

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

StroPellGas - Nachhaltiger Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Charakterisierung der Strohpellets und verfahrenstechnische und ökobilanzielle Bewertungen

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement,
Fachgebiet NEUTec,
Rudolf-Diesel-Straße 12, 37075 Göttingen

Teilvorhaben 2: Sozioökonomische Bewertung

Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften,
Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung,
Management der Agrar- und Ernährungswirtschaft
Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen

Teilvorhaben 3: Praxisversuche

Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Eigenbetriebe,
Carl-Sprengel-Weg 1, 37075 Göttingen

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22041518

Teilvorhaben 2: 2219NR075

Teilvorhaben 3: 2219NR101

Laufzeit:

01.08.2019 bis 31.03.2023

Monat der Erstellung:

06/2023

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

I.	Kurzbericht	8
1.	Aufgabenstellung	8
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	8
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse.....	9
a.	Arbeitspakete und Meilensteine	9
b.	Zusammenfassung.....	13
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	15
1.	Charakterisierung von Strohpellets	15
1.1	Pelletherstellung.....	15
1.2	Form, Größe und Beschaffenheit der Pellets	16
1.3	Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS)	17
1.4	Schüttdichte	18
1.5	Auflöseverhalten	19
1.6	Partikelgrößenverteilung	20
1.7	Nährstoffgehalte.....	21
1.8	C/N Verhältnis	22
1.9	Pentosangehalt	22
1.10	Heizwert	22
1.11	Erweiterte Weender Futtermittelanalytik.....	22
2.	Batch - Gasertragstest.....	23
2.1	Bestimmung des Gasertragspotentials	23
2.2	Methanbildungskinetik.....	24
2.3	Biogas- und Methanertragspotenzial	25
3.	Herstellung von Strohpellets im Technikum	26
4.	Entwicklung und Bau einer Technikums-Versuchsanlage	27
5.	Kontinuierliche Technikumsversuche	28
5.1	Material und Methoden der kontinuierlichen Gärtests	28
5.2	Ergebnisse der kontinuierlichen Technikumsversuche aus Versuchsphase 1 und 2.....	31
5.3	Vergleichende Untersuchungen zum Einsatz von Strohpellets und Häckselstroh, Versuchsphase 3	35
5.4	Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche	35
5.5	Modell für die Prognose des TS-Gehalts im Gärrest.....	41
6.	Versuche an der Praxisanlage	43
6.1	Durchführung der Praxisversuche	43
6.2	Wissenschaftliche Begleitung der großtechnischen Praxisversuche	45
7.	Sozioökonomische Bewertung	51
7.1	Material und Methoden	52
7.1.1	Literaturrecherche und -analyse	52

7.1.2	Szenarientwicklung	52
7.1.3	Ökonomische Bewertung	52
	Ermittlung des Gleichgewichtspreises für Strohpellets	58
7.1.4	Akzeptanzstudie	59
	Studiendesign – Pelletier und Pelletvermarkter - Befragung	59
	Studiendesign – Biogasanlagenbetreiber - Befragung	59
	Methoden zur Analyse der Befragungsdaten:	60
7.2	Ergebnisse	61
7.2.1	Literaturanalyse	61
7.2.2	Ökonomische Bewertung	64
7.3	Akzeptanzstudie	74
7.3.1	Deskriptive Ergebnisse der Befragung von Pelletierern und Pelletvermarktern	74
7.3.2	Deskriptive Ergebnisse der Befragung von landw. Biogasanlagenbetreibern*innen	76
7.3.4	Zahlungsbereitschaft für Strohpellets	78
7.4	Fazit und Handlungsempfehlung des AP 2	81
8.	Ökobilanzielle Bewertung des Strohpelleteinsatzes als Biogassubstrat	84
8.1	Material und Methoden	84
8.2	Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung der Strohpelletbereitstellung	88
8.2.1	Umweltwirkungspotenziale der Stroh- und Strohpellet-Prozessketten	88
8.2.2	Emissionen der Strohpelletbereitstellung mit unterschiedlichen Pelletierverfahren	88
8.2.3	Allokationsmethode für den Getreideanbau und die Strohbereitstellung	89
8.2.4	Sensitivitätsanalyse der Stroh- und Pelletlogistik	91
8.3	Wirkungsabschätzung der verschiedenen Biogaserzeugungs-Szenarien	92
8.3.1	Ergebnisse der Szenarien mit unterschiedlicher Strohpelletbereitstellung	92
8.3.2	Anteil der Strohpelletbereitstellung an den Gesamtemissionen der einzelnen Szenarien und Umweltwirkungskategorien	98
8.4	Zusammenfassung der ökobilanziellen Bewertung	99
III.	Verwertung	101
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	101
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	101
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	101
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	102
IV	Erkenntnisse von Dritten	103
V	Veröffentlichungen	103
	Literaturverzeichnis	105
ANHANG	116
	Teilvorhaben 1: Charakterisierung der Strohpellets und verfahrenstechnische und ökobilanzielle Bewertungen	116
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	116
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	116
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	117
	Teilvorhaben 2: Sozioökonomische Bewertungen	119

1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	119
2.	Bearbeitete Arbeitspakete.....	119
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	119
	Teilvorhaben 3: Praxisversuche	121
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	121
2.	Bearbeitete Arbeitspakete.....	121
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mobile Pelletherstellung auf dem Feld	Abbildung 1b: Pellets aus mobiler Pressung	15
Abbildung 2: Teilmobile Pelletherstellung	Abbildung 2 b: Pellets aus teilmobiler Pressung	15
Abbildung 3: Vier Strohpellets aus Weizen-, Roggen- und Gerstenstroh; mit unterschiedlichen Pressverfahren hergestellt		17
Abbildung 4: TS- und oTS-Gehalte von Stroh und den daraus gepressten Strohpellets		18
Abbildung 5: Schüttdichte von Strohpellets und Stroh		18
Abbildung 6: Auflöseverhalten der Weizenstrohpellets P2 und P4 in Wasser		19
Abbildung 7: Auflöseverhalten der Strohpellets P2 und P4 in Gärrest		20
Abbildung 8: Partikelgrößenverteilung in Strohpellets		20
Abbildung 9: Nährstoffgehalte in Strohpellets und im Vergleich dazu in Maissilage		21
Abbildung 10: Erweiterte Weender Futtermittelanalytik von Stroh, Pellets und Pelletrest nach der Vergärung		23
Abbildung 11: Klimakammer mit PET-Fässern und Gasfolienbeuteln		23
Abbildung 12: Biogasmessgerät und Trommel-gaszähler zur Bestimmung der Biogasqualität und -quantität		23
Abbildung 13: Methanertragskurve von Strohpellets aus mobiler und teilmobiler Pressung und Stroh		24
Abbildung 14: Methanertragskurve von Strohpellets (Eigenproduktion HAWK) und Stroh		24
Abbildung 15: Methan- und Biogaserträge der Pelletproben P2 bis P11		26
Abbildung 16: Pelletieranlage im Technikum der HAWK		26
Abbildung 17: Hammermühle zur Vorzerkleinerung des Strohs aus Strohballen		26
Abbildung 18: Strohpellets PI 1 und PI 2, eigene Herstellung		27
Abbildung 19: a) 10-zügige Versuchsanlage, b) Rührwerk für hohe TS-Gehalte, c) Fermenteransicht		28
Abbildung 20: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V1 und V2		31
Abbildung 21: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V3 und V4		31
Abbildung 22: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V5		32
Abbildung 23: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V6 und V7		32
Abbildung 24: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V8 und V10		33
Abbildung 25: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, TS-Gehalt		36
Abbildung 26: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, oTS-Gehalt		37
Abbildung 27: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, C/N-Verhältnis		38
Abbildung 28: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, FOS/TAC		38
Abbildung 29: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, pH-Wert		39
Abbildung 30: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, Leitfähigkeit		39
Abbildung 31: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, NH ₄ -N		40
Abbildung 32: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, Schwefel-Gehalt		40
Abbildung 33: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, Chlor-Gehalt		41
Abbildung 34: Berechnung der Biogasdichte in Abhängigkeit vom Methangehalt		42
Abbildung 35: qualitative Auswertung des Wasserbedarfs unterschiedlicher Substrate für die Umsetzung zu Biogas		43
Abbildung 36: Lagerung von Strohpellets auf Siloplatte		44
Abbildung 37: Strohpellets im Vergleich zu Häckselstroh		44
Abbildung 38: Fütterungsmanagement Hauptfermenter und Nachgärer Versuchsphase 1, Basis: erwarteter Methanertrag		46

Abbildung 39: Fütterungsmanagement Hauptfermenter und Nachgärer Versuchsphase 2, Basis: erwarteter Methanertrag	47
Abbildung 40: Entwicklung TS-Gehalt für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate	47
Abbildung 41: Entwicklung oTS-Gehalt für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate	48
Abbildung 42: Entwicklung C/N-Verhältnis für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate	48
Abbildung 43: Entwicklung Leitfähigkeit für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate	49
Abbildung 44: Entwicklung FOS/TAC für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA)	49
Abbildung 45: Entwicklung pH für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA), sowie Schweinegülle (SG)	50
Abbildung 46: Entwicklung Anteil NH ₄ -N für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA), sowie Substrate	50
Abbildung 47: Entwicklung Anteil o-Phosphat für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA), sowie Substrate	51
Abbildung 48: Stromaufnahme Rührwerk Hauptfermenter Relliehausen, Versuchsphase 2	51
Abbildung 49: Arbeitsschritte im Bereich der Sozioökonomischen Bewertung	52
Abbildung 50: Teil-mobile und mobile Pelletierung mit einer Krone Premos	53
Abbildung 51: Steilförderschnecke und Rohförderschnecke	55
Abbildung 52: Prozesskette der Biogaserzeugung aus Strohpellets	64
Abbildung 53: Strohpreise nach Jahren und Region	65
Abbildung 54: Mehrkosten des Strohpelleteinsatzes nach Szenarien (€/kWh Strom)	70
Abbildung 55: Transportkosten von Substraten in Abhängigkeit von der Entfernung	71
Abbildung 56: Lagerrente in €/ha bei Vollkostendeckung der Biogaserzeugung	72
Abbildung 57: Herstellungskosten pro Tonne Strohpellets (ohne Rohstoffkosten) (n=13)	74
Abbildung 58: Kostenaufteilung des Pelletierprozesses nach Pelletiertechnik (n=12)	75
Abbildung 59: Vermarktungsanteil nach Preisgruppen	75
Abbildung 60: Alternativsubstrate zu Mais und Getreidekorn	78
Abbildung 61: Ergebnis der Strukturgleichungsmodellierung	80
Abbildung 62: Substratzusammensetzung der Szenarien sowie die Trockensubstanzgehalte der Substratmixe und der daraus resultierenden Gärreste	85
Abbildung 63: Systemgrenze der modellierten Szenarien	86
Abbildung 64: Systemgrenze der Bereitstellung von Strohpellets anhand der drei Verfahren: mobile Pelletierung, teil-mobile Pelletierung und stationäre Pelletierung	87
Abbildung 65: Emissionspotenziale der untersuchten Prozessketten verschiedener Pelletierverfahren in der Kategorie Klimawandel	89
Abbildung 66: Verteilung der Emissionen des Getreideanbaus auf das Stroh und das Getreide anhand unterschiedlicher Allokationsmethoden	90
Abbildung 67: Treibhausgasemissionen der Prozesskette zur mobilen Pelletierung mit verschiedenen Allokationsmethoden des Getreideanbaus	90
Abbildung 68: Treibhausgasemissionen für verschiedene Bereitstellungsprozessketten der Pellets und Entfernungen des Pellet-Transports	91
Abbildung 69: Änderung der Treibhausgasemissionen durch Variation der Transportentfernung der Strohpellets	91
Abbildung 70: Änderung der Treibhausgasemissionen durch Variation der Transportentfernung der Strohballen	92

Abbildung 71: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Klimawandel.....	93
Abbildung 72: Fossiler Ressourcenverbrauch der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade	94
Abbildung 73: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Partikelemissionen.....	95
Abbildung 74: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Versauerungspotenzial.....	95
Abbildung 75: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie frischwasserbezogene Ökotoxizität.....	96
Abbildung 76: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie frischwasserbezogene Eutrophierung.....	97
Abbildung 77: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Humantoxizität	97
Abbildung 78: Einsparungen an Treibhausgasemissionen und fossilen Ressourcenverbrauch durch eine veränderte Gärrestlogistik der Szenarien S4 sowie S13-S14 im Vergleich zu den Basisszenarien.....	98
Abbildung 79: Anteil der Strohpelletbereitstellung an den Emissionen der einzelnen Szenarien	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Form, Aussehen und Beschaffenheit der untersuchten Strohpellets	16
Tabelle 2: Methan- und Biogaserträge von Stroh und Strohpellets	25
Tabelle 3: Form, Aussehen und Beschaffenheit der im Technikum hergestellten und zugekaufter Strohpellets	27
Tabelle 4: Frequenz der Analysen für die untersuchten Parameter	29
Tabelle 5: Varianten der im kontinuierlichen Betrieb untersuchten Substratmischungen , Versuchsphase 1 und Versuchsphase 2	30
Tabelle 6: Varianten der im kontinuierlichen Betrieb untersuchten Substratmischungen, Versuchsphase 3	30
Tabelle 7: Überblick Ergebnisse kontinuierliche Technikumsversuche Phase 1	34
Tabelle 8: Überblick Ergebnisse kontinuierliche Technikumsversuche Phase 2	35
Tabelle 9: Methanertragspotentiale für großtechnische Versuche.....	46
Tabelle 10: Prozessschema mobile Pelletierung	54
Tabelle 11: Szenarien der Wirtschaftlichkeitsanalyse	56
Tabelle 12: Entfernungen und Kosten bei der Substratbeschaffung und Gärrestausbringung	57
Tabelle 13: Produktionskosten für Strohpellets	62
Tabelle 14: Ergebnisse der Zeiterfassung bei der teilstationären Pelletierung aus Quaderballen	65
Tabelle 15: Ergebnisse der Zeiterfassung bei der mobile Pelletierung von Weizenstroh	66
Tabelle 16: Ermittlung der Strohpelletkosten frei Biogasanlage	67
Tabelle 17: Stromverbrauch je Einzelsubstrat in kWh/t	68
Tabelle 18: Zeitaufwand Fütterung nach Substraten	68
Tabelle 19: Unterschiede Basisszenario zum Szenario mit Strohpelleteinsatz	69
Tabelle 20: Gleichgewichtspreis in Abhängigkeit von Maissilage und den Gärrestverbringungskosten	73
Tabelle 21: Pelletierverfahren - Leistungsdaten.....	74
Tabelle 22: Installierte el. Leistung und Höchstbemessungsleistung nach Größenklasse	76
Tabelle 23: Zahlungsbereitschaft der befragten Biogasanlagenbetreibern*innen für Strohpellets	78
Tabelle 24: Modellierte Szenarien der unterschiedlichen Substratmischungen	86
Tabelle 25: Verwendete Wirkungskategorien nach ReCiPe 2016 zur Beurteilung der Umweltwirkungen	87

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben StroPellGas – Nachhaltiger Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung wurde im Zeitraum vom 1.8.2019 bis zum 30.03.2023 bearbeitet. Das Gesamtziel des Vorhabens war die Entwicklung, Bewertung und Validierung von anwendungsgerechten Nutzungskonzepten für den nachhaltigen Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung.

Getreidestroh ist ein Reststoff mit großem, ungenutztem Potenzial. Mit Blick auf die Biogaserzeugung könnten bei der Substitution von Maissilage durch Stroh bis zu 30 % des Substratbedarfs durch dieses Koppelprodukt der Getreideproduktion gedeckt werden. Ein zunehmender Einsatz von Stroh in Biogasanlagen kann so den zum Teil negativen Auswirkungen des hohen Maisanbaus in Deutschland entgegenwirken. In der Vergangenheit gab es bereits verschiedene Ansätze, Stroh durch Verbrennung oder nach einer Vorbehandlung zum Aufschluss der Lignocellulosestruktur (z. B. Mahlen, Aufschluss per Extruder, Hydrolyse, Schneidpumpe, etc.) in Biogasanlagen energetisch zu nutzen. Eine breite Anwendung findet aber bisher nicht statt, da der erzielte Mehrertrag den Mehraufwand oft nicht trägt (Reinhold et al. 2014). Einen neueren Ansatz stellt die Verwendung von pelletiertem Stroh dar. Die Pelletierung und vorgeschaltete Zerkleinerung des Strohs stellt zunächst einen größeren energetischen und finanziellen Aufwand dar, bietet aber eine ganze Reihe von Vorteilen gegenüber bisherigen Ansätzen zur Nutzung von Stroh in Biogasanlagen.

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine anwendungsorientierte Bewertung des Einsatzes von Strohpellets in Biogasanlagen unter Berücksichtigung der Verfahrenstechnik, der Prozessbiologie und der Nachhaltigkeit durchgeführt. Es wurden Anwendungsszenarien auf Basis des aktuellen Wissensstandes erstellt und zur Anwendungsreife weiterentwickelt. Zum Ende des Vorhabens wurde eine Handreichung, die Biogasanlagenbetreibern umfassende Informationen zur Nutzung von Strohpellets liefert, erstellt.

Im Forschungsvorhaben wurden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Weiterentwicklung von Anwendungsszenarien auf Basis des aktuellen Wissensstandes
- Bewertung und Validierung der Szenarien zum nachhaltigen Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung in Technikumsversuchen und in der landwirtschaftlichen Praxis unter Einbeziehung technischer, sozioökonomischer und ökologischer Aspekte,
- Detaillierte Bewertung der Nachhaltigkeit der weiterentwickelten Szenarien mit den drei Schwerpunkten soziale, ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit,
- Erstellung von praxistauglichen Nutzungskonzepten aus den weiterentwickelten Szenarien,
- Erstellen von Handlungsempfehlungen zum Projektende

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben „StroPellGas - Nachhaltiger Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung“ gliederte sich in die Arbeitspakete Charakterisierung von Strohpellets AP 1, Sozioökonomische Bewertung AP 2, Ökobilanzielle Bewertung AP 3, Handlungsempfehlungen AP 4 und die Projektkoordination AP 5.

Im Arbeitspaket Charakterisierung von Strohpellets lag der Fokus auf der Bewertung der Eignung von Strohpellets für den Einsatz in Biogasanlagen. Neben der Beurteilung der chemisch-physikalischen Eigenschaften der Pellets wurden praktische Versuche zur Pelletierung und Vergärung der Pellets durchgeführt. Die Vergärung erfolgte im großtechnischen und im Technikums-Maßstab.

Die großtechnischen Versuche fanden an der Biogasanlage der Eigenbetriebe der Universität Göttingen in Relliehausen statt. Die Versuche wurden durch die HAWK Göttingen analytisch begleitet. Zudem erfolgten die Auswertung des Betriebstagebuchs zum Gasertrag und eine Erfassung der Leistungsdaten der Frequenzumrichter der Rührwerke.

Für die Vergärung im Technikumsmaßstab wurde eine Versuchsanlage mit 10 Fermentern geplant und errichtet. Auf Basis der Untersuchung der eingesetzten Materialien und Abbauuntersuchungen aus Vorversuchen wurden Modelle erstellt, deren Validierung auf Basis der praktischen Untersuchungen erfolgte.

Die Ergebnisse der Modellbildung wurden im Rahmen von Fallbeispielen in den Arbeitspaketen AP 2, sozioökonomische Bewertung und AP 3, ökobilanzielle Bewertung verwertet.

Im Rahmen der sozioökonomischen Bewertung in AP 2 wurden auf Basis der ermittelten Daten aus den Arbeitspaketen 1 und 3, weiteren Datenerhebungen und Literaturdaten eine ökonomische Bewertung des Strohpelleteinsatzes in Biogasanlagen auf Basis einer Prozesskostenbetrachtung und der Ermittlung von Lagerenten für Strohpellets vorgenommen. Darüber hinaus wurde die Akzeptanz von Biogasanlagenbetreibern*innen gegenüber dem Einsatz von Strohpellets in der Biogaserzeugung im Rahmen einer ausführlichen Akzeptanzstudie untersucht.

Das Bearbeiten von AP 2.1 fand in enger Abstimmung mit der ökobilanziellen Bewertung in AP 3 statt, um die Systemgrenzen in den beiden Arbeitspaketen vergleichbar zu definieren und eine Vergleichbarkeit verschiedener Szenarien hinsichtlich der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit der Verwendung von Strohpellets als Gärsubstrat in Biogasanlagen zu schaffen.

In der ökobilanziellen Bewertung wurden die Umweltwirkungen der entwickelten Szenarien der Nutzung von Strohpellets in Biogasanlagen ermittelt und miteinander verglichen. Dazu erfolgte die Erstellung von Ökobilanzen in Anlehnung an die Normen ISO14040 und 14044 mittels GaBi, einer Software der Firma Sphera Ltd. Zur Modellierung der Wertschöpfungsketten und zur Bilanzierung der verschiedenen Szenarien wurden zum einen ermittelte Daten aus den Technikums- und Praxisversuchen aus AP 1 und zum anderen Literaturdaten sowie Daten aus den vorhandenen Datenbanken von GaBi und ecoinvent genutzt.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a. Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP1 Charakterisierung von Strohpellets	08/2019 bis 03/2023	Die Eignung von Strohpellets als Biogassubstrat konnte erfolgreich untersucht werden. Dazu wurden elf Strohpelletproben aus mobiler, teil-mobiler und stationärer Pressung und zwei Proben aus Pelletierversuchen im Technikum der HAWK charakterisiert. Anhand von chemisch-physikalischen Analysen und Batchversuchen konnten wichtige Parameter wie der Trockensubstanzgehalt, die Lagerfähigkeit, der Einfluss der Partikelgrößen auf die Biogasbildung und das Auflöseverhalten beschrieben und bewertet werden. Außerdem lieferte die Ermittlung des Methan- und Biogasbildungspotenzials von Stroh und Strohpellets Ergebnisse, welche anschließend als Grundlage für quasikontinuierliche Versuche mit Strohpellets als Co-Substrat sowie für die ökonomische und ökobilanzielle Bewertung genutzt wurden. Auf Basis von Versuchen mit Strohpellets in der Praxisbiogasanlage Relliehausen konnten Aussagen zur Stromaufnahme und zum Einsatz unterschiedlicher Substratmischungen getroffen werden.
AP 2 Sozioökonomische Bewertung	08/2019 bis 03/2023	Die Literaturrecherche wurde im Wesentlichen zu Projektbeginn durchgeführt. Im Laufe der Projektlaufzeit wurden darüber hinaus weitere neue Quellen berücksichtigt, um die Aktualität der Ergebnisse sicherzustellen. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden zehn Szenarien als Basis für die Technikumsversuche entwickelt, die einen repräsentativen Substrat-Mix für verschiedene Anlagentypen in Deutschland darstellen sollen. Für die Analysen zur Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit von Strohpellets wurde festgelegt, dass mobile, teil-mobile als auch stationäre Pelletierverfahren bei verschiedenen Transportentfernungen betrachtet werden sollen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im AP 2.1 erfolgte anhand der kompletten Prozesskette von der Strohpelletbeschaffung über die Vergärung bis hin zur Gärrestlagerung und -verbringung. Hierfür wurden zunächst Daten bzgl. der einzelnen Prozessstufen zur Generierung von Annahmen erhoben (mobile und teil-mobile Pelletierung,

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>Fütterung und Einbringung von Strohpellets). Anschließend erfolgte eine exemplarische Vollkostenbetrachtung für die definierten Szenarien, um die Gewinnänderung in Cent pro kWh Strom zu ermitteln. Die Berechnung der Lagerenten wurde für Silomais, GPS-Getreide (als Referenzsubstrate) sowie Roggen- und Weizenstroh solo und in Koppelnutzung durchgeführt. Über alle Berechnungen hinweg konnte die mobile Pelletierung als wirtschaftlichste Variante der Strohpelletnutzung bestimmt werden. Um Praktikern eine gute Orientierung über die Preiswürdigkeit von Strohpellets zu geben, wurden Gleichgewichtspreise zu Silomais auf Basis des Methanertrages pro Tonne Frischmasse unter Berücksichtigung des Gärrestanfalls und des Gärrestlagerraumbedarfs ermittelt. Soweit möglich und vorhanden, wurden Ergebnisse aus den Technikumsversuchen und den großtechnischen Versuchen in die Kalkulationen einbezogen und durch Literaturdaten ergänzt.</p> <p>Im Frühjahr 2021 wurde eine Befragung von Betreibern landwirtschaftlicher Biogasanlagen zur Untersuchung der Akzeptanz von Strohpellets als Biogassubstrat durchgeführt, die 309 auswertbare Beobachtungen hervorbrachte. Als Grundlage für den Fragebogen diente die Unified Theorie of Acceptance and Use of Technology 2 (UTAUT 2). Gemäß der Projektbeschreibung wurden die Daten zunächst deskriptiv ausgewertet. Es konnte festgestellt werden, dass Strohpellets aktuell keine Rolle als Biogassubstrat in der Praxis spielen und Anlagenbetreiber nur einen geringen Kenntnisstand zu den Vergärungseigenschaften dieser haben. In einer weiterführenden Studie, die über die Vorhabenbeschreibung hinausgeht, wurden die Daten einer Faktoren- und Clusteranalyse unterzogen und die Ergebnisse im Journal <i>Energies</i> veröffentlicht. Anhand der Intention zur Nutzung von Strohpellets wurden die Anlagenbetreiber kategorisiert und vier Cluster gebildet. Abschließend wurden anhand der Befragungsdaten ein Strukturgleichungsmodell geschätzt und erste Ergebnisse im Rahmen der europäischen Biogastagung im Mai 2022 vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Anlagenbetreiber in ihrer Intention zur Nutzung von Strohpellets insbesondere in ihrer Risikobereitschaft und ihrem Innovationsverhalten unterscheiden. Darüber hinaus spielt insbesondere das Kosten-Nutzen-Verhältnis eine wichtige Rolle. Ergebnis-Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Poster- und Journalbeiträgen und als Praxisvorträge sind erfolgt und im Kapitel „Veröffentlichungen“ aufgeführt. Aus beiden Studien zusammen wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet, die im Fazit des AP 2 detailliert dargestellt sind.</p>
AP 3 Ökobilanzielle Bewertung	08/2019 bis 03/2023	Für die ökobilanzielle Bewertung wurden Szenarien entwickelt und Sachbilanzen erstellt. Es erfolgte eine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>Abschätzung der Umweltwirkung in den entsprechenden Umweltwirkungskategorien. Außerdem wurde der Strohpelleteinsatz in der Praxisbiogasanlage Relliehausen ökobilanziell bewertet. Insgesamt konnten dadurch das Emissionsminderungspotenzial für unterschiedliche Substratmixe evaluiert und die Emissionspotenziale der Prozessketten zur Substratversorgung mit Strohpellets analysiert werden. Mithilfe von Prozess- und Parametervariationen wurden dabei die Einflussfaktoren hinsichtlich potentieller Hotspots sowie den logistischen Rahmenbedingungen untersucht. Es zeigte sich, dass je nach Substratmix und Bereitstellungskette der Strohpellets Emissionsminderungen im Vergleich zum Ausgangs-Substratmix ohne Strohpellets erreicht werden können. Maßgebliche Parameter sind sowohl die gewählte Pelletier-Technik und die Energieform zur Herstellung der Pellets als auch die Transportentfernungen der Stroh- und Pelletbereitstellung sowie die Gärrestlogistik. Zudem konnte gezeigt werden, dass im Substratmix die Einsatzmenge von Wirtschaftsdünger die Gesamtemissionen stark beeinflusst und die Bandbreite in den jeweiligen Wirkungskategorien groß war.</p>
AP 4 Handlungsempfehlungen	02/2020bis 03/2023	<p>Am 01.03.2023 wurde ein Webinar mit der Veröffentlichung der gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse zum Einsatz von Strohpellets durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Handlungsempfehlung mit den gewonnenen Erkenntnissen für den praktischen Einsatz von Strohpellets als Biogassubstrat erstellt und ab 15.Juli 2023 zur freien Verfügung online gestellt https://neutec.hawk.de/de/ueber-uns/aktuelles.</p>
AP 5 Projektkoordination	08/2019 bis 03/2023	<p>Die Projektkoordination, Organisation von Projekttreffen, Koordination und Erstellen von Publikationen sowie der Zwischen- und-Endberichte erfolgte gemäß Darstellung im Projektantrag.</p>

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1.1	01/2022	Die Literaturrecherche ist abgeschlossen
M 1.2	04/2020	Die Szenarien sind festgelegt
M 1.3	12/2021	Die Bewertung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der hergestellten Pellets ist abgeschlossen, relevante Parameter für weitere Analysen sind festgelegt.
M 1.4	07/2022	Pelletierungsversuche sind abgeschlossen.
M 1.5	12/2020	Entwicklung und Bau der Versuchsanlage sind abgeschlossen.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1.6	09/2021	Die kontinuierlichen Versuche für die Szenarien Ackerbauregion sind abgeschlossen.
M 1.7	08/2022	Die kontinuierlichen Versuche für die Szenarien Veredelungsregion sind abgeschlossen. Eine Rezirkulierung wurde nicht durchgeführt, da dies zu einer Akkumulation der schwer oder nicht abbaubaren Anteile in den Versuchsfermenter geführt hätte. Damit wäre der TS-gehalt weiter angestiegen, was zu weiteren Prozessstörungen geführt hätte.
M 1.8	04/2020	Phase I der Praxisversuche ist abgeschlossen.
M 1.9	07/2022	Phase II der Praxisversuche ist abgeschlossen.
M 1.10	07/2021	Die Auswertung der quasikontinuierlichen Versuche für die Szenarien Ackerbau ist abgeschlossen.
M 2.1	02/2020 + fortlaufend	Die Literaturrecherche ist abgeschlossen.
M 2.2	04/2020	Die Szenarientwicklung ist abgeschlossen.
M 2.3	04/2022	Die Prozesskostenrechnung als Vollkostenrechnung anhand der Prozesskette sowie die Lagerentenermittlung wurde mit Projektende abgeschlossen.
M 2.4	09/2021	Die Akzeptanzstudie wurde im Frühjahr 2021 durchgeführt und anschließend ausgewertet. Dies ist abgeschlossen.
M 2.5	08/2021	Die Zwischenauswertung der Ergebnisse für die ersten Handlungsempfehlungen wurde abgeschlossen.
M 3.1	01/2020	Die Szenarientwicklung ist abgeschlossen.
M 3.2	03/2021	Die GaBi-Modelle für alle Szenarien sind erstellt. Erste Emissionsberechnungen konnten durchgeführt werden und die ersten Ergebnisse aus den ökonomischen Überlegungen sind in das Modell eingeflossen.
M 3.3	04/2022	Die Ökobilanzierung ist abgeschlossen und die finalen Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien liegen vor.
M 3.4	04/2022	Die Ökobilanzierung für die Praxisbiogasanlage ist abgeschlossen.
M 4.1	01/2021	Aufgrund (auch Corona-bedingter) Verzögerungen im Projekt konnten die ersten Handlungsempfehlungen nicht herausgegeben werden, der entsprechende Meilenstein wurde mit M 4.2 zusammengelegt.
M 4.2	06/2023	Zu Projektende liegt eine etwa 20-seitige Handlungsempfehlung vor mit Kennzahlen, Informationen und einer Charakterisierung von Strohpellets sowie mit Berechnungshilfen und Anwendungsbeispielen für landwirtschaftliche Biogasanlagen in der Praxis.
M 4.3	03/2023	Ein Webinar zur Vorstellung der Ergebnisse wurde am 01.03.2023 mit ca. 150 Teilnehmern online durchgeführt.
L 5.1	09/2020	Zwischenbericht 1 ist erstellt
L 5.2	07/2021	Zwischenbericht 2 ist erstellt

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
L 5.3	07/2022	Zwischenbericht 3 ist erstellt
L 5.4	06/2023	Abschlussbericht ist fertig gestellt
L 5.5	06/2023	Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften
M 5.6	03/2023	Erfolgreicher Abschluss des Forschungsprojektes.

b. Zusammenfassung

Ziel des hier beschriebenen Forschungsvorhabens war es, den Einsatz von Strohpellets als alternatives (Co-) Substrat zur Biogaserzeugung im Rahmen von Technikums- und Praxisversuchen zu evaluieren, die technische und ökonomische Machbarkeit sowie die Nachhaltigkeit zu bewerten und daraus Handlungsempfehlungen für Anlagenbetreiber abzuleiten.

Zu Projektbeginn erfolgte neben der Literaturanalyse ein gemeinsames Brainstorming der Projektpartner zum Einsatz von Strohpellets in der Biogaserzeugung. Dies diente zum einen der Überprüfung des Status Quo aus der Vorhabensbeschreibung, zum anderen wurden zehn Szenarien als Grundlage für die Technikumsversuche zur Vergärung von Strohpellets und für die ökonomische sowie ökobilanzielle Bewertung festgelegt.

Eine umfassende Charakterisierung von Strohpellets konnte zeigen, dass sich diese gut als Biogassubstrat eignen. Sie weisen hohe Trockensubstanzgehalte (TS) und oTS Gehalte und Schüttdichten von 557 kg/m³ auf, was eine hohe Energiedichte und gute Lager- und Transportwürdigkeit gewährleistet. Jedoch sind durch die hohen TS-Gehalte mögliche Einflüsse auf den Wassergehalt und die Rührfähigkeit im Fermenter zu beachten. Ebenso wiesen Strohpellets ein sehr weites C:N-Verhältnis von 88:1 auf. Es konnte gezeigt werden, dass sich Strohpellets sehr gut in Wasser auflösen. Im Fermenter ist das Auflösungsverhalten von dessen Viskosität und TS-Gehalt abhängig. Die Viskosität kann durch den Pentosangehalt der Strohpellets beeinflusst werden. Die Partikelgrößen in den Pellets sind vom Pressverfahren abhängig und hatten einen Einfluss auf die Methanbildungskinetik. Der Methanertrag belief sich auf 251 L_N/kg Frischmasse bei Strohpellets und war damit doppelt so hoch wie bei Maissilage.

Sowohl die großtechnischen Versuche als auch die kontinuierlichen Versuche im Technikum haben gezeigt, dass Strohpellets ein geeignetes Alternativsubstrat darstellen, um den Substratmix von Biogasanlagen in Deutschland zu ergänzen. Die Fütterung der Pellets ist relativ einfach möglich und bei den untersuchten Konzentrationen und Zeiträumen konnten stabile Betriebszustände hergestellt werden.

Der Einsatzanteil von Strohpellets im Gesamtsubstrat-Mix sollte nicht zu hoch gewählt werden und eine Prognose des zu erwartenden TS-Gehalts im Fermenter vorab erfolgen, um sicherzustellen, dass der Fermenterinhalt rührfähig bleibt. Als besonders günstig hat sich die Co-Vergärung mit Substraten erwiesen, die sich neben einem hohen Wassergehalt durch einen hohen zu erwartenden oTS-Abbaugrad auszeichnen. Hier ist in erster Linie die Zuckerrübe zu nennen. Bei hohen Anteilen von Rindergülle konnten in den kontinuierlichen Technikumsversuchen die auf Basis der Batchversuche prognostizierten Methanmengen nicht erreicht werden. Bei den meisten anderen Varianten stimmten die in den kontinuierlichen Technikumsversuchen ermittelten Methanerträge nahezu mit den Prognosewerten überein. Es wurde ein Prognosetool zur Abschätzung des TS-Gehalts im Fermenter entwickelt. Die hieraus berechneten Werte zeigten gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der kontinuierlichen Versuche im Technikum. Zieht man allerdings die Auswertungen des Biogasmessprogramms III (FNR,2021) für einen Vergleich heran, so ergeben sich zum Teil deutliche Abweichungen zu den Praxisdaten. Diese Abweichungen sollten bei der Anwendung des Tools in der Praxis berücksichtigt werden, ggf. durch entsprechende Korrekturfaktoren.

Die ökonomische Bewertung hat gezeigt, dass Strohpellets unter gewissen Voraussetzungen wie hohen Substratkosten, Substratknappheit und knappem Lagerraum für Gärrest eine gute Ergänzung für den Substratmix von Biogasanlagen darstellen können. Die Wirtschaftlichkeit des Strohpelleteinsatzes hängt dabei wesentlich von den Beschaffungs- bzw. Herstellungskosten ab. Das noch relative neue, mobile Pelletierverfahren, bei dem direkt aus dem Strohschwad auf dem Feld pelletiert wird, hat sich nach den Erkenntnissen aus diesem Projekt als am kostengünstigsten erwiesen und bietet zudem – zumindest bei dem im Rahmen des Projekts eingesetzten Maschinenmodellen - die Möglichkeit teil-mobil aus Quaderballen pelletieren zu können. Die Prozesskostenbetrachtung anhand der Szenarien hatte zum Ziel die Gewinnänderung zwischen dem Basisszenario und dem jeweiligen Szenario mit Strohpellets (Maisersatz durch Strohpellets bis zu einem max. TS-Gehalt im Gärrest von rechnerisch 10 %) unter Berücksichtigung der Gärrestverbringungs- und -

lagerkosten sowie der Veränderung des Eigenstrombedarfs zu ermitteln. Unter günstigen Voraussetzungen bei der Pelletbeschaffung konnte aufgrund der Reduzierung der durchschnittlichen Substratkosten eine minimale Gewinnsteigerung im Vergleich zum Basisszenario ermittelt werden. Dies setzt jedoch die Annahme voraus, dass die Nährstoffe der Strohabfuhr über den Gärrest zurückgeführt werden und entsprechend nicht monetär bewertet werden. Bei Verwendung der teil-mobilen Pelletierung und insbesondere bei Verwendung von Pellets aus Zukaufstroh, bei dem die Nährstoffentzugskosten und der Gewinn des Strohverkäufers enthalten, nimmt die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung in allen Szenarien mit steigender Pelletmenge im Substratmix ab, da die Mehrkosten für die Strohpellets sowie der höhere Eigenstrombedarf die Kosten Einsparungen bei den Gärrestaustausbring- und lagerkosten überlagern. Zu guter Letzt wurden Gleichgewichtspreise von Strohpellets ermittelt, die zeigen, dass diese insbesondere bei hohen Gärrestverbringungskosten und hohen Substratpreisen an Bedeutung gewinnen können, da der Grenzpreis oberhalb der realisierbaren Pelletierkosten liegt. Dies gilt nicht nur im Vergleich zum Substrat Silomais, sondern insbesondere auch im Vergleich zu Getreidekorn, das nach wie vor von vielen Anlagenbetreibern als Substrat eingesetzt wird und in den letzten drei Jahren verhältnismäßig teuer im Zukauf war.

Die Lagerenten haben gezeigt, dass bei Strohpellets im Vergleich zu etablierten Substraten wie Silomais und GPS-Getreide aufgrund der höheren Transportwürdigkeit längere Transportstrecken realisiert werden können. Unter Annahme der Vollkostendeckung wird bis zu Entfernungen zwischen 50 km und 80 km bei mobil hergestellten Pellets eine positive Lagerente realisiert. Dies kann insbesondere vor dem Hintergrund eines Austausches von Strohpellets gegen Gärrest zwischen Biogasanlagen in Veredelungsregionen (Überschuss an org. Düngern) mit landwirtschaftlichem Betrieb in Ackerbauregionen (Überschuss an Stroh) praxisrelevant sein.

Im Rahmen einer Akzeptanzstudie konnte gezeigt werden, dass Strohpellets aktuell keine Bedeutung als Biogassubstrat in der Praxis haben und aktuell ein geringer Wissensstand über die Vergärungseigenschaften und die Preiswürdigkeit von Strohpellets im Vergleich zu etablierten Substraten vorliegt. Da ein mangelndes Wissen und eine geringe Verfügbarkeit an Information über die jeweilige Innovation als Hemmnis bei der Akzeptanz von Innovationen und nachhaltigen Bewirtschaftungspraktiken in der Landwirtschaft sein können, gilt es dies im Hinblick auf die Strohpelletvergärung durch Wissensverbreitung, Beratung, Infomaterial und weiterführende Projekte zu verbessern und zu fördern. Wie anhand der Clusteranalyse und des Strukturmodells der PLS-Analyse hervorging, nehmen neben den Eigenschaften der Innovation Strohpellets selbst insbesondere die Faktoren Risikoeinstellung und Innovationsbereitschaft eine bedeutende Rolle für die Akzeptanz von Strohpellets unter landwirtschaftlichen Biogasanlagenbetreibern in Deutschland ein.

Durch die ökobilanzielle Bewertung der Prozessketten des Strohpelleteinsatzes wurde gezeigt, dass je nach Substratmix und Bereitstellungskette der Strohpellets eine Emissionsminderung in einigen Umweltwirkungskategorien wie dem GWP (Global warming potential) im Vergleich zum Ausgangs-Substratmix ohne Strohpellets erreicht werden kann. Die Parameter mit großer Einflussnahme auf die Ergebnisse sind die gewählte Pelletier-Technik, die Transportentfernungen der Stroh-, und Pelletbereitstellung sowie die Gärrestlogistik. Zudem zeigte sich, dass im Substratmix die Einsatzmenge von Wirtschaftsdünger die Gesamtemissionen in den einzelnen Wirkungskategorien stark beeinflusst, sodass die Bandbreiten an Emissionen in den jeweiligen Wirkungskategorien und innerhalb der Substratzusammensetzungen in manchen Szenarien groß waren. Die ökologischen Auswirkungen der Nutzung von Strohpellets als Substrat hängen deshalb immer mit den zugrunde gelegten Randbedingungen wie der Wahl der Allokationsmethode für den Getreideanbau oder dem verwendeten Substrat-Mix zusammen.

Abschließend ist festzustellen, dass Strohpellets unter bestimmten Bedingungen aus technischer, wirtschaftlicher und ökobilanzieller Sicht eine Substratalternative für die Biogasproduktion darstellen. Strohpellets weisen durch hohe TS-Gehalte eine hohe Energiedichte und Methanerträge mit 251 NL/kg FM auf. Darüber hinaus hat sich in gezeigt, dass nach der Vergärung ca. 15 % der eingesetzten Strohpelletmenge als Anteil aus Lignin, Cellulose und Hemicellulose, nicht abgebaut wurden und somit bei Gärrestrückfuhr für den Humusaufbau zur Verfügung stehen. Ein großer Vorteil von Strohpellets ist außerdem die gute Transportwürdigkeit sowie die hohe Flexibilität in Hinblick auf die Einbringtechnik. Dadurch, dass ein gewisser Anteil Strohpellets mit Standard-Einbringtechnik ohne weiteres gefüttert werden kann, ist ein kurzfristiger, zeitweiser Einsatz von Strohpellets jederzeit möglich (siehe weitere Empfehlungen hierzu in der Handreichung.). Positiv zu bewerten ist darüber hinaus, dass während der Projektlaufzeit eine zunehmende Tendenz der Verfügbarkeit von mobiler Pelletiertechnik sowie ein steigendes Interesse von Agrarhandelsunternehmen, Lohnbetrieben als auch Biogasanlagentreibern beobachtet werden konnte. Zusätzlich stellt sich der Getreideanbau mit Strohabfuhr besser dar als das aktuell meistgenutzte Substrat Silomais. Zukünftige rechtliche Rahmenbedingungen beim Substrateinsatz sowie neue Erlöschancen durch den Einsatz von Reststoffen in den Bereichen Biomethan (Stichwort: Doppelanrechnung) und LNG lassen auf eine stärkere Dynamik bei der Steigerung der Strohpelletvergärung hoffen.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Charakterisierung von Strohpellets

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 11 Pelletproben aus stationärer, teil-mobiler und mobiler Herstellung untersucht. Dabei waren elf Proben aus Weizenstroh und jeweils eine aus Roggen- und Gerstenstroh. Bei sechs Pelletproben wurde das Stroh, aus denen die Pellets hergestellt wurden, ebenfalls analysiert. Dabei handelte es sich um fünf Weizen-Strohproben und einer Probe aus Gerstenstroh. Neben einer chemisch- physikalischen Charakterisierung wurde für alle Proben auch das Biogas- und Methanbildungspotenzial bestimmt (Kapitel 2). Zusätzlich wurden aus einer gehäckselten Weizenstrohprobe zwei unterschiedliche Pellets im Technikum der HAWK gepresst und ebenfalls untersucht (Kapitel 3).

1.1 Pelletherstellung

Zwei Pelletproben wurden in einem stationären Pressverfahren mit einer Matrize mit 8mm Durchmesser hergestellt. Vor der Pelletierung wurde das Stroh vorzerkleinert und entstaubt. Die mobile Pelletierung fand direkt auf dem Feld mit einem mobilen Pelletiersystem statt. Es wurden vier verschiedene Strohpelletproben aus der mobilen Herstellung untersucht, auch bei diesem Verfahren wurde das Stroh ohne Aufbereitung pelletiert. Dabei wurden zwei Proben mit einem Durchmesser von 8mm und zwei Proben mit einem Durchmesser von 15 mm hergestellt. In einem teil-mobilen Verfahren wurden fünf der elf Proben aus Quaderballen hergestellt. Das verwendete Stroh wurde vor der Pressung nicht vorzerkleinert. In den Abbildungen 1 und 2 sind die mobile und teilmobile Pelletierung dargestellt. Im Kapitel 7.2.2. werden die Herstellungsverfahren im Abschnitt „Rohstoffkosten von Strohpellets und Analyse von Pelletierverfahren“ detailliert beschrieben und bewertet.



Abbildung 1: Mobile Pelletherstellung auf dem Feld
Quelle: Mohrmann, 2020



Abbildung 1b: Pellets aus mobiler Pressung



Abbildung 2: Teilmobile Pelletherstellung
Quelle: Mohrmann 2020



Abbildung 2 b: Pellets aus teilmobiler Pressung

1.2 Form, Größe und Beschaffenheit der Pellets

Die Beschreibung der Pelletform erfolgte anhand von Durchmesser sowie der minimalen und maximalen Länge der Pellets. Diese Werte wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 17829 jeweils anhand einer repräsentativen Probe mit Hilfe eines Messgeräts bestimmt. Anhand einer optischen Sichtprüfung wurden darüber hinaus das Aussehen, die Farbe, die Textur und die Struktur der Pellets beschrieben. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist eine Auswahl an unterschiedlichen Strohpellets dargestellt.

Tabelle 1: Form, Aussehen und Beschaffenheit der untersuchten Strohpellets

Nr.	Bezeichnung	Form, Aussehen	Farbe	Größe der Pellets	Pressverfahren
P1	Weizenstrohpellets 1	dick, locker gepresst, brüchig, sichtbarer Krümel- und Faseranteil, Oberfläche leicht glänzend	hell beige	Länge : 32,5 - 45 mm Durchmesser : 15 mm	teil-mobil
P2	Weizenstrohpellets 2	dick, fest gepresst, homogen, kein Krümel- und Faseranteil, Oberfläche matt	beige, braun	Länge : 25-35 mm Durchmesser : 15 mm	teil-mobil
P3	Weizenstrohpellets 3	dick, fest gepresst, homogen, kein Krümel- und Faseranteil, Oberfläche glänzend	beige	Länge : 25-30 mm Durchmesser : 15 mm	teil-mobil
P4	Weizenstrohpellets 4	dick, fest gepresst, faserige Struktur, kein Krümelanteil, Oberfläche glänzend	beige, braun	Länge : 20-30 mm Durchmesser : 15 mm	mobil
P5	Weizenstrohpellets 5	dick, fest gepresst, faserige Struktur, kein Krümelanteil, Oberfläche matt	hellbeige	Länge : 25-40 mm Durchmesser : 15 mm	teil-mobil
P6	Roggenstrohpellets 6	dick, fest gepresst, faserige Struktur, kaum Krümelanteil, Oberfläche glänzend	beige	Länge : 30-65 mm Durchmesser : 15 mm	mobil
P7	Gerstenstrohpellets 7	dünn, fest gepresst, homogen, kein Krümel- und Faseranteil, Oberfläche matt	hell beige	Länge : 15-30mm Durchmesser : 8 mm	stationär
P8	Weizenstrohpellets 8	dünn, fest gepresst, homogen, kein Krümel- und Faseranteil, Oberfläche leicht glänzend	beige	Länge : 8-25 mm Durchmesser : 8 mm	stationär
P9	Weizenstrohpellets 9	dünn, mittelfest gepresst, homogen, mittlerer Krümelanteil, Oberfläche matt	grünbraun, beige	Länge : 8-35 mm Durchmesser : 8 mm	mobil
P10	Weizenstrohpellets 10	dünn, mittelfest gepresst, homogen, mittlerer Krümelanteil, Oberfläche matt	grünbraun, beige	Länge : 20-40 mm Durchmesser : 8 mm	mobil
P11	Weizenstrohpellets 11	dick und locker gepresst, hoher Krümel- und Faseranteil, Oberfläche leicht glänzend	hell beige	Länge : 30-50 mm Durchmesser : 15 mm	teil-mobil

Die Pellets wurden mit unterschiedlichen Matrizengrößen gepresst. Sieben Proben sind mit einem Durchmesser von 15 mm und vier Proben mit einem Durchmesser von 8 mm gepresst worden. Die Längen der einzelnen Pellets variieren zwischen 8 mm und 65 mm. Die Pellets weisen verschiedene Färbungen von hellbeige bis grünbraun auf, wobei kein Zusammenhang zwischen Getreideart und Farbe beobachtet werden konnte. Die Pelletproben unterscheiden sich hinsichtlich der Festigkeit, der sichtbaren Faser- und

Krümelanteile sowie der Oberfläche deutlich. Die Pellets der Proben P1 und P11 sind locker gepresst mit deutlich sichtbarem Krümel- und Faseranteil. Die Pellets P2 bis P8 weisen eine feste Form mit geringem oder fehlendem Krümel- und Faseranteile auf. In Abbildung 3 sind vier Pelletproben mit unterschiedlichen Getreidearten, Durchmessern und Pressverfahren beispielhaft dargestellt.



Pellets P1, teil-mobil
Weizenstroh, 15 mm

Pellets P7, stationär
Gerstenstroh, 8 mm

Pellets P6, mobil
Roggenstroh, 15 mm

Pellets P10, mobil
Weizenstroh, 8 mm

Abbildung 3: Vier Strohpellets aus Weizen-, Roggen- und Gerstenstroh; mit unterschiedlichen Pressverfahren hergestellt

1.3 Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS)

Der Trockensubstanzgehalt hat Einfluss auf die Energiedichte und die Transportwürdigkeit und ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung der Strohpellets. Durch die Bestimmung der organischen Trockensubstanz kann der für die Vergärung nutzbare organische Anteil der Strohpellets ermittelt werden. Die Schüttdichte ist eine wichtige Kenngröße für die Transportwürdigkeit und den Lagerbedarf der untersuchten Strohpellets.

Die Trockensubstanz einer Probe wird durch Trocknen bei einer Temperatur von 105°C und Wägung der Gewichts Differenz zwischen frischer und getrockneter Probe bestimmt. Die Bestimmung wird auf Basis der Norm DIN 11465 durchgeführt. Der Gehalt an organischer Substanz einer Probe wird durch Glühen bei 550°C unter Luftzufuhr bestimmt. Die Analyse erfolgte nach DIN EN ISO 18122 als 2-fach-Bestimmung.

In Abbildung 3 sind beispielhaft die TS- und oTS-Gehalte der Pelletproben sowie der Strohproben, aus denen die Pellets gepresst wurden, dargestellt. Insgesamt liegen die TS-Gehalte der untersuchten Strohpelletproben zwischen 88,4 % und 96,3 % mit einem Mittelwert von 92,0 %. Der Mittelwert liegt damit bei den Strohpellets leicht höher als der Mittelwert der sechs Strohproben mit 90,7 %. Dies könnte durch die Verdampfung von Wasser während der Pressung verursacht werden. Die Gehalte an organischer Trockensubstanz(oTS) sind mit einem mittleren Wert von 94,0 % TS vergleichbar mit denen von Stroh (94,0 % TS).

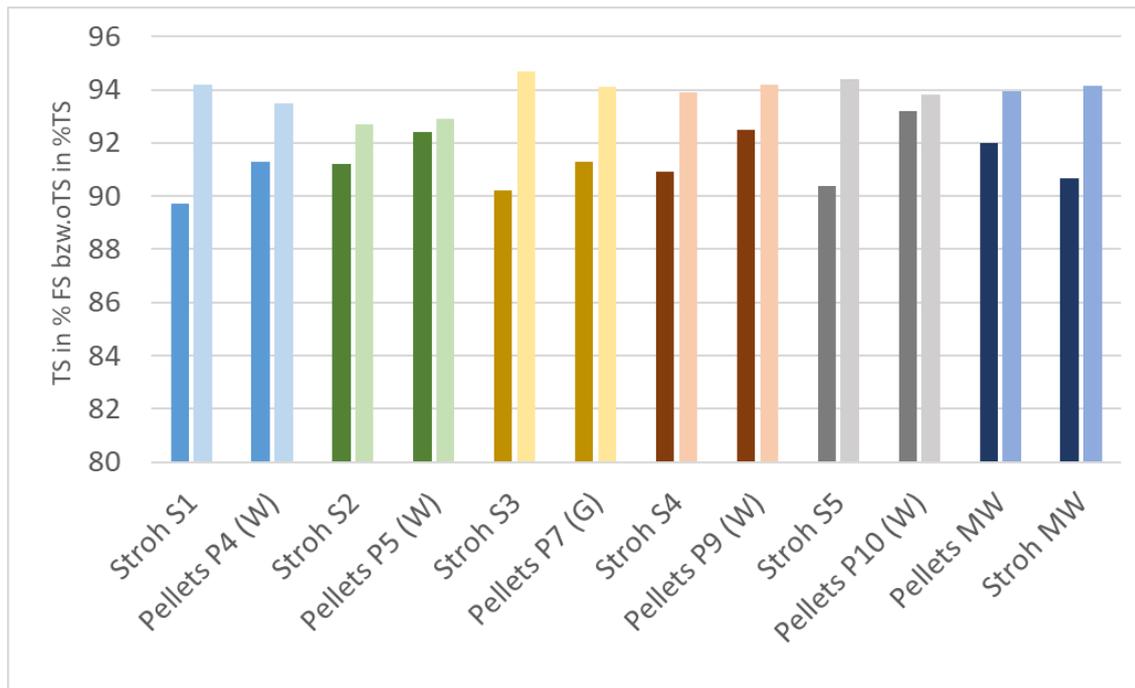


Abbildung 4: TS- und oTS-Gehalte von Stroh und den daraus gepressten Strohpellets

Strohpellets weisen im Vergleich zu anderen Biogassubstraten wie Mais- oder Grassilage sehr hohe Trockensubstanzgehalte auf. Aufgrund der hohen TS-, und oTS-Gehalte weisen die untersuchten Strohpellets eine hohe Energiedichte auf.

Die hohen Trockensubstanzgehalte könnten in der Praxis den Wassergehalt im Fermenter und dadurch die Rührfähigkeit und die Stromaufnahme im Fermenter beeinflussen. Diese Parameter sind jedoch auch stark von weiteren Faktoren wie dem Substratmix und dem Anteil an der Gesamtfütterungsmenge abhängig.

1.4 Schüttdichte

Die Schüttdichte ist eine wichtige Lagergröße und wurde nach DIN 51705:2001-06 bestimmt. Dabei wurde das Leergewicht eines Behälters aus Plexiglas bestimmt und anschließend mit Strohpellets befüllt. Das überstehende Schüttgut wurde mit einer Vierkantleiste abgestreift und der Behälter wurde mit Füllung erneut gewogen. Die Schüttdichte wurde anhand der Masse des Behälters mit Füllung abzüglich des Leergewichts des Behälters im Verhältnis zum Behältervolumen berechnet. Die anhand der beschriebenen Methode ermittelten Schüttdichten der untersuchten Strohpellets liegen zwischen 487 kg/m³ und 645 kg/m³ und sind in Abbildung 5 dargestellt.

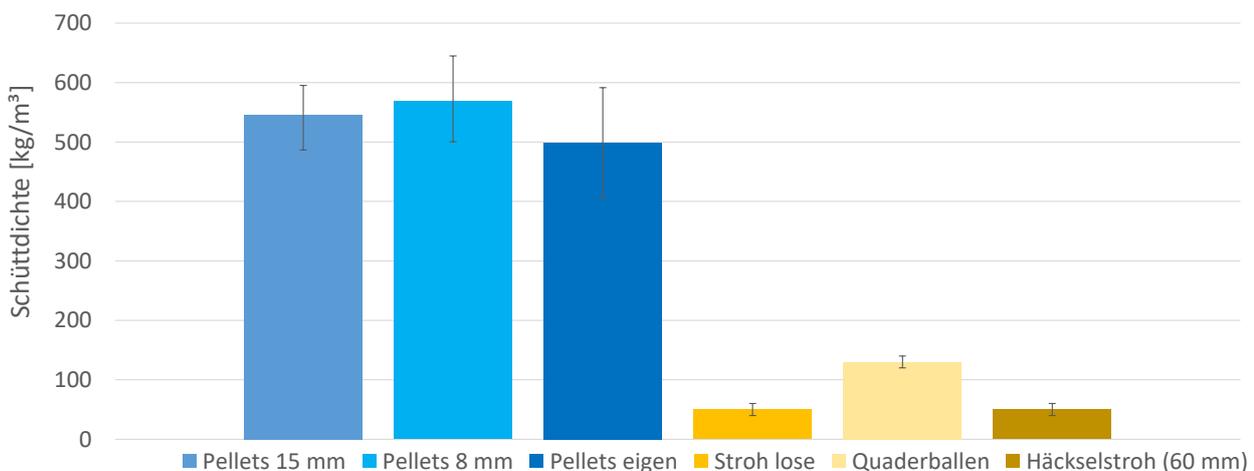


Abbildung 5: Schüttdichte von Strohpellets und Stroh

Die mittlere Schüttdichte von Strohpellets mit 15 mm Durchmesser liegt bei 546 kg/m³ und bei Strohpellets mit 8 mm Durchmesser mit 586 kg/m³ etwas höher. Die Schüttdichte der im Technikum hergestellten Pellets fällt

mit 499 kg/m^3 geringer aus. Im Vergleich dazu liegen die Schüttdichten von losem Stroh und Häckselstroh mit 50 kg/m^3 und bei Quaderballen mit 130 kg/m^3 deutlich unter denen von Strohpellets.

Die hohen Schüttdichten der Strohpellets wirken sich vorteilhaft auf den Transport, die Lagerung und die Einbringung in den Fermenter aus. Eine Einbringung in den Fermenter über gängige Fütterungstechnik wie Förderschnecken ist somit einfach umsetzbar im Gegensatz zu Stroh. Um das Verhalten der Pellets im Fermenter zu untersuchen wurden außerdem Auflöse-Versuche durchgeführt.

1.5 Auflöseverhalten

Um Aussagen über das Auflöseverhalten von Pellets treffen zu können, wurde über einen Zeitraum von vier Stunden die Auflösung in Wasser beobachtet. Das Auflöseverhalten in Wasser sowie die Bildung von Sink- und Schwimmschichten wurden anhand einer an der HAWK dafür entwickelten Versuchsanweisung betrachtet. Dazu wurden ein 2,7 Liter-Glasgefäß mit 2200 Millilitern Wasser (20°C) befüllt und anschließend 100 g Strohpelletprobe dazu gegeben. Direkt nach Zugabe der Pellets (Zeitpunkt 0) wurde ein Foto gemacht. Die Auflösung und Verteilung der Strohpellets in Wasser wurde nach 60, 120, 180 und 240 Minuten durch ein weiteres Foto dokumentiert. Aufgrund der deutlich höheren Viskosität und Trockensubstanzgehalte von Fermenterinhalt wurde der Versuch auch mit Fermenterinhalt durchgeführt. Dabei wurde die eingesetzte Menge Wasser durch 2000 mL Fermenterinhalt einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit einem TS-Gehalt von 9,4 % ersetzt.

Die **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt beispielhaft das Auflöseverhalten der Weizenstrohpellets P2 und P4 in einem mit Wasser befüllten Gefäß im zeitlichen Verlauf über 240 Minuten.

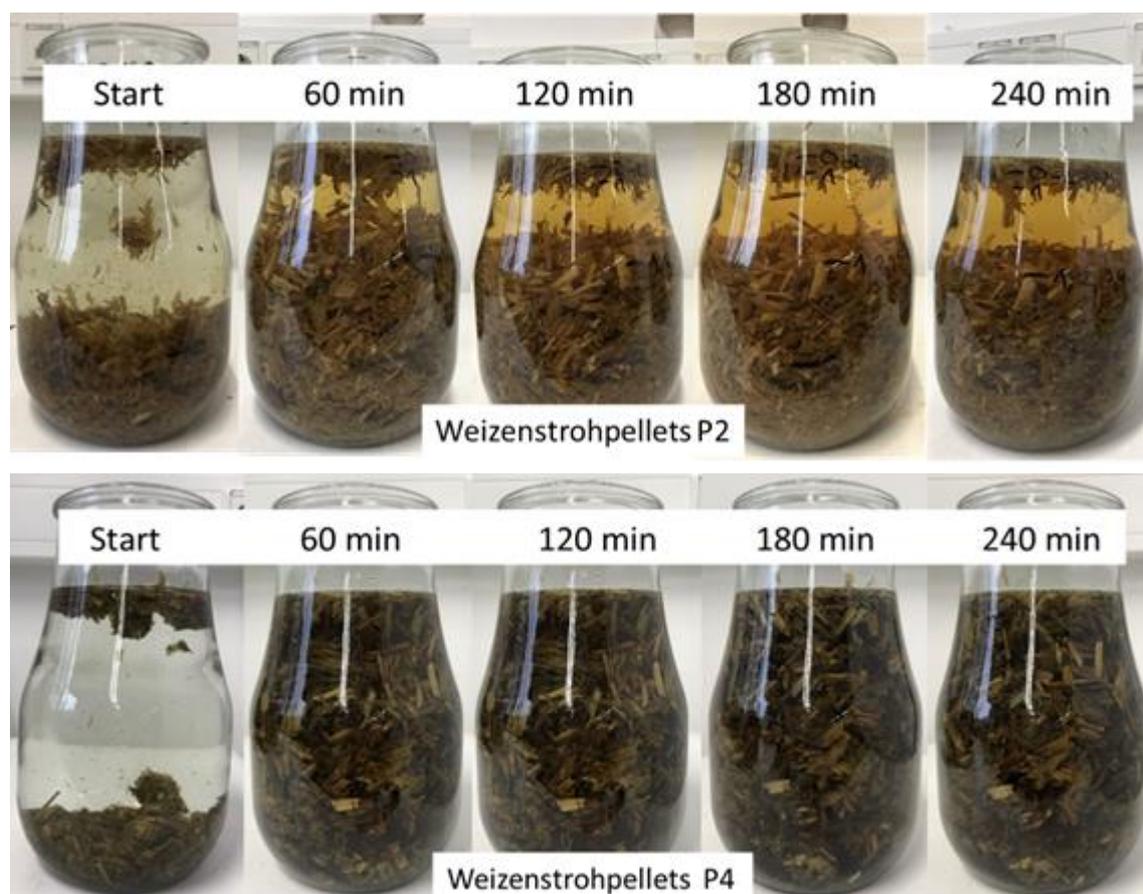


Abbildung 6: Auflöseverhalten der Weizenstrohpellets P2 und P4 in Wasser

Das Auflöseverhalten in Wasser ist sehr gut. Die Pellets lösen sich innerhalb der ersten Minuten auf. Nach 60 Minuten sind die eingefüllten Pellets vollständig aufgelöst. Im weiteren Verlauf bildet sich bei den Pellets P2 eine leichte Schwimmschicht. Im Beispiel der Pellets P4 bleiben die Pelletfasern gleichmäßig verteilt und aufgequollen im Wasser. Bei der Beobachtung des gleichen Versuchsaufbaus mit Fermenterinhalt anstelle von Wasser als flüssiges Medium konnte nur ein leichtes Aufquellen und keine Auflösung der Pellets festgestellt werden. Das Auflöseverhalten der Strohpellets P2 und P4 in Fermenterinhalt sind in Abbildung 7: Auflöseverhalten der Strohpellets P2 und P4 in Gärrest



Abbildung 7: Auflöseverhalten der Strohpellets P2 und P4 in Gärrest

Die Strohpellets sind über den gesamten Beobachtungszeitraum an der Oberfläche des Gefäßes verblieben und nur zum Teil in den Fermenterinhalt eingesunken. Dabei sanken die Pellets P4, welche mit kleinerem Durchmesser gepresst wurden, noch etwas besser ein. Für den Einsatz in Biogasanlagen kann abgeleitet werden, dass das Auflöseverhalten im Fermenter von der Viskosität und dem TS-Gehalt abhängig ist. Daher werden für die Praxis ein gutes Einrühren und evtl. Anmaischen vor der Einbringung empfohlen.

1.6 Partikelgrößenverteilung

Je nach Herstellungsverfahren wurden die Strohpellets mit unterschiedlicher Aufbereitung gepresst. Dies hat Einfluss auf die Größe der Strohpartikel, welche dann zu einem Pellet verpresst werden. Nach Reuters (2014) besteht Stroh zu 35 % aus Cellulose, zu 25 % aus Hemicellulose und zu 18 % aus Lignin. Alle drei Komponenten liegen als Lignocellulosekomplex im Stroh vor.

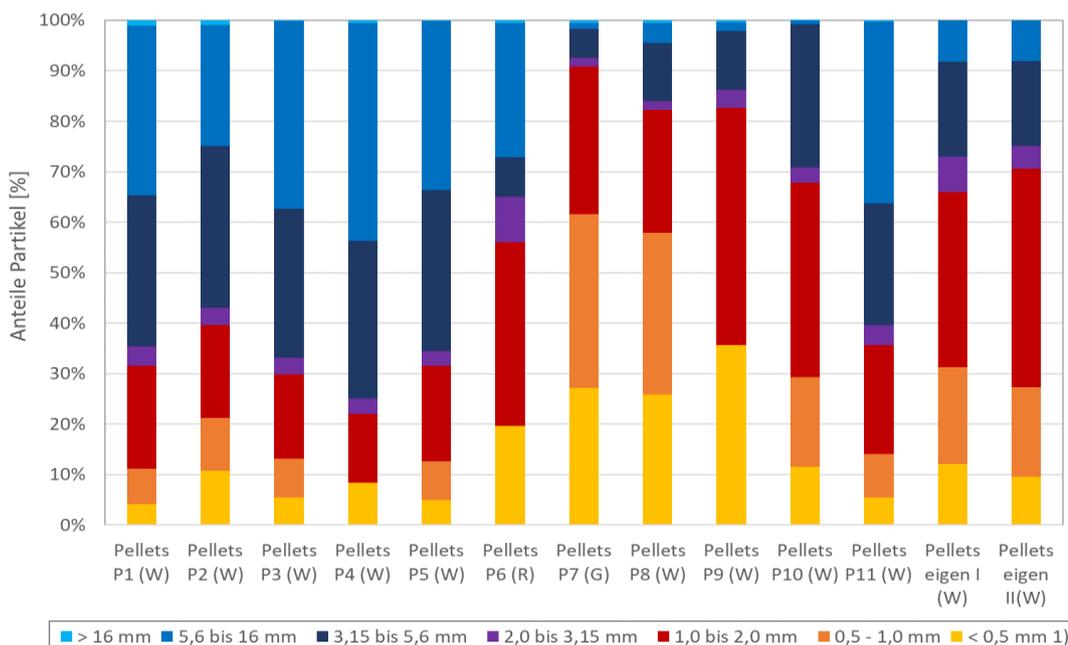


Abbildung 8: Partikelgrößenverteilung in Strohpellets

Da im Biogasprozess das Lignin praktisch nicht abbaubar ist im Gegensatz zu Cellulose und Hemicellulose, hat die Vorbehandlung von Stroh z.B. durch Zerkleinerung, einen Einfluss auf den Abbau im Fermenter. Durch die Vorbehandlung sind die abbaubaren Inhaltsstoffe für die Mikroorganismen besser verfügbar. Die Zusammensetzung von Stroh und Pellets wird im Kapitel „Erweiterte Weender Futtermittelanalyse“ detailliert beschrieben. In Abbildung 8 sind die Massenanteile der Partikel nach Größe dargestellt. Die Größenfraktionen werden farblich unterschieden (Feinfraktion: gelb-rot, mittlere Fraktion: lila und dunkelblau, Grobfraktion: blau).

Die Größenverteilung der Strohpartikel in den untersuchten Pellets wurde durch Siebungen nach DIN EN ISO 17830 bestimmt. Dabei wurden die gesiebten Fraktionen in folgende Kategorien unterteilt: Feinfraktion bis 2 mm, mittlere Fraktion von 2 mm bis 5,6 mm und Grobfraktion > 5,6 mm.

Die Pellets P1 bis P5 und P11 wurden teil-mobil bzw. mobil ohne vorherige Aufbereitung des Strohs gepresst. Die zeigt sich auch in der Partikelgrößenverteilung. Der mittlere Anteil der Feinfraktion liegt hier bei 32 %. Im Vergleich dazu liegt dieser bei den Pellets P7 und P8, welche stationär aus gehäckseltem Stroh gepresst wurden, bei 85 %. Die Pellets aus eigener Herstellung wurden mit einer Hammermühle vorzerkleinert. Dort liegt der Feinanteil bei 69 %. Dementsprechend fällt die Partikelgrößenverteilung der untersuchten Pelletproben je nach Pressverfahren und Vorbehandlung des Strohs sehr unterschiedlich aus.

1.7 Nährstoffgehalte

Die in den Strohpellets enthaltenen Nährstoffgehalte spielen bei der Versorgung der Mikroorganismen im Fermenter sowie im Gärrest hinsichtlich der Düngewirkung eine Rolle. Die Strohpellets als Biogassubstrat wurden hinsichtlich ihrer Gehalte an Makronährstoffen wie Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium untersucht. Die Nährstoffgehalte sind als prozentualer Anteil des jeweiligen Trockensubstanzgehalts in

Abbildung 9 dargestellt. Für die Bestimmung der Makronährstoffe wurden die getrockneten und gemahlene Proben gemäß DIN EN ISO 16967 mittels Säuredruckaufschluss aufgeschlossen und die Gehalte anschließend mittels Flammen-Atomabsorptions-Spektrometrie nach ISO 7980, ISO 9964-1, ISO 9964-2 und ISO 9964-3 bestimmt.

