

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

GülleHebel – Fermenter- und Verfahrenskonzept für die breitenwirksame wirtschaftliche Erschließung von kleinen Güllemengen durch Co-Vergärung mit Stroh und Spelzen

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer IKTS

Förderkennzeichen:

2220WD011X

Laufzeit:

01.01.2022 bis 30.06.2024

Monat der Erstellung:

10/2024

Datum der Veröffentlichung:

07.02.2025

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 | 2 |
| 1. | Aufgabenstellung | 2 |
| 2. | Planung und Ablauf des Vorhabens | 3 |
| 3. | Resümee der wesentlichen Ergebnisse | 4 |
| | a) Arbeitspakete und Meilensteine | 4 |
| | b) Zusammenfassung | 5 |
| II. | Ausführliche Darstellung der Ergebnisse | 7 |
| 1. | Erzielte Ergebnisse | 7 |
| | Arbeitspaket 1: Stoffstromcharakterisierung | 7 |
| | Arbeitspaket 2: Substratkonditionierung | 18 |
| | Arbeitspaket 3: Reaktorkonzept und Durchmischung..... | 31 |
| | Arbeitspaket 4: Kleintechnische Vergärung | 45 |
| | Arbeitspaket 5: Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen | 55 |
| 2. | Verwertung..... | 61 |
| | a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen..... | 61 |
| | b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 61 |
| | c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 61 |
| | d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit | 61 |
| 3. | Erkenntnisse von Dritten | 61 |
| 4. | Veröffentlichungen | 61 |

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

In Deutschland fallen jährlich ca. 120 Mio. t Wirtschaftsdünger an. Den deutlich größten Anteil stellen dabei Rindergülle (65 %) und Schweinegülle (19%) dar (SCHWARZ 2020). Laut STINNER (2020) werden bisher nur 30 % der Wirtschaftsdünger energetisch und klimaschonend in Biogasanlagen genutzt. Ursache hierfür ist, dass sich die Installation einer Biogasanlage häufig nicht lohnt, da an vielen Standorten zu geringe Mengen an Gülle verfügbar sind und/oder Transportentfernungen für den Zusammenschluss mehrerer Stallanlagen zu groß sind.

Das Projekt „GülleHebel“ möchte mit Hilfe einer gezielten Input-Aufstockung durch Reststoffe aus der Getreideproduktion (Stroh, Ausputz, Spelzen) für Standorte mit geringem Gülleaufkommen (z.B. 100 bis 200 Großvieheinheiten (GV) Milchkuh) den Gasertrag derart erhöhen, dass eine wirtschaftlich tragfähige Ausbaugröße im Marktsegment der Güllekleinanlagen erreicht werden kann. Grundlage dieser Überlegung ist, dass die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen u.a. stark von der Ausbaugröße abhängt. Die Stromgestehungskosten für Güllekleinanlagen sinken mit steigender Ausbaugröße von ca. 40 ct/kWh für Anlagen < 30 kW auf ca. 24 ct/kWh (75 kW) bis auf 20 ct/kWh (150 kW) (MAJER et al. 2019).

Ein Rinderstall mit z.B. 110 GV kommt mit 1850 m³ Gülle pro Jahr auf ein Gaspotenzial für eine Verstromungskapazität von knapp 18 kW_{el}. Über die Beimengung von z.B. 20 % Stroh kann eine solche Anlage bis zu 75 kW_{el} erreichen, da der auf Frischmasse bezogene Gasertrag von Stroh mehr als 10-mal so hoch liegt wie der von Gülle. Erst durch die Nutzung der Co-Substrate wird die ursprünglich zu kleine BGA auf ein Niveau „gehebelt“, welches sich wirtschaftlich darstellen lässt und welches neben neuen Güllemengen auch noch weitere landwirtschaftliche Reststoffe in die energetische Nutzung überführt. Weil dabei gezielt auf das Konzept der dezentralen Vergärung im vergleichsweise kleinen Maßstab gesetzt wird, kann mit einem sehr geringen Transportaufwand sowohl für die Wirtschaftsdünger als auch für die Co-Substrate gerechnet werden.

Allerdings ergeben sich durch eine signifikante Beimischung strohartiger Co-Substrate in Güllekleinanlagen ernsthafte Herausforderungen, welche mit Hilfe des Projektes adressiert werden sollten. So erhöht sich der Feststoffgehalt der Inputsubstrate auf bis zu 25% in der Mischung. Für die Vergärung derartiger Substrate bedarf es einer robusten und effektiven Fermenterkonstruktion. Prädestiniert dafür ist das NatUrgas®-Fermentersystem des Projektpartners Ingenieurbüro Rückert GmbH, welches innerhalb des Projektes erstmalig für diesen Größenmaßstab entwickelt, angepasst und bewertet werden sollte. Trotz des darin enthaltenen sehr effektiven Paddelrührsystems, welches sich in größerskaligen Anwendungen bereits bewährt hat, sind nicht alle Substratmischungen unbehandelt einsetzbar (Faserlängen, Abbaugrad). Eine gezielte Beeinflussung von Abbaugrad und Gesamtviskosität durch moderaten Substratvoraufschluss für die Reststoffe aus dem Bereich Getreideproduktion war ein weiteres Projektziel. Dabei sollte auf möglichst einfache und kostengünstige Methoden gesetzt werden, um ein Optimum zwischen Aufwand und notwendiger Wirkung zu finden.

Insgesamt sollten durch das Projekt die notwendigen verfahrenstechnischen und technologischen Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Co-Vergärung von mindestens 80 % Gülle und maximal 20 % Reststoffen aus der Getreideproduktion in Güllekleinanlagen untersucht und im kleintechnischen Maßstab getestet werden. Potenziell können dadurch allein bei der Milchviehhaltung mindestens 4 Mio. t Gülle pro Jahr neu dezentral erschlossen werden und mit bis zu 1 Mio. t Reststoffen ergänzt werden. Daraus allein ergibt sich ein Energiepotenzial von etwa 170 MW_{el}, welches durch den angestrebten „GülleHebel“ erschlossen werden kann. Ähnliche Größenordnungen sind für die Bereiche Schweinezucht und Rinderhaltung (ohne Milchvieh) zu erwarten.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Bearbeitung der Aufgabenstellungen fand inklusive einer kostenneutralen Verlängerung über 2,5 Jahre statt. In Tabelle 1 ist der Arbeits- und Zeitplan dargestellt.

Tabelle 1: Arbeits- und Zeitplan des Projektes GülleHebel

| Arbeitspakete Projekt | | 2022 | | | | 2023 | | | | 2024 | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1. QT | 2. QT | 3. QT | 4. QT | 1. QT | 2. QT | 3. QT | 4. QT | 1. QT | 2. QT | | | | | | | | |
| AP | | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J |
| 1 | Stoffstromcharakterisierung | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | Bewertung Stoffstromangebot auf kleineren Betrieben mit Viehhaltung (inkl. Gestehungs- und Bezugskosten) und Beprobung Wirtschaftsdünger/Reststoffe | Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2 | Analyse der Proben insbesondere hinsichtlich rheologischer, granulometrischer Parameter und Gaserträge sowie Bilanz des TR-Abbaus bzw. erreichbare End-TR-Werte für verschiedene Mischungen | IKTS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.3 | Auswahl und quantitative Festlegung von relevanten Stoffmischungen für die weiteren Untersuchungen | IKTS, Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Substratkonditionierung | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.1 | Gezielte Veränderung der rheologischen und granulometrischen Eigenschaften von Reststoffen der Getreideproduktion und Festmist durch robuste mechanische Zerkleinerung (Labor und Kleintechnik) | IKTS, Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | Analytische Bewertung des Zerkleinerungserfolges (Proben aus 2.1 und 2.3) - Partikelgröße, Gasertrag und Viskosität in def. Güllemischungen | IKTS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.3 | Auswahl und Bewertung von geeigneten großtechnischen Aggregaten sowie Konzept für die optimale Einbindung in das Gesamtverfahren | Rückert, IKTS, UAN | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Reaktorkonzept und Durchmischung | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 | Systematische Untersuchung zur Entwicklung der Viskosität in verschiedenen Mischungen (Gülle + Reststoffe) in Abhängigkeit von Mischverhältnis, Vorzerkleinerung, Mischdauer, Vergärungszustand und Vorseparation | IKTS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2 | Prozessstomographische Untersuchungen zur Einmischung von verschiedenen trockenen Reststoffen in Gülle oder Gärsubstrat mittels liegender Paddelrührer | IKTS, Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.3 | Ableitung von Rührsystem und Rührgeometrie für eine kleintechnische Versuchsanlage. Konzeption für kleintechnische Versuche | Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Kleintechnische Vergärung | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.1 | Umbau und Adaption eines bestehenden Paddelreaktors für die Nutzung als kleintechnischer Fermenter | Rückert, IKTS, UAN | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.2 | Durchführung kleintechnischer Fermentationsversuche (Maximierung Feststoffgehalt), Analytische Bewertung und Prozessbilanzierung | IKTS, Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.3 | Erstellung großtechnisches Konzept zur Vergärung von Gülle mit Reststoffen oder Festmist (Dimensionierung, grober Aufstellplan, Aggregate, Kostenschätzung) | Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen (LCA) | IKTS, Rückert | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Koordination, Projekttreffen, Veröffentlichungen, Berichte | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

| Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag) | Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag) | Zielerreichung |
|---|--|--|
| AP 1 Stoffstromcharakterisierung | 01/2022 bis 09/2023 | <ul style="list-style-type: none"> • Befragung durchgeführt, Rücklauf gering, trotzdem wichtige Zahlen abgeleitet • Beprobung und Erfassung wichtiger Stoffkenngrößen • Energiepotenzial pro Betrieb und mögliche sowie notwendige Ergänzung von Co-Substraten aufgezeigt • Bilanzierung des TR-Abbaus von ausgewählten strohartigen Co-Substraten experimentell durchgeführt → maximale Zugabemengen abgeleitet |
| AP 2 Substratkonditionierung | 05/2022 bis 09/2023 | <ul style="list-style-type: none"> • Systematische Zerkleinerung von Stroh und Heu mit verschiedenen mechanischen Verfahren • Erfassung der Veränderung von Granulometrie sowie Gasertrag • Empfehlung für mindest-Zerkleinerungsgrad • Recherche zu relevanten großtechnischen Zerkleinerungsaggregaten für Stroh, Beprobung und Bewertung • Einordnung von kommerziell erhältlichen Produkten für Einstreu oder als Biogas-Co-Substrat (Partikelgröße und Biogasertrag) |
| AP 3 Reaktorkonzept und Durchmischung | 04/2022 bis 09/2023 | <ul style="list-style-type: none"> • Mischversuche mit Gülle + Stroh durchgeführt • Maximale Zumischung von Stroh liegt bei ca. 4,5 % • Vorzerkleinerung wirkt sich verbessernd aus, aber maximale Zugabemenge kann kaum gesteigert werden • Vergärung der Strohbestandteile führt zu großer Senkung der Viskosität → bis 20 % Strohzugabe möglich • Klassische runde Reaktorgeometrie mit liegenden Paddelrührwerken kombiniert → Modellreaktor für Prozesstomographie hergestellt und betrieben • Lokalisierung von schlecht durchmischten Bereichen sowie Empfehlungen für Drehrichtung und Paddelstellung abgeleitet |
| AP 4 Kleintechnische Vergärung | 10/2022 bis 05/2024 | <ul style="list-style-type: none"> • Anpassung eines 800 Liter – Fermenters für die feststoffreiche Vergärung von Stroh und Gülle • Separater Eintrag von Gülle (mit Pumpe) und Stroh (mit Schnecke) • Erfolgreiche Vergärung von 16,7 % Strohhacksel in 83,3 % Gülle, stabile Biologie, sicherer Gasaustrag und plausible Gaserträge • Erhöhung von Raumbelastung und Gasausbeute um Faktor 2,7 und 2,5 (durch Strohzugabe) • Grenzviskosität bei ca. 13 % Feststoffgehalt im Fermenter erreicht |
| AP 5 Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen | 02/2024 bis 06/2024 | <ul style="list-style-type: none"> • Aus Sicht der THG-Bilanz kann die kWh Strom CO₂-neutral oder sogar negativ erzeugt werden • Unter Berücksichtigung der THG-Einsparung durch Güllevergärung vs. Gülle-Management ohne BGA wird pro kWh_{el} ca. 0,25 kg CO₂-äq eingespart → sollte eigentlich bonifiziert werden • Eine Wirtschaftlichkeit ist aufgrund der hohen Investitionskosten, aber insbesondere der hohen Kosten für Stroh (100 EUR/t) aktuell nicht gegeben → höhere Vergütung (für Strom und THG-Vermeidung) und/oder geringere Substratkosten würden helfen |

| Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag) | Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag) | Zielerreichung |
|---|--|---|
| M 1 | 09/2022 | <ul style="list-style-type: none"> Projektspezifische Stoffströme sind charakterisiert und hinsichtlich der Relevanz bewertet (erledigt) Mischungen (Wirtschaftsdünger + Reststoff) für die weiteren Untersuchungen sind hinsichtlich Art und Mischungsverhältnis festgelegt (erledigt) |
| M 2 | 09/2023 | <ul style="list-style-type: none"> Voruntersuchungen zur Substratkonditionierung abgeschlossen → Zielgrößen und Zerkleinerungsprinzip festgelegt (erledigt) Einmischbedingungen und Rührintensität für sichere Durchmischung von Gülle und Co-Substraten ermittelt → Rührsystem konzipiert (erledigt) Kleintechnische Versuchsanlage an projektspezifische Anforderungen angepasst und umgebaut → einsatzbereit für kleintechnische Vergärungsversuche (erledigt) |

b) Zusammenfassung

Im Projekt GülleHebel wurde die Machbarkeit einer signifikanten Zugabe von Stroh oder ähnlichen Reststoffen in Güllekleinanlagen für die deutliche Erhöhung der Anlagenleistung hinsichtlich des Biogasertrages untersucht. Den Ausgang bildete die Datenerfassung für ausgewählte landwirtschaftliche Betriebe hinsichtlich Rohstoffangebot und Qualität. Die betrachteten Betriebe lagen im Größenordnungsbereich von 40 bis 240 ha Betriebsfläche und einem Viehbestand von 50 bis 270 GVE (insbesondere Rinder bzw. Milchvieh). Mit den dort vorhandenen Gülle- und Festmismengen sowie den ermittelten Gasertragspotenzialen könnten theoretisch nur sehr kleine Biogasanlagen von 10 bis 45 kW_{el} betrieben werden. Ab einem Schwellenwert von etwa 23 kW_{el}, welche aus den vorhandenen Güllemengen generiert werden können, ist es bilanziell möglich durch eine Beimengung von bis zu 20 % Stroh oder ähnlichen Reststoffen mindestens 75 kW_{el} zu erreichen.

Allerdings zeigten die Rohstoffanalysen hinsichtlich der Partikelgröße, dass zum einen eine grobe Vorzerkleinerung nötig ist, um die Abbaubarkeit und das Handling beim Mischen und Pumpen zu verbessern. Zum anderen wurde deutlich, dass ein Anmischen von Gülle und trockenen Reststoffen bezüglich der Viskosität stark begrenzt ist. Ab einem Strohanteil von nur 4,5 % in Gülle verliert die Mischung die Eigenschaft einer misch- und pumpfähigen Suspension und ähnelt eher einem Schüttgut. Um dennoch höhere Zugabemengen an Stroh realisieren zu können, wurde der Feststoffabbau während der Vergärung sowie dessen Einfluss auf die Viskosität näher untersucht. Die Verringerung des Feststoffgehaltes um ca. 40 % sowie die Abnahme der Viskosität um mindestens 50 % während der Vergärung schafft die Möglichkeit, dass je nach Feststoffgehalt der Gülle bis zu 20 % Strohzugabe realisiert werden können ohne eine Überlastung von Rührung oder Pumpentechnik. Die Voraussetzungen dafür sind eine getrennte Zuführung von Gülle und Stroh sowie ein ausreichend robustes Rührsystem.

Als Spezialist für Fermenter mit robusten Paddelrührwerken hat sich der Projektpartner und Unterauftragnehmer Ingenieurbüro Rückert GmbH in das Projekt eingebracht. Für die Durchführung von Rühr- und Mischversuchen wurde ein Modellreaktor für die Prozessstomografie entwickelt und hergestellt. Die damit realisierten Untersuchungen erbrachten wichtige Erkenntnisse für die Mischgüte in Rundfermentern mit liegenden Paddelrührwerken.

Für den kleintechnischen Nachweis der Vergärung von größeren Strohanteilen in Gülle wurde ein liegender 800 Liter Fermenter mit Paddelrührwerk angepasst. Nach Einfahrphase und Steigerung des Feststoffgehaltes im Fermenter konnte ein stabiler Betrieb für 16,7 % Strohanteil in Rindergülle nachgewiesen werden. Die Raumbelastung konnte dadurch um den Faktor 2,7 gesteigert werden. Der entsprechende Gasertrag konnte ebenfalls um den Faktor 2 bis 2,5 gesteigert werden. Die etwas geringere Steigerung gegenüber der Raumbelastung resultierte aus der geringeren Abbaugeschwindigkeit des hierbei verwendeten Strohs.