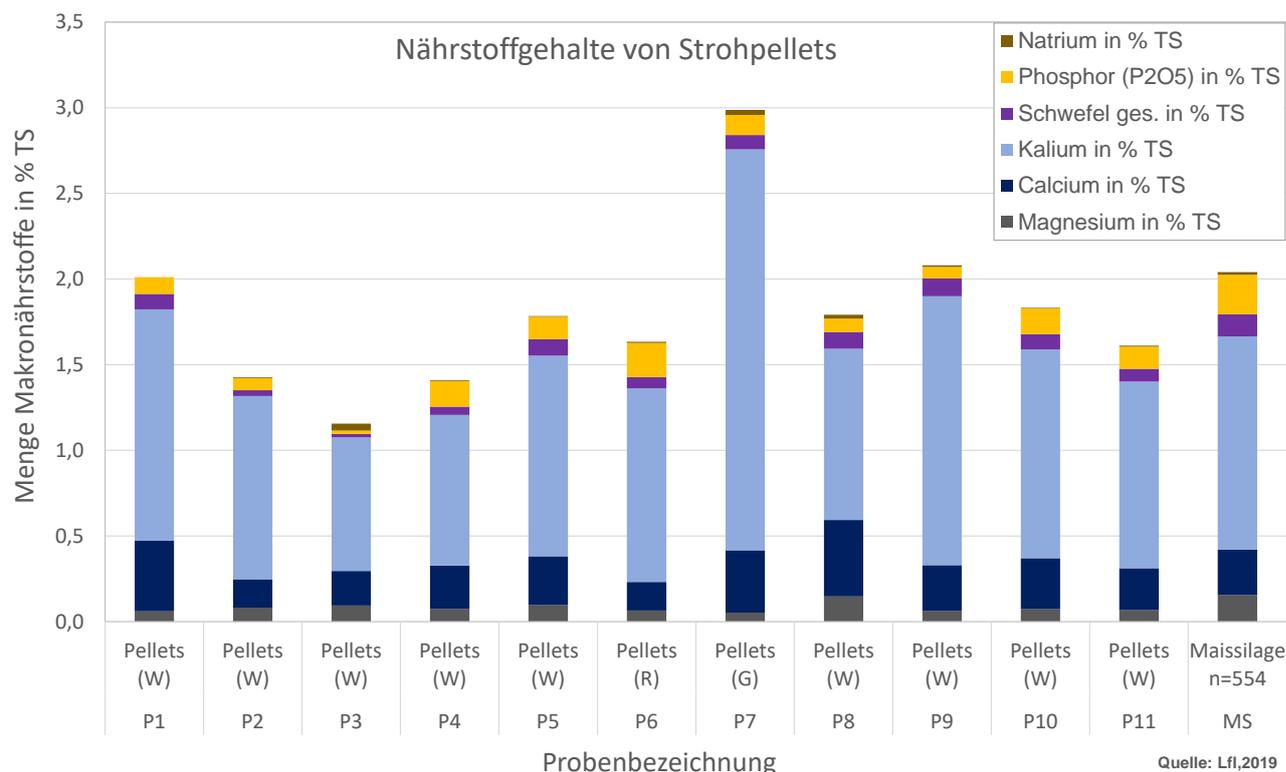


Abbildung 9: Nährstoffgehalte in Strohpellets und im Vergleich dazu in Maissilage

Quelle: Lfl 2019

Die mittleren Gehalte liegen für Magnesium bei 0,08 % der TS, für Calcium bei 0,28 % und für Kalium bei 1,24% und damit in ähnlichen Bereichen wie bei Maissilage. Die Gehalte an Schwefel (0,13 %), Chlor (0,28 %) und Phosphor (0,11 %) weichen von den Gehalten in der Trockensubstanz von Maissilage ab. Während in Maissilage die Gehalte an Schwefel und Phosphor höher liegen, sind die Chlorgehalte geringer.

Neben den Hauptnährstoffen, die zur Versorgung der Mikroorganismen im Fermenter wichtig sind, wurden auch die Gehalte an Silicium nach DIN EN ISO 17294-2 bestimmt. Silicium kann sich bei der Verbrennung

von Biogas im BHKW in Form von Siliciumdioxid ablagern und zu höherem Verschleiß und Schäden führen. Für Weizenstrohpellets lagen die Siliciumgehalte bei 15 g/kg TS, für die Probe aus Roggenstroh bei 4,1 g/kg und aus Gerstenstroh bei 5,5 g/kg.

1.8 C/N Verhältnis

Die Bestimmung der Elemente Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) wurde mit dem Elementaranalysator Vario MACRO cube der Firma Elementar nach DIN EN ISO 16948 durchgeführt.

Das ermittelte C/N-Verhältnis der untersuchten Strohpellets liegt bei 88:1 (n=11) und bei den untersuchten Strohproben bei 90:1 (n=6). Das ideale C/N-Verhältnis im Fermenter liegt zwischen 10:1 und 40:1 (Eder et al, 2012). Im Vergleich dazu liegen die C/N-Verhältnisse von Gülle bei 8-10:1, bei Maissilage bei 35:1 und bei Zuckerrübensilage bei 50:1 (Amon et al 2007; Hersener et al 2002; ALB Bayern 2001). Strohpellets und Stroh weisen somit größere C/N-Verhältnisse auf. Bei einem Einsatz in der Praxis sollte deshalb, je nach Substratmischung, auf ausreichende Stickstoffzufuhr, z.B. durch Gülle, geachtet werden.

1.9 Pentosangehalt

Pentosane sind Schleimstoffe und gehören zur Gruppe der Hemicellulosen. Es gibt wasserlösliche und wasserunlösliche Pentosane. Die wasserlöslichen Pentosane weisen eine hohe Wasserbindungsfähigkeit auf und können somit Einfluss auf die Viskosität des Fermenterinhalt haben. Nach Belitz (2002) hat Weizen Pentosangehalte von 2-3 % und Roggen Pentosangehalte von 6-8 % (Theiss 2008).

Die Pentosangehalte in Strohpellets wurde mit dem Furfurol-Verfahren nach DIN ISO 54361 bestimmt. Neben Strohpellets wurden auch Maissilage und Zuckerrübe analysiert. Für die Strohpellets PI1 (Pellets eigen I) und PI 2 (Pellets eigen II) aus eigener Herstellung wurde ein Pentosangehalt von 37,8 % gemessen. Für die restlichen Strohpelletproben lag der Pentosangehalt bei 30,7 %. Im Vergleich dazu ergaben die Maissilageproben einen Wert von 15,1 % und die Zuckerrübenproben einen Wert von 5,5 %. Durch den Einsatz von Strohpellets kann die Viskosität im Fermenter, abhängig von der zugeführten Menge, beeinflusst werden.

1.10 Heizwert

Zur Beurteilung des Energiegehalts der Strohpellets wurden die Heizwerte und Brennwerte nach DIN EN 14918:2010 in Doppelbestimmung mit einem Bombenkalorimeter der Firma IKA gemessen. Der mittlere Brennwert der Strohpellets wurde mit 17,4 MJ/kg ermittelt. Der mittlere Heizwert (Q_p, net ar: Heizwert im Anlieferungszustand, lufttrocken) lag bei 14,5 MJ/kg. Im Vergleich dazu werden in der Literatur der Heizwert von Holzpellets mit 18 MJ/kg und von Biogas aus landwirtschaftlichen Reststoffen zwischen 20 und 27 MJ/kg angegeben (Schmidmeier 2023).

1.11 Erweiterte Weender Futtermittelanalytik

Die Bestimmung der Zusammensetzung der Strohpellets liefert Informationen zur Vergärbarkeit und zu anaerob nicht oder schwer abbaubaren Anteilen wie z.B. Lignin und Rohasche. In Abbildung 10 ist die Zusammensetzung von Stroh (MW Stroh), Strohpellets (MW Pellets) und Strohpelletresten nach der Vergärung im Biogasertragstest (MW Pellets nV) dargestellt. Der Ansatz und die Durchführung des Biogasertragstests werden im Kapitel Batch-Gasertrag beschrieben. Zur Bestimmung der Zusammensetzung des Strohpelletrests nach Vergärung wurden Strohpellets vor der Vergärung in Nylonbeutel gefüllt. Die Nylonbeutel wurden nach Beendigung des Biogasertragstests wieder aus dem Fermenter entnommen und mit Wasser gespült. Anschließend wurde der Strohpelletrest im Nylonbeutel getrocknet und anhand der folgenden Beschreibung analysiert.

Die Untersuchung erfolgte anhand der Verordnung EG 152/2009. Dabei werden die Parameter Rohasche (nach Anh.III, A), Rohfett (nach Anh.III, H), Rohprotein (Kjeldahl nach Anh III, C), Rohfaser (Anh.III, I Ankom) und Stärke (Anh.III, L) analysiert. Außerdem werden nach dem VDLUFA-Methodenbuch Band III die Gehalte an Zucker (VDLUFA 7.1.3), an Neutraler Detergentienfaser aNDF_{org} (VDLUFA 6.5.1), an Saurer Detergentienfaser ADF_{org} (VDLUFA 6.5.2) und an Saurem Detergentienlignin ADL_{org} (VDLUFA 6.5.3) untersucht. Die Faseranalytik wurde mit dem ANKOM-Filterbeutelsystem durchgeführt. Anhand der Gehalte an aNDF, ADF und ADL wurden die Gehalte an Hemicellulose (aNDF-ADF) und Cellulose (ADF-ADL) berechnet. Bei der Berechnung der Anteile in der getrockneten Probe wurde angenommen, dass die Anteile an Rohasche und Lignin sich durch die Vergärung nicht ändern, da Lignin anaerob nicht abbaubar ist und die Rohasche den anorganischen Anteil darstellt. Anhand dieser Annahme wurde der während des Biogasprozesses abgebaute Anteil berechnet.

Der Anteil an nicht vergärbarem Material beträgt 15 % und unterscheidet sich bei Stroh und Strohpellets nicht. Den größten Anteil haben Cellulose und Hemicellulose, welche zum größten Teil abgebaut werden. Insgesamt konnten im Batchtest 70 % der eingesetzten Masse an Strohpellets abgebaut werden. Der Anteil an Rohprotein war nach der Vergärung leicht höher als im Ausgangsmaterial. Abweichend davon konnten Czepuk

et al (2006) im Biogasertragstest einen guten Abbau von Proteinen anhand von Gelatine und Casein in 19-21 Tagen beobachten. Der demgegenüber erhöhte Anteil nach den im Rahmen des hier beschriebenen Projekts durchgeführten Vergärungsversuchen kann mit der Probengewinnung nach dem Biogasertragstest zusammenhängen. Geringe Mengen des Inokulums aus dem Biogasprozess sind nach dem Spülvorgang noch an den Resten der Strohpelletproben verblieben.

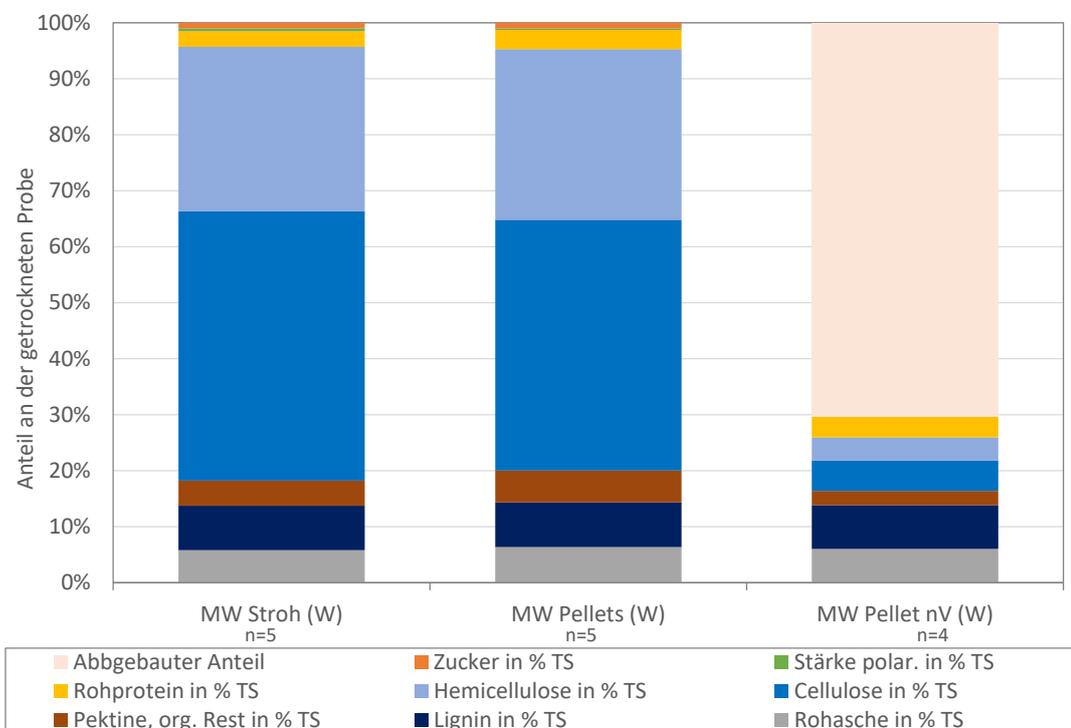


Abbildung 10: Erweiterte Weender Futtermittelanalytik von Stroh, Pellets und Pelletrest nach der Vergärung

2. Batch - Gasertragstest

2.1 Bestimmung des Gasertragspotentials

Die Bestimmung des Gasertragspotentials erfolgte gemäß der VDI-Richtlinie 4630 in 30 L PET-Fässern mit einem Nutzvolumen von 20 L bei 37°C in einer Klimakammer (Abbildung 11). Dabei wurden die zu untersuchenden Proben zusammen mit einem Inokulum angesetzt. Als Inokulum wurde die flüssige Fraktion des Gärrests aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage verwendet. Jede Probe wurde in 3-fach-Bestimmung mit arbeitstäglicher Biogasmessung angesetzt. Das oTS-Verhältnis von Probenmaterial zu Inokulum beträgt maximal 0,5. Die Bestimmung der gebildeten Gasmenge sowie der Gehalte an Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂), Sauerstoff (O₂) und Schwefelwasserstoff (H₂S) erfolgte mit einem Messgerät der Firma Eheim. Die Volumenbestimmung erfolgte mittels Trommelgaszähler der Firma. Ritter mit Korrektur auf Normbedingungen (1013 mbar, 273 K). Die Gasmesseinrichtung ist in Abbildung 12 dargestellt.

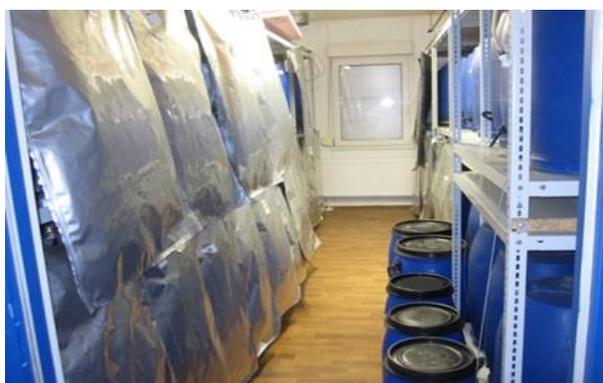


Abbildung 11: Klimakammer mit PET-Fässern und Gasfolienbeuteln



Abbildung 12: Biogasmessgerät und Trommelgaszähler zur Bestimmung der Biogasqualität und -quantität

Das eingesetzte Stroh wurde mit der Schere auf ca. 15 cm gekürzt. Die Pellets wurden unzerkleinert eingesetzt. Die Proben wurden in Nylonstrümpfe bzw. in Wäschenetze gepackt und mit Gewichten versehen, bevor sie in den Fermenter eingebracht wurden. Damit wurde das Aufschwimmen des Strohs bzw. der Pellets während des Versuchs verhindert und eine vollständige Benetzung mit Inokulum gewährleistet. Der Hauptfokus der Batchversuche lag auf der Bestimmung des Biogas- und Methanbildungspotenzial, das Verhalten von Häckselstroh und Strohpellets im Fermenter bezüglich der Bildung von Schwimm- oder Sinkschichten und des Auflöseverhaltens wurde in weiteren Versuchen untersucht. In der Praxis wird Stroh vor dem Einbringen in den Fermenter in der Regel durch häckseln ebenfalls vorzerkleinert.

2.2 Methanbildungskinetik

Anhand des Biogasertragstests können einerseits die Methan- und Biogaserträge und andererseits die Bildungskinetiken anhand der kumulierten täglich gemessenen Gasmenge erfasst werden. In Abbildung 13 wird die Methanbildungskinetik der Strohproben S1 und S2 und der daraus gepressten Pellets P4 und P5 dargestellt. Die Strohpellets P4 wurden aus dem Stroh S1 gepresst und die Pellets P5 aus dem Stroh S2. Bei der Herstellung der Pellets wurde das eingesetzte Stroh ohne vorherige Aufbereitung verarbeitet.

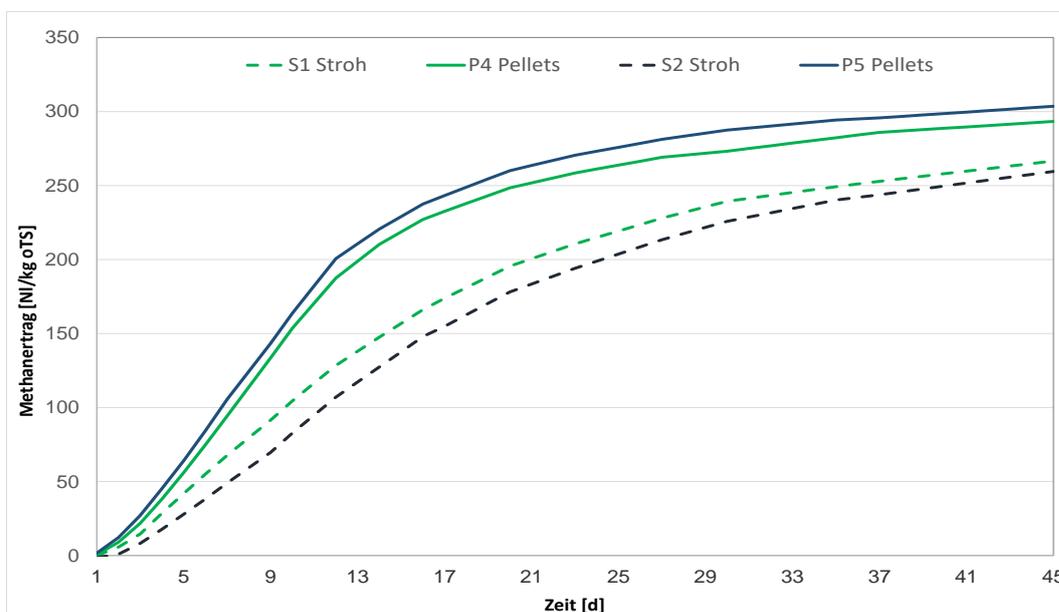


Abbildung 13: Methanertragskurve von Strohpellets aus mobiler und teilmobiler Pressung und Stroh

Nach 45 Tagen Versuchszeit erreichten die Strohproben 260 bzw. 267 NL/kg oTS Methan. Die Methanerträge der Pellets lagen mit 293 und 303 NL/kg oTS etwas höher. Auch die Methanbildung der Strohpellets ist in den ersten 14 Tagen höher als bei Stroh.

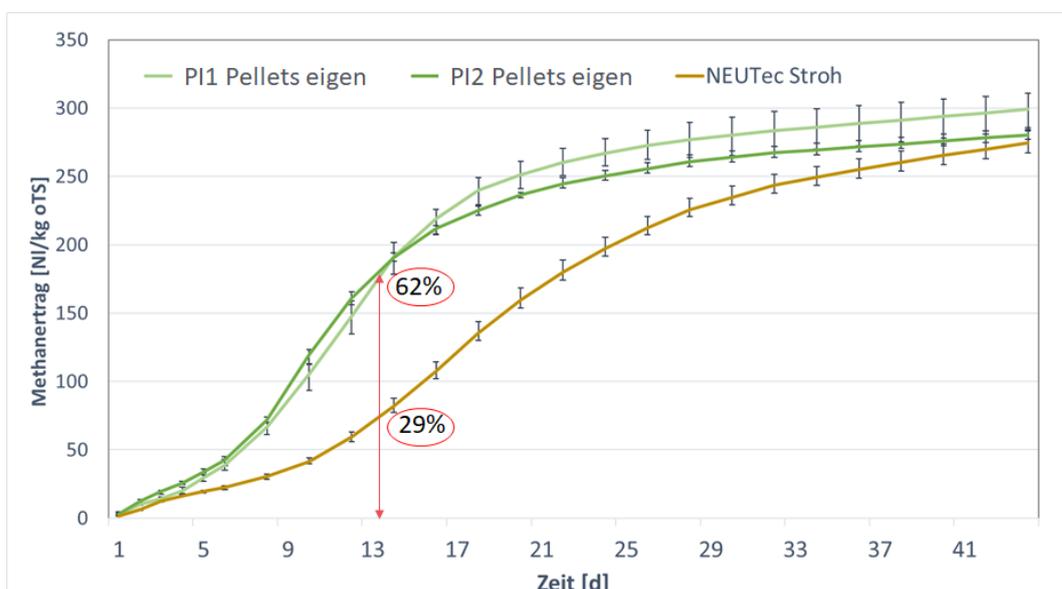


Abbildung 14: Methanertragskurve von Strohpellets (Eigenproduktion HAWK) und Stroh

Im Vergleich zur dargestellten Methanbildungskinetik der Pellets P4 und P5 werden in Abbildung 14 die Methanbildungskinetik und der Methanertrag am Beispiel von Stroh und Strohpellets, welche im Technikum der HAWK hergestellt wurden, gezeigt. Die Erzeugung der „Pellets eigen“ wird im nächsten Kapitel „Herstellung von Strohpellets im Technikum“ detailliert beschrieben.

Die Kinetiken der Methanertragskurven zeigen einen deutlichen Unterschied für Stroh und Strohpellets. So sind bei den Strohpellets bereits nach 14 Tagen 62 % des gesamten Methanertrages gebildet, bei Stroh sind es 29 % des Gesamtmethanertrags. Bei den eingesetzten Pellets handelt es sich, wie in Abbildung 8 dargestellt, um Pellets mit einem hohen Feinanteil, da diese vor dem Pressen mit der Hammermühle vorzerkleinert wurden. Im Vergleich dazu weisen die Verlaufskurven in Abbildung 10 beim Abbaugrad nach 14 Tagen eine geringere Differenz zwischen Stroh und den entsprechenden Strohpellets P4 und P5 auf. Im Hinblick auf die Partikelgrößenverteilung der untersuchten Pellets zeigen die Abbildung 13 und Abbildung 14 beispielhaft den Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf die Methanbildungskinetik. Es kann abgeleitet werden, dass durch einen höheren Feinanteil in den Pellets die Abbaubarkeit steigt und somit die Methanbildung zu Beginn der Gasertragstests höher ist.

2.3 Biogas- und Methanertragspotenzial

Die ermittelten Methan- und Biogaserträge der untersuchten Strohpellet-, und Strohproben sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Methan- und Biogaserträge von Stroh und Strohpellets

	TS	oTS	Ertrag bezogen auf die organische Trockensubstanz		Ertrag bezogen auf Frischmasse		
	[% FM]	[%TS]	Biogas [LN/kg oTS]	Methan [LN/kg oTS]	Biogas [LN/kg FM]	Methan [LN/kg FM]	Methan gehalt [%]
Strohpellets	92,0%	94,0%	560	291	484	251	51,9
Stroh	90,5%	93,9%	520	268	442	228	51,5
Maissilage (KTBL, 2021)	35,1%	96,5%	658	357	223	121	54,3

Die Methanerträge von Stroh und Strohpellets fallen bezogen auf die organische Trockensubstanz (oTS) um 20-25 % geringer aus als bei Maissilage, was sich durch die bessere Verdaulichkeit von Maissilage aufgrund hoher Anteile an schnell abbaubaren Kohlenhydraten erklären lässt (Eder et al, 2012). Durch die hohen Trockensubstanzgehalte weisen Strohpellets jedoch, bezogen auf die Frischmasse, deutlich höhere Methanerträge auf als Maissilage mit 121 LN/kg FM. Dabei liegt der durchschnittliche Methangehalt bei Maissilage mit 54,3 % etwas höher als bei den Strohpellets mit 51,9 %. Die ermittelten Methanerträge der Strohpellets liegen 10 % höher als die der untersuchten Strohproben. Diese Werte wurden als Grundlage für die ökonomische Bewertung verwendet.

Für die untersuchten Strohpelletproben werden die gemessenen Biogas- und Methanertragspotenziale in Abbildung 15 im Einzelnen aufgeführt.

Die Methanerträge der einzelnen Pelletproben liegt zwischen 271 und 340 NL/kg oTS. Die Biogaserträge liegen dementsprechend zwischen 523 und 593 LN/kg oTS. Auf Frischmasse bezogen weisen die Strohpellets 251 NL/kg FM auf. Im Vergleich dazu werden die Methanerträge für Maissilage in der Literatur mit 102 - 121 NL/kg FM angegeben (LfL, 2023; KTBL, 2021). Dies bedeutet, dass der gleiche Methanertrag wie aus einem kg Maissilage (FM) alternativ durch 0,4 - 0,48 kg Strohpellets erzeugt werden kann.

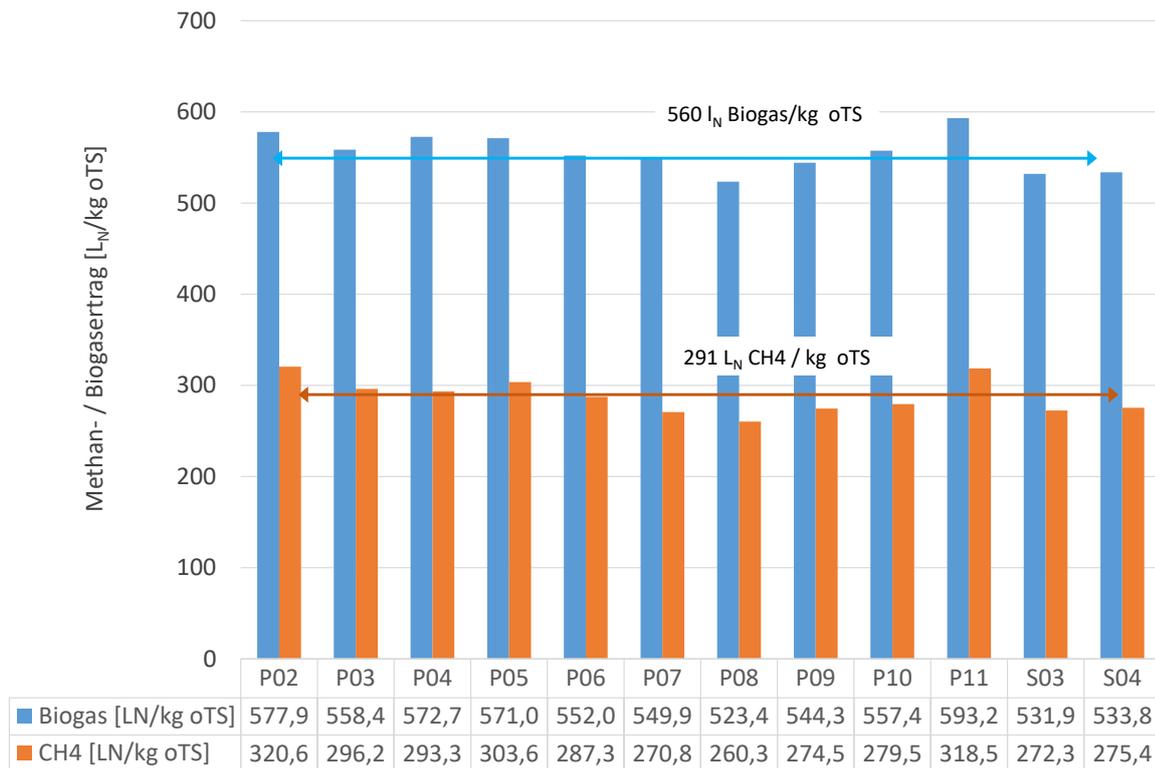


Abbildung 15: Methan- und Biogaserträge der Pelletproben P2 bis P11

3. Herstellung von Strohpellets im Technikum

Um nachvollziehen zu können, welche Parameter sich eventuell auf die Vergärung von Strohpellets auswirken könnten, wurden im Technikum der HAWK Pellets aus Weizenstroh hergestellt. In einer Pelletieranlage, welche in Abbildung 16 dargestellt ist, konnten nach einer langen Adaptionphase mit einem Durchsatz von ca. 21 kg Stroh pro Stunde, einer rechnerischen Wasserzufuhr zwischen 12 % und 20 % und einem Matrizenlochdurchmesser von 8 mm die Pellets P11 und P12 gepresst werden. Damit das Stroh durch die Pelletieranlage verarbeitet werden konnte, musste es mithilfe einer Hammermühle vorzerkleinert werden (Abbildung 17).



Abbildung 16: Pelletieranlage im Technikum der HAWK



Abbildung 17: Hammermühle zur Vorzerkleinerung des Strohs aus Strohballen

Diese Pellets wurden mit zugekauften Strohpellets verglichen, welche aus dem gleichen Stroh hergestellt wurden. Die Pressung mit anderen Konfigurationen (Matrizenlochdurchmesser von 6 und 10 mm, länger gehäckseltes Stroh oder weniger Wasserzufuhr) führte entweder zu einem relativ schnellen Verstopfen der Matrize oder zu einer unvollständigen Pressung, sodass geschlussfolgert werden kann, dass eine Herstellung von Strohpellets im getesteten Kleinmaßstab ohne Pelletierhilfsmittel wie Stärke nur in einem sehr eng definierten Parameterrahmen möglich ist. Als maßgeblicher Parameter hat sich dabei die Menge an

zugeführtem Wasser und dessen Verteilung im Stroh herausgestellt. Nur kleine Abweichungen des optimalen Wassergehaltes führten zu Störungen im Prozess, sodass der Versuch abgebrochen werden musste. Für eine großtechnische Umsetzung sind diese Einschränkungen allerdings weniger relevant und haben einen geringen Einfluss auf die Realisierbarkeit der Strohpelletierung im industriellen Maßstab.

Die Beschreibungen der hergestellten Pellets sowie der zugekauften Strohpellets zum Vergleich sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Form, Aussehen und Beschaffenheit der im Technikum hergestellten und zugekaufter Strohpellets

Bezeichnung	Form, Aussehen	Farbe	Größe der Pellets	Pressverfahren
eigene Herstellung aus Weizenstroh				
Weizenstrohpellets PI 1	dünn, locker gepresst, homogen, hoher Krümelanteil, Oberfläche matt	beige	Länge: 5-15 mm Durchmesser: 8 mm	stationär Technikum
Weizenstrohpellets PI 2	fest gepresst, hoher Krümel- und Faseranteil, Oberfläche leicht glänzend	beige	Länge: 10-20 mm Durchmesser: 8 mm	stationär Technikum
Weizenstrohpellets Zukauf Vergleich	fest gepresst, homogen, kaum Krümelanteil, Oberfläche leicht glänzend	beige	Länge: 5-20 mm Durchmesser: 8 mm	stationär

Die Pellets PI1 weisen eine geringere Festigkeit auf, haben einen höheren Krümelanteil und neigten zur Schimmelbildung. Die Pellets PI2 hingegen wiesen eine hohe Homogenität und Festigkeit auf und hatten eine glatte Oberfläche.



Abbildung 18: Strohpellets PI 1 und PI 2, eigene Herstellung

Wie in Abbildung 18 dargestellt, weisen die Strohpellets PI1 und PI2 sehr unterschiedliche Trockensubstanzgehalte von 81 % und 91 % FS auf. Dabei liegen diese unter dem mittleren TS-Gehalt von 92 % FM der elf Strohpelletproben, die in Kapitel 1.3 dargestellt wurden. Die Schüttdichten der hergestellten Pellets lagen bei 406 kg/m³ (PI1) und 592 kg/m³ (PI2). Aufgrund des geringeren Trockensubstanzgehalts und der geringeren Pressdichte ist auch die Schüttdichte bei den Pellets PI1 geringer.

4. Entwicklung und Bau einer Technikums-Versuchsanlage

Die 10-zügige Versuchsanlage für die Untersuchung der kontinuierlichen Vergärung unterschiedlicher Substratmischungen wurde seitens der HAWK geplant und konstruiert. Der Schaltschrank wurde im Unterauftrag hergestellt.

Folgende Prinzipien wurden bei der Entwicklung der Versuchsanlage verfolgt: Ziel war die Konstruktion von 10 baugleichen Fermentern, die mittels Wassermantel unabhängig voneinander temperiert werden. Eine Homogenisierung des Fermenterinhalt soll bis zu einem TS-Gehalt von 12 % bezogen auf die Frischmasse möglich sein. Um dies zu erreichen kommt eine spezielle Konstruktion der Rührorgane zum Einsatz, die aus zwei spiralförmig angeordneten Halbkreisen bestehen, die über senkrechte Stäbe stabilisiert werden. Die Erfassung der Gasvolumina erfolgte mittels Trommelgaszähler der Firma Ritter. Die Analyse der

Gaszusammensetzung erfolgte mittels externem Gasmessgerät. Der Überlauf der Fermenter ist so konstruiert, dass er in ein Siphonglas mündet. Bei Überlaufen des Fermenterinhalt aufgrund eines Aufschäumens des Gärsubstrats kann der Fermenterinhalt aufgefangen und in den Fermenter zurückgeführt werden.

Das entwickelt Rührorgan ist geeignet, um im Versuchsmaßstab eine gute Durchmischung bei TS-Gehalten bis 12 % zu erzielen (vgl. Abbildung 19 b). Die fertiggestellte Versuchsanlage ist in den Abbildung 19 a) und c) gezeigt.



Abbildung 19: a) 10-zügige Versuchsanlage, b) Rührwerk für hohe TS-Gehalte, c) Fermenteransicht

Die Anlage ist darauf ausgelegt, 5 Varianten in Doppelbestimmung zu untersuchen. Die Fütterung erfolgt über einen Fütterungsstutzen, in den die Substrate, ggf. angemischt mit Fermenterinhalt, mittels Trichter und Fütterungsstab eingebracht werden. Die Temperierung der Fermenter erfolgt über eine Wasserheizung. Die Temperatur des Mantels wird über ein Magnetventil geregelt. Regelgröße ist die Temperaturmessung im Inneren des Fermenters. Der Füllstand der Fermenter wird bei der Bedienung so eingestellt, dass er max. 5 cm oberhalb des Heizmantels liegt. Für die einzelnen Fermenter könnten bei Bedarf unterschiedliche Temperaturen eingestellt werden. Die Fermenter sind im Gasraum mit einem Überlaufrohr ausgestattet, das in einem Gefäß mit Wasser (1L) endet. So wird sichergestellt, dass bei Überschäumen eines Fermenters dessen Inhalt aufgefangen wird und wieder in den Fermenter zurückgeführt werden kann. So wird der Verlust von Fermentermaterial geringgehalten. Das Biogas wird jeweils über zwei Gasleitungen durch einen Siphon zu einem Trommelgaszähler geführt. Die Gasvolumina wurden digital erfasst und mittels parallel gemessener Gastemperatur und -druck auf Normbedingungen korrigiert.

Das Nutzvolumen im Fermenter beträgt 30 L. Die Durchmischung der Fermenter erfolgte unter Vorgabe von Rührintervallen und Zeiträumen für die Durchmischung.

5. Kontinuierliche Technikumsversuche

5.1 Material und Methoden der kontinuierlichen Gärtests

Die Untersuchung des Gasertragspotentials mittels kontinuierlich betriebener Fermenter erfolgte in der eigens entwickelten Versuchsanlage in Doppelbestimmung. Ziel der Untersuchung war neben der Ermittlung von Methan- und Biogasertrag unter praxisnahen Bedingungen die Erzeugung eines Gärrests, der das über einen langen Zeitraum gefütterte Substrat repräsentiert. Gemäß VDI-Richtlinie 4630 wird davon ausgegangen, dass der Gärrest nach 2-3 Verweilzeiten für die Substratmischung repräsentativ ist, sofern diese nicht verändert wurde. Die Versuche wurden unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Versuchsanlage:

- 10 (Phase 1) bzw. 8 (Phase 2) volldurchmischte Fermenter
- 30 L Nutzvolumen je Fermenter
- Temperierung auf 37 °C
- Doppelbestimmung je Variante
- arbeitstäglich: Fütterung, Bestimmung von Gasvolumen (Ritter Trommelgaszähler) und Gasqualität (Sewerin Visit04)
- wöchentliche Probenahme
- Raumbelastung bei Vollast: ~2,5 kg oTS/(m³*d) (V1 bis V8), ~3,5 kg oTS/(m³*d) (V10)

Die Zugabe der Substrate erfolgte arbeitstäglich gemäß einem Fütterungsplan. Dabei wurden die Substrate Maissilage, Zuckerrübe, Mist und Grassilage nach Vorgaben gemischt und eingefroren. Vor dem Einsatz in der Versuchsanlage wurden diese portionsweise aufgetaut. Die Rindergülle wurde alle 4 Wochen von einem Landwirt geholt und gekühlt aufbewahrt. Strohpellets und (in der letzten Phase) gehäckseltes Stroh wurden direkt vor der Fütterung in den Fermenter zu der Futtermischung dosiert. Die Futtermischung wurde mit Gärrest angemischt, der zuvor dem entsprechenden Fermenter entnommen wurde.

Die Überprüfung der Dichtigkeit der Fermenter erfolgte mittels Regelkarte. Dabei wird die Differenz der täglichen Gasbildung der beiden Fermenter in Doppelbestimmung aufgezeichnet. Optimal ist es, wenn der

Mittelwert dieser täglich ermittelten Differenzen der gebildeten Gasmenge für die identisch gefütterten Varianten 0 ergibt. Auf Basis von festgelegten Regeln aus der statistischen Prozesskontrolle lassen sich Undichtigkeiten an Fermentern frühzeitig identifizieren und beheben.

Die Untersuchung der wöchentlich aus den Fermentern gezogenen Proben erfolgte nach dem folgenden Probennahmeplan:

Tabelle 4: Frequenz der Analysen für die untersuchten Parameter

Parameter	P ₂ O ₅	N-Anteil	C-Anteil	NH ₄ -N	FOS/TAC	TS-Gehalt	oTS-Gehalt	pH	LF
Frequenz [1/Woche]	0,25	0,25	0,25	0,5	1	1	0,5	1	1

In **Tabelle 4** sind die untersuchten Substratmischungen mit entsprechenden Massenanteilen und Untersuchungszeiträumen aufgeführt. Die Varianten 1 bis 10 repräsentieren mit den angegebenen Substratmischungen unterschiedliche Regionen in Deutschland bzw. nehmen Bezug auf die großtechnischen Versuche in Relliehausen (Varianten 1 und 2 sowie 6 und 7, diese erlauben jeweils einen direkten Vergleich der Fütterung ohne bzw. mit Strohpellets).

Die Varianten 1 und 7 sind ähnliche Varianten, in der für die Standardfütterung in Relliehausen ein Teil der Maissilage durch Strohpellets ersetzt wurde. Die Varianten 2 und 6 sind Varianten mit Standardfütterung in Relliehausen. Diese Varianten wurden mit leichten Variationen doppelt durchgeführt, da der Versuchslauf in der ersten Phase zum Teil durch Prozessstörungen beeinträchtigt war.

Die Variante 3 repräsentiert die Region Nordwest. Aufgrund relativ hoher Viehhaltungsdichte ist hier eine hohe Verfügbarkeit von Gülle vorhanden. Um den Biogasertrag zu optimieren wird die Gülle mit Maissilage kombiniert.

Variante 4 repräsentiert eine Substratmischung einer NawaRo-Anlage ohne Rindermist und Rindergülle.

Variante 5 repräsentiert die klassischen Gülleanlagen, die mindestens 80 % Gülle einsetzen. Die 20 % alternative Substrate werden hier durch 6,5 % Strohpellets und 13,5 % Maissilage vertreten.

In der Variante 8 wurde versucht eine klassische Güllekleinanlage mit 20 % Strohpellets zu füttern, die 80 % Rindergülle wurden beibehalten.

Die Variante 9 repräsentiert eine Ackerbauregion mit 30 % Rindergülle, 10 % Strohpellets, 40 % Maissilage und 20 % Zuckerrübensilage. Leider konnte diese Variante aufgrund von technischen Problemen nicht in der kontinuierlichen Versuchsanlage untersucht werden.

Die Variante 10 repräsentiert den Standort Süddeutschland mit hoher Verfügbarkeit an Grassilage. Hier werden 35 % Rindergülle mit 5 % Strohpellets, 40 % Maissilage und 20 % Grassilage kombiniert.

Die Varianten V1 bis V10 und die jeweiligen Laufzeiten der ausgewerteten Versuche sind in folgender Tabelle zusammengefasst. Vor dem 7.7.2021 wurde eine Versuchsphase 1 gestartet, die aufgrund von technischen Problemen mit der Versuchsanlage abgebrochen wurde und nicht in die Auswertung der Ertragsdaten einfluss. Trotzdem sind die Analysen der Proben im Folgenden aufgeführt. Die Versuchsphase 1 wurde dann am 7.7. erneut gestartet.

Tabelle 5: Varianten der im kontinuierlichen Betrieb untersuchten Substratmischungen, Versuchsphase 1 und Versuchsphase 2

Variante	Variante 1 (Relliehausen Stroh) R1, R2	Variante 2 (Relliehausen ist) R3, R4	Variante 3 (Nordwest) R5, R6	Variante 4 (NaWaRo)	Variante 5 (Gülle-Anlage, 75 kW)	Variante 6 Relliehausen (Stroh raus)	Variante 7 Relliehausen (mit Stroh)	Variante 8 (Gülleanlage)	Variante 9 (A2 70% Mais/Rübe 30% W-)	Variante 10 (Grünland/Süd deutschland)
Versuchs-Zeitraum	7.7. - 3.11.21	7.7. - 3.11.21	7.7. - 3.11.21	7.7.-3.11.23, R7 am 3.9. abgebrochen	7.7. - 3.11.21	21.4.-26.9.22	21.4.-26.9.22	21.4.-26.9.22		21.4.-18.08.22
	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]
Rinderfestmist	20,3	20,0				20,0	21,7			
Rindergülle	25,4	25,0	40,0		80,0	25,0	27,2	80,0	30,0	35,0
Strohpellets bzw. Häckselstroh	3,6		8,1	4,0	6,6		5,4	20,0	10,0	5,0
Maissilage	25,4	30,0	51,9	71,0	13,4	30,0	18,5		40,0	40,0
Grassilage										20,0
Zuckerrübensilage	25,4	25,0		25,0		25,0	27,2		20,0	

Im Verlauf der Versuche wurde mehrfach die Frage aufgeworfen, ob die Fütterung von Strohpellets im Hinblick auf die Rührbarkeit des Fermenterinhalt deutliche Vorteile gegenüber der Fütterung von Häckselstroh hat. Aus diesem Grunde wurden zusätzlich die Varianten 7a/7b, 8a/8b und 11a/11b untersucht (a jeweils mit Stroh, b mit Pellets). Bei 7a/7b wurde zum Animpfen eine Mischung aus Reaktorinhalt der Varianten 6 und 7 im Verhältnis 1:1 hergestellt. Für die Varianten 8a und 8b wurde Reaktorinhalt aus Variante 8 zu gleichen Teilen mit separiertem Gärrest aus einer Güllekleinanlage versetzt. Für die Varianten 11a /11b wurde als Animpfmateriel wiederum das Material aus der Variante 8b mit dem separierten Gärrest aus der Güllekleinanlage versetzt. Aus Sicht der Fütterung sind die Varianten 7b und 8b Fortsetzungen der Varianten 7 bzw. 8 aus der vorangegangenen Versuchsphase.

Nachdem die Variante 8a (Gülle/Häckselstroh) schon nach 2 Wochen in der untersuchten Versuchskonstellation nicht mehr rührfähig war, wurden die Varianten 8a und 8b abgebrochen und durch die Varianten 11a und 11b ersetzt.

Bei der Variante 11 wurde der Einsatz von Gülle/Zuckerrübe und Stroh untersucht. Für 11a wurden 3 Teile Zuckerrübe mit einem Teil Häckselstroh versetzt, in dem Zustand tiefgefroren und vor Einsatz aufgetaut. Somit fand ein Durchfeuchten des Strohs mit der zerkleinerten Zuckerrübe statt. In Variante 11b wurden die drei Fraktionen Zuckerrübe, Strohpellets und Rindergülle einzeln gefüttert. Mit diesem Vergleich sollte untersucht werden, ob diese Kombination und das vorherige Einweichen des Häckselstrohs einen Vorteil für die Fütterung und die Rührbarkeit bringen, der möglicherweise die Nachteile des Häckselstrohs gegenüber den Strohpellets ausgleichen kann.

Die maximale Raumbelastung lag für die Variante 10 bei 3,5 kg oTS/(m³*d) und für alle anderen Varianten bei 2,5 kg oTS/(m³*d).

Tabelle 6: Varianten der im kontinuierlichen Betrieb untersuchten Substratmischungen, Versuchsphase 3

Variante	Versuchsphase 3					
	Variante 7a Relliehausen (mit Häckselstroh)	Variante 7b Relliehausen (mit Strohpellets)	Variante 8a Gülle Häcksel- stroh	Variante 8b Gülle Strohpellet s	Variante 11a Gülle Rübe Häckselstroh	Variante 11b Gülle Rübe Strohpellets
Versuchs-Zeitraum	26.9.23 - 15.2.23 bzw. bis 3.2.23	26.9.23 - 15.2.23	26.09.2022 - 10.10	26.09.2022 - 10.10	28.11.- 2.2.23	28.11.- 2.2.23
	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]
Rinderfestmist	21,7	21,7				
Rindergülle	27,2	27,2	80,0	80,0	60,0	60,0
Strohpellets bzw. Häckselstroh	5,4	5,4	20,0	20,0	10,0	10,0
Maissilage	18,5	18,5				
Grassilage						
Zuckerrübensilage					30,0	30,0

5.2 Ergebnisse der kontinuierlichen Technikumsversuche aus Versuchsphase 1 und 2

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche in den kontinuierlich betriebenen Fermentern dargestellt. Dabei wird der anhand der Batchuntersuchungen prognostizierte Methanertrag mit dem tatsächlich ermittelten Methanertrag bei einer Raumbelastung von 3,5 kg oTS/(m³*d) für die Variante 10 bzw. 2,5 kg oTS/(m³*d) für die anderen Varianten gezeigt.

Die Varianten V1 und V2 repräsentieren den großtechnischen Versuch in der Biogasanlage in Relliehausen in der Phase 1. Im Basisszenario ohne Strohpellets (V2) werden 20 % Rinderfestmist, 25 % Rindergülle, 30 % Maissilage und 25 % Rübensilage als Substratgemisch gefüttert. 1 Mg Strohpellets ersetzen bei diesem Ansatz nur 1,8 Mg der eingesetzten Maissilage. Dadurch reduziert sich bei gleichbleibenden Raumbelastung von 2,5 kg oTS/(m³*d) die gefütterte Menge um 1,4%, so dass sich die in Tabelle 2 angegebenen Substratanteile ergeben, obwohl die Massen von Rindermist, Rindergülle und Zuckerrübe absolut gesehen gleichbleiben. Die Ergebnisse der Prognose gesamt zeigen, dass im Verhältnis zur Reduzierung der Maissilage zu viel Strohpellets eingesetzt wurden. Rein rechnerisch zeigt sich, dass für den Ersatz der Maissilage 2,25 Mg Strohpellets notwendig gewesen wären. Dabei wird die Massenreduzierung durch den Einsatz der Pellets berücksichtigt.

Für beide Varianten zeigt sich ein bei den kontinuierlichen Versuchen um 3,7 % reduzierter Methanertrag im Vergleich zur Prognose. Dieser Minderertrag ist für die beiden Varianten identisch und möglicherweise auf schwankende Güllequalitäten zurückzuführen. Die Qualität der Gülle wurde daher in Phase 2 vergleichmäßig, indem jede neue Gülle auf einen konstanten TS-Gehalt von 5,4 % verdünnt wurde.

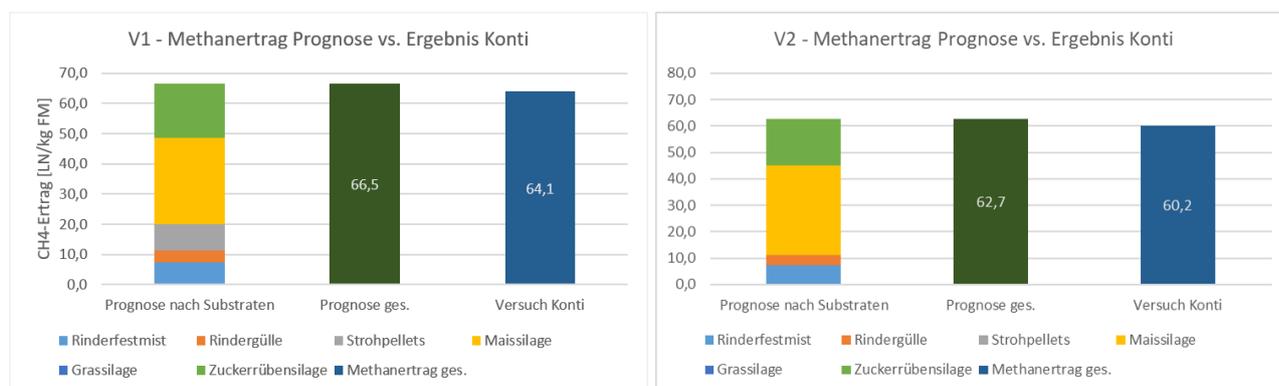


Abbildung 20: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V1 und V2

Für die Variante V3 wurde im Vergleich zur Prognose ein um 11 % verminderter Methanertrag und für die Variante V4 (NaWaRo) ein um 6 % verminderter Methanertrag ermittelt. Gründe hierfür werden im Zusammenhang mit den Analyseergebnissen diskutiert.

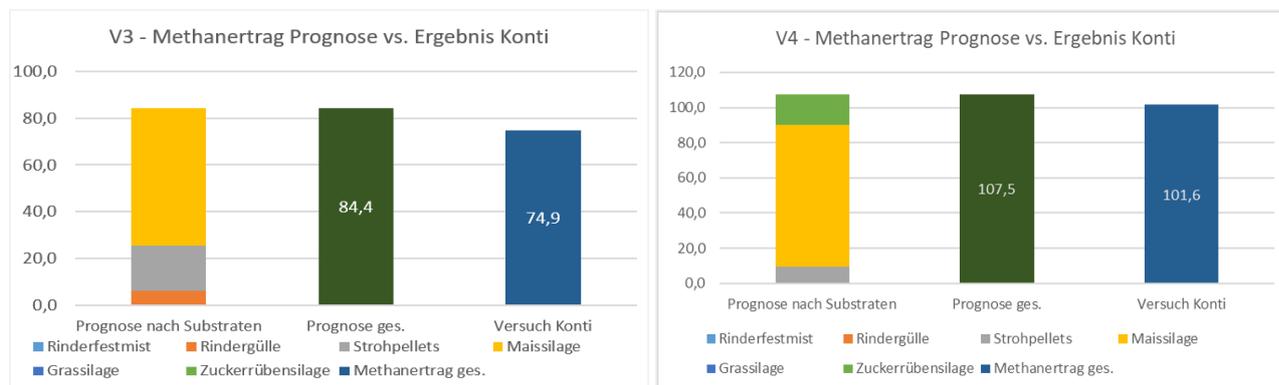


Abbildung 21: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V3 und V4

Für die Variante V5 mit einem Gülleanteil von 80 % konnten im kontinuierlichen Versuch nur 80 % des erwarteten Methanertrags ermittelt werden.

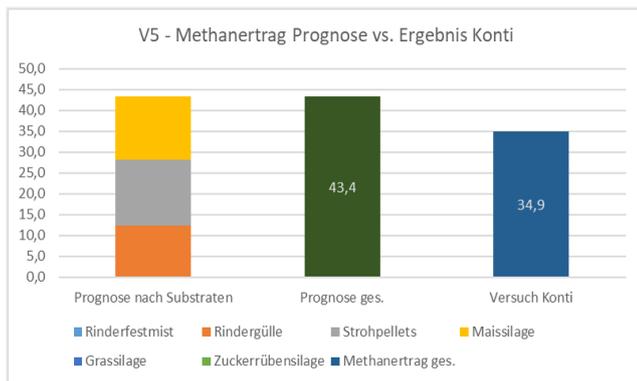


Abbildung 22: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V5

Die Varianten V6 und V7 repräsentieren den großtechnischen Versuch in der Biogasanlage in Reliehausen in der Phase 2. Im Basisszenario ohne Strohpellets (V6) werden 20 % Rinderfestmist, 25 % Rindergülle, 30 % Maissilage und 25 % Rübensilage als Substratgemisch gefüttert. In der Variante V7 werden 43 % der Maissilage durch Strohpellets ersetzt (1 Mg Strohpellets ersetzt 2,6 Mg der eingesetzten Maissilage). Dadurch reduziert sich bei gleichbleibenden Raumbelastung von 2,5 kg oTS/(m³d) die gefütterte Menge um 8 %, so dass sich die in Tabelle 2 angegebenen Substratanteile ergeben, obwohl die Massen von Rindermist, Rindergülle und Zuckerrübensilage absolut gesehen gleichbleiben.

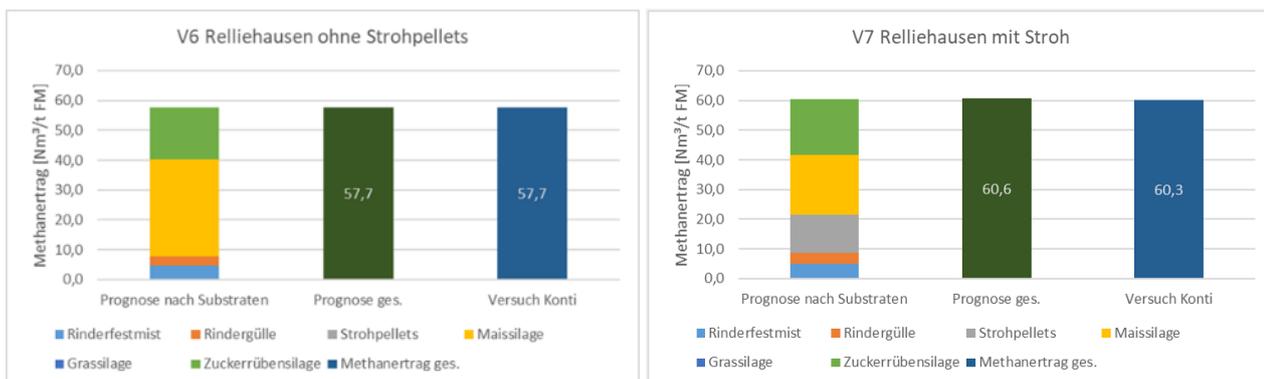


Abbildung 23: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V6 und V7

Der Vergleich der auf Basis von Batchversuchen ermittelten Methanertragungspotentiale der Einzelsubstrate mit dem Methanertragungspotential des Substratgemischs im kontinuierlich gefütterten Fermenter zeigt für die Variante V6 ein identisches Ergebnis. Für V7 liegt der mittels kontinuierlich gefütterter Fermenter ermittelte Methanertrag um 0,7% niedriger als das auf Basis der Batchversuche prognostizierte Ergebnis (vgl. Abbildung 23). Die Ergebnisse zeigen, dass die Umsetzung der Substrate bei der Variante mit Strohpellets nahezu den Erwartungen entsprach. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei Variante V7 8 % weniger Substrat eingesetzt wurde als bei der Variante V6, liegt der Methanertrag bei gleicher Raumbelastung bezogen auf das Fermentervolumen um 4 % niedriger. Berücksichtigt man den um 0,7 % reduzierten Methanertrag bezogen auf die Prognose bei Variante 7, ergibt sich der Faktor 2,25 für den Ersatz von Maissilage durch Strohpellets.

Für die Variante V8, mit einer Substratmischung aus 80 % Rindergülle und 20 % Strohpellets, wird auf Basis der Ergebnisse des Methanertragungspotentials ein spezifischer Methanertrag von 58,5 L_N CH₄/kg FM prognostiziert. Diese Prognose wird um 15 % unterschritten. Ein Teil der Abweichung ist möglicherweise dadurch begründet, dass die Güllequalität nicht immer gleich war und die Prognose für den Gülleanteil nur auf ein Ergebnis des Methanertragungspotentials im Batchversuch zurückzuführen ist. Außerdem wird anhand der Abbildung 24 deutlich, dass ca. 5/6 des Methanertrags gemäß Prognose auf die Strohpellets zurückzuführen sind und somit ein großer Anteil der Defizite mit hoher Wahrscheinlichkeit in Zusammenhang mit einem unvollständigen Abbau der Strohpellets steht.

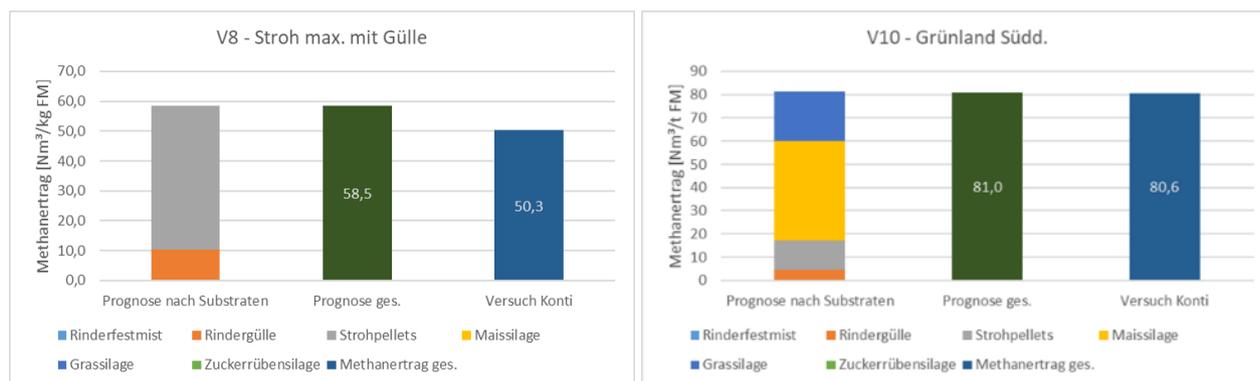


Abbildung 24: Methanertrag Prognose vs. ermitteltes Ergebnis V8 und V10

Allerdings ist nicht grundsätzlich davon auszugehen, dass ein hoher TS-Gehalt im Fermenter zu einem reduzierten Abbau der Strohpellets führt. So wurde für die Variante V10 trotz einer Raumbelastung von 0,35 kg oTS/(m³*d) und einem TS-Gehalt im Fermenter von 13,6 % für die Substratmischung mit 35 % Rindergülle, 5 % Strohpellets, 40 % Maissilage und 20 % Zuckerrübensilage ein um nur 0,4 % geringeres Ergebnis als in der Prognose ermittelt. Möglicherweise hängt der Abbau der Strohpellets in einer Substratmischung von den Co-Substraten ab. Denkbar ist, dass die Anwesenheit leicht abbaubarer Substrate die Vergärung von Strohpellets begünstigt.

In den folgenden 2 Tabellen werden im Überblick die Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche inkl. dem Vergleich von Prognose und erzieltem Methanertrag dargestellt. Die Tabellen sind folgendermaßen aufgebaut:

Im oberen Teil werden die eingesetzten Substrate hinsichtlich TS, oTS, Methanertrag und Methangehalt charakterisiert. Diese Daten fließen in das Prognosetool zur Auswertung der zu erwartenden TS-Gehalte im Fermenter ein (vgl. Kapitel 5.5). In diesem Tool werden auf Basis der ermittelten Gasertragsdaten für die Mischung TS, oTS und Methanertrag prognostiziert.

Die Methan- und Biogaserträge sowie der Methangehalt des Biogases ergeben sich aus den kontinuierlichen Versuchen. Ausgewertet wurden dafür die letzten 4 Wochen der jeweiligen Versuchsphase. Außerdem sind in der Tabelle charakteristische Daten wie täglich gefütterte Menge (bei Volllast), Verweilzeit im Fermenter und Raumbelastung dargestellt.

Des Weiteren werden die tatsächlichen, aus dem kontinuierlichen Versuch ermittelten Methanerträge mit den auf Basis der Batchversuche prognostizierten Erträgen verglichen. Außerdem wird der auf Basis des Prognosetools berechnete oTS-Abbau mit dem in den Versuchen ermittelten verglichen.

Für die in Tabelle 7 dargestellten Ergebnisse der Versuchsphase 1 konnte für die Reliehäusen-Varianten V1 und V2 eine Wiederfindungsrate von 96 % ermittelt werden. Die Prognose des oTS-Abbaus ist etwas geringer als die tatsächlichen Ergebnisse, wobei allerdings auch kleinere Differenzen aufgrund nicht-idealer Durchmischung im Fermenter und somit Entnahme nicht 100 % repräsentativer Proben auftreten können. Für die Variante V3 wurden 89 % des prognostizierten Methanertrags ermittelt. Dies geht einher mit einem TS-Gehalt von 13,1 %. Möglicherweise war der Abbau durch den hohen TS-Gehalt und die dadurch verringerte Durchmischung reduziert. Dies spiegelt sich auch im oTS-Abbaugrad wider, der deutlich hinter der Prognose zurückbleibt. Für die NawaRo-Variante werden 94 % des prognostizierten Methanertrags erzielt. Der TS-Gehalt im Fermenter liegt niedriger als der prognostizierte. Trotz des hohen TS-Gehalts in der Substratmischung kann für diese Substratmischung ein sehr guter oTS-Abbaugrad realisiert werden, der über den Erwartungen liegt. Das Vorhandensein von Zuckerrübe hat möglicherweise günstige Auswirkungen auf den Abbau des Substratgemischs und begünstigt den TS-Gehalt im Fermenter.

Für die Variante V5 mit einem Anteil von 80 % Rindergülle, 6,6 % Strohpellets und 13,4 % Maissilage lagen die ermittelten Methanerträge um 20 % unterhalb der Prognose. Der deutliche Minderertrag geht mit einer relativ kurzen Verweilzeit von 53,4 Tagen einher. Möglicherweise ist dies der Grund dafür, dass der Abbau der Substrate deutlich weniger weit fortgeschritten war als bei den anderen Substratgemischen.

Tabelle 7: Überblick Ergebnisse kontinuierliche Technikumsversuche Phase 1

Parameter	Daten der Batchuntersuchungen für die Prognose				Variante 1 (Reliehause n mit Stroh) R1, R2	Variante 2 (Reliehause n ohne Stroh) R3, R4	Variante 3 (Nordwest) R5, R6	Variante 4 (NaWaRo) R7, R8	Variante 5 (Gülle- Anlage), R9, R10
	TS [%]	oTS [%TS]	Methan- gehalt [%]	Methan- ertrag [m ³ /t]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]
Rinderfestmist	21,2	74,1	0,56	36,5	20,3	20,0			
Rindergülle	9,0	80,0	0,58	15,5	25,4	25,0	40,0		80,0
Strohpellets bzw. Häckselstroh	92,7	92,0	0,52	239,6	3,6		8,1	4,0	6,6
Maissilage	30,9	95,0	0,54	113,3	25,4	30,0	51,9	71,0	13,4
Grassilage									
Zuckerrübensilage	21,0	90,3	0,55	70,0	25,4	25,0		25,0	
TS erwartet [%]					11,1	9,5	12,0	12,1	9,7
oTS erwartet [%]					71,6	70,1	77,4	78,9	75,3
Methanertrag erwartet [m ³ CH ₄ /t FM]					66,5	62,7	84,4	107,5	43,4
Methanertrag erwartet [m ³ CH ₄ /t oTS]					329,9	343,0	336,5	371,0	282,1
TS rechnerisch Input [%]					22,8	20,7	27,2	30,9	17,5
oTS rechnerisch Input [% TS]					88,4	88,3	92,2	93,8	87,9
oTS rechnerisch Input [% FM]					20,2	18,3	25,1	29,0	15,4
Methanertrag IST [m ³ CH ₄ /t FM]					64,1	60,2	74,9	101,6	34,9
Methanertrag IST [m ³ CH ₄ /t oTS]					318,0	329,4	298,7	350,5	226,9
Biogasertrag IST [m ³ Biogas/t FM]					122,8	118,3	142,6	190,2	64,7
Biogasertrag IST [m ³ Biogas/t oTS]					609,3	647,2	568,6	656,2	420,6
Mittlerer Methangehalt					52%	51%	53%	53%	54%
Täglich gefütterte Menge					0,58	0,60	0,50	0,41	0,78
Verweilzeit im Fermenter [Tage]					71,6	69,5	83,4	101,2	53,4
Raumbelastung [kg oTS/m ³ /d]					2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
TS Fermenter gemessen [%]					12,6	11,3	13,1	11,4	11,2
oTS Fermenter gemessen [%TS]					67,8	66,0	82,9	74,5	83,0
Vergleich des experimentell bestimmten Methanertrags mit dem auf Basis der Batchversuche bestimmten					96%	96%	89%	94%	80%
oTS Abbaugrad ist					0,72	0,74	0,59	0,81	0,33
oTS Abbaugrad Prognose					0,66	0,68	0,7	0,75	0,55

In der Versuchsphase 2 (vgl. Tabelle 8) konnte für die Varianten V6, V7 und V10 nahezu 100 % der prognostizierten Methanerträge in den kontinuierlichen Versuchen realisiert werden. Allerdings war die Rührbarkeit der Variante V10 in der Endphase nicht mehr vollständig gegeben, so dass der Versuch vorzeitig beendet wurde.

Bei Variante V8, bei der ein Substratgemisch aus 80 % Rindergülle und 20 % Strohpellets eingesetzt wurde, war der Abbau mit 86 % des prognostizierten Gasertrags zwar auch deutlich niedriger als in den anderen Varianten dieser Versuchsphase, aber dennoch besser als bei der Variante V5. Dies könnte einerseits auf den niedrigeren TS-Gehalt der Rindergülle und die bessere Rührbarkeit oder aber auch auf die längere Verweilzeit im Fermenter zurückzuführen sein.

Der prognostizierte oTS-Abbaugrad liegt für die Varianten V1, V2, V4, V6, V7 und V10 oberhalb der Prognose. Dies spiegelt sich allerdings nicht immer im Vergleich der Methanertragsprognosen mit den ermittelten Methanerträgen wieder. Möglicherweise war die Bestimmung der TS- und oTS-Gehalte zu ungenau oder es war aufgrund der schlechten Rührbarkeit der Gärreste keine repräsentative Probenahme möglich.

Die kontinuierlichen Versuche für die Variante V9 konnten aufgrund technischer Probleme nicht durchgeführt werden, so dass zwar prognostizierte Werte in der Tabelle dargestellt wurden, aber kein Abgleich mit den gemessenen erfolgen konnte.

Tabelle 8: Überblick Ergebnisse kontinuierliche Technikumsversuche Phase 2

Parameter	Daten der Batchuntersuchungen für die Prognose				Variante 6 Relliehausen ohne Stroh, R1, R2	Variante 7 Relliehausen mit Stroh, R3, R4	Variante 8 Gülleanlagen , R7, R8	Variante 9 (A2 70% Mais/Rübe 30% W-	Variante 10 (Grünland/Süd deutschland), R9, R10
	TS [%]	oTS [%TS]	Methan- gehalt [%]	Methan- ertrag [m ³ /t]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]
Rinderfestmist	21,2	74,1	0,56	23,2	20,0	21,7			
Rindergülle	5,4	84,3	0,58	12,9	25,0	27,2	80,0	30,0	35,0
Strohpellets bzw. Häckselstroh	89,6	92,7	0,52	250,8		5,4	20,0	10,0	5,0
Maissilage	29,9	97,2	0,54	107,9	30,0	18,5		40,0	40,0
Grassilage	37,1	89,7	0,50	106,5					20,0
Zuckerrübensilage	21,0	90,3	0,55	70,0	25,0	27,2		20,0	
TS erwartet [%]					9,4	11,3	12,1	11,3	12,2
oTS erwartet [% TS]					74,5	74,3	80,8	78,6	82,6
Methanertrag erwartet [m ³ CH ₄ /t FM]					57,7	60,6	58,5	84,5	81,0
Methanertrag erwartet [m ³ CH ₄ /t oTS]					325,6	307,4	289,3	341,0	337,8
TS rechnerisch Input [%]					19,8	22,2	22,2	26,7	25,7
oTS rechnerisch Input [% TS]					89,5	88,8	91,1	92,8	93,3
oTS rechnerisch Input [% FM]					17,7	19,7	20,2	24,8	24,0
Methanertrag IST [m ³ CH ₄ /t FM]					57,7	60,3	50,3		80,6
Methanertrag IST [m ³ CH ₄ /t oTS]					325,6	305,9	248,7		336,1
Biogasertrag IST [m ³ Biogas/t FM]					111,4	113,9	92,5		136,6
Biogasertrag IST [m ³ Biogas/t oTS]					628,6	577,8	457,4		569,7
Mittlerer Methangehalt					52%	53%	54%		59%
Täglich gefütterte Menge					0,60	0,54	0,52		0,61
Verweilzeit im Fermenter [Tage]					70,5	77,5	81,4		68,4
Raumbelastung [kg oTS/m ³ /d]					2,5	2,5	2,5		3,5
TS Fermenter gemessen [%]					8,7	10,9	12,8		13,6
oTS Fermenter gemessen [%TS]					70,0	71,9	81,1		80,5
Vergleich des experimentell bestimmten Methanertrags mit dem auf Basis der Batchversuche bestimmten					100,0%	99,5%	86,0%		99,5%
oTS Abbaugrad ist					0,73	0,68	0,58		0,70
oTS Abbaugrad Prognose					0,66	0,63	0,59	0,72	0,66

5.3 Vergleichende Untersuchungen zum Einsatz von Strohpellets und Häckselstroh, Versuchsphase 3

Bei der vergleichenden Untersuchung der Substrate Strohpellets und Häckselstroh wurden die in Tabelle 6 genannten Varianten 7a/7b, 8a/8b und 11a/11b betrachtet.

Die Variante 8a/8b wurde nach einem Zeitraum von 14 Tagen abgebrochen, da die Rührfähigkeit der Varianten mit Häckselstroh nach 14 Tagen nicht mehr gegeben war. Die Variante mit Strohpellets lief schon als Variante V8 für einen Zeitraum von 158 Tagen und als V8b für den Zeitraum von 14 Tagen und war über den gesamten Zeitraum rührfähig. Der Vergleich der Gaserträge entfällt aufgrund des kurzen Zeitraums des Parallelbetriebs.