Für die Steigerung der Biogasausbeute sollte die mittlere Faserlänge auf < 5 mm verringert werden. Für eine sichere Verhinderung von Verzopfungen genügt die Begrenzung der maximalen Faserlänge auf 10 cm. Dies entspricht der Behandlung mittels Schneidmühle und einem 8 mm Sieb. Für die einfache und zuverlässige Strohzerkleinerung im praktischen Maßstab konnten verschiedene Prallmühlen recherchiert und bewertet werden, welche die empfohlenen Zerkleinerungsgrade gut erreichen.

Aus Sicht der Ökobilanzierung ist die Erschließung von zusätzlichen Güllemengen für die Biogaserzeugung sehr positiv zu bewerten, da gegenüber der reinen Güllelagerung- und Ausbringung erhebliche Mengen an THG-Emissionen eingespart werden. Für die Kombination aus 15 % Stroh + 85 % Gülle konnte darüber hinaus eine CO₂-neutrale Stromerzeugung über den Weg der Vergärung bilanziert werden. Beide Effekte zusammen führen theoretisch sogar zu negativen Emissionen von 0,25 kg CO₂-äq pro erzeugter kWh Strom. Dieser Effekt könnte und sollte bei der Bemessung der Stromvergütung berücksichtigt werden (z.B. durch Anrechnung von

CO₂-Zertifikaten). Andernfalls ist die Wirtschaftlichkeit des GülleHebel-Konzeptes sowie der Vergärung von kleinen Güllemengen schwer darstellbar. Zum einen sind die Investitions- und damit Abschreibungskosten relativ hoch. Zum anderen ist insbesondere Stroh als Einsatzstoff kaum für unter 100 EUR pro t zu erwerben, was die Stromgestehungskosten deutlich erhöht. Je nach individuellen Standortbedingungen wäre durch Variation aller Einflussgrößen (Geringere Investition, niedrigerer Strohpreis bzw. alternatives Substrat und höhere Erlöse (THG-Bonus)) auch eine finanziell tragbare Option denkbar.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Stoffstromcharakterisierung

Für die Erfassung von betriebspezifischen Daten wurden viele unterschiedliche Kommunikationswege und Netzwerke aktiviert. Neben dem Versuch über Adresslisten und Direktbefragung an Datensätze zu gelangen, wurde auch ein online Fragebogen entworfen, welcher ein niedrigschwelliges Angebot zur Teilnahme darstellte.

Zunächst wurden verschiedene Landesbauernverbände angefragt. Mangels Bewusstsein der Relevanz des Themas war die Unterstützung sehr gering oder gar nicht vorhanden. Zwar führte ein direkter Kontakt zum Thüringer Bauernverband zu einer Weiterleitung der Informationen und Umfrage an ausgewählte Mitglieder, jedoch ohne Rücklauf.

Weiterhin wurden ausgewählte Hochschulen auf mehreren Wegen kontaktiert, sowohl über die allgemeine E-Mail Adresse, als auch über Professoren vor Ort direkt und über das schwarze Brett, welches die Studierenden direkt erreicht. Eine Rückmeldung blieb leider aus. Keine Rückmeldung kam außerdem von einem Verein zum Netzwerk für Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie.

Online wurde der Link zur Umfrage über die sozialen Medien wie WhatsApp-Statusmeldungen und Facebook verteilt und gepostet. Auf Facebook vorrangig in Gruppen, die Landwirte als Mitglieder haben. Außerdem wurden Landwirte direkt angesprochen. Gemeinsam mit dem Fachverband Biogas e.V. wurde ein Anzeigetext mit Kontaktmöglichkeit zum Projekt erarbeitet, welcher in einem Mitglieder-Rundschreiben veröffentlicht wurde. Problem hierbei war offensichtlich, dass die Mitglieder des FVB i.d.R. bereits Biogasanlagen betreiben und dort wenig Optimierungspotenzial im Bestand sehen. Ähnlich war die Einschätzung des bayrischen Bauernverbandes.

Insgesamt war der Rücklauf sehr gering, was zum einen mit dem Zusatzaufwand der Befragungsteilnahme und zum anderen mit Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes zu tun hatte. In diesem Bereich agieren Landwirte generell vorsichtig. Kontaktlisten von potenziellen Anwendern waren daher nicht zu erhalten.

Aus diesem Grund wurde versucht, auf der Messe EnergyDecentral und EURO-Tier im November 2022 am Stand der FNR das Projekt und die Befragung weiter bekannt zu machen. Neben Poster und Stand-Akquise wurden Flyer mit dem QR-Code zur Befragung auf der Messe verteilt sowie eine begleitende Kampagne auf der Plattform linkedIN durchgeführt.

Trotz guter Gespräche auf der Messe vor Ort sowie Informationsstreuung durch weitere Multiplikatoren (z.B. Hinweis im Rundbrief des Bundesverbandes Deutscher Milchviehhalter) und einer guten Resonanz und Weiterleitung auf linkedIN erwies sich der Rücklauf von ausgefüllten Fragebögen als sehr gering.

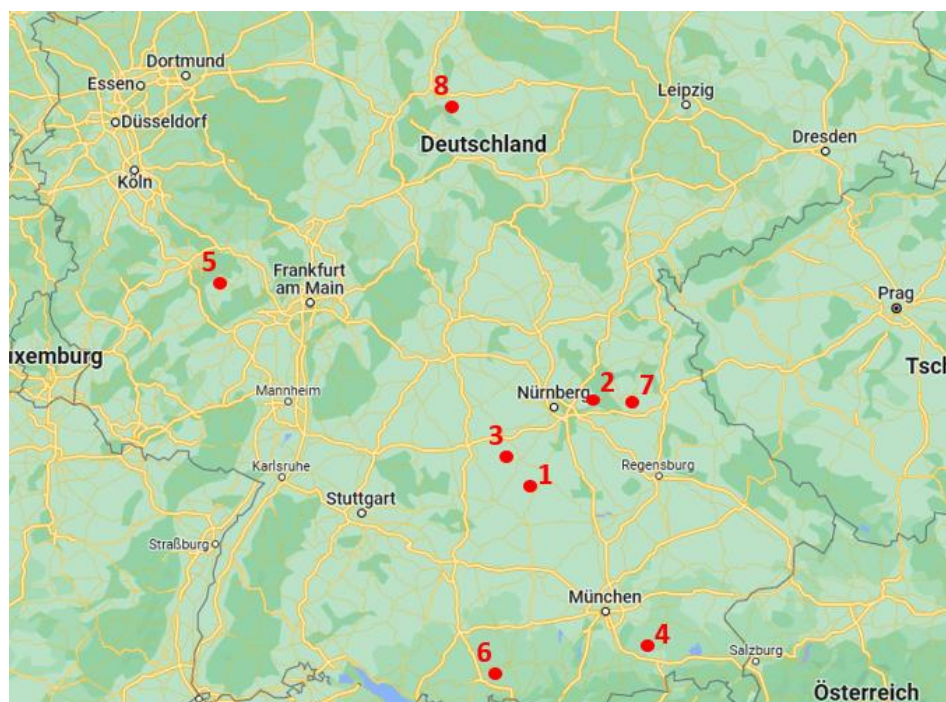


Abbildung 1: Geografische Lage der akquirierten Betriebe

Insgesamt konnten trotz aller Bemühungen nur 8 Betriebe akquiriert werden, deren Standorte in Abbildung 1 dargestellt sind. Erwartungsgemäß liegen besonders in Bayern die meisten Betriebe mit kleinerem Viehbestand, aufgrund der dortigen Agrarstruktur mit eher kleineren und mittleren Betriebsgrößen.

In Abbildung 2 sind die bewirtschafteten Flächen sowie der Viehbestand für die betrachteten Betriebe grafisch dargestellt. Das Spektrum reicht von 40 ha bis 250 ha Gesamtfläche. Beim Tierbestand liegen die Betriebe mit 50 bis 250 Großvieheinheiten (GVE) genau im interessanten Bereich für das Projekt GülleHebel (zu klein für eine autarke Biogasproduktion nur aus Gülle).

Abbildung 3 zeigt das prinzipielle Vorkommen von potenziellen Biogas-Einsatzstoffen in den einzelnen Betrieben. Dabei wird ersichtlich, dass vor allem mit Flüssiggülle, Festmist und Stroh zu rechnen ist. Die Dominanz von Rindergülle und -mist ist aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht repräsentativ. In anderen Regionen besitzt die Schweinehaltung ebenfalls einen hohen Stellenwert.

Für die Rubrik „Sonstiges“ wurden seitens der Betriebe noch Kartoffelpülpe, Heu, Pferdemist und Landschaftspflege als vorhandene Ressourcen genannt. Beim Substrat „Ausputz“ handelt es sich bei den betreffenden zwei Betrieben um Kleinstmengen, welche im Kontext der Projektziele als nicht relevant betrachtet werden.

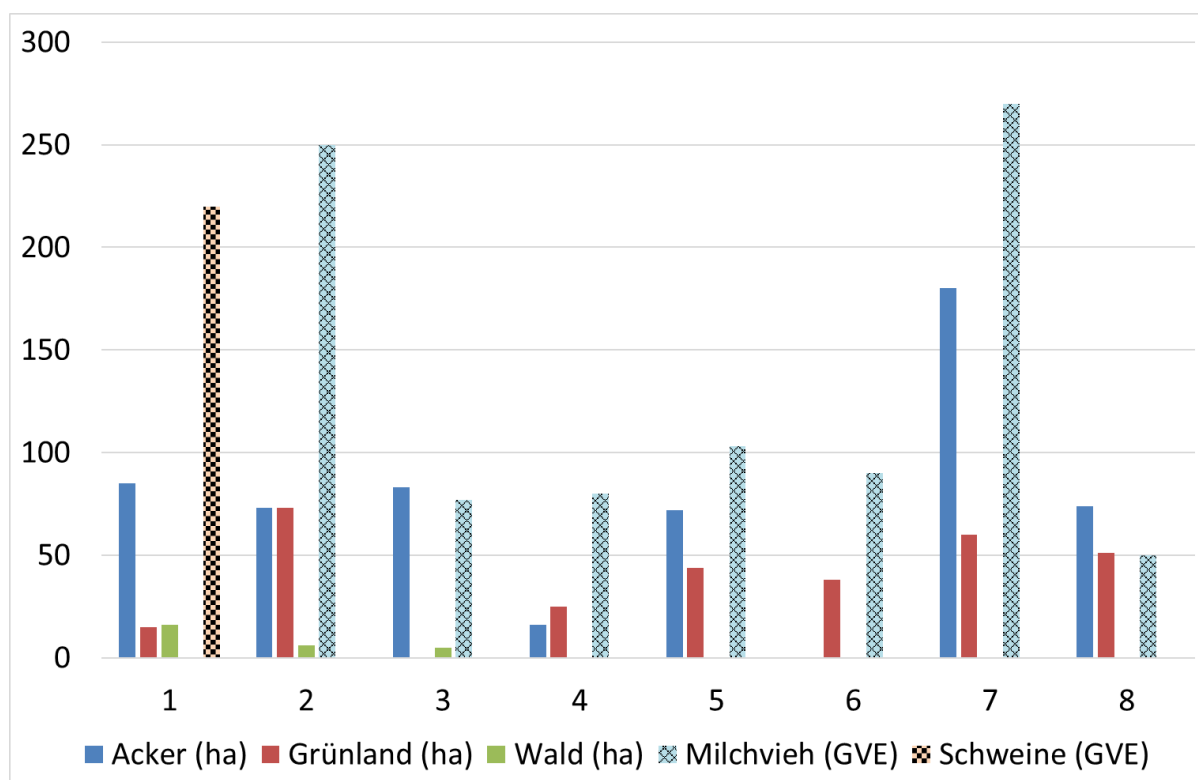


Abbildung 2: Betriebsgrößen hinsichtlich Fläche und Tierbestand

Die Bezugskosten für Stroh wurden von drei Betrieben mit 100 bis 160 EUR/t angegeben. Ein weiterer Betrieb kalkuliert mit 20 EUR pro t für die eigene Strohbergung.

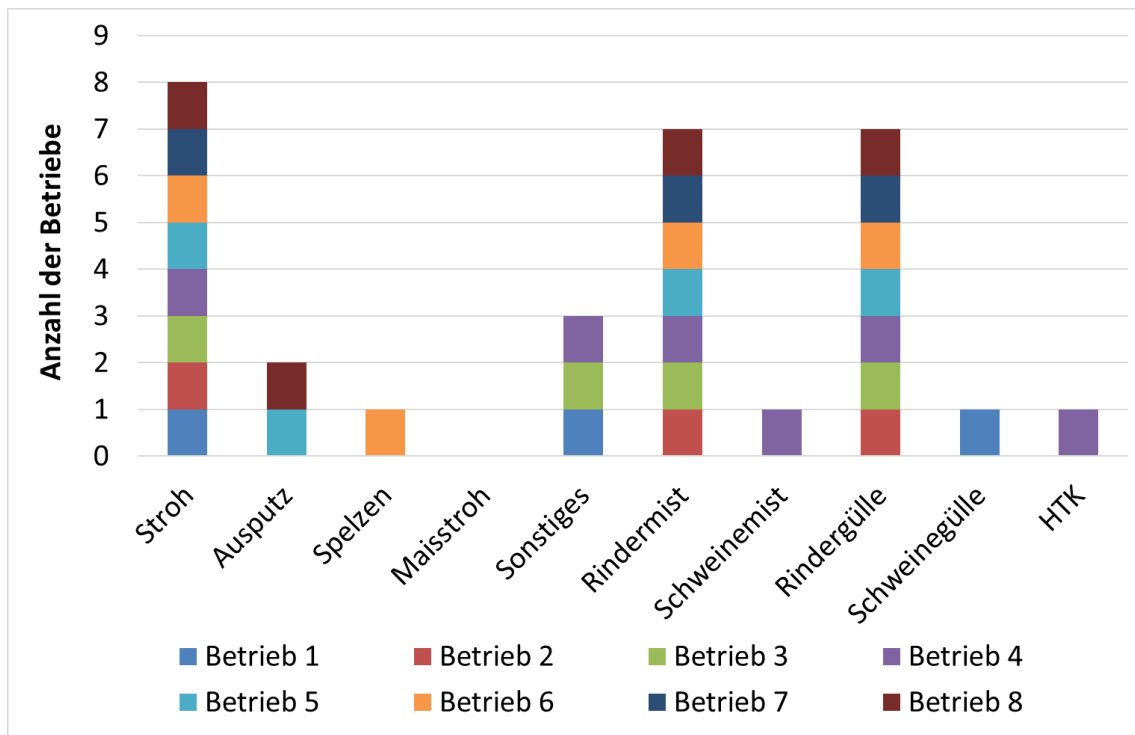


Abbildung 3: Vorhandene und eingesetzte Substrate

Ein wichtiges Ziel im Projekt Güllehebel war die Maximierung des Feststoffeintrages in kleineren Biogasanlagen. Aus diesem Grund ist es relevant zu wissen, welche Flüssigkeiten an den Standorten noch zur Verfügung stehen, um die Viskosität des Gärmediums evtl. noch beeinflussen zu können, falls die Rühr- oder Pumpfähigkeit nicht mehr gegeben sein sollte. In Abbildung 4 sind die pro Betrieb theoretisch vorhandenen Wasserquellen dargestellt und zeigen diesbezüglich ein relativ breites Angebot.

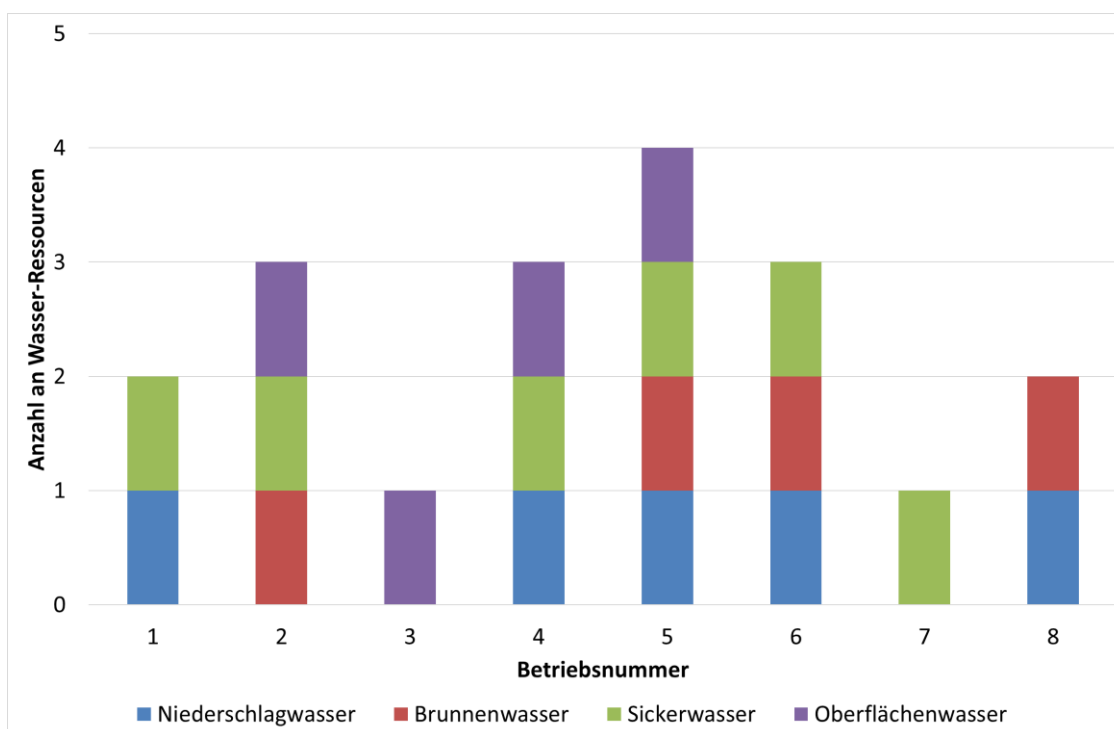


Abbildung 4: Verfügbare Wasser- bzw. Flüssigkeitsquellen pro Betrieb

In Abbildung 5 sind die jährlichen Mengen an Wirtschaftsdünger dargestellt, welche in den jeweiligen Betrieben zur Verfügung stehen. Mit Ausnahme von Betrieb 2 korrelieren diese Mengen erwartungsgemäß mit der Anzahl der Tiere. Für Betrieb 2 ist offensichtlich eine geplante Stallerweiterung im Nachbarbetrieb mit einkalkuliert worden. Insgesamt wird ersichtlich, dass Flüssiggüllen stark dominieren.

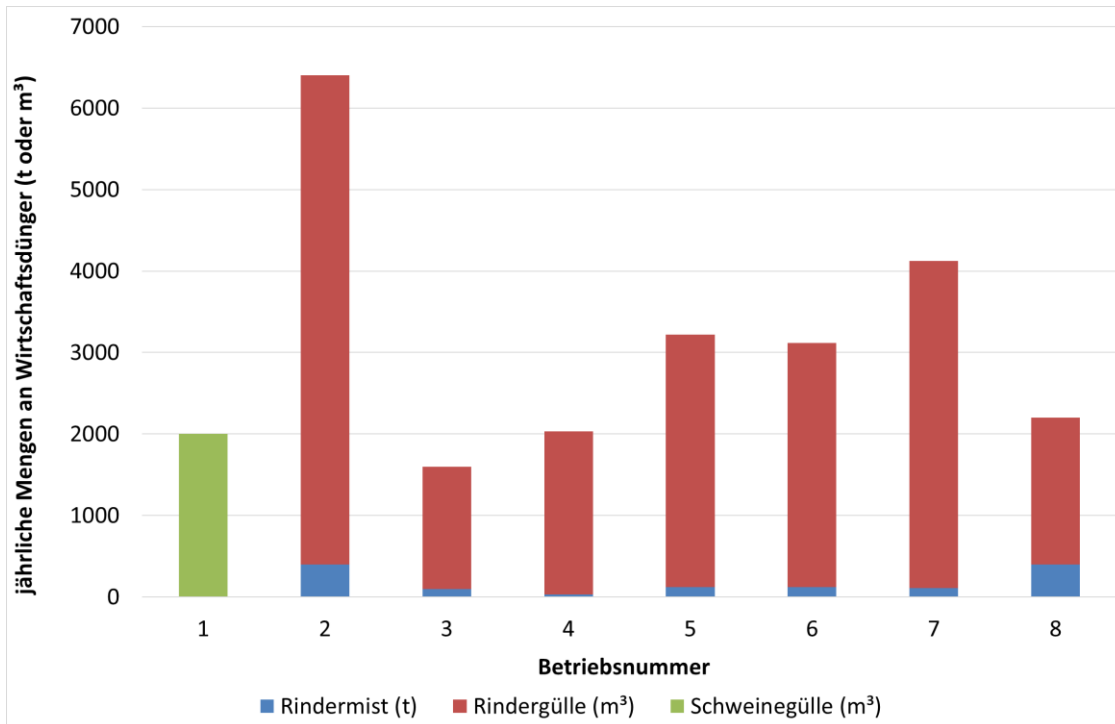


Abbildung 5: Jährliche Anfallmengen an Wirtschaftsdüngern in den betrachteten Betrieben

Um weitere Datensätze akquirieren zu können, wurde mit dem FNR-Projekt MOVE eine Vereinbarung getroffen, dass wichtige Kernfragen aus dem Projekt GülleHebel auch in einen MOVE-Fragebogen einfließen. Im Projekt MOVE existierten bereits gut Kontakte zu einer Auswahl an Betrieben mit Schweinehaltung. Seitens der Kollegen konnten Mengenangaben für den Gülleanfall zur Verfügung gestellt werden.

In Tabelle 2 ist neben der jährlichen Anfallmenge der Schweinegülle auch die theoretisch mögliche Methanproduktion aus dieser angegeben. Aufgrund der fehlenden Zahlen zum Gasertrag wurde überschläglich mit dem Gasertrag der GülleHebel-Probenahme gerechnet. Wie sich zeigt, könnten die Beispielbetriebe aus dem Projekt MOVE allein durch eine Güllevergärung Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung zwischen 27 und 113 kW betreiben. Um diejenigen Anlagen mit kleineren Güllemengen auf 75 kW_{el} zu „hebeln“, wäre die Ergänzung von jährlich 500 bis 600 t an Stroh eine Möglichkeit.

Mit notwendigen Strohanteilen von 14 % bis 16 % in der Mischung aus Gülle und Stroh liegen diese Betriebe der Schweinehaltung ähnlich wie die betrachteten Milchviehbetriebe. Die Strohzugabe liegt damit konform zum EEG (Kleingüleanlagen) und auch in einem guten Bereich für die praktische Umsetzung.

Tabelle 2: Anfallmenge Schweinegülle für ausgewählte Anlagen aus FNR-Projekt MOVE (Hr. Häner)

| | Gülleanfall | CH4-Ertrag* | | theoretische BGA-Größe |
|------|-------------|-------------|----------|------------------------|
| | | m³/a | Nm³/t OS | Nm³/d |
| LW1 | 10666 | 21,0 | 614 | 97,0 |
| LW3 | 2995 | 21,0 | 172 | 27,2 |
| LW4 | 3000 | 21,0 | 173 | 27,3 |
| LW5 | 12472 | 21,0 | 718 | 113,4 |
| LW7 | 3365 | 21,0 | 194 | 30,6 |
| LW9 | 3150 | 21,0 | 181 | 28,6 |
| LW10 | 6880 | 21,0 | 396 | 62,5 |

*Geschätzt mit Gasertrag aus Projekt GülleHebel

Für die Betriebe wurden Beprobungen durchgeführt, um die Eigenschaften der einzelnen Substrate analytisch bewerten zu können. Tabelle 3 und Tabelle 4 geben die Gehalte an Feststoff (TR) und organischen Feststoff (oTR) sowie die potenziellen Gaserträge für die wichtigsten Stoffströme der einzelnen Betriebe an.

Tabelle 3: Sommerbeprobung (ausgewählte Betriebe)

| | | | Gasertrag | CH4-Gehalt | CH4 | CH4 |
|-------------------------|--------|---------|------------------------|------------|------------------------|-----------------------|
| | TR (%) | oTR (%) | Nm ³ /t oTR | % | Nm ³ /t oTR | Nm ³ /t OS |
| Betrieb 1 | | | | | | |
| Schweinegülle | 6,85 | 73,2 | 632,3 | 66,3 | 419,2 | 21,0 |
| Stroh | 90,0 | 94,5 | 440,2 | 51,8 | 228,0 | 193,9 |
| Betrieb 2 | | | | | | |
| Rindergülle | 6,34 | 78,3 | 298,6 | 58,6 | 175,0 | 8,7 |
| Rindermist | 26,1 | 86,7 | 403,2 | 56,3 | 227,0 | 51,3 |
| Pferdemist (Holzspähne) | 36,8 | 83,7 | 21,9 | 59,1 | 12,9 | 4,0 |
| Betrieb 3 | | | | | | |
| Rindergülle | 9,62 | 81,7 | 402,2 | 56,9 | 228,9 | 18,0 |
| Mist | 32,5 | 82,1 | 388,2 | 50,7 | 196,8 | 52,5 |
| Stroh | 91,0 | 93,1 | 499,7 | 50,3 | 251,3 | 212,9 |
| Heu | 91,7 | 93,8 | 401,00 | 49,0 | 196,5 | 169,0 |

Tabelle 4: Winterbeprobung (ausgewählte Betriebe)

| | | | Gasertrag | CH4-Gehalt | CH4 | CH4 |
|---|--------|---------|------------------------|------------|------------------------|-----------------------|
| | TR (%) | oTR (%) | Nm ³ /t oTR | % | Nm ³ /t oTR | Nm ³ /t OS |
| Betrieb 1 | | | | | | |
| Schweinegülle | 5,89 | 72,9 | 494,1 | 64,6 | 319,2 | 13,7 |
| Betrieb 2 | | | | | | |
| Rindergülle | 7,76 | 76,1 | 414,5 | 59,2 | 245,4 | 14,5 |
| Rindermist (Milchkühe) | 24,7 | 90,8 | 470,5 | 51,7 | 243,1 | 54,6 |
| Rindermist (Kälber) | 34,0 | 91,3 | 669,7 | 53,7 | 360,0 | 111,9 |
| Betrieb 4 | | | | | | |
| Kälbermist | 37,5 | 92,6 | 449,6 | 52,9 | 237,8 | 82,7 |
| Mastschwein | 25,9 | 89,1 | 488,4 | 55,8 | 272,7 | 63,0 |
| Mutterschwein | 31,1 | 82,7 | 393,5 | 54,5 | 214,5 | 55,2 |
| Gülle Milchvieh aufgerührt | 5,8 | 82,6 | 351,2 | 58,2 | 204,5 | 9,7 |
| Gülle Milchvieh Mistschieber | 12,2 | 81,5 | 413,5 | 55,8 | 230,7 | 22,9 |
| Mist Freifläche Pferd | 20,1 | 73,8 | 460,0 | 54,7 | 251,6 | 37,4 |
| Mist Legehennen | 71,6 | 80,8 | 403,3 | 55,1 | 222,4 | 128,7 |
| Mist Boxenmist Pferd | 23,8 | 78,0 | 379,6 | 53,0 | 201,4 | 37,4 |
| Gülle Jungvieh + Entwassg. | 3,3 | 73,6 | 579,2 | 56,1 | 324,6 | 7,9 |
| Betrieb 5 | | | | | | |
| Rindergülle | 11,2 | 81,3 | 459,3 | 57,7 | 264,9 | 24,2 |
| Rindermist | 20,9 | 87,3 | 460,4 | 58,2 | 267,8 | 48,8 |
| Stroh | 87,6 | 95,0 | 535,0 | 53,7 | 287,0 | 238,8 |
| Ausputz/Silage | 26,8 | 91,9 | 287,4 | 57,8 | 166,2 | 40,9 |
| Betrieb 6 | | | | | | |
| Gülle mit Futterkohle und ASL aus dem Endlager | 6,4 | 73,8 | 375,6 | 59,3 | 222,8 | 10,6 |
| Gülle aus dem Stall mit Futterkohle | 10,6 | 81,0 | 391,0 | 59,6 | 232,9 | 19,9 |
| Betrieb 7 | | | | | | |
| Rindergülle | 7,38 | 80,6 | 383,3 | 57,8 | 221,7 | 13,2 |
| Rindermist (Milchkühe) | 20,9 | 91,3 | 474,6 | 55,8 | 264,7 | 50,6 |
| Rindermist (Kälber) | 17,2 | 93,3 | 488,4 | 56,5 | 275,7 | 44,1 |
| Betrieb 8 | | | | | | |
| Rindermist (2 Wo. alt) | 25,4 | 86,9 | 674,6 | 54,3 | 366,1 | 80,7 |
| Stroh | 85,6 | 90,7 | 589,3 | 52,2 | 307,6 | 238,8 |
| Gülle+NS-Wasser | 3,95 | 76,2 | 244,3 | 53,0 | 129,5 | 3,9 |

Auf Grundlage der Anfallmengen wurde mit den **Gaserträgen** der Substrate die jährliche Methanmenge und über einen elektrischen Wirkungsgrad von 36 % die mögliche zu installierende elektrische Leistung einer Biogasanlage berechnet. Abbildung 6 zeigt dieses Leistungspotenzial für die Sommer- und Winterbeprobung. Keiner der betrachteten Betriebe würde demnach mit dem vorhandenen Reststoffpotenzial (Gülle + Festmist) eine Größe von 75 kW_{el} erreichen. Selbst der Betrieb 2 kommt mit Stallerweiterung nur auf knapp 45 kW_{el}.

In Tabelle 5 ist theoretisch berechnet, wieviel Stroh pro Jahr zugesetzt werden müsste, um die Größe einer Biogasanlage jeweils auf 75 kW_{el} zu hebeln. Zusätzlich zu den analysierten Betrieben 1-8 sind in der Tabelle auch die seitens MOVE-Projekt übermittelten Betriebe enthalten, welche ebenfalls nicht genügend Substrat (Schweinegülle) für eine 75 kW_{el}-BGA aufweisen (LW). Daraus ergeben sich notwendige Zugabemengen von 150 bis 800 t Stroh pro Jahr. Allerdings ist bei den Betrieben 1, 2, 4 und 8 mehr Stroh notwendig, als das 20 %-Kriterium für Klein-Gülle-Anlagen zulassen würde. Für diese Anlagen mit Substratmengen für weniger als 20 bis 30 kW_{el} kann maximal auf 40 bis 50 kW_{el} gehebelt werden, wenn genau 20 % Stroh anteilig zu Gülle und Festmist zugegeben werden.

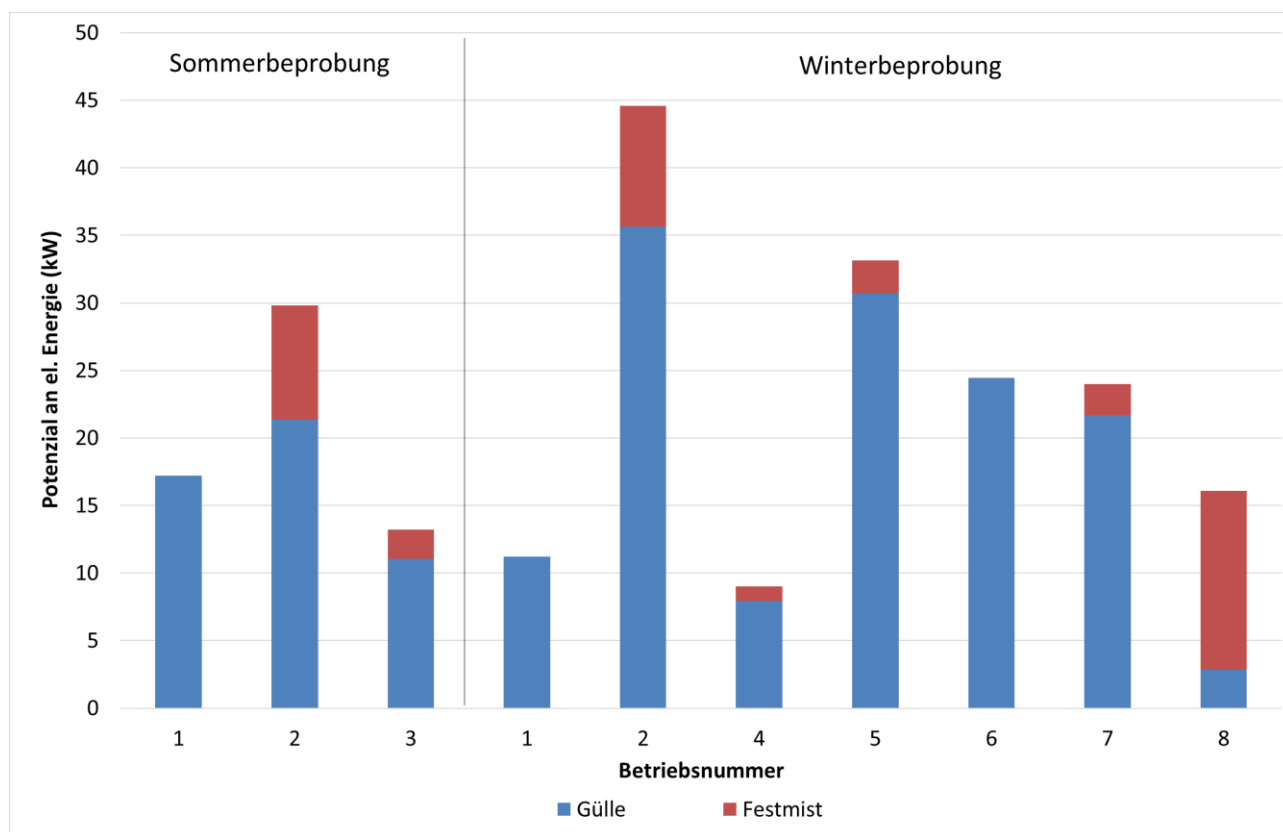


Abbildung 6: Theoretisches Potenzial für die Erzeugung von el. Energie pro Betrieb

Dennoch zeigt sich, dass ein erheblicher Anteil der betrachteten kleineren Landwirtschaftsbetriebe genau in das Raster des Projektes GülleHebel fällt und eine weitergehende Betrachtung der Zugabe von Stroh oder ähnlichen Reststoffe durchgeführt werden sollte.