Für die Variante V7a/V7b konnten die Versuche nicht in der Detailtiefe ausgewertet werden wie für die Varianten V6 bis V10, da die Laufzeit deutlich kürzer war. Deutlich wurde, dass die Gaserträge von Häckselstroh in praxisnahen Mischungen nicht deutlich von denen von Strohpellets abweichen. Für die Varianten V7a/V7b wurde ermittelt, dass der Methanertrag bei Einsatz von Häckselstroh um 2,6 % niedriger liegt. Bei V11a/V11b scheint die Variante mit Häckselstroh/Rübe leichte Vorteile zu bringen (3 % höhere Methanerträge bezogen auf Frischmasse). Insgesamt wurde allerdings beobachtet, dass bei der Fütterung von Häckselstroh eine höhere Wahrscheinlichkeit von Prozessstörungen durch beeinträchtigte Rührfähigkeit zu beobachten ist. Das Einsilieren von Häckselstroh mit dem Substrat Rübe scheint einen positiven Einfluss auf die Rührfähigkeit im Fermenter zu haben. Weitere Untersuchungen könnten hier noch detailliertere Aussagen liefern.

5.4 Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche

Während der kontinuierlichen Versuche an der 10-zügigen Versuchsanlage beim Fachgebiet NEUTec der HAWK wurden regelmäßig Fermenterproben gezogen und analysiert. Dabei wurden die Parameter bzw. Elemente Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, Anteil Kohlenstoff, Anteil Stickstoff, C/N-Verhältnis, Leitfähigkeit, FOS, TAC, FOS/TAC, pH, NH₄-N, o-Phosphat, Molybdän, Nickel, Kobalt, Magnesium, Calcium, Kalium, Schwefel, Chlor Selen, Silicium und Pentosane analysiert. Die analytischen Methoden sind in Kapitel 1.1 beschrieben.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden auszugsweise dargestellt. Die Zuordnung zu den unterschiedlichen Versuchsphasen 1, 2 und 3 erfolgt in den Grafiken. Die jeweiligen genutzten Fermenter

werden den Varianten 1 bis 12b zugeordnet. Im Folgenden wird ausschließlich auf Besonderheiten Bezug genommen, die im Zusammenhang mit der Fütterung der Strohpellets stehen.

In Phase 1 werden für die Relliehausen-Varianten mit und ohne Strohpellets relativ geringe Unterschiede im TS-Gehalt ermittelt. Für die Variante V3 Nord-West liegen die TS-Gehalte mit bis zu >13 % sehr hoch. Möglicherweise ist der hohe TS-Gehalt dafür verantwortlich, dass der Methanertrag unterhalb der Prognose liegt. Auch bei der Variante V5 liegt der Methanertrag deutlich unter der Prognose. Es werden nur 75 % des erwarteten Wertes erzielt. Die TS-Gehalte im Fermenter liegen hier bei ca. 11 % und können daher nicht für eine alleinige Erklärung der Mindererträge herangezogen werden.

In Phase 2 wird deutlich, dass für sich für die Relliehausen Variante mit Strohpellets (V7) nach ca. 70 Tagen ein Gleichgewichtszustand bzgl. des TS-Gehalts einstellt. Das gleiche gilt für die Varianten V8 und V10. Die Variante V8 (80 % Gülle und 20 % Strohpellets) bleibt über den Versuchszeitraum rührfähig. Die Variante V10 hingegen muss nach einer Laufzeit von ca. 120 Tagen abgebrochen werden, da der Fermenterinhalt nicht mehr gerührt werden konnte.

In der Phase 3 wurde der Vergleich der Substrate Strohpellets und gehäckseltes Stroh untersucht. Die Fortsetzung von V8 führte für die Varianten mit Häckselstroh schon innerhalb von 12 Tagen zum Abbruch des Versuchs, obwohl der Fermenterinhalt für den Neustart mit separiertem Gärrest verdünnt wurde. Hier ist eindeutig zu erkennen, dass die Fütterung mit Häckselstroh sehr viel schneller zu einer Reduzierung der Rührfähigkeit führt als die Fütterung mit Strohpellets. Die Nachstellung der Relliehausen-Variante V7 für den Vergleich von Strohpellets und Häckselstroh zeigt, dass für beide Varianten wieder ein ähnliches TS-Niveau erreicht wird. Die Variante mit Häckselstroh (7a) weist aber früher eine schlechtere Rührbarkeit auf als die Variante mit Strohpellets (7b). Dies tritt auf, obwohl die TS-Gehalte für V7b im Mittel niedriger liegen als für V7a. Möglicherweise kommt es bei der Variante mit Häckselstroh zur Agglomeration von Stroh und zu einem schlechteren Austrag und somit an dieser Stelle zu einem Minderbefund des TS-Gehaltes bei der Analyse.

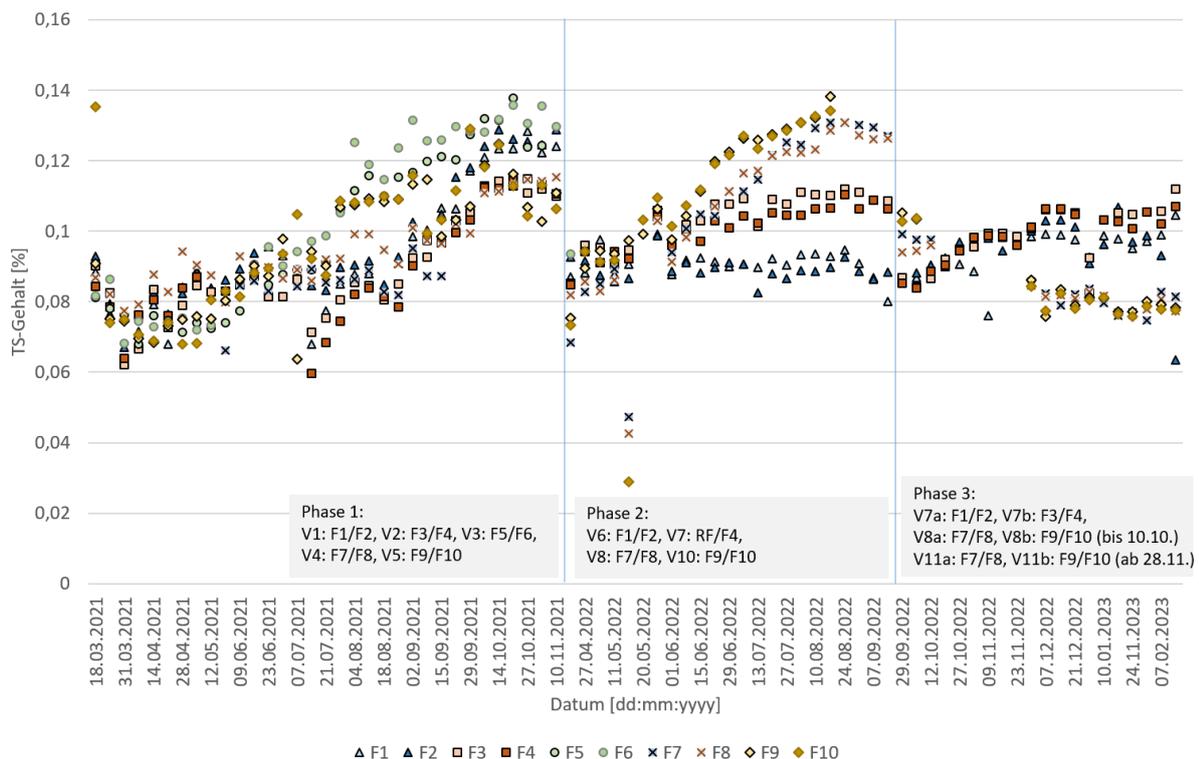


Abbildung 25: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, TS-Gehalt

In Phase 1 werden für die Relliehausen-Varianten mit und ohne Strohpellets relativ geringe Unterschiede im oTS-Gehalt ermittelt. Für die Variante V3 Nord-West und die Variante V5 Gülleanlagen liegen die Anteile an organischer Trockensubstanz mit über 80 % TS sehr hoch. Dies wird auch durch den gegenüber der Prognose deutlich geringeren oTS-Abbaugrad bestätigt (Tabelle 7).

Für die Phase 2 werden die gleichen Beobachtungen gemacht. Auch hier liegen die oTS-Gehalte für die beiden Relliehausen-Varianten relativ niedrig. Die Variante V7 Relliehausen mit Strohpellets weist gegenüber V6

leicht erhöhte oTS-Gehalte auf. Dies entspricht den Erwartungen, da der oTS-Abbau für Stroh etwas unter dem von Maissilage liegt. Das oTS-Niveau von V8 (Gülle/Strohpellets) und V10 (Grünland) liegt deutlich über dem der Relleiehausen-Varianten. Während dies für V8 mit einem Minderbefund des Methanertrags gegenüber der Prognose von 15 % einhergeht, verläuft der Abbau der Organik im kontinuierlichen Versuch bei V10 erwartungsgemäß.

Für Phase 3 wird deutlich, dass die oTS-Gehalte noch kein klares Bild zeigen, da die Laufzeit zu kurz war.

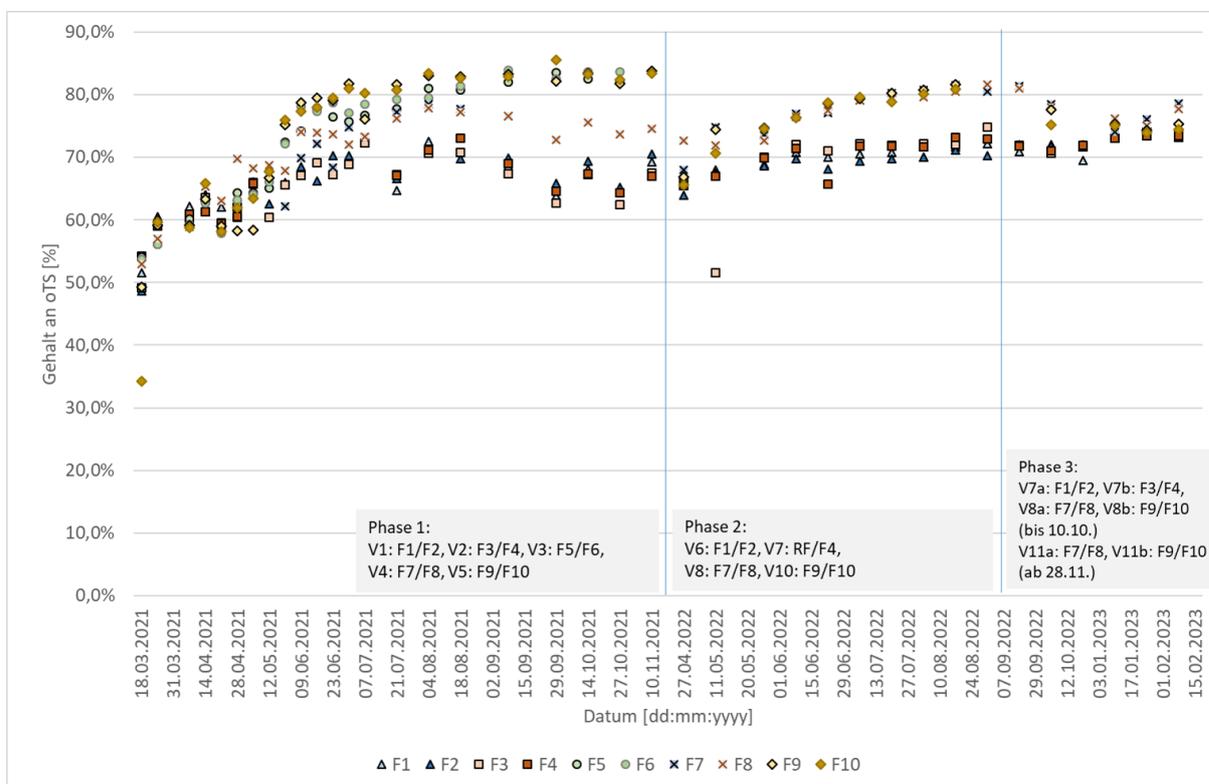


Abbildung 26: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, oTS-Gehalt

Für die Phase 2 wird hinsichtlich des C/N-Verhältnisses deutlich, dass sich bei den Relleiehausen-Varianten ein klarer Unterschied einstellt. Durch die Fütterung von 5,4 % Strohpellets ändert sich das C/N-Verhältnis im Fermenter zugunsten des Anteils an Kohlenstoff (C).

Insbesondere für die Varianten V8 stellt sich mit einem C/N-Verhältnis von ca. 20 ein hohes Niveau ein. Das C/N-Verhältnis der Varianten, deren im kontinuierlichen Versuch ermittelter Methanertrag den Erwartungen entsprach (V1, V2, V6, V7, V10), liegt im Bereich von 10 bis 15.

Die Phase 3 konnte hinsichtlich des endgültigen Niveaus des C/N Verhältnisses nicht ausgewertet werden, da der Gleichgewichtszustand nicht erreicht wurde. Bei Vergleich des C/N-Verhältnisses von V11a und V11b fällt aber auf, dass das Niveau für die Variante V11b mit Strohpellets etwas höher zu sein scheint als bei der Variante V11a, bei der Häckselstroh mit Zuckerrübe gemischt und durchfeuchtet wurde. Möglicherweise ist dies ein Indiz, dass die Mischung von Zuckerrübe mit Stroh und eine entsprechende Lagerung/Silierung sich günstig auf den Abbau auswirken.

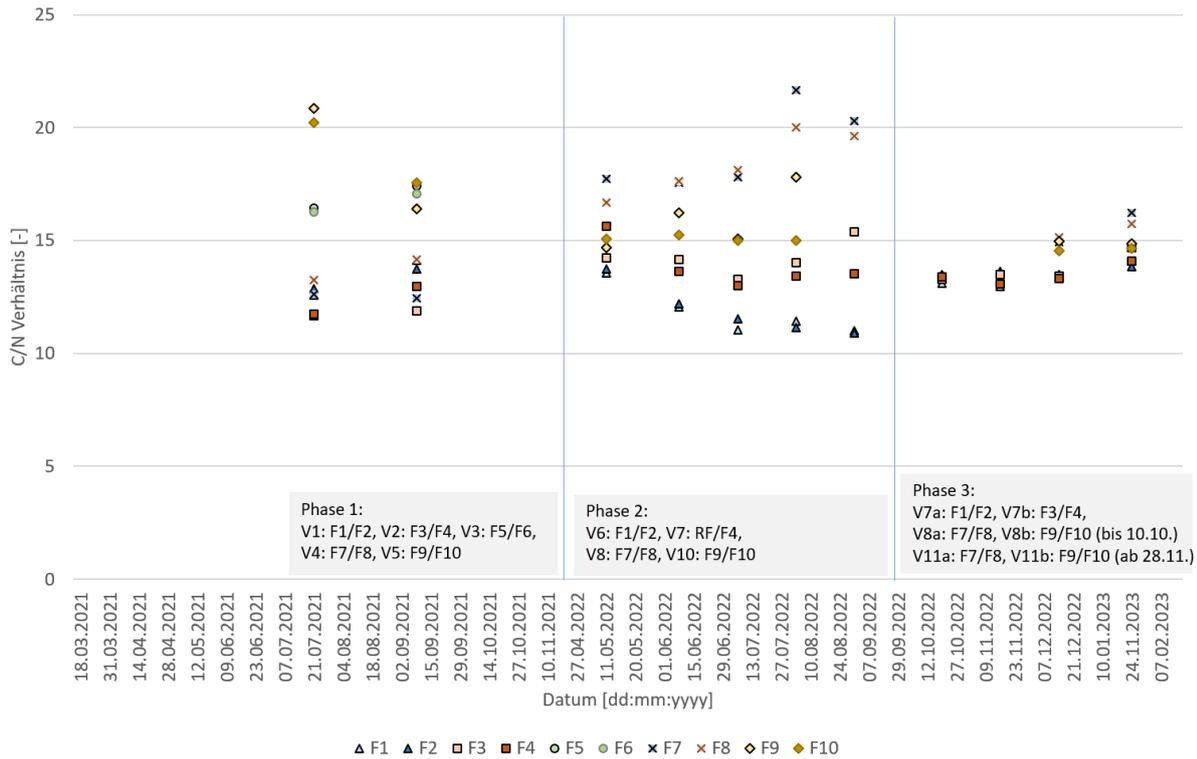


Abbildung 27: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, C/N-Verhältnis

Die Ergebnisse für den FOS/TAC (Abbildung 28) zeigen vor allem in der Phase 2 für die Variante V10 einen hohen Wert. Auch für V8 werden im Zeitraum um den 20.05. erhöhte FOS/TAC Verhältnisse bestimmt. In diesen Phasen wurde die Fütterungsmenge reduziert. Insgesamt wies die Variante V10 über den gesamten Versuch ein höheres Niveau bzgl. des FOS/TACs auf, was vermutlich durch die bei dieser Variante realisierte Raumbelastung von 3,5 kg oTS/(m³*d) hervorgerufen wurde.

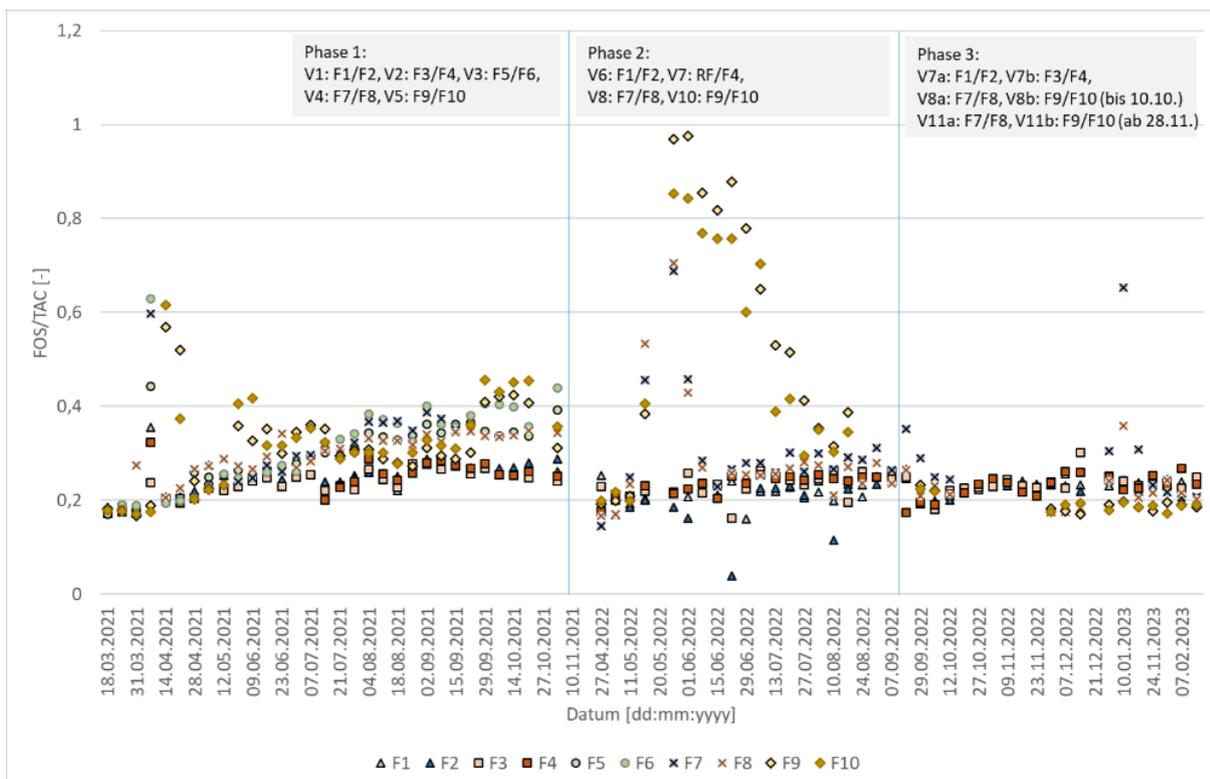


Abbildung 28: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, FOS/TAC

Die Ergebnisse für die pH-Wert-Bestimmung (Abbildung 29) in den kontinuierlichen Technikumsversuchen sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Hier lassen sich keine klaren Gesetzmäßigkeiten in Abhängigkeit von der Fütterung ableiten.

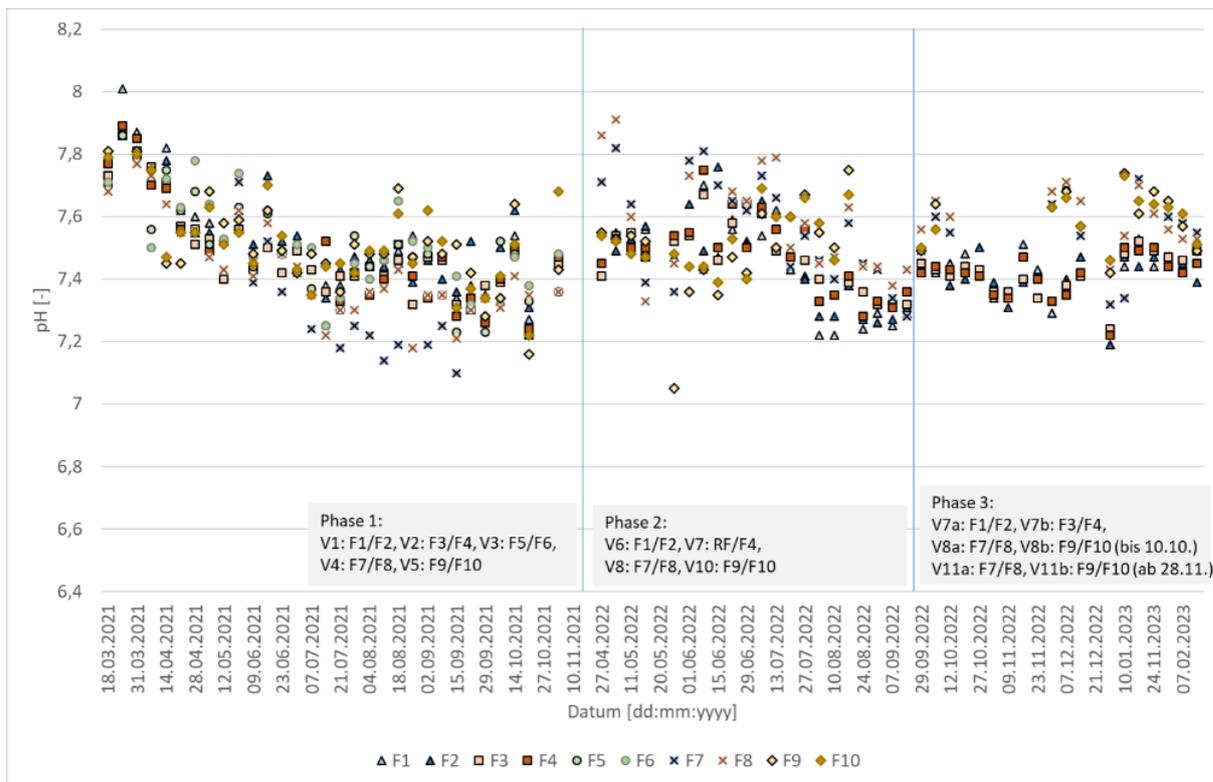


Abbildung 29: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, pH-Wert

Die Ergebnisse für die Leitfähigkeit in den kontinuierlichen Technikumsversuchen sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Auch hier lassen sich keine klaren Gesetzmäßigkeiten in Abhängigkeit von der Fütterung ableiten.

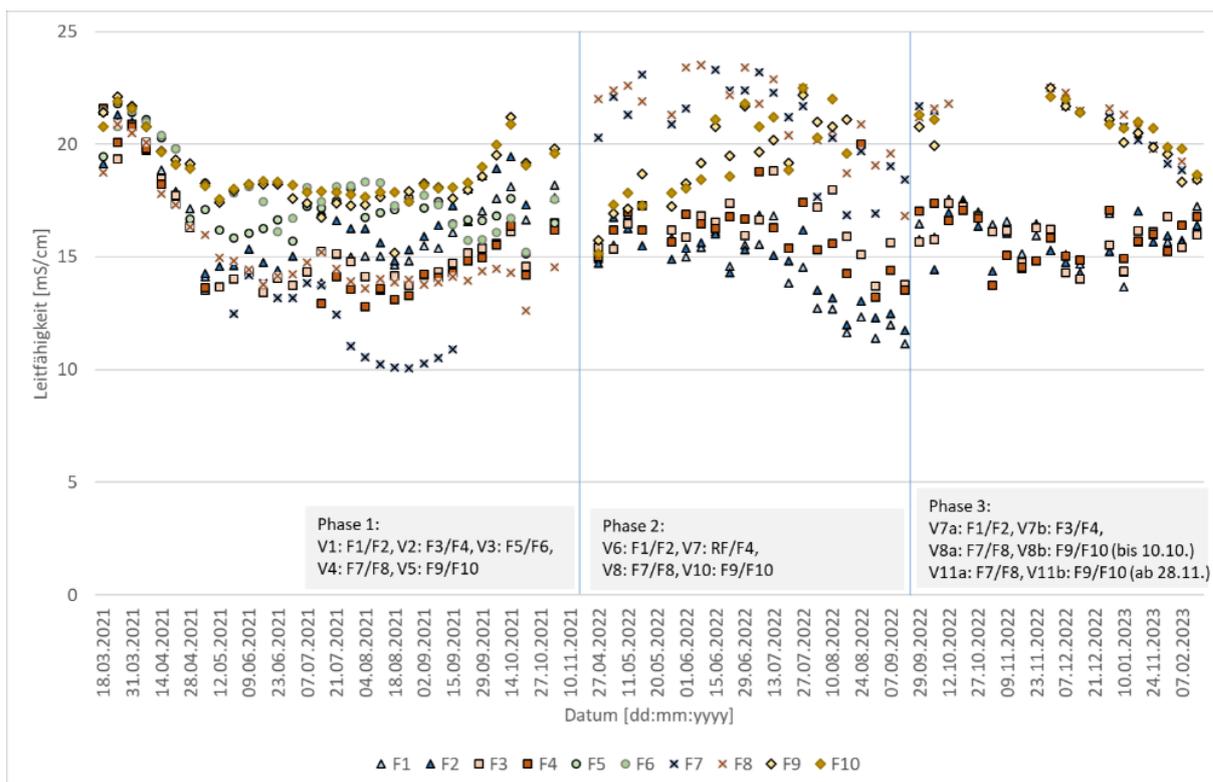


Abbildung 30: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, Leitfähigkeit

Die Ergebnisse für die Gehalte an NH₄-N (Abbildung 31) zeigen eine deutliche Substratabhängigkeit. In allen Varianten zeigen die im Verlauf der Versuche fallenden Werte, das sich in der Regel ein niedrigeres Niveau einstellt als bei den Animpfmaterialien.

In Phase 2 zeigt sich dies für die Relliehausen-Varianten V6 (ohne Strohpellets) und V7 (mit Strohpellets), bei denen ein relativ niedriges Niveau erreicht wird. Dabei liegen die Werte von V6 unterhalb derer von V7. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der relative Anteil der NH₄-N reichen Substrate wie Rindergülle und Rindermist ansteigt. Dies ist bei der Vergärung von Substratmischungen, bei denen keine Ammoniumhemmung droht, als positiv zu bewerten.

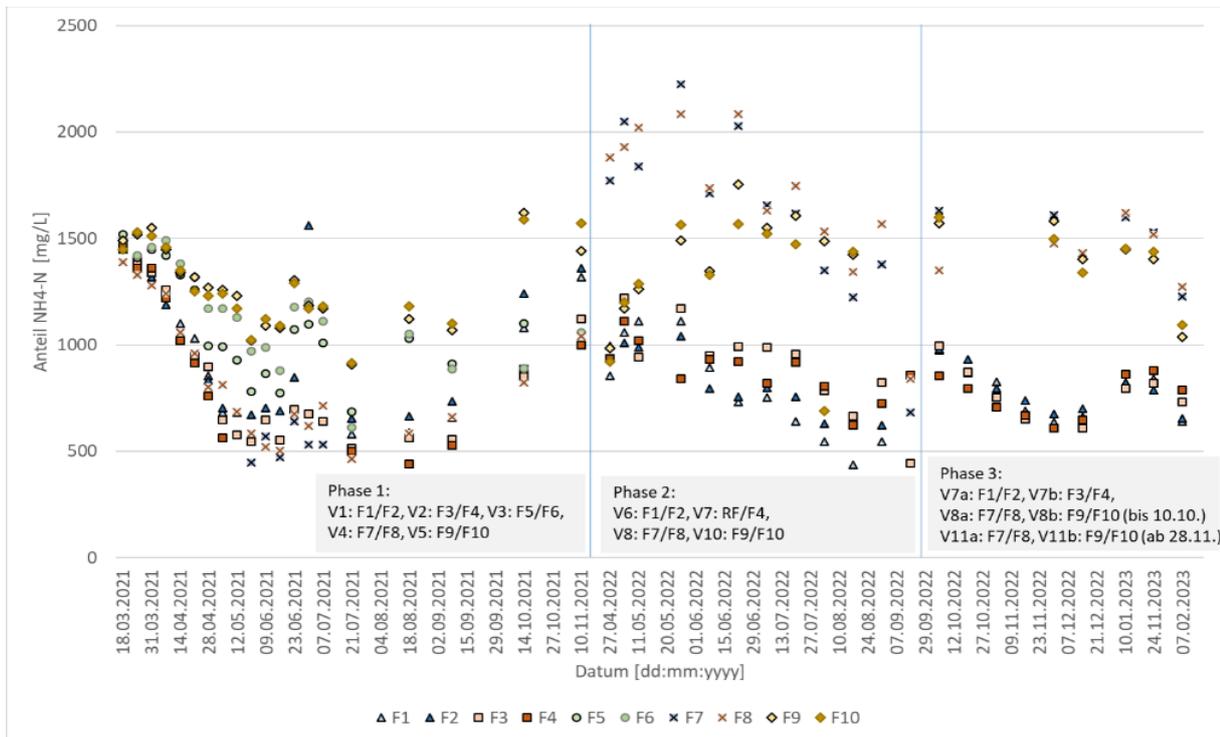


Abbildung 31: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, NH₄-N

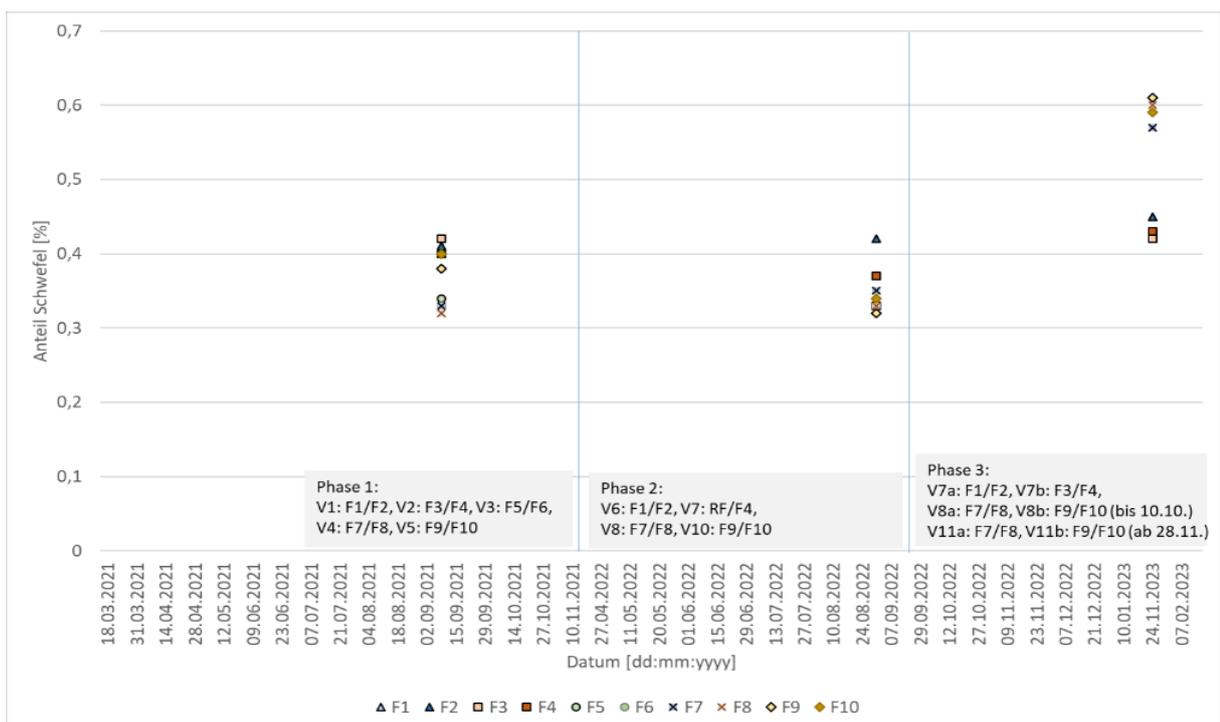


Abbildung 32: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, Schwefel-Gehalt

Die Schwefelgehalte der Fermenterproben der kontinuierlichen Technikumsversuche jeweils am Ende der Versuchslaufzeit sind in Abbildung 32 dargestellt. Ein relativ hoher Anteil an Schwefel in den Fermenterproben wird vor allem bei schwefelreichen Substratmischungen ermittelt, z.B. bei Einsatz von Zuckerrüben.

Hinsichtlich der Anteile von Chlor in den Fermenterproben (Abbildung 33) fällt auf, dass insbesondere die Varianten mit hohem Anteil an Strohpellets (V3 mit 8,1 % und V8 mit 20 %) relativ hohe Gehalte im Fermenter aufweisen. Allerdings zeigen die gleichmäßigen Schwankungen in den einzelnen Phasen für alle Substratmischungen, dass möglicherweise auch Inhaltsstoffe in der Gülle den Cl-Gehalt signifikant beeinflussen.

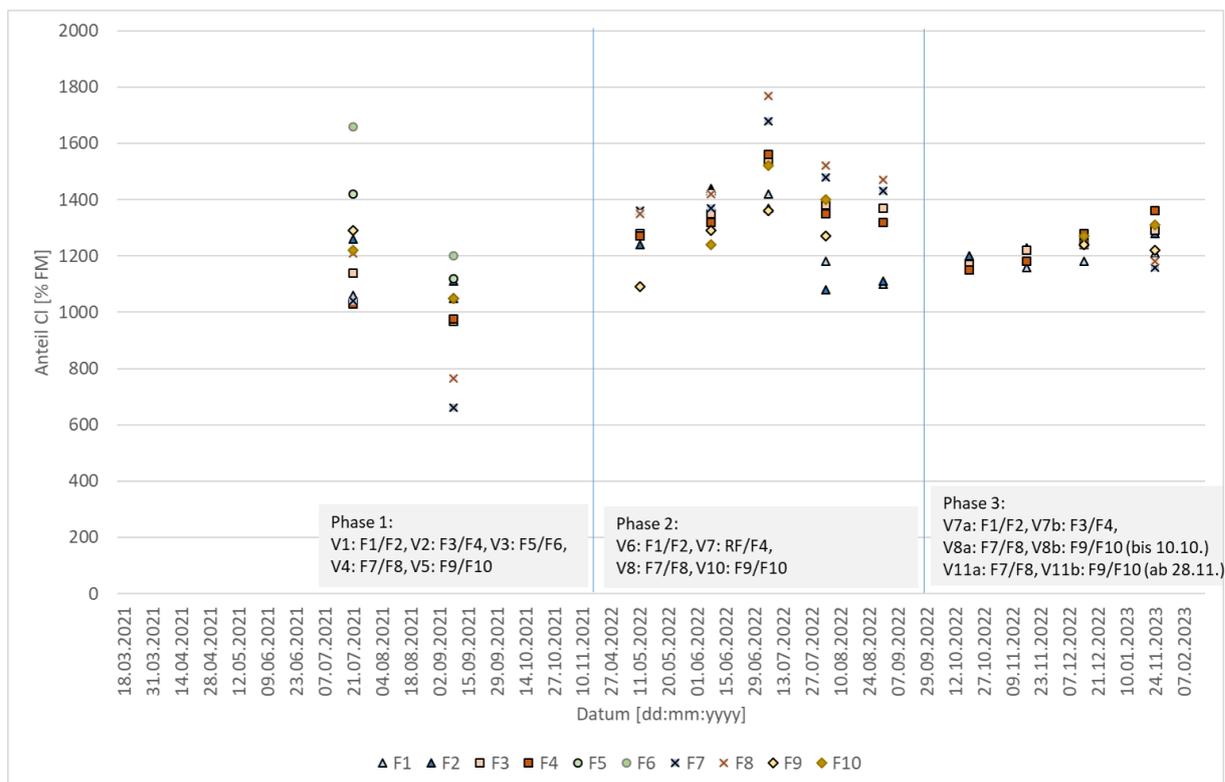


Abbildung 33: Analytische Begleitung der kontinuierlichen Versuche, Chlor-Gehalt

5.5 Modell für die Prognose des TS-Gehalts im Gärrest

Im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts wurde ein EXCEL Tool entwickelt, das der Prognose des TS-Gehalts im Fermenter dient. Hintergrund der Entwicklung dieses Tools ist, dass der sich einstellende TS-Gehalt im Fermenter von unterschiedlichen Faktoren abhängt.

Dem Prognosetool liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Die aus einem Substrat gebildete Biogasmenge führt zu einer definierten Reduktion des organischen Anteils im Substrat.
- Nach (Reinhold 2005) wird bei der Vergärung der Substrate während der Hydrolysephase Wasser aus dem Fermenter in die entstehenden Gärprodukte eingebunden und somit verbraucht. Dieser Anteil ist abhängig von der chemischen Struktur der Substrate und kann auf Basis der Gehalte an C, H, N, O, S rechnerisch ermittelt werden. In der Praxis liegen die Anteile für die Wasserreduktion zum Teil allerdings deutlich niedriger, so dass es die Möglichkeit gibt, einen praxisrelevanten Korrekturfaktor einfließen zu lassen. Dieser ist z.B. dadurch begründet, dass Oberflächenwasser in die Anlage geführt wird.
- Als Basis für das Modell dienen für die unterschiedlichen Substrate die Gasertragsdaten nach KTBL (2021) mit der Bezugsgröße σ_{TS} . Eine Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes ist für die Abschätzung obligatorisch, da es einen großen Einfluss auf den TS-Gehalt im Fermenter hat, ob beispielsweise eine NawaRo-Anlage mit einem hohen Anteil an Maissilage mit eher trockenem oder feuchten Substrat gefüttert wird. Sind dem Nutzer des Tools keine σ_{TS} -Gehalte bekannt, wird mit den seitens KTBL vorgegebenen gerechnet.
- Der Abbau des Substrats ist vollständig gemäß VDI-Richtlinie 4630; das heißt, dass die im batchversuch täglich gebildete Gasmenge weniger als 0,5 % der bis dahin gebildeten Gasmenge beträgt.

- e) Um zu überprüfen, ob die Prognose des TS-Gehaltes für den Einsatz von Strohpellets passt, kann ein Abgleich des TS-Gehaltes im Fermenter für jeden Substratmix in der Vergangenheit zur Prüfung eingegeben werden. Sollte es zu deutlichen Abweichungen kommen, sollte ein Korrekturfaktor ermittelt werden, der z.B. Berücksichtigt, dass Oberflächenwasser in die Anlage geleitet wird.
- f) Die Dichte des Biogases hängt von der Zusammensetzung des Gases (Methan- und Kohlendioxidgehalt) ab.

Das Modell für das Prognosetool unterliegt folgenden Beschränkungen:

- a) Mit dem Methanertrag gemäß KTBL werden mittlere Gaserträge angenommen, die aufgrund von Substratspezifika und Abbauspezifika von den tatsächlichen Gaserträgen abweichen können.
- b) Der Eintrag von Oberflächenwasser wird nicht anlagenspezifisch berücksichtigt und kann aufgrund von Wetterereignissen wie Starkniederschläge, Trockenphasen oder Tauwetter zu deutlichen Schwankungen führen.
- c) Die Prognose gibt einen Gleichgewichtszustand wieder, der nur erreicht wird, wenn über einen längeren Zeitraum die gleiche Substratmischung gefüttert wird. Nach VDI-Richtlinie 4630 wird davon ausgegangen, dass dieser Gleichgewichtszustand erst nach ca. 2-3 Verweilzeiten erreicht wird.
- d) Das Modell liefert eine erste Einschätzung über die möglichen Mengen an Strohpellets, deren Einsatz muss aber durch die Überwachung der TS-Gehalte und der Rührfähigkeit des Fermenterinhalts begleitet werden.

Basis der Berechnungen ist die Masse des gebildeten Biogases. Die Dichte wird anhand der in der folgenden Darstellung gezeigten Ausgleichsfunktion berechnet.

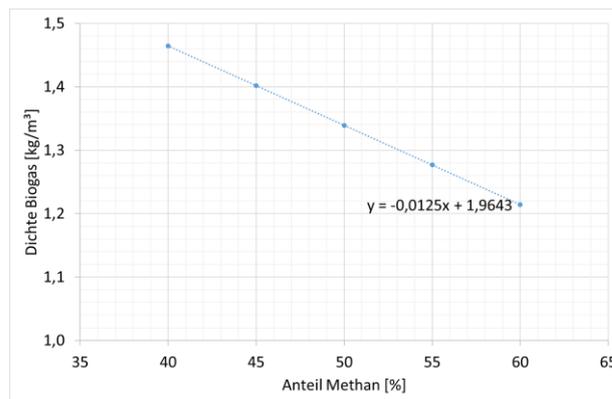
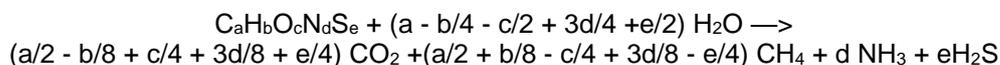


Abbildung 34: Berechnung der Biogasdichte in Abhängigkeit vom Methangehalt
(eigene Darstellung nach Reinhold 2005)

Nach Reinhold 2005 lässt sich der Anteil des notwendigen Wassers für die Bildung von Biogas aufgrund der stöchiometrischen Zusammensetzung von Substraten ermitteln.

Anhand der erweiterten Buswell-Formel



kann berechnet werden, welche Molmasse an Wasser benötigt wird, um die entsprechenden Molmassen an CH₄ und CO₂ zu erzeugen, sofern die Massenanteile der einzelnen Komponenten bekannt sind. Im Rahmen der Entwicklung des Tools wurde hierzu eine HAWK-eigene Datenbank ausgewertet, um die Zusammensetzung der Elemente für die unterschiedlichen Substrate zu ermitteln. Da die vorliegenden Daten nicht vollständig waren, wird hier nur eine qualitative Einschätzung des notwendigen Wasserbedarfs für die Bildung von Biogas in Abhängigkeit von den eingesetzten Substraten vorgenommen.



Abbildung 35: qualitative Auswertung des Wasserbedarfs unterschiedlicher Substrate für die Umsetzung zu Biogas

(eigene Ergebnisse in Kombination mit Reinhold 2005)

6. Versuche an der Praxisanlage

6.1 Durchführung der Praxisversuche

Im Rahmen der Abarbeitung der Arbeitspakete wurde in insgesamt vier Ernteperioden pelletiert. Dabei zeigte sich, dass die Schlagkraft und Effizienz sehr stark von der Getreideart, dem Reifegrad und vor allem dem Feuchtegehalt abhängen. Der erste Tau in den Abendstunden ließ die Pelletierung sofort stoppen. Gleiches gilt für zu feuchtes Stroh morgens. Zentral für eine ausreichende Effizienz ist ein gleichmäßiger Gutfuss. Der wiederum war nicht immer gewährleistet.

Ein Teil des Strohs musste witterungsbedingt zum Trocknen verteilt und wieder geschwadet werden. Hier reduzierte sich der Ertrag auf weniger als 2 t je Hektar bei Kornerträgen von 8 - 9 t je Hektar. Insgesamt waren Stroherträge selten über 60 % der Kornerträge. Sehr reifes Getreide mit sehr trockenem Stroh führte ebenfalls zu einem Ertrag von lediglich 2-3 t Stroh bei 8 t Kornertrag. Die üblichen Relationen von 0,9 t Stroh je Tonne Getreide konnten also im Ertrag in der Praxis – zumindest in den Versuchsjahren - nicht erzielt werden.

Die Pelletierung erwies sich als energieintensiv. Der Schlepper sollte mindestens über eine Leistung von 240 KW verfügen. Dabei zeigte sich ein Verbrauch von rd. 12 l Diesel je Tonne Pellets (siehe AP2), was etwa 6 % der durch Biogas nutzbaren Energie entspricht. Der Transport der Pellets und auch die Einlagerung erwiesen sich als sehr unproblematisch. Letztendlich unterscheiden sich Pellets von der Schüttdichte und dem Schüttverhalten nicht wesentlich von Getreide, so dass die gleichen Gerätschaften zum Einsatz kommen können.

Für die Fütterung erwiesen sich die Pellets als sehr einfach im Handling. Ebenfalls wie Getreide können sie mit der Schaufel eines Frontladers bewegt werden. Einschränkend muss man allerdings feststellen, dass sich heruntergefallene Pellets durch Wasser- und Windeinfluss in ihre Einzelteile auflösen und zu einer hohen Schmutzbelastung werden können. Sorgsames sauberes Arbeiten ist daher notwendig. Bei der Vergärung konnte in der Praxisanlage mit einer Tonne Pellets das Äquivalent von etwa zwei Tonnen Mais ersetzt werden. Dabei hat sich die Rührfähigkeit verringert, sodass ein höherer Strombedarf zu verzeichnen war. Der Einsatz war insgesamt auf der gesamten Strecke unproblematisch.

Leider wurden unfreiwillig Erfahrungen mit der Brennbarkeit von Pellets gemacht. Ein Großbrand der Lagerhalle mit 200 t eingelagerten Strohpellets hat darüber gezeigt, dass Pellet bei dichter Lagerung nur schwer entzündlich sind. Die Strohpellets waren neben statischen Eisenelementen und Betonsockeln die einzigen später noch zu entsorgenden Materialien. Trotz des massiven Feuers sind die Strohpellets nur teilweise abgebrannt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht unter anderem bei der vergleichenden Untersuchung mit Häckselstroh, um die Vor- und Nachteile der Pelletierung gegenüber dem Einsatz von Häckselstroh differenziert betrachten zu können. Ökonomisch betrachtet hat die Preisentwicklung im Energie- und Agrarsektor einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Strohpellets als Biogassubstrat, wodurch sich die getroffenen Aussagen je nach Preisentwicklung erheblich ändern können. Verschiedene Getreidesorten u.v.a. Standort- und Witterungsbedingungen wiesen sehr unterschiedliche Pelletiergeschwindigkeiten auf und beeinflussen so die Wirtschaftlichkeit, dies konnte im Rahmen des Projekts jedoch nicht untersucht werden. Hier besteht für die Weiterentwicklung des Verfahrens Forschungsbedarf.

Insgesamt ist beim Einsatz von Stroh aus Sicht der Praxis ein wesentliches Augenmerk auf den ausreichenden Eintrag von Wasser in die Anlage zu legen. Dies spielt insbesondere in Zeiten trockener Sommer eine entscheidende Rolle, da auch Mais dann einen deutlich höheren Gehalt an Trockensubstanz mitbringt. Im Hinblick auf diesen Aspekt haben Biogasanlagen, die nennenswerte Mengen an Oberflächenwasser durch Ihre Biogasanlagen schleusen, möglicherweise einen Vorteil. Auch wird der Modellierung des Abbauverhaltens im Fermenter und damit der Ermittlung von anlagenspezifischen Fugatfaktoren möglicherweise eine höhere Bedeutung zukommen.

Deutlich wurde, dass während des Versuchslaufs die zuvor prognostizierte Masse an Substraten nicht ausreichte, um die Stromproduktion konstant zu halten. Es wurde eine leichte Steigerung der Substratmenge vorgenommen. Im Mittel ersetzen über den Versuchszeitraum täglich 1,4 t Strohpellets etwa 0,5 t Rindermist, 0,4 t Schweinegülle, 1,6 t Maissilage und 0,8 t Zuckerrüben.

Eine exakte Bestimmung des Gasertrags der Pellets ließ sich mit diesen Daten nicht vornehmen. Unter Berücksichtigung der Trockensubstanzgehalte und Erfahrungswerte scheint der Ertrag in der Praxis 5-10 % unter den Laborergebnissen zu liegen.



Abbildung 36: Lagerung von Strohpellets auf Siloplatte

Quelle: Mohrmann 2021

In Abbildung 36 ist ein Vergleich von Strohpellets zu Häckselstroh bei der Datenerhebung zum Eigenstromverbrauch dargestellt. Vorgehensweise und Ergebnisauswertung werden in den Ausführungen zum Teilvorhaben 2 weiter unten beschrieben.



Abbildung 37: Strohpellets im Vergleich zu Häckselstroh

Quelle: Mohrmann 2022

An der Biogasanlage in Relliehausen wurden zwei Versuchsphasen zum Einsatz von Strohpellets in den Fermentern durchgeführt.

Die Praxisanlage des Versuchsgutes Relliehausen verfügt über einen Fermenter mit 1150 m³, einen Nachgärer mit 1500 m³ und ein geschlossenes Gärrestlager mit 3200 m³ Gärvolumen. Gefüttert werden kann mit einem Feststoffdosierer per Schneckeneintrag in den Fermenter sowie mit einem Feststoffdosierer über einen Flüssigfütterungseintrag in einen beliebigen Behälter.

Bei den Versuchsdurchführungen wurde das Ziel verfolgt, über einen möglichst langen Zeitraum vor Einsatz der Pellets bis deutlich nach Einsatz der Pellets eine konstante Fütterung vorzunehmen. Während des Einsatzes der Pellets sollte lediglich durch die Reduzierung des Maiseinsatzes die notwendige Fütterungsmenge für die Auslastung von zwei 530 kW BHKW mit einem Wirkungsgrad von 44 % erzielt werden. Der Versuch startete, nachdem über einen Zeitraum von 14 Tagen der vorgesehene Substratmix gefüttert wurde, ohne dass Anpassungen der Menge notwendig wurden. Die Pellets wurden in den Fermenter gegeben, so dass sie alle drei Gärstufen durchliefen. Das Handling der Pellets war insgesamt unproblematisch. Kommen Pellets mit Regenwasser in Berührung, quellen sie sofort auf und verschmutzen unter Windeinfluss die Hoffläche, was beim Einsatz berücksichtigt werden sollte.

Am Langwellenrührwerk des Fermenters (Biobull) wurde während des Versuchs das anteilige Drehmoment und somit die veränderte Leistungsaufnahme während der Versuchsdauer gemessen. Während der 1. Fütterungsphase blieb das Substrat so flüssig, dass keine signifikanten Ergebnisse abgeleitet werden konnten. In der 2. Versuchsphase wurde daher die Dosierung einer größeren Menge an Pellets realisiert. Dadurch wurde der Effekt sich verändernder Rahmenbedingungen in einer Praxisanlage relativ und absolut verkleinert.

Es waren zwei Versuchsphasen für den Einsatz von Strohpellets geplant. Aufgrund starker Frostereignisse mit Temperaturen unter -20 °C im Januar 2021 wurde die 2. Versuchsphase nach 10 Tagen unterbrochen, da die Fütterung unmöglich war. Folgende Phasen wurden realisiert:

- 25.11.2019 bis 13.03.2020: Versuch Phase 1
- 06.08.2020: Großbrand in Relliehausen vernichtet alle Pellets -> erneute Pelletierung wurde notwendig
- 31.01 bis 10.02.2021: Beginn Phase 2 mit Abbruch wegen bis zu -25°C Dauerfrost -> Fütterung unmöglich
- 30.04.2021 bis 10.06.2021: Wiederaufnahme der Phase 2

6.2 Wissenschaftliche Begleitung der großtechnischen Praxisversuche

Parallel zu den großtechnischen Versuchen wurden jeweils einmalig die Gasertragspotentiale der Substrate im Batch in 3-facher Bestimmung untersucht.

Während der großtechnischen Versuche in Phase 1 und 2 wurden die Biogasanlage wöchentlich und die Substrate seltener beprobt. Für die Proben Hauptfermenter (HF), Nachgärer (NG), Lager (LA), Rindermist (Mist), Schweinegülle (SG), Maissilage (MS), Zuckerrübe (ZR), Mischung aus Maissilage und Zuckerrübe (MSZR) und Strohpellets (SP) wurden mit unterschiedlicher Frequenz die Parameter bzw. Elemente organische Trockensubstanz, Trockensubstanz, Anteil Kohlenstoff, Anteil Stickstoff, C/N-Verhältnis, Leitfähigkeit, FOS, TAC, FOS/TAC, pH, NH₄-N, o-Phosphat, Molybdän, Nickel, Kobalt, Magnesium, Calcium, Kalium, Schwefel und Chlor analysiert. Die analytischen Methoden sind in Kapitel 1.1 beschrieben.

In der folgenden Tabelle werden die Methanertragspotentials der einzelnen Substrate dargestellt. TS und oTS beziehen sich auf die untersuchte Probe. Während der Versuchslaufzeit wurden zusätzliche Proben auf die Gehalte an Trockensubstanz und die Gehalte an organischer Trockensubstanz untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen der Analyseergebnisse dargestellt. Bei der rechnerischen Bewertung der Methanertragspotentiale der Mischungen wurden die qualitativen Änderungen der Substrate über die Zeit nicht berücksichtigt. Diese Details werden bei der Durchführung der Technikumsversuche berücksichtigt, bei denen die Qualität der Substrate weitestgehend konstant gehalten wurde.

Tabelle 9: Methanertragspotentiale für großtechnische Versuche

	TS	oTS	Methanertragspotential
	[% FM]	[%TS]	[LN/kg FM]
Maissilage	34,1	96,3	128
Zuckerrübe	24,2	90,3	66
Rindermist	18,5	86,9	47
Schweinegülle	1,5	98,5	7
Strohpellets	88,4	93,1	250
Zuckerrübe/ Maissilage	26,9	87,5	110

In der folgenden Abbildung ist der erwartete Methanertrag in der 1. Versuchsphase sowie den vor- und nachgelagerten Phasen dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anlage so gefüttert wurde, dass die Stromproduktion möglichst konstant blieb. Qualitative Schwankungen der Substrate werden ansatzweise mittels TS-Gehalten abgebildet.

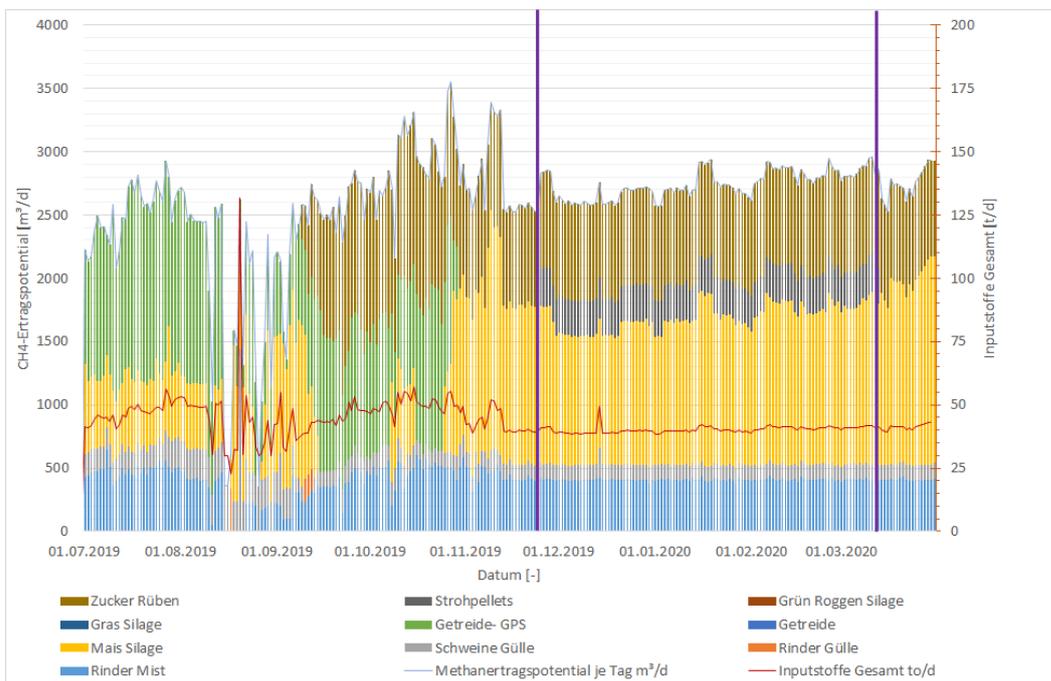


Abbildung 38: Fütterungsmanagement Hauptfermenter und Nachgärer Versuchsphase 1, Basis: erwarteter Methanertrag

Die 2. Versuchsphase der großtechnischen Versuche wurde in der Anfangsphase stark durch den Frost beeinträchtigt. Da die Rüben bei Fortsetzung der Versuchsphase 2 schon sehr lange gelagert und eingefroren waren, wurde zwecks Konservierung eine Mischung von Maissilage und zerkleinerter Zuckerrübe hergestellt und im Verlauf gefüttert. Rechnerisch wird dies in der folgenden Abbildung als Methanertrag aus den Einzelfraktionen berücksichtigt. Parallel wurde zusätzlich ein Methanertrag aus der Mischfraktion ermittelt. Dieser lag mit 110 LN CH₄/kg Frischmasse um 10 % höher als der rechnerisch ermittelte.

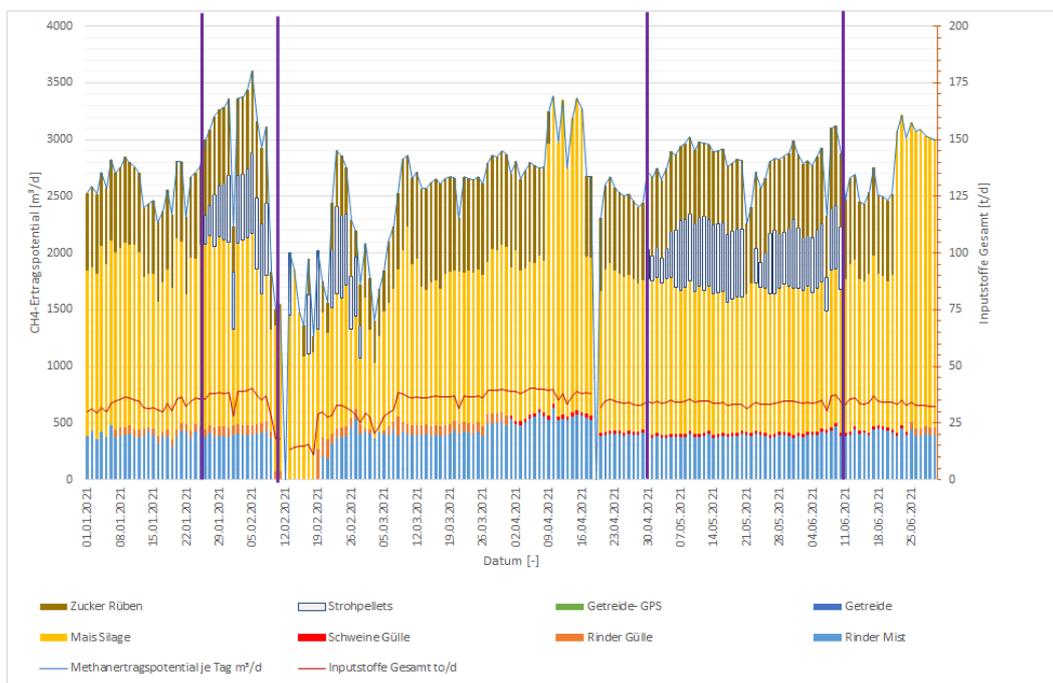


Abbildung 39: Fütterungsmanagement Hauptfermenter und Nachgärer Versuchsphase 2, Basis: erwarteter Methanertrag

In den folgenden Abbildungen wird die Begleitanalytik auszugsweise dargestellt und erläutert. Die TS-Gehalte der Proben aus dem Hauptfermenter sind vor allem in der 2. Versuchsphase deutlich angestiegen (von 8,8 % auf 10,7 %). Die TS-Gehalte der Substrate schwanken. Dies gilt vor allem für Schweinegülle und Rindermist. Auch das Spektrum der TS-Gehalte der Strohpellets variiert stark (84,9 % bis 93,8 %). Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Strohpellets auf der Platte abgedeckt gelagert wurden, da die in Phase 1 vorhandene Lagermöglichkeit in einer Scheune nach einem Brand nicht mehr zur Verfügung stand.

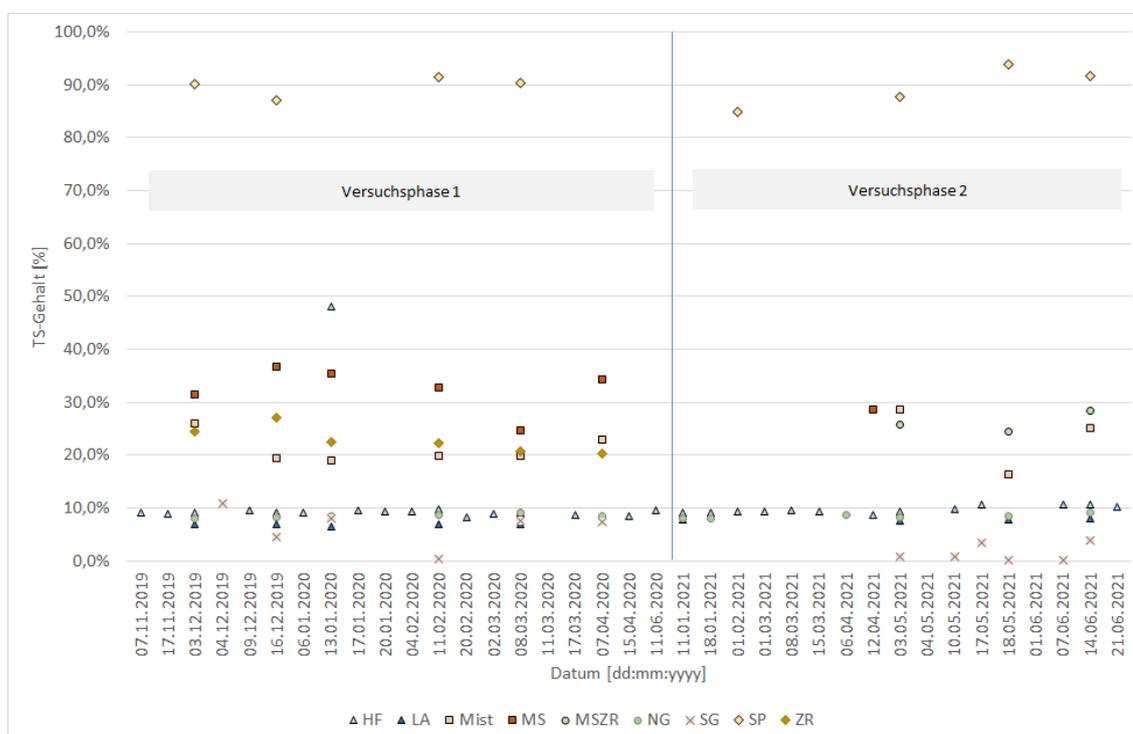


Abbildung 40: Entwicklung TS-Gehalt für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate

Die in der folgenden Abbildung dargestellten oTS-Gehalte von Gärresten und Substraten wurden durch die Fütterung von Strohpellets in den Phasen 1 und 2 nicht signifikant beeinflusst.

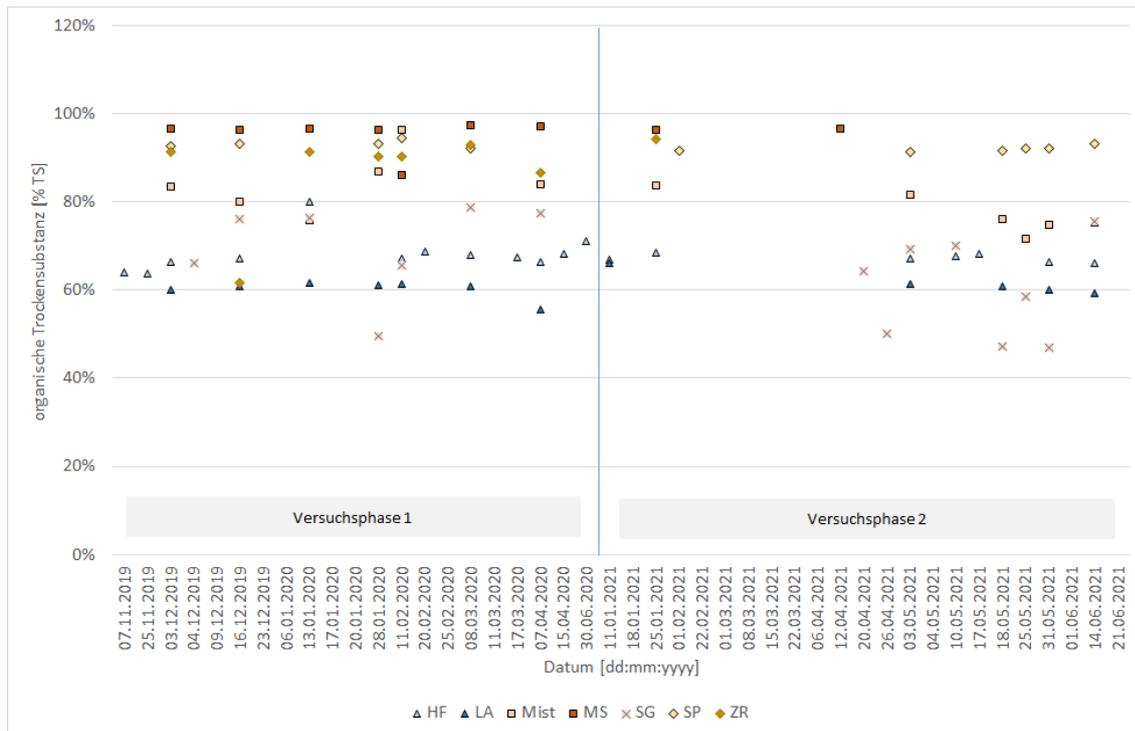


Abbildung 41: Entwicklung oTS-Gehalt für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate

Das C/N-Verhältnis der Strohpellets in der ersten Versuchsphase liegt auf einem höheren Niveau als in der 2. Versuchsphase. Auch dies hängt vermutlich mit der Lagerung auf der Platte und einer entsprechenden Eigenerwärmung zusammen. Auf die Gärrestproben hat dies keinen signifikanten Einfluss. Allerdings ergibt sich aus dieser Erkenntnis der Schluss, dass Strohpellets vor der Vergärung auf jeden Fall trocken zu lagern sind, um Lagerverluste zu vermeiden.

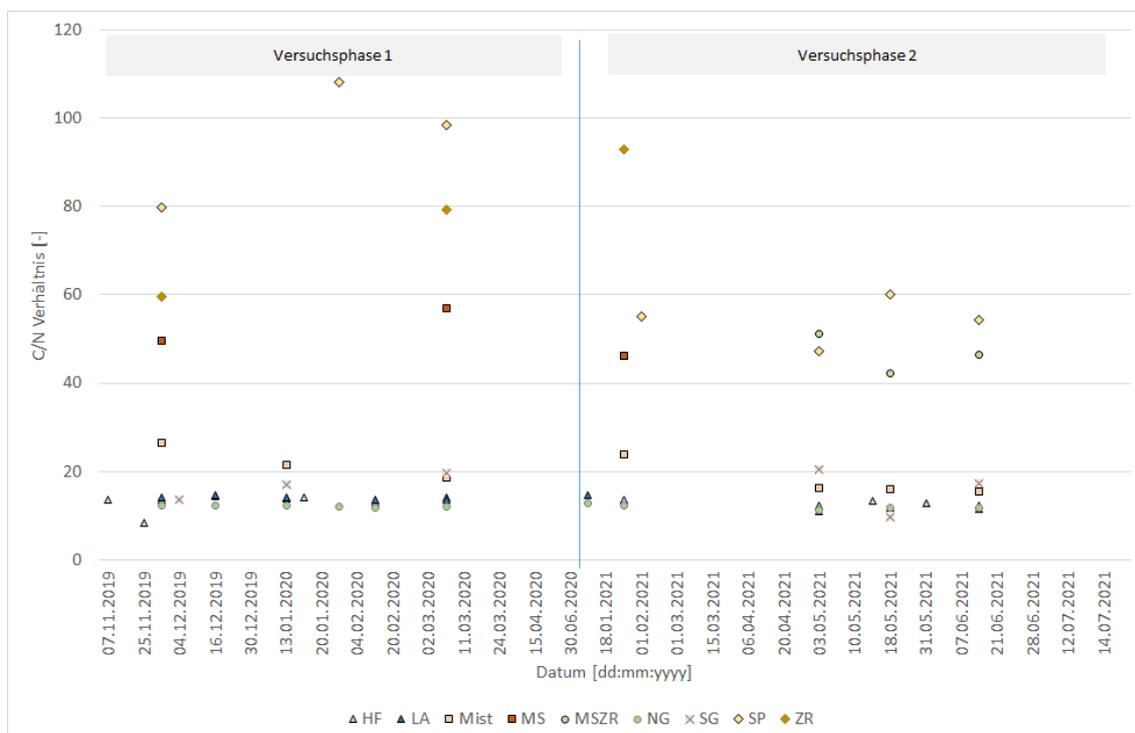


Abbildung 42: Entwicklung C/N-Verhältnis für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate

Die Leitfähigkeit der Gärrestproben wird durch die Fütterung von Strohpellets nicht signifikant beeinflusst. Vermutlich hat die Leitfähigkeit der Schweinegülle einen deutlich stärkeren Einfluss.

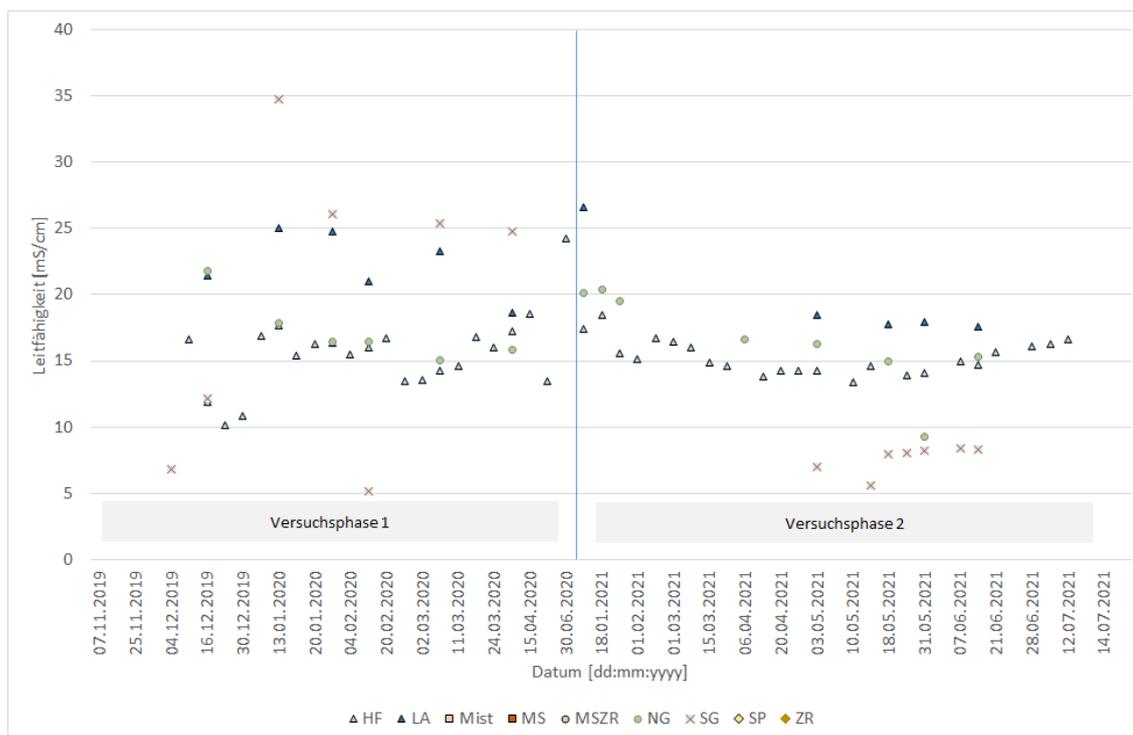


Abbildung 43: Entwicklung Leitfähigkeit für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA) sowie die Substrate

Der FOS/TAC im Hauptfermenter steigt gegen Ende der ersten Versuchsphase und bei Wiederaufnahme der Fütterung in der 2. Versuchsphase deutlich. Dies ist allerdings nur von kurzer Dauer und es kommt relativ schnell wieder zu einer Stabilisierung des Prozesses.

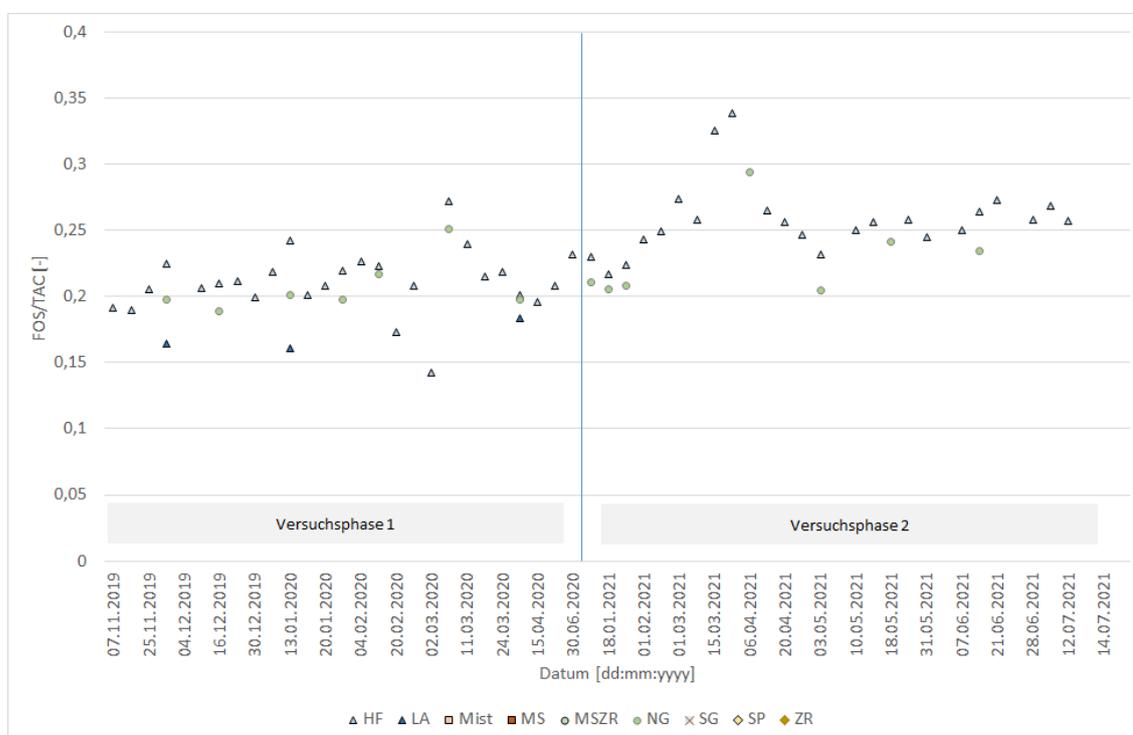


Abbildung 44: Entwicklung FOS/TAC für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA)

Der pH-Wert wird vermutlich nicht durch die Fütterung der Strohpellets beeinflusst. Eher könnte der pH-Wert der Schweinegülle einen Einfluss haben.

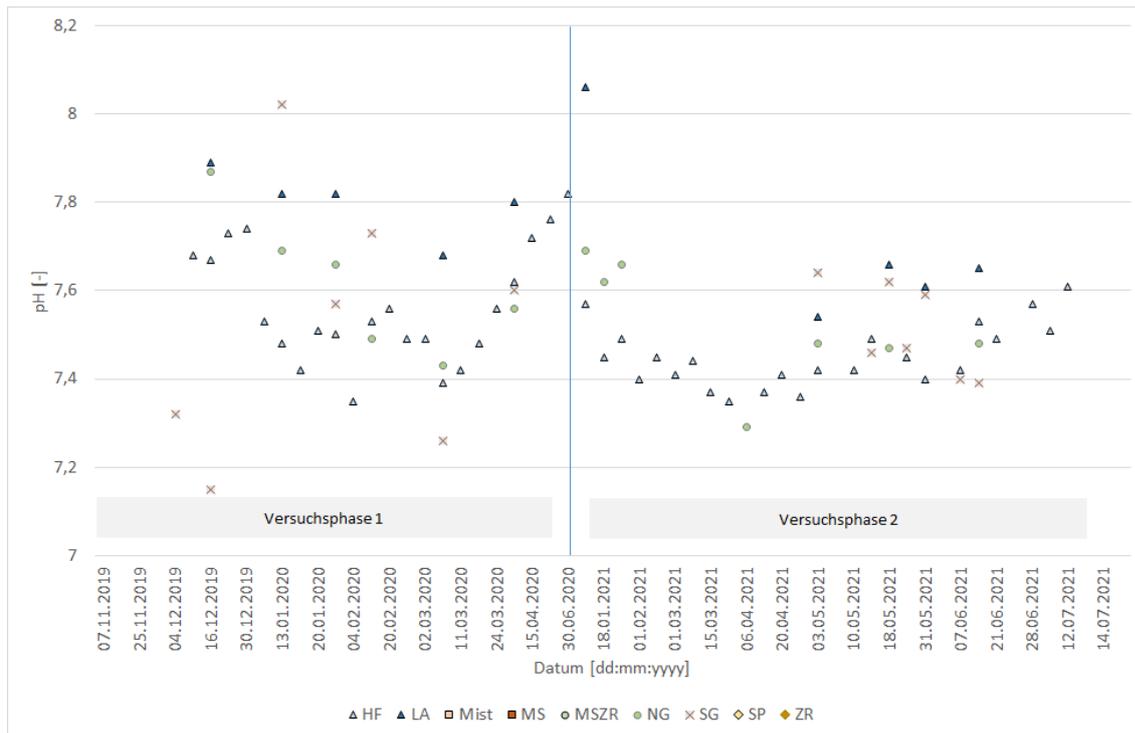


Abbildung 45: Entwicklung pH für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA), sowie Schweinegülle (SG)

Der Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ im Gärrest wird während der großtechnischen Versuche durch die Fütterung von Strohpellets nicht signifikant beeinflusst.

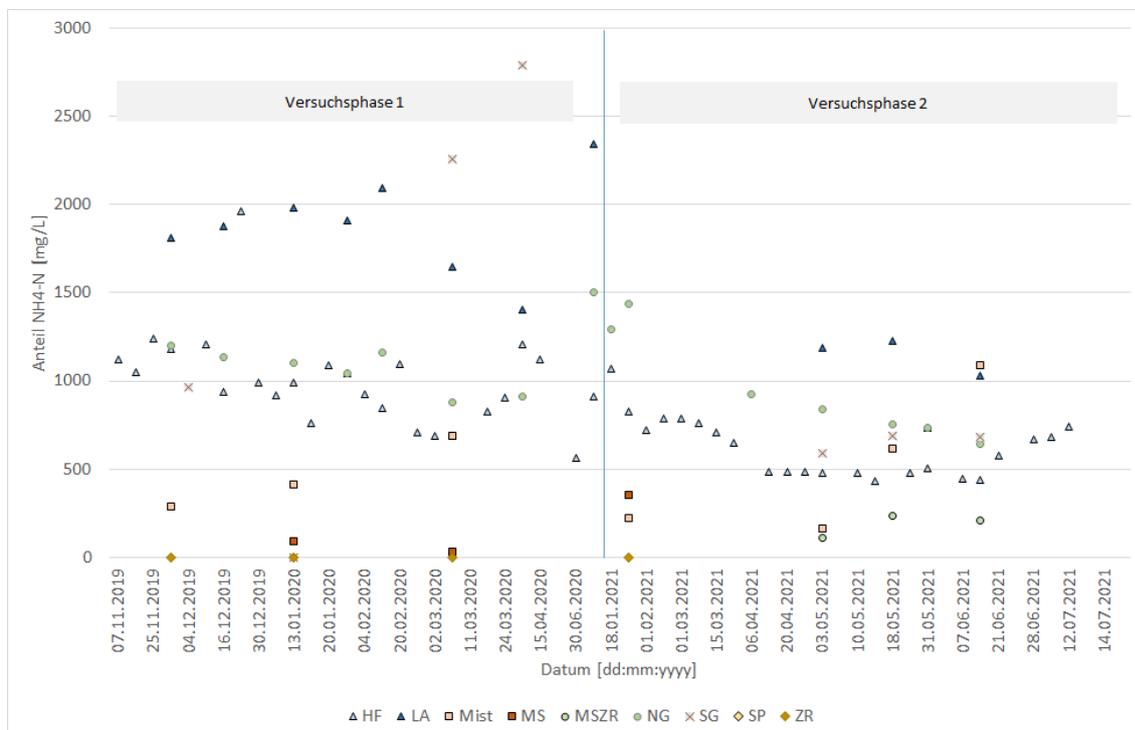


Abbildung 46: Entwicklung Anteil $\text{NH}_4\text{-N}$ für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA), sowie Substrate

Die Ergebnisse der Untersuchung der Proben auf o-Phosphat deuten darauf hin, dass der Phosphatgehalt im Fermenter möglicherweise leicht sinkt.

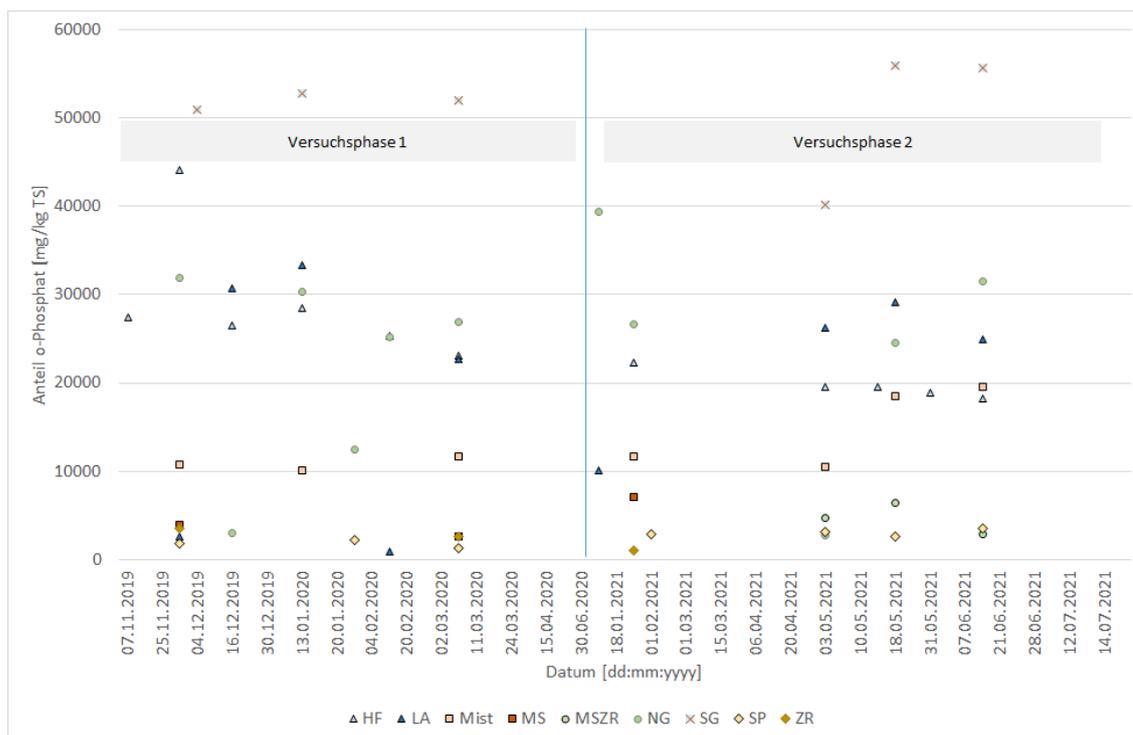


Abbildung 47: Entwicklung Anteil o-Phosphat für die Proben HF (Hauptfermenter), NG (Nachgärer) und Lager (LA), sowie Substrate

Die Analyse der Proben hinsichtlich der genannten Mikro- und Makronährstoffe ergibt in den großtechnischen Versuchen keinen offensichtlichen Zusammenhang mit der Fütterung von Pellets. Für die Stromaufnahme der Rührwerke in Versuchsphase 2 lassen sich vor allem nach Wiederaufnahme der Strohpelletfütterung leichte Korrelationen im Zusammenhang mit der Strohfütterung erkennen. Die Abnahme der Stromaufnahme zu Beginn von Phase 2 ist auf Störungen zurückzuführen, die in Zusammenhang mit den Frostereignissen stehen. Die Ergebnisse der Stromaufnahme sind in folgender Abbildung dargestellt.

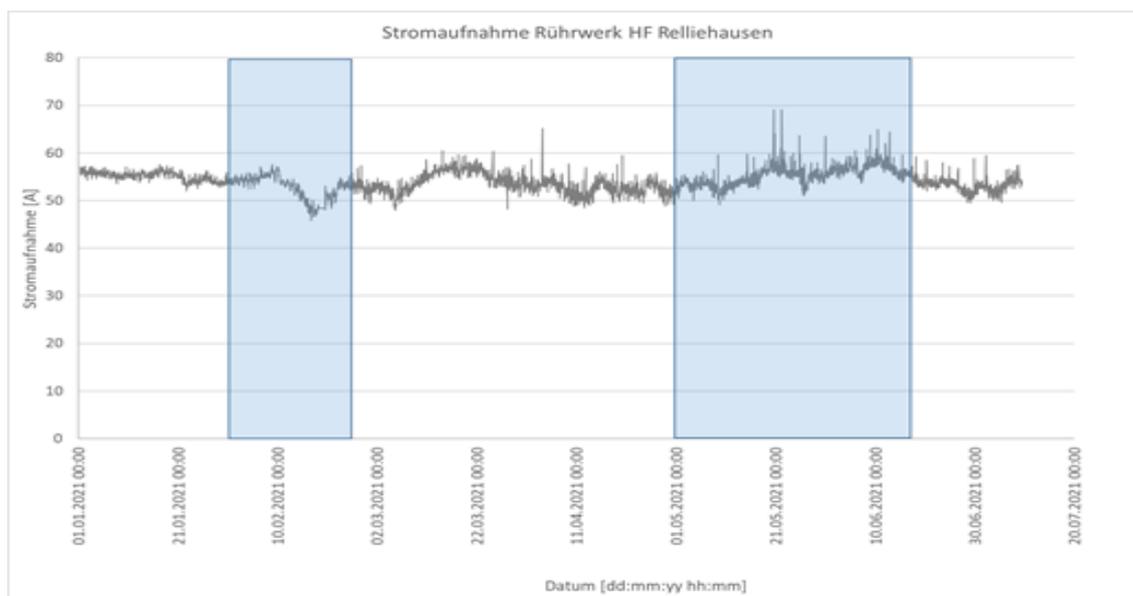


Abbildung 48: Stromaufnahme Rührwerk Hauptfermenter Relliehausen, Versuchsphase 2

7. Sozioökonomische Bewertung

Die sozioökonomische Bewertung unterteilt sich in die Abschnitte Prozesskostenrechnung, Ermittlung der Lagerente zur ökonomischen Bewertung des Strohpelleteinsatzes sowie Akzeptanzstudie. Ergänzend hierzu wurden eine Literaturrecherche und -analyse (inklusive teilprojektübergreifende Szenarienentwicklung) durchgeführt und zu Projektende Handlungsempfehlungen auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zusammengestellt. Abbildung 49 gibt einen Überblick zu den untergeordneten Arbeitsschritten.

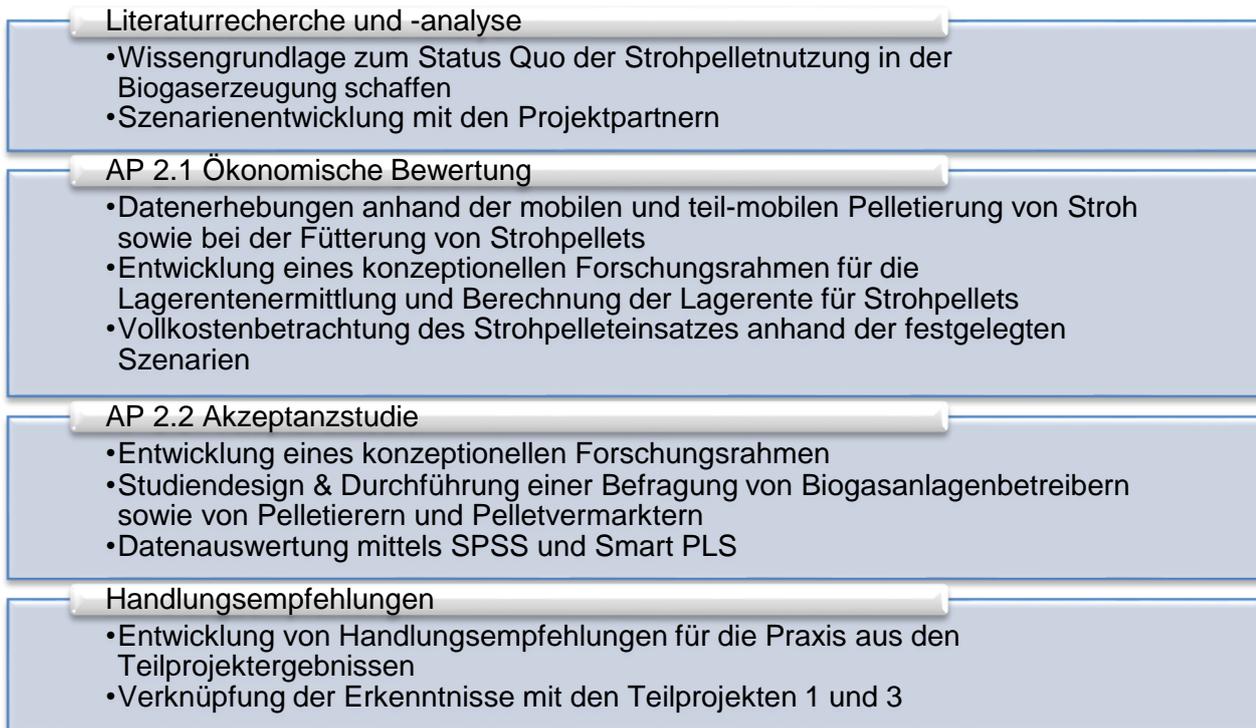


Abbildung 49: Arbeitsschritte im Bereich der Sozioökonomischen Bewertung

7.1 Material und Methoden

7.1.1 Literaturrecherche und -analyse

Die Literaturanalyse umfasste zwei Teile: Im ersten Teil wurden gezielt Literaturquellen zu den rechtlichen Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung mit einem Schwerpunkt auf die Substratversorgung und dahingehenden Entwicklungen sowie zu den Kosten der Strohpelletierung und den Vergärungseigenschaften von Stroh und - soweit vorhanden - von kompaktiertem Stroh recherchiert. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in die gemeinsame Szenarioentwicklung mit den Projektpartnern eingeflossen und wurden in den Annahmen und bei Interpretation der Ergebnisse des AP 2.1 verwendet. Darüber hinaus wurde Literatur zur Vollkosten-/Prozesskostenrechnung sowie zur Lagerentenermittlung und den Thünschen Ringen analysiert. Im zweiten Teil der Recherche wurden die theoretischen Grundlagen für die Entwicklung der empirischen Erhebungen und zu den entsprechenden Analyseverfahren geschaffen. Ein Schwerpunkt wurde dabei auf Literatur zur Akzeptanz von Innovationen und neuen Technologien durch landwirtschaftliche Betriebsleiter*innen und Biogasanlagenbetreiber*innen gesetzt. Darüber hinaus wurde Literatur zur statistischen Datenanalyse und zur Strukturgleichungsmodellierung analysiert.

Bei der Literaturrecherche wurden deutschsprachige und englischsprachige Journalbeiträge, Tagungsbände, Jahrbücher und Sammelbände berücksichtigt. Des Weiteren wurden Suchmaschinen für wissenschaftliche Literatur (z.B. Google Scholar, Web of Science) sowie die online verfügbaren Suchfunktionen der Universitätsbibliothek verwendet, um Dissertationsschriften und weitere verfügbare Beiträge zu berücksichtigen. Vor Durchführung der Literaturrecherche wurden zu Projektbeginn Suchbegriffe festgelegt und dokumentiert, die mit den Themenschwerpunkten der Literaturanalyse in Verbindung gebracht werden können.

7.1.2 Szenariientwicklung

Auf Basis der Literaturanalyse und -auswertung wurden gemeinsam mit den Projektpartnern der Teilprojekte 1 und 3 zehn Szenarien (siehe AP 1) als Grundlage für die Laborversuche und die Prozesskostenbetrachtung erarbeitet und festgelegt.

7.1.3 Ökonomische Bewertung

Datenerhebung

Für die ökonomischen Bewertung musste zunächst eine Datenbasis geschaffen werden, um Strohpellets im Rahmen der Lagerentenermittlung und der Prozesskostenbetrachtung bewerten zu können. Einen Schwerpunkt bildete aufgrund des Neuheitsgrades der mobilen und teil-mobilen Pelletierverfahren die

Erfassung von Arbeitszeit-, Leistungs- und Verbrauchsdaten anhand der Pelletierung von Getreidestroh mit einer Krone Premos im teil-mobilen Verfahren im Januar 2020 und im mobilen Verfahren im August 2020 (Ammon 2019; Holzhammer 2023). Darüber hinaus erfolgte die Arbeitszeiterfassung bei der Fütterung von Strohpellets während der großtechnischen Versuche in AP 1 sowie eine Eigenstromverbrauchsmessung am Eintragungssystem bei der Fütterung von einzelnen Substraten an der Versuchsanlage Relliehausen im Herbst 2022.

Arbeitszeit-, Leistungs- und Verbrauchsdatenerfassung bei der Pelletierung von Strohpellets

Für die Zeitdatenerhebung gibt es eine Vielzahl von Methoden, die hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Durchführungsaufwand, Zuverlässigkeit und Nachprüfbarkeit variieren und entsprechend des Verwendungszwecks und dem Umfang der zu erhebenden Daten auszuwählen sind (Reith 2018). Die Erfassung des Arbeitszeitaufwandes kann grundsätzlich durch grobe Schätzungen, Arbeitstagebücher, Befragungen oder mit Hilfe technischer Hilfsmittel, IT-gestützt, durchgeführt werden. Da es sich bei der Pelletierung um einen Prozess handelt, der keine kurzen, schnell aufeinanderfolgenden, einzelnen Arbeitselemente enthält, wurde die objektive Messung durch einen Dritten mittels digitaler Stoppuhr und Protokoll als Methode gewählt (Heitkämper et al. 2011; Schlosser und Theuvsen 2016; Auernhammer 1986). Vor der eigentlichen Datenerhebung wurden das teil-mobile und mobile Verfahren beobachtet und Messpunkte für die einzelnen Prozesse festgelegt.



Abbildung 50: Teil-mobile und mobile Pelletierung mit einer Krone Premos

Quelle: Mohrmann 2020

Die Datenerhebung zur teil-stationären Pelletierung mit der Krone Premos wurde im Januar 2020 im Rahmen der Pelletproduktion für die großtechnischen Versuche auf dem Versuchsgut Relliehausen der Universität Göttingen durchgeführt. Es wurden trocken gelagerte Quaderballen mit einer Abmessung von 200x70x220 cm pelletiert. Die Pelletiermaschine verfügt über einen automatischen Ballenauflöser sowie einen Zuführtisch, auf dem mit einem Frontladerschlepper bis zu drei Ballen abgelegt werden konnten (siehe Abbildung 50). Bei der Datenerfassung wurde die pelletierte Menge anhand der Ballenanzahl und dem Durchschnittsgewicht pro Ballen im Abgleich mit den Wiegedaten der Maschine ermittelt. Dabei wurde die Messung der Zeit begonnen, sobald der Ballen von den Einzugschnecken erfasst wurde. Gestoppt wurde, sobald der Ballen komplett durch die Einzugschnecken aufgelöst war.

Für die Datenerfassung bei der mobilen Pelletierung im August 2020 wurde das Prozessschema in Tabelle 10 vorab entwickelt und während der Messung befolgt. Das Verfahren der mobilen Pelletierung wurde an zwei Tagen lückenlos durch den Wissenschaftler aufgezeichnet sowie an zwei weiteren Tagen mittels Daten des Maschinenterminals erfasst. Es wurde zwischen aktiver Pelletierzeit (=Zeit, in der die Maschine aktiv Stroh mittels einer Pick-Up aus dem Schwad aufnimmt) und inaktiver Zeit: Störungszeiten, Wendezeit + Leerfahrten auf dem Feld, Abbunkern (erfolgte ausschließlich am Feldrand), Rüstzeiten auf dem Feld, Rüstzeiten auf dem Hof sowie die Straßenfahrt zum Betriebsgelände der Universität Göttingen (Entfernung rd. 4 km) untergliedert. Die Pelletierung erfolgte auf Flächen mit 2 bis 15 Hektar Größe. Die produzierten Pelletmengen wurden über die Wiegeeinheit des Bunkers der Krone Premos gemessen. Abgebunkert wurde die Maschine auf dem Vorgewende, wo entsprechende Transportanhänger abgestellt waren.

Die erfassten Daten wurden anschließend in einer Vollkostenrechnung ermittelt, die zum Ziel hatte, den Pelletierpreis in Euro pro Tonne zu bestimmen. Da die Krone Premos aktuell nicht gekauft werden kann und von der Firma Krone lediglich längerfristig vermietet wird, wurden die festen Mietkosten pro Jahr sowie der Arbeitspreis pro Stunde entsprechend des Vermietkonzeptes (Stand: 2021) berücksichtigt. Es wurde eine Gesamtauslastung von 555,6 Stunden pro Jahr angenommen: Angelehnt an die Auslastung von

Quaderballenpressen wurde zunächst eine Auslastung von 277,8 Stunden im mobilen Betrieb ermittelt. Für den Winterbetrieb wurde die gleiche Stundenzahl pro Jahr pauschal angenommen. Im Vergleich dazu wurden die Pelletierkosten anhand einer stationären Pelletieranlage und einer Miet-Containeranlage berechnet. Die Annahmen hierzu stammen aus Expertengesprächen sowie exemplarischen Angeboten zur Lohnpelletierung. Zu Grunde gelegt wurden bei allen Verfahren ein Dieselpreis von 1,26 €/l, ein Strompreis von 0,21 ct/kWh und ein Lohnansatz von 21,5 €/h (Statistisches Bundesamt 2023a; KTBL 2022).

Tabelle 10: Prozessschema mobile Pelletierung

Arbeitsablaufabschnitt	Beschreibung	Anfangsereignis	Endereignis
Rüstarbeiten am Hof	Vorbereitende Arbeiten (Tanken, Betriebsmittel auffüllen etc.)	Erster Schritt	Letzter Schritt
Fahrt vom Hof zum Feld	Starten des Fahrzeugs und Fahrt zum Feld	Erster Tritt auf Trittbett	Erreichen der Feldeinfahrt mit Schleppvorderrad
Rüstarbeiten am Feld	Vorbereitung der Maschine für den Arbeitseinsatz	Erste Betätigung der Maschine (Klappung)	Fahrzeug steht vor dem Schwad, Start der Zapfwelle
Pelletieren außen herum + Vorgewende	Zunächst wird das Feld rundherum bearbeitet, ohne Wendezeiten	Anfahren mit angeschalteter Zapfwelle	Rundherumfahren beendet
Pelletieren Hauptfeld	Strohaufnahme in der Mitte des Feldes mit Wendezeiten am Vorgewende	Erster Schwad nach dem kreisförmigen rundherumfahren	Alle Schwaden aufgesammelt, letztes Pellet daraus im Bunker
Wenden an der Hauptfläche	Mehrfacher Vorgang	Pickup sammelt kein Stroh mehr	Pickup sammelt wieder Stroh vom nächsten Schwad
Abbunkern	Mehrfacher Vorgang zum Entladen des Erntegutes	Erstes Pellet fällt vom Förderband auf das Abfahragespann	Förderband komplett entleert
Rüstzeiten am Feldende	Vorbereiten der Maschine für die Straßenfahrt	Das aufgesammelte Stroh befindet sich komplett im Bunker, Abschalten der Zapfwelle	Alle Vorrichtungen sind ein-/hochgeklappt für den Straßentransport
Fahrt vom Feld zum Hof	Abfahrt zum Hof.	Verlassen der Feldeinfahrt mit Schleppvorderrad	Erreichen der Hofeinfahrt mit Schleppvorderrad
Rüstarbeiten am Hof	Reinigung/Wartung der Maschine	Parken der Maschine	Abstellen aller Maschinen und Werkzeuge.

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (Reith 2018)

Messung des Arbeitszeitbedarfs bei der Fütterung von Strohpellets

Während der großtechnischen Versuche an der Biogasanlage in Relliehausen wurde in 2021 eine Ermittlung des Arbeitszeitbedarfs bei der Fütterung der Biogasanlage gemacht, um festzustellen, ob Unterschiede zur Fütterung von Strohpellets im Vergleich zu anderen Substraten bestehen. Die Messung erfolgte über einen Zeitraum von drei Tagen, an denen der zuständige Mitarbeiter der Biogasanlage die zwei vorhandenen Feststoffeinträge wie täglich üblich mit einem Teleskoplader befüllte. An Tag 1 erfolgte eine Probemessung zur Definition der Start und Stopp Punkte, an Tag zwei und drei wurde die Zeitmessung mittels Stoppuhr durchgeführt und protokolliert (Reith 2018). Die Daten wurden für jedes Substrat (Maissilage, Zuckerrüben, Rindermist, Strohpellets) einzeln bei der Fütterung des Strautmann Eintragungssystems (Feststoffeintrag 1) durchgeführt. Die Messung wurde mit dem Anfahren des Laders am Feststoffeintrag gestartet und mit der

Entleerung der Schaufel über dem Feststoffeintrag gestoppt. Um Ungenauigkeiten zu vermeiden, wurde die Zeiterfassung jeweils durch die gleiche Person durchgeführt (Auernhammer 1986). Neben der benötigten Fütterungszeit wurden die Entfernungen zwischen Lager und Feststoffeintrag für die Interpretierbarkeit der Ergebnisse gemessen. Auf Basis der erfassten Daten wurde die Futtermenge pro Laderschaufel und pro Substrat in Minuten errechnet, um die Fütterungsmenge in Tonnen pro Stunde ermitteln zu können. Weitere Arbeiten, wie das Aufdecken des Silohaufens oder die Zugabe von Additiven wurden nicht erfasst, da diese im Prozessablauf nicht der reinen Fütterungszeit zuzuordnen sind. Weitere Veränderungen der Arbeitszeit (z.B. zunehmende Störungen durch den Pelleteinsatz, engmaschigere Beobachtung der Rührfähigkeit), die auf den Einsatz von Strohpellets zurückzuführen sind, konnten während der Versuchsphase nicht festgestellt werden.

Messung des Eigenstromverbrauchs des Eintragungssystems

Zur Ermittlung des Eigenstromverbrauchs für die Einbringung von Strohpellets im Vergleich zu anderen Substraten wurde im November 2022 gemeinsam mit einem Energieberater eine Messung zur Ermittlung des Stromverbrauchs des Eintragungssystems bei den Substraten Silomais, Zuckerrüben, Lapf-Gras, Mist, Strohpellets und Häckselstroh durchgeführt. Entsprechend der technischen Machbarkeit auf der Biogasanlage des Versuchsgutes Relliehausen wurde der Stromverbrauch der Rohrförder- und der Steilförderschnecke gemessen. Die Messung erfolgte mit einem Datenlogger PEL 104 des Herstellers Chauvin-Arnoux. Gemessen wurde der Stromfluss an den entsprechenden Leitern nach der dreiphasigen Schmelzsicherung, die den Verbrauchern Rohrförderschnecke und Steilförderschnecke vorgeschaltet ist.

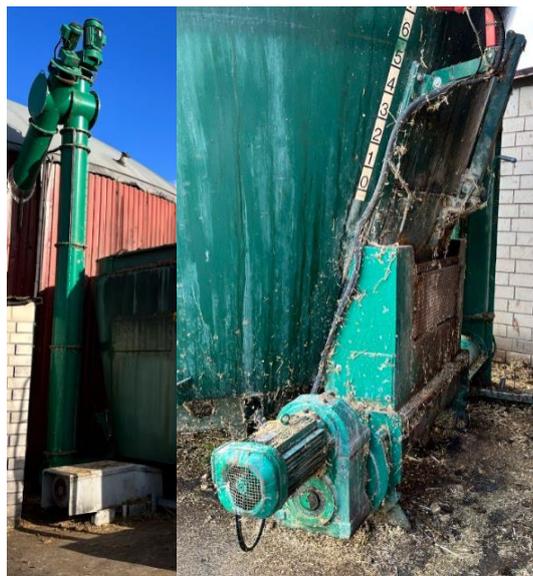


Abbildung 51: Steilförderschnecke und Rohrförderschnecke

In den Dosierer wurde für jede Messung des jeweiligen Substrates eine Füllmenge von ca. 1500-2000 kg gegeben. Die Menge wurde mit Hilfe der fest verbauten Waage des Behälters erfasst und dokumentiert. Für jedes Substrat wurde eine eigene Messung durchgeführt, die nach der Befüllung und vor dem Beginn der Förderung gestartet wurde. Die Messung wurde beendet, wenn der Behälter bis auf eine technische Restmenge von ca. 400 kg entleert war. Die Öffnung des Schiebers am Mischer zur Rohförderschnecke wurde während des Versuchs nicht verstellt. Als Ergebnis wurde eine Tabelle mit der Summe der Leistungsaufnahme beider Schnecken in Kilowatt (kW) ausgegeben. Für die Rohrförder- und Steilförderschnecke wurden die 300 mittleren Messwerte über den beschriebenen Zeitraum berücksichtigt, um das Anlaufen und Abklingen bei geringerer Menge im Mischer außen vor zu lassen.

Um die Stromaufnahme der verschiedenen Aggregate zu dokumentieren und den Gesamtstrombedarf pro Tonne Frischmasse berechnen zu können, wurden abschließend mit Zangenamperemeter und über die Anzeige der Frequenzumrichter die Stromaufnahme der Mischschnecken (links, rechts) und der Stopfschnecke gemessen.

Annahmen zu den Szenarien zur Wirtschaftlichkeitsanalyse

Ziel der prozessbezogenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung war es, die Veränderung der Vollkosten bei der Biogaserzeugung in Cent pro produzierte Kilowattstunde zu ermitteln, die beim Einsatz von Strohpellets anstelle von Maissilage bei den zu Beginn definierten Szenarien entstehen würden. In Anlehnung an die Größe der Versuchsanlage wurde angenommen, dass in allen Szenarien 4,4 Mio. kWh Strom pro Jahr (530 kW_{el.}) erzeugt werden müssen. Hierfür wird eine Methanmenge von 1,05 Mio. m³ Methan pro Jahr benötigt. Entsprechend weichen die prozentualen Anteile der Anpassungsszenarien minimal von den in AP 1 dargestellten Szenarien ab. Da die Leistung entsprechend der Annahmen immer gleichbleibt, lag der Fokus auf der Analyse der entstehenden Kosten.

Das jeweilige Ausgangsszenario enthält keine Strohpellets im Substratmix. Im Szenario mit Strohpellets wird so viel Silomais ersetzt, dass der rechnerisch TS-Gehalt im Gärrest einen Wert von rd. 10 % nicht überschreitet. Dies entspricht in etwa einem maximalen TS-Gehalt von 12% im Fermenter, der für viele Biogasanlagen je nach installierter Rührtechnik ein Maximum darstellt (Kusch und Oechsner 2004; Reinhold 2019). Die Berechnung der TS-Prognose im Gärrest basiert auf dem Konzept zur Masse- und Trockensubstanzbilanzierung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Reinhold 2005).

Die Gesamtsubstratkosten für jedes Szenario wurden anhand der Preisannahmen in Tabelle 11 für jedes Szenario berechnet. Da die Szenarien einer jeweiligen typischen Region zugeordnet wurden, sind die Entfernungs- und Preisannahmen aus der Betreiberbefragung (siehe AP 2.2) für die Kostenkalkulation verwendet worden. Wo Preisangaben fehlten, wurde der Preis ggf. äquivalent zum Preis von Mais auf Basis m³/Methan pro Tonne umgerechnet (KTBL 2013). Für Strohpellets wurden die jeweiligen Vollkosten pro Tonne Strohpellets frei Biogasanlage bei 1,26 €/l Diesel berechnet. Dabei wurden Lager- bzw. Silierverluste von einem Prozent bei Strohpellets und 12 % bei Silomais, Getreide-GPS und Gras in den Preisannahmen einkalkuliert (KTBL 2022). Auf Basis der Datenerhebung bei der Fütterung wurden angelehnt an die KTBL-Daten Mehrkosten bei der Einbringung von Strohpellets in Höhe von 1,94 €/t angenommen.

Tabelle 11: Szenarien der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Szenarien	Substrat		Mais-	Zucker-	Rinder-	Rinder-	Stroh-	TS-	
	TS in %	Menge in t/a	silage %	rüben %	gülle %	mist %	pellets %	Gärrest % ¹	
Relliehausen	V6	23,8	15.625	30,0	25,0	25,0	20,0	-	6,9 (8,5)
	V7	26,0	14.678	20,3	26,6	26,6	21,3	5,2	8,5 (10,0)
Nord-West	V3.1	25,0	14.177	60,0	-	40,0	-	-	6,3 (7,9)
	V3.2	28,8	12.816	47,1	-	44,2	-	8,6	8,8 (10,4)
NaWaRo	V4.1	32,0	10.190	75,0	25,0	-	-	-	6,5 (8,1)
	V4.2	34,1	9.710	69,8	26,2	-	-	4,0	7,81 (9,4)
	V4max	35,2	9.497	67,3	26,8	-	-	5,9	8,4 (10,0)
Gülleanlagen	V5.1	15,0	29.309	20,0	-	80,0	-	-	5,3 (6,8)
	V5.2	17,1	27.102	6,9	-	86,6	-	6,6	6,9 (8,4)
	V8	18,3	26.071	0,0	-	89,9	-	10,1	7,7 (9,3)
Ackerbauregion(en)	V9.1	25,1	13.776	50,0	20,0	30,0	-	-	5,8 (7,4)
	V9.2	29,6	12.264	33,8	22,5	33,7	-	10,0	8,7 (10,3)
Süd-Deutschland	V10.1	26,3	13.743	45,0	-	35,0	20,0	-	7,4 (8,9)
	V10.2	28,6	12.944	36,6	-	37,2	21,2	5,1	8,9 (10,5)

¹ Korrigierter Wert auf Basis des Biogas-Messprogramm III (Wert in Klammern: Rein rechnerischer Wert nach Reinhold (2005)), Quelle: Eigene Darstellung

Der Nährstoffzugswert für die Strohabfuhr wurde bei den Pelletkosten aus der mobilen und teil-mobilen Variante nicht berücksichtigt. Diese Annahme ist allerdings betriebsindividuell zu überprüfen. Sie trifft zu, wenn die Gärrestrückführung auf die entsprechenden Flächen erfolgt und die Nährstoffe im Kreislauf verbleiben. Das dürfte bei einem überwiegenden Teil der Biogasanlagen der Fall sein, die das Stroh von eigenen Flächen nutzen. Auch Stroh liefernde Betriebe im näheren Umfeld, dürften bei Ablieferung von Stroh in der Regel die Rücknahme des Gärsubstrates in entsprechender Größenordnung vereinbaren.

In Variante drei, teil-mobile Pelletierung aus Zukaufstroh, wurden Stroh-Quaderballen mit einem Zukaufpreis von 100 €/ frei Biogasanlage berücksichtigt.

Bei der Fütterung wurde gemäß den Ergebnissen zur Zeiterfassung bei der Fütterung an der Biogasanlage Relliehausen keine Änderung der Arbeitszeit vorgenommen, da in der Konstellation durch das Austauschverhältnis von Silomais zu Strohpellets von 1:0,45 keine Änderung im Arbeitszeitbedarf ergeben würden (siehe Ergebnisse aus AP1). Diese Annahme kann je nach Biogasanlage variieren.

Gemäß dem Methanertrag für Maissilage nach KTBL (2013) wurde diese durch Strohpellets im genannten Austauschverhältnis anhand des Methanertrags pro Tonne Frischmasse ersetzt. Der Gärrestanfall für die

jeweiligen Szenarien wurden jeweils für den Gesamt-Substratmix errechnet und die Differenz zur jeweiligen Referenz ermittelt und mit den Ausbringkosten gemäß Tabelle 12 bewertet. Der Lagerraumbedarf für Gärrest wurde ebenfalls berücksichtigt. Es wurde jeweils von einem Lagerraumbedarf von neun Monaten für flächenlose Betriebe entsprechend der Düngeverordnung ausgegangen (DüV 2020). Die Differenz im notwendigen Lagerraumbedarf wurde im Positiven sowie Negativen mit 6,1 €/m³ bewertet. Dieser Annahme liegt ein Gärrestlager mit Baukosten von rd. 91 €/m³, ein Abschreibungszeitraum von 20 Jahren und ein Zinssatz von 3 % sowie 100 % Fremdkapitalfinanzierung zu Grunde.

Tabelle 12: Entfernungen und Kosten bei der Substratbeschaffung und Gärrestausbringung

Mittelwerte nach Regionen	Substrat-Beschaffung (frei Siloplatte bzw. Vorgrube)					Gärrest (frei Feld)	
	Ø Entfernung	Ø Preis Silomais	Ø Preis Grassilage	Ø Preis Rindergülle	Ø Preis Rindermist	Ø Entfernung Ausbringung	Transportkosten
	km	€/t netto	€/t netto	€/t netto	€/t netto	km	€/m ³ netto
Region Süd (BW, BY, HE, RP, SL)	5,5	38,4	25,0	3,63	8,13	5,6	4,1
Region Nord-West (HH, HB, NI, NW, SH)	4,9	38,1	-	3,6	9,7	8,7	5,2
Region Ost (BB, BE, MV, SN, ST, TH)	5,1	37,8	-	3,05	8,05	6,0	4,4

Quelle: Eigene Datenerhebung

Die Änderung des TS-Gehaltes durch die Substratanpassung (siehe Ergebnisse) lässt Mehrkosten beim Eigenstrombedarf als Teil der variablen Kosten erwarten (Oechsner et al. 2018). Da die Ergebnisse bzw. Einschätzung im Rahmen der großtechnischen Versuche keine belastbaren Erkenntnisse darüber liefern konnten, wie sich der Eigenstrombedarf bei der Fütterung von Strohpellets insgesamt verändert, wurde hierfür der folgende, rechnerische Ansatz entwickelt: Zunächst wurde der TS-Gehalt im Gärrestendlager von 17 Biogasanlagen aus dem Biogasmessprogramm III sowie der Biogasanlage Relliehausen und einer weiten Referenzanlage mit dem Eigenstromverbrauch gegenübergestellt. Hierbei wurde ein relativ hoher Korrelationskoeffizient von 0,53 festgestellt. Auf dieser Basis wurde die Annahme gestützt, dass der Eigenstrombedarf zum TS-Gehalt im Gärrestendlager im Verhältnis 1,01 zu 1 steht (Barchmann et al. 2021). Entsprechend wurde die Entwicklung des Eigenstrombedarfs zwischen den Szenarien auf Basis des prognostizierten TS-Gehaltes im Gärrestendlager hochgerechnet. Um diesen näher zu spezifizieren wurde zu Grunde gelegt, dass 43,98 % des Eigenstromverbrauchs auf die BHKW(s), 39,18 % auf die Rührwerke, 5,8 % auf das Einbringsystem und 11,04 % auf sonstige Stromverbraucher entfallen (Dachs et al. 2006). Der Verbrauch der BHKW und sonstiger Stromverbraucher wurde unverändert gelassen. Beim Einbringsystem wurde auf Basis der Substratmengenänderung hochgerechnet.

Ermittlung der Lagerente von Strohpellets

Während die Transportkosten aufgrund des technischen Fortschritts für viele Güter heute als unbedeutend zu gelten, haben sie bei einer Vielzahl von landwirtschaftlichen Gütern aufgrund der hohen Spannweite in der Transportwürdigkeit weiterhin eine besondere Bedeutung – insbesondere im Biogassektor (Bauer 2009; Toews 2009; Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010). Trotz steigender Energiekosten und Weiterentwicklungen bei Transport- und Erntetechniken sind in den letzten Jahren nahezu keine wissenschaftlichen Studien entstanden, die sich dieser Thematik widmen. Ziel war es daher, anhand der Lagerente die Eignung von Strohpellets als Substratalternative zu bewerten. Das Modell der Lagerentenermittlung hat sich nach dem Konzept der Thünenschen Ringe in der Literatur bewährt und ist in vorangegangenen Studien bereits für die Analyse der Wirtschaftlichkeit von Rohstoffen für Biogasanlagen zum

Einsatz gekommen (Lankoski und Ollikanen 2006; Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010). Die Lagerente¹ bestimmt, welches Produkt in welcher Entfernung zum Markt angebaut werden sollte. Am Punkt mit der Lagerente $R = 0$ befinden sich die Grenzproduzenten, d.h. an diesem Punkt wird bei der entsprechenden Entfernung vom Zentrum, z.B. der Biogasanlage, ein gerade noch kostendeckender Erlös erzielt. Weiter entfernte Transportentfernungen über diesen Punkt hinaus sind unrentabel, während die Lagerente und damit der Nettoerlös pro Flächeneinheit steigt, desto kürzer die Transportentfernungen zum Zentrum sind (Steinhauser et al. 1992). Bei der Methode der Lagerentenermittlung ist es unerheblich, ob der Anlagenbetreiber die Flächen um die Biogasanlage selbst bewirtschaftet oder die Substrate zu diesen Kosten zukaft. Je höher die Lagerente des jeweiligen Substrates ist, desto besser ist dieses aus wirtschaftlicher Sicht für die Biogaserzeugung geeignet (Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010).

Angelehnt an die Studie von Schulze Steinmann und Holm-Müller (2010) wurde die Formel zur Berechnung der Lagerente konzeptionell erweitert, um die Gärrestausbringung und Düngung entsprechend der Entfernungen und des Düngebedarfs zu berücksichtigen. Ähnlich der Vorgehensweise von Schulze Steinmann und Holm-Müller (2010) wurde zur Berechnung der Lagerenten als Marktpreis die maximale Zahlungsbereitschaft zur Deckung der Vollkosten verwendet. Es wurde das Marginalprinzip angewendet, nach dem das Substrat jeweils noch bis zu dem Preis eingesetzt wird, bis der Punkt erreicht ist, dass die zusätzlichen Kosten den Nutzenzuwachs überschreiten (Dabbert und Braun 2021). Die Ermittlung der maximalen Zahlungsbereitschaft erfolgte anhand von Daten zu den Erlösen und Kosten von 31 Biogasanlagen des Biogas-Messprogramms III, bei denen die entsprechende Datenverfügbarkeit gegeben war (Barchmann et al. 2021).

Im Rahmen der Berechnungen wurden Strohpellets im Vergleich zu den Substraten Silomais (Referenz), GPS-Getreide und Häckselstroh betrachtet. Die Produktionskosten wurden frei Feststoffeintrag ermittelt, d.h. neben den Anbaukosten wurden Lagerverluste und Einbringkosten berücksichtigt. Die Daten für die Produktionskosten des Anbaus wurden in Anlehnung an den Leistungs-Kostenrechner und dem Feldarbeitsrechner der KTBL ermittelt (KTBL 2023a, 2023b). Die Düngung wurde an den Nährstoffentzug nach aktuellen Rahmenbedingungen angepasst, der verpflichtende Zwischenfruchtanbau ergänzt sowie bei Mais die Maiszünslerbekämpfung im Herbst (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2023) berücksichtigt. Exemplarisch wurde eine Flächengröße von 5 ha bei einer Mechanisierung mit 120 kW zu Grunde gelegt und die Stückkosten und Leistungen pro Tonne Erntegut berechnet. Bei Getreidestroh wurden die Kosten des Getreideanbaus auf das Getreidekorn bezogen, während die Kosten des Pressens von Quaderballen für die teil-mobile Pelletierung bzw. die Kosten der Pelletierung dem Stroh zugeordnet wurden. Für die Kosten der mobilen und teil-mobilen Pelletierung wurden Daten auf Basis der eigenen Datenerhebung verwendet. Darüber hinaus wurden Lagerverluste von 12 % bei Silomais und GPS und 1 % bei Strohpellets auf Kostenseite berücksichtigt. Die Einbringkosten in den Fermenter wurden mit 1,63 €/t bei Silomais, 1,56 €/t bei GPS berücksichtigt. Umgerechnet anhand eigener Daten zum Zeitbedarf bei der Fütterung wurden für Strohpellets 3,63 €/t angesetzt. Bei den Erträgen wurden Durchschnittserträge für die Region Nord-West (Niedersachsen, Schleswig-Holstein, NRW) auf Basis der Statistik der Jahre 2016 bis 2021 verwendet (Statistisches Bundesamt 2023b). Die Diesel- und Düngekosten wurden jeweils als Dreijahresdurchschnitt 2020/2021/2022 verwendet (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2023; Statistisches Bundesamt 2023a). Die Datenerfassung erfolgte aus Gründen der Datenverfügbarkeit anhand der Entfernungen 1,2,3,4,5,10,15 km, um anschließend eine lineare Produktionsfunktion daraus zu bilden und die Kosten für weitere Entfernungen flexibel simulieren zu können (Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010). Bei der Düngung wurden Nährstoffentzugswerte angesetzt, bei den die maximale Gärrestmenge pro Hektar ausgebracht wird, die gemäß Stickstoff oder Phosphor möglich ist. Der übrige Düngebedarf bei Stickstoff wird mineralisch mit dem Düngemittel Kalkammonsalpeter (KAS) (27% Stickstoff) und bei Kalium mit Kornkali (40% K₂O) ausgeglichen. Für den Gärrest wurde eine Standard-Analyse angenommen (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2023). Die Transportkosten des Erntegutes wurden für Quaderballen ebenfalls auf Basis des Leistungs-Kostenrechners angenommen. Für Strohpellets und Silomais wurden die Transportkosten in Anlehnung an Döring et al. (2010) und Hinzunahme des KTBL-Maschinenkostenrechners berechnet. Die Schüttdichte bei Mais wurde mit 350 kg/m³ und für Strohpellets im Mittel mit 557 kg/m³ gemäß der Ergebnisse aus AP 1 verwendet (Döring et al. 2010; KTBL 2023c).

Ermittlung des Gleichgewichtspreises für Strohpellets

Um Praktikern eine Orientierung zu bieten wurden auf Basis des in AP1 ermittelten Biogasertrages und Methangehaltes für Strohpellets Gleichgewichtspreise von Strohpellets zu Silomais anhand des

¹Die Lagerente bestimmt, welches Produkt an welchem Standort hergestellt werden sollte und repräsentiert den potentiellen Gewinn, den ein Produzent mit einem bestimmten Gut bei einem bestimmten Marktpreis erzielen kann, wenn ihm der Boden kostenlos zur Verfügung steht (Maier und Tödting 1992)

Methanertrages pro Tonne Frischmasse ermittelt. Die Umrechnung erfolgte dabei auf der Basis €/m³ Methan anhand von Maissilage (KTBL 2013). Ebenfalls dargestellt wurde der äquivalente Preis für Getreidekorn, da sowohl in der Betreiberumfrage (AP 2.2) als auch bei der Analyse der Daten des Biogasmessprogramms III auffiel, dass neben Maissilage auch Getreidekorn eine wesentliche Rolle als aktuelles Substrat einnimmt, das zukünftig nicht mehr bzw. nur noch in geringeren Anteilen zulässig sein wird. Dieses gilt es vor dem Hintergrund des Maisdeckels als auch der ethischen Diskussion zu ersetzen. Bei der Ermittlung der Gleichgewichtspreise wurden Lagerverluste bei Maissilage von 10 % sowie bei Strohpellets von einem Prozent berücksichtigt. Die Gärrestlagerkosten wurden anhand des Fugatfaktors mit Kosten von 6,1 € pro m³ Gärrestlagerraum bewertet. Die Lagerkosten wurden anhand aktueller Preiskalkulationen für den Bau eines Lagers mit rd. 7000 m³ Fassungsvermögen ermittelt. Der Preis für Maissilage wurde bei 35% TS-Gehalt inkl. Anrechnung von Lagerverlusten von 12% zwischen 35 €/t und 55 €/t variiert. Die Kosten für die Gärrestausrückführung wurden mit 0 €/m³ (innerbetriebliche Verwertung), 5 €/m³ und 10 €/m³ exemplarisch gewählt.

7.1.4 Akzeptanzstudie

Studiendesign – Pelletier und Pelletvermarkter - Befragung

Ergänzend zur Literaturanalyse wurde eine empirische Kurzstudie zu den Kosten der Pelletierung in Deutschland durchgeführt. Dazu wurde eine Online-Befragung im Zeitraum vom 27.01. bis zum 05.03.2021 unter Strohpelletierern und Pelletvermarktern durchgeführt. Eine persönliche Befragung war aufgrund der anhaltenden Corona-Pandemie oder aus Gründen der betrieblichen Geheimhaltung nicht möglich. Aufgrund der spezifischen Zielgruppe wurden die Pelletierer und Pelletvermarkter überwiegend telefonisch oder per E-Mail vorab kontaktiert und der Link zur Umfrage zugesandt. Darüber hinaus wurde in den sozialen Medien sowie bei TopAgrar online auf die Umfrage hingewiesen. Insgesamt haben 72 Probanden den Umfragelink geöffnet und begonnen den Fragebogen auszufüllen. 54 Teilnehmer haben die Beantwortung des Fragebogens vorzeitig abgebrochen. Lediglich 18 Teilnehmer haben den Fragebogen vollständig bearbeitet. Der Fragebogen enthielt 32 Fragen, von denen ein Teil der Fragen als Filterfragen angelegt war, um nach der Art der Pelletierung: mobil, teil-mobiler (z.B. Containeranlage) und stationärer Pelletieranlage zu unterscheiden. Des Weiteren wurden die pelletierten Stroharten, Anlagenhersteller, Transportentfernungen, Lagerung des Stroh, Auflöseverfahren und Pelletierleistung abgefragt. Anschließend wurden folgende Daten zur Ökonomie erfasst: Nettoherstellungskosten in €/t, Kostenaufteilung in Prozent und Verkaufspreise in €/t. Zum Abschluss wurden die Probanden gebeten ihre Einschätzung zu den Zukunftsaussichten der Strohpelletierung und Hemmnissen bei der Verwendung von Strohpellets anstelle von Langstroh auf einer fünfstufigen Likert-Skala (von 1 = „stimme überhaupt nicht zu“ bis 5 = „stimme voll und ganz zu“) abzugeben. Abschließend enthielt der Fragebogen drei Fragen zur Soziodemographie der Teilnehmer.

Studiendesign – Biogasanlagenbetreiber - Befragung

Um die vielschichtigen Interaktionen zwischen verschiedenen Akzeptanzfaktoren näher zu untersuchen, wurde in einer zweiten Studie auf Grundlage der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (UTAUT 2) ein Strukturgleichungsmodell zur Untersuchung des Nutzungsverhalten von Strohpellets in der Biogaserzeugung entwickelt. Das UTAUT 2 wurde in der wissenschaftlichen Literatur bereits häufig als Grundlage für die Analyse der Verhaltensintention zur Nutzung einer neuen Technologie oder eines neuen Systems dient, verwendet (Venkatesh et al. 2003; Arens et al. 2012; Peralta et al. 2019; Schukat und Heise 2021). Das Modell enthält acht Konstrukte: Leistungserwartung (LE), Aufwandserwartung (AE), sozialer Einfluss (SE), erleichternde Rahmenbedingungen (ER), hedonische Motivation (HM), Gewohnheit (G) und Kosten-Nutzen-Verhältnis (KNV), die die Verhaltensintention und das Nutzungsverhalten einer Technologie determiniert (Venkatesh et al., 2012). Auf der Grundlage der vorangegangenen Literaturrecherche wurde das Konstrukt HM aus dem Modell entfernt und das wahrgenommene Risiko (WR) und die persönliche Innovationsbereitschaft (PI) dem UTAUT 2-Modell für den Anwendungsfall der Akzeptanz von Strohpellets als Biogassubstrat hinzugefügt (Martins et al. 2014; Tamilmani et al. 2020; Koivisto et al. 2016; Wellner und Theuvsen 2018). Für jedes Konstrukt wurden Statements auf der Grundlage der vorhandenen Literatur formuliert und in randomisierter Reihenfolge innerhalb der konstruktbezogenen Abschnitte in der Online-Befragung dargestellt (Kröger et al, 2016; Venkatesh et al., 2012; Schaper et al., 2008; Granoszweski et al., 2009; Voss et al., 2009; Borrero et al., 2014; Peris et al., 2011; Shaw und Sergueeva, 2019; Wellner et al., 2019). In Anlehnung an vorangegangene UTAUT-Studien wurden die Moderatorvariablen Alter ((1) bis 35 Jahre; (2) 36 bis 45 Jahre; (3) 46 bis 55 Jahre; (4) mehr als 55 Jahre), Geschlecht, Freiwilligkeit der Nutzung und die Erfahrung, in diesem Fall in der Biogaserzeugung ((1) bis zu 10 Jahre; (2) 11 bis 15 Jahre (3) mehr als 15 Jahre) in dieser Studie berücksichtigt und analysiert (Venkatesh, 2003; 2012). Darüber hinaus wurde die landwirtschaftliche Ausbildung ((1) landwirtschaftliche Lehre und andere Abschlüsse; (2) Landwirtschaftsschule I+II; (3) Landwirtschaftsmeister; (4) landwirtschaftlicher Hochschulabschluss) als

moderierende Variablen in das Modell dieser Studie aufgenommen (Niehaves und Plattfaut 2010; Liew et al. 2014; Nguyen et al. 2014).

Basierend auf der Konzeptionalisierung wurde ein Fragebogen entwickelt und im Zeitraum vom 09.02 bis zum 06.04.2021 für eine anonyme und standardisierte Befragung unter Betreibern einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in Deutschland online über die Plattform Unipark (Questback GmbH) verwendet. Vor dem Start der Umfrage wurde ein Pretest durchgeführt, um die Funktionalität und Verständlichkeit des Fragebogens zu gewährleisten. Der Weblink zum finalen Fragebogen wurde über verschiedene Verbände und Zeitschriften mit Agrar- und Bioenergiehintergrund, persönliche Netzwerke und Social-Media-Plattformen verbreitet, um eine breite Streuung innerhalb des Agrarsektors in Deutschland zu erreichen. Insgesamt nahmen 316 Personen an der Umfrage teil. Aufgrund außergewöhnlicher Antwortzeiten sowie einer erkennbaren Systematik von Teilnehmenden ausschließlich Antworten in der Mitte der Skala zu platzieren, wurden drei Beobachtungen von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Vier weitere Beobachtungen von Landwirten, die Biogasanlagen mit einem Substratanteil von über 90 % an Gewerbe-, Industrie- und Siedlungsabfällen betreiben, wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Daher umfasste der endgültige Datensatz, der für die weitere Analyse verwendet wurde, 309 Beobachtungen.

Der Fragebogen bestand aus fünf Teilen. Um Verwechslungen mit anderen Verarbeitungsformen von Getreidestroh oder anderen Rohstoffen wie Mais- oder Rapsstroh zu vermeiden, enthielt der Fragebogen zu Beginn eine allgemeine Definition von Strohpellets aus Getreidestroh. Detaillierte Informationen zu den Vergärungseigenschaften von Strohpellets wurden vorab nicht bereitgestellt, um das Antwortverhalten nicht zu beeinflussen. Im zweiten Teil wurden die Anlagenbetreiber zu ihren Betriebsmerkmalen, wie z. B. weiteren Betriebszweigen und Betriebsgröße, befragt. Im dritten Teil wurden zusätzliche Betriebsmerkmale mit spezifischen Fragen zur Biogasanlage (u.a. installierte elektrische Leistung, Höchstbemessungsleistung, Vergütung, technische Ausstattung, aktueller Substrateinsatz) sowie der erste Teil der Zahlungsbereitschaft¹ für Strohpellets abgefragt. Der vierte Teil des Fragebogens umfasste elf Abschnitte mit Statements zu den verschiedenen Konstrukten des UTAUT 2-basierten Forschungsmodells, die zuvor auf Basis der vorhandenen Literatur operationalisiert worden sind (Granoszewski et al. 2009; Voss et al. 2009; Kröger et al. 2016; Schaper et al. 2008; Venkatesh et al. 2012; Peris und Nüttgens 2011; Simon 2001; Shaw und Sergueeva 2019; Wellner et al. 2019; Borrero et al. 2014; Lohmöller 1988). Abschnittsweise wurden den Befragten sechs bis acht Statements in randomisierter Reihenfolge angezeigt. Die Bewertung der Items durch die Probanden erfolgte auf 5-stufigen-Likert-Skalen (von 1 = „stimme überhaupt nicht zu“ bis 5 = „stimme voll und ganz zu“). Im fünften und letzten Teil des Fragebogens wurde der zweite Teil der Zahlungsbereitschaft¹ (informationsgestützt) für Strohpellets und die soziodemografischen Merkmale der Biogasanlagenbetreiber*innen abgefragt.

¹Zur Ermittlung der Zahlungsbereitschaft für Strohpellets kam die Contingent Valuation Method (CVM) mit offenem Fragenformat und inhaltlichem Fokus auf den Preis als Produkteigenschaft zur Anwendung (Sattler und Nitschke 2003; Völckner 2006). Um festzustellen, ob das Vorwissen zur Vergärung von Strohpellets und das zur Verfügung stellen von Informationen einen Einfluss auf die Zahlungsbereitschaft für Strohpellets hat, wurde ein zweistufiger Ansatz der CVM gewählt. Beide Abfragen wurden unabhängig voneinander gestellt (Poe und Bishop 1992; Wu et al. 2017): Zunächst wurde die Zahlungsbereitschaft in Relation zum Durchschnittspreis des aktuellen Hauptbiogassubstrats ohne weitere Informationen in Teil 3 des Fragebogens in Euro pro Tonne Frischmasse abgefragt. Im letzten Teil des Fragebogens, am Ende der Umfrage, wurde die Zahlungsbereitschaft erneut, in diesem Fall mit einer tabellarischen Kurzinformationen zu den Vergärungseigenschaften von Strohpellets aus Vorversuchen der HAWK im Vergleich zu Maissilage als Referenzsubstrat abgefragt (Mitchell und Carson 1989). Bei Maissilage wurde ein Ankerpreis von 36 € pro Tonne als Orientierungswert ausgewiesen (Scheffelowitz et al. 2015).

Methoden zur Analyse der Befragungsdaten:

Die statistische Analyse wurde in den Fällen a) und b) mit IBM SPSS Statistics Version 27 und im Fall c) mit Software SmartPLS 3.3.2 durchgeführt. Über beide Umfragen hinweg kamen uni-, bi- sowie multivariate Analysemethoden zum Einsatz. Während die Datenanalyse der Umfrage unter Pelletierern und -vermarktern ausschließlich deskriptiv erfolgte, wurden die Befragungsdaten der Anlagenbetreiber wie unter a) und b) beschrieben weiterführend untersucht.

a) Deskriptive Statistik

Zunächst wurde mit beiden Datensätzen univariate Analysen durchgeführt, um deskriptive Statistiken der Daten zu erstellen und die Datensätze beschreiben zu können (Raab-Steiner und Benesch 2010). Unter anderem wurden Daten zu Betriebs- und Anlagemerkmale sowie zur Soziodemographie der Probanden deskriptiv analysiert. Für die Zahlungsbereitschaft der Biogasanlagenbetreiber*innen wurden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet.

b) Faktoren und Clusteranalyse

Die Umfragedaten der Biogasanlagenbetreiber*innen wurde im Anschluss an a) weitergehend im Rahmen einer explorativen Faktorenanalyse mit 13 Akzeptanzvariablen untersucht. Diese diente dazu, die Dimension in Bezug auf die Absicht, Strohpellets für die Biogaserzeugung zu verwenden, zu reduzieren (Backhaus et al. 2018). Zur Kontrolle der Qualität der Analyse wurden ein Maß für die Stichprobenadäquanz (MSA), der Kaiser-Meyer-Olkin-Wert (KMO), der Bartlett-Test und eine anschließende Reliabilitätsanalyse eingesetzt (Brosius 2013). Anschließend wurde eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt, um homogene Gruppen auf der Grundlage der zuvor extrahierten Faktoren zu bilden (Backhaus et al. 2018). Die Single-Linkage-Methode wurde angewandt, um Ausreißer zu entfernen. Die optimale Anzahl von Clustern wurde mit der Ward-Methode analysiert. Mit der k-means-Methode wurde die zuvor generierte Startpartition der Ward-Methode optimiert, wie in der Literatur empfohlen (Bortz 2005). Für eine detaillierte Charakterisierung der gebildeten Cluster wurde eine einseitige ANOVA durchgeführt. Im Falle von Varianzheterogenität (Levene-Test) wurde die Welch-ANOVA durchgeführt, die im Vergleich zum Einweg-Ansatz eine höhere Robustheit gegenüber Varianzheterogenität aufweist. Zur Ermittlung signifikanter Unterschiede zwischen den einzelnen Clustern wurde der Tamhane T2 Post-hoc-Mehrfachvergleichstest durchgeführt, der davon ausgeht, dass sich Gruppen in ihrer Varianz unterscheiden können. Bei kategorialen Variablen wurde eine Kreuztabellierung mit einem Chi-Quadrat-Test nach Pearson durchgeführt. Dieser Ansatz wurde durch einen paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur ($\alpha=0,05$) erweitert (Brosius 2013; Backhaus et al. 2018).

a) Strukturgleichungsmodellierung mit PLS-SEM

Die Analyse der Beziehungen zwischen den Konstrukten (latenten Variablen) erfolgte unter Verwendung der Partial Least Square (PLS) Strukturgleichungsmodellierung (SEM). Die Signifikanz der Indikatorladungen wurde mittels des Bootstrap-Verfahrens mit 5000 Iterationen getestet; die Auswertung und Inferenz erfolgte unter der Annahme einer randomisierten Stichprobe. Die Multigruppenanalyse (MGA) wurde verwendet, um mögliche moderierenden Effekte von (kategorialen) demographischen Faktoren wie Alter, Erfahrung und Berufsausbildung auf die Intention zur Nutzung von Strohpellets zu testen (Hair et al. 2018; Cheah et al. 2020).

7.2 Ergebnisse

7.2.1 Literaturanalyse

Der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen hat sich in den letzten Jahrzehnten in der deutschen Landwirtschaft etabliert. Im Jahr 2019 sind auf 14 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen in Deutschland Pflanzen für die Erzeugung von Biogas, Biodiesel/Pflanzenöl oder Bioethanol angebaut worden (FNR 2020). Auch wenn der Flächenanteil für die Erzeugung von Biomasse seit 2014 relativ stabil ist, wird die Verwendung von landwirtschaftlichen Flächen für die Energieerzeugung im Rahmen der „Teller oder Tank“-Diskussion nach wie vor kritisch gesehen (Bernigau 2017; Neu 2019).

Vor diesem Hintergrund plant die Bundesregierung zukünftige Bioenergiepotenziale vor allem im Bereich der biogenen Rest- und Abfallstoffe zu erschließen. Damit soll die Nutzungs- und Flächenkonkurrenz begrenzt und die Kosten der Bioenergieerzeugung möglichst gering gehalten werden (FNR 2015a; Mohrmann et al. 2022). Bereits mit dem EEG 2012 ist erstmalig für Neuanlagen eine Begrenzung des Maisanteils zugunsten von Alternativsubstraten eingeführt worden. Darüber hinaus ist auch für Bestandsanlagen, für die die 20-jährige-EEG-Förderperiode ab 2020 nach und nach ausläuft, ein verpflichtender Deckel für Getreidekorn und Mais (außer Maisstroh) festgelegt worden. Soll eine Bestandsanlage zukünftig weiterbetrieben werden, muss für diese ein festgeschriebener, maximaler Anteil dieser Substrate eingehalten werden, um an zukünftigen Ausschreibungen teilnehmen zu können (Loibl 2017; Daniel-Gromke et al. 2020). Nachdem dieser zunächst einen Anteil dieser Substrate von maximal 50 % vorsah, wurde der „Maisdeckel“ mit den EEG-Novellen 2017 und 2021 schrittweise auf 44 % bzw. 40 % verschärft. Mit der Novelle 2023 soll eine weitere Absenkung auf 30% ab 2026 erfolgen (Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2021). Entsprechend besteht ein hoher Handlungsdruck traditionelle Substrate, wie Silomais oder Getreide-Ganzpflanzensilage, zukünftig zugunsten von Alternativsubstraten zu substituieren. In Hinblick auf die noch ausstehende nationale Umsetzung der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) gewinnen Alternativsubstrate darüber hinaus bei Reduzierung von Treibhausgasemissionen in der Biogaserzeugung an Bedeutung (Rauh 2020). Als Lösungsansatz bieten insbesondere die Nutzung von landwirtschaftlichen Nebenprodukten und Reststoffen ein hohes Potential für die stoffliche und energetische Nutzung in Deutschland (Brosowski et al. 2015; Weiser 2014).