Tabelle 5: notwendige Strohmenge für 75 kW

| Betrieb | Strohergänzung | |
|---------|----------------|---------------|
| | t/a | % in Mischung |
| 1 | 739,8 | 37,0 |
| 2 | 461,3 | 7,2 |
| 3 | 754,0 | 47,1 |
| 4 | 801,0 | 39,4 |
| 5 | 510,9 | 15,9 |
| 6 | 613,7 | 19,7 |
| 7 | 622,4 | 15,1 |
| 8 | 718,7 | 32,7 |
| LW3 | 583,0 | 16,3 |
| LW4 | 582,4 | 16,3 |
| LW7 | 541,9 | 13,9 |
| LW9 | 565,8 | 15,2 |
| LW10 | 152,0 | 2,2 |

Für die Nutzung insbesondere von faserreichen Substraten in Biogasanlage sind die **Fasereigenschaften** hinsichtlich Größe und Form für die Durchmischung und das Fördern von Bedeutung. Besonders relevant sind dabei alle Grobanteile, welche für die Analyse mittels 0,5 mm Sieb zurückgehalten werden. In Abbildung 7 sind die Masseanteile bezogen auf den Gesamtfeststoff für ausgewählte Substratkategorien dargestellt.

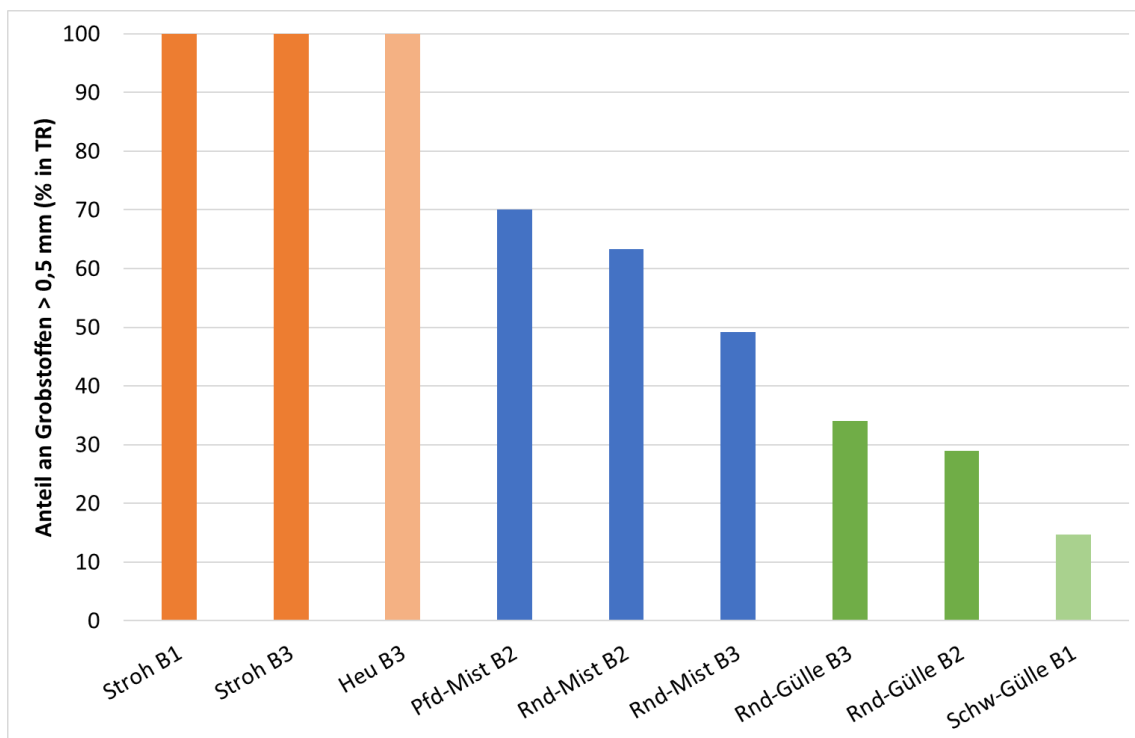


Abbildung 7: Masseanteil der Grobstoffe > 0,5 mm am Gesamtfeststoff (TR) Pfd...Pferde, Rnd...Rinder, Schw...Schweine

Während Stroh und Heu (orange) praktisch keinen Feinanteil aufweisen, sieht es für die Gülle (grün) erwartungsgemäß genau entgegengesetzt aus. Als Ergebnis von Kauen und Verdauen ist der Anteil von Grobstoffen in Gülle sehr gering. Festmist als Mischung von Stroh-Einstreu und Gülle liegt in der Mitte.

In Abbildung 8 sind die mittlere und maximale **Faserlänge** dieser Grobstoffanteile dargestellt. Die untersuchten Gülleproben weisen kleine Faserlängen im Mittel von ca. 2 mm mit maximalen Faserlängen von 10 cm auf. Aufgrund der geringen Anteile der längeren Fasern kann Gülle sehr einfach durchmischt und gepumpt werden.

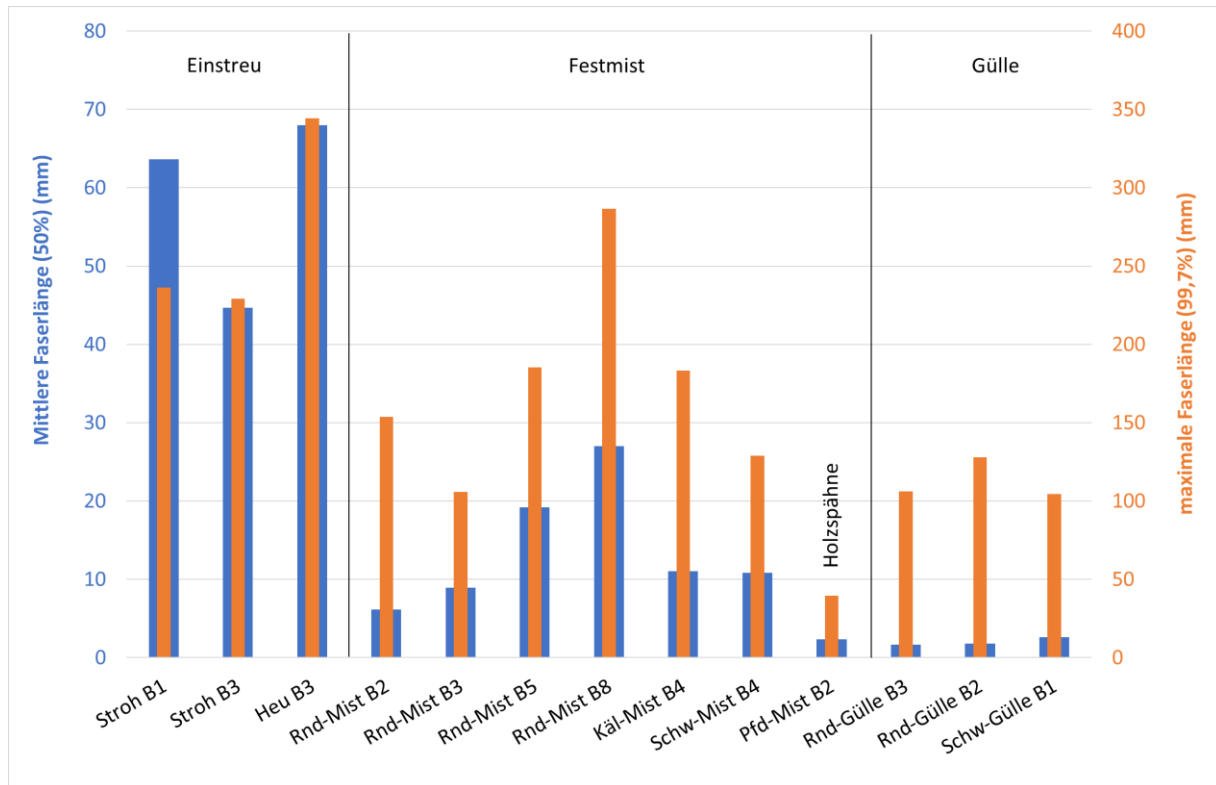


Abbildung 8: typische Faserlängen (Mittel = Median und Maximal) für ausgewählte Substrate

Beim Festmist zeigen sich Proben mit vergleichsweise kurzen Faserlängen von bis zu 10 mm im Mittel, aber auch Proben mit sehr langen Fasern. Im Fall von Betrieb B8 sind maximale Faserlängen enthalten, welche unbehandeltem bzw. grob aufgelöstem Stroh entsprechen. Damit wird deutlich, dass unbehaltener Festmist problematisch für die Vergärung in herkömmlichen Biogasanlagen ist. Eine Aufbereitung der langen Fasern ist empfehlenswert. Eine Ausnahme stellt die Pferdemitprobe dar, welche Holzspäne als Einstreu enthielt (kurze Faserlängen).

Unbehandeltes Stroh und Heu zeigen im Mittel um 15-fach längere Fasern auf, wobei die Maximallängen mit 23 bis 35 cm nur etwa doppelt so lang wie bei Gülle oder Festmist ausfallen. Trotzdem wird ersichtlich, dass Strohfaserlängen in einer ganz anderen Größenordnung liegen und damit quasi nach praktischen Lösungen für Rührung und Vorzerkleinerung verlangen, um eine störungsfreie Vergärung zu ermöglichen.

Auch wenn die **Faserdicken** (Abbildung 9) nicht unbedingt die entscheidende Rolle für die Vergärung spielen, so geben die Messwerte einen guten Eindruck davon, welche Substrate bereits teilweise aufgefaserter bzw. vorzerkleinert sind (Güllen) und welche nicht (Stroh, Heu und auch Festmist mit größeren Anteilen an Einstreu). In der Beeinflussung der Faserlängen und des Grades der Auffaserung liegt ein Schlüssel für die Realisierung einer sicheren Vergärung. Diese Möglichkeit wurde im AP 2 näher untersucht.

Im Mittel betragen die Dicken der Fasern im Festmist nur etwa 1/3 im Vergleich zu den mittleren Dicken im Stroheinstreu. Dies deutet bereits auf eine gute Auffaserung während des Stalleinsatzes durch die mechanische Beanspruchung der Tiere hin und sollte Vorteile für die Vergärung bringen. Die maximalen Faserdicken zeigen, wie bereits die maximalen Faserlängen, auch Anteile von nahezu unverändertem Stroh. Dies zeigt die Grenzen der „Vorbehandlung“ durch Einsatz als Einstreu. Eine zusätzliche mechanische Aufbereitung ist dringend zu empfehlen.

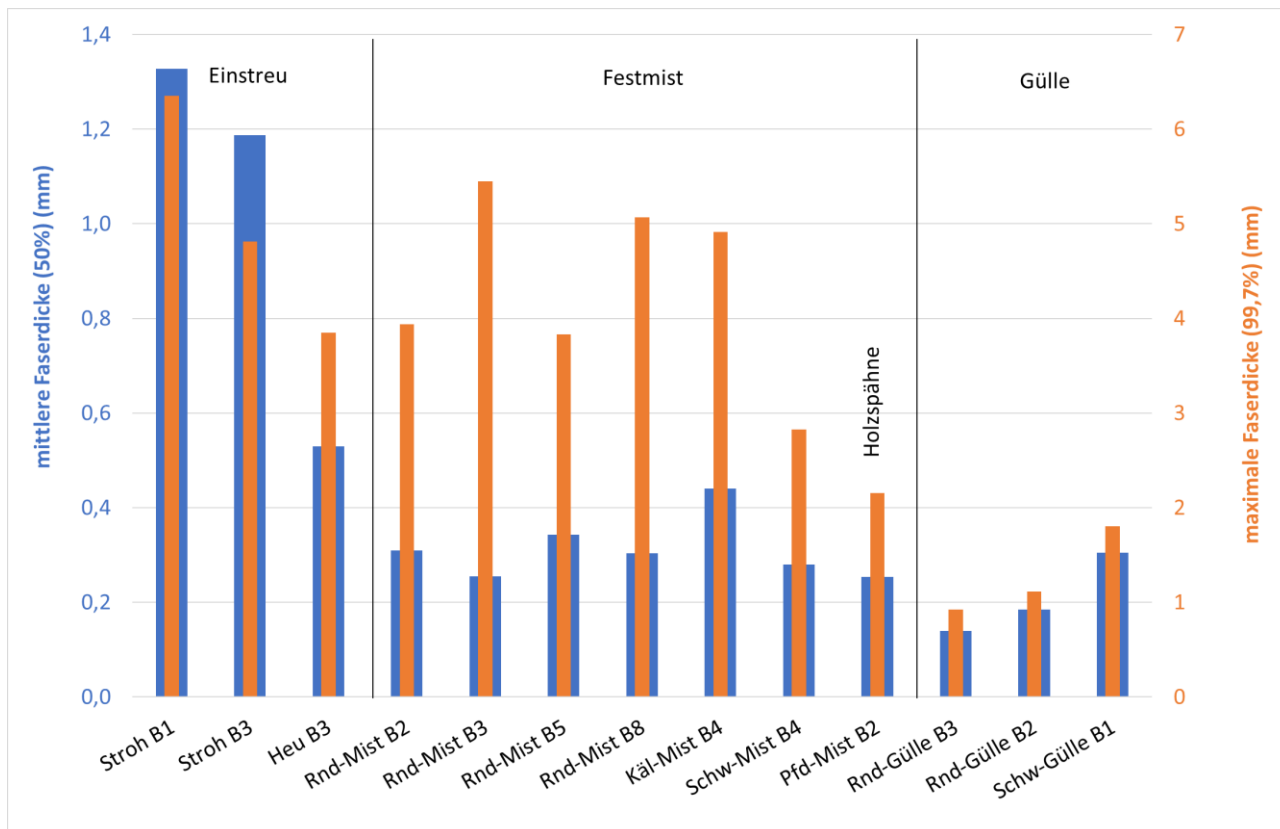


Abbildung 9: typische Faserdicken (Mittel = Median und Maximal) für ausgewählte Substrate

Neben den granulometrischen Eigenschaften der Fasern spielt auch die **Viskosität** der flüssigen Inputstoffe (Güllen, Prozesswässer) eine wichtige Rolle für die Durchmischung der Reaktoren. In Abbildung 10 sind ausgewählte Kurven der Viskosität dargestellt, welche für verschiedene Schergeschwindigkeiten mittels Rotationsviskosimeter bei 38 °C aufgenommen wurden. Die verschiedenen Güllen weisen demnach sehr unterschiedliche Viskositäten auf. Hauptursache sind die variierenden TR-Gehalte, welche ebenfalls im Diagramm angegeben sind. Für die Konzeption der Zugabe von trockenen Co-Substraten ist es daher wichtig, dass die Qualität der Gülle hinsichtlich TR oder Viskosität bekannt ist, da dadurch das Limit bezüglich der maximalen Zugabemenge bestimmt wird.