Das größte mengenmäßige Potential besteht mit 8 bis 13 Mio. Tonnen Frischmasse in der energetischen Verwertung von Getreidestroh (Weiser 2014; Kalcher und Brosowski 2018). Dies entspricht einem Anteil von 27% bis 44% des gesamten Strohaufkommens in Deutschland (Weiser et al. 2014). Bei Rückführung von Nährstoffen über die Gärrestausrückführung aus der Biogaserzeugung auf die entsprechenden Flächen erhöht sich das Nutzungspotential auf 14 bis 21,5 Mio. Tonnen (Brosowski et al. 2020). Das Potential zur stofflichen/energetischen Nutzung von Stroh wird bisher kaum ausgeschöpft, obwohl es kostengünstig, relativ gut verfügbar und nicht-konkurrierend mit der Lebensmittelproduktion wäre (Antonczyk und Scherer 2015).

Die Nutzung als Brennstoff oder als Rohstoff für die Produktion von Biokraftstoffen hat sich trotz mehrerer Forschungsprojekte bis heute nicht in der breiten Praxis durchsetzen können (Zeller et al. 2012; Zhang 2012; (FNR 2015a; Erneuerbare Energien 2018). Ähnliches trifft auf die Vergärung von Getreidestroh zu (Möller et al. 2006; Kaparaju et al. 2009; Reinhold und Friedrich 2012; Reinhold 2014). Trotz der niedrigen Stromgestehungskosten von 4,61 ct/kWh für den Rohstoff Getreidestroh wird dieser aufgrund des hohen Aufwandes für die Beschaffung und Aufbereitung für die Fütterung in Biogasanlagen in der Literatur als nicht kosteneffizient bezeichnet (Kadam et al. 2000; Mussoline et al. 2013; Møller und Hansen 2014; Luo et al. 2015; Schwarz 2016b). Das hohe Volumen und die geringe Dichte von Stroh verursacht hohe Transportkosten und einen hohen Lagerraumbedarf bei der Beschaffung und Einlagerung (Dubrovskis et al. 2018; Møller und Hansen 2014). Darüber hinaus können die physikalischen Eigenschaften wie die langfaserige Struktur und ein hoher TS-Gehalt zu verfahrenstechnischen Komplikationen wie z.B. Schwimmschichten, einer erschwerte Rührbarkeit oder zu hohen Trockensubstanzgehalten im Fermenter führen (Reinhold 2014, 2019; Møller und Hansen 2014). Auch technische und chemische Aufbereitungsverfahren sowie Verfahren zur Co-Silierung mit Substraten wie Zuckerrüben oder Silomais haben bisher nicht zu einer wesentlichen Nutzung von Stroh in Biogasanlagen beitragen können (Mohrmann und Otter 2021; Laser et al. 2019; Höppner et al. 2014). Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit von Stroh regional, je nach konkurrierenden Nutzungsoption vor Ort, sehr unterschiedlich (Thraen und Stecher 2012). Neuere Ansätze befassen sich daher mit der Nutzung von kompaktiertem Stroh in Form von Briketts und Pellets (Møller und Hansen 2014; Schwarz 2016a; Schwarz et al. 2019). Durch diese Aufbereitungsform werden die verfahrenstechnischen Probleme im Vergleich zur Verwendung von Langstroh überwiegend gelöst (Larsson et al. 2008; Kaliyan und Morey 2010). Insbesondere Lager- und Transportkosten können hierdurch gesenkt werden (Rijal et al. 2012; Theerarattananoon et al. 2012; Møller und Hansen 2014). Darüber hinaus wird ein positives Verhalten im Fermenter sowie der Möglichkeit der Rückführung von Nährstoffen und humus-bildenden Teilen über die Gärrestverbringung festgestellt (Schwarz 2016a, 2016b; Dubrovskis et al. 2018). Während zur Verfahrenstechnik erste Ergebnisse zur Vergärung von Strohpellets vorliegen, ist die Frage der Wirtschaftlichkeit des Strohpelletsatzes in Biogasanlagen noch offen.

Für den Zukauf von Strohpellets in Einstreuqualität im BigBag sind je nach Abnahmemenge Preise zwischen 230 und 330 €/t zu finden (BayWa AG 2020; Tilger Dienstleistungs- & Handels GmbH 2020). In der Literatur werden Gesamtproduktionskosten pro Tonne Strohpellets von 30 €/t ohne Berücksichtigung der Rohstoffkosten für Stroh von bis zu 210 € pro Tonne inkl. Rohstoffkosten für Stroh angegeben (siehe Tabelle 13). Insbesondere die Rohstoffkosten für Stroh sind neben den Energiekosten der Hauptkostenfaktor der Pelletierung. Die Fixkosten hängen insbesondere von der angenommenen Auslastung in Tonnen pro Jahr ab.

Tabelle 13: Produktionskosten für Strohpellets

Quelle	Kosten	Bemerkungen
(Prüfer et al. 1974).	120 – 204 €/t (235 – 400 DM)	Inkl. Strohbergung
(Passalacqua et al. 2004)	94 €/t – 164 €/t	Rohmaterial Stroh 25-50 €/t, Pelletiervorgang 20-30 €/t, übrige Kosten = Fixkosten Vergleichspreis Dänemark: 135 €/t
(Mani et al. 2006)	Ca. 47 €/t (50,57 \$/t)	Inkl. Rohware frei Pelletieranlage (19,73 \$/t, 39%), 5,99 \$/t Kapitalkosten, 44,58 \$/t variable Kosten. Durchsatz: 6 t/h stationär. 40,3 \$/t ohne Trocknungskosten (20,4% der Kosten)
(Hiendlmeier 2006)	80€/t – 100 €/t	Marktpreis 140 – 180 €/t
(Sultana et al. 2010)	Ca. 112 €/t – 157 €/t (122,2 – 170,9 \$/t)	Pelletierkosten in Abhängigkeit des Strohertrags pro Hektar, Durchsatzes pro Jahr und Auslastung der stationären Pelletieranlage Hauptkostentreiber: Strohbergungs- und Transportkosten
(Nolan et al. 2010)	100,95 €/t 94,70 €/t - 111,10 €/t je nach Auslastung	73,31 €/t Kapitalkosten inkl. Rohmaterial-Zukauf (66,33 €/t, bei Weizenstroh 32 €/t), 27,64 €/t variable Kosten; Dänemark: 61 €/t aus Strohballen, Beschaffenheit der Pellets,

Quelle	Kosten	Bemerkungen
(Gersbeck 2013)	54 €/t stationär, 79 €/t – 85 €/t teil-mobil	Zuzüglich Rohstoffkosten von 77 €/t bis 108 €/t
(Bioenergieforschungsplattform Baden-Württemberg 2013)	128 €/t TM; 130 €/t TM	Preis frei Biogasanlage, Unterscheidung zw. kleiner (128 €) und mittlerer Pelletieranlage (130 €, höhere Transportkosten).
(Oosterkamp 2016)	155 €/t	Inkl. Kosten für Strohballen von 105 €/t, 35 €/t Pelletieren, 15 €/t Transport (70 km)
(Schwarz 2016a)	95 €/t	Inkl. 35 €/t Strohbergung; Containeranlage 1 t/h,
(Kwaśniewski und Kuboń 2016)	63 €/t – 70 €/t	Stromkosten: ca. 40 % der Gesamtkosten, Strohbeschaffungskosten: ca. 22 €/t, Festkosten: 3-10 €/t, Durchsatz: 3 t/h, Auslastung:19.200, 13.400, 6700 t/Jahr
(Nagy et al. 2018)	88 €/t – 90 €/t	Fixkosten: ca. 14 €/t, variable Kosten: ca. 77 €/t, Annahme: Trocknung durch Abwärme (kostenfrei)
(Schwarz et al. 2019)	85 €/t – 210 €/t	Inkl. Beschaffungskosten pro Ballen: 25-140 €/t, zuzüglich Gewinnanspruch Dienstleister 25 €/t und Natronlauge 10 €/t,
(Schaidler Pelltec o. J., 2020).	30 €/t – 62 €/t	Ohne Rohstoffkosten Stroh, Angaben des Herstellers
(Karsten 2022)	144,8 €/t; 147,2 €/t; 210,5 €/t	Kosten: Krone Premos mobil; teil-mobil (Durchsatz jeweils bei 5 t/h); Ecokraft stationär (1 t/h)

Quelle: eigene Darstellung

Wichtige Kostentreiber von Biogassubstraten sind neben den Rohstoffkosten die Transportkosten (Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010; Kellner et al. 2011), Lagerkosten (Hahne 2016) und Arbeitserledigungskosten (Schwarz 2003). Diese sind in Hinblick auf Strohpellets bisher nicht untersucht. Darüber hinaus fehlen Informationen zu den Änderungen der Kosten auf Ebene der einzelnen Prozesse (Substratbeschaffung, Fütterung, Vergärung, Gärrestmanagement). Aufgrund der Tatsache, dass die Substratkosten über 50 % der jährlichen Gesamtkosten einer Biogasanlage ausmachen, gilt es diese in Bezug auf Strohpellets als potientielles neues Inputsubstrat im Detail zu untersuchen (Cucchiella et al. 2019; Daniel-Gromke et al. 2020).

Aufgrund der in der Literatur herausgestellten Bedeutung der Transportkosten bei der Substratbeschaffung sollte dieser Aspekt gesondert betrachtet werden (Toews 2009; Döring et al. 2010; Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010; Kellner et al. 2011). Das am häufigsten eingesetzte Biogassubstrat Silomais ist ein transportunwürdiges Substrat, während Strohpellets nach bisherigem Kenntnisstand als transportwürdiges Substrat bezeichnet werden können (Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010; Schwarz 2016b). Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Verteilung und Größe der Biogasanlagen sowie gleichzeitig regional variierender Verfügbarkeit von Stroh in Deutschland stellt sich die Frage, bis zu welcher Transportentfernung welcher Rohstoffe der optimale ist (Thraen und Stecher 2012; Daniel-Gromke et al. 2017; Fachverband Biogas 2020). Für traditionelle Biogassubstrate sind solche Studien bereits durchgeführt worden (Lankoski und Ollikanen 2006; Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010; Weiland 2010). Die Aktualität dieser ist aufgrund elementarer Änderungen rechtlicher Rahmenbedingungen (u.a. Novellierung der Düngeverordnung, CO₂-Bepreisung ab 2021) jedoch nicht mehr gegeben (DüV 2020). Darüber hinaus ist eine Betrachtung von landwirtschaftlichen Nebenprodukten, wie z.B. Stroh und Strohpellets, im Vergleich zu weiteren Nebenprodukten und/oder traditionellen Inputsubstraten bisher nicht erfolgt.

Ferner sind neben ökonomischen Gesichtspunkten auch persönliche, soziale und psychologische Faktoren bei der Entscheidung über den Einsatz eines Substrats von Bedeutung (Crane und Matten 2004; Henke und Theuvsen 2014; Kröger et al. 2016). Studien zum Verhalten von Landwirten zeigen, dass das soziale Umfeld und die Beziehung zu Familienangehörigen eine wichtige Rolle bei betrieblichen Entscheidungen einnimmt (Weber et al. 2013; Jeinsen et al. 2018). Auch die persönliche Innovationsbereitschaft und Risikoneigung bestimmt die grundsätzliche Bereitschaft neue Dinge im betrieblichen Kontext auszuprobieren (Voss et al. 2009; Granoszewski et al. 2009; Schaper et al. 2010; Emmann et al. 2013; Kröger et al. 2016). Ausschlaggebend kann ebenfalls die Infrastruktur auf dem Betrieb oder der Zugang zu Informationen zu einer

neuen Technologie sein (Fielding et al. 2008; Wellner und Theuvsen 2018). Die Akzeptanz von Innovationen, wie beispielsweise ein neues Inputsubstrat, hängt darüber hinaus von soziodemographischen Merkmalen, wie Alter, Berufserfahrung, Betriebsgröße oder den Ausbildungsstand, des Entscheiders ab (Lamm et al. 1976; Fernandez-Cornejo et al. 1994; Willock et al. 1999; Fernandez-Cornejo et al. 2002; Hertell 2004; Schaper et al. 2008; Kröger et al. 2016; Jeinsen et al. 2018). Im Biogassektor ist eine Untersuchung der genannten Faktoren anhand des Gärsubstrats Güllefeststoffe bereits erfolgt (Kröger et al. 2014). Für das Substrat Strohpellets steht diese noch aus. Darüber hinaus fällt auf, dass moderierende Variablen in der Literatur bei Studien im Biogasbereich bisher keine Anwendung gefunden haben, obwohl deren Einfluss in Untersuchungen zur Technologieakzeptanz im IT-Bereich (Chang 2012; Liew et al. 2014; Borrero et al. 2014; Nguyen et al. 2014; Al Mansori et al. 2018; Kulak et al. 2019) und Agrarbereich (Arens et al. 2012) mehrheitlich belegt werden konnte. Neben den moderierenden Variablen sind Gewohnheitseffekte sowie der Einfluss der vorhandenen Infrastruktur (erleichternde Rahmenbedingungen) bisher nicht einbezogen worden.

7.2.2 Ökonomische Bewertung

Zu Beginn des Projektes wurde herausgearbeitet, in welchen Bereichen der Prozesskette von der Substratbeschaffung, Einbringung, Vergärung und der Gärrestausbringung Kostenänderungen beim Einsatz von Strohpellets im Vergleich zu etablierten Substraten entstehen könnten. Das Ergebnis des Brainstormings ist in Abbildung 52 dargestellt und enthält die jeweiligen Parameter, die im Rahmen des AP 1, der Literaturanalyse und Datenerhebungen im Rahmen des AP 2.1 berücksichtigt werden sollten.



Abbildung 52: Prozesskette der Biogaserzeugung aus Strohpellets

Quelle: Eigene Darstellung

Hinweis: Nicht jeder der dargestellten Punkte stellt im Folgenden ein eigenes Unterkapitel dar, da beispielsweise Kostenkomponenten wie die Transport- und Lagerkosten in die Kosten für Strohpellets frei Biogasanlage mit einfließen.

Rohstoffkosten von Strohpellets und Analyse von Pelletierverfahren

Der Preis für den Rohstoff Stroh ist nur schwer allgemeingültig zu bestimmen, da dieser regional je nach konkurrierender Nutzung (z.B. intensive Nutztierhaltung im Nordwesten Deutschlands) sowie jährlich schwankender Faktoren, wie z.B. dem Strohertrag oder dem Düngemittelpreis, als Maßgabe für die Berechnung der Nährstoffentzugskosten durch die Strohabfuhr, variieren kann. Die AMI weist der Preis für Stroh-Großballen in den Jahren 2017 bis 2020 eine Schwankungsbreite von 50 € in Sachsen-Anhalt in 2020 und 140 €/t in Schleswig-Holstein in 2019 aus. Insbesondere die Jahre 2018 und 2019, in denen es regionsübergreifend sehr trocken war, führten zu niedrigen Getreide- und Stroherträgen, die sich in insgesamt höheren Strohpreisen niederschlugen. Nicht nur zwischen den Jahren sind erhebliche Preisschwankungen möglich, auch innerhalb eines Jahres können Schwankungen von bis zu 30 % auftreten, wobei die Preise in der Ernte im Vergleich zu den Wintermonaten in der Regel geringer sind. Im Schnitt der letzten vier Jahre ergibt sich ein durchschnittlicher Preis pro Tonne Stroh, gepresst in Großballen, von 90,6 €/t netto ohne Transport zum jeweiligen Nutzungsort. In Niedersachsen, Hessen sowie Schleswig-Holstein liegt das

Preisniveau bei über 100 €/t im Schnitt der letzten vier Jahre. In den östlichen Bundesländern sowie Nordrhein-Westfalen ist ein Preisniveau von weniger als 80 €/t festzustellen (Agrarmarkt Informations-Gesellschaft (AMI) 2021).

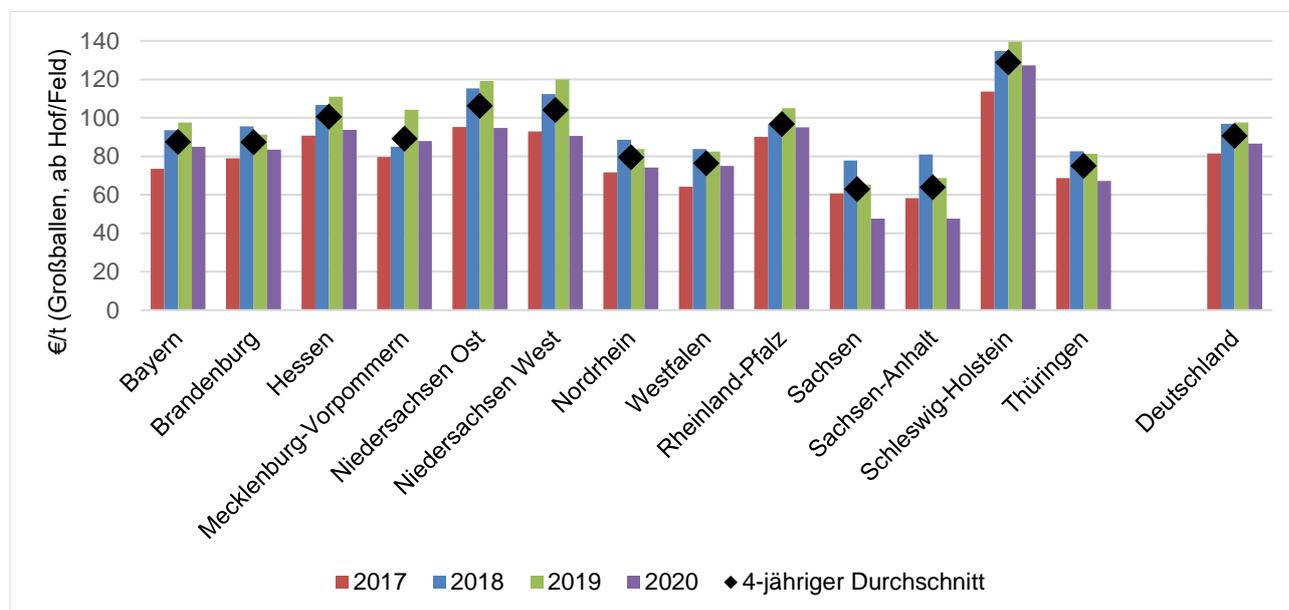


Abbildung 53: Strohpreise nach Jahren und Region

Quelle: Eigene Darstellung nach AMI 2021

Kosten der Stropelletierung

Als Datengrundlage für die Berechnung der Pelletierkosten wurden wie in Kapitel 7.1.3 folgende Arbeitszeit-, Leistungs- und Verbrauchsdaten ermittelt. Weiterführende Informationen sind in Zwischenbericht 2 vorzufinden.

Teil-mobile Pelletierung

Im Schnitt wurde über die drei Tage der Datenerhebung pro Ballen eine Pelletierzeit von 6,62 Industrieminuten (Imin) erfasst. Die Hochrechnung anhand der Zeiterfassung pro Ballen ergab einen Durchsatz von 2,17 t/hasd. Unter Berücksichtigung der täglichen Arbeiten sowie zwischenzeitlicher Störungen wurde jedoch nur ein tatsächlicher Durchsatz von 1,71 t/h erreicht, der deutlich von der vom Hersteller angegebenen Durchsatzleistung von bis zu vier Tonnen pro Stunde abweicht. Der Auf- und Abbau der Anlage (Ein-/Ausklappen des Zufuhrtisches) sowie das tägliche Auspusten der Pelletiermaschine mit Druckluft, die routinemäßige Durchsicht der Maschine sowie das Tanken des Schleppers lassen sich auf etwa 30 Minuten Arbeitszeit pro Tag beziffern. Darüber hinaus traten bei der Datenerfassung, z.B. bei etwas höherer Feuchtigkeit der zu pelletierenden Strohballen, häufiger Störungen auf, die zu Verzögerungen im Pelletiervorgang führten. Sowohl die Rüstzeiten als auch Störungsbehebung sind in der Betrachtung in Bezug auf die Bruttozeit berücksichtigt worden. An Tag 1 waren die einzelnen Pelletierzeiten pro Ballen zu Beginn deutlich langsamer, da die Pelletiermaschine kalt (Temperatur der Kollerwalze zu Beginn 4°C) gestartet wurde. An Tag 2 und 3 konnte mit einer Ausgangstemperatur von etwas mehr als 30°C gestartet werden. Eine größere technische Störung an Tag 1, die zu einer größeren Reparatur (Tausch eines Lagers) an Tag 2 führte, wurde als außergewöhnliche Störung bereinigt.

Tabelle 14: Ergebnisse der Zeiterfassung bei der teilstationären Pelletierung aus Quaderballen

Parameter	Einheit	Mittelwert
Pelletiere Ballen	Anzahl	46
Ø Gewicht Ballen	t	0,250
Pelletierte Menge	t	11,5
Ø Zeitbedarf/Ballen	Imin/Ballen	6,62
Durchsatz Nettozeit	t/Std.	2,17
Durchsatz Bruttozeit (inkl. Rüstzeiten)	t/Std.	1,71

Quelle: Eigene Datenerhebung

Mobile Pelletierung

Der Durchsatz der Maschine lag im Durchschnitt von vier Tagen der Datenerhebung netto, d.h. bezogen auf die aktive Zeit, bei 5,57 t/h. Bezogen auf die Bruttozeit inklusive der Fahrt- und Rüstzeiten ergab sich ein durchschnittlicher Durchsatz von 3,65 t/h. Damit konnte der vom Hersteller angegebene Wert für die mobile Pelletierung von bis zu 5 t/h bzw. durchschnittlich ca. drei Tonnen bestätigt werden. Die aktive Zeit bei der mobilen Pelletierung macht knapp 2/3 im Tagesverlauf aus, 1/3 die inaktive Zeit. Das Verhältnis von aktiver zu inaktiver Zeit hängt wesentlich davon ab, wie viel Störungszeiten und Leerfahrten gemacht werden. So könnte – anders als in den beobachteten Versuchen - z.B. das Abbunkern während des aktiven Pelletierens zu einer Reduzierung der inaktiven Zeit beitragen und den Durchsatz pro Stunde weiter erhöhen.

Tabelle 15: Ergebnisse der Zeiterfassung bei der mobile Pelletierung von Weizenstroh

Vorgang		Tag 1	Tag 2	Tag 3*	Tag 4*	Mittelwert
Pelletierte Menge pro Tag	t	34,96	28,55	52,44	33,35	37,33
Aktive Netto-Pelletier-Zeit	lh	6,10	4,85	9,8	6,3	6,76
Anteil aktive Pelletierzeit an Gesamtzeit	%	70,2	67,6	66,7	57,3	65,4
Durchsatz Nettozeit	t/lh	5,73	5,89	5,35	5,29	5,57
Brutto-Pelletier-Zeit	lh	8,69	7,17	14,70	11,00	10,39
Summe inaktive Zeit	lh	2,59	2,32	4,90	4,70	3,63
Anteil inaktive Zeit an Gesamtzeit	%	29,8%	32,4%	33,3%	42,7%	34,6%
Durchsatz Bruttozeit	t/lh	4,02	3,98	3,57	3,03	3,65

Quelle: Eigene Datenerhebung, *Daten Maschinenterminal

Auf Basis der erfassten Leistungsdaten wurden die Pelletierkosten am Beispiel der Krone Premos berechnet. Bei der teil-mobilen Pelletierung wurden die eigenen Ergebnisse mit den Herstellerangaben gemittelt und entsprechend mit einem Durchsatz von 2,65 t/h Stunde weitergerechnet. Bei der mobilen Pelletierung wurde der ermittelte Wert von 3,65 t/h bzw. 3,69 t/h (ohne Anfahrt zum Feld) genutzt.

Die mobile Pelletierung ist mit Gesamtkosten von 85 €/t am günstigsten. Pro kWh Strom entspricht dies 8,2 ct/kWh. Die teil-mobile Variante ist insbesondere aufgrund der höheren Pelletierkosten von 138 €/t sowie höheren Lagerkosten für Strohballen mit 185,9 €/t deutlich kostenintensiver und würde zu Stromgestehungskosten von 18,1 ct/kWh führen. Würde die Krone Premos im Jahresverlauf zu 50% mobil und 50% teil-mobil betrieben, ergäben sich Pelletierkosten von 135,2 €/t. Würde man statt der Kosten für das Pressen und den Ballentransport Zukaufstroh einsetzen, dass frei Anlage geliefert und direkt pelletiert wird, so würden Kosten von rd. 246 €/t entstehen. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass im Zukaufpreis neben den Transportkosten zur Anlage, der Nährstoffentzug des Strohs sowie eine Gewinnprämie des Verkäufers enthalten ist. Bei allen anderen Kalkulationen gilt die Annahme, dass der Nährstoffentzug des Strohs nicht berücksichtigt wird, da die Nährstoffe über die Gärrestzufuhr im Kreislauf verbleiben. Das Pelletieren mit einer festinstallierten Anlage direkt an der Biogasanlage kommt auf Gesamtkosten von 159,1 €/t bzw. Stromgestehungskosten von 15,5 ct/kWh. Mit einer Container-Mietanlage sind die reinen Pelletierkosten mit rd. 170 €/t am höchsten, da der Durchsatz nur eine Tonne pro Stunde und zum anderen zwei Arbeitskräfte benötigt werden. Die Stromgestehungskosten würden in diesem Fall 21,3 ct/kWh betragen.

Tabelle 16: Ermittlung der Strohpelletkosten frei Biogasanlage

	Einheit	Mobil	Teil-mobil	Teil-mobil (aus Zukauf Quaderb.)	Festinstallierte Anlage**	Container- Mietanlage
Pelletierleistung/Durchsatz pro Stunde	t/h	3,65	2,65	2,65	1,0	1,0
Pressen	€/t	- €	23,89 €		23,89 €	23,89 €
Ballentransport u. Einlagerung	€/t	- €	10,59 €		10,59 €	10,59 €
Zukauf Quaderballen frei BGA	€/t			100,00 €		
Pelletierung	€/t	79,57 €	138,09 €	138,09 €	111,54 €	170,06 €
Transport Feld-Hof	€/t	2,71 €	-	-		
Transport Hof-Hof	€/t	- €	1,38 €	1,38 €	1,38 €	1,38 €
Lagerung						
Lagerung Ballen (3 Monate) inkl. Lagerverluste	€/t	- €	8,30 €	-	8,30 €	8,30 €
Lagerung Pellets (3 Monate) inkl. Lagerverluste	€/t	4,32 €* 4,32 €	2,39 €	5,10 €* 5,10 €	2,32 €	2,47 €
Zinsansatz	€/t	0,62 €	1,30 €	1,80 €	1,11 €	1,54 €
Gesamtkosten frei BGA	€/t	84,51 €	185,94 €	246,37 €	159,12 €	218,23 €
<i>Stromgestehungskosten***</i>	€/kWh	0,082 €	0,181 €	0,240 €	0,155 €	0,213 €

*hier abweichend 6 Monate Lagerung Pellets **21 ct/kWh Strom; *** 9,97 kWh/m³ Methan, 41% Wirkungsgrad.

Quelle: Eigene Berechnungen

Einbringung

Bei der Einbringung von Strohpellets stellte sich vorab der großtechnischen Versuche die Frage, ob Strohpellets ohne technische Anpassungsmaßnahmen am Eintragungssystem eingebracht werden können oder bereits an dieser Stelle Probleme auftreten, die mit entsprechenden Mehrkosten verbunden wären. Während der Versuchsphasen konnten mit Strohpellets im täglich gefütterten Substratmix keine Probleme festgestellt werden, die Mehrkosten verursachen könnten. Um hier näher ins Detail zu gehen, wurde die oben bereits beschriebene Messung zum Eigenstrombedarf vorgenommen, die folgende Ergebnisse brachte:

Eigenstromverbrauch Eintragungssystem

Die Messung der Leistungsaufnahme der Rohrförder- und Steilförderschnecke ergab eine Spanne zwischen 2,13 kW (Häckselstroh) und 5,84 kW (Lapf-Gras). Für Silomais wurde ein Wert von 3,79 kW und für Strohpellets ein Wert von 4,29 kW ermittelt.

Die Stromaufnahme der Frequenzumrichter bzw. per Amperezange wurde indirekt bestimmt, in dem zunächst die Stromstärke gemessen wurde. Die betrug für die Mischschnecke (FU rechts) 24,4 A, die Mischschnecke (FU links) 23,8 A und die Stopfschnecke 3,7 A. Aus diesen Werten ließ sich mit den gemessenen Volt von 408,9 V die Leistung in kW berechnen. Die zwei Mischschnecken im Futtermischer liefen konstant mit 9,73 kW bzw. 9,98 kW Leistung. Die Stopfschnecke mit 1,51 kW.

Bezogen auf die Zeit, die für die Versuchsmenge des Substrates gebraucht wurde, wurde für Strohpellets ein vergleichsweise niedriger Stromverbrauch von 1,31 kWh/t Frischmasse Strohpellets ermittelt (Tabelle 17). Limitierend zu berücksichtigen ist, dass es sich jeweils um eine Einzelbetrachtung der Substrate handelt. Entsprechend kann nicht direkt auf den Verbrauch einer Substratmischung geschlossen werden, sondern lediglich Tendenzen abgeleitet werden.

Tabelle 17: Stromverbrauch je Einzelsubstrat in kWh/t

Substrate	Strohpellets	Silomais	Lapf-Gras	Zuckerrüben	Rindermist	Häckselstroh
kWh/t FM	1,31	5,28	9,99	2,54	5,65	9,97

Quelle: Eigene Berechnungen

Limitation der Messwerte: Insgesamt sind die Stromverbräuche des Eintragungssystems überdurchschnittlich hoch, was damit zu begründen ist, dass es sich bei dem benannten Strautmann Feststoffeintrag um einen Ovalbehälter mit zwei Intensivmischwerkzeugen handelt. Dieses System gehört zu den energieintensivsten Eintragungssystemen mit Verbräuchen zwischen 2,1 kWh und 4,5 kWh pro Tonne Frischmasse. Je nach technischer Auslegung des Eintragungssystems und den Substraten selbst sind Verbräuche unter 1,25 kWh/t Frischmasse möglich (Streicher et al. 2019).

Arbeitszeitbedarf Fütterung

Für Silomais wurde bei der Fütterung eine Futtermenge pro Zeiteinheit von 42,8 t/h bei einer Entfernung von 40 m von der Mitte des Feststoffeintrages bis zum Ladepunkt am Silohaufen ermittelt (siehe Tabelle 18). Die durchschnittliche Futtermenge pro Laderschaufel betrug 1,03 t. Bei einem Volumen der Laderschaufel von 1,25 m³ entspricht dies einer Schüttdichte des verdichteten Silomaises von 761,5 kg/m³. Bei Strohpellets wurde im Mittel eine Fütterungsmenge von umgerechnet 19,9 t/h ermittelt. Die Strohpellets mussten über eine Entfernung von 170 m mit dem Lader transportiert werden, da diese in einer Lagerscheune des angegliederten landw. Betriebe gelagert wurden. Pro Laderschaufel wurden 836 kg transportiert, was einer Schüttdichte der Pellets von 619 kg/m³ entspricht. Für den Übertrag auf andere Biogasanlagen ist insbesondere die Entfernung des Substrates vom Eintragungssystem, die Größe der Laderschaufel und die Schnelligkeit des Fahrers maßgebend. Entsprechend sind die ermittelten Werte lediglich beispielhaft zu sehen und sind für jede Biogasanlage individuell zu betrachten.

Tabelle 18: Zeitaufwand Fütterung nach Substraten

Substrat	Entfernung vom Eintrag	Tonnen pro Stunde
Maissilage	40m	42,8 t/h
Maissilage + Zuckerrübenschnitzel	40m	65,5 t/h
Strohpellets	170m	19,9 t/h
Rindermist	95m	53,2 t/h
Zuckerrüben	20m	77,9 t/h

Quelle: eigene Datenerhebung

In Bezug auf die betrachtete Biogasanlage ergibt sich aus den ermittelten Ergebnissen kein Mehraufwand bezüglich der benötigten Fütterungszeit für Strohpellets, obwohl pro Stunde weniger Tonnage gegenüber Maissilage in das Eintragungssystem eingebracht wird. Aus den Ergebnissen zur Gasausbeute aus Teilprojekt 1 ergibt sich ein Austauschverhältnis von Maissilage (KTBL, 2013) zu Strohpellets von 1:0,45. Entsprechend müssten bei 42,8 t/h Mais 19,2 t/h Pellet gefüttert werden, um die gleiche Gasmenge aus den Substraten zu gewinnen. Mit 19,9 t/h wurde dieser Wert um 3,6 % überschritten. Eine weitere Zeitersparnis bei der Fütterung könnte das nicht notwendige Abdecken der Maissilage sein, wohingegen je nach Lagerung der Strohpellets ggf. eine Lagerhalle geöffnet und geschlossen werden müsste.

Prozesskostenbetrachtung

Für jedes der bereits vorgestellten Szenarien wurde die Gewinnänderung unter Berücksichtigung der prozesstechnischen Daten in Tabelle 19 in €/kWh berechnet. Entsprechend der Differenzen zum jeweiligen Ausgangsszenario bei der Strohpelletmenge, der entsprechenden Reduktion beim Silomaisanteil, Eigenstrombedarf dem Gärrestanfall und dem notwendigen Gärrestlagerraum (siehe Tabelle 19) wurden die Gewinnänderungen in €/kWh aufgeteilt nach Pellets aus mobiler Pelletierung, mobiler Pelletierung mit Berücksichtigung von Strohzu Kaufkosten bzw. Nährstoffentzug von 35 €/t, teil-mobiler Pelletierung und teil-mobiler Pelletierung aus Zukaufstroh ermittelt (siehe Abbildung 54).

Die Erlösseite blieb aufgrund der Annahme der gleichen Strommenge und Gesamterlösen von 22,56 ct/kWh unverändert, so dass in jedem Szenario ein Gesamterlös von 992.667,79 €/Jahr bei rd. 4,4 Mio. Kilowattstunden erzeugtem Strom pro Jahr erreicht wird. Der Erlös von 22,56 ct/kWh entspricht umgerechnet auf Biomethan einem Preis von 8,4 ct/kWh (Hs). Die sonstigen Stromgestehungs- und Betriebskosten sowie Abschreibungen ohne Substratkosten und ohne die Eigenstromverbrauchskosten betragen in Anlehnung an die analysierten Daten aus dem Biogasmessprogramm III für alle Szenarien 10,71 ct/kWh bzw. 471.253,19 €/Jahr. Die Substratkosten wurden entsprechend der o.g. Preisannahmen und der Eigenstromverbrauch individuell nach Szenario kalkuliert und sind in den Ergebnissen in Abbildung 54 enthalten.

Tabelle 19: Unterschiede Basisszenario zum Szenario mit Strohpelleteinsatz

Szenarien		Differenz zum Basisszenario					
		Strohpellets	Silomais	TS Gärrest	Eigenstrombedarf	Gärrestanfall	Gärrest-Lagerraum
		t/a	t/a	% absolut	% absolut	m ³ /a	m ³ Lagerraum
Rellehausen	V6→V7	767	-1.714	1,53	1,55	-949	-711
Nord-West	V3.1→V3.2	1.103	-2.465	2,53	2,55	-1.364	-1.023
NawaRo	V4.1→V4.2	389	-868	1,30	1,31	-480	-360
	V4.1→V4 _{max}	562	-1.254	1,93	1,95	-694	-521
Gülleanlagen	V5.1→V5.2	1.789	-3.996	1,60	1,62	-2.211	-1.658
	V5.1→V8	2.624	-5.862	2,46	2,48	-3.244	-2.433
Ackerbau-regionen	V9.1→V9.2	1.226	-2.738	2,89	3,03	-1.515	-1.137
Süd-Deutschland	V10.1→V10.2	655	-1.462	1,56	2,02	-809	-607

Quelle: Eigene Darstellung

Wie in Abbildung 54 dargestellt, bieten Strohpellets aus mobiler Pelletierung mit Vollkosten von rd. 84,5 €/t die Möglichkeit den Gewinn nahezu gleich zu halten bzw. sogar einen betriebswirtschaftlichen Vorteil zu erreichen. Der Ersatz von Mais (43,4 €/t inkl. Lagerverluste) kann hier zu einer Kostenreduktion führen, da dieser zu relativ hohen Anteilen durch Strohpellets ersetzt werden kann, die hier im Verhältnis günstiger sind. Die Substratkosten sinken insgesamt von 7,69 ct/kWh auf 7,19 ct/kWh in V5.2 bzw. 6,96 ct/kWh in Szenario V8. Darüber hinaus sinken die Gärrestausrückgangskosten sowie die Kosten für das Vorhalten des Gärrestlagerraums. Die Mehrkosten des Eigenstrombedarfs werden unter den getroffenen Annahmen mehr als kompensiert. Ebenfalls positiv stellen sich die Ergebnisse bei den Szenarien V7, V3.2 und V9.2 dar, wobei der Effekt jeweils auf die günstigen Pellets zurückzuführen ist. Rechnet man den mobil hergestellten Pellets 35 €/t hinzu, z.B. beim Zukauf von Stroh von Nachbarfelder ohne Gärrestrückgabe, so sinkt der Gewinn in allen Szenarien gegenüber dem Basisszenario. Eine Minderung von bis zu 1,2 ct/kWh (V8 Gülleanlage max) wird ermittelt, was bei der Beispielanlage mit 530 kWel eine Minderung um rd. 51.000 € pro Jahr entspricht. Mit steigendem Pelletpreis nimmt die Gewinnminderung bei steigendem Pelleteinsatz überproportional zu. Bei einem durchschnittlichen Gewinn von rund 4,2 ct/kWh (n=31) im Biogasmessprogramm III, würde durch den

Pelleteinsatz insbesondere bei teil-mobil pelletiertem Zukaufstroh in den Szenarien V5.2, V8 und V9.2 ein Verlust entstehen (Barchmann et al. 2021). Anders kann sich dies darstellen, wenn Biomethan produziert werden soll. Wie eingangs erwähnt, wurde ein Biomethan-Äquivalenter Preis von knapp 8,5 ct/kWh Biomethan (Hs) angenommen. Während für Mais aktuell 9 ct/kWh Hs zu geboten werden, wären es bei Strohpellets unter Annahme von +15 CO₂eq/Mj² rd. 10 ct/kWh Hs bei Einfachanrechnung bzw. 14 ct/kWh bei Doppelanrechnung. Je nach Szenario würde sich bereits bei Einfachanrechnung der Einsatz von Strohpellets aus der teil-mobilen Pelletierung aus Zukaufstroh noch wirtschaftlich - ohne Gewinnminderung - darstellen lassen.

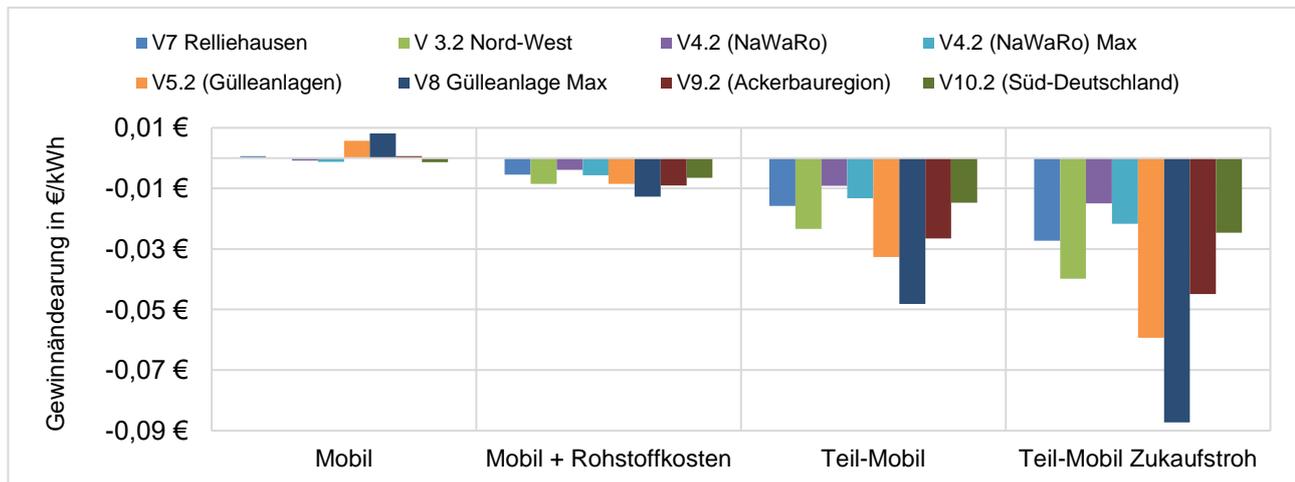


Abbildung 54: Mehrkosten des Strohpelleteinsatzes nach Szenarien (€/kWh Strom)

Quelle: Eigene Darstellung

Limitationen: Das angenommene Verhältnis von Eigenstrombedarf zum TS-Gehalt im Gärrestendlager sowie die Aufteilung des Eigenstrombedarfs nach BHKW, Rührwerkstechnik, Einbringung und Sonstiges kann in der Praxis anlagenindividuell sehr unterschiedlich sein, so dass die ermittelte Steigerungsrate des Eigenstromverbrauchs lediglich als theoretisch ermittelter Anhaltspunkt zu interpretieren ist, der je nach technischer Ausstattung der jeweiligen Anlage abweichen kann. Auch die Annahme, dass der Eigenstrombedarf linear mit dem TS-Gehalt im Fermenter ansteigt ist zu prüfen. Aufgrund dieser Annahme steigt insbesondere der Eigenstrombedarf der Rührwerkstechnik stark (zwischen 57,2 % (V7) und 133,7 % in V9.2), da der Eigenstrombedarf der BHKW und Sonstiges gleichbleiben und bei der Einbringtechnik eine Reduktion entsteht, da die Futtermenge in Summe mit Strohpellets abnimmt. Empfehlenswert wären Folgeversuche mit entsprechender, messtechnischer Ausstattung an mehreren Biogasanlagen, um den tatsächlichen Eigenstrombedarf beim Einsatz von Strohpellets über einen längeren Zeitraum feststellen zu können.

Lagerentenermittlung

Zunächst erfolgte die Ermittlung der Transportkosten pro Tonne in Abhängigkeit der Transportentfernungen. Die Ergebnisse sind nach Substrat und Transportfahrzeug in Abbildung 55 dargestellt. Der Transport von Strohpellets ist bei einem entsprechenden Volumen des Anhängers recht günstig und steigt mit der Entfernung langsamer als bei Quaderballen oder Silomais. Dies setzt jedoch voraus, dass die Pelletierkapazität auf dem Feld bei mobiler Pelletierung zum Abfahrgepann passt. Bei Pelletierleistungen zwischen 3,65 t/h bis zu 5,5 t/h wie in den Versuchen ermittelt, sind selbst kleinere Anhänger mit einer Nutzlast von 10 t erst in zwei Stunden befüllt. Geht man davon aus, dass der Anhänger zunächst am Feldrand abgestellt wird und das Zugfahrzeug zum Betriebsstandort zurückkehrt und den vollen Anhänger später wieder abholt, steigen die Kosten bei weiteren Transportwegen deutlich an (siehe durchgehende graue und hellblaue Linien in Abbildung 55).

²Hinweis: Überschlägig ermittelter Wert nach eigenen Ergebnissen. Unbedingt anlagenindividuell mit dem Zertifizierer je nach Beschaffung abklären lassen.

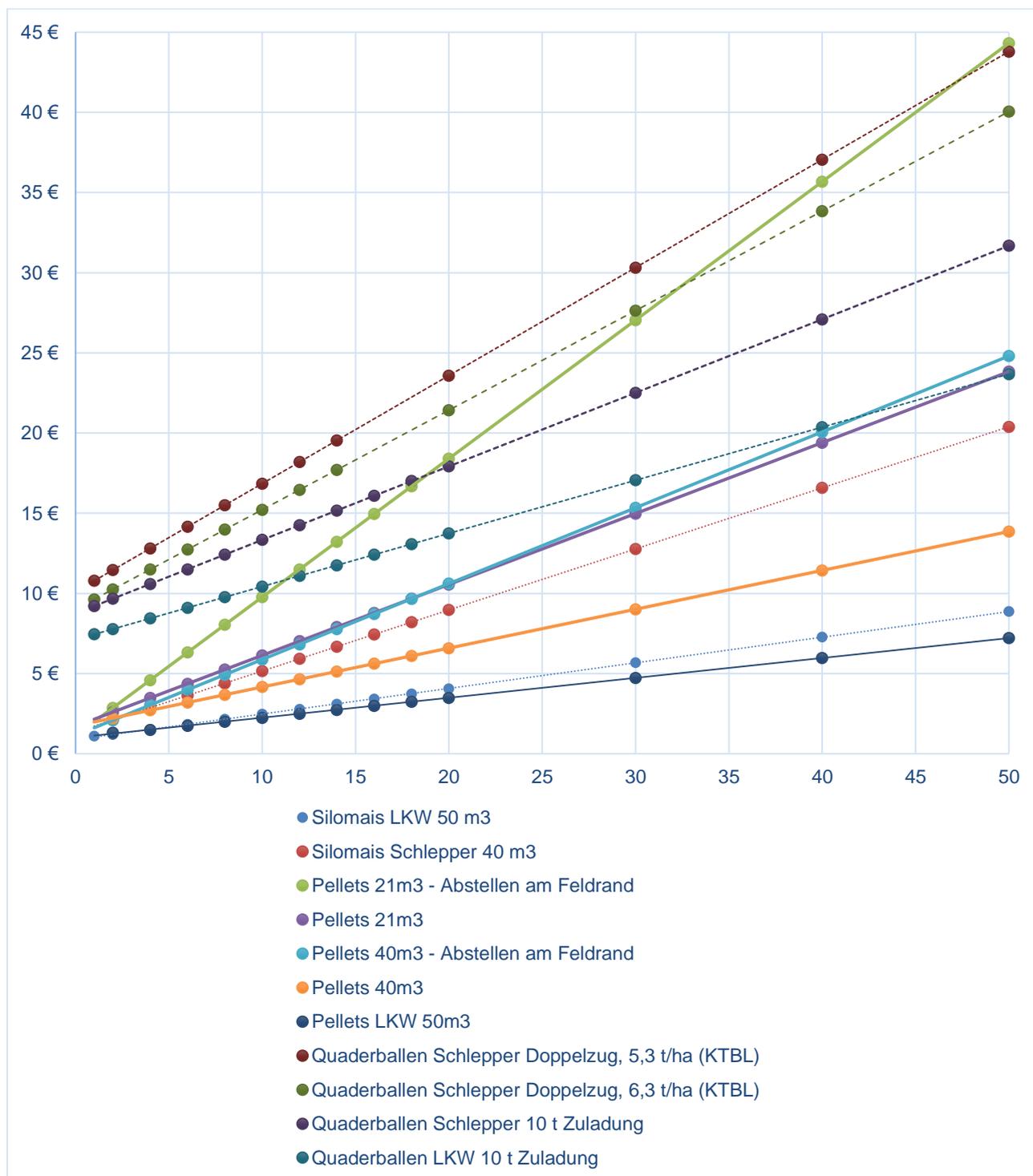


Abbildung 55: Transportkosten von Substraten in Abhängigkeit von der Entfernung

Quelle: Eigene Berechnungen

Neben den Transportkosten wurde die maximale Zahlungsbereitschaft als Preisannahme in der Lagerentenformel bestimmt. Hierfür wurden erneut die Zahlen aus dem Biogasmessprogramm III herangezogen und die Gesamterlöse aus Strom- und Wärmevermarktung bezogen auf die produzierte Kilowattstunde Strom von 22,56 ct/kWh als Grundlage verwendet (Barchmann et al. 2021). Die Deckung der variablen Kosten ohne Substratkosten von 7,13 ct/kWh bzw. der Vollkosten von 11,85 ct/kWh ist bei einem Silomaispreis von 70,9 €/t bzw. 54,7 €/t gegeben. Dies entspricht auf Basis von m³ Methan/t Frischmasse einem Preis für Strohpellets von 158,3 €/t bzw. 121,6 €/t. Ist die Lagerente bei diesen Preisannahmen größer gleich null, so würde bei Annahme der Vollkostendeckung mit diesen Substraten ein Gewinn erzielt, so lange die Lagerente größer gleich null ist. Zu beachten ist dabei, dass die Lagerente ohne Bodenrentenanteil ermittelt wird. Entsprechend ist aus dieser auch die Pacht oder ein positiver Gewinnbeitrag zu leisten (Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010). Darüber hinaus wäre aus der Lagerente eine Entlohnung des

Nährstoffentzugs oder des Strohaufs zu tätigen, sofern nicht der Annahme gefolgt werden soll, dass die durch das Stroh entzogenen Nährstoffe im Kreislauf verbleiben. Neben entfernungsabhängigen Produktionskosten, die die Bodenbearbeitung, Aussaat, Pflanzenschutz, mineralische Düngung und die Ernte des Hauptproduktes ohne Abfahrt des Erntegutes enthalten, wurden die Transportkosten in Anlehnung an die oben dargestellte Abbildung sowie Kosten für die Gärrestausrückführung berücksichtigt. Die Ausbringkosten berechnet nach dem KTBL-Feldarbeitsrechner für einen 20m³ Selbstfahrer mit 20m³ Zubringer-LKW liegen zwischen 3,88 €/m³ (1km) und 21,25 €/m³ (100km Entfernung) und werden in Kulturen kilometergenau angesetzt (KTBL, 2023).

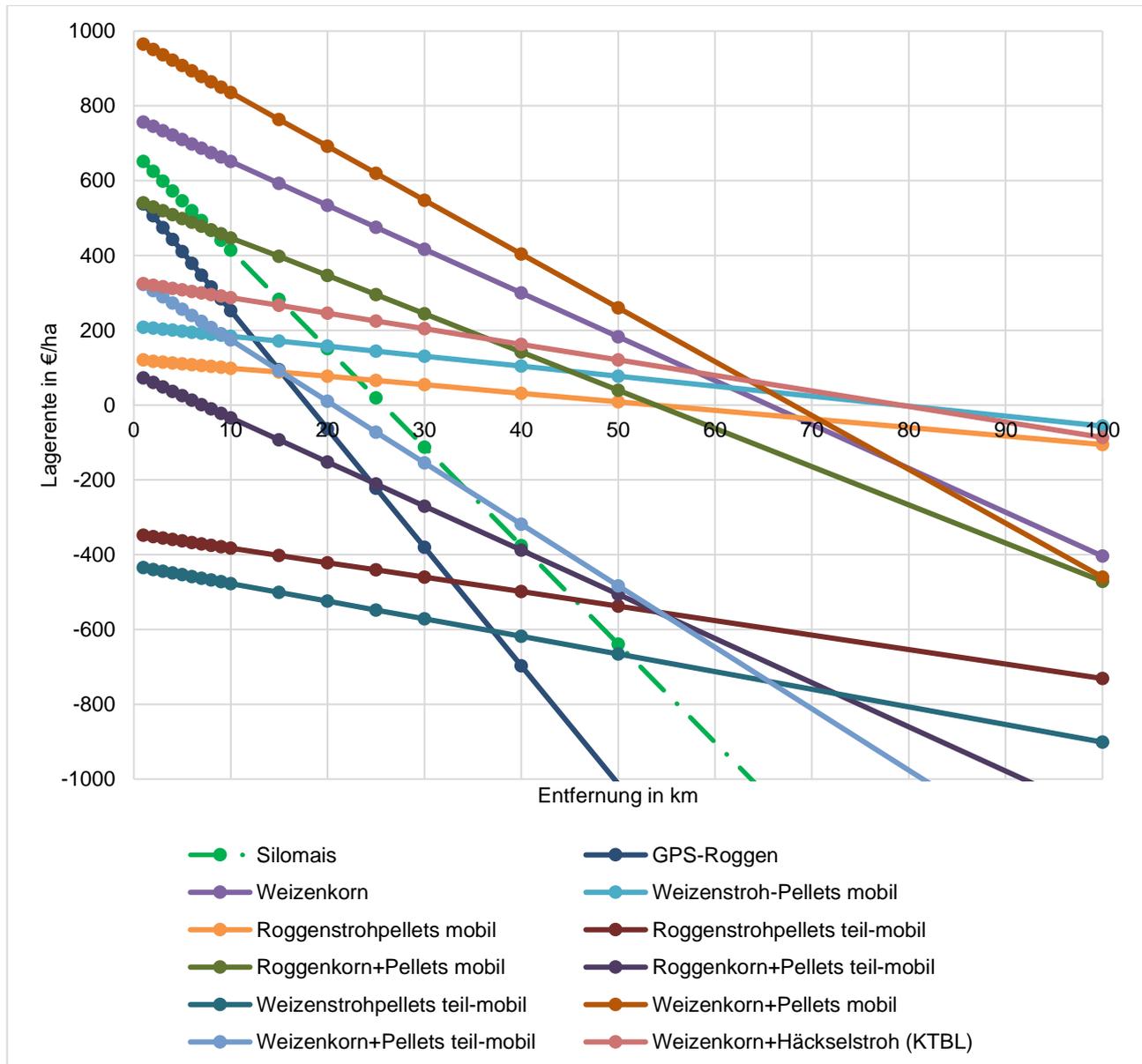


Abbildung 56: Lagerente in €/ha bei Vollkostendeckung der Biogaserzeugung

In Abbildung 56 sind die Lagerenten für die betrachteten Substrate bei Deckung der Vollkosten und bei maximaler Ausbringungsmenge an Gärrest (auf Basis Entzug und 170 kg Stickstoff/ha) der Biogaserzeugung ohne Bodenrentenanteil dargestellt. Die Referenzsubstrate GPS-Getreide und Silomais erreichen bis ca. 18 km bzw. 25 km eine Lagerente von größer gleich null. Weizenstroh und Roggenstroh erreichen bei teil-mobiler Pelletierung keine positive Lagerente. Roggenkorn, bewertet mit einem Preis von 186,2 €/t, aggregiert mit Strohpellets aus teil-mobiler Pelletierung erreichen im 7 km Umkreis gerade so einen positiven Wert, da die positive Lagerente des Roggenkorns die negative Lagerente der Strohpellets ausgleicht. Weizenkorn, bewertet mit 214,9 €/t, kombiniert mit Weizenstroh aus teil-mobiler Pelletierung erreicht bis ca. 20 km eine Lagerente von größer gleich null. Pellets aus mobiler Pelletierung solo betrachtet oder auch aggregiert mit dem jeweiligen Hauptprodukt erreichen positive Lagerenten bis in den Entfernungsbereich 50 km bis 80 km. Insgesamt fällt auf, dass die Lagerentenfunktionen für die Strohpelletvarianten im Vergleich zu Silomais oder GPS-Roggen deutlich flacher verlaufen und eine weniger starke negative Steigung aufweisen. Zur Einordnung wurde Weizen-Häckselstroh mit einem Biogasertrag nach KTBL (2003), das bei ca. 80 km eine Lagerente von

null annimmt, ebenfalls dargestellt. Die Variante umfasst den Quaderballentransport mit Lagerung der Ballen und dem Auflösen per Stroh­mühle sowie das Einbringen. Auftretende, prozesstechnische Probleme beim Einsatz von (Häcksel-)stroh, die in der Literatur bereits häufig beschrieben wurden und in AP1 bestätigt werden konnten, sind in der Lagerente, die nur die Vorgänge bis zum Feststoffeintrag berücksichtigt, nicht enthalten.

Gleichgewichtspreise

In der landwirtschaftlichen Praxis wird häufig über den Zukaufpreis von Substraten frei Biogasanlage diskutiert. Entsprechend wurde ein Gleichgewichtspreis von Stroh­pellets gegenüber Maissilage als auch Getreidekorn gebildet. Letzteres vor dem Hintergrund, dass relativ viele Anlagen sowohl in der Betreiberbefragung als auch im Biogasmessprogramm III Getreidekorn als Substrat genannt haben und dieses vor allem bei Substratknappheit in Erwägung gezogen wird. Im Vergleich zu Silomais als Referenzsubstrat ergeben sich bei Gärrestverbringungskosten von 0 €/m³ (bei Kostenzuteilung der Ausbringung im Ackerbau, Abgabe ab Behälter) Gleichgewichtspreise zwischen 86,3 €/t und 131 €/t. Bei 5 € Ausbringkosten, was in etwa dem Durchschnitt der Angaben im Rahmen der Betreiberbefragung entspricht zwischen 93,0 €/t und 137,7 €/t. Bei höheren Gärrestausbringkosten von 10 €/m³ beträgt der Gleichgewichtspreis zwischen 99,7 €/t und 144,4 €/t. In Tabelle 20 sind die Werte im Detail aufgeführt und der Preis für Getreidekorn als Äquivalent dargestellt. Stroh­pellets aus dem mobilen Pelletierverfahren können bei hohen Substratpreisen von über 45 €/t Silomais und/oder höheren Ausbringkosten für die Gärrestverbringung sowohl zu Mais als auch zu Getreidekorn konkurrenzfähig sein. Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei der Ermittlung der dargestellten Gleichgewichtspreise der Gärrestlagerraum mit 6,1 €/m³ angenommen wurde. Hierdurch sind Stroh­pellets und Getreidekorn im Vergleich zu Silomais etwas bessergestellt, als wenn der Gärrestlagerraum nicht monetär bewertet werden würde.

Unter Berücksichtigung der Durchschnittspreise für Getreide in den letzten drei Jahren, stellen Stroh­pellets unter günstigen Pelletierbedingungen eine wirtschaftlichere Alternative zu Getreidekorn dar: Bei einem Durchschnittspreis für Futterroggen in den Jahren 2019/20 bis 2021/22 von rd. 186 €/t (21/22: 286 €/t) plus der Kosten für das Mahlen/Schroten, käme dieser höchstens bei 55 €/t Maissilage und Gärrestausbringkosten von 10 €/m³ als Biogassubstrat in Frage. Weizenkorn kommt unter den getroffenen Annahmen aufgrund höherer Produktpreise weniger in Betracht als Roggenkorn.

Tabelle 20: Gleichgewichtspreis in Abhängigkeit von Maissilage und den Gärrestverbringungskosten

		Kosten Gärrestverbringung		
		0 €/m ³	5 €/m ³	10 €/m ³
		Stroh­pellets* Getreidekorn**	Stroh­pellets* Getreidekorn**	Stroh­pellets* Getreidekorn**
Mais­silage (35% TS) **	35 €/t	86,3 112,6	93,0 122,3	99,7 132,0
	40 €/t	97,5 127,0	104,2 136,7	110,7 144,9
	45 €/t	108,7 141,4	115,4 151,1	122,1 160,7
	50 €/t	119,9 155,8	126,5 165,5	133,2 175,1
	55 €/t	131,0 170,2	137,7 179,9	144,4 189,5

*anhand Gasausbeute aus AP1; **KTBL (2013); Lagerraumkosten 6,1 €/m³

inkl. 12% Lagerverluste bei Maissilage; 1% bei Stroh­pellets und Getreidekorn

Im Vergleich zu Stroh­pellets ist der Gleichgewichtspreis von Häckselstroh nach Ergebnissen des AP 1 bei Lagerverlusten von 3 % nur um 5 €/t bis 10 €/t niedriger, da der Methanertrag pro Tonne Frischmasse von Häckselstroh mit 232,3 m³ Methan pro Tonne Frischmasse nur um 7,5 % niedriger ist, als der von Stroh­pellets. Der Fugatfaktor von Häckselstroh liegt mit 0,38 nahezu auf dem Niveau von Stroh­pellets (0,36). Diese Werte weichen deutlich von denen der KTBL ab, die einen Methanertrag für gehäckseltes Stroh von 161 m³ Methan pro Tonne Häckselstroh bei einem Fugatfaktor von 0,6 angeben. Das könnte darin begründet liegen, dass in AP1 nur eine einzelne Stichprobe bewertet wurde, die entsprechend nicht dazu geeignet ist, eine belastbare Aussage zur Ökonomie zu treffen (KTBL 2013). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass das Handling von Häckselstroh schwieriger ist und unter Umständen auch zu Fixkosten durch notwendige, bauliche Veränderungen führt, die im Rahmen des Projektes aufgrund der Fokussierung auf Stroh­pellets nicht betrachtet wurden.

Limitationen AP 2.1: Das angenommene Verhältnis von Eigenstrombedarf zum TS-Gehalt im Gärrestendlager sowie die Aufteilung des Eigenstrombedarfs nach BHKW, Rührwerkstechnik, Einbringung und Sonstiges kann in der Praxis anlagenindividuell sehr unterschiedlich sein. Daher ist die ermittelte Steigerungsrate des Eigenstromverbrauchs lediglich als theoretisch ermittelter Anhaltspunkt zu interpretieren, der je nach

technischer Ausstattung der jeweiligen Anlage abweichen kann. Auch die Annahme, dass der Eigenstrombedarf linear mit dem TS-Gehalt im Fermenter ansteigt, ist zu prüfen. Diese Annahme lässt den Eigenstrombedarf der Rührwerkstechnik sehr deutlich ansteigen (zwischen 57,2% in V7 und 133,7% in V9.2), da der Eigenstrombedarf der BHKW und Sonstiges gleichbleiben, während der Eigenstrombedarf der Einbringtechnik aufgrund der geringeren Futtermenge in den Szenarien mit Strohpellets abnimmt. Empfehlenswert wären Folgeversuche mit entsprechender, messtechnischer Ausstattung an mehreren Biogasanlagen, um den tatsächlichen Eigenstrombedarf beim Einsatz von Strohpellets über einen längeren Zeitraum feststellen zu können. Darüber hinaus wurde bei den Berechnungen davon ausgegangen, dass die Nährstoffzusammensetzung des Gärrestes unabhängig vom Einsatzanteil der Pellets gleichbleibt. Aufgrund des steigenden TS-Gehaltes des Gärrestes durch den Strohpelleteinsatz ist jedoch davon auszugehen, dass in Abhängigkeit der Pelleteinsatzmenge im Substrat-Mix, die Nährstoffdichte zunehmen und damit die zu transportierende und auszubringende Gärrestmenge abnehmen müsste. Dies gilt ist in weiterführenden Untersuchungen aufbauend auf AP1 zu untersuchen, um dies in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einbeziehen zu können.

7.3 Akzeptanzstudie

7.3.1 Deskriptive Ergebnisse der Befragung von Pelletierern und Pelletvermarktern

Insgesamt wurde der Online-Fragebogen von 18 Teilnehmern*innen³ beendet. Insgesamt konnte so nur ein kleiner Datensatz erreicht werden, der keine repräsentative Stichprobe darstellt. Dennoch können die folgenden Ergebnisse erste Einblicke liefern.

Über alle Pelletierverfahren hinweg wurden Durchschnittskosten von 123,4 €/t exklusive der Aufwendungen für die Strohbeschaffung ermittelt (siehe Abbildung 57). Für stationäre Anlagen wurden Durchschnittskosten von 110 €/t (n=6), für teil-mobile Containeranlagen 124,5 €/t (n=2) und für mobile Pelletieranlagen 139 €/t ermittelt.

Tabelle 21: Pelletierverfahren - Leistungsdaten

	Einheit	Gesamt	Mobil	Teil-mobil	Stationär
Stichprobe	n	13	5	2	6
Produktionsmenge	t/a	1360	628	270	2375
Durchsatz	t/h	2,74	4,04	1,15	2,19
Nettoherstellungskosten	€/t	123,4	139,0	124,5	110,0
Benötigte Arbeitskraftstunden	Akh	1,48	1,50	1,15	1,58

Quelle: Eigene Datenerhebung

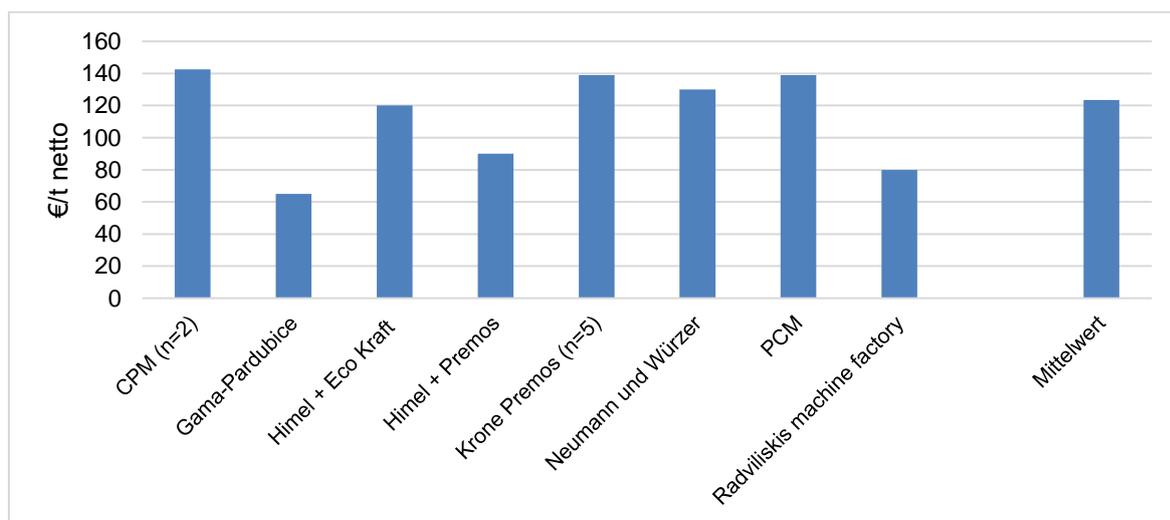


Abbildung 57: Herstellungskosten pro Tonne Strohpellets (ohne Rohstoffkosten) (n=13)

Quelle: Eigene Datenerhebung

³Aufgrund einzelner Eingabefelder, die freiwillig zu beantworten waren, kann die analysierte Stichprobe je nach Fragestellung dennoch abweichen.

Bezüglich der prozentualen Aufteilung auf die einzelnen Kostenpositionen ergibt sich ein relativ uneinheitliches Bild. Für die Beschaffung des Rohmaterials inklusive Transportes zum Ort der Pelletierung wird im Mittel ein Wert von 31 % angegeben, wobei ein Kostenanteil zwischen 20 % und 60 % angegeben wird. Für die Pelletieranlage von Neumann und Würzer wurde ein Wert von 0 % genannt, da sich diese Angaben auf die reine Lohnpelletierung beziehen. Die zweitgrößte Kostenposition stellt die Energie mit 23,3 % wider. Darauf folgen die Fixkosten mit 18,9 % sowie die Arbeiterledigungskosten mit 10,5 %. Die Reparaturen verursachen 6,7 %. Die Zwischenlagerung der Rohwaren, Verbrauchsmaterialien und sonstige Kosten machen jeweils weniger als 5 % der Gesamtkosten aus (siehe Mittelwerte in Abbildung 58).

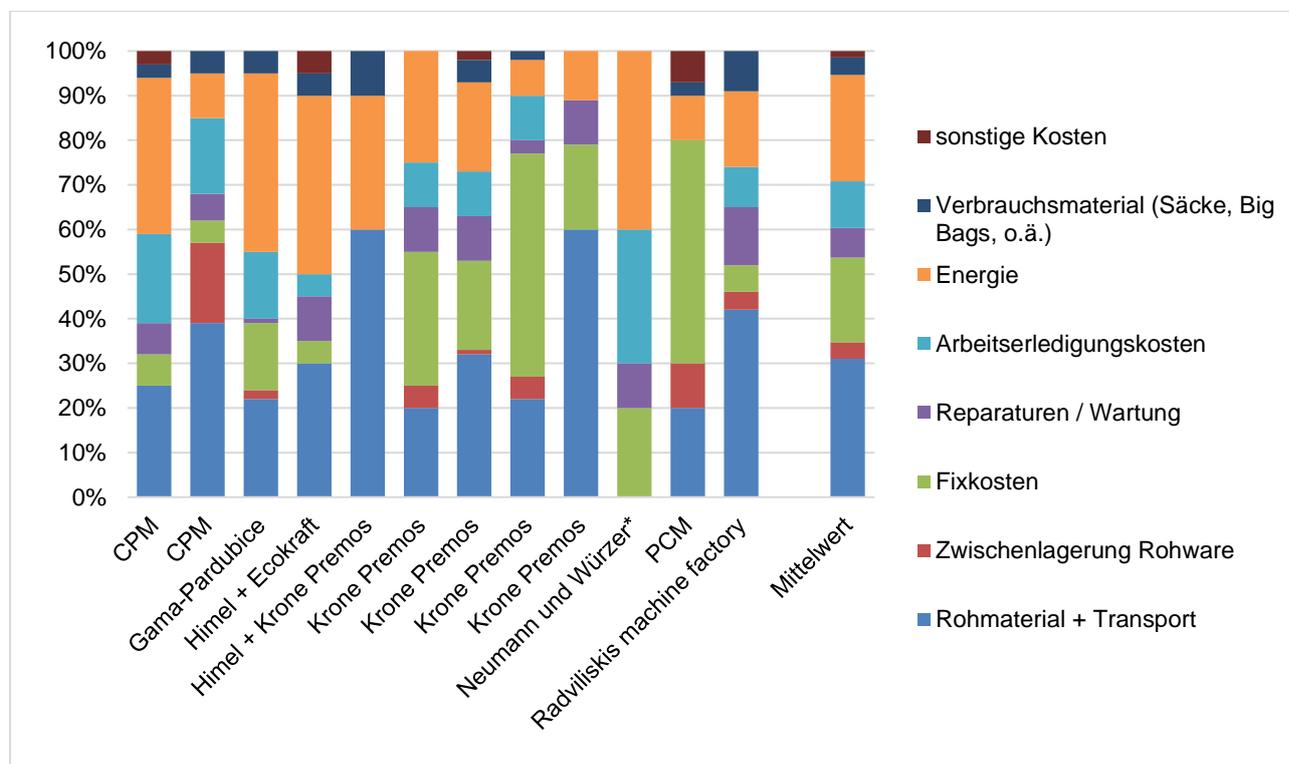


Abbildung 58: Kostenaufteilung des Pelletierprozesses nach Pelletiertechnik (n=12)

*Angaben beziehen sich auf die Lohnpelletierung, Quelle: Eigene Datenerhebung

Neben den Kosten sind die durchschnittlichen Verkaufspreise in Preisgruppen abgefragt worden. Es wurde auf eine direkte Abfrage des genauen Verkaufspreises verzichtet, um die Antwortbereitschaft zu verbessern. Über die Hälfte der Probanden hat einen Verkaufspreis von 200-250 €/t Strohpellets angegeben. Darüber hinaus geben knapp 28 % der Teilnehmer an, einen Verkaufspreis von über 250 € zu erzielen. Zusammengefasst ergibt sich ein Preis pro Tonne von über 200 €/t. Damit bestätigt die Umfrage die Preisangaben, die bei der Online-Recherche auf verschiedenen Vermarktungsplattformen für Landwirte und Privatpersonen zu finden sind.

In Hinblick auf die Biogasnutzung ist zu berücksichtigen, dass die Vermarktungsmengen zu den angegebenen Kosten voraussichtlich vergleichsweise niedrig sind, da die pelletierten Mengen insbesondere an Pferdehalter (n=17) vermarktet werden. Der mittlere Vermarktungsanteil liegt bei 58,1%. Darauf folgend finden die Pellets als Einstreu in der Milchviehhaltung (n=11, 11,5 %) und als Raufutter in der Tierhaltung (n=10, 10,4 %) Verwendung. Auch der Kleintiermarkt mit 12 Nennungen und einem mittleren von 7,6 % ist von höherer Relevanz. Aktuell werden keine Biogasanlagen beliefert. Auch die energetische Nutzung in Heizanlagen spielt mit vier Nennungen eine untergeordnete Rolle.

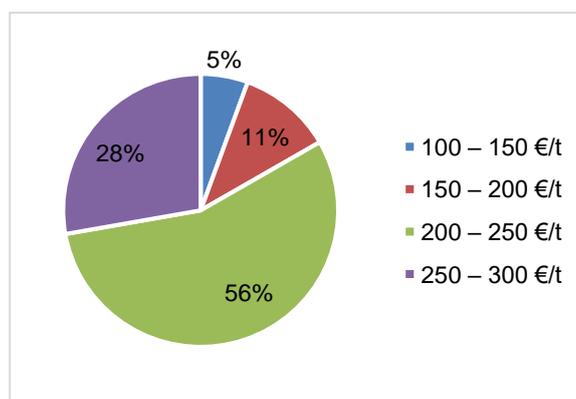


Abbildung 59: Vermarktungsanteil nach Preisgruppen

Bezüglich der Zukunft von Strohpellets wurde die Einschätzung geteilt, dass der Absatz in den nächsten Jahren steigen wird. Neue Absatzmärkte werden insbesondere im Bereich von Tierwohl-Programmen in der Landwirtschaft gesehen. Der Aussage, dass die Nutzung von Strohpellets in der Biogaserzeugung zukünftig eine bedeutende Rolle auf dem Pelletmarkt einnimmt, stimmten die Pelletierer und Pelletvermarkter eher nicht zu. Im Hinblick auf die Hemmnisse beim Austausch von unverarbeitetem Getreidestroh durch Strohpellets sehen die Pelletierer und Pelletvermarkter unabhängig von der Nutzungsrichtung ein mangelndes Wissen und ausbleibende Empfehlung durch Berater als Hauptgrund. Des Weiteren werden Gewohnheit/Bequemlichkeit und die Kosten pro Tonne Pellets genannt.

7.3.2 Deskriptive Ergebnisse der Befragung von landw. Biogasanlagenbetreibern*innen

Ein Vergleich der Stichprobe von 309 Beobachtungen mit der Statistik des Deutschen Bauernverbandes aus dem Jahr 2020 zeigt, dass die Altersstruktur der Befragungsteilnehmer*innen in etwa der allgemeinen Altersstruktur der Betriebsleiter*innen in Deutschland entspricht, wobei die Altersgruppen „55-65 Jahre“ und „über 65 Jahre“ etwas unterrepräsentiert sind.

Das Bildungsniveau der Stichprobe kann sowohl bei den allgemeinbildenden als auch den berufsbezogenen Abschlüssen als vergleichsweise hoch bezeichnet werden. Bei den berufsbezogenen Abschlüssen gaben 39,2 % der Befragten an, ein agrarwissenschaftliches Hochschulstudium (Bachelor, Master, Promotion oder Habilitation) abgeschlossen zu haben (9,4 % der Betriebsleiter*innen in der allgemeinen Statistik). Insgesamt haben 44,3 % der Teilnehmer*innen die zweijährige Fachschule Landwirtschaft oder den Landwirtschaftsmeister (24,1 % der Betriebsleiter*innen) abgeschlossen. 7,8 % der Teilnehmer*innen absolvierten eine landwirtschaftliche Ausbildung oder die einjährige Fachschule (33,5 % der Betriebsleiter*innen), während 8,7 % praktische Erfahrungen oder sonstige berufliche Qualifikationen Angaben (33 % der Betriebsleiter) (Pascher et al. 2021).

Bei den allgemeinen Schulabschlüssen ließ sich im Vergleich zur deutschen Gesamtbevölkerung im Jahr 2019 ein hohes Bildungsniveau feststellen (Bundeszentrale für Politische Bildung 2022). Insgesamt 59,9 % der Befragten verfügen über die Fachhochschulreife oder die allgemeine Hochschulreife (33,5 % der deutschen Bevölkerung). Insgesamt 27,5 % haben einen Hauptschulabschluss oder einen gleichwertigen Abschluss (23,5 % der deutschen Bevölkerung). Ca. 12 % haben einen Hauptschulabschluss oder einen polytechnischen Abschluss (35,1 % der deutschen Bevölkerung). Keiner der Befragten geht noch zur Schule oder hat keinen Hauptschulabschluss (7,5 % der deutschen Bevölkerung) (Bundeszentrale für Politische Bildung 2022). Hinsichtlich des Geschlechts dominieren in der Stichprobe männliche Probanden mit 96,8 %, während laut der Statistik des Deutschen Bauernverbandes von 2020 89% der Betriebsleiter Männer waren (Pascher et al. 2021). Nur 2,6 % bzw. 0,6 % der Befragten gaben ihr Geschlecht als weiblich bzw. divers an. Ein Teilnehmer (0,3 %) machte keine Angaben zum Geschlecht.

Tabelle 22: Installierte el. Leistung und Höchstbemessungsleistung nach Größenklasse

Größenklasse	Installierte el. Leistung		Höchstbemessungsleistung
	Stichprobe (2021) ¹	Biogasanlagen DE (2015) ²	Stichprobe (2021) ¹
≤70 kW	0,6 %	0,4 %	1,3 %
71–150 kWel	3,6 %	2,4 %	4,9 %
151–300 kWel	9,7 %	40,8 %	15,5 %
301–500 kWel	12,9 %		25,2 %
501–750 kWel	17,5 %	41,3 %	24,3 %
751–1000 kWel	13,3 %		12,9 %
>1000 kWel	42,4 %	15,1 %	15,9 %

Eigene Darstellung nach ¹Eigener Datenerhebung; ²Barchmann et al. 2021

Die regionale Verteilung der Biogasanlagen in der Stichprobe entspricht im Wesentlichen der Statistik des Fachverbandes Biogas des Jahres 2020. Lediglich bei den Bundesländern Bayern (unterrepräsentiert) und Niedersachsen (überrepräsentiert) zeigen sich stärkere Abweichungen. Geringe Abweichungen sind für Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zu beobachten (Fachverband Biogas 2022). Die Anlagenbetreiber*innen haben vom Zeitpunkt der Erstinbetriebnahme einer Biogasanlage bis zur Teilnahme an der Befragung durchschnittlich 12,8 Jahre Erfahrung mit der Biogaserzeugung gesammelt.

Insgesamt werden 56,6 % der Biogasanlagen durch das EEG 2009, 22,9 % durch das EEG 2004 und 6,1 % durch das EEG 2012 gefördert. Drei Anlagen (1 %) wurden zum Zeitpunkt der Befragung noch nach dem EEG 2000 betrieben. Die Vergütung nach dem EEG 2014 gilt für 1,6 % und nach dem EEG 2017/Ausschreibung für 0,6 % der Anlagen. Insgesamt 11 % der Teilnehmer gaben eine Förderung nach mehreren, verschiedene EEGs an.

Hinsichtlich der Stromerzeugungskapazität umfasst die Stichprobe vor allem größere Biogasanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 1000 kW bei einer Höchstbemessungsleistung von rd. 700 kWel. Bemessungsleistung (siehe Tabelle 22). Größere landwirtschaftliche Anlagen vergären statistisch gesehen höhere Anteile an klassischen pflanzlichen Biogassubstraten, wie z.B. Mais, als kleinere Biogasanlagen, die typischerweise höhere Anteile an Mist und Gülle verwenden. Dies hat eine hohe Aussagekraft für die Untersuchung der Akzeptanz von Strohpellets als alternative Substratoption zum Ersatz der bisherigen Pflanzensubstrate (Daniel-Gromke et al. 2020).

Aktuell setzen 96,1 % der Teilnehmer*innen Maissilage in ihrer Biogasanlage ein. Der durchschnittliche Substratanteil von Maissilage liegt bei 42,6 %. Daran zeigt sich, dass die Absenkung des Maisdeckels im EEG 2021, der Mais (Silomais, Corn-Cob-Mix, Körnermais, Lieschkolbenschrot) und Getreidekorn umfasst, für einen Großteil der Biogasanlagen von Relevanz ist, sofern sie eine Anschlussförderung nach dem EEG erhalten wollen. Darüber hinaus fällt auf, dass die Substrate Getreidekorn mit 22,7 % und Körnermais/CCM/Lieschkolbenschrott mit 11,7 % ebenfalls von vielen Anlagen eingesetzt werden. Dies bestätigen ebenfalls die Daten aus dem Biogas-Messprogramm III (Barchmann et al. 2021). Getreidestroh wurde von zehn Biogasanlagenbetreibern (3,2 %) als Substrat angegeben. Zwei von ihnen verwenden derzeit zu Pellets gepresstes Stroh (0,01 %). Insgesamt 25,6 % (n=80) der Betreiber haben in der Vergangenheit bereits Stroh allgemein in ihrer Biogasanlage getestet, davon gaben sieben Teilnehmer (2,2 %) an, dies vorübergehend in Form von Getreidestrohpellets getan zu haben.

In Hinblick auf die novellierte Düngeverordnung gaben im Rahmen der Befragung 52,1 % der 309 Anlagenbetreiber*innen an, dass sie derzeit über weniger als die geforderten neun Monate an Gärrestlagerraum zur Verfügung haben. Da nur 20 % der befragten Betreiber nach dem EEG 2000 oder 2004 vergütet werden, besteht unter Berücksichtigung der EEG-Restlaufzeit bei 80 % der Anlagenbetreiber*innen kurzfristig ein hoher Handlungsbedarf bezüglich der Erweiterung des Gärrestlagervolumens. Als Anpassungsmaßnahme zur Erhöhung des Gärrestlagervolumens präferieren die Anlagenbetreiber*innen mit einem Lagervolumen von weniger als neun Monaten die Gärrestseparation (44,9 %) und die Umstellung der Inputsubstrate (36,2 %), gefolgt vom Zubau eines gasdichten Gärrestlagers (30,9 %). Maßnahmen, wie die Trocknung/Verdampfung von Gärresten (13,0 %) sowie die Leistungsreduktion (12,1 %) kommen nur für vergleichsweise wenige Anlagenbetreiber*innen in Frage, ebenso wie die Pacht/Miete (4,8 %) von Lagerbehältern.

Bei der Frage nach den Substratalternativen, die für Anlagenbetreiber*innen bei einer verpflichtenden Reduktion der Anteile an Mais (Maissilage, CCM, LKS, Körnermais) und Getreidekorn in Frage kämen (siehe Abbildung 60), dominieren klassische nach-wachsende Rohstoffe wie GPS-Getreide, Grassilage und Zuckerrüben. Bei den Wirtschaftsdüngern werden Rindermist und Rindergülle präferiert. Vor dem Hintergrund der Düngeverordnung sind Zuckerrüben, Grassilage und Wirtschaftsdünger entweder aufgrund einer verhältnismäßig hohen Nährstofffracht an Stickstoff oder des Lagerraumbedarfs als ungünstig einzustufen (Reinhold 2019). Letzteres trifft insbesondere für flüssige Wirtschaftsdünger zu (Gers-Grapperhaus et al. 2017). Die Durchwachsene Silphie und Getreidestroh-Pellets werden von knapp 35 % bzw. 27 % der Anlagenbetreiber*innen als denkbare Alternativsubstrat genannt. Die separate Rangierung der in Frage kommenden Substrate ergibt eine ähnliche Abfolge wie nach der Häufigkeit der Nennung, wobei Strohpellets hierbei erst nach Sorghum und Körnermais-Stroh eingeordnet werden. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass Anlagenbetreiber*innen grundsätzlich offen für den Einsatz von Getreidestroh-Pellets sind. Eine ablehnende Haltung konnte nicht festgestellt werden.

Dennoch gaben lediglich 19,2 % (n=59) der Probanden haben angegeben sich in der Vergangenheit schon mal konkret mit der Nutzung von Strohpellets in der Biogasanlage beschäftigt haben, während 80,8 % (n=250) dies bisher nicht getan haben. Entsprechend schätzen nur 7,1 % der Teilnehmer*innen ihren Kenntnisstand über die Vergärung von Strohpellets als hoch oder sehr hoch, 66,1 % als sehr gering oder gering und 26,9 % als mittelmäßig ein.

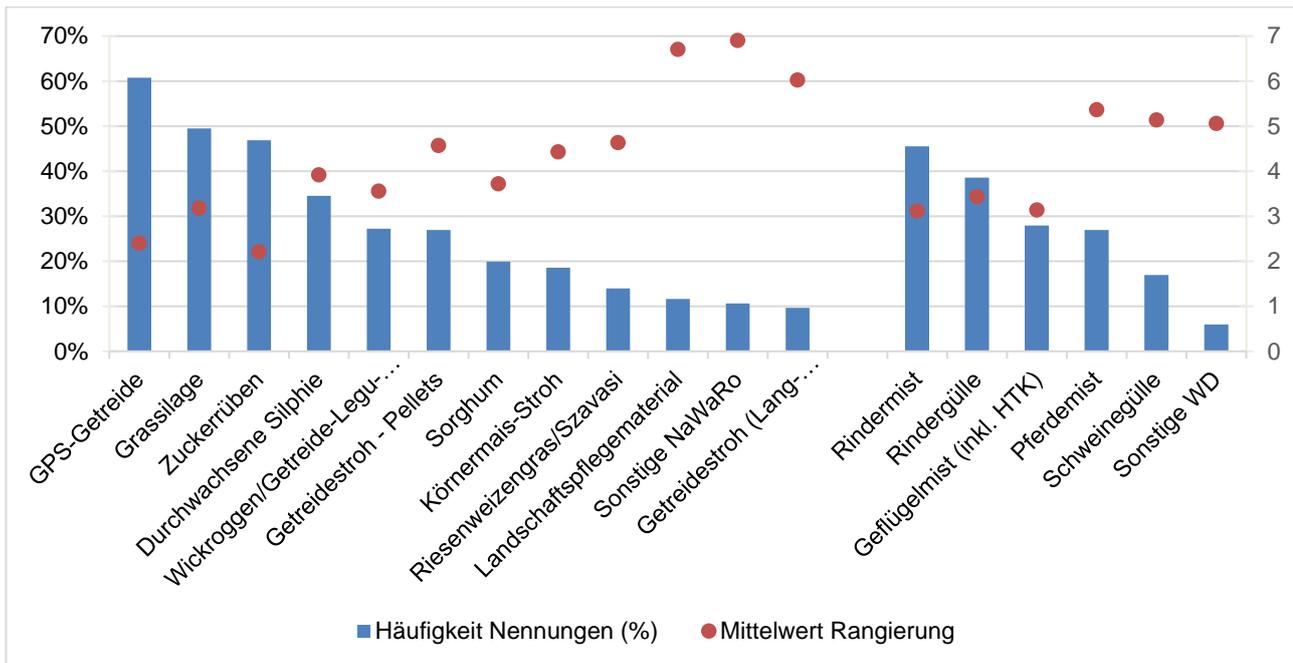


Abbildung 60: Alternativsubstrate zu Mais und Getreidekorn

*Frage: „Welche Substratalternativen würden Sie in Ihrer Biogasanlage einsetzen bzw. in Ihrem Anteil erhöhen, wenn Sie den Anteil an Mais (Maissilage, CCM, LKS, Körnermais) und Getreidekorn reduzieren müssten?“ ** „Bitte ordnen Sie die ausgewählten Alternativsubstrate nach der Vorzüglichkeit für Ihre Biogasanlage.“ (n=301). Quelle: Eigene Datenerhebung.

7.3.4 Zahlungsbereitschaft für Strohpellets

Insgesamt haben 305 Biogasanlagenbetreiber*innen im Rahmen der Akzeptanzumfrage unter Biogasanlagenbetreibern in Deutschland ihre Zahlungsbereitschaft geäußert. Darunter waren 58 Anlagenbetreiber*innen, die sich im Vorfeld der Umfrage schon mal mit dem Thema Strohpellets für die Biogasproduktion beschäftigt haben und 247 Betreiber*innen, die sich mit dem Thema bisher noch gar nicht beschäftigt haben. Die Zahlungsbereitschaft bei der ersten, ungestützten Abfrage beträgt über alle Teilnehmer*innen im Mittel 41,14 €/t. Gestützt mit Informationen zur Vergärung von Strohpellets fällt die Zahlungsbereitschaft mit durchschnittlich 52,74 €/t deutlich höher aus, was einem Anstieg um knapp 30 % entspricht. 61 % der Teilnehmer haben informationsgestützt eine höhere Zahlungsbereitschaft geäußert, während 14,8 % ihre Zahlungsbereitschaft reduziert haben. Probanden, die sich schon vor der Umfrage mit dem Einsatz von Strohpellets beschäftigt haben, weisen bei der ersten, ungestützten Abfrage mit 45,29 €/t eine höhere Zahlungsbereitschaft auf. Durch das Geben von Informationen wird die Zahlungsbereitschaft dieser Biogasanlagenbetreiber um 14,6% auf 51,9 €/t gesteigert. Teilnehmer*innen, die sich bisher noch nicht mit Strohpellets für die Biogasproduktion beschäftigt haben, nannten eine Zahlungsbereitschaft von 40,16 €/t. Gestützt durch Informationen steigt die Zahlungsbereitschaft dieser Betreiber*innen von 40,16 €/t um 31,5 % auf 52,94 €/t (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23: Zahlungsbereitschaft der befragten Biogasanlagenbetreibern*innen für Strohpellets

	Zahlungsbereitschaft 1: Ungestützt			Zahlungsbereitschaft 2: Informationsgestützt		
	58	247	305	58	247	305
Stichprobe (n)	58	247	305	58	247	305
Vorheriges Interesse ¹	Ja.	Nein, noch nicht.	Σ	Ja.	Nein, noch nicht.	Σ
Durchschnittliche Zahlungsbereitschaft (€/t)	45,29	40,16	41,14	51,90	52,94	52,74
Standardabweichung (€/t)	36,25	38,04	37,70	31,58	29,41	29,78

n= 305. ¹Fragestellung: „Haben Sie sich vor dieser Umfrage schon einmal konkret mit der Nutzung von Getreidestroh, in Form von Strohpellets für die Biogaserzeugung beschäftigt?“

Quelle: Eigene Datenerhebung

Eine Zahlungsbereitschaft von 0 €/t wurde von neun Betreibern*innen in der ersten Abfrage und von sieben Betreibern in der zweiten Abfrage geäußert. Diese Antwort kann, zum einen, in einem allgemeinem Desinteresse an der Vergärung von Strohpellets in der Biogasanlage begründet sein, zum anderen, kämen auch befragungstechnische Gründe wie Protestantworten aufgrund des hypothetischen Szenarios der Umfrage, mangelnde Unkenntnis oder eine empfundene Komplexität durch die offene Fragestellung in Betracht (Yu und Abler 2010). Darüber hinaus deuten die hohen Standardabweichungen bei der Zahlungsbereitschaft auf eine hohe Unsicherheit der Biogasanlagenbetreiber*innen bei den Aussagen zur Zahlungsbereitschaft hin (Otter und Deutsch 2023). Abschließend lässt sich im Vergleich zu den eingangs aufgeführten Pelletierkosten und Marktpreisen für Strohpellets festhalten, dass die Zahlungsbereitschaft der Biogasanlagenbetreiber sowohl mit als auch ohne Information deutlich differiert.

Im Anschluss an die Analyse der deskriptiven Daten wurden unter Verwendung multivariater Verfahren die Akzeptanz von Strohpellets weiterführend untersucht. Ziel der Akzeptanzstudie war es die Determinanten der Akzeptanz landwirtschaftlicher Biogasanlagenbetreiber für den Einsatz von Strohpellets als Inputsubstrat für Biogasanlagen zu ergründen.

Kategorisierung von Biogasanlagenbetreibern*innen

Im Rahmen einer explorativen Faktorenanalyse wurden aus 13 Items zur Akzeptanz von Strohpellets zwei Faktoren „Intention zur Nutzung von Strohpellets“ und „Nutzungsverhalten“ gebildet. Auf Basis der beiden Faktoren wurde eine hierarchische Clusteranalyse nach Ward mit anschließender k-means Optimierung durchgeführt. Als Ergebnis konnte eine vier Clusterlösung ermittelt werden (Mohrmann und Otter 2023):



Die Charakterisierung der Cluster erfolgte auf Basis der clusterbildenden Variablen sowie clusterbeschreibenden Variablen zum Managementverhalten (Innovationsbereitschaft, Risikoverhalten, sozialer und gesellschaftlicher Einfluss), Einstellung gegenüber der Innovation Strohpellets (Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit, Gärrestmanagement, Leistungserwartung, Aufwandserwartung) sowie betrieblichen und soziodemographischen Daten. Im Ergebnis zeichnen sich Betreiber*innen in Cluster A „Risikoaverse Ablehner“ (n=78) durch eine sehr geringe Intention zur Nutzung von Strohpellets in der Biogaserzeugung aus. Darüber hinaus weisen sie eine vergleichsweise hohe Risikoaversion auf. Auffällig ist bei den Biogasanlagen der Betreiber in diesem Cluster ein hoher Anteil an Gülle und Mist (47 %) im Substratmix (Mais rd. 36 %) sowie ein relativ hoher Anteil an kleineren Biogasanlagen mit einer Höchstbemessungsleistung von weniger als 150 kW_{el}. Cluster B „Zögerliche Mehrheit“ umfasst den Großteil der Anlagenbetreiber*innen der Stichprobe (n=117). Sie haben keine klare Position zur Nutzung von Strohpellets in der Biogasanlage. Auch zeigen sich bei der Risikoaversion oder Innovationsbereitschaft keine eindeutigen Tendenzen. In Cluster C (n=73) befinden sich die „Risikobereite Akzeptanten“. Diese weisen eine deutliche Intention zur Nutzung von Strohpellets auf. Darüber hinaus fallen eine geringe Risikoaversion und eine hohe Innovationsbereitschaft auf. Der Maisanteil ist bei Biogasanlagen der Betreiber in diesem Cluster mit 47,5 % am höchsten, der Gülle und Mistanteil mit rd. 35 % am niedrigsten. Cluster D (n=37) beinhaltet den niedrigsten Anteil der Anlagenbetreiber*innen der Stichprobe, die „zukunftsorientierten Zögerer“. Zum einen zeigen sie konkretere Vorstellungen zur zukünftigen Nutzung von Strohpellets, zum anderen ist ihre Risiko- und Innovationsneigung weniger stark ausgeprägt als in Cluster C (Mohrmann und Otter 2023).

Akzeptanz im Strukturgleichungsmodell

Das Strukturgleichungsmodell wurde vor der inhaltlichen Interpretation anhand der in der wissenschaftlichen Literatur definierten Gütekriterien evaluiert. Alle externen Ladungen der Indikatoren liegen über dem Schwellenwert von >0,6 für neue, explorativ entwickelte Skalen (ansonsten >0,7) (Hulland 1999). Die Reliabilität der internen Konsistenz wurde anhand des Cronbachs Alpha und der Konstruktreliabilität überprüft. Für jedes Konstrukt wurde der Schwellenwert von mindestens 0,6 für explorative Studien erreicht (Nunally et al. 1994; Hair et al. 2017). Die mit der durchschnittlich extrahierten Varianz (AVE) überprüfte konvergente Validität überschreitet mit einer Ausnahme den Schwellenwert von >0,5 je Konstrukt. Lediglich das Konstrukt LE hat einen Wert knapp unter dem Grenzwert bei der AVE, kann aber aufgrund eines Reliabilitätswertes von 0,793 akzeptiert werden (Fornell und Larcker, 1981; Lam, 2012). Die Kreuzladungen der Indikatoren haben eine signifikant höhere Ladung auf das eigene Konstrukt als auf jedes andere. Anhand dieser und des Fornell-Larcker-Kriteriums sind alle Konstrukte gemäß der in der Literatur genannten Grenzwerte zu rechtfertigen (Fornell und Larcker 1981; Chin 1998). Das Heterotrait-Monotrait-Verhältnis (HTMT) überschreitet weder den

Schwellenwert von 0,9 noch enthält das Konfidenzintervall nicht den Wert "1", so dass die Diskriminanzvalidität als akzeptabel angesehen werden kann (Hair et al., 2017).

Die Ergebnisse des Strukturmodells der PLS-Analyse zeigen, dass acht von fünfzehn Beziehungen zwischen den latenten Variablen im Modell signifikante Pfadkoeffizienten aufweisen. Die Werte der Pfadkoeffizienten sind im Folgenden in Klammern dargestellt und gemäß dem entsprechenden Signifikanzniveau auf Basis von t-Tests, die die jeweilige Nullhypothesen prüfen, dass die exogene Variable keinen Einfluss auf die jeweilige endogene Variable hat, markiert: *= $p < 0,05$; **= $p < 0,01$; ***= $p < 0,001$. Das Konstrukt KNV hat den stärksten Einfluss auf die Absicht Strohpellets als Biogassubstrat zu verwenden (0,468***). Dieses Konstrukt wird durch vier Indikatoren gemessen, die sich auf die wirtschaftlichen Vorteile von Strohpellets für die Biogaserzeugung beziehen. Aufgrund des großen Einflusses der Substratkosten auf die Rentabilität der Biogasanlage ist es nicht überraschend, dass dieses Konstrukt den größten Einfluss auf die Akzeptanz einer neuen Substratalternative hat (Cucchiella et al. 2019; Hahn et al. 2014). Zweitens haben die LE (0,141*) und das WR (-0,128*) einen eher geringen, aber statistisch signifikanten Einfluss auf die Verhaltensintention. Die LE wurde anhand der nicht-ökonomischen Vorteile von Strohpellets für die Biogaserzeugung gemessen, z.B. eine höhere ökologische Nachhaltigkeit, Entspannung der Pachtpreise für Ackerland, Reduzierung des Substratanbaus und ein geringerer Flächenbedarf für die Substratversorgung der Biogasanlage.

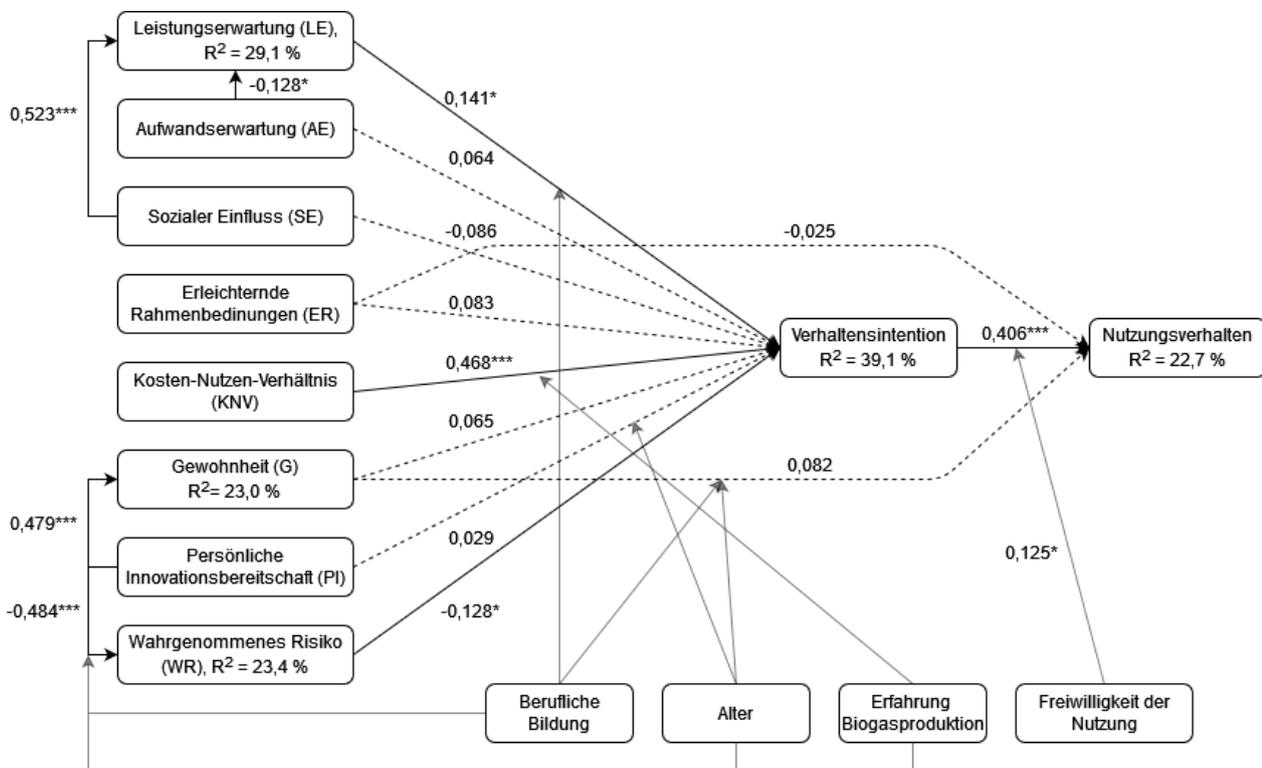


Abbildung 61: Ergebnis der Strukturgleichungsmodellierung

Signifikanzniveau: *= $p \leq 0,05$, **= $p \leq 0,01$, ***= $p \leq 0,001$; Pfeile: Pfadkoeffizienten mit Signifikanzniveau; gestrichelte Linie: nicht signifikant.

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen auf Grundlage eigener Daten

Weiterhin zeigt sich ein Einfluss der LE, allerdings mit einem geringeren Effekt als in vielen anderen UTAUT-Studien (Tamilmani et al. 2020). Der SE (0,523***), der sich aus drei Statements zur Unterstützung durch befreundete Biogasanlagenbetreibern, familiäre Unterstützung und Imageverbesserung zusammensetzt, hat einen statistisch signifikanten und positiven, größeren Einfluss auf die LE. Die Beobachtung für den SE in dieser Studie unterscheidet sich von Kröger et al. (2016), die feststellen konnten, dass das „Image“ und die „Kritik aus der Bevölkerung“ keinen Einfluss auf die wahrgenommene Nützlichkeit von Güllefeststoffen als Substrat in Biogasanlagen in deren Stichprobe haben (Kröger et al. 2016). Zusätzlich hat die AE einen negativen Einfluss auf die LE (-0,128*) für die vorliegende Stichprobe. Das bedeutet, dass ein höherer Aufwand die Nutzenerwartung für den Einsatz von Strohpellets in Biogasanlagen reduziert. Weiterhin wird ein negativer Einfluss zwischen dem Konstrukt WR und der Verhaltensintention in der vorliegenden Studie gezeigt (-0,128*), was konsistent zu anderen Studien ist (Tamilmani et al. 2020; Slade et al. 2015). Der negative Effekt von WR bestätigt, dass die Risikoaversion die Akzeptanz von Innovationen, insbesondere bei

landwirtschaftlichen Entscheidungsträgern, minder kann (Hardaker et al. 2004; Granoszewski et al. 2009; Voss et al. 2009; Reynaud und Couture 2012; Maart-Noelck und Mußhoff 2014). Das Konstrukt PI hat einen negativen Einfluss auf das WR (-0,484***), was mit den Beobachtungen von Schaper et al. (2008; 2010) übereinstimmt. Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in Studien anderer wissenschaftlicher Disziplinen, die UTAUT-Modelle mit PI- und PR-Konstrukterweiterungen verwenden (Thakur und Srivastava 2015; Manzano et al. 2009).

Mit einem Pfadkoeffizienten unter 0,1 zeigen die Pfade von SI/AE/ER/PI zur Verhaltensintention statistisch nachweisbaren Einfluss, da die Streuung sehr groß ist (Chin 1998; Lohmöller 1988). Die Verhaltensintention selbst zeigt für die Stichprobe einen moderat-großen Einfluss auf das Nutzungsverhalten (0,406***). Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Konstrukten wird in der vorliegenden Stichprobe durch die Freiwilligkeit der Nutzung moderiert (0,125*). Auch das Alter der Biogasanlagenbetreiber*innen zeigt hier einen moderierenden Effekt auf die Beziehung zwischen G und Nutzungsverhalten, PI und Verhaltensintention sowie zwischen PI und PR. Würde man von einer Zufallsstichprobe ausgehen, so könnten die Effekte als statistisch abgesichert interpretiert werden. Die landwirtschaftliche Ausbildung moderiert den Pfad PI zu PR und KNV zur Verhaltensintention für die Stichprobe. An dieser Stelle fällt auf, dass Anlagenbetreiber in der Stichprobe mit weniger als 10 Jahren Erfahrung in der Biogaserzeugung innovativer sind als die Gruppe mit 11 bis 15 Jahren und mehr als 15 Jahren Erfahrung. Außerdem ist der Pfadkoeffizient zwischen KNV und Verhaltensabsicht bei mehr als 15 Jahren Erfahrung höher als bei den anderen Gruppen mit weniger Erfahrung. Daraus kann interpretiert werden, dass mit steigender Erfahrung die Wirtschaftlichkeit an Bedeutung im Entscheidungsverhalten der Biogasanlagenbetreiber gewinnt. Darüber hinaus moderiert die landwirtschaftliche Ausbildung die Beziehungen zwischen G und Nutzungsverhalten, LE und Verhaltensintention sowie PI und WR für die vorliegende Stichprobe. Insbesondere die Interpretation der Ausbildung wird durch die unterschiedlichen Gruppengrößen eingeschränkt. Während die Gruppe „landwirtschaftliche Lehre und andere Abschlüsse“ nur 39 der Teilnehmer umfasst, haben die anderen drei Gruppen zwischen 69 und 121 Mitglieder. Die erklärte Varianz erreicht einen Wert von $R^2=39,1\%$, was einer durchschnittlich erklärten Varianz (ein $R^2 \geq 0,33$ gilt als durchschnittlich) entspricht, für die Verhaltensabsicht und ein R^2 von $22,7\%$ (ein $R^2 \geq 0,19$ gilt als schwach) für das Nutzungsverhalten (Chin 1998). Für die endogenen Konstrukte LE, G und PI ist die erklärte Varianz auf Basis des R^2 ebenfalls schwach. Während der Wert für das Nutzungsverhalten relativ niedrig ist, ist das R^2 des Nutzungsverhaltens vergleichbar mit früheren, explorativen Studien in der Agrarforschung, die strukturelle Modellierungsansätze verwendeten (Adrian et al. 2005; Aubert et al. 2012; Gebrezgabher et al. 2015).

Limitationen des AP 2.2: Zu berücksichtigen ist bei den Ergebnissen zur Akzeptanz, dass die Stichprobe der Studie nicht vollständig repräsentativ ist. Insbesondere größere Biogasanlagen sind in der Stichprobe stärker vertreten. Darüber hinaus sind Anlagenbetreiber*innen aus Niedersachsen über- und aus Bayern unterrepräsentiert. Weitere Verzerrungen der Stichproben können beispielsweise durch das Online-Befragungsformat bedingt sein. Zur besseren Verallgemeinerung und Absicherung der Ergebnisse wird die Wiederholung der Befragung empfohlen.

7.4 Fazit und Handlungsempfehlung des AP 2

Wie aus der Literatur hervorgeht, haben die Substratbeschaffung und die Kosten dieser einen besonderen Stellenwert in der Biogaserzeugung. Gleichermaßen werden in diesem Bereich rechtliche Rahmenbedingungen laufend verschärft, die den Einsatz bestimmter, etablierter Substrate zunehmend beschränken und die Kosten der Substratversorgung beeinflussen. Wie in Teilvorhaben 1 und 3 bestätigt werden konnte, bieten Strohpellets aus technischer Sicht eine Reihe von Vorteilen, die den Einsatz im Vergleich zu unverarbeitetem Stroh deutlich verbessern und vorzüglicher machen.

Im Rahmen des AP 2 konnte festgestellt werden, dass die Wirtschaftlichkeit des Strohpelleteinsatzes wesentlich von den Beschaffungs- bzw. Herstellungskosten abhängen. Das noch relative neue Verfahren der mobilen Pelletierung, bei dem direkt aus dem Strohschwad auf dem Feld pelletiert wird, hat sich nach den Erkenntnissen aus diesem Projekt als am kostengünstigsten erwiesen. Aufgrund der begrenzten Pelletierleistung pro Stunde reicht das Zeitfenster im Sommer jedoch nicht aus, um größere Mengen produzieren zu können, es sei denn, es besteht die Möglichkeit mehrere Maschinen in diesem Zeitraum einsetzen zu können. Ist dies nicht der Fall, ist einer entsprechenden Mischkalkulation aus den Kostender mobilen mit der teil-mobilen Pelletierung zu bilden. Die im Rahmen des Projektes näher betrachtete Pelletiermaschine Krone Premos hat ihr Potential nur im mobilen, jedoch nicht im teil-mobilen Betrieb nachweisen können. Sollte die Pelletierleistung unter optimaleren Bedingungen (etwas größerer Schlepper, (noch) trockeneres Stroh) einen höheren Durchsatz erreichen, besteht hier ein realistisches Einsparpotential, um die teil-mobile Pelletierung kostengünstiger durchführen zu können. Darüber hinaus gibt es in der Praxis erste Ansätze zu einem teil-mobilen Betrieb mit einem Elektromotor, der ebenfalls kosteneinsparpotential

aufweisen kann. Weitere Pelletierverfahren wie die stationäre Pelletierung oder teil-mobile Containeranlagen mit einer Pelletierkapazität von 1 t/h wiesen insgesamt höhere Kosten auf, wobei auch hier in Abhängigkeit des Energieträgers Potential zur Kostenreduzierung vorhanden sind. Darüber hinaus zu berücksichtigen, dass bei diesen beiden Verfahren das Häckseln und Entstauben des Stroh vorweggeschaltet ist und das Endprodukt 8 mm Pellets sind. Die Krone Premos arbeitet ohne Zerkleinerung und pelletiert das Material direkt zu 16 mm Pellets.

Die Datenerhebungen zur Fütterung von Strohpellets haben gezeigt, dass aufgrund des Austauschverhältnisses von Silomais zu Strohpellets von 1:0,45 bezogen auf den Methanertrag pro Tonne Frischmasse keine Unterschiede im Arbeitszeitbedarf bestehen. Dies hängt jedoch wesentlich von dem jeweiligen Lagerort und dessen Entfernung vom Eintragungssystem ab.

Anhand der Szenariobetrachtung wurde deutlich, dass Strohpellets unter günstigen Pelletierbedingungen die Möglichkeit bieten, die durchschnittlichen Substratkosten zu reduzieren. Dies setzt jedoch die Annahme voraus, dass die Nährstoffe der Strohabfuhr (bei 6 t Stroh pro Hektar: 30 kg Stickstoff, 18 kg P₂O₅, 84 kg K₂O) über den Gärrest zurückgeführt werden und entsprechend nicht monetär bewertet werden.

Bei Verwendung der teil-mobilen Pelletierung und insbesondere bei Verwendung von Pellets aus Zukaufstroh, bei dem die Nährstoffzugskosten und der Gewinn des Strohverkäufers enthalten, nimmt die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung in allen Szenarien mit steigender Pelletmenge im Substratmix ab. Die eingesparten Ausbringkosten für den Gärrest, die mit 6,1 €/m³ bewertete Lagerraumersparnis ändern daran im Verhältnis eher wenig, da der Eigenstrombedarf durch den steigenden TS-Gehalt und den damit verbundenem, steigendem Rührbedarf entsprechend zunimmt.

Die zu Grunde gelegten 22,6 ct/kWh an Gesamterlösen aus dem Biogasmessprogramm entsprechen einem Biomethanpreis von rd. 8,4 ct/kWh. Geht man für die Zukunft davon aus, dass Strohpellets eine THG-Emission von +15g CO₂eq/MJ erreichen, so wäre ein Biomethanpreis von 10 ct/kWh Hs bei Einfachanrechnung bzw. 14 ct/kWh Hs bei Doppelanrechnung realistisch, so dass auch Pelletpreise über 200 €/t wirtschaftlich eingesetzt werden können. Im Umkehrschluss ist in Bezug auf die Verstromung festzuhalten, dass bei einem Höchstwert von aktuell 19,83 ct/kWh für bestehende Biogasanlagen im Rahmen der Ausschreibung selbst unter Annahme von günstigen Pelletierbedingungen kaum einen Gewinn ermöglicht werden kann (Bundesnetzagentur 2023).

Die Lagerenten zeigen, dass bei Strohpellets im Vergleich zu etablierten Substraten wie Silomais und GPS-Getreide aufgrund der höheren Transportwürdigkeit längere Transportstrecken realisiert werden können. Unter Annahme der Vollkostendeckung wird bis zu Entfernungen zwischen 50 km und 80 km bei mobil hergestellten Pellets eine positive Lagerente realisiert. Dies kann insbesondere vor dem Hintergrund eines Austausches von Strohpellets gegen Gärrest zwischen Biogasanlagen in Veredelungsregionen (Überschuss an org. Düngern) mit landwirtschaftlichem Betrieb in Ackerbauregionen (Überschuss an Stroh) praxisrelevant sein. Wichtig ist dabei, dass die Pelletierkapazität im mobilen Verfahren zum Abfahragespann passt. Bei hohen Getreidepreisen kann der Erlös aus der Vermarktung oder innerbetrieblichen Verwertung im Rahmen einer Koppelnutzung dazu verwendet werden, die Kosten der Strohpelletierung in gewisser Hinsicht mitzutragen. Insbesondere, wenn das Stroh aus ackerbaulicher Sicht abgefahren werden soll, sind die eingesparten Kosten des Strohhäcksels beim Dreschen und ggf. das Einsparen einer Bodenbearbeitung mit zu berücksichtigen.

Zu guter Letzt zeigen die Gleichgewichtspreise von Strohpellets, dass diese insbesondere bei hohen Gärrestverbringungskosten und hohen Substratpreisen an Bedeutung gewinnen können, da der Grenzpreis oberhalb der realisierbaren Pelletierkosten liegt. Dies gilt nicht nur im Vergleich zum Substrat Silomais, sondern insbesondere auch im Vergleich zu Getreidekorn, dass nach wie vor von vielen Anlagenbetreibern als Substrat eingesetzt wird und in den letzten drei Jahren verhältnismäßig teuer im Zukauf war. In der Praxis treten diese Fälle insbesondere bei kurzfristiger Futterknappheit, knappem Gärrestlagerraum über die Wintermonate oder vor dem Hintergrund der 9-monatigen Lagerdauer gemäß der letzten Novelle der Düngeverordnung auf (DüV 2020).

Auffällig ist, dass die Gleichgewichtspreise für Strohpellets deutlich höher sind als die ermittelten Zahlungsbereitschaften. Diese Diskrepanz unterstreicht möglicherweise die Erkenntnisse aus den deskriptiven Ergebnissen, dass Biogasanlagenbetreiber in Deutschland aktuell ein geringes Wissen zur Vergärung von Strohpellets haben und diese in ihrer Preiswürdigkeit entsprechend deutlich unterschätzen. Gestützt werden kann diese Vermutung mit der hohen Standardabweichung, die auf eine hohe Unsicherheit der Anlagenbetreiber schließen lässt. Entsprechend kann ein mangelndes Wissen über eine Innovation Strohpellets sowie eine geringe Verfügbarkeit an Informationen ein bedeutendes Hemmnis für die Akzeptanz von Strohpellets in der Praxis darstellen. Stützen lässt sich diese Interpretation anhand der Beobachtungen

von Lantz et al. (2007) im Bereich der Nutzung von landwirtschaftlichen Nebenprodukten in der schwedischen Biogasproduktion sowie Rodriguez et al. (2008) und Mishra et al. (2018), die ein mangelndes Wissen über die jeweilige Innovation als Hemmnis bei der Akzeptanz von nachhaltigen Bewirtschaftungspraktiken in der Landwirtschaft identifizieren konnten (Mishra et al. 2018; Lantz et al. 2007; Rodriguez et al. 2008). Entsprechend gilt es dies im Hinblick auf die Strohpelletvergärung durch Wissensverbreitung, Beratung, Infomaterial und weiterführende Projekte zu verbessern und zu fördern.

Wie aus der Clusteranalyse und dem Strukturmodell der PLS-Analyse hervorgeht, nehmen neben den Eigenschaften der Innovation Strohpellets selbst, insbesondere die Faktoren Risikoeinstellung und Innovationsbereitschaft eine bedeutende Rolle für die Akzeptanz von Strohpellets unter landwirtschaftlichen Biogasanlagenbetreibern in Deutschland ein. Zur Etablierung von Strohpellets als zukünftiges Biogassubstrat sind zunächst Anlagenbetreiber*innen zur Nutzung von Strohpellets in ihrer Biogasanlage zu motivieren, die in Cluster C „Risikobereite Akzeptanten“ und Cluster D „Zukunftsorientierte Zögerer“ eingeordnet sind. Von Forschungsinstituten betreute Pilotprojekte oder praktische Versuche an Biogasanlagen könnten dazu beitragen das Wissen über die Verwendung von Strohpellets in der Biogaserzeugung zu sammeln und positive Praxisbeispiele zu erzeugen. Sollte sich der Einsatz von Pellets bei innovativen, risikobereiten Anlagenbetreibern*innen durchsetzen, besteht die Chance, dass andere Praktiker (Cluster B) nachziehen, da insbesondere in der Landwirtschaft das Beobachten und „Abgucken“ bei Neuerungen eine wichtige Rolle spielen (Frederking 1996). Unterstützend können politisch initiierte Förderprogramme (z.B. eine Sondervergütung für Strohpellets), eine Möglichkeit darstellen die Nutzung von Strohpellets in der Biogaserzeugung durch finanzielle Anreize stärker zu etablieren. Hierdurch könnten auch risiko-averse Anlagenbetreiber zum Einsatz von Strohpellets ermutigt werden, da das finanzielle Risiko gemindert würde (Mola-Yudego et al. 2014). Um eine schnellere Umsetzung in der Praxis zu erreichen wäre darüber hinaus ein politisch initiiertes, finanzieller Anreiz z.B. im Rahmen der EEG-Anschlussförderungen für Stroh(-pellets) hilfreich, um Anlagenbetreiber zu ermutigen und das finanzielle Risiko abzumildern. Auch das aktive Fördern von technischen Innovationen im Bereich Pelletierung (energieeffizienter, leistungsstärker) kann einen Ansatz darstellen, diese für den Biogasbereich marktfähiger zu bekommen.

8. Ökobilanzielle Bewertung des Strohpelleteinsatzes als Biogassubstrat

Die Ökobilanz ist eine Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produkts, einer Prozesskette oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus. Die Biogasproduktion aus Strohpellets ist eine vielversprechende Technologie zur Nutzung erneuerbarer Energieressourcen und Erschließung von bisher ungenutzten Stoffströmen. Stroh ist eine erneuerbare Ressource, die häufig als Abfallprodukt in der Landwirtschaft anfällt und daher als kosteneffiziente und umweltfreundliche Quelle für Biogas dienen kann. Im Rahmen des Projektes wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt, um die Umweltauswirkungen der Prozesskette von der Strohpelletproduktion bis zur Biogaserzeugung sowie die Umweltwirkungen der sich daraus ergebenden Veränderungen zu bewerten. Die Untersuchungen bezogen sich dabei auf unterschiedliche Bereitstellungspfade von Strohpellets und deren Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Szenarien und Substratmischen zur Nutzung in Biogasprozessen. Dabei wurden die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus untersucht und bewertet, von der Roh- und Reststoffproduktion über die Produktion der Strohballen und der Strohpellets sowie die damit verbundenen Transporte bis hin zur Biogasproduktion und Verbringung des Gärrests. Die Analyse wurde mit dem Ziel durchgeführt, Schlüsselfaktoren zu identifizieren, welche die Umweltauswirkungen erhöhen, sowie Maßnahmen, die dazu beitragen können, die Umweltauswirkungen zu verringern und die ökologische Nachhaltigkeit der Biogaserzeugung aus Strohpellets zu verbessern.

8.1 Material und Methoden

Die Ökobilanzen zur Bewertung der besten Prozessketten zur Bereitstellung von Biogas aus Strohpellets wurden in Anlehnung an die Vorgehensweise nach ISO 14040 und 14044 anhand der vier Hauptphasen durchgeführt:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
2. Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung,
4. Auswertung.

In der ersten Phase werden die beabsichtigte Anwendung, die Hintergründe und die beabsichtigte Zielgruppe definiert sowie der Untersuchungsrahmen festgelegt. In der zweiten Phase „Sachbilanz“ werden die benötigten Daten anhand der Inputs und Outputs des untersuchten Systems innerhalb der Systemgrenzen erfasst. Die Inputs betreffen Energie, Rohstoffe und andere physische Inputs, die Outputs umfassen Produkte und Nebenprodukte sowie entstehende Abfälle und direkte Emissionen in die Umweltkompartimente Luft, Wasser und Boden. Die zugrundeliegenden Daten stammen aus Primär- und Literaturdaten für die modellierten Vordergrundprozesse sowie aus den Ökobilanzierungsdatenbanken für die Hintergrundprozesse. In der Phase der Wirkungsabschätzung folgt die Verknüpfung der Sachbilanzen mit den Umweltwirkungen der einzelnen Stoff- und Energieflüsse anhand von Indikatoren. Anhand von Umweltwirkungsabschätzungs-Methoden, bei denen die Emissionen erstens in Wirkungskategorien eingeteilt und zweitens in gemeinsamen Einheiten beschrieben werden, können Vergleiche unterschiedlicher Verfahren und Szenarien erfolgen. Zuletzt wird überprüft, ob die Ergebnisse in Übereinstimmung mit dem angegebenen Ziel und dem Untersuchungsrahmen stehen, und die Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz geprüft. Als iterative Methode erfolgen diese Schritte bei der Ökobilanzierung laufend, so dass ein möglichst konsistentes und robustes Endergebnis erreicht werden kann.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Anwendung der Methodik nach ISO 14040/14044 erfolgte für den ökobilanziellen Vergleich der Methanbereitstellung in unterschiedlichen Erzeugungsszenarien. Ziel der durchgeführten ökobilanziellen Bewertung war es, den potenziellen Umweltnutzen der Verwendung des landwirtschaftlichen Reststoffs Stroh in Form von Pellets als Substrat im Biogasprozess besser zu verstehen. Zu diesem Zweck wurde eine vergleichende Ökobilanz für verschiedene Prozessketten zur Herstellung und Anwendung von Strohpellets durchgeführt. Die einzelnen Behandlungsschritte und Szenarien der Bereitstellung sowie der Einsatz in verschiedenen Substratkombinationen sowie deren Beitrag zu den verschiedenen Umweltauswirkungen wurde über den gesamten Lebenszyklus ermittelt und anschließend diskutiert. Insbesondere sollten zwei Unterziele verfolgt werden:

- Ermittlung der Bereitstellungspfade mit den geringsten Emissionen unter Einbezug der Biomasselogistik und verschiedener Herstellungsverfahren für Strohpellets.
- Identifikation der Emissionsreduktion durch den Einsatz von Strohpellets in exemplarischen Szenarien mit unterschiedlichen Substratmischen.

Die in Abbildung 62 aufgeführten untersuchten sechs Hauptszenarien mit jeweils zwei bis drei Variationen spiegeln die Substratzusammensetzungen aus den kontinuierlichen Technikumsversuchen wieder und bilden

damit die Biogaserzeugungslandschaft in Deutschland im Hinblick auf unterschiedliche Substratmixe hinreichend genau ab.

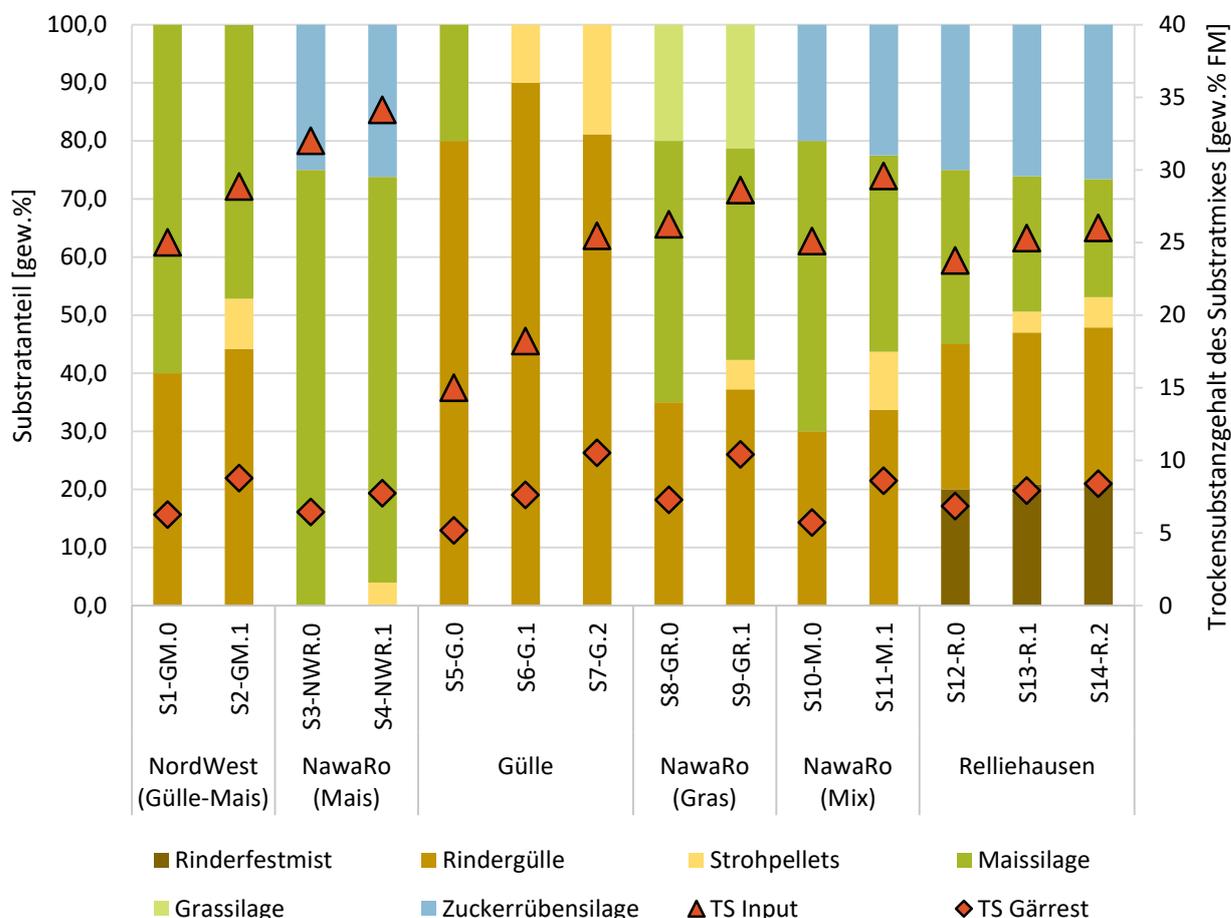


Abbildung 62: Substratzusammensetzung der Szenarien sowie die Trockensubstanzgehalte der Substratmixe und der daraus resultierenden Gärreste

Insgesamt sollte bei der ökologischen Bewertung ein Panorama von aktuellen und zukünftigen Substrat-Mixen sowie der zugehörigen Biomasse- und Gärrestlogistik abgedeckt und die wichtigsten Quellen für Umweltauswirkungen des Strohpelleteinsatzes zur Biogaserzeugung in verschiedenen Szenarien beleuchtet werden.

Der hohe Aggregationsgrad der verschiedenen Substratmixe und die generische Anlagenkonfiguration erlauben überblicksartige Bilanzen für den Systemvergleich des Einsatzes von Strohpellets in Biogasanlagen. Damit liefert die durchgeführte Ökobilanz umfassende Informationen zu den ökologischen Auswirkungen der einzelnen Bereitstellungspfade der Strohpellets (mobil, teil-mobil und stationär) sowie über das Zusammenspiel in verschiedenen Substratkonstellationen.

Funktionelle Einheit

Für die Fragestellungen der Bereitstellung eines erneuerbaren Energieträgers in Form von Methan im Biogas wurde als funktionelle Einheit (FU) die Erzeugung von einem Normkubikmeter Methan [Nm³ CH₄] aus den jeweiligen Substratmixen innerhalb der Szenarien gewählt. Um zusätzlich die Auswirkungen einzelner Prozess- und Parameterentscheidungen auf die Emissionen der Strohpelletbereitstellung zu evaluieren und die Auswertung übersichtlicher zu gestalten, wurde für das angegliederte Teil-System der Strohpelletbereitstellung als funktionelle Einheit die Bereitstellung von 1 kg (FM) Strohpellets gewählt.

Geografischer und Zeitlicher Rahmen

Der geografische Rahmen gibt an, welche Bilanzparameter für die entsprechende Regionalisierung der Ökobilanz anzusetzen sind, da sich die Hintergrunddaten innerhalb verschiedener Landesgrenzen maßgeblich unterscheiden. Da die Situation der Biogaserzeugung aus Strohpellets in Deutschlands abgebildet

werden sollte, ist der geografische Rahmen der durchgeführten Ökobilanzierung Deutschland. Für Energieträger und Hilfsstoffe erfolgte falls möglich die Modellierung der realen Bedingungen der Förder- bzw. Produktionsstandorte. Da nicht für alle verwendeten Prozesse aus den generischen Ökobilanz-Datenbanken eine Georeferenzierung für Deutschland vorhanden war, wurde teilweise auf einen europäischen oder in seltenen Fällen auf einen durchschnittlichen, weltweiten Datensatz zurückgegriffen. Neben dem geografischen Rahmen ist der zeitliche Bezug immanent für die Ergebnisse einer Ökobilanz. Der zeitliche Bezug bestimmt z. B. rechtliche, technische und energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen, vor allem der Hintergrundprozesse. Aufgrund der Datenlage wurde der Bezugsrahmen um das Jahr 2021 gelegt.

Systemgrenzen

Die Systemgrenzen einer Ökobilanz umfassen im Allgemeinen alle Prozesse „von der Wiege bis zur Bahre“, angefangen von der Rohstoffgewinnung über die Nutzung des Endproduktes beziehungsweise der Dienstleistung bis zur Abfallentsorgung. Dabei werden alle zugeführten Energieträger und stofflichen Inputs sowie die aus dem System abgegebenen Reststoffe und Emissionen in die Berechnung einbezogen. Die Systemgrenzen der Pelletbereitstellung mithilfe unterschiedlicher Pelletierungsverfahren (mobil, teil-mobil und stationär) umfasste verschiedene Prozessketten mit unterschiedlicher Stroh- und Pelletlogistik. Zudem wurden anhand von sechs verschiedenen Ausgangs-Substratmischungen insgesamt 14 unterschiedliche Szenarien (siehe Tabelle 24) modelliert, um den Einsatz von Strohpellets in möglichst vielen Substratkombinationen zu bewerten. Daraus ergab sich die in Abbildung 63 dargestellte Systemgrenze der durchgeführten ökobilanziellen Bewertung.

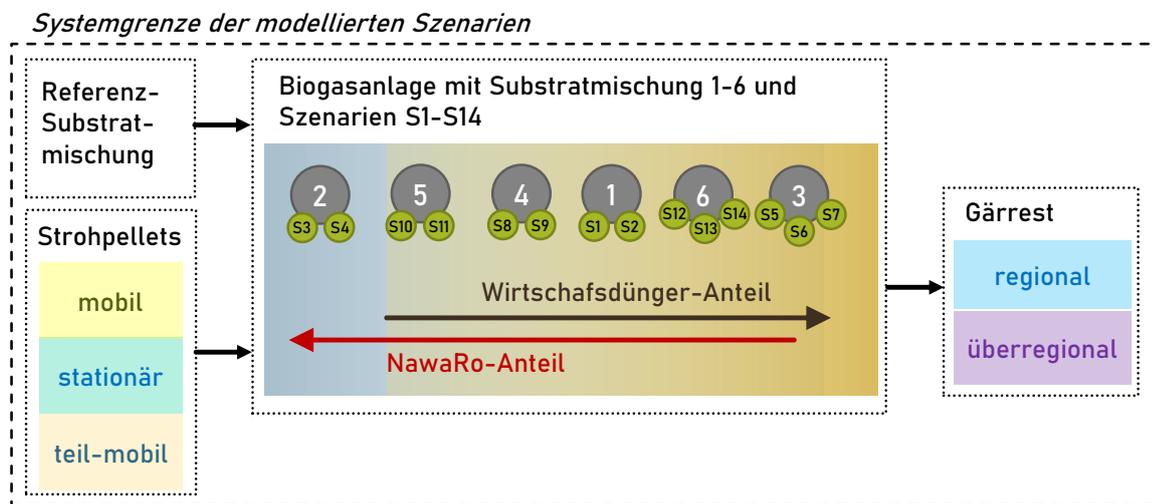


Abbildung 63: Systemgrenze der modellierten Szenarien

Um den Einfluss der entsprechenden Prozesskettenglieder im Hinblick auf ihren Anteil an den Gesamtemissionen in den unterschiedlichen Wirkungskategorien zu ermitteln, werden zunächst die Sachbilanzen für die Bereitstellung der Strohpellets bestimmt.

Tabelle 24: Modellierte Szenarien der unterschiedlichen Substratmischungen

Substratmischung	Name/Hauptsubstrat	Szenario-Nr.	Szenario-Name
1	Nordwest (Gülle-Mais)	S1	GM.0
		S2	GM.1
2	NawaRo (Mais)	S3	NWR.0
		S4	NWR.1
3	Gülle	S5	G.0
		S6	G.1
		S7	G.2
4	NawaRo (Gras)	S8	GR.0
		S9	GR.1
5	NawaRo (Mix)	S10	M.0
		S11	M1
6	Beispielbiogasanlage (Relliehausen)	S12	R.0
		S13	R.1
		S14	R.2

In Abbildung 64 ist die Systemgrenze der Bereitstellung von Strohpellets dargestellt. Diese beinhaltet sowohl die direkte Herstellung der Pellets aus dem Schwad mittels mobiler Pelletierung als auch die teil-mobile und stationäre Herstellung der Strohpellets mit den vorgelagerten Prozessketten zur Ballenherstellung und Ballenlogistik. Für die teil-mobile und stationäre Pelletierung an der Biogasanlage wurden zudem unterschiedliche Logistikszenerarien betrachtet. Zum einen war dies die regionale Bereitstellung mit Strohballen, welche direkt zur Biogasanlage (BGA) geliefert werden, und zum anderen die überregionale Strohballenherkunft, bei der ein zusätzlicher Zwischentransport der Strohballen von einem externen landwirtschaftlichen Betrieb zur Biogasanlage erfolgt.

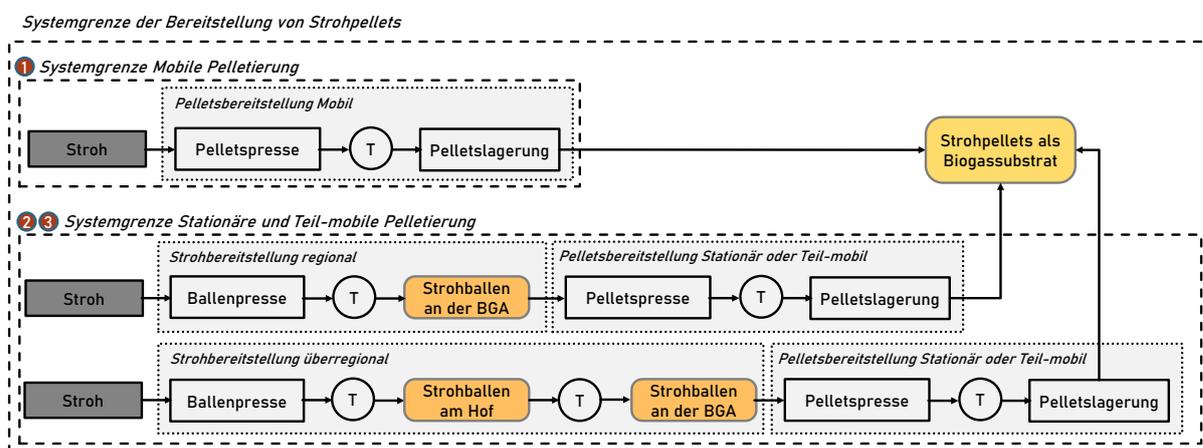


Abbildung 64: Systemgrenze der Bereitstellung von Strohpellets anhand der drei Verfahren: mobile Pelletierung, teil-mobile Pelletierung und stationäre Pelletierung

Grundsätzlich wurde, wenn möglich, eine Systemraumerweiterung durch entsprechenden Gutschriften durchgeführt (z. B. für die Nährstoffe aus den Gärresten). Hintergrundprozesse, die als aggregierte Prozesse in den Datenbanken vorliegen und bei denen eine Allokation bereits im Vorfeld durchgeführt wurde, blieben davon unberührt. Da die Systemraumerweiterung für die Nutzung des Getreides aufgrund der mannigfaltigen Möglichkeiten der Zielstellung der ökobilanziellen Bewertung gegenübergestanden hätte, wurde für die Strohbereitstellung ebenfalls auf eine Allokationsmethode zurückgegriffen. Diese wurde allerdings im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variiert, um den Einfluss verschiedener Allokationsmethoden ebenfalls mit der durchgeführten ökobilanziellen Bewertung abzubilden.

Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Sachbilanz werden in der Wirkungsabschätzung zusammengefasst und entsprechend ihres Beitrags zu der betrachteten Umweltwirkungskategorie anhand ihres spezifischen Wirkungspotenzials gewichtet. Daraus können für die entsprechenden Wirkungskategorien die entstandenen Emissionen der verschiedenen Substratmixe und Szenarien abgeleitet werden. Die in Tabelle 25 aufgeführten Umweltwirkungen wurden für die Beurteilung der ökologischen Auswirkungen der Methanbereitstellung nach ReCiPe 2016 Midpoint Methode mit 100-jährigem Bezugsrahmen für die untersuchten Szenarien verwendet (vgl. Huijbrets et al. 2017).

Tabelle 25: Verwendete Wirkungskategorien nach ReCiPe 2016 zur Beurteilung der Umweltwirkungen

Wirkungskategorie	Charakterisierungsfaktor	Einheit
Klimawandel	Global warming potential (GWP)	[kg CO ₂ -äq.]
Feinstaub	Particulate matter formation potential (PM)	[kg PM _{2,5} -äq.]
Fossiler Ressourcenverbrauch	Fossil fuel potential (FFP)	[kg oil-äq.]
Süßwasser Ökotoxizität	Freshwater ecotoxicity potential (FETP)	[kg 1,4-DB-äq.]
Süßwasser Eutrophierung	Freshwater eutrophication potential (EP)	[kg P-äq.]
Versauerung	Terrestrial acidification potential (AP)	[kg SO ₂ -äq.]
Humantoxizität, Krebserregend	Human toxicity potential (HTPc)	[kg 1,4-DB-äq.]

Datenquellen

Als Datenquellen standen primär die im Projekt erhobenen Daten zu den Szenarien und der Pelletierung sowie die Methanerträge aus den Technikums-Versuchen zur Verfügung (siehe Abbildung 62). Darüber hinaus wurden Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.6 (Wernet et al. 2016) und den GaBi-Datenbanken (Sphera 2022) sowie Daten aus Literaturquellen für die Bilanzierung verwendet.

Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist ein wichtiger Bestandteil der Ökobilanzierung, um die Konsistenz und Genauigkeit in der Bewertung von Umweltauswirkungen verschiedener Produkte und Prozesse sicherzustellen. Gemäß ISO 14044 ist die Sensitivitätsanalyse ein systematisches Verfahren zur Abschätzung der Auswirkungen, die alternative Entscheidungen für Methoden und Daten auf das Ergebnis einer Studie haben. Daher wird eine Sensitivitätsanalyse im Allgemeinen durchgeführt, um den Einfluss der angenommenen Parameterwerte und Entscheidungen innerhalb der Prozessketten auf die Emissionspotenziale zu ermitteln. Daraus lässt sich der Einfluss der verwendeten Daten auf die Ergebnisse überprüfen und die Aussagen der gewonnenen Erkenntnisse können entweder gestützt oder widerlegt werden, wenn die Sensitivitätsanalyse eine hohe Relevanz für einzelne Parameter ergeben hat (JRC 2010). Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, die Robustheit der Bilanzierungsergebnisse zu erhöhen und eine bessere Grundlage für die Bewertung von Umweltrisiken und die Identifikation von Verbesserungsmöglichkeiten zu erhalten. Die Sensitivitätsanalyse des modellierten Systems wurde mittels zweier Vorgehensweisen durchgeführt:

1. Zur Bestimmung der Auswirkungen einzelner Parameter auf die Resilienz des modellierten Systems wurde der Einfluss einzelner Parameter auf die Wirkungskategorien mittels Parametervariation bestimmt (z.B. die benötigte Strom- und Dieselmenge für die Strohpelletierung, die Transportentfernungen für das Stroh, die Pellets sowie den Gärrest)
2. Die Einflussnahme verschiedener Prozesse und Allokationsmethoden auf die Umweltauswirkungen erfolgte anhand der Variation einzelner Prozesse (z.B. Wahl der zugrunde gelegten Erzeugungsorte der benötigten elektrischen Energie bzw. des Strom-Mixes, oder die Wahl der Allokationsmethode der Prozesskette zum Anbau des Getreides).

8.2 Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung der Strohpelletbereitstellung

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der in diesem Projekt durchgeführten Ökobilanzierung der Verwendung von Strohpellets zur Biogaserzeugung vorgestellt. Die Umweltbelastungen werden zunächst für die Bereitstellung der Pellets durch verschiedene Bereitstellungsszenarien ausgewertet. Anschließend erfolgt die Darstellung der unterschiedlichen Substratkonfigurationen unter Einbezug verschiedener Konzepte für die regionale und überregionale Stroh- bzw. Pellet-Logistik sowie die Gärrest-Verbringung. Grundsätzlich konnten dadurch die Umweltaspekte des Strohpelleteinsatzes als Biogassubstrat in Deutschland möglichst umfassend bewertet und mögliche ökologische Vorteile oder Nachteile unterschiedlicher Substrat- und Logistikkonzepte aufgedeckt werden.