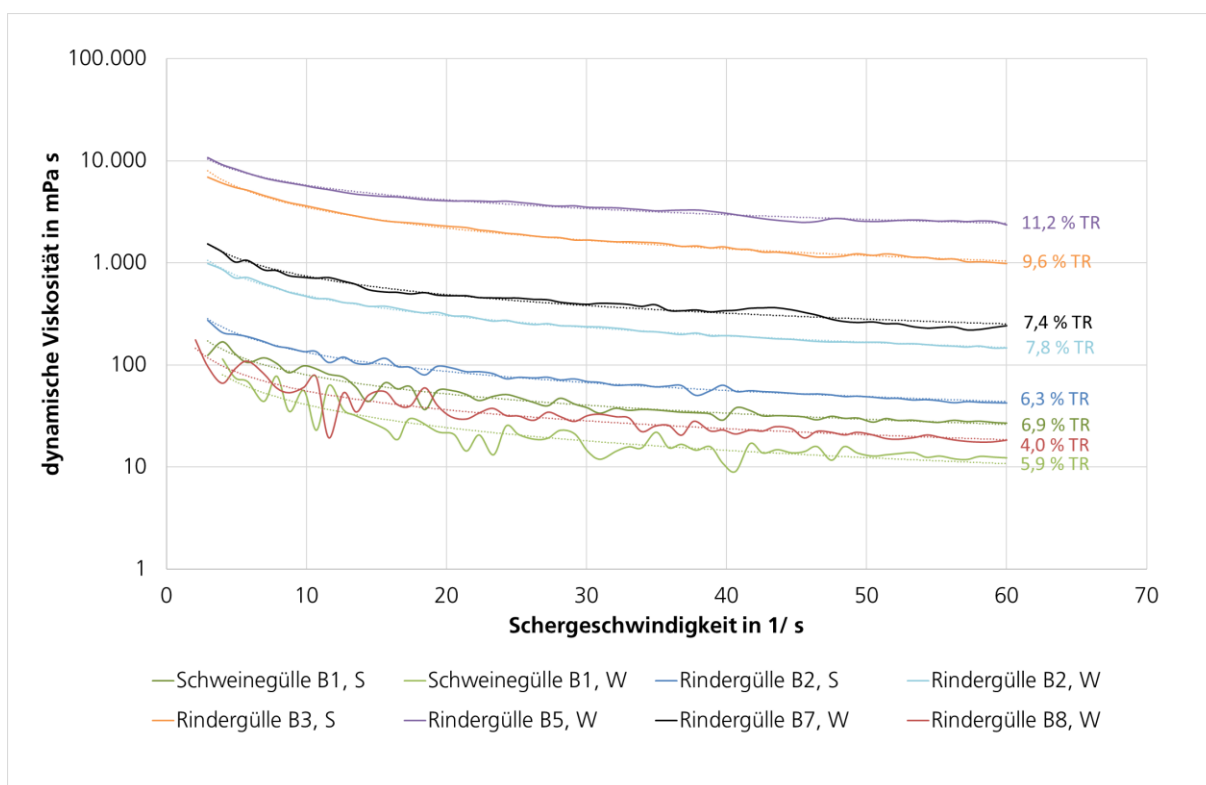


Abbildung 10: Viskosität verschiedener Güllen in Abhängigkeit von TR-Gehalt und Schergeschwindigkeit

Weiterhin sind diese Analysen Voraussetzung für die Durchmischungsversuche im Prozesstomographen (Nachbildung des GülleHebel-Reaktors) im AP 3.2, weil dafür synthetische Güllen mit einzustellender Viskosität eingesetzt werden sollten.

Ein weiteres Untersuchungsziel im AP 1 bestand in der Bewertung und Bilanzierung des TR-Abbaus während der Vergärung. Die Verringerung des TR-Gehaltes durch die Umwandlung von Organik in Biogas (CO₂, CH₄) ist ein wichtiger Effekt, um auch Substrate mit höherem Input-TR-Gehalt sicher vergären zu können. Dazu wurden Batchreaktoren (Impfmedium Faulschlamm = FS) mit unterschiedlichen Mengen an Heu und Stroh (auf 4 oder 8 mm zerkleinert) als Gärtest über 38 Tage betrieben. Neben der Ermittlung des Gasertrages wurde gezielt die Änderung des TR-Gehaltes im Reaktor durch die Vergärung erfasst. In Abbildung 11 kann für die Mischung von Faulschlamm sowohl mit Heu als auch mit Stroh ein Rückgang des TR-Gehaltes um knapp 40 % durch die Vergärung abgelesen werden.

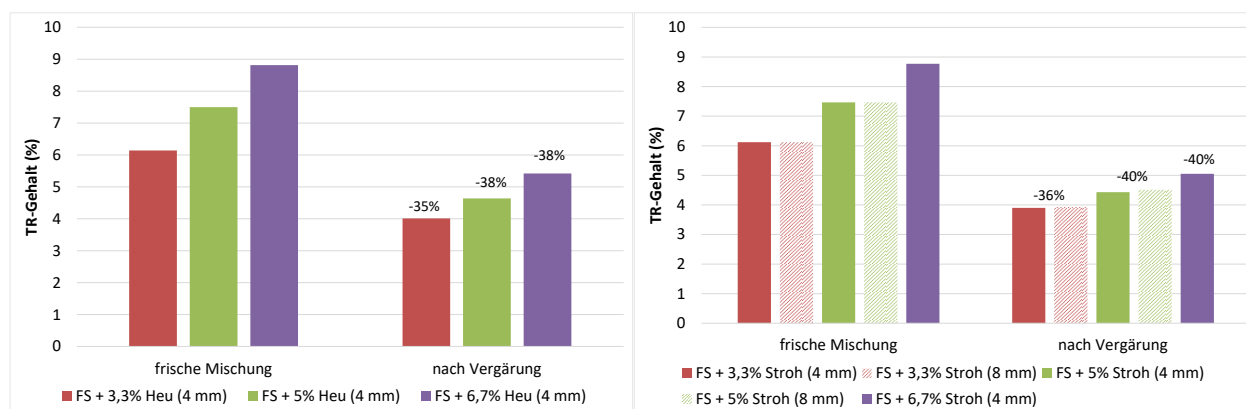


Abbildung 11: Reduzierung des TR-Gehaltes durch die Vergärung; FS ... Faulschlamm

Dieser relative Rückgang des TR-Gehaltes dient hier lediglich zum Vergleich. In der Praxis werden je nach Mischungsverhältnis (Start-TR) und der Abbaubarkeit der Substrate sehr unterschiedliche Reduktionsraten erreicht. Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die erreichbaren reduzierten TR-Werte nach Vergärung gut theoretisch berechnet werden können.

Setzt man verschiedene Mischungsverhältnisse von z.B. Gülle (8 % TR) mit Stroh an und berechnet mit Hilfe der experimentell bestimmten Abbaugrade die zu erwartenden TR-Werte nach der Vergärung in einer Biogasanlage, so ergibt sich das in Abbildung 12 dargestellte Bild. Durch den Substratabbau während der Fermentation kann beispielsweise der sehr hohe Ausgangs-TR-Wert bei Mischungen mit 10 oder 20 % Stroh auf Werte unterhalb von 13 % gesenkt und damit theoretisch die Rührfähigkeit erreicht werden. Mischungen mit 30 % Strohanteil liegen auch nach einer Fermentation über 15 % Feststoffgehalt, was als nicht rührfähig angesehen werden muss.

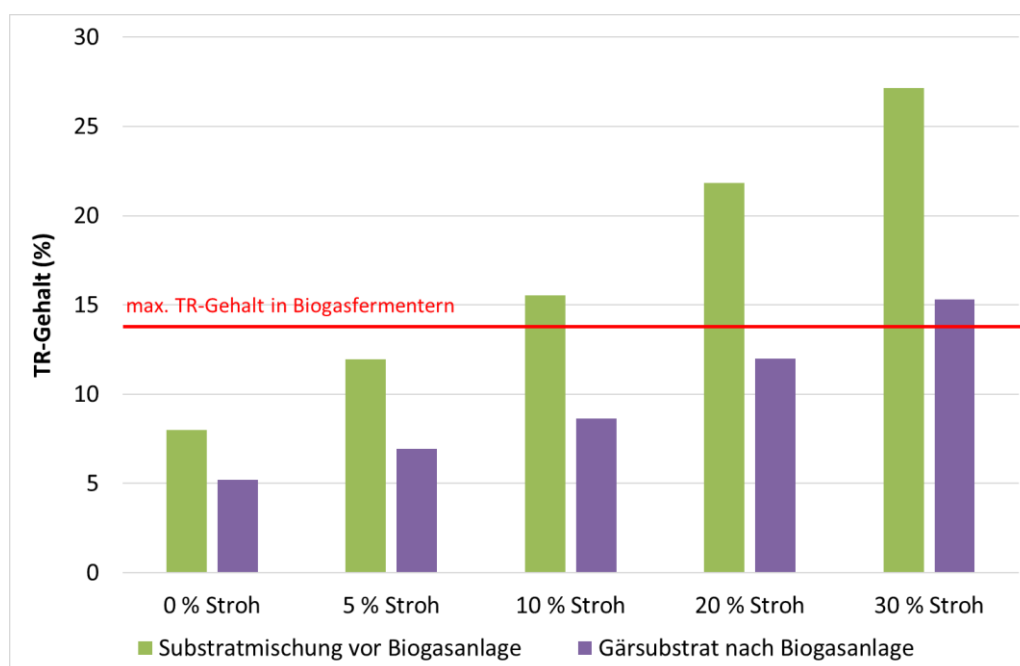


Abbildung 12: theoretische TR-Gehalte vor und nach Vergärung für verschiedene Mischungen aus Gülle und Stroh

Wie in Abbildung 12 zu sehen liegt eine erste Grenze hinsichtlich der maximalen Beimengung von Stroh theoretisch bei etwa 20 %, wobei je nach Güllequalität (TR-Gehalt und Viskosität) sowie der Strohqualität (Partikelgröße) mit einer Verschiebung dieser Grenze zu rechnen ist.

Bei dieser Zumischungsrate von Stroh hätte die Inputmischung einen TR-Gehalt von 22 %, was optisch eher einem Haufen Festmist entspricht als einer pump- oder rührfähigen Suspension. Dies wurde auch im AP 3 durch praktische Untersuchungen zur Mischung von Stroh und Gülle bestätigt. Aus diesem Grund sollten Gülle und Stroh getrennt voneinander direkt dem Vergärungsreaktor zugegeben werden, um die Reduktion des TR-Gehaltes während des anaeroben Abbaus auszunutzen. Alternativ wäre auch eine Anmischung mit Gärrest möglich, wobei dafür größere Anmischbehälter sowie zusätzliche Technik für das Pumpen und Rühren nötig wäre.

Einen weiteren Aspekt bezüglich der maximalen Menge an Stroh, welche gemeinsam mit Gülle vergoren werden kann, stellt die Qualität der Gülle dar. Je dünner die Gülle, desto mehr Stroh kann erwartungsgemäß zumischt werden, ohne dass größere Probleme bei der Rührung auftreten. Für eine beispielhafte Grenzkonzentration von 13,5 % TR-Gehalt im Fermenter (inklusive Abbau) zeigt Abbildung 13 in Abhängigkeit vom TR-Gehalt der eingesetzten Gülle wieviel Stroh anteilig maximal zugegeben werden kann.

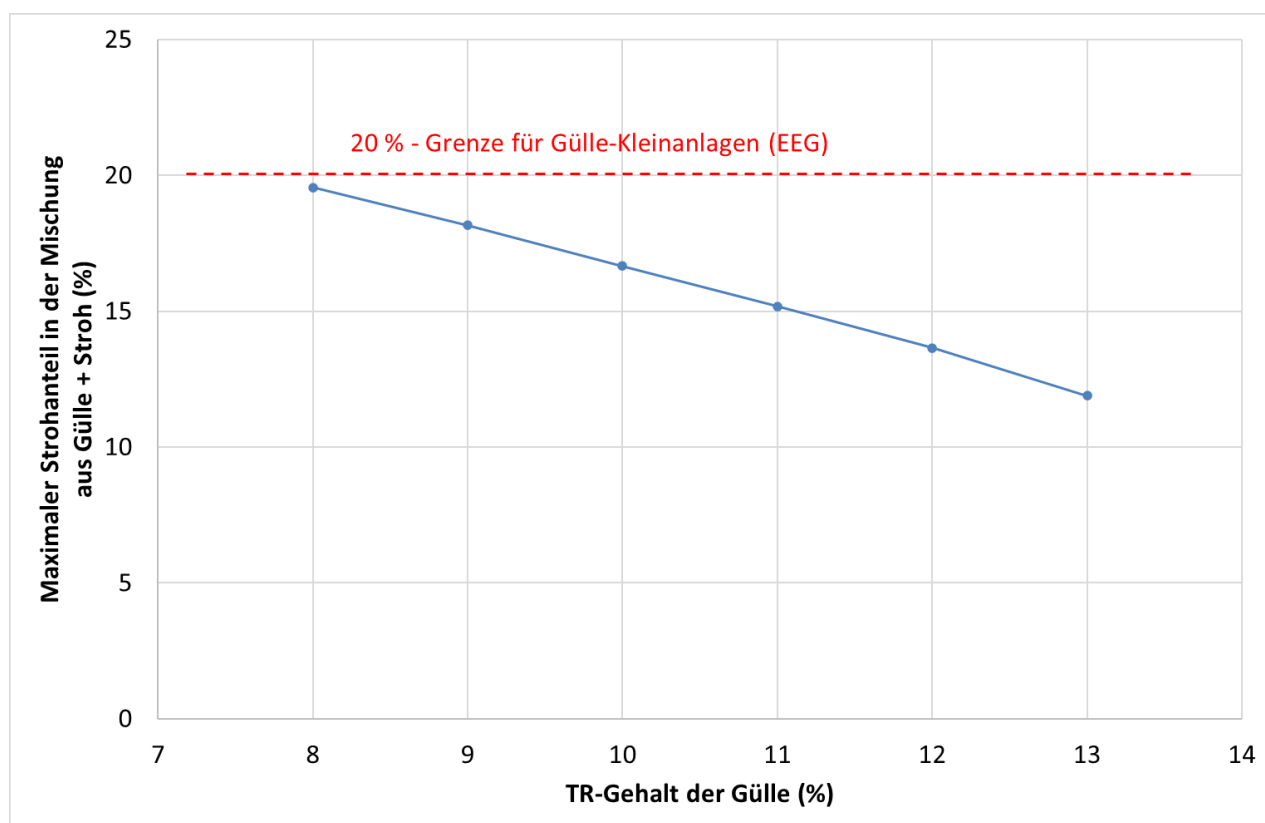


Abbildung 13: Maximal möglicher Strohannteil in der Mischung mit Gülle in Abhängigkeit vom TR-Gehalt der Gülle

Es ist demnach zu erwarten, dass insbesondere bei Schweinegülle und dünnen Rindergüllen (< 8 % TR) bis zu 20 % Stroh oder ähnlich trockene Co-Substrate zugegeben werden können (das EEG-Maximum für Güllekleinanlagen kann ausgeschöpft werden). Sind die Güllen (insbesondere Rindergüllen) deutlich dicker, so sinkt die maximale Strohmenge auf z.B. 12 bis 13 % ab.

Arbeitspaket 2: Substratkonditionierung

Im Arbeitspaket 2 stand die Zerkleinerung und analytische Bewertung des Zerkleinerungserfolges im Fokus. Dabei wurden zunächst Versuche im Labor und Technikum des IKTS durchgeführt. Anschließend wurde ausgewählte großtechnische Zerkleinerungsaggregate bewertet und abschließend auch vorzerkleinerte kommerziell erhältliche Einstreuprodukte als Alternative.

Die beprobten Reststoffe Stroh und Heu wurden in einer **ersten Versuchsreihe** mit Hilfe von 3 verschiedenen Zerkleinerungsaggregaten im Technikum des Fraunhofer IKTS behandelt, um die Partikelgrößen und damit die Gaserträge und Viskositäten in Mischungen zu verbessern.

Die Zerkleinerung erfolgte in einer Schneidmühle der Fa. Retsch, in einer Messermühle (Grindomix) sowie durch mehrmaliges Überfahren mittels Rasenmäher (vgl. Abbildung 14). Letzteres sollte eine einfache und robuste Prallbeanspruchung simulieren.

Mit Hilfe der Schneidmühle wurden 3 verschiedene Schnittlängen bzw. Durchlasssiebweiten eingestellt. Da diese Behandlung vor allem auf ein definiertes Kürzen der Fasern abzielt und weniger eine Auffaserung erreicht wird, sollte mit Hilfe von Grindomix (stumpfe Messer) und Rasenmäher eine Prallbeanspruchung bei höheren Drehzahlen erreicht werden.



Abbildung 14: Zerkleinerungsaggregate für die Stroh-/Heu-Behandlung von links: Schneidmühle, Messermühle, Rasenmäher

In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die Zerkleinerungsergebnisse für die Substrate des Beispielbetriebes B3 qualitativ dargestellt.