8.2.1 Umweltwirkungspotenziale der Stroh- und Strohpellet-Prozessketten

Die Bereitstellung von Strohpellets als Biogassubstrat kann auf unterschiedlichste Weise erfolgen. Im Rahmen des Projektes wurden deshalb verschiedene Prozessketten der Bereitstellung untersucht. Dafür wurden die Emissionscharakteristika der unterschiedlichen Verfahren zur Pelletierung, der potenziell vorgeschalteten Strohlogistik sowie der Allokationsmethode des Getreideanbaus ausgewertet.

8.2.2 Emissionen der Strohpelletbereitstellung mit unterschiedlichen Pelletierverfahren

Ein wesentlicher Unterschied in der Erzeugung von Pellets aus Stroh kann auf die gewählte Anlagentechnik zurückgeführt werden. Die mobile Pelletierung aus dem Schwad sowie die teil-mobile Pelletierung aus Strohballen durch traktorgezogene oder LKW-Auflieger-Anlagen erfolgt meist mit Dieselmotoren und relativ geringen Durchsätzen. Stationäre, ortsfeste Pelletier-Anlagen weisen in der Regel größere Durchsätze und einen Antrieb mit Elektromotoren für die Pelletierung selbst und assoziierte Prozesse (Vorzerkleinerung, Kühlung, Absaugung, Abpackung, etc.) auf. Zudem wird für eine teil-mobile und stationäre Pelletierung eine Pressung und Lagerung des Strohs in Ballenform benötigt. Die Ermittlung der potenziellen Treibhausgasemissionen für die drei Prozessketten mittels verschiedener Pelletierverfahren ist in Abbildung 65 dargestellt. Die Emissionen aus dem Getreideanbau werden dabei nicht berücksichtigt. Die Fehlerindikatoren spiegeln die Bandbreite der Emissionen aus der Sensitivitätsanalyse (Transportentfernungen, Energiebedarfe und Energiebereitstellungsform der Pelletierung) wider.

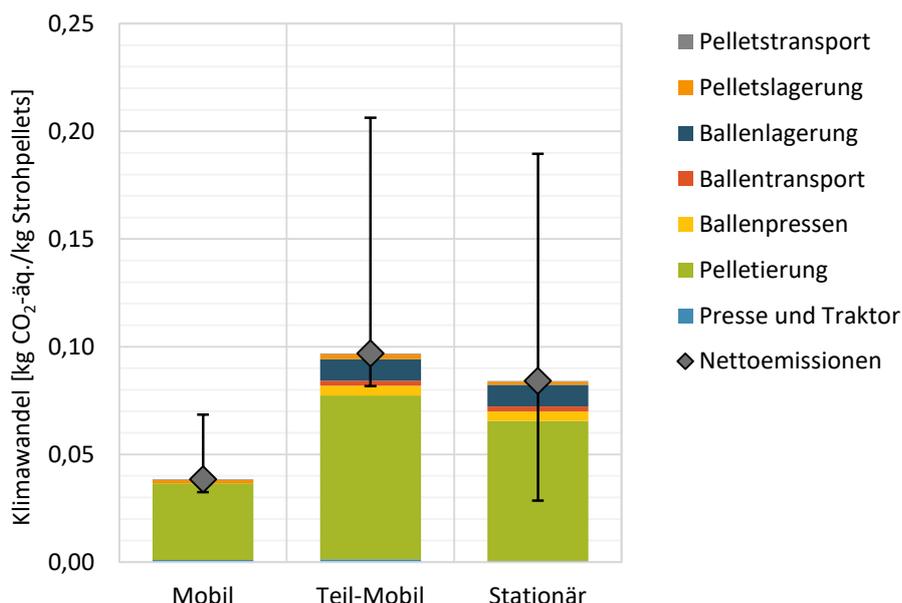


Abbildung 65: Emissionspotenziale der untersuchten Prozessketten verschiedener Pelletierverfahren in der Kategorie Klimawandel.

Insgesamt fallen die Treibhausgasemissionen für die mobile Pelletierung aus dem Schwad aufgrund der gewählten Anlagentechnik und den damit verbunden, vergleichsweise geringen Dieselverbräuchen am geringsten aus, wohingegen die teilmobile Pelletierung durch die notwendige Strohballenherstellung und -logistik das höchste Emissionspotenzial besitzt. Die direkten Emissionen bei der Pelletierung mit der zugehörigen Bereitstellung der Energie aus Diesel oder Strom sind für alle drei Verfahren innerhalb der jeweiligen Prozesskette dominierend. Zudem zeigt sich, dass die Prozesskette zur Bereitstellung der Strohballen im Vergleich zur sehr energieintensiven Pelletierung und den damit verbundenen hohen Emissionen einen geringeren Einfluss auf die Gesamtemissionen hat. Legt man allerdings eine größere Transportdistanz für die Strohballen bzw. die Pellets als 5 km zugrunde (bis 500 km), steigen die Emissionen entsprechend an, repräsentiert durch die positive Bandbreite der Fehlerindikatoren. Allerdings können potenzielle Einsparungen in den Dieselverbräuchen der Pelletierung oder durch die Änderung des Strombereitstellungpfades (Eigenstrom aus Biogas oder ein grüner Strom-Mix) zu teils großen Einsparungen an potenziell freigesetzten Treibhausgasen führen, sodass die stationäre Pelletierung auf einem ähnlichen Emissionsniveau wie die mobile Pelletierung liegen kann.

8.2.3 Allokationsmethode für den Getreideanbau und die Strohbereitstellung

Die Wahl der Allokationsmethode zur Anrechnung der vorgelagerten Prozesskette des Getreideanbaus hängt von den Untersuchungszielen und der Komplexität des Systems ab. Ein konsistenter Ansatz ist jedoch wichtig, um Vergleiche zwischen den verschiedenen Produkten zu ermöglichen. Um die Auswirkungen verschiedener Ansätze zu vergleichen, erfolgt die Aufteilung der Emissionen anhand der in der Ökobilanzdatenbank vorhandenen Prozessen zur Massen- und Preisallokation des Strohanteils (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) sowie anhand des Abfallkriteriums (keine Anrechnung von Emissionen), wie es beispielsweise in der Biokraft-NachV bzw. der RED II Anwendung findet. Abbildung 66 zeigt die prozentuale Aufteilung der Emissionen nach den jeweiligen Allokationsmethoden.

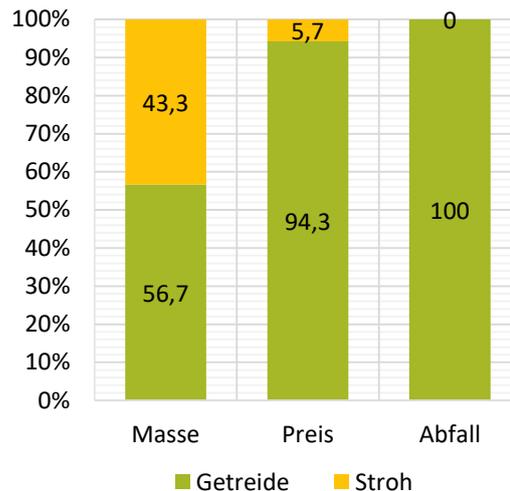


Abbildung 66: Verteilung der Emissionen des Getreideanbaus auf das Stroh und das Getreide anhand unterschiedlicher Allokationsmethoden.

Der größte Anteil an Emissionen des Getreideanbaus, die dem Stroh als Reststoff zugeschlagen werden (43,3 %), erfolgt durch die Allokation nach Masse. Die Preisallokation führt zu einem Anteil der zugerechneten Emissionen von 5,7 % wohingegen die Bewertung als Abfall von einer emissionsbefreiten Bereitstellung des Strohs ausgeht. Mit den drei zugrundeliegenden Allokationsmethoden und der dabei angewendeten Aufteilung der Emissionen zwischen Getreide und Stroh zeigt sich eine große Bandbreite der Gesamtemissionen in den Umweltwirkungskategorien für die untersuchten Prozessketten. Die Emissionen in der Kategorie Klimawandel für die mobile Pelletierung mit den unterschiedlichen Allokationsansätzen sind in **Abbildung 67** dargestellt.

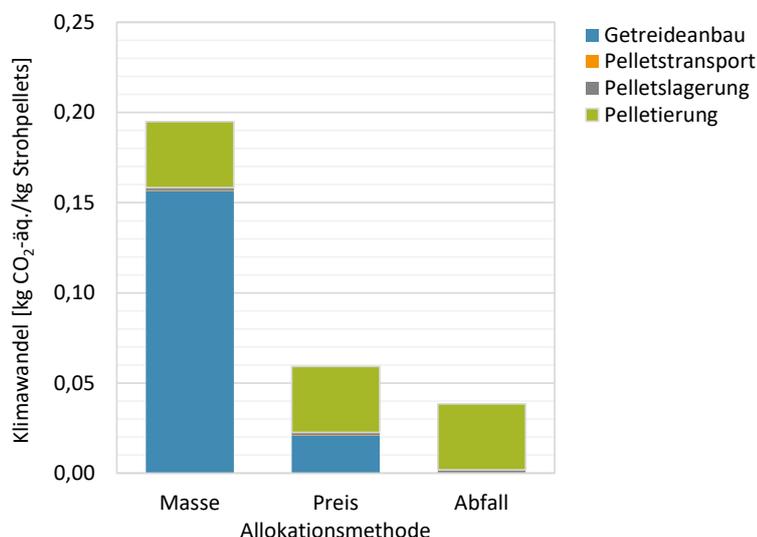


Abbildung 67: Treibhausgasemissionen der Prozesskette zur mobilen Pelletierung mit verschiedenen Allokationsmethoden des Getreideanbaus.

Die Auswahl des Allokationsverfahren hat einen großen Einfluss auf die Gesamtemissionen der Prozessketten der Strohpelletbereitstellung. Die Treibhausgasemissionen der gesamten Prozesskette der Strohpelletbereitstellung sind für die Allokation nach dem Abfallkriterium die einzigen Emissionen. Die anfallenden Emissionen aus dem Getreideanbau werden in diesem Fall nicht betrachtet. Wird nach ökonomischen Gesichtspunkten allokiert, liegen die Emissionen aus der Vorkette in der Kategorie Klimawandel aufgrund der geringen Zuteilung bei ca. 35 % der Emissionen der gesamten Strohpelletbereitstellung. Für die Allokation nach der Masse ist der Getreideanbau der Hauptemittent in der gesamten Prozesskette und dominiert die Gesamtemissionen der Strohpelletbereitstellung von 0,195 kg CO₂ äq./kg Strohpellets mit 80 %. Die Auswahl des Allokationsverfahren hat demnach einen großen Einfluss auf die Gesamtemissionen der Strohpelletbereitstellung.

8.2.4 Sensitivitätsanalyse der Stroh- und Pelletlogistik

Neben der Auswahl des Pelletierverfahrens und der angewendeten Allokationsmethode des Getreideanbaus hat die Wahl der Transportentfernung der Strohballen und der Strohpellets einen Einfluss auf die Emissionen der Prozessketten.

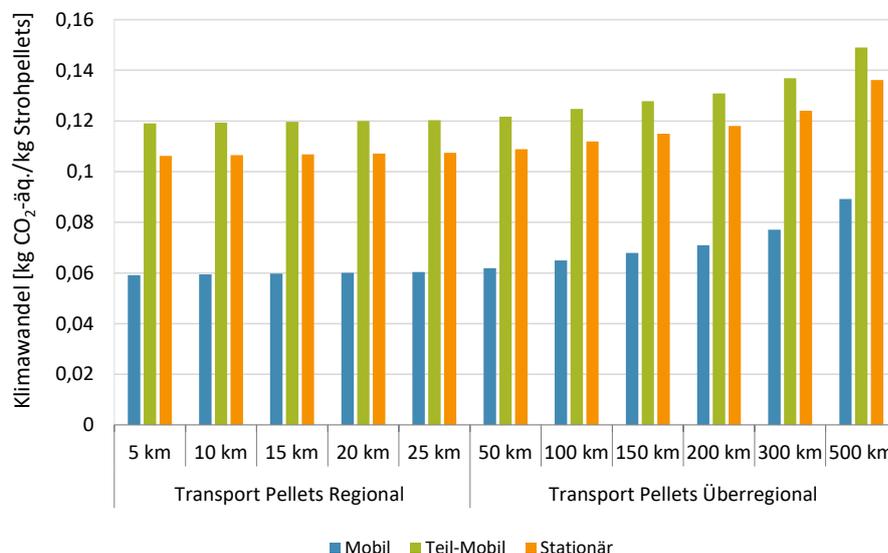


Abbildung 68: Treibhausgasemissionen für verschiedene Bereitstellungsprozessketten der Pellets und Entfernungen des Pellet-Transports.

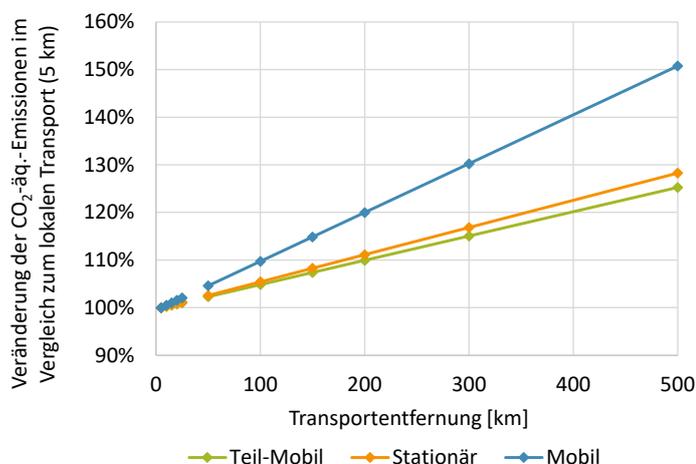


Abbildung 69: Änderung der Treibhausgasemissionen durch Variation der Transportentfernung der Strohpellets.

Bezogen auf die Gesamtemissionen in der Wirkungskategorie Klimawandel mit einer Transportentfernung von 5 km ergibt die Erhöhung der Transportentfernung für die Pellets auf bis zu 500 km einen Anstieg der Emissionen um bis zu 50 % für die Bereitstellungskette der Strohpellets mittels mobiler Pelletierung (siehe Abbildung 68 und Abbildung 69). Eine Ausweitung der Transportentfernung bei den teil-mobilen und stationären Bereitstellungspfaden der Pellets, in denen andere Prozesskettenglieder als die Pelletierung einen höheren Anteil an den Gesamtemissionen einnehmen, führt zu einem maximalen Anstieg von bis zu 25-28 %. Neben den Transportentfernungen für die Strohpellets nach dem Pelletiervorgang haben auch die Transportentfernungen der Strohballen für die teil-mobile oder stationäre Pelletierung einen maßgeblichen Einfluss auf die Emissionswerte der Bereitstellungsketten (siehe Abbildung 70).

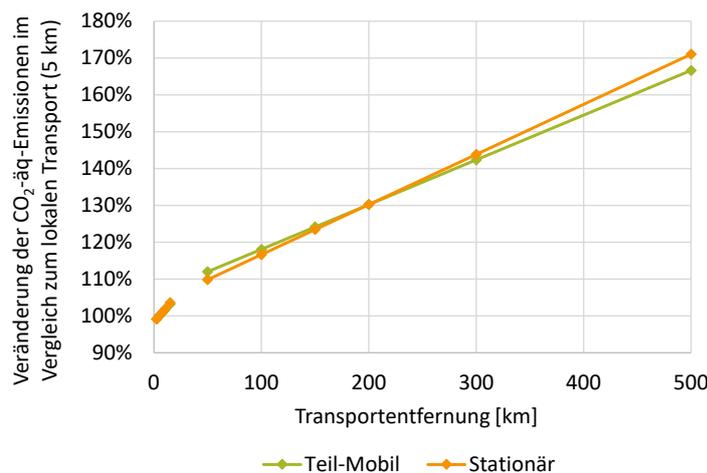


Abbildung 70: Änderung der Treibhausgasemissionen durch Variation der Transportentfernung der Strohballen.

Für die Strohballenlogistik ergab sich aufgrund des höheren Volumens und damit der geringeren Transportwürdigkeit ein anderes Bild. Die Ausweitung der Transportentfernung von 5 km auf 500 km hatte für die Treibhausgasemissionen einen Anstieg um bis zu 71 % zur Folge. Insgesamt hatten die Transportentfernungen der Strohpellets eher einen geringen Einfluss auf die Gesamtemissionen in der Kategorie Klimawandel, wohingegen die Ausweitung der Transportentfernungen für die Strohballen einen höheren Emissionsanstieg zur Folge hatte. Die höhere Transportwürdigkeit der Pellets im Vergleich zu den Strohballen spiegelt sich demnach auch in den zu erwartenden Treibhausgasemissionen wider. Neben der Erhöhung der Treibhausgasemissionen ergaben sich je nach Pelletverfahren für den fossilen Ressourcenverbrauch ebenfalls Erhöhungen der Emissionen zwischen 22-56 %. Demgegenüber zeigten sich für die anderen Umweltwirkungskategorien nur sehr geringe Einflüsse der Transportentfernungen.

Hinsichtlich der Sensitivität der zugrunde gelegten Transportvorgänge und die damit verbundenen Änderungen der Umweltwirkungen der Bereitstellung von Strohpellets kann ein maßgeblicher Einfluss auf die Kategorien Klimawandel und fossiler Ressourcenverbrauch festgestellt werden. Je größer die Transportentfernungen für die Pellets oder Ballen sind, desto höher ist der Anteil der Transportprozesse an den Gesamtemissionen. Zudem fallen die Emissionsanstiege bei den Strohballen stärker aus als bei den Strohpellets. Aufgrund der geringeren Dichte der Ballen im Vergleich zu den Pellets haben diese einen höheren Verbrauch pro transportierter Menge und Strecke als die Pellets. Die Substratbereitstellung sollte deshalb falls möglich lokal erfolgen.

8.3 Wirkungsabschätzung der verschiedenen Biogaserzeugungs-Szenarien.

Die vorliegenden Ergebnisse bieten einen detaillierten Einblick in die Umweltauswirkungen der Strohpellet-Produktion und –Verwendung in verschiedenen Substratkombinationen und liefern somit Informationen zur Entscheidungsfindung im Hinblick auf die nachhaltige Bereitstellung erneuerbarer Energien. Für die Auswertung wurde als Allokationsgrundlage davon ausgegangen, dass das Stroh ohne Emissionen in den Bilanzraum eintritt, um beispielsweise die Berechnung der Treibhausgasemissionen analog zu der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung zu ermöglichen. Des Weiteren wurde für die Transportwege zunächst davon ausgegangen, dass die Strohpellets, die Strohballen und die Gärreste vereinfacht und in Anlehnung an die ökonomischen Betrachtungen mit einer durchschnittlichen Entfernung von 5 km transportiert wurden. Anschließend wurden die Entfernungen in der Sensitivitätsanalyse variiert.

8.3.1 Ergebnisse der Szenarien mit unterschiedlicher Strohpelletbereitstellung

Die Gegenüberstellung der verschiedenen Szenarien zum Strohpelleteinsatz S1-S14 sowie die Emissionscharakteristik der Referenzszenarien mit Substrat-Mixe ohne Strohpellets für die einzelne Wirkungskategorien sind in den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 71 - Abbildung 77) dargestellt. Die angegebenen Fehlerindikatoren für die Ergebnisse der einzelnen Szenarien spiegeln die maximalen und minimalen Werte der durchgeführten Sensitivitätsanalysen wieder und die blauen Balken die jeweiligen Werte aus den Referenzszenarien ohne Strohpellets als Substrat (vgl. Abbildung 62 und Tabelle 24).

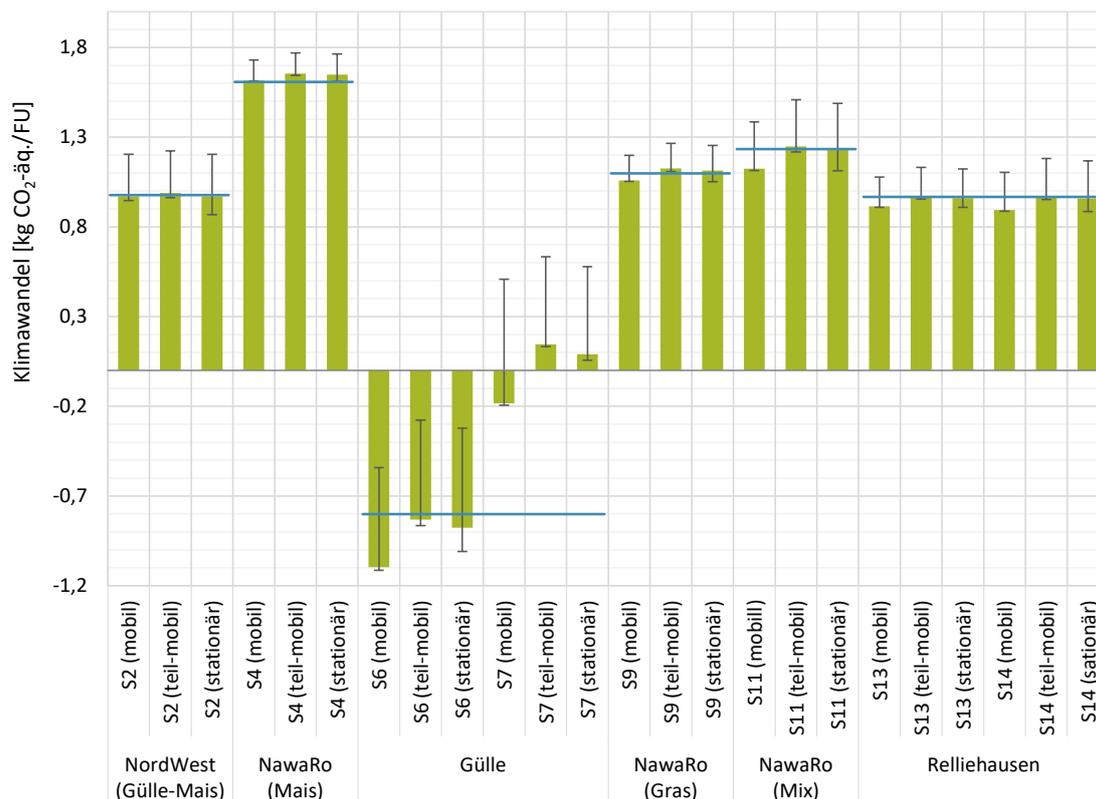


Abbildung 71: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Klimawandel.

Die Treibhausgasemissionen der unterschiedlichen Substratkombinationen und verschiedenen Herstellungsverfahren der Strohpellets weisen mit Werten zwischen -1,1 und 1,65 kg CO₂-äq./FU eine hohe Bandbreite auf (Abbildung 71). Die höchsten Emissionseinsparungen können in den Szenarien S6-S7 durch den Einsatz von großen Mengen an Wirtschaftsdüngern (siehe Abbildung 62) erreicht werden, wodurch Methanemissionen eingespart und das Treibhausgaspotenzial reduziert werden können (Petersen 2016; Dalby et al. 2023). Die Bandbreite der potenziellen Emissionen aus der Variation der Transportentfernungen und Prozessparameter der einzelnen Strohpelletpfade ist bei hohen Strohpelletanteilen im Substratmix (S6 und S7) am höchsten und führt in Szenario S6 durch eine Substitution von Maissilage (siehe Abbildung 62) zu einer weiteren Minimierung der Treibhausgasemissionen (-1,1 bis -0,83 kg CO₂-äq./FU) im Vergleich zum Szenario S5 ohne Strohpellets (-0,8 kg CO₂-äq./FU). Eine weitere Erhöhung des Strohpelletanteils im Szenario S7 hat eine Erhöhung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Szenario S6 zur Folge, da der Anteil an Wirtschaftsdünger und damit die Gutschriften aus der Wirtschaftsdüngervergärung entsprechend reduziert werden. Nichtsdestotrotz haben die Szenarien mit hohem Wirtschaftsdüngeranteil (S5-S7, S11-S14) die höchsten Emissionsminderungspotenziale. Demgegenüber treten die höchsten Treibhausgasemissionen bei den Szenarien mit hohem Anteil an nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) im Substratmix (S3-S4, S10-S11) auf. Die Substitution von Maissilage durch Strohpellets kann allerdings auch in diesen Szenarien eine Reduktion der Treibhausgasemissionen ermöglichen, falls die Pelletierung mobil oder stationär mit einer Eigenstromnutzung erfolgt, das Stroh und die Strohpellets regional bereitgestellt und der Trockensubstanzgehalt des Gärrestes durch den Einsatz der Strohpellets entsprechend erhöht werden können. Die Strohpelletierung mithilfe teil-mobiler Anlage konnte aufgrund der geringen Durchsätze und den hohen Energieverbräuchen sowie der benötigten Prozesskette zur Strohballenherstellung zu keiner Emissionsreduktion beitragen. Insgesamt sind demnach die Aufwendungen und damit die Treibhausgasemissionen der Prozessketten mit teil-mobiler Pelletierung in den meisten Szenarien höher als die Einsparungen durch den Einsatz der Strohpellets. Für die Prozessketten mit mobiler und stationärer Pelletierung kann bei angepasster Prozesskette hingegen eine Emissionsreduktion im Vergleich zum Ausgangsszenario erreicht werden. Sind die Transportentfernungen oder der Einsatz fossiler Energieträger zu groß, liegen die Treibhausgasemissionen mit Strohpellets über denen der konventionellen Substrat-Mixe. Diese Zusammenhänge werden bei der Betrachtung des fossilen Ressourcenverbrauchs ebenfalls ersichtlich (vgl. Abbildung 72). Durch die hohen energetischen Aufwendungen für die Pelletierung und die damit verbundenen Verbräuche von Dieselkraftstoff liegen die Ressourcenverbräuche der Szenarien mit teil-mobiler Pelletierung über den jeweiligen Referenzszenarien. Eine Bereitstellung der benötigten Energie aus erneuerbarer Quelle, wie die Nutzung des an der Biogasanlage erzeugten Stroms oder eines generischen

grünen Strom-Mixes, wie in den Szenarien mit stationärer Pelletierung ersichtlich, führt zu einer Reduktion des fossilen Ressourcenverbrauchs. Dadurch kann sowohl die Strohpelletbereitstellung mit mobile_ Pelletierung als auch mit stationärer Pelletierung geringere Ressourcenverbräuche aufweisen als die Referenzszenarien. Zudem zeigen die hohen Bandbreiten der potenziellen Ressourcenverbräuche den hohen Einfluss der Transportentfernungen (für die Strohballen, die Strohpellets und den Gärrest) und der damit assoziierten Dieselverbräuche in den jeweiligen Szenarien.

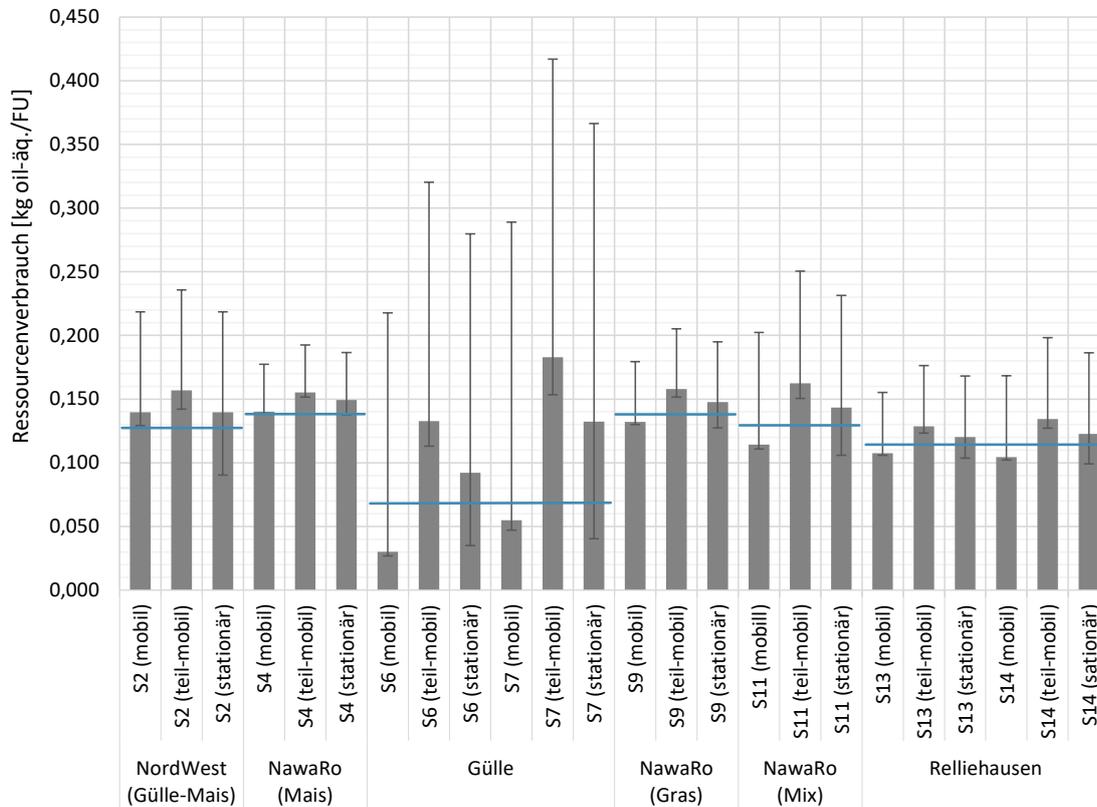


Abbildung 72: Fossiler Ressourcenverbrauch der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade

Die Verteilung der Gesamtemissionen in den Umweltwirkungskategorien Partikelemissionen (Abbildung 73) und Versauerungspotenzial (Abbildung 74) zeigt für die einzelnen Szenarien eine ähnliche Entwicklung. Durch den Einsatz von Strohpellets können in fast allen Szenarien bis auf S4 und S7 Emissionseinsparungen im Vergleich zu den Ausgangsszenarien erreicht werden. Die Gutschriften für die Gülleverwertung in den Szenarien S1-S2 sowie S5-S9 haben eine deutliche Einflussnahme auf die Gesamtemissionen. Insgesamt können in diesen Szenarien sowohl Partikelemissionen als auch Versauerungspotenziale reduziert werden. Ähnlich wie bei der Kategorie Klimawandel sinken die Emissionen in diesen Szenarien durch die Substitution von Mais (S2, S6, S9) sowie die damit einhergehende verminderten Gärrestlogistik. Allerdings hat eine alleinige Substitution von Mais mit einem relativ geringen Anstieg des TS-Gehaltes der Gärreste (vgl. Abbildung 62) für alle Bereitstellungspfade der Strohpellets in Szenario S4 eine Erhöhung der Emissionen zur Folge. Insgesamt sind die Reduktionspotenziale durch den Strohpelleteinsatz in diesen beiden Wirkungskategorien begrenzt, da die maßgeblichen Prozesse die Zuckerrübenbereitstellung und der Einsatz von Wirtschaftsdüngern sind.

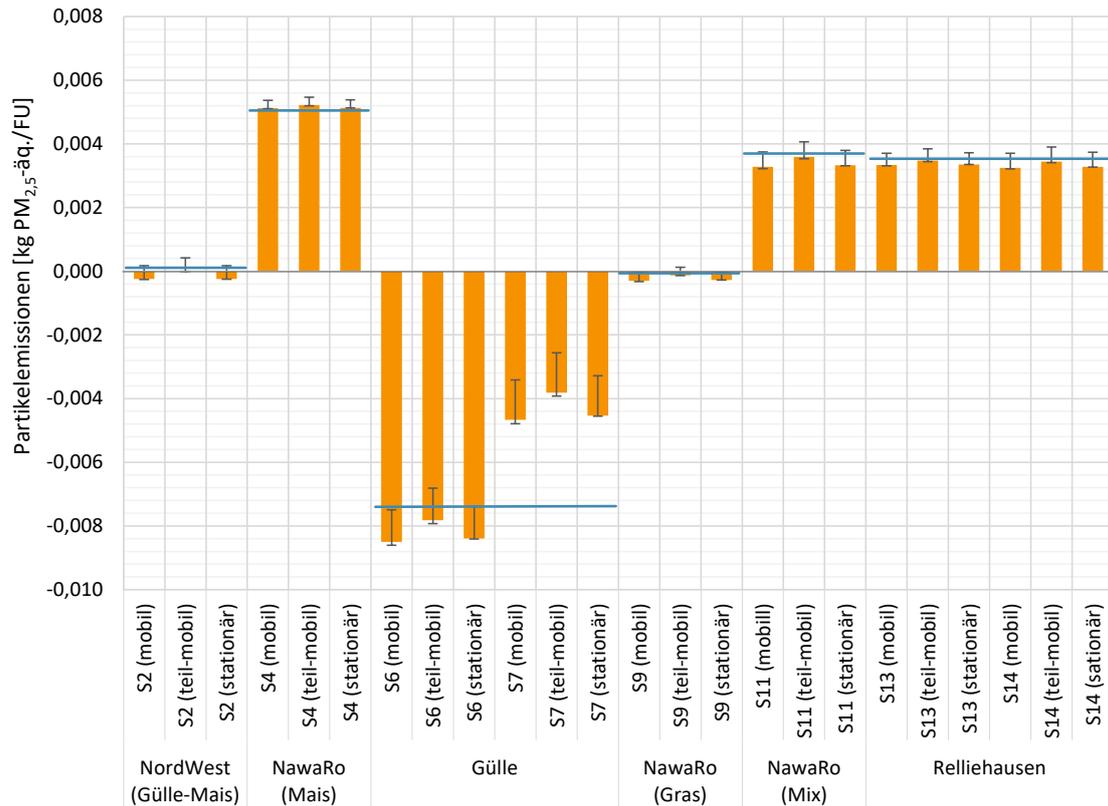


Abbildung 73: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Partikelemissionen.

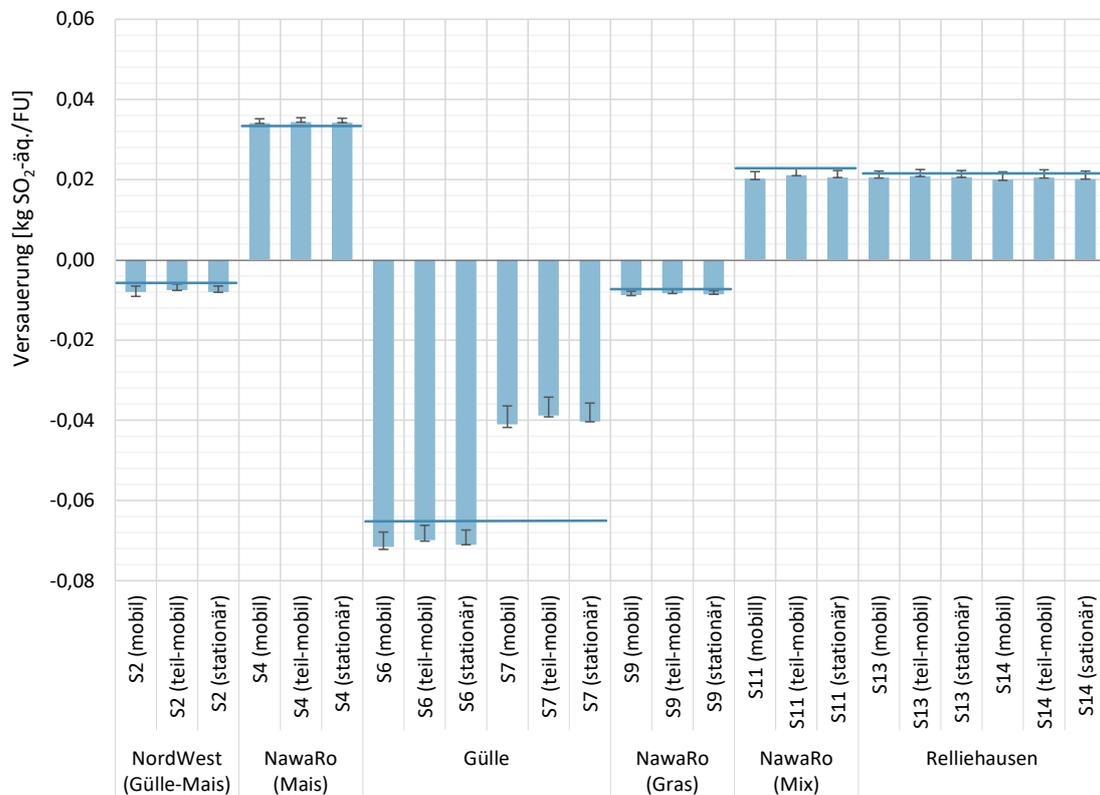


Abbildung 74: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Versauerungspotenzial.

In Bezug auf die Verteilung der Gesamtemissionen in den Umweltwirkungskategorien Ökotoxizität (Abbildung 75), Eutrophierung (Abbildung 76) und Humantoxizität (Abbildung 77) weisen alle Szenarien des Strohpelleteinsatzes eine Emissionsminderungspotenzial im Vergleich zu den Ausgangsszenarien auf. Im Allgemeinen sind die Emissionen in diesen drei Kategorien für die wirtschaftsdüngerdominierten Substrat-Mixe (Szenario S6 und S7) am geringsten, wohingegen die Emissionen in den NawaRo Szenarien, vor allem im Szenario S4 am höchsten sind. Die Emissionsreduktionen für die frischwasserbezogene Ökotoxizität sind hauptsächlich auf die Substitution von Maissilage zurückzuführen (siehe Abbildung 75). Demnach kann mit weiten Transportentfernungen des Stroh, der Strohpellets und der Gärreste, repräsentiert durch die oberen Enden der Bandbreiten der Sensitivitätsanalyse, ebenfalls in allen Szenarien eine Emissionsreduktion beobachtet werden. Für das Eutrophierungspotenzial kann es allerdings aufgrund der Bereitstellungskette der Strohpellets zu einem starken Anstieg kommen (Abbildung 76), sodass dort die Emissionen über denen der Basisszenarien liegen können. Ausgehend von den selben Rahmenbedingungen der Transportentfernungen in den Szenarien mit und ohne Strohpellets sind allerdings ebenfalls Emissionseinsparungen möglich. Die Emissionspotenziale in der Wirkungskategorie Humantoxizität liegen für die Szenarien mit Strohpellets als Substrat ebenfalls für fast alle Bereitstellungsprozessketten unter denen der Basisszenarien (Abbildung 77). Einzig die stationäre Pelletierung im Szenario S4 hat höhere Emissionen zur Folge. Insgesamt können in diesen drei Umweltwirkungskategorien die Anpassung der Strohpelletbereitstellung durch einen grünen Strom-Mix oder die Minderung der Energieverbräuche für die Pelletierung nur sehr geringe Emissionseinsparungen, repräsentiert durch die unteren Enden der Bandbreiten, hervorrufen.

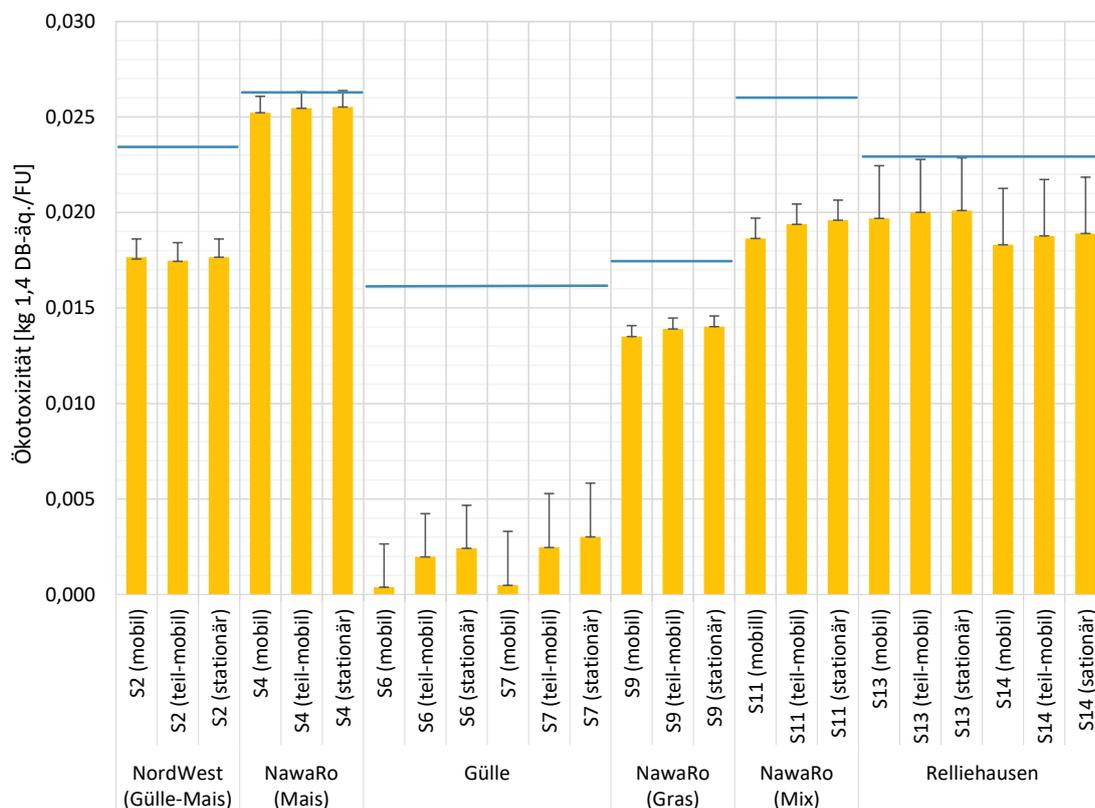


Abbildung 75: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie frischwasserbezogene Ökotoxizität.

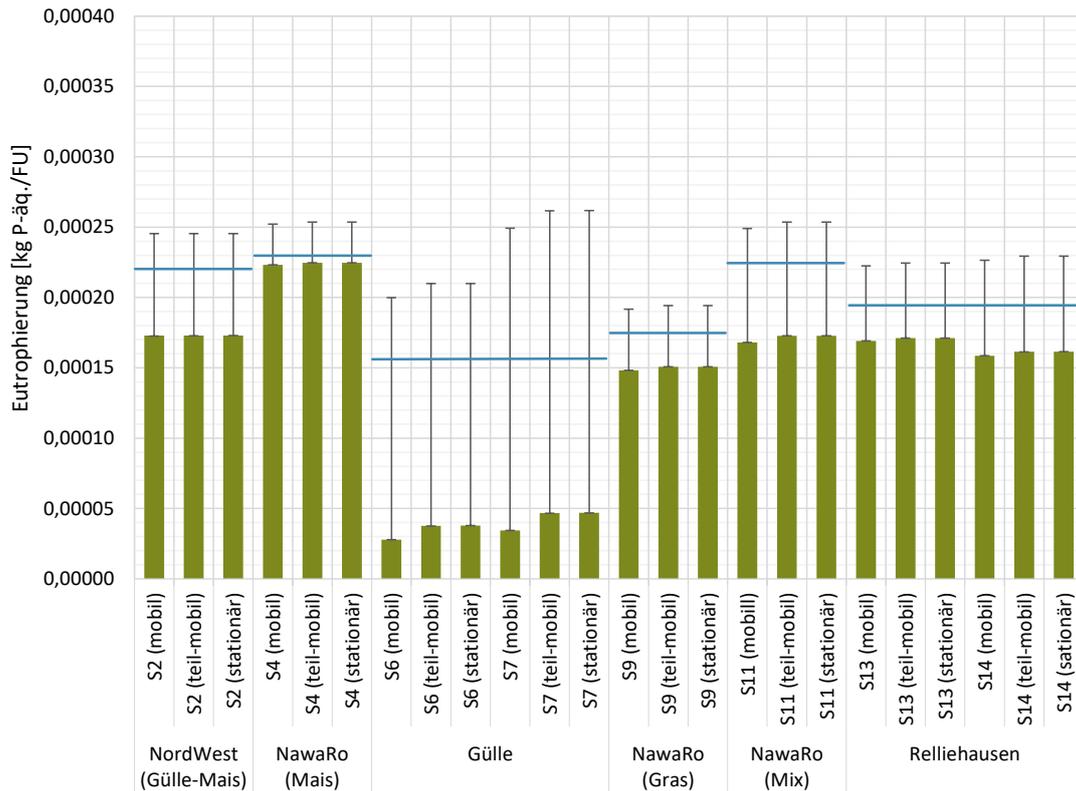


Abbildung 76: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie frischwasserbezogene Eutrophierung.

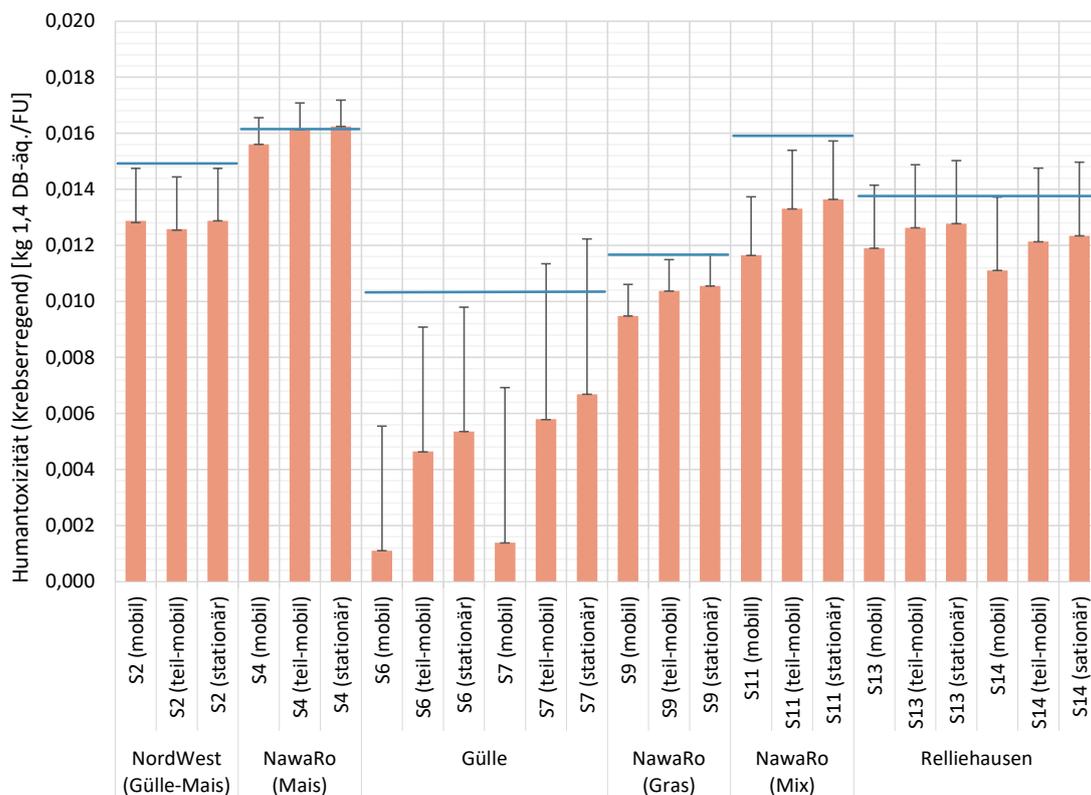


Abbildung 77: Emissionen der Substratszenarien und Pelletbereitstellungspfade für die Kategorie Humantoxizität

3.2.2 Sensitivitätsanalyse der Gärrestlogistik

Der Einfluss der Transportentfernungen für die Verbringung der Gärreste auf die Treibhausgasemissionen und den Ressourcenverbrauch in den Szenarien S4 mit einer 100 %-NawaRo-Substratbasis und in den Szenarien S13-S14 mit dem Substratmix der Beispielanlage in Relliehausen mit Strohpellets ist in Abbildung 78 dargestellt. Es zeigt sich, dass durch den Einsatz von Strohpellets die Treibhausgasemissionen und der Ressourcenverbrauch mit Zunahme der Transportentfernung des Gärrestes unterschiedlich stark reduziert werden. Im Szenario S4 betragen die Einsparungen bei einer maximalen Transportentfernung von 500 km lediglich 0,45 % der Gesamtreibhausgasemissionen des Szenarios, wohingegen die Einsparungen im Szenario S14 3,2 % betragen. In der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch sind die Einsparungen noch höher. Sie liegen für das Szenario S4 im Vergleich zum Basisszenario S3 bei einer Transportentfernung von 500 km bei 1,5 % und beim Szenario S14 im Vergleich zum Szenario S12 sogar bei 9 %. In den anderen Wirkungskategorien ist der Einfluss auf die Emissionen aus der Gärrestverbringung durch den Einsatz von Strohpellets allerdings vernachlässigbar.

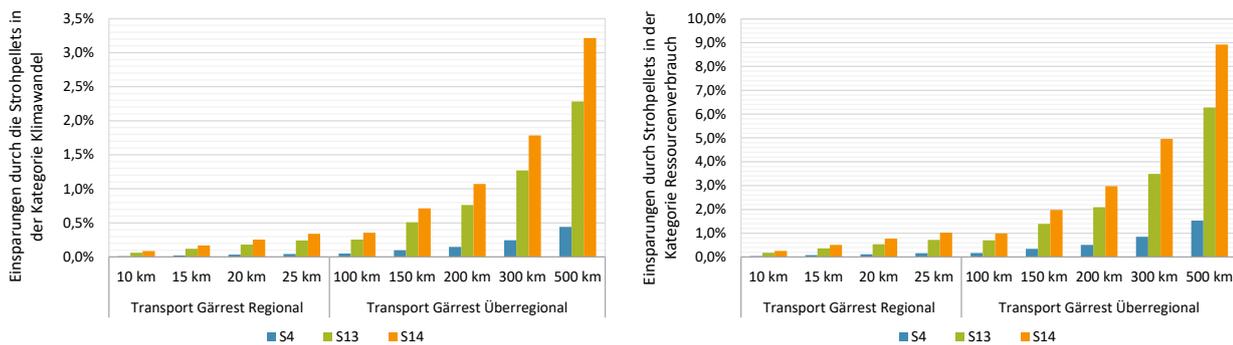


Abbildung 78: Einsparungen an Treibhausgasemissionen und fossilen Ressourcenverbrauch durch eine veränderte Gärrestlogistik der Szenarien S4 sowie S13-S14 im Vergleich zu den Basisszenarien

Insgesamt hat eine Ausweitung der Transportentfernungen für die Gärrestverbringung mit Strohpellets nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtemissionen an Treibhausgasen und den Ressourcenverbrauch, wenn die Transporte regional erfolgen.

8.3.2 Anteil der Strohpelletbereitstellung an den Gesamtemissionen der einzelnen Szenarien und Umweltwirkungskategorien

Die Ergebnisse der Bilanzierung für die einzelnen Szenarien zur Biogasbereitstellung werden maßgeblich von der Bereitstellung der Substrate beeinflusst. Da im Projekt der Einfluss der Strohpellets auf die Emissionswirkungen der gesamten Prozesskette der Biogaserzeugung untersucht wurde, sind die Auswirkungen der Prozessketten zur Bereitstellung der Strohpellets auf die Emissionen in den einzelnen Wirkungskategorien (vgl. Abbildung 71- Abbildung 77) in Abbildung 79 dargestellt.

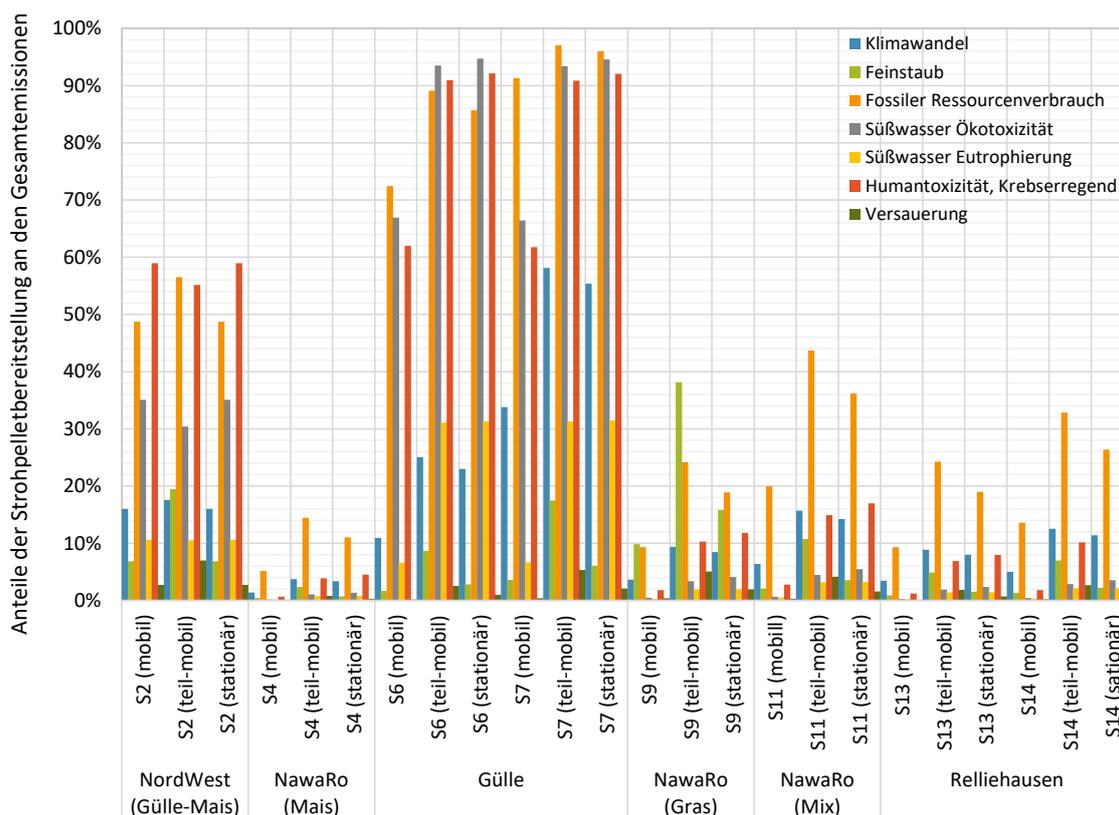


Abbildung 79: Anteil der Strohpelletbereitstellung an den Emissionen der einzelnen Szenarien

Die Anteile der Strohpelletbereitstellung an den Emissionen in den Wirkungskategorie Klimawandel haben mit 1,4 % (Szenario S4) bis zu 58 % (Szenario S7) eine hohe Bandbreite. Für Szenarien mit relativ hohen Emissionen sind die Anteile der Strohpelletbereitstellung eher gering. Bei Szenarien mit sehr geringen beziehungsweise negativen Emissionen hat die Strohpelletbereitstellung allerdings einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtemissionen. Aufgrund der hohen Energieintensität des Pelletiervorgangs, der fossil basierten Energiebereitstellung und des vergleichsweise hohen Logistikaufwands bei der teil-mobilen und stationären Pelletierung liegen die Anteile am fossilen Ressourcenverbrauch in allen Wirkungskategorien mit Werten zwischen 5,2 % (S4) und 97 % (S7) tendenziell am höchsten. Hierbei sind die Vorteile des Wirtschaftsdüngereinsatzes klar ersichtlich, da geringe Gesamtemissionen in den Wirtschaftsdüngerdominierten Szenarien zu einem hohen Anteil der Strohpelletbereitstellung an den Gesamtemissionen führen.

Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass die Emissionen der Substratbereitstellung von Strohpellets den Anteil am Substratmix widerspiegelt und auf einem ähnlichen Niveau liegt wie die Emissionen der Bereitstellung anderer NawaRo, obwohl für einige Substrat-Mixe durch die Substitution von Maissilage ein Emissionsminderungspotenzial, speziell für das Eutrophierungspotenzial, die Öko- und Humantoxizitätspotenziale und in Teilen für die Partikelemissionspotenziale und die Treibhausgaspotenziale attestiert werden kann.

8.4 Zusammenfassung der ökobilanziellen Bewertung

Die ökobilanzielle Bewertung der Strohpelletbereitstellung sowie der gesamten Prozesskette mit unterschiedlichen Nutzungsszenarien und Substrat-Mixen zeigt ein sehr differenziertes Bild des Strohpelleteinsatzes zur Biogaserzeugung auf. Die Auswertung der Szenarien mit unterschiedlichen Substrat-Mixen ergibt, dass diese einen maßgeblichen Einfluss auf die zu erwartenden Emissionen haben. Insbesondere der Einsatz von Wirtschaftsdünger bietet einen großen Hebel zur Minderung der Treibhausgasemissionen und des fossilen Ressourcenverbrauchs. Für die Strohpellets können bei einer angepassten Prozesskette und dem entsprechenden Substrat-Mix ebenfalls Reduktionen in den Treibhausgasemissionen und dem fossilen Ressourcenverbrauch erreicht werden. In den Umweltwirkungskategorien Eutrophierung, Humantoxizität und Ökotoxizität kann durch den Einsatz von Strohpellets in allen Szenarien eine Emissionsminderung beobachtet werden, wohingegen die Partikelemissionen und das Versauerungspotenzial in einigen Szenarien ansteigen. Insgesamt können Strohpellets als Biogassubstrat bei einer angepassten Prozesskette der Strohpelletbereitstellung und einem

auf Wirtschaftsdünger basierenden Substrat-Mix eine sinnvolle Alternative zu klassischen NawaRo einnehmen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Strohpelletbereitstellung zeigen, dass die entscheidenden Parameter bei der Pelletbereitstellung die Wahl der Allokationsmethode für die Strohbereitstellung, die verwendete Pelletiertechnik sowie die Transportentfernungen der Strohballen und Pellets sind. Im Hinblick auf eine Anpassung der Allokationsmethode führt die Zuteilung der Emissionen von Stroh und Getreide nach Masse oder Preis der einzelnen Produkte in allen Umweltwirkungskategorien zu einer Erhöhung der Gesamtemissionen der Bereitstellungsketten. Dadurch wäre der Einsatz von Strohpellets als Biogassubstrat aufgrund der aufwendigen Prozesskette emissionsintensiver und die Emissionen der Szenarien mit Strohpellets würden über denen der Referenzszenarien ohne Strohpellets liegen. Allgemein zeigt sich die mobile Pelletierung aufgrund der relativ hohen Durchsätze und der damit einhergehenden geringen Energieverbräuche als vorteilhaft gegenüber einer stationären Pelletierung, da die mobile Pelletierung mit größeren Pelletdurchmessern arbeitet. Der Vorteil der stationären Pelletierung besteht darin, dass die Energieversorgung mittels elektrischer Energie erfolgen kann, was sich bei Wahl eines „grünen“ Strom-Mixes oder des Stroms aus der Biogasanlage emissionsmindernd auswirkt. Der Mehraufwand einer Strohballenprozesskette, die für eine stationäre Pelletierung benötigt wird, kann dadurch kompensiert werden, sodass die Gesamtemissionen an Treibhausgasen für die Prozesskette der stationären Pelletierung unter denen der mobilen Pelletierung liegen. Sind die Transportentfernungen oder der Einsatz fossiler Energieträger allerdings zu groß, liegen die Treibhausgasemissionen der Szenarien mit Strohpellets über denen der konventionellen Substrat-Mixe. Zudem zeigt sich, dass ein Strohpellet-Transport über 200 km für die gegebenen Randbedingungen in der Kategorie Klimawandel in etwa den selben Emissionsanstieg wie ein Strohballen-Transport über 50 km hervorruft. In Bezug auf die Treibhausgasemissionen ist deshalb eine stationäre Pelletierung eher mit einer lokalen Strohballenversorgung und die mobile Pelletierung für einen weiten Strohpellet-Transport geeignet.

III. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

- Entfällt

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

- Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt ist der Einsatz von Strohpellets mit begrenztem Mengenanteil aus technischer Sicht in Biogasanlagen mit Standard-Einbringtechnik möglich. Insbesondere die starke Begrenzung des Maisanteils durch den Maisdeckel - der für Bestandanlagen insbesondere ab 2026 zum Tragen kommen wird - sowie die Verknappung an verfügbaren Mengen an Mist und Gülle aufgrund sinkender Tierbestände in Deutschland erhöhen die Notwendigkeit landwirtschaftliche Reststoffe wie Stroh(-pellets) zu nutzen.
- Die Nutzung von Getreidestrohpellets wird, wie aus den Ergebnissen zur Akzeptanz hervorgeht, vor allem von der Wirtschaftlichkeit des Strohpelleteinsatzes abhängen. Die ökonomischen Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Strohpellets aktuell unter bestimmten Voraussetzungen für Biogasanlagen wirtschaftlich interessant. Hierbei spielen insbesondere die Knappheit der Substratversorgung und das Gärrestlagervolumen eine Rolle.
- In Hinblick auf die Vermarktung von Biomethan und LNG ermöglichen die aktuell zu erzielenden Erlöse für Biomethan aus Reststoffen wie Stroh auch höhere Pelletpreise, wie z.B. Aus der teil-mobilen Pelletierung.
- Offen ist die Frage in Hinblick auf die Nachhaltigkeitszertifizierung von Biogasanlagen, ob die Emissionen der Stroh-Pelletierung tatsächlich voll berücksichtigt werden müssen. IdR wird dies als Konversionsschritt des Substrates angesehen, der entsprechend zu bilanzieren ist. Bei Strohballen, werden das Pressen und den Transport der Strohballen nicht berücksichtigt, da die Emissionen bei Abfall- und Reststoffen bis zum ersten Sammelpunkt mit 0 angesetzt werden. Hier gilt es zu klären, warum nicht auch bei mobiler Pelletierung auf dem Feld ein Wert von 0 anzusetzen ist.
- Zertifizierungsunternehmen, die die Nachhaltigkeitszertifizierung von Biogasanlagen gemäß RED-2 durchführen können, sind in die Diskussion einzubeziehen, um Klarheit bezüglich der Anrechnung der Emissionsminderung bei Strohpellets zu bekommen (siehe auch 3.2). Dieser Aspekt könnte in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Pelleteinsatzes sowie die Verbreitung insgesamt eine wichtige Rolle spielen.
- Aktualisiert werden folgend die Erfolgsaussichten analog zu den Angaben im Projektantrag dargestellt:

Verwertungs-kategorie	Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten der Verwertung	1. für Landwirte: Schaffung von Vermarktungsmöglichkeiten für Stroh	Kommunikation der Ergebnisse über Handreichung, Vorträge und Publikationen	kurz- bis mittelfristig
	2. für Hersteller von Pelletieranlagen: Erweiterung des Marktes		kurz- bis mittelfristig
	3. für Biogasanlagenbetreiber: Option zum nachhaltigeren und ökonomischeren Wirtschaften		kurz- bis mittelfristig
	4. Bezug von nachhaltigen Treibstoff		

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

- Auf Basis der erzielten zur Akzeptanz ist davon auszugehen, dass das Interesse an der Strohpelletvergärung in der Praxis zunehmen wird, da der Wissensstand durch die Veröffentlichung der Ergebnisse bei Biogasanlagenbetreibern, Beratern, aber auch Pelletierern und Pelletvermarktern steigt und die Zahlungsbereitschaft vermutlich steigern wird. Darüber hinaus war bereits zu Projektende festzustellen, dass mit dem Webinar sowie einzelner Berichte in Praxiszeitschriften hierzu, konkrete Anfragen von innovativen Anlagenbetreibern an uns herangetragen wurden.

- Aktualisiert werden folgend die Erfolgsaussichten analog zu den Angaben im Projektantrag dargestellt:

Verwertungskategorie	Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten der Verwertung	1. Schaffung von Know-how zur Weiterentwicklung der Forschungskompetenzen	Kommunikation der Ergebnisse über Handreichung, Vorträge und Publikationen	kurz- und mittelfristig
	2. Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit	Verstetigung der Forschung in diesem Gebiet	kurz- und mittelfristig
	3. Erweiterung der Vernetzung in Wissenschaft	Netzwerkbildung	kurz- und mittelfristig
	4. Richtige Anpassung von Anlagentechnik und Prozessführung an den Einsatz von Strohpellets	Publikation der Projektergebnisse aus dem Betrieb der Versuchsanlagen und der großtechnischen Anlage	kurz- und mittelfristig

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Eine aussichtsreiche Möglichkeit, die in Folgeprojekt näher betrachtet werden sollte, ist die Kaskadennutzung, bei der Strohpellets zunächst in der Nutztierhaltung und anschließend in der Biogasanlage eingesetzt werden. Für die Tierhaltung ist zu erwarten, dass im Vergleich zu Stroh weniger Staub entsteht und insgesamt ein geringer Strohverbrauch erwartet wird. Auch nach der Nutzung als Einstreu ist davon auszugehen, dass z.T. ein Teil der Struktur des pelletierten Strohs weiterhin vorteilhaft bleibt.
- Um diese Einschätzung abzusichern sind folgende Aspekte zu näher zu untersuchen:
 - Eignung von Strohpellets als Einstreu bei Milchkühen, Hähnchen- und Putenmast, Schweinehaltung aus Sicht des Tierwohls und Tiergesundheit.
 - Akzeptanz von Nutztierhaltern für die Nutzung von Strohpellets
 - Untersuchung der Struktur von Strohpellets nach der Nutzung in der Tierhaltung bei verschiedenen Tierarten und Tierhaltungsverfahren
 - Untersuchung der Vergärungseigenschaften von Mist aus Strohpellets im Vergleich zu Mist aus Langstroh/Häckselstroh
- Sollten die Vorteile in den Vergärungseigenschaften von Strohpellets nach der Nutzung als Einstreu in der Tierhaltung annähernd erhalten bleiben, so ist zu vermuten, dass die Kaskadennutzung auch aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhaft ist. Bei der Emissionsbewertung nach RED-2 können diese Stroh- bzw. „aufgelösten Mistpellets“ bei der Emissionsbewertung mit dem vorteilhafteren Standardwert für Mist bewertet werden und entsprechend höhere Erlöse bei der Vermarktung erzielen.
- Die technische Entwicklung von mobilen und teil-mobilen Pelletiermaschinen ist weiter zu beobachten und zu validieren. Insbesondere die Beziehung zwischen Festigkeit der Pellets-Biogasertrag-Durchsatz der Pelletiertechnik sind näher zu untersuchen.
- Aktualisiert wird folgend die Anschlussfähigkeit analog zu den Angaben im Projektantrag dargestellt:

Verwertungskategorie	Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit im Hinblick auf eine Verwertung	1. Folgeprojekt zur Optimierung der Strohpelletnutzung	Beantragung von Drittmitteln für Folgeprojekte	kurzfristig
	2. Folgeprojekt zu weiteren, pelletierbaren Biomassen (Rapsstroh, Maisstroh, Spelzen, Landschaftspflegematerial, etc.)	Beantragung von Drittmitteln für Folgeprojekte	kurzfristig

IV Erkenntnisse von Dritten

Bisherige Studien haben sich vor allem mit dem Einsatz von Getreidestrohpellets in Biogasanlagen beschäftigt, die mit NaOH, Melasse oder Pflanzenölen aufbereitet bzw. in Kombination mit Geflügelmist verarbeitet wurden (Dubrovskis et al. 2018; Schwarz 2016; Schwarz et al. 2019). Darüber hinaus konnte bei einer Untersuchung verschiedener Einstreuverfahren bei Pferden festgestellt werden, dass Pelleteinstreu im Vergleich zu anderen Einstreumaterialien (loses Stroh, Flachs, Einstreu aus Holz) aufweisen konnte (Mönch-Tegeder et al. 2013). In einer weiteren Studie wird die mechanische Vorbehandlung von Weizenstroh für den Einsatz als Biogassubstrat untersucht. Dabei werden die Verfahren Mahlen, Extrusion und Pelletierung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Abbaugeschwindigkeit und das Biogasbildungspotenzial verglichen (Victorin et al. 2020). Die mechanischen und energetischen Eigenschaften von Pellets aus Weizen-, Raps- und Maisstroh wurden 2014 in einer Studie untersucht (Niedziolka et al. 2014).

In einem Praktikerbericht aus dem Mai 2023 in der landwirtschaftlichen Fachzeitschrift wird aufgezeigt, dass bei der Krone Premos ein deutlich höherer Durchsatz erreicht werden kann, wenn das Pellets weniger fest gepresst werden (Holzhammer, 2023). Das Pelletieren wird dadurch nicht nur schlagkräftiger, sondern auch kostengünstiger. Es wird berichtet, dass das mobile Pelletieren 20 von 24 Stunden am Tag in den meisten Fällen möglich ist. Diese Erfahrung konnten im Rahmen der im StroPelGas durchgeführten Pelletierversuchen nicht gemacht werden. Ggf. besteht hier ein Zusammenhang zur Festigkeit der Pellets der näher untersucht werden sollte. Darüber hinaus wird im Praxisbericht beim teil-mobilen Pelletieren aus Strohballen mit der Premos mit einem Elektromotor statt Schlepper gearbeitet, die wiederum mit Eigenstrom betrieben wird. Diese Möglichkeit haben wir in der Interpretation der Ergebnisse ebenfalls berücksichtigt, jedoch nicht als allgemeingültig angesehen. Inwieweit die Festigkeit der Strohpellets einen Einfluss auf die Gasausbeute hat sollte ebenfalls näher untersucht werden. Das Temperatur und Druck, wie im Praxisartikel berichtet, grundsätzlich zu einem höheren Gasertrag führen, konnte bestätigt werden.

V Veröffentlichungen

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Loewe, K.; Walz, M.; Gievers, F.; Mohrmann, S.; Augustin, D. (in review): Charakterisierung und Einsatz von Strohpellets als Substrat in Biogasanlagen. (Landtechnik).

Mohrmann, S.; Otter, V. (2022). Categorisation of Biogas Plant Operators in Germany with Regards to Their Intention to Use Straw Pellets as Innovative and Sustainable Substrate Alternative. *Energies*, 16(1).

Beiträge in Sammelbänden

Mohrmann, S.; Schaper, C.; Otter, V. (2023): Strohpellets als innovatives Alternativsubstrat in der (niedersächsischen) Biogasproduktion: Ergebnisse einer empirischen Analyse. *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.*, Bd. 58, (In Druck).

Mohrmann, S.; Otter, V. (2021): Substratalternativen für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung vor dem Hintergrund der Novellierung der Düngeverordnung und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021. In: *KTBL (Hg.): Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Online-Kongress am 29. und 30. September 2021. Darmstadt (KTBL-Schrift 524), S. 262–266.*

Posterbeiträge

Mohrmann, S.; Otter, V. (2022): Strohpellets als Alternativsubstrat für Biogasanlagen – erste Erkenntnisse zur Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit. Posterbeitrag auf der Regionalkonferenz 2022 des Digitalen Experimentierfeldes FarmerSpace. 24. Mai. 2022, Göttingen.

Mohrmann, S.; Otter, V. (2022): Straw pellets as sustainable biogas substrate - willingness to pay of biogas plant operators in Germany. Posterbeitrag auf der SGA-Tagung 2022 „Evidenzbasierte Agrar- und Ernährungspolitik - Rolle der Forschung für die Politikgestaltung“. 28.–29. April 2022, Frick.

Mohrmann, S.; Otter, V. (2021): Substratalternativen für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung vor dem Hintergrund der Novellierung der Düngeverordnung und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021. In: *KTBL (Hg.): Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Online-Kongress am 29. und 30. September 2021. Darmstadt (KTBL-Schrift 524), S. 262–266.*

Praxisbeiträge & Vorträge

Mohrmann, S. (2023): Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Strohpellets in der Biogaserzeugung. Online-Veranstaltung „Strohpellets - eine Substratalternative für die Biogasproduktion. Präsentation der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt StroPelGas, 01.03.2023, Göttingen (digital).

Loewe, K. (2023): Untersuchung des Abbauverhaltens von Strohpellets in praxisrelevanten Substratmischungen. Präsentation der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt StroPelGas, 01.03.2023, Göttingen (digital).

Augustin, D. (2023): Einsatz von Strohpellets in der Biogasanlage – Erfahrungen aus der Praxis. Präsentation der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt StroPelGas, 01.03.2023, Göttingen (digital).

Walz, M. (2023): Charakterisierung und Einordnung von Strohpellets als Biogassubstrat. Präsentation der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt StroPelGas, 01.03.2023, Göttingen (digital).

Mohrmann, S.; Augustin, D. (2023): Strohpellets für die Biogasanlage? DLG-Mitteilungen 3/2023, S. 76-79.

Mohrmann, S. (2022) Biogaserzeugung im Wandel – Chancen und Risiken für Anlagenbetreiber und Substratlieferanten. Bezirksversammlung der Vereinigte Hagel 2022, Bezirksdirektion Münster, 24.11.2022, Nottuln.

Mohrmann, S.; Augustin, D.; Loewe, K. (2022): Strohpellets als Substrat für die Biogaserzeugung – eine echte Alternative zu Silomais? Erste Erkenntnisse zur Vergärung, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit. Vortrag auf dem 3Ländertag zu Biomasse und Bioenergie 2022. 05. Juli 2022, Göttingen.

Mohrmann, S.; Otter, V. (2022): The Acceptance of Straw Pellets for Biogas Production in Germany - a UTAUT Based PLS-SEM Estimation. Oral Presentation on the 30th European Biomass Conference & Exhibition (EUBCE 2022). Session reference 2CO.8. 9.-12. May 2022, Marseille (digital).

Augustin, D.; Loewe, K.; Mohrmann, S. (2021): Strohpelletvergärung – Technik und Wirtschaftlichkeit. Vortrag auf der 6. Heidener BiogASFachtagung „Biogas aus Stroh, Gülle und Co“. 25.-26. August 2021, Heiden (digital).

Literaturverzeichnis

- Adrian, A. M.; Norwood, S. H.; Mask, P. L. (2005): Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 48 (3), S. 256–271, DOI:10.1016/j.compag.2005.04.004 .
- Agrarmarkt Informations-Gesellschaft (AMI) (2021): Monatliche Erzeugerpreise für Stroh in Groß- und HD-Ballen für mindestens 13 Regionen in Deutschland für den Zeitraum Januar 2017 bis Dezember 2020.
- ALB Bayern e.V. (Hrsg) (2001): Einsatzstoffspezifische Besonderheiten in der Prozessführung. Biogasforum Bayern. Nr.III- 18/2001. Arbeitsgruppe III Prozessbiologie, -bewertung und Analytik)
- Al Mansori, K. A.; Sarabdeen, J.; Tchanchane, A. L. (2018): Investigating Emirati citizens' adoption of e-government services in Abu Dhabi using modified UTAUT model. In: *Information Technology & People* 31(2), S. 455–481. DOI:10.1108/ITP-12-2016-0290.
- Ammon, F. (2019): Energiebündel. In: *Traction-Magazin* Juli/August 2019, S. 82–85.
- Amon, T.; Machmüller, A.; Kryvoruchko, V.; Milovanovic, D.; Hrbek, R.; Eder, M. W.; Stürmer, B. (2007): Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark. Endbericht
- Antonczyk, S.; Scherer, P. (2015): Entwicklung einer anorganisch synthetischen Gülle zur definierten Bilanzierung der Strohvergärung. In: KTBL (Hg.): Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress vom 22. bis 23. September 2015 in Potsdam. Darmstadt (KTBL Schrift 508).
- Arens, L.; Plumeyer, C. H.; Theuvsen, L. (2012): Akzeptanz von Informationssystemen durch Schweinemäster. Eine Kausalanalyse. In: A. Balmann, T. Glauben, M. Graubner, M. Grinds, N. Hirschauer, F. Schaft und P. Wagner (Hg.): *Unternehmerische Landwirtschaft zwischen Marktanforderungen und gesellschaftlichen Erwartungen*. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag (Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V., Band 47), S. 289–299.
- Aubert, B. A.; Schroeder, A.; Grimaudo, J. (2012): IT as enabler of sustainable farming. An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. In: *Decision Support Systems* 54 (1), S. 510–520. DOI: 10.1016/j.dss.2012.07.002.
- Auernhammer, H. (1986): Landwirtschaftliche Arbeitslehre. Manuskript der Vorlesung. Institut für Landtechnik der TU-Weihenstephan.
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (2018): *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 15. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Barchmann, T.; Pohl, M.; Denysenko, V.; Fischer, E.; Hofmann, J.; Lenhart, M. et al. (2021): Biogas-Messprogramm III, Erstausgabe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow-Prüzen.
- Bauer, S. (2009): Ansteigende Diversitäten ländlicher Räume? Schlussfolgerungen für die Regionalpolitik. In: R. Friedel und E. A. Spindler (Hg.): *Nachhaltige Entwicklung ländlicher Räume. Chancenverbesserung durch Innovation und Traditionspflege*. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 97–112.
- BayWa AG (2020): Strohpellets als Einstreu für Kleintiere und Pferde. Online verfügbar unter <https://www.baywa.de/de/tierhaltung/stallhygiene-tierhygiene/einstreu/strohpellets-als-einstreu-fuer-kleintiere-und-pferde/-p-00000000001627437/?url=/tierhaltung/stallhygiene-tierhygiene/einstreu/strohpellets-als-einstreu-fuer-kleintiere-und-pferde/-p-00000000001627437/&CSRFToken=250d0dcc-edac-4f83-8c17-125aa499b94c>, zuletzt geprüft am 15.09.2020.
- Bernigau, S. (2017): Die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen. In: S. Bernigau (Hg.): *Eine Marketing-Strategie für nachhaltigere Biokraftstoffe in Deutschland. Ein Ansatz zur Verbesserung der Konsumentenakzeptanz?* Wiesbaden: Springer Gabler, S. 63–98.
- Belitz, H.D.; W. Grosch und A. Schieberle (2002): *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. Springer Verlag.
- Bioenergieforschungsplattform Baden-Württemberg (2013): Systemanalyse zur Erzeugung und Nutzung biogener Gase in Baden-Württemberg. Schlussbericht.

- Borrero, J. D.; Yousafzai, S. Y.; Javed, U.; Page, K. L. (2014): Expressive participation in Internet social movements: Testing the moderating effect of technology readiness and sex on student SNS use. In: *Computers in Human Behavior* 30, S. 39–49. DOI: 10.1016/j.chb.2013.07.032.
- Bortz, J. (2005): Statistik: Für Human- und Sozialwissenschaftler. 6. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Brosius, F. (2013): SPSS 21. 1. Auflage. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: mitp Professional.
- Brosowski, A.; Adler, P.; Erdmann, G.; Stinner, W.; Thraen, D.; Mantau, U. et al. (2015): Biomassepotenziale Von Rest- Und Abfallstoffen. Status Quo In Deutschland. Potenzialstudie der DBFZ GmbH. Hg. v. FNR. Gülzow.
- Brosowski, A.; Bill, R.; Thrän, D. (2020): Temporal and spatial availability of cereal straw in Germany-Case study: Biomethane for the transport sector. In: *Energy, Sustainability and Society* 10 (1), S. 1–21. DOI: 10.1186/s13705-020-00274-1.
- Bundesnetzagentur (2023): Ausschreibungen für Bio-mas-se-an-la-gen. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Biomasse/start.html>, zuletzt geprüft am 05.06.2023.
- Bundesregierung (2019): CO₂-Bepreisung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.
- Bundeszentrale für Politische Bildung (2022): Bildungsstand der Bevölkerung. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61656/bildungsstand-der-bevoelkerung/>, zuletzt geprüft am 20.09.2022.
- Chang, A. (2012): UTAUT and UTAUT 2. A review and agenda for future research. In: *The Winners* 13(2), S. 106–114. DOI:10.21512/tw.v13i2.656.
- Cheah, J. H.; Thurasamy, R.; Memon, M. A.; Chuah, F.; Ting, H. (2020): Multigroup Analysis using SmartPLS: Step-by-Step Guidelines for Business Research. In: *Asian Journal of Business Research* 10 (3). DOI: 10.14707/ajbr.200087.
- Chen, Chen (2021): Untersuchung und optimierung der Co-Vergärung von Strohpellets in Biogasanlagen. Masterarbeit, HAWK, Göttingen.
- Czepuck, K.; Oechsner, H.; Schumacher, B.; Lemmer, A. (2006): Biogasausbeuten im Labor im Vergleich zur rechnerischen Abschätzung. *Landtechnik* Nr.61 2/2006
- Chin, W. W. (1998): The partial least squares approach for structural equation modeling. In: *Modern methods for business research*, S. 295–336.
- Crane, A.; Matten, D. (2004): Business ethics. A European perspective. Managing corporate citizenship and sustainability in the age of globalization. Oxford: Oxford University Press.
- Cucchiella, F.; D'Adamo, I.; Gastaldi, M. (2019): An economic analysis of biogas-biomethane chain from animal residues in Italy. In: *Journal of Cleaner Production* 230, S. 888–897. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.116>.
- Dabbert, S.; Braun, J. P. (2021): *Landwirtschaftliche Betriebslehre*. 4. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB, 2792).
- Dachs, G.; Rehm, W.; Eberl, S.; Horschak, G.; Schilling, J. (2006): Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. BASE TECHNOLOGIES GmbH in Kooperation mit Fachhochschule München. Hg. v. Solarenergieförderverein Bayern e. V. München. Online verfügbar unter https://www.sev-bayern.de/wp-content/uploads/2019/01/SeV_BASE-Studie_Biogas-Eigenverbrauch_2006.pdf, zuletzt geprüft am 28.08.2023.
- Dalby F.R., Hansen M.J., Guldborg L.B., Hafner S.D., Feilberg A. (2023): Simple Management Changes Drastically Reduce Pig House Methane Emission in Combined Experimental and Modeling Study. *Environmental Science and Technology*, 57 (9), pp. 3990 – 4002, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08891>.
- Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Barchmann, T.; Oehmichen, K.; Beil, M. et al. (2020): Optionen für Biogas- Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Texte 24/2020).
- Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Trommler, M.; Reinholz, T.; Völler, K. et al. (2017): Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. (FKZ 37EV 16 111 0). Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum (DBFZ) (DBFZ-Report, Nr. 30).

- Döring, G.; Schilcher, A.; Strobl, M.; Schleicher, R.; Seidl, M.; Mitterleitner, J. (2010): Verfahren zum Transport von Biomasse. Zusammengestellt für die Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung) im „Biogas Forum Bayern“. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. Freising.
- Dubrovskis, V.; Plume, I.; Straume, I. (2018): Anaerobic co-fermentation of molasses and oil with straw pellets. In: *Agronomy Research* 16 (3), S. 688–695. <http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.100>.
- Düngeverordnung (DüV) (2020): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV). DüV, vom Düngeverordnung vom 26.05.2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 28.04.2020.
- Eder, B. (Hrsg) (2012): Biogas Praxis.Grundlagen,Planung,Anlagenbau,Beispiele Wirtschaftlichkeit, Umwelt. 5.Auflage Ökobuch Freiburg
- Emmann, C. H.; Arens, L.; Theuvsen, L. (2013): Individual Acceptance of the Biogas Innovation: A Structural Equation Model. In: *Energy Policy* 62, S. 372–378. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.083
- Erneuerbare Energien (2018): Änderung im Kraftstoffmix. EU tankt neuen Biosprit aus Stroh. Online verfügbar unter <https://www.erneuerbareenergien.de/archiv/eu-tankt-neuen-biosprit-aus-stroh-150-3882-108567.html>, zuletzt geprüft am 30.05.2020.
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) (2021): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 3026) geändert worden ist. Online verfügbar unter https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/sites/default/files/2021-11/EEG_2021_210716.pdf, zuletzt geprüft am 10.11.2022.
- Fachverband Biogas (2022): Branchenzahlen 2021 und Prognose der Branchenentwicklung 2022. Stand: Oktober 2022. Online verfügbar unter [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/22-10-06_Biogas_Branchenzahlen-2021_Prognose-2022.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/22-10-06_Biogas_Branchenzahlen-2021_Prognose-2022.pdf), zuletzt geprüft am 10.03.2023.
- Fachverband Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2015a): Heizen mit Stroh - Wertschöpfung für Landwirtschaft und Kommunen. 1. Auflage. Gülzow-Prüzen.
- Fachverband Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2015b): Wie sind die Bioenergie-Ziele der Bundesregierung zu erreichen? Papier zum parlamentarischen Mittagessen am 09.09.2015 in Berlin. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Handout_Folder_Parlam_Mittag_Web.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2023.
- Fachverband Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2020): Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Gülzow-Prüzen.
- Fernandez-Cornejo, J.; Beach, E. D.; Huang, W.-Y. (1994): The adoption of IPM techniques by vegetable growers in Florida, Michigan, and Texas. In: *Journal of Agricultural and Applied Economics* 26 (1), S. 158–172. DOI: 10.1017/S1074070800019271.
- Fernandez-Cornejo, J.; McBride; W. D. (2002): Adoption of Bioengineered Crops. Hg. v. Economic Research Service. Washington D.C.
- Fielding, K. S.; Terry, D. J.; Masser, B. M.; Hogg, M. A. (2008): Integrating social identity theory and the theory of planned behaviour to explain decisions to engage in sustainable agricultural practices. In: *The British Psychological Society* 47, S. 23–48. DOI: 10.1348/014466607X206792.
- Frederking, M. (1996): Zusammenhänge zwischen Merkmalen der Agrarstruktur und dem Innovationsverhalten von Landwirten. In: D. Kirschke, M. Odening und G. Schade (Hg.): *Agrarstrukturentwicklungen und Agrarpolitik*. Band 32. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag (Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.), S. 349–359.
- Gebrezgabher, S. A.; Meuwissen, M.P.M.; Kruseman, G.; Lakner, D.; Oude Lansink, A. G. J. M. (2015): Factors influencing adoption of manure separation technology in The Netherlands. In: *Journal of Environmental Management* 150 (1), S. 1-8. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.10.029.
- Gersbeck, E. (2013): Pelletierung - Brikettierung halmgutartiger Biomasse. Überblick, Praxistauglichkeit, Kosten. Bad Sassendorf, 05.03.2013.
- Gers-Grapperhaus, C.; Hartmann, S.; Keymer, U.; Messner, J.; Reinhold, G.; Schünemann-Plag, P.; Wernsmann, P. (2017): Anpassungsstrategien für Biogasanlagen. KTBL-Heft 118. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).

- Granoszewski, K.; Reise, C.; Spiller, A.; Mußhoff, O. (2009): Entscheidungsverhalten landwirtschaftlicher Betriebsleiter bei Bioenergie Investitionen – Erste Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung. Göttingen (Diskussionspapier Nr. 0911).
- Hahn, H.; Ganagin, W.; Hartmann, K.; Wachendorf, M. (2014): Cost analysis of concepts for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. In: *Bioresource Technology* 170, S. 211–220. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.07.085.
- Hahne, S. (2016): Standorteröffnung von Biogasanlagen: Problemmodellierung, -einordnung und -lösung. In: *Logistics Journal Proceedings*, S. 1–7. DOI: 10.2195/lj_Proc_hahne_de_201610_01.
- Hair, J. F.; Risher, J. J.; Sarstedt, M.; Ringle, C. M. (2018): When to use and how to report the results of PLS-SEM. In: *European Business Review* 31(1). DOI: 10.1108/EBR-11-2018-0203.
- Hardaker, J. B.; Huirne, R. B. M.; Anderson, J. R.; Lien, G. (2004): Coping with risk in agriculture. 2nd ed. Wallingford: CABI Pub. DOI: 10.1079/9780851998312.0000
- Heitkämper, K.; Schick, M.; Fritzsche, S. (2011): Arbeitszeitbedarf in der Mastschweinehaltung. In: *Landtechnik* 66(2), S. 113–115. DOI: 10.1515/lt.2011.362.
- Henke, S.; Theuvsen, L. (2014): SLCA: Regional differenzierte Bewertung von Biogasanlagen und Kurzumtriebsplantagen. In: *Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie* 23, S. 81–90.
- Hersener, J.; Meier, U.; Dinkel, F. (2002): Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Vergärung, Schlussbericht, April 2002, Luzern
- Hertell, F. V. (2004): Strategische Betriebsentwicklung – Erfahrungen und Visionen. In: Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) (Hg.): Das neue große Europa: Perspektiven für die Agrarwirtschaft. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, S. 129–138.
- Hiendlmeier, S. (2006): Der Brennstoff Strohpellets. Infoschreiben Strohpellets 12/06. C.A.R.M.E.N.
- Holzhammer, A. (2023): Strohpellets statt Mais in der Biogasanlage. Hg. v. topagrar online. Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/technik/news/strohpellets-statt-mais-in-der-biogasanlage-a-13380421.html>, zuletzt geprüft am 10.06.2023.
- Höppner, F.; Hecht, A.-S.; Ahrens, T. (2014): Silierung und Biogasbildung von Mischsilagen mit Rübe und Stroh. In: C. Pekrun, M. Wachendorf und L. Francke-Weltmann (Hg.): Technik in der Pflanzenproduktion. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. mit der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik VDI-MEG. Wien, 16. bis 18. September 2014. Band 26. Göttingen: Liddy Halm (Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften), S. 110–111.
- Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; van Zelm, R. (2017): ReCiPe2016. A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22(2), pp. 138–147, <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- Jeinsen, T. von; Heppe, H.; Theuvsen, L. (2018): Determinanten der Akzeptanz technischer Innovationen in der Landwirtschaft. In: A. Ruckelshausen, A. Meyer-Aurich, K. Borchard, C. Hofacker, J.-P. Loy, R. Schwerdtfeger et al. (Hg.): 38. GIL-Jahrestagung, Digitale Marktplätze und Plattformen. Bonn: Köllen (Lecture Notes in Informatics (LNI)), S. 127–130.
- Joint Research Centre of the European Commission (JRC) (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook. Framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators, Luxembourg.
- Kadam, K. L.; Forrest, L. H.; Jacobson, W. A. (2000): Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects. In: *Biomass and Bioenergy* 18(5), S. 369–389. DOI: 10.1016/S0961-9534(00)00005-2
- Kalcher, J.; Brosowski, A. (2018): Flächenbezogene Berechnung von Biomassepotentialen. In: G. Meinel, U. Schumacher, M. Behnisch und T. Krüger (Hg.): Flächennutzungsmonitoring X. Flächenpolitik - Flächenmanagement - Indikatoren. Berlin: Rhombos (IÖR Schriften Band 76), S. 257–260.
- Kaliyan, N.; Morey, R. V. (2010): Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. In: *Bioresource Technology* 101, S. 1082–1090. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.064

- Kaparaju, P.; Serrano, M.; Thomsen, A. B.; Kongjan, P.; Angelidaki, I. (2009): Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. In: *Bioresource Technology* 100, S. 2562–2568. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.11.011.
- Karsten, L. (2022): Analyse der Pelletpresse“ Krone Premos 5000“ vor dem Hintergrund einer landwirtschaftlichen sowie industriellen Nutzung. Masterthesis. Online verfügbar unter https://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb_thesis_0000002816/dbhsnb_derivate_0000003418/Masterarbeit-Karsten-2022.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2023.
- Kellner, U.; Delzeit, R.; Thiering, J. (2011): Wo steht die Biogasanlage? – Auch bei den Gärrest-Verbringungskosten zählt der Standort. In: M. Clasen, O. Schätzel und B. Theuvsen (Hg.): Qualität und Effizienz durch informationsgestützte Landwirtschaft, Fokus: Moderne Weinwirtschaft. Referate der 31. GIL-Jahrestagung; 24. - 25. Februar 2011 in Oppenheim, Germany. Bonn: Ges. für Informatik (GI-Edition. Proceedings, 181), S. 109–112.
- Koivisto, K.; Makkonen, M.; Frank, L.; Riekkinen, J. (2016): Extending the technology acceptance model with personal innovativeness and technology readiness: a comparison of three models. In: J. Versendaal, C. Kittl, A. Pucihar und M. K. Borstnar (Hg.): BLED 2016: Proceedings of the 29th Bled eConference “Digital Economy”, S. 113–128.
- Kröger, R.; Konerding, J. R.; Theuvsen, L. (2016): Identifikation von Einflussfaktoren auf die Nutzung von Güllefeststoffen als Gärsubstrat in Biogasanlagen. In: *German Journal of Agricultural Economics* 65(2), S. 112–131. DOI: 10.22004/ag.econ.284974.
- Kröger, R.; Theuvsen, L.; Konerding, J. R. (2014): Güllefeststoffe als Gärsubstrat für Biogasanlagen. Ergebnisse einer empirischen Erhebung unter Biogasanlagenbetreibern. In: *Berichte über Landwirtschaft* 92(3), S. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.12767/buel.v92i3.58>.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2013): Faustzahlen Biogas. 3. Ausgabe. Darmstadt.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- KTBL (Hrsg) (2018): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 15. Auflage. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- KTBL (2021): Gasausbeute in landw. Biogasanlagen. Potenziale, Erträge, Einflussfaktoren. KTBL Schrift 526. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V (KTBL), Darmstadt.
- KTBL (2022): Betriebsplanung Landwirtschaft 2022/23. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- KTBL (2023a): KTBL-Feldarbeitsrechner. Online verfügbar unter <https://daten.ktbl.de/feldarbeit/home.html>, zuletzt geprüft am 16.06.2023.
- KTBL (2023b): Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Online verfügbar unter <https://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html>, zuletzt geprüft am 10.06.2023.
- KTBL (2023c): MaKost - Maschinenkosten und Reparaturkosten. Online verfügbar unter <https://www.ktbl.de/home/webanwendungen/makost>, zuletzt geprüft am 05.06.2023.
- Kulak, J. P.; Trojanowski, M.; Barmantloo, E. (2019): A Literature Review of Partial Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (UTAUT2) Model. In: *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio H - Oeconomia* 53(4). DOI:10.17951/h.2019.53.4.101-113.
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2004): Kurzbeitrag – Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in Feststofffermentern. In: Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs“. 4./5. Februar 2004 in Gülzow. Band 23. Gülzow (Gülzower Fachgespräche), S. 105–113.
- Kwaśniewski, D.; Kuboń, M. (2016): Economic effectiveness of straw pellet production. In: *Agricultural Engineering* 20(4), S. 147–155. DOI:10.1515/agriceng-2016-0072.
- Lamm, H.; Burger, C.; Fuchsle, T.; Trommsdorf, G. (1976): Geschlecht und Alter als Einflussfaktoren der Risikobereitschaft bei Entscheidungen für die eigene und eine andere Person. In: *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie* 26 Jg., S. 496–508.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2023): Richtwert-Deckungsbeiträge 2022. Oldenburg.
- Lankoski, J.; Ollikanen, M. (2006): Bioenergy crop production and climate policies: A von Thunen model and case of reed canary grass in Finland. Helsinki.
- Lantz, M.; Svensson, M.; Björnsson, L.; Börjesson, P. (2007): The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden - Incentives, barriers and potentials. In: *Energy Policy* 35, S. 1830–1843. DOI:10.1016/j.enpol.2006.05.017.

- Larsson, S. H.; Thyrel, M.; Geladi, P.; Lestander, T. A. (2008): High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. In: *Bioresource Technology* 99, S. 7176–7182. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.12.065.
- Laser, H.; Boelhauve, M.; Garmeister, R. (2019): Biomasseaufwertung und Silierung lignocellulosereicher Koppelprodukte zur Optimierung der Methanausbeute (BASiliKOM). Soest: Fachhochschule Südwestfalen (Forschungsberichte des Fachbereichs Agrarwirtschaft Soest, Fachhochschule Südwestfalen, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Nr. 46).
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL) (o. J.): Biogasausbeuten verschiedener Substrate. Biogasausbeuten-Datenbank. Maissilage. Abgerufen am 25.02.2023 unter: <https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/>
- Liew, E. J. Y.; Vaithilingam, S.; Nair, M. (2014): Facebook and socio-economic benefits in the developing world. In: *Behaviour & Information Technology* 33(4), S. 345–360. DOI: 10.1080/0144929X.2013.810775
- Lohmöller, J. B. (1988): The PLS program system: Latent variables path analysis with partial least squares estimation. In: *Multivariate Behavioral Research* 23 (1), S. 125–127. DOI: 10.1207/s15327906mbr2301_7
- Loibl, H. (2017): Die Ausschreibung am Beispiel Biogas und sonstige Neuerungen. Vorlesung Energie- und Umweltrecht. OTH Regensburg. Online verfügbar unter https://www.paluka.de/fileadmin/user_upload/EEG_2017_Ausschreibung_am_Beispiel_Biogas.pdf, zuletzt geprüft am 27.11.2019.
- Luo, T.; Long, Y.; Li, J.; Meng, X.; Mei, Z.; Long, E.; Dai, B. (2015): Performance of a novel downward plug-flow anaerobic digester for methane production from chopped straw. In: *BioResources* 10(1), S. 943–955.
- Maart-Noelck, S. C.; Mußhoff, O. (2014): Measuring the risk attitude of decision-makers: are there differences between groups of methods and persons? In: *Australian Journal of Agriculture and Resource Economics* 58(3), S. 336–352. DOI: 10.1111/j.1467-8489.2012.00620.x.
- Maier, G.; Tödting, F. (1992): Regional- und Stadtökonomik, Standorttheorie und Raumstruktur. Wien: Springer.
- Mani, S.; Sokhansanj, S.; Bi, X.; Turhollow, A. (2006): Economics of production fuel pellets from biomass. In: *Applied Engineering in Agriculture* 22 (3), S. 421–426. DOI: 10.13031/2013.20447.
- Manzano, J.; Lassala-Navarre, C.; Ruiz-Mafe, C.; Sanz-Blas, S. (2009): The role of consumer innovativeness and perceived risk in online banking usage. In: *International Journal of Bank Marketing* 27 (1), S. 53–75. DOI: 10.1108/02652320910928245.
- Martins, C.; Oliveira, T.; Popovic, A. (2014): Understanding the Internet banking adoption: A unified theory of acceptance and use of technology and perceived risk application. In: *International Journal of Information Management* 34, S. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2013.06.002.
- Mishra, D.; Gyawali, B. R.; Paudel, K. P.; Poudyal, N. C.; Simon, M. F.; Dasgupta, S.; Antonious, G. (2018): Adoption of Sustainable Agriculture Practices among Farmers in Kentucky, USA. In: *Environmental Management* 62 (6), S. 1060–1072. DOI: 10.1007/s00267-018-1109-3.
- Mitchell, R. C.; Carson, R. T. (1989): Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method. Washington D.C.: Resources for the Future.
- Mohrmann, S.; Otter, V. (2021): Substratalternativen für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung vor dem Hintergrund der Novellierung der Düngeverordnung und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021. In: KTBL (Hg.): Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Online-Kongress am 29. und 30. September 2021. Darmstadt (KTBL-Schrift 524), S. 262–266.
- Mohrmann, S.; Otter, V. (2023): Categorisation of Biogas Plant Operators in Germany with Regards to Their Intention to Use Straw Pellets as Innovative and Sustainable Substrate Alternative. In: *Energies* 16 (1), S. 5. DOI: 10.3390/en16010005.
- Mohrmann, S.; Schukat, S.; Schaper, C. (2022): Der Markt für Bioenergie 2021/2022. In: *German Journal of Agricultural Economics* 71 (Supplement), S. 101–125. DOI: 10.30430/71.2022.5.Bioenergie.
- Mola-Yudego, B.; Dimitriou, I.; Gonzalez-Garcia, S.; Gritten, D.; Aronsson, P. (2014): A conceptual framework for the introduction of energy crops. In: *Renewable Energy* 72, S. 29–38. DOI: 10.1016/j.renene.2014.06.012.

- Möller, K.; Leithold, G.; Michel, J.; Schnell, S.; Stinner, W.; Weiske, A. (2006): Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe. Endbericht: DBU – AZ 15074. Gießen und Leipzig.
- Mönch-Tegeder, M.; Lemmer, A.; Oechsener, H.; Jungbluth, T. (2013): Investigation of the methane potential of horse manure. In: *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15 (2), S. 161-172.
- Møller, H. B.; Hansen, M. M. (2014): Briquettes of straw and dry grass double biogas production. In: *FiB no. 47*, S. 3–5.
- Mussoline, W.; Esposito, G.; Giordano, A.; Lens, P. (2013): The anaerobic digestion of rice straw: a review. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* Vol 43 (9), S. 895–915. DOI: 10.1080/10643389.2011.627018.
- Nagy, D.; Balogh, P.; Gabnai, Z.; Popp, J.; Olah, J.; Bai, A. (2018): Economic Analysis of Pellet Production in Co-Digestion Biogas Plants. In: *Energie* 11, S. 1–21.
- Neu, C. (2019): Dorf und Ernährung. In: Nell W. und Weiland M. (Hg.): *Dorf. Ein interdisziplinäres Handbuch*: J. B. Metzler, S. 212–219.
- Niedziolka, I.; Szpryngiel, M.; Kachel-Jakubowska, M.; Kraszkiwicz, A.; Zawislak, K.; Sobczak, P.; Nadulski, R. (2015): Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. In: *Renewable Energy* 76 (8), 2015, S. 312-317. DOI: 10.1016/j.renene.2014.11.040
- Nguyen, T. D.; Nguyen, T. M.; Pham, Q.-T.; Misra, S. (2014): Acceptance and Use of E-Learning Based on Cloud. In: Beniamino Murgante, Sanjay Misra, Ana Maria A. C. Rocha, Carmelo Torre, Jorge Gustavo Rocha, Maria Irene Falcão et al. (Hg.): *Computational science and its applications - ICCSA 2014. 14th international conference*, Guimarães, Portugal, June 30 - July 3, 2014; proceedings, part V. Cham: Springer (Lecture notes in computer science, 8583), S. 159–174.
- Niehaves, B.; Plattfaut, R. (2010): The age-divide in private Internet usage: A quantitative study of technology acceptance. In: *Proceedings of the 16th Americas Conference on Information Systems*, S. 1–14.
- Nolan, A.; McDonnell, K.; Devlin, G.; Carroll, J.-P.; Finnan, J. (2010): Economic Analysis of Manufacturing Costs of Pellet Production in the Republic of Ireland Using Non-Woody Biomass. In: *The Open Renewable Energy Journal* 3, S. 1–11. DOI: 10.2174/1876387101003010001.
- Oechsner, H.; Nägele, H.-J.; Kress, P. (2018): Studie zur Effizienzmessung eines neuartigen und innovativen Rührwerks für Substrate in Biogasanlagen und dessen Strömungsverhalten. Abschlussbericht. Universität Hohenheim - Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie. Online verfügbar unter https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/85193-Studie_zur_Effizienzmessung_eines_neuartigen_und_innovativen_R%C3%BChrwerks_f%C3%BCr_Substrate_in_Biogasanlage.pdf zuletzt geprüft am 10.06.2023.
- Oosterkamp, W. J. (2016): Straw pellets for anaerobic co-digestion with cattle manure in the Netherlands. Online verfügbar unter <http://www.oosterkamp.org/Monocm.pdf>, zuletzt geprüft am 15.05.2022.
- Otter, V.; Deutsch, M. (2023): Did policy lose sight of the wood for the trees? An UTAUT-based partial least squares estimation of farmers acceptance of innovative sustainable land use systems. In: *Land Use Policy* 126, 106467. DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106467.
- Pascher, P.; Hemmerling, U.; Stork, S. (2021): Situationsbericht 2021/22. Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Deutscher Bauernverband e.V. Berlin.
- Passalacqua, F.; Zaetta, C.; Janssen, R.; Pigaht, M.; Grassi, G.; Pastre, O. et al. (2004): Pellets in Southern Europe. The state of the art of pellets utilisation in Southern Europe. New perspectives of pellets from agri-residues. In: van W. P. M. Swaaij, T. Fjällström und P. Helm (Hg.): *Second world biomass conference. For energy, industry and climate protection: proceedings of the world conference held in Rome, Italy 10-14 May 2004*. Florence: ETA-Florence (Biomass for energy, industry and climate protection: world conference, 2), S. 1806–1810.
- Peralta, A.; Carrillo-Hermosilla, J.; Crecente, F. (2019): Sustainable business model innovation and acceptance of its practices among Spanish entrepreneurs. In: *Corporate Social Responsibility and Environmental Management* 26 (5), S. 1119–1134. DOI: 10.1002/csr.1790.
- Peris, M.; Nüttgens, M. (2011): Anwendung der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology zur Akzeptanzbestimmung von Web 2.0-Anwendungen in KMU-Netzwerken. In: R. Maier (Hg.): 6th

- Conference on professional knowledge management. From knowledge to action. Innsbruck, Austria, 21-23.02.2011. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. (Lecture Notes in Informatics (LNI)), S. 88–97.
- Petersen, S. O. (2018): Greenhouse gas emissions from liquid dairy manure: Prediction and mitigation, *Journal of Dairy Science*, Volume 101, Issue 7, pp. 6642-6654, <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13301>.
- Poe, G. L.; Bishop, R. C. (1992): Measuring the Benefits of Groundwater Protection from Agricultural Contamination: Results from a Two-Stage Contingent Valuation Study. Staff Papers 200549. University of Wisconsin-Madison. Department of Agricultural and Applied Economics.
- Prüfer, S.; Biebow, R.; Stirl, A. (1974): Erfahrungen und Ergebnisse bei der Strohpelletierung in landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen. In: *Agrartechnik* 24(6).
- Raab-Steiner, E.; Benesch, M. (2010): Der Fragebogen – von der Forschungsidee zur SPSS/PASW-Auswertung. 2. Auflage. Stuttgart: UTB.
- Rauh, S. (2020): Aktueller Stand EEG-Novelle und Chancen durch RED-II für die Stroh-Vergärung. Dingolfingen, 12.02.2020.
- Reinhold, G. (2005): Masse- und Trockensubstanzbilanz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: *Neue Landwirtschaft* 12, S. 68–72.
- Reinhold, G. (2014): Vergärung von Stroh in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Hg. v. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Jena.
- Reinhold, G. (2019): Bewertung der Einsatzstoffe für die Biogaserzeugung. 53. Biogas - Fachtagung Thüringen Biogassubstrate und Gärreste. Walterhausen, 26.11.2019.
- Reinhold, G.; Friedrich, E. (2012): Vergärung von Stroh. Stand und Perspektiven. 2. Internationale Stroh-Tagung. Berlin, 29.03.2012.
- Reith, S. (2018): Arbeitswirtschaft: Arbeitszeiterhebung und Vergleichszahlen. Fortbildung „Chancen für Betrieb und Familie durch Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen“. KTBL. Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume. Schwäbisch Gmünd, 12.11.2018.
- Reynaud, A.; Couture, S. (2012): Stability of risk preference measures: results from a field experiment on French farmers. In: *Theory and Decision* 73(2), S. 203–221. DOI: 10.1007/s11238-012-9296-5.
- Rijal, B.; Ighathinathane, C.; Karki, B.; Yu, M.; Pryor, S. W. (2012): Combined effect of pelleting and pretreatment on enzymatic hydrolysis of switchgrass. In: *Bioresource Technology* 116 (36-41). DOI: 10.1016/j.biortech.2012.04.054.
- Rodriguez, J. M.; Molnar, J. J.; Fazio, R. A.; Sydnor, E.; Lowe, M. J. (2008): Barriers to adoption of sustainable agriculture practices: Change agent perspectives. In: *Renewable Agriculture and Food Systems* 24 (1), S. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1742170508002421>.
- Sattler, H.; Nitschke, T. (2003): Zahlungsbereitschaften - Ein empirischer Vergleich von Instrumenten zur Erhebung von Zahlungsbereitschaften. In: *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung: Zfbf* 55, S. 346–381.
- Schaider Pelltec (o. J.): So arbeitet Schaidler Pelletec D 8.0. Online verfügbar unter https://biomasse.pege.org/download/folder_pelletec.pdf , zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Schaider Pelltec (2020): Zusammenfassung Energy Harvester „Schaider Pelletec D 8.0“. Staatsdorf.
- Schaper, C.; Spiller, A.; Theuvsen, L. (2010): Risikoneigung und Risikoverhalten von Milcherzeugern: Eine Typologisierung. In: *Yearbook of Socioeconomics in Agriculture* 3, S. 157–193.
- Schaper, C.; Wocken, C.; Abeln, C.; Lassen, B.; Schierenbeck, S.; Spiller, A.; Theuvsen, L. (2008): Risikomanagement in Milchviehbetrieben. Eine empirische Analyse vor dem Hintergrund der sich ändernden EU-Milchmarktpolitik. In: *Landwirtschaftliche Rentenbank* (Hg.): Risikomanagement in der Landwirtschaft (Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Rentenbank, Band 23), S. 135–184.
- Scheftelowitz, M.; Hennig, C.; Beil, M.; Thraen, D. (2015): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse). Zwischenbericht Mai 2015. Hg. v. Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum (DBFZ).
- Schlosser, K.; Theuvsen, L. (2016): Arbeitszeitbedarfsermittlung am Beispiel der Ferkelerzeugung – IT-basierte Erfassungsmethoden und ihre Verwendungsmöglichkeiten. In: A. Ruckselshausen (Hg.): *Intelligente Systeme - Stand der Technik und neue Möglichkeiten*. Lecture Notes in Informatics (LNI). Gesellschaft für Informatik. Bonn, S. 181–184.

- Schmidmeier (2023): Heizwerte und Aschegehalte unterschiedlicher Brennstoffe, Online verfügbar unter www.schmidmeier.com/brennstoffe/heizwerte-aschegehalte, zuletzt geprüft am 13.06.2023,
- Schukat, S.; Heise, H. (2021): Smart Products in Livestock Farming—An Empirical Study on the Attitudes of German Farmers. In: *Animals* 11, 1055. DOI: 10.3390/ani11041055.
- Schulze Steinmann, M.; Holm-Müller, K. (2010): Thünensche Ringe der Biogaserzeugung – der Einfluss der Transportwürdigkeit nachwachsender Rohstoffe auf die Rohstoffwahl von Bio-gasanlagen. In: *German Journal of Agricultural Economics* 59(1), S. 1–12. DOI: 10.22004/ag.econ.145218.
- Schwarz, B. (2016a): Schlussbericht Vorhaben EFFIGEST, FKZ 03KB081. Fraunhofer IKTS. Dresden.
- Schwarz, B. (2016b): STROH - STROHPELLETS - BIOGASPELLETS. Alternative Möglichkeiten zur verbesserten Biomethanproduktion. SpreuStroh Innovationsforum, 2. Workshop. Fraunhofer IKTS. Leipzig, 14.03.2016.
- Schwarz, B.; Pfeufer, D.; Balling, N.; Papendieck, J.; Schneider, P.; Hülsmann, M. et al. (2019): Verwertung strohbasierter Energiepellets und Geflügelmist in Biogasanlagen mit wärmeautarker Gärrestveredlung - STEP.
- Schwarz, H.-P. (2003): Biogasanlagen – Arbeitszeiterfassung und Ermittlung der Verfahrenskosten. In: *Landtechnik* 58(5), S. 318–319. DOI: <https://doi.org/10.1515/lt.2003.1521>.
- Shaw, N.; Sergueeva, K. (2019): The non-monetary benefits of mobile commerce: Extending UTAUT2 with perceived value. In: *International Journal of Information Management* 45, S. 44–55. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.10.024.
- Simon, B. (2001): Wissensmedien im Bildungssektor. Eine Akzeptanzuntersuchung an Hochschulen. Dissertation. Wirtschaftsuniversität Wien, Wien.
- Slade, E. L.; Dwivedi, Y. K.; Piercy, N. C.; Williams, M. D. (2015): Modeling Consumers' Adoption Intentions of Remote Mobile Payments in the United Kingdom: Extending UTAUT with Innovativeness, Risk, and Trust. In: *Psychology & Marketing* 32 (8), S. 860–873. DOI: 10.1002/mar.20823.
- Statistisches Bundesamt (2023a): Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2023. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotorkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/>, zuletzt geprüft am 20.05.2023.
- Statistisches Bundesamt (2023b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wachstum und Ernte - Feldfrüchte. Fachserie 3 Reihe 3.2.1. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Publikationen/Downloads-Feldfruechte/feldfruechte-jahr-2030321227164.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Steinhauser, H.; Langbehn, C.; Peters, U. (1992): Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre – Allgemeiner Teil. 5., neubearb. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB für Wissenschaft Uni-Taschenbücher Agrarwissenschaften, 113).
- Streicher, G.; Effenberger, M.; Helm, M. (2019): Technische Empfehlungen für Feststoffeintragssysteme an Biogasanlagen. Hg. v. ALB Bayern e.V. Freising (Biogas Forum Bayern bfb5). Online verfügbar unter <https://www.biogas-forum-bayern.de/bfb5>, zuletzt geprüft am 15.06.23.
- Sphera (2022): GaBi Software System and Database for Life Cycle Engineering, Version 10.6
- Sultana, A.; Kumar, A.; Harfield, D. (2010): Development of agri-pellet production cost and optimum size. In: *Bioresource Technology* 101(14), S. 5609–5621. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.011.
- Tamilmani, K.; Rana, N. P.; Dwivedi, Y. K. (2020): Consumer Acceptance and Use of Information Technology: A Meta-Analytic Evaluation of UTAUT2. In: *Information Systems Frontiers*, S. 1–19. DOI:10.1007/s10796-020-10007-6.
- Thakur, R.; Srivastava, M. (2015): A study on the impact of consumer risk perception and innovativeness on online shopping in India. In: *International Journal of Retail and Distribution* 43 (2), S. 148–166. DOI: 10.1108/IJRDM-06-2013-0128.
- Theerarattananoon, K.; Xu, F.; Wilson, J.; Staggenborg, S.; McKinney, L.; Vadlani, P. et al. (2012): Effects of the pelleting conditions on chemical composition and sugar yield of corn stover, big bluestem, wheat straw, and sorghum stalk pellets. In: *Bioprocess Biosyst Engineering* 35, S. 615–623. DOI:10.1007/s00449-011-0642-8.

- Thraen, D.; Stecher, K. (2012): Stand der europaweiten energetischen Nutzung von Halmgütern. 2. Internationale Fachtagung Strohenergie. Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum (DBFZ). Berlin, 29.03.2012.
- Tilger Dienstleistungs- & Handels GmbH (2020): Strohpellets - Pferd, Geflügel, Rind & Co. - Strohpellets Einstreu. Online verfügbar unter <https://www.strohpellets-strohgranulat.de/strohpellets/?p=1&o=4>, zuletzt geprüft am 15.09.2021.
- Toews, T. (2009): Biomassetransport – Was kostet die Logistik von Gülle & Co. In: Fachverband Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hg.): Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. Tagungsband zum KTBL/FNR-Biogas-Kongress vom 15. bis 16. September 2009 in Weimar (Gülzower Fachgespräche, Band 32), S. 63–75.
- Theiss, S. (2008): Bestimmung, Isolierung und Charakterisierung von Roggenpentosanen, S.14-18. Diplomarbeit, Universität Wien, Okt. 2008
- Venkatesh, V.; James, Y. L.; Thong, J. Y. L.; Xu, X. (2012): Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology. In: *MIS quarterly* 36(1), S. 157–178. DOI: 10.2307/41410412.
- Venkatesh, V.; Morris, M. G.; Davis, G. B.; Davis, F. D. (2003): User acceptance of information technology: Toward a unified view. In: *MIS quarterly*, S. 425–478. DOI: 10.2307/41410412.
- Victorin, M.; Davidsson, Å.; Wallberg, O. (2020): Characterization of Mechanically Pretreated Wheat Straw for Biogas Production. In: *Bioenerg. Res.* 13 (3), S. 833–844. DOI: 10.1007/s12155-020-10126-7.
- Völkner, F. (2006): Methoden zur Messung individueller Zahlungsbereitschaften: Ein Überblick zum State of the Art. In: *JfB* 56, S. 33–60.
- Voss, J.; Schaper, C.; Spiller, A.; Theuvsen, L. (2009): Innovationsverhalten in der deutschen Landwirtschaft - Empirische Ergebnisse am Beispiel der Biogaserzeugung. In: *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.* 44, S. 379–391.
- Weber, M.; El Benni, N.; Munz, M. (2013): Der Einfluss von Direktzahlungen auf betriebswirtschaftliche Entscheidungen – eine Befragung von landwirtschaftlichen Beratern. Untersuchung zuhanden des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW). ETH Zürich. Zürich.
- Weiland, P. (2010): Flaschenhals Gärrestverwertung. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn047034.pdf, zuletzt geprüft am 20.04.2023
- Weiser, C. (2014): Einflüsse auf den Getreidestrohertrag als Voraussetzung der Bestimmung des nachhaltigen Strohpotenzials. In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 23. Jg., Heft 2, S. 66–70.
- Weiser, C.; Zeller, V.; Reinicke, F.; Wagner, B.; Majer, S.; Vetter, A.; Thraen, D. (2014): Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany. In: *Applied Energy* Vol 114, S. 749–762. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.07.016.
- Wellner, K.; Theuvsen, L.; Heise, H. (2019): Die Teilnahmebereitschaft deutscher Sauenhalter an der Initiative Tierwohl - wodurch wird sie beeinflusst? Vortrag anlässlich der 59. Jahrestagung der GEWISOLA „Landwirtschaft und ländliche Räume im gesellschaftlichen Wandel“. Braunschweig, 2019.
- Wellner, M.; Theuvsen, L. (2018): Community Supported Agriculture - Determinanten der Teilnahmebereitschaft deutscher Landwirte. Vortrag anlässlich der 58. Jahrestagung der GEWISOLA „Visionen für eine Agrar- und Ernährungspolitik nach 2020“. Kiel, 2018.
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment* 21, pp. 1218–1230, DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8
- Willock, J.; Deary, I. J.; Mcgregor, M. M.; Sutherland A.; Edwards-Jones, G.; Morgan, O. et al. (1999): Farmers' Attitudes, Objectives, Behaviors, and Personality Traits: The Edinburgh Study of Decision Making on Farms. In: *Journal of Vocational Behavior* 54 Jg. (1), S. 5–36. DOI: 10.1006/jvbe.1998.1642.
- Wu, P.-I.; Chen, S.-H.; Liou, J.-L. (2017): A general model for treatment of protests and no-answer responses in contingent valuation method. In: *Environmental Economics* 8 (2), S. 38–49. DOI:10.21511/ee.08(2).2017.04.
- Yu, X.; Abler, D. (2010): Incorporating zero and missing responses into CVM with open-ended bidding: willingness to pay for blue skies in Beijing. In: *Environment and Development Economics* 15 (5), S. 535–556. DOI: 10.1017/S1355770X10000197.

Zeller, V.; Thrän, D.; Zeymer, M.; Bürzle, B.; Adler, P.; Ponitka, J. et al. (2012): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung. DBFZ Report Nr. 13. Hg. v. Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum (DBFZ). Leipzig.

Zhang, X. (2012): Introduction of utilization of straw energy in China. 2. Internationale Fachtagung Strohenergie. Berlin, 30.03.2012.

ANHANG

Teilvorhaben 1: Charakterisierung der Strohpellets und verfahrenstechnische und ökobilanzielle Bewertungen

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 1 mit drei Arbeitspaketen zu technischen Untersuchungen, ökologischen Betrachtungen und koordinativen Aufgaben des Projektes hatte zunächst das Ziel, die Pellets als Substrat umfassend zu charakterisieren. Neben den Versuchen im Labor und Technikum erfolgte die Überprüfung der Eignung von Strohpellets als Substrat für Biogasanlagen durch die wissenschaftliche Begleitung der großtechnischen Versuche. Dabei wurden dem Anlagenbetreiber der großtechnischen Biogasanlage Daten aus den Technikumsversuchen und den Laboranalysen der großtechnischen Versuche an die Hand gegeben, um den Verlauf des großtechnischen Versuchs abschätzen zu können und Prozessstörungen frühzeitig zu erkennen.

Die Durchführung eigener Versuche im Technikumsmaßstab zur Pelletherstellung und Vergärung ermöglichte es, noch genauere Erkenntnisse zum Gasertragungspotential des Strohs und Pelletiereigenschaften im kontinuierlichen Versuchen zu ermitteln. Durch weitergehende physikalische und chemische Untersuchungen wurde die Eignung des Substrats für den Einsatz in Biogasanlagen eingeschätzt. Die Ökobilanzen für den Pelleteinsatz hatten das Ziel, die potentiellen Emissionswirkungen der unterschiedlichen Szenarien zu ermitteln und so die ökologische Vorteilhaftigkeit des Pelleteinsatzes zu eruieren.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Literaturrecherche und Szenario-Weiterentwicklung

Die Szenario-Weiterentwicklung und die Literaturrecherche erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Bearbeitern der Arbeitspaketen 2 und 3. Die Literaturrecherche wurde über die gesamte Projektlaufzeit fortgeführt und die gewonnenen Erkenntnisse bei der Projektbearbeitung berücksichtigt.

Arbeitspaket 1.1: Chemisch-physikalische Bewertung, Batch-Gasertragstest und Pelletierversuche

In diesem Arbeitspaket wurden elf Strohpelletproben hinsichtlich ihrer Eignung als Biogassubstrat untersucht. Außerdem wurden im Technikumsmaßstab zwei unterschiedliche Pelletproben hergestellt. Es erfolgte eine Beschreibung der Pellets anhand verschiedener Analyseparametern, wie dem Heizwert, dem Trockensubstanzgehalt, der Nährstoffzusammensetzung sowie der Zusammensetzung anhand der Weender Futtermittelanalyse. Außerdem wurden für den Einsatz im Fermenter wichtige Eigenschaften, wie die Partikelgrößenverteilung in den Pellets und das Auflösungsverhalten untersucht. Das Methan- und Biogasbildungspotenzial von Pellet- und Strohproben wurde nach der VDI-Richtlinie 4630 ermittelt.

Arbeitspaket 1.2: Entwicklung/Bau Versuchsanlage Technikum

Im Technikum der HAWK wurde eine Versuchsanlage entwickelt und gebaut, die der kontinuierlichen Vergärung von Substraten dient, die einen hohen TS-Gehalt im Fermenter erwarten lassen.

Arbeitspaket 1.3: Kontinuierliche Versuche Technikum der HAWK

Im Technikum der HAWK wurden kontinuierliche Versuche an der eigens entwickelten 10-zügigen Versuchsanlage durchgeführt. Von den geplanten 10 Varianten wurde die kontinuierliche Vergärung von 9 Varianten untersucht und ausgewertet. Eine der 10 Varianten konnte aufgrund technischer Probleme nicht untersucht werden und wurde nur theoretisch betrachtet.

Zusätzlich wurden drei Varianten untersucht, in denen der Einsatz von Strohpellets mit dem von Häckselstroh verglichen wurde. Diese Untersuchungsphasen dienten nur dem Vergleich der beiden Einsatzvarianten. Die Laufzeit war zu kurz, um einen vollständig repräsentativen Betrieb für die Substratmischungen zu erreichen.

Arbeitspaket 1.4: Versuche an der Praxisanlage

An der großtechnischen Biogasanlage in Relliehausen, die zu den Versuchswirtschaften der Universität Göttingen gehört wurden Strohpellets in zwei Versuchsphasen eingesetzt. Ziel war es einen Teil der Maissilage durch Strohpellets zu ersetzen. Die Versuche wurden seitens der HAWK in Göttingen wissenschaftlich begleitet.

Arbeitspaket 3: Ökobilanzielle Bewertung

Die ökobilanzielle Bewertung des Einsatzes von Strohpellets zur Biogaserzeugung erfolgte anhand der aufgestellten Szenarien und unterschiedlichen Bereitstellungspfade der Strohpellets. Durchgeführt wurden die

Modellierungen und Auswertungen der Prozessketten mithilfe der software *GaBi 10.6* der Firma Sphera Ltd. und den Ökobilanzierungsdatenbanken von Sphera und econinvent.

Arbeitspaket 4: Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse die in diesem Projekt gewonnen werden konnten wurden als Praxisleitfaden in Form einer Handreichung zusammengefasst und werden nach Abgabe des Projektberichts veröffentlicht.

Arbeitspaket 5: Projektkoordination

Die Projektkoordination oblag der HAWK. Auch wenn alle Projektpartner in Göttingen beheimatet sind, konnten die regelmäßigen Projekttreffen Corona-bedingt zweitweise nur online stattfinden. Somit haben der regelmäßige Austausch aller Beteiligten und die Abstimmungen bzgl. der Projektarbeiten, Zwischen- und Endberichte sowie des durchgeführten Webinars wie geplant stattgefunden. Darüber hinaus haben sich bei Bedarf auch einzelne Projektbeteiligte in weiteren Terminen abgesprochen. Unterstützt wurde die Projektkoordination durch das Teilvorhaben 2, Universität Göttingen.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Anhand der umfassenden Charakterisierung von elf extern erzeugten Pellets und zwei Proben aus eigener Herstellung konnte für Strohpellets als Biogassubstrat eine gute Eignung festgestellt werden. Strohpellets erreichen hohe TS und oTS Gehalte mit mittleren Schüttdichten von 500-560 kg/m³, sie weisen damit hohe Energiedichten und gute Lager- und Transportwürdigkeiten auf. In der Praxis sollte ein möglicher Einfluss auf den Wassergehalt, die Rührfähigkeit und den Strombedarf für die Rührwerke im Fermenter beachtet werden. Es konnte ein gutes Auflösungsverhalten von Strohpellets in Wasser nachgewiesen werden, welches im Fermenter von dessen Viskosität und TS-Gehalt abhängig ist. Die Viskosität kann durch höhere Pentosangehalte der Strohpellets beeinflusst werden. Die Nährstoffversorgung durch Strohpellets ist gut, jedoch weisen sie ein weites C/N Verhältnis auf. Die Partikelgrößen in den Pellets sind vom Pressverfahren abhängig und es konnte in den Gasertrags-Batchversuchen einen Einfluss auf die Methanbildungskinetik nachgewiesen werden. Ebenso wurde eine gute Abbaubarkeit von Cellulose und Hemicellulose und Methanerträge von 251 NL/kg FM bei Strohpellets festgestellt. Damit liegen die Methanerträge bezogen auf Frischmasse deutlich höher als bei Maissilage mit 121 NL/kg FM. Die Pellets zeigten tendenziell einen schnelleren Abbau im Vergleich zu Stroh.

Die kontinuierliche Vergärung von Strohpellets enthaltenden Substratmischungen wurde im Rahmen der Technikumsversuche erfolgreich durchgeführt. Die Varianten V1 und V2 sowie V6 und V7, die die großtechnischen Bedingungen der Praxisanlage in Relliehausen widerspiegeln, waren in der Durchführung erfolgreich. Die Ergebnisse des kontinuierlichen Versuchs lagen hinsichtlich des Methanertrags bei 96 % für die Varianten V1 und V2 und bei nahezu 100 % für die Varianten V6 und V7. Es konnte ermittelt werden, dass in der Praxis etwa 2,25 Mg Maissilage durch 1 Mg Strohpellets ersetzt werden können. Bei den anderen Substratmischungen wurde jeweils nur die Variante mit Strohpellets untersucht. Geringe Abweichungen des Methanertrags der kontinuierlichen Versuche von den anhand der Batchversuche prognostizierten zeigen sich vor allem bei der Covergärung mit eher leicht abbaubaren Substraten wie Zuckerrübe oder Maissilage. Bei der Covergärung von Strohpellets mit hohen Anteilen Rindergülle, blieben die Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche bis zu 20 % hinter der Prognose mittels Batchtest zurück. Dies ist möglicherweise auf zu geringe Verweilzeiten oder schlechte Verdaulichkeit der einzelnen Komponenten zurückzuführen.

Vergleichende Untersuchungen für den Einsatz von Strohpellets im Vergleich zu Häckselstroh zeigten für Häckselstroh und vergleichsweise grobe Pellets einen vergleichbaren Methanertrag. Allerdings war die Rührfähigkeit des Fermenters bei Einsatz von Häckselstroh deutlich stärker eingeschränkt.

Von großer Bedeutung für den Einsatz von Strohpellets ist es, den möglichen Anteil an Strohpellets im Vorfeld zu ermitteln. Dieser hängt sehr stark von den Co-Substraten, der verbauten Rührtechnik und dem Oberflächenwassermanagement im Fermenter ab. Grundsätzlich ist die Co-Vergärung mit leicht abbaubaren Substraten mit vergleichsweise hohem Wassergehalt günstig (z.B. Zuckerrübe). Daher ist es notwendig, vor dem Einsatz von Strohpellets eine Abschätzung des zu erwartenden TS-Gehalts im Fermenter vorzunehmen. Seitens der HAWK wurde ein EXCEL Tool entwickelt, das dies ermöglicht.

Die ökobilanzielle Bewertung der Prozessketten des Strohpelleteinsatzes zeigt auf, dass je nach Substratmix und Bereitstellungskette der Strohpellets in einigen Umweltwirkungskategorien Emissionsminderungen im Vergleich zum Ausgangs-Substratmix ohne Strohpellets erreicht werden können. Maßgebliche Parameter sind die gewählte Pelletier-Technik, die Transportentfernungen der Stroh-, und Pelletbereitstellung sowie die Gärrestlogistik. Zudem fällt auf, dass im Substratmix der Einsatzmenge von Wirtschaftsdünger die Gesamtemissionen in den einzelnen Wirkungskategorien stark beeinflusst, sodass die Bandbreiten an Emissionen in den jeweiligen Wirkungskategorien und innerhalb der Substratzusammensetzungen teilweise groß sind. Die ökologischen Auswirkungen der Nutzung von Strohpellets als Substrat hängen deshalb immer

mit den zugrunde gelegten Randbedingungen wie der Wahl der Allokationsmethode für den Getreideanbau oder den Substrat-Mix zusammen.

Weitere Ergebnisse zu allen Arbeitspaketen finden sich im ausführlichen Abschlussbericht.

Teilvorhaben 2: Sozioökonomische Bewertungen

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 2 war es den Einsatz von Strohpellets in der Biogaserzeugung sozioökonomisch zu bewerten. Die ökonomische Bewertung in AP 2.1 setzte sich aus einer Vollkostenbetrachtung entlang der Prozesskette von der Pelletbeschaffung über die Einbringung, Vergärung und den Gärresttransport und die Ermittlung der Lagerenten für Strohpellets zusammen. Die Annahmen hierfür wurden aus den Ergebnissen der AP 1 und AP 3, der Betreiberbefragung (AP 2.2) und Daten aus der Literatur gestützt. In AP 2.2 erfolgte eine Befragung von Biogasanlagenbetreibern in Deutschland zur Akzeptanz des Einsatzes von Strohpellets in Biogasanlagen. Darüber hinaus wurde die Zahlungsbereitschaft für Strohpellets in einem zweistufigen Verfahren ermittelt. Ergänzend wurde eine Kurzumfrage mit Pelletierer und Pelletvermarktern durchgeführt. Gemeinsam mit den Teilvorhaben 1 und 3 wurden abschließend Handlungsempfehlungen für die Praxis zusammengefasst, die insbesondere Biogasanlagenbetreibern von Bestandsanlagen Wege aufzuzeigen soll, die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit ihrer Anlage zu verbessern.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Literaturanalyse

Die Szenarioentwicklung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den AP 1 und AP 3. Die Literaturanalyse wurde über die gesamte Projektlaufzeit fortgeführt und die gewonnenen Erkenntnisse bei der Projektbearbeitung berücksichtigt.

Arbeitspaket 2.1: Ökonomische Bewertung

Prozesskostenbetrachtung: Ermittlung der Vollkosten der mobilen und teil-mobilen Pelletierung, Arbeitszeiterfassung Fütterung von Strohpellets, Eigenstrombedarfsmessung Einzelsubstrate, Ermittlung der Gewinnänderung bei Einsatz von Strohpellets auf Basis der Szenarien Lagerentenermittlung: Vorabberechnung der Leistungen und Kosten für Silomais, GPS-Getreide sowie Roggen und Weizen plus Strohpellets aus mobiler und teil-mobiler Pelletierung und Häckselstroh, Berechnung der Transportkosten einzelner Substrate, Berechnung der Lagerenten.

Arbeitspaket 2.2: Akzeptanzstudie

Im Rahmen der Akzeptanzstudie wurde eine Online-Umfrage unter Biogasanlagenbetreibern in Deutschland zur Akzeptanz des Strohpelleteinsatzes der Biogaserzeugung durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Zahlungsbereitschaft im Rahmen der Studie ermittelt. Die Auswertung erfolgte anhand uni-, bi und multivariater Verfahren sowie einer Strukturgleichungsmodellierung. Zusätzlich wurde eine Kurzumfrage unter Strohpelletierern und -vermarktern durchgeführt.

Arbeitspaket 4: Handlungsempfehlungen

Zusammenfassen der Ergebnisse und Ableiten von Handlungsempfehlungen für die Praxis (Beratung, Politik, Pellethersteller und -vermarkter, Biogasanlagenbetreiber etc.).

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die ökonomische Bewertung hat gezeigt, dass Strohpellets unter gewissen Voraussetzungen wie hohen Substratkosten, Substratknappheit und knappem Lagerraum für Gärrest eine gute Ergänzung für den Substratmix von Biogasanlagen darstellen können. Die Kosten des Strohpelleteinsatzes in der Biogasanlage sind wesentlich durch die Kosten des Pelletiervorgangs bestimmt, dessen Hauptkostentreiber die Energie-, Fix- und Arbeitserledigungskosten sind. Mittlerweile gibt es verschiedene Systeme, die für die Herstellung von Strohpellets zur Verfügung stehen. Das noch relativ neue, mobile Pelletierverfahren, das im Rahmen des Projektes anhand einer Krone Premos intensiv beobachtet wurde, stellt sich insgesamt als die kostengünstigste Variante dar und bietet zudem – zumindest bei diesem Maschinenmodell - die Möglichkeit teil-mobil aus Quaderballen pelletieren zu können und die Auslastung der Maschine zu verbessern. Weitere Pelletierverfahren wie die stationäre Pelletierung oder teil-mobile Containeranlagen mit einer Pelletierkapazität von 1 t/h wiesen insgesamt höhere Kosten auf, wobei auch hier in Abhängigkeit des Energieträgers Potential zur Kostenreduzierung vorhanden sind. Darüber hinaus zu berücksichtigen, dass bei diesen beiden Verfahren das Häckseln und Entstauben des Strohs vorweggeschaltet ist und das Endprodukt 8 mm Pellets sind. Die Krone Premos arbeitet ohne Zerkleinerung und pelletiert das Material direkt zu 16 mm Pellets.

Die Datenerhebungen zur Fütterung von Strohpellets haben gezeigt, dass aufgrund des Austauschverhältnisses von Silomais zu Strohpellets von 1:0:45 bezogen auf den Methanertrag pro Tonne

Frischmasse keine Unterschiede im Arbeitszeitbedarf bestehen. Dies hängt jedoch wesentlich von dem jeweiligen Lagerort und dessen Entfernung vom Eintragungssystem ab.

Anhand der Szenariobetrachtung wurde deutlich, dass Strohpellets unter günstigen Pelletierbedingungen die Möglichkeit bieten, die durchschnittlichen Substratkosten zu reduzieren. Dies setzt jedoch die Annahme voraus, dass die Nährstoffe der Strohabfuhr über den Gärrest zurückgeführt werden und entsprechend nicht monetär bewertet werden. Bei Verwendung der teil-mobilen Pelletierung und insbesondere bei Verwendung von Pellets aus Zukaufstroh, bei dem die Nährstoffzugskosten und der Gewinn des Strohverkäufers enthalten sind, nimmt die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung in allen Szenarien mit steigender Pelletmenge im Substratmix ab. Die eingesparten Ausbringkosten für den Gärrest, die mit 6,1 €/m³ bewertete Lagerraumersparnis ändern daran im Verhältnis eher wenig, da der Eigenstrombedarf durch den steigenden TS-Gehalt und den damit verbundenem, steigendem Rührbedarf entsprechend zunimmt.

Die Lagerenten zeigen, dass bei Strohpellets im Vergleich zu etablierten Substraten wie Silomais und GPS-Getreide aufgrund der höheren Transportwürdigkeit längere Transportstrecken realisiert werden können. Unter Annahme der Vollkostendeckung wird bis zu Entfernungen zwischen 50 km und 80 km bei mobil hergestellten Pellets eine positive Lagerente realisiert. Wichtig ist dabei, dass die Pelletierkapazität im mobilen Verfahren zum Abfahrge spann passt. Bei hohen Getreidepreisen kann der Erlös aus der Vermarktung oder innerbetrieblichen Verwertung im Rahmen einer Koppelnutzung dazu verwendet werden, die Kosten der Strohpelletierung in gewisser Hinsicht mitzutragen.

Zu guter Letzt zeigen die Gleichgewichtspreise von Strohpellets, dass diese insbesondere bei hohen Gärrestverbringungskosten und hohen Substratpreisen an Bedeutung gewinnen können, da der Grenzpreis oberhalb der realisierbaren Pelletierkosten liegt. Dies gilt nicht nur im Vergleich zum Substrat Silomais, sondern insbesondere auch im Vergleich zu Getreidekorn, das nach wie vor von vielen Anlagenbetreibern als Substrat eingesetzt wird und in den letzten drei Jahren verhältnismäßig teuer im Zukauf war.

Aus den deskriptiven Ergebnissen der Akzeptanzstudie geht hervor, dass Strohpellets aktuell keine Rolle als Substrat in der Biogaserzeugung spielen und Anlagenbetreiber*innen einen geringen Wissensstand über die Vergärungseigenschaften und Prieswürdigkeit von Strohpellets im Vergleich zu etablierten Substraten haben. Anhand der Clusteranalyse und dem Strukturmodell der PLS-Analyse konnte gezeigt werden, dass neben den Eigenschaften der Innovation Strohpellets selbst, insbesondere die Faktoren Risikoeinstellung und Innovationsbereitschaft eine bedeutende Rolle für die Akzeptanz von Strohpellets unter landwirtschaftlichen Biogasanlagenbetreibern in Deutschland einnehmen. Zur Etablierung von Strohpellets als zukünftiges Biogassubstrat sind daher zunächst Anlagenbetreiber*innen mit einer höheren Innovations- und Risikobereitschaft vom Strohpelleteinsatz zu überzeugen, um positive Praxisbeispiele zu erzeugen, die anderen Betreibern als Vorbild dienen können. Hier spielt insbesondere der soziale Einfluss bzw. ein bereits häufig in der Landwirtschaft beobachteter „Nachahmungseffekt“ eine besondere Rolle. Gestützt werden könnte dies durch politische Anreize über Sondervergütungen für Stroh(-pellets), die das finanzielle Risiko mindern und so auch risiko-aversere Betriebe ermutigt Strohpellets in ihrer Biogasanlage einzusetzen.

Teilvorhaben 3: Praxisversuche

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

In dem Verbundvorhaben StrohPELLgas - nachhaltiger Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung haben die Eigenbetriebe der Georg-August-Universität Göttingen das Teilvorhaben Praxisversuche bearbeitet. Das Teilvorhaben sollte Antworten darauf geben, inwiefern repräsentative Anlagen den Einsatz von Strohpellets praktisch umsetzen. Gibt es technische Probleme oder Grenzen und sind die labortechnisch ermittelten Gaspotenziale in der Praxis zu erzielen.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1.4

Die Versuche in der Praxisanlage des Versuchsgutes Relliehausen verliefen nach Störungen durch höhere Gewalt am Ende weitgehend nach Plan. In vier Erntephase konnten vielfältige Erfahrungen zum Pelletieren von Stroh mit unterschiedlichen Reife- und Feuchtigkeitsgehalten gewonnen werden. Die Transportkette einschließlich der Zuführung zu dem Feststoff dosieren erwies sich in den drei Fütterungsphasen 2020 und 2021 wie erhofft unproblematisch. Das erzielte Gaspotenzial entsprach zwar nicht den labortechnischen Werten, ist aber mit dem Ersatz von 2,1 t Mais durch 1 t Pellets in vielen Situationen wettbewerbsfähig, auch wenn im Normalbetrieb meist Silage in der Regel geringere Gasgestehungskosten verursacht. Die zu erwartende Trockensubstanzerhöhung konnte gemessen und der daraus resultierende höhere Rührbedarf durch Messung der Leistungsaufnahme dokumentiert werden.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Strohpellets stellen eine Möglichkeit dar, einen weitverbreitet verfügbaren nur bedingt genutzten Rohstoff energetisch über die Vergärung in Biogasanlagen zu nutzen. Als Nebenprodukt verfügt es über einen relativ günstigen CO₂ Footprint. Dadurch sind Pellet sehr interessant für Verwertungswege, in denen ein niedriger CO₂ Footprint honoriert wird. Dazu zählt im Moment insbesondere der Mobilitätssektor. Eine starke Verwendung für die LNG-Produktion ist also zu erwarten, zumal in diesem Bereich der starke Einsatz von Gülle der Rührfähigkeit häufig nicht zu enge Grenzen setzt. Aber auch in herkömmlichen Verwertungswege werden Pellet immer dann eine interessante Alternative darstellen, wenn Abweichungen vom normalen laufenden Betrieb entstehen. Hierzu zählen Ertragseinbußen, die durch Pellets kurzfristig ausgeglichen werden können. Weiterhin kann mit dem Einsatz von Strohpellet sehr flexibel auf plötzlich eintretende Hochpreisphasen reagiert werden, ohne dass das Lagervolumen eine zusätzlich starke Inanspruchnahme erfährt. Insgesamt können Landwirte ihre Vorratslagerhaltung geringer halten, weil quasi jede Anlage in Deutschland kurzfristige Unterdeckung an Substraten über Pellets abdecken kann.

Pellets sind also eine sehr gute Möglichkeit, flexibel auf Veränderungen zu reagieren. Damit dienen sie in hervorragender Weise der zukünftigen Aufgabe der Biogasproduktion, Schwankungen der anderen erneuerbaren Energien auszugleichen.