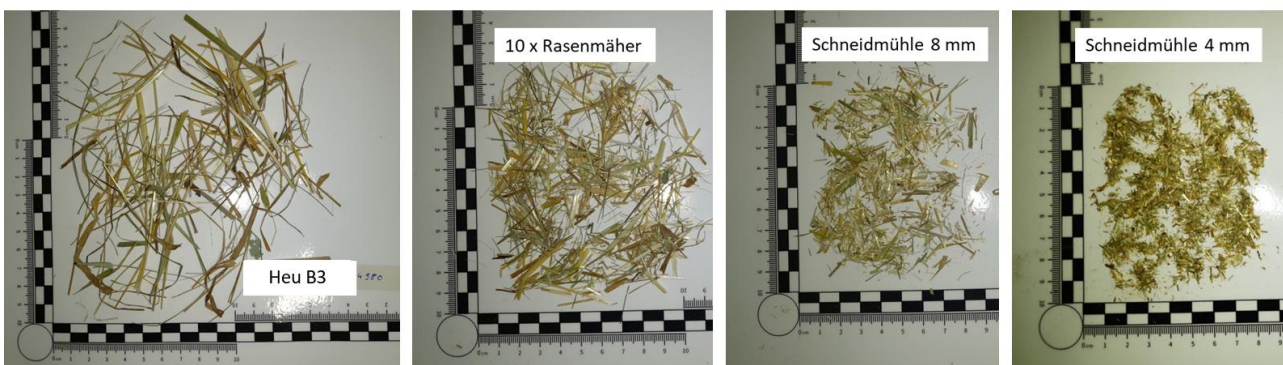


Abbildung 15: Zerkleinerungsstufen Heu (Betrieb 3)

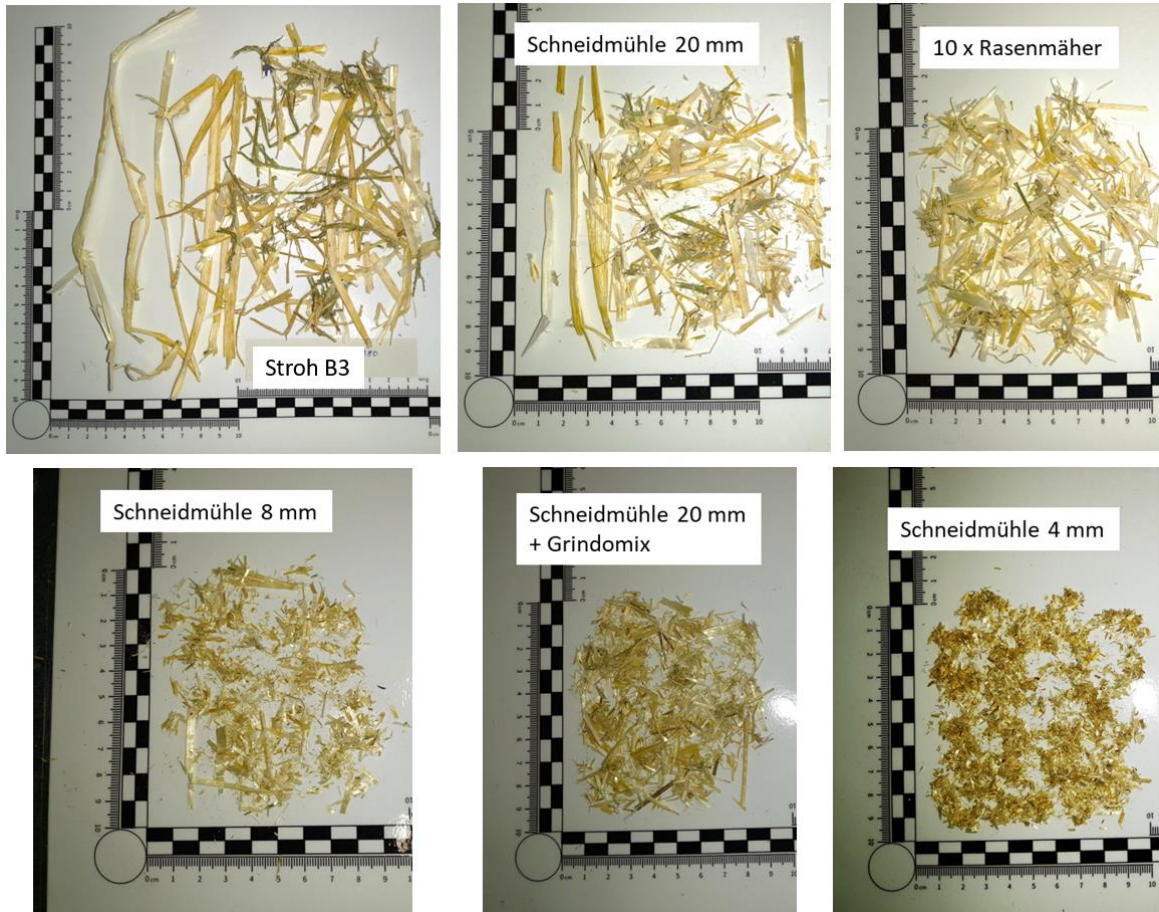


Abbildung 16: Zerkleinerungsstufen Stroh (Betrieb 3)

Die Proben wurden mit Hilfe optischer Bildanalyse hinsichtlich Faserlänge- und -dicke bewertet. In Abbildung 17 und Abbildung 18 sind die Messwerte für die Grobfraktionen ($> 0,5$ mm) als x_{10} bis x_{90} dargestellt, was bedeutet, dass die zugehörige Länge oder Dicke von 10 % oder 90 % der insgesamt gemessenen Partikel unterschritten wird.

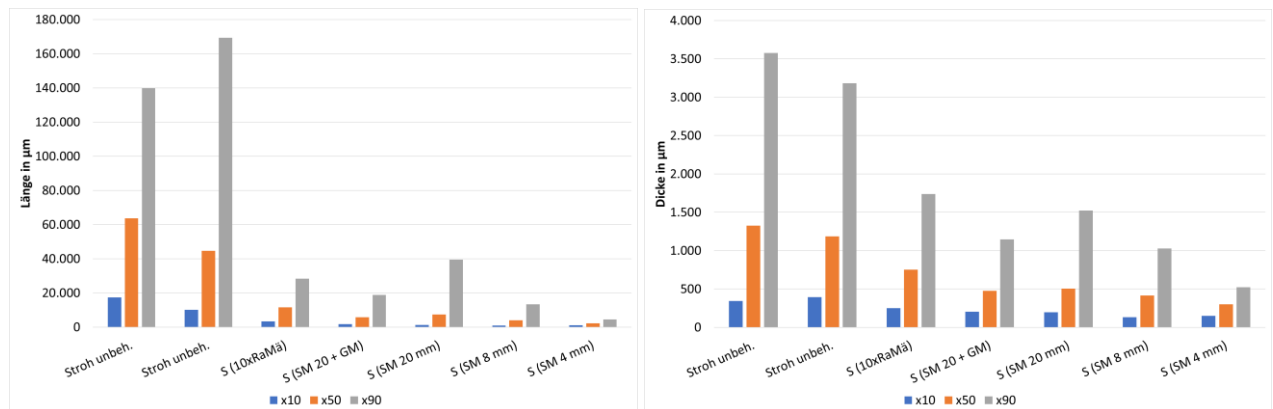


Abbildung 17: Faserlänge und -dicke für Stroh (Fraktion $> 0,5$ mm) in Abhängigkeit von der Behandlung

Der Zerkleinerungsfortschritt ist für alle Zerkleinerungsarten erkennbar, wobei die Faserlängen deutlich stärker verringert werden als die Dicken. Rasenmäher, Messermühle (Grindomix) und 20 mm Schneidmühle erreichen nur eine sehr grobe Vorzerkleinerung. Die Proben aus der Schneidmühle mit 8 und insbesondere 4 mm Siebausgang liegen deutlich feiner. Der hier nicht dargestellte Feinanteil von $< 0,5$ mm beträgt nur für die Zerkleinerung bei 8 mm oder 4 mm Schneidmühle eine signifikante Größenordnung von 18 bzw. 25 % Anteil am Gesamtfeststoff. Alle anderen Verfahren erzeugen kaum Faserfraktionen $< 0,5$ mm.

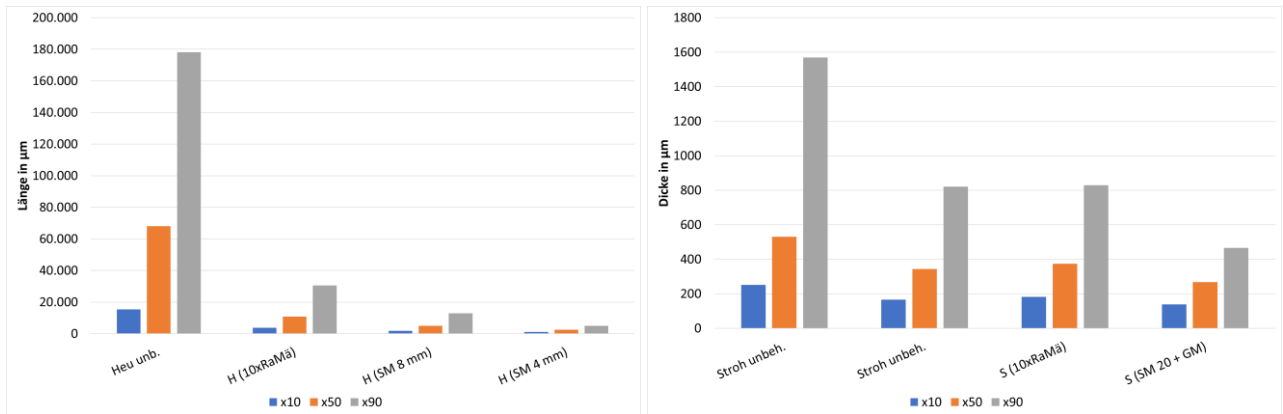


Abbildung 18: Faserlänge und -dicke für Heu (Fraktion > 0,5 mm) in Abhängigkeit von der Behandlung

Werden die äußeren Faserabmessungen der Grobfractionen zu einem spezifischen Flächenwert in cm² pro g Substrat zusammengefasst, ergeben sich die in Abbildung 19 dargestellten Reihenfolgen. Je größer die spezifische Oberfläche ausfällt, desto mehr Angriffsflächen bieten sich Mikroorganismen oder auch Wassermolekülen, was zu schnellerer Wasseraufnahme und schnellerem Abbau führt.

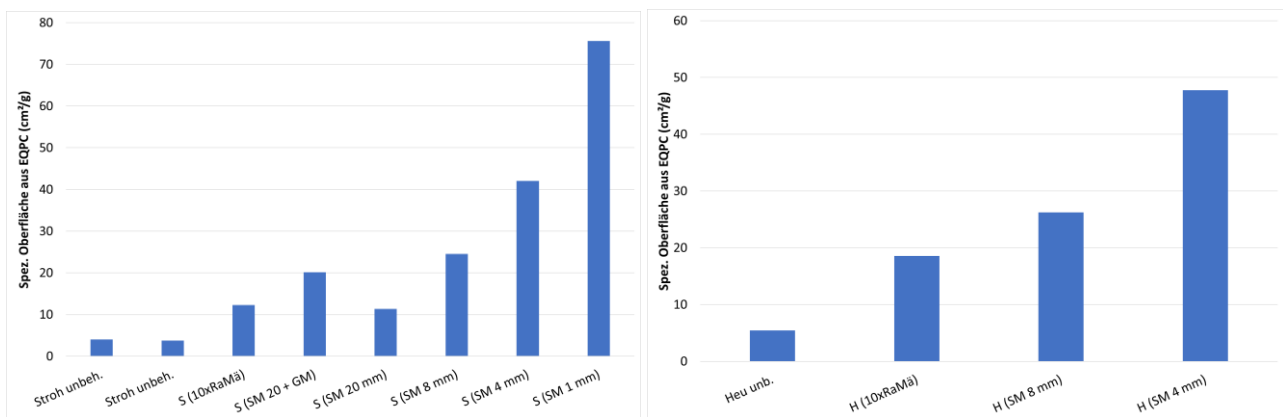


Abbildung 19: berechnete spezifische Oberfläche des Grobanteils > 0,5 mm (links: Stroh, rechts: Heu)

Dividiert man diese spezifischen Oberflächen der Grobstoffe durch den Grobstoffanteil, erhält man einen Kennwert, welcher auch den Anteil der Feinstoffe berücksichtigt. In Abbildung 20 sind die Methanerträge für verschiedene Zerkleinerungsstufen (nach Schneidmühle) in Abhängigkeit von diesem spezifischen Oberflächenkennwert aufgetragen.

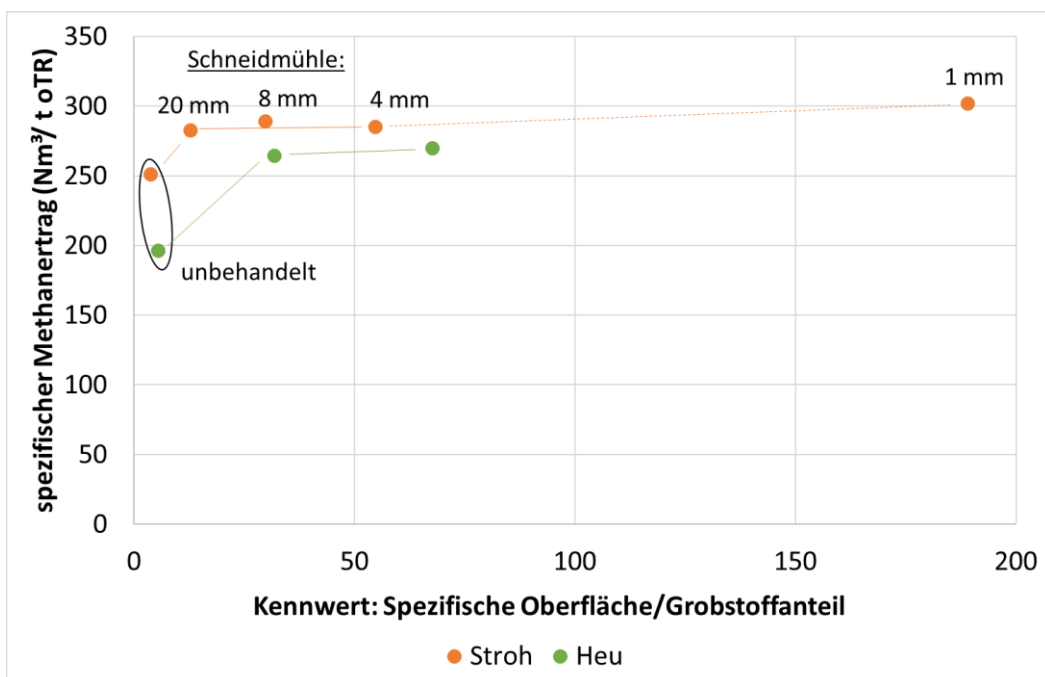


Abbildung 20: Spezifische Methanerträge in Abhängigkeit vom Zerkleinerungszustand (Schneidmühle)

Es zeigte sich, dass durch eine schneidende Beanspruchung (Schneidmühle) selbst mit relativ groben Siebausslässen (8 mm) bereits ein Fortschritt bei der Biogaserzeugung gegenüber der unbehandelten Probe erreicht wird. Offensichtlich werden hier Wachsschichten oder ähnliche Strukturen bereits geschädigt und damit besser benetzbar und für die Mikroorganismen erreichbar. Weiterer Aufwand bei der Zerkleinerung mittels Schneidprinzip scheint nur noch geringe Verbesserungen zu erbringen, welche den energetischen Aufwand nicht rechtfertigen. Die sehr grob zerkleinerten Rasenmäher-Proben wurden nicht hinsichtlich Gasertrag bewertet, da die Faserkennwerte hier keine Verbesserung erwarten ließen.

In einer **zweiten Versuchsreihe** wurde Stroh mittels kleintechnischer Hammermühle und einer weiteren Schneidmühle der Fa. Fritsch zerkleinert.

Für orientierende Versuche in der Hammermühle wurden zunächst die in Abbildung 21 gezeigten Siebeinsätze verwendet und das Stroh einmalig zugegeben.

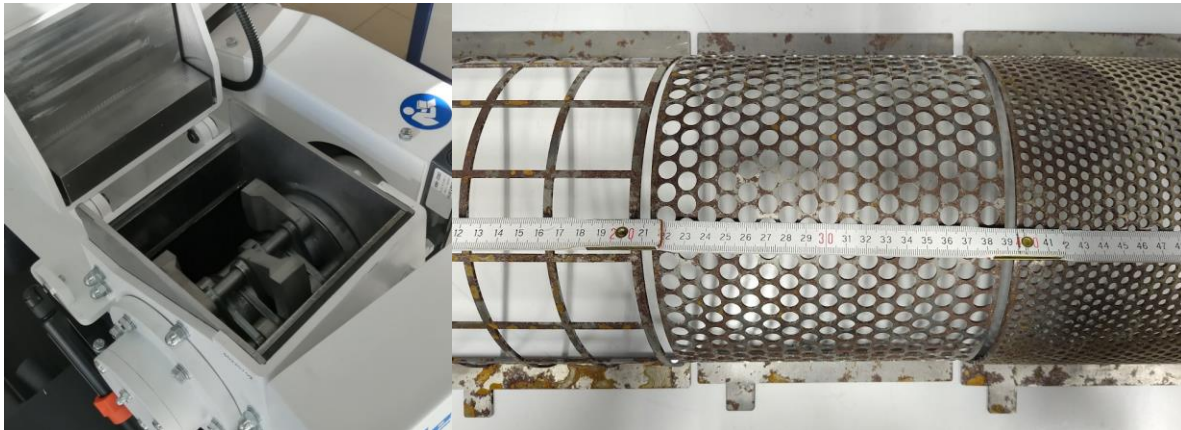


Abbildung 21: Hammermühle und Siebeinsätze (40 x 40, 10 mm und 5 mm Rundloch)

Für orientierende Versuche in der alternativen Schneidmühle der Fa. Fritsch (anderer Rotor und andere Siebqualität als bei Schneidmühle Retsch) wurden die Siebausslässe 0,5 mm, 1 mm und 6 mm verwendet (vgl. auch Abbildung 22). Auch für diese Versuche wurde das Stroh jeweils einmalig so lange zerkleinert, bis es die Kammer durch das Sieb verlassen konnte.



Abbildung 22: Schneidmühle „Pulverisette 19“ der Fa. Fritsch mit Rotor und Siebausslass

Die behandelten Proben wurden wie in Versuchsreihe 1 beschrieben mit Hilfe optischer Bildanalyse hinsichtlich Faserlänge- und -dicke bewertet. In Abbildung 23 sind die Messwerte für die Grobfraktionen (> 0,5 mm) als x_{10} bis x_{90} dargestellt.

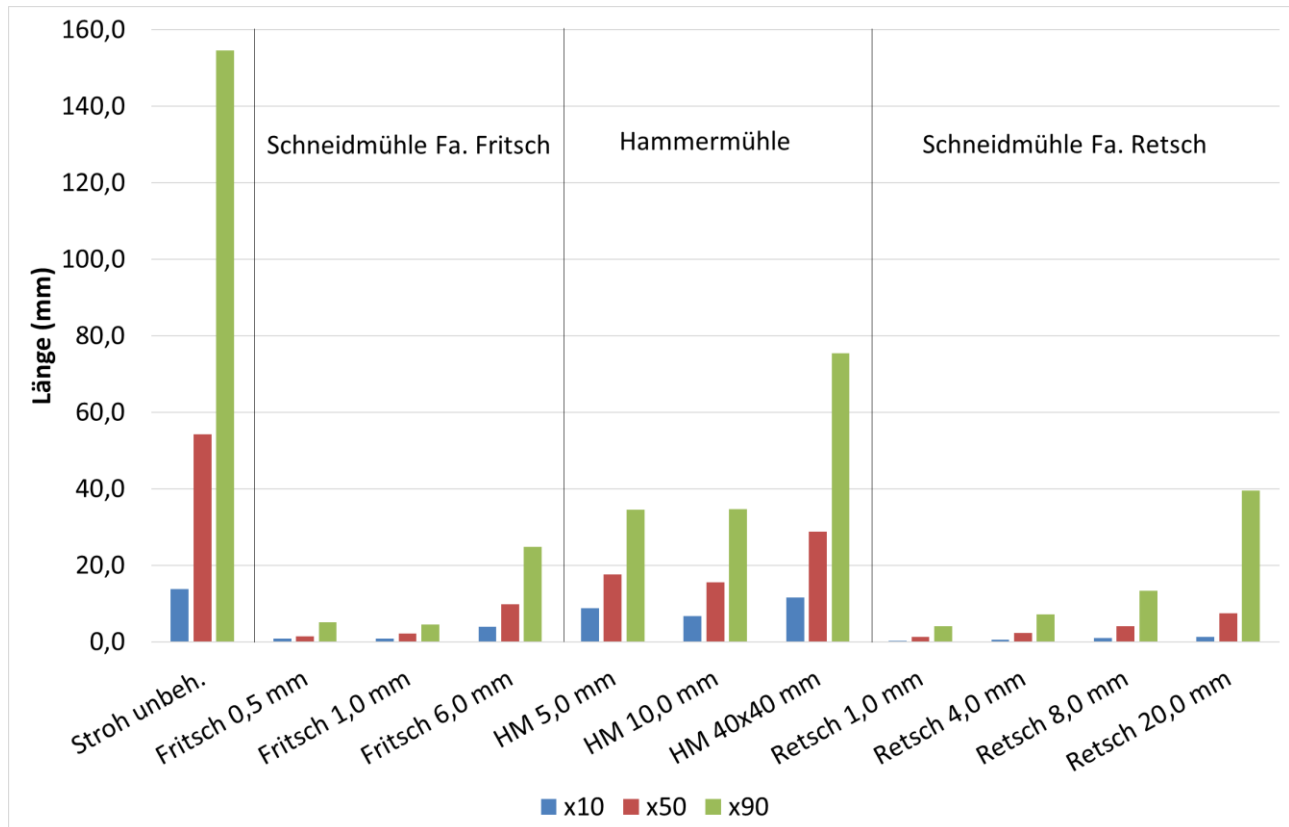


Abbildung 23: Faserlänge für Stroh (Fraktion > 0,5 mm) in Abhängigkeit von der Behandlung

Es wird ersichtlich, dass die beiden getesteten Schneidmühlen zwar ähnliche Effekte hinsichtlich der Längenänderung erreichen. Die Schneidmühle der Fa. Retsch kann jedoch noch kleinere Längen bei vergleichbaren Sieben erreichen.

Für die Behandlung in der Hammermühle konnte festgestellt werden, dass der Zerkleinerungseffekt bei vergleichbaren Siebweiten geringer ausfällt als bei den Schneidmühlen. Eine Ursache könnte der starke Luftstrom durch die Rotation der Hämmer sein, welcher dazu führt, dass Strohpartikel (auch etwas längere) die Behandlungskammer eher verlassen, da sie längs durch die Sieblöcher geblasen werden. Unplausibel erschien in den orientierenden Vorversuchen allerdings der geringe Unterschied zwischen der Behandlung in der Hammermühle mit 5 und 10 mm Sieb.

Daher wurden die Hammermühlenversuche fortgesetzt und dabei auch 2-fach und 3-fach Durchläufe der Proben durch die Mühle getestet. Dafür wurde das zerkleinerte Material aufgefangen und erneut in die Mühle gegeben.

Die ursprüngliche Zielstellung beim Einsatz der Hammermühle war, eine größere Zerfaserung durch groben Prall zu erreichen. In den durchgeführten Versuchen zeigte sich aber, dass das Stroh nur sehr kurz in der Kammer verweilt und offensichtlich die Scherung (Schneidbeanspruchung) am Sieb eine größere Rolle spielte als die Schläge innerhalb der Kammer. Aus diesem Grund wurde durch einen Spezialbau ein „Siebeinsatz“ ohne Sieblöcher beauftragt und angefertigt, um die Kammer komplett verschließen zu können. Dadurch sollte die Aufenthaltszeit und damit die Prallbeanspruchung erhöht werden. Abbildung 14 zeigt die nach unten verschlossene Mahlkammer und behandeltes Stroh nach 2 mal 10 s Behandlungsdauer.

Es musste aber auch hierfür festgestellt werden, dass eine signifikante Auffaserung nicht stattfindet. Stattdessen wird ein Teil zu Staub zermahlen, welcher trotz geschlossenen Mahlraumes an sehr kleinen Öffnungen austrat. Der andere Teil der Proben wies einen nur geringen Zerkleinerungsfortschritt auf, welcher in etwa einen ein- oder zweifachen Durchlauf mit 10 mm Sieb entsprach.



Abbildung 24: Stroh von Betrieb B1 nach 2 x 10 s Hammermühle (ohne Sieb → Batchbetrieb)

Die erreichten Ergebnisse hinsichtlich der mittleren Partikellänge (X_{50}) sind in Abbildung 25 dargestellt. Die Mehrfachbeanspruchung in der Hammermühle verbessert das Zerkleinerungsergebnis und nach 2 Durchläufen (D2) werden mittlere Längen erreicht, welche der Auslass-Siebweite entsprechen. Damit konnten plausible Ergebnisse erzielt werden. Jedoch war die Zerkleinerung in der genutzten Hammermühle auch mit mehreren Durchläufen weniger effektiv als die in der Schneidmühle (Retsch). Der oben geschilderte Batchbetrieb (2 x 10 s bei geschlossener Kammer) konnte, wie erwähnt, keine Verbesserung erreichen.

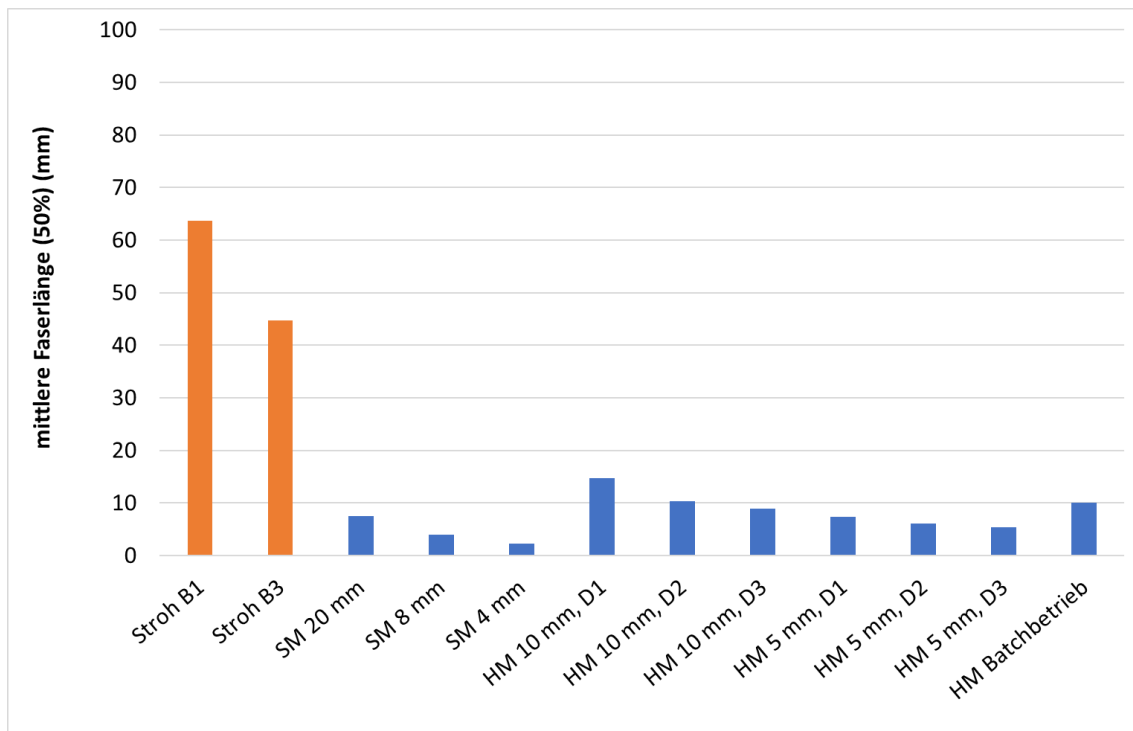


Abbildung 25: Mittlere Partikellängen (X_{50}) für verschiedene Vorbehandlungsverfahren (Labor/Technikum)

Bezüglich der maximalen Partikellänge (Abbildung 26) liegen sowohl bei der Schneidmühle als auch bei der Hammermühle die 4 bzw. 5 mm – Siebe mit Werten < 11 bzw. 34 mm auf der sicheren Seite bzgl. der Betriebssicherheit von Biogasanlagen beim Pumpen und Rühren.

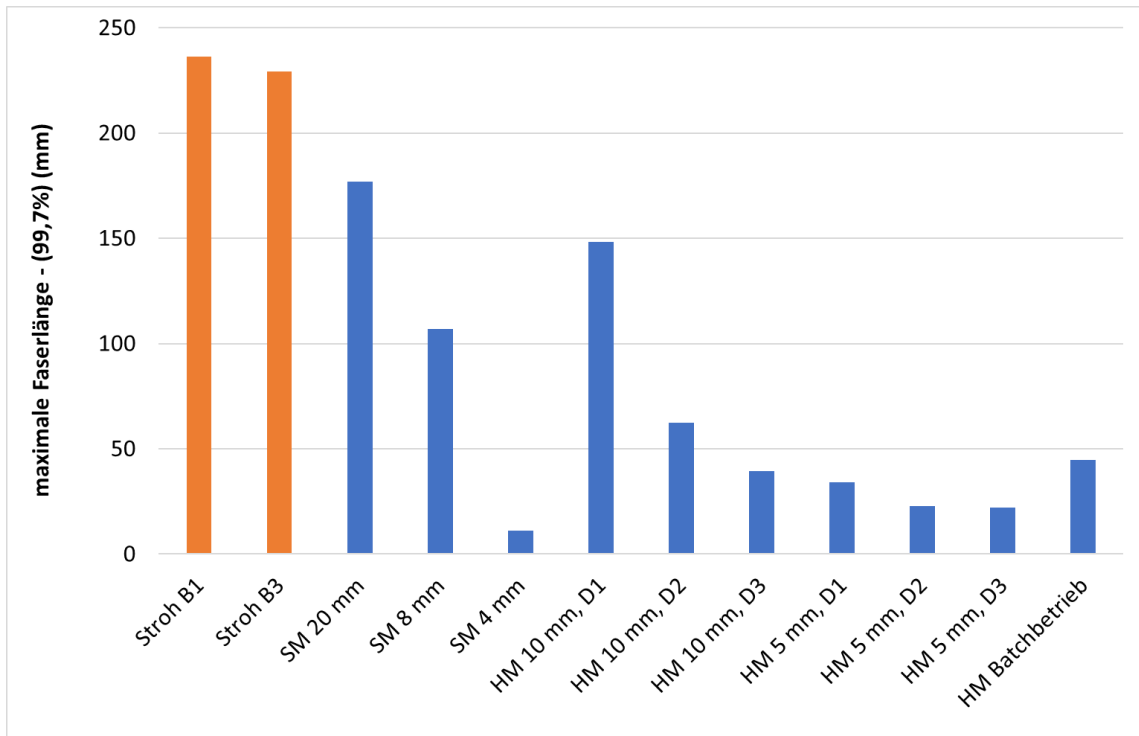


Abbildung 26: Maximale Partikellängen ($X_{99,7}$) für verschiedene Vorbehandlungsverfahren (Labor/Technikum)

Für die mittlere (Abbildung 27) und für die maximale Partikeldicke (Abbildung 28) kann abgeleitet werden, dass auch hier die Schneidmühle mit zwanghafter Scherung effektiver wirkt als die Prallbeanspruchung in der Hammermühle.

Die verwendete Hammermühle scheint fast unabhängig von der Anzahl der Durchläufe und der genutzten Siebweiten nur einen geringen Effekt auf die Dicke der Strohpartikel zu haben. Somit scheint auch der Effekt der Auffaserung eher gering auszufallen.

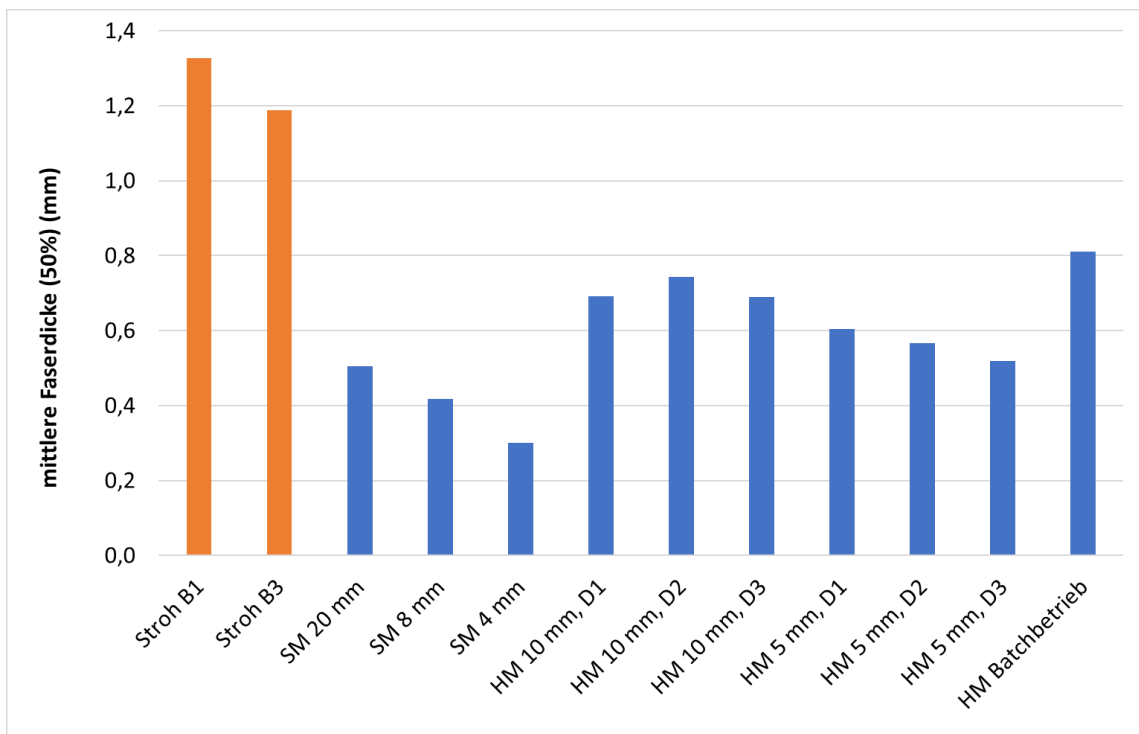


Abbildung 27: Mittlere Partikeldicken (X_{50}) für verschiedene Vorbehandlungsverfahren (Labor/Technikum)

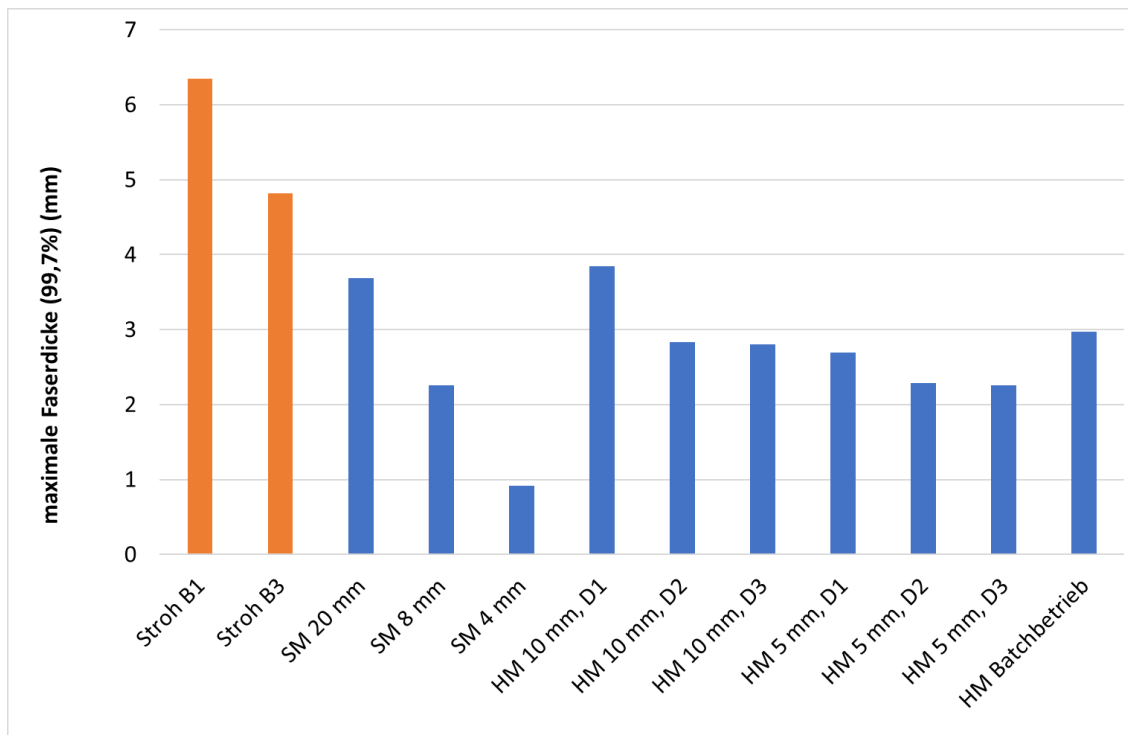


Abbildung 28: Maximale Partikeldicken (X_{99,7}) für verschiedene Vorbehandlungsverfahren (Labor/Technikum)

Trotz der vergleichsweise geringen Auffaserung, welche mit den kleintechnischen Aggregaten erreicht wurde, sind die Ergebnisse für die Längenveränderung in einem guten Bereich bezüglich der potenziellen Betriebsstabilität einer Biogasanlage. Außerdem spielen Technologien nach dem Prinzip der Hammermühle in der Praxis eine große Bedeutung, weshalb bei den Recherchen und Untersuchungen im großtechnischen Bereich der Fokus darauf gelegt wurde.

Seitens des UAN Ingenieurbüro Rückert wurde eine Recherche zu potenziellen **Zerkleinerungsaggregaten** durchgeführt. Zusätzlich wurde die Option des Zukaufs von bereits vorbehandelten Substraten geprüft und entsprechende Substrate angefragt. Tabelle 6 gibt einen Überblick zu den verschiedenen Verfahren und Produkten. Ebenfalls enthalten sind Informationen zu Kosten und Probenahmen im Projekt.

Tabelle 6: Übersicht zu den betrachteten Verfahren und Substraten

| Hersteller | Modell | Art der Zerkleinerung (nass, trocken) + Fertigprodukte | jährliche Kosten (EUR) | Substrat - probe |
|---------------------------|------------------------|---|--------------------------------|---------------------|
| Vogelsang | Pre-Mix | Nasszerkleinerer, Mischzerkleinerer | 27.045* + 65.000 | |
| Tietjen | Impra 3M | Nasszerkleinerer mit Additivzugabe | 32.910* + 65.000 | |
| Tietjen | BMS 1500 | Prallreaktor | 63.177* + 65.000 | |
| BioG | Zerfaserer RBG 06 | Prallreaktor | 27.389* + 65.000 | x |
| Grundmann | Zweirotor-Hammermühle | Hammermühle | 15.931* + 65.000 | |
| Himel (Elektromotor) | STZMi | Strohmühle klein | 20.182* + 65.000 | x |
| Himel (Zapfwellenantrieb) | STZ540 | Strohmühle klein | 22.114* + 65.000 | |
| Briol (Elektromotor) | Falcon | Strohmühle klein | 12.414* + 65.000 | |
| Briol (Zapfwelle) | Falcon | Strohmühle klein | 11.247* + 65.000 | |
| Briol (Zapfwelle) | Haybuster | Strohmühle groß | 16.881* + 65.000 | x |
| Gruber | Strohzerreißer SZ 2000 | Strohmühle grob | laut Hersteller nicht geeignet | |
| Hirlinger Landtechnik | Strohhexe | Strohmühle klein | laut Hersteller zu klein | |
| Teagle | Tomahawk | Strohmühle groß | | x |
| Biogasgemisch | ATS | Biomasse Mischung für BGA | 81.375** | x |
| Stroh briкетt | C.F. Nielsen (DK) | Großbriкетt | | x |
| easy-strø | easy agricare (DK) | fertige Einstreuprodukte | 217.750** | x |
| easy-way | easy agricare (DK) | fertige Einstreuprodukte | 212.550** | x |

* AfA + Betriebskosten für 650 t Stroh-Behandlung (Ohne Gestehungskosten für das Ausgangsstroh = 65.000 EUR)

** Produktkosten für 650 t (inkl. vorheriger Behandlung)

Verfahren zur Nasszerkleinerung wurden zunächst vereinzelt mit betrachtet, weil man den Abbau in der Vergärung ausnutzen könnte und anschließend mit geringerer Energie den Gärrest (nass) behandeln würde. Dies wurde jedoch relativ schnell verworfen, da eine erste Vergärungsstufe nicht ohne Vorzerkleinerung der Substrate funktioniert. Trotzdem sind zum Vergleich die Jahreskosten auch für die Nasszerkleinerung abgeschätzt worden.

Hinsichtlich der Trockenzerkleinerung wurden ausschließlich Prallreaktoren und verschiedene Stroh- und Hammermühlen betrachtet. Die folgenden Abbildung zeigen eine Auswahl an Aggregaten.



Abbildung 29: Große Stroh­mü­hlen für Einstreu (links: Teagle, rechts: Briol Haybuster 1030)¹

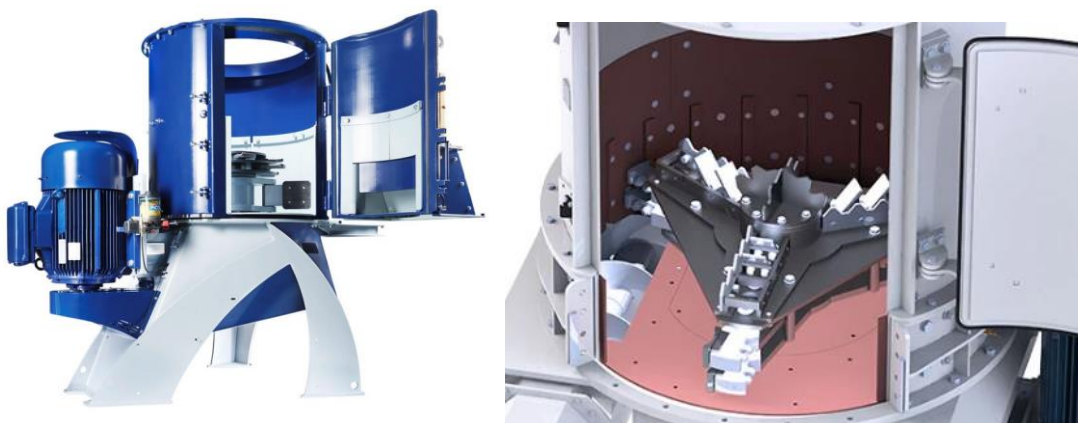


Abbildung 30: Prallreaktoren (links: Fa. Lindner für BioG, rechts: Fa Tietjen)²



Abbildung 31: Kleine Stroh­mü­hlen bzw. Häcksler (links: Fa. Himel, rechts: Fa. Hirlinger)³

¹ <https://www.teagle.de> und https://briol.de/?us_portfolio=haybuster-1000-1130

² <https://biog-biogas.com/aufbereitungstechnik/> und <https://www.tietjen-original.com/produkte/maschinen/biomasse-shredder-bms/>

³ https://himel.de/index.php?route=product/product&path=17_99&product_id=48 und <https://www.landtechnik-hirlinger.de/152>

Für ausgewählte Behandlungsaggregate sowie für die fertigen Zukaufprodukte wurde Musterproben angefordert, welche hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung und zum Teil auch hinsichtlich des Gasertrages bewertet wurden. Die nachfolgenden Abbildung zeigen diese Substrate.

In Abbildung 32 ist sehr langes Stroh zu sehen, welches durch eine sehr kurze Behandlung im Prallreaktor nur geringe Veränderungen hinsichtlich der Partikelgröße erfahren hat.



Abbildung 32: links: Weizenstroh, rechts: Gerstenstroh, oben: unbehandelt, unten: nach Prall (BioG)

Stroh nach einer Behandlung mittels Himmel-Mühle mit 30 mm Sieb wirkt optisch gut aufgefasert (Abbildung 33). Im Gegensatz dazu wirken die Proben nach Haybuster (Abbildung 33) und Teagle (Großmühlen) (Abbildung 34) eher geschnitten und wenig zerfasert. Ausnahme bildet die Probe nach kleinem Sieb (20 mm) mit großem Feinanteil.



Abbildung 33: Stroh nach Himmel-Mühle 30 mm (links) und nach Briol Haybuster (50 mm und 20 mm – Sieb)



Abbildung 34: Stroh nach Teagle Strohmühle Tomahawk (links: C12, rechts: Dual Chop)

Das Biogasmischsubstrat in Abbildung 35 ist ein bereits kommerziell für Biogasanlagen verfügbares Substrat, welches eine Mischung aus stärkehaltigen Reststoffen der Kartoffelverarbeitung und aus Resten der Getreideproduktion darstellt. Dieses Substrat wurde als eine Art Referenz-Co-Substrat für Vergleiche hinsichtlich Gasertrag und Kosten mit betrachtet. Außerdem weist es eine Partikelstruktur auf, welche bisher in keiner der Anwender-Biogasanlagen zu Problemen geführt hat.



Abbildung 35: links: kommerzielles Biogasmischsubstrat (Fa. ATS), rechts: Strohbricketts (10 cm Durchmesser)

Die getesteten kommerziellen Einstreusubstrate (für Rind und Schwein) aus Dänemark (Abbildung 36) wurden ebenfalls als potenzielle Einsatzsubstrate herangezogen, da deren Kosten bereits Gesteuerung und Aufbereitung beinhalten. Außerdem könnte hier, wie auch bei allen anderen Strohprodukten ein Doppelnutzen als Einstreu und anschließender energetischer Nutzung in Frage kommen. Im Produkt Easy way sind auch Pellets bzw. Pelletbruchstücke zu erkennen, was den Feinanteil und damit die Gasausbeute leicht erhöht (vgl. auch Tabelle 7).



Abbildung 36: kommerzielle Einstreuprodukte (Easy AgriCare), links: Easy Strø, rechts: Easy way

Die Einstreuprodukte aus Dänemark (inkl. der großen Strohbricketts mit 10 cm Durchmesser) erreichten im Gasertragstest ähnliche Gasausbeuten, wie vorzerkleinertes Stroh. Damit wäre aus Sicht der Biogaserzeugung im Zusammenhang mit den hohen Einkaufs- und Lieferkosten der Einsatz dieser Produkte schlechter zu bewerten als die Nutzung von selbst aufbereiteten Stroh.

Das Produkt der Fa. ATS zeigt trotz höherem Wassergehalt eine kaum geringere Gasausbeute pro Frischmasse als die hoch feststoffhaltigen dänischen Einstreuprodukte. Bei einem deutlich günstigeren Preis stellt dieses Produkt eine Alternative für Biogasanlagen dar.

Tabelle 7: Basiseigenschaften der kommerziellen Fertigprodukte

| Produkt | Herkunft | TR (%) | oTR (%) | Biogas | |
|---------------|---------------|--------|---------|-------------|-------------|
| | | | | (NL/kg oTR) | (NL/kg OS*) |
| Biogasgemisch | ATS | 66,3 | 94,5 | 726,7 | 455,3 |
| Strohbrickett | Dänemark | 92,9 | 92,8 | 537,8 | 463,6 |
| easy-strø | easy agricare | 90,3 | 95,9 | 561,8 | 486,5 |
| easy-way | easy agricare | 94,5 | 94,7 | 575,0 | 514,6 |

* Originalsubstanz

Von besonderem Interesse waren die relevanten Partikelgrößen, um für die kleintechnischen Versuche sowie für die spätere Praxis geeignete Materialien bzw. Aufbereitungstechniken auswählen zu können. In den folgenden Diagrammen sind diese granulometrischen Eigenschaften dargestellt.

Anhand der Vorversuche sowie der praktischen Erfahrung im Umgang mit Stroh in Vergärungsanlagen wurden für die mittlere und maximale Länge der Partikel die in den Abbildungen rot markierten Grenzwerte festgelegt. Demnach eignen sich bis auf die sehr grobe Zerkleinerung bei BioG alle anderen Technologien und Fertigungssubstrate für einen Einsatz in der Biogasanlage.

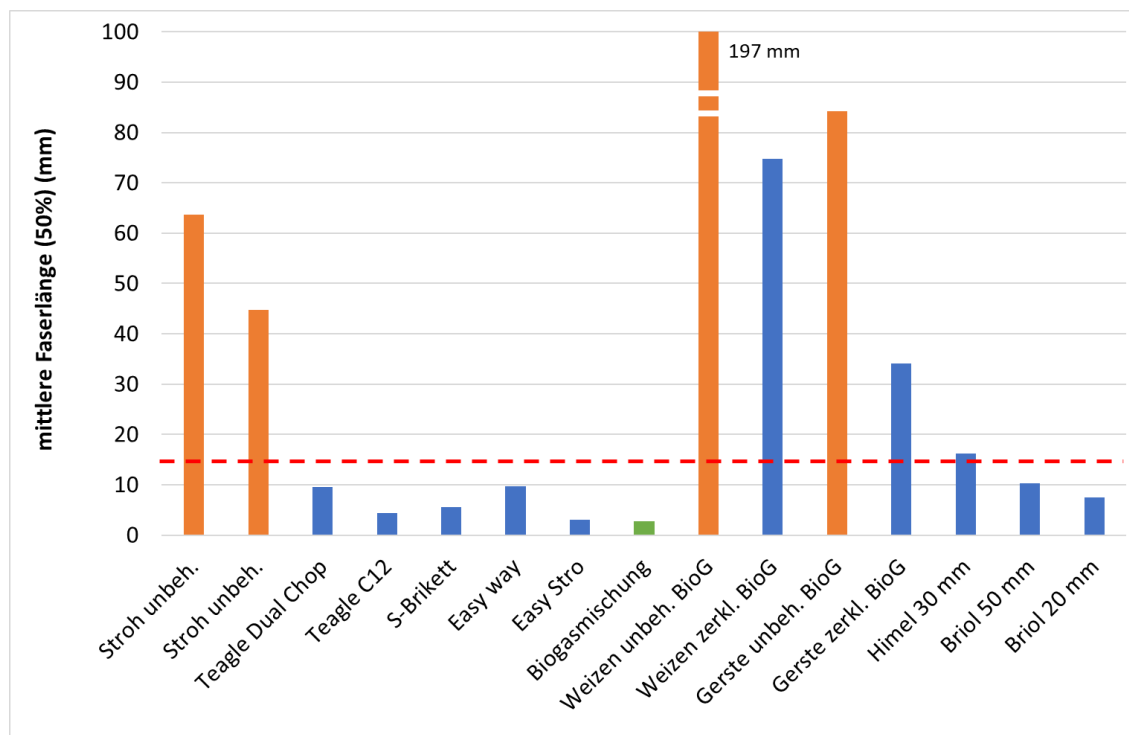


Abbildung 37: mittlere Faserlänge (X₅₀) für verschiedene Substrate (Großtechnik)

Im konkreten Fall ist auch immer zu betrachten, welchen Anteil z.B. die Partikel mit maximalen Abmessungen haben (Abbildung 38). Eine geringe Anzahl langer Einzelpartikel ist wenig problematisch. Aus diesem Grund ist auch das knappe Überschreiten der Grenzwerte durch die Versuchsanlage der Fa. Himmel als unkritisch zu bewerten.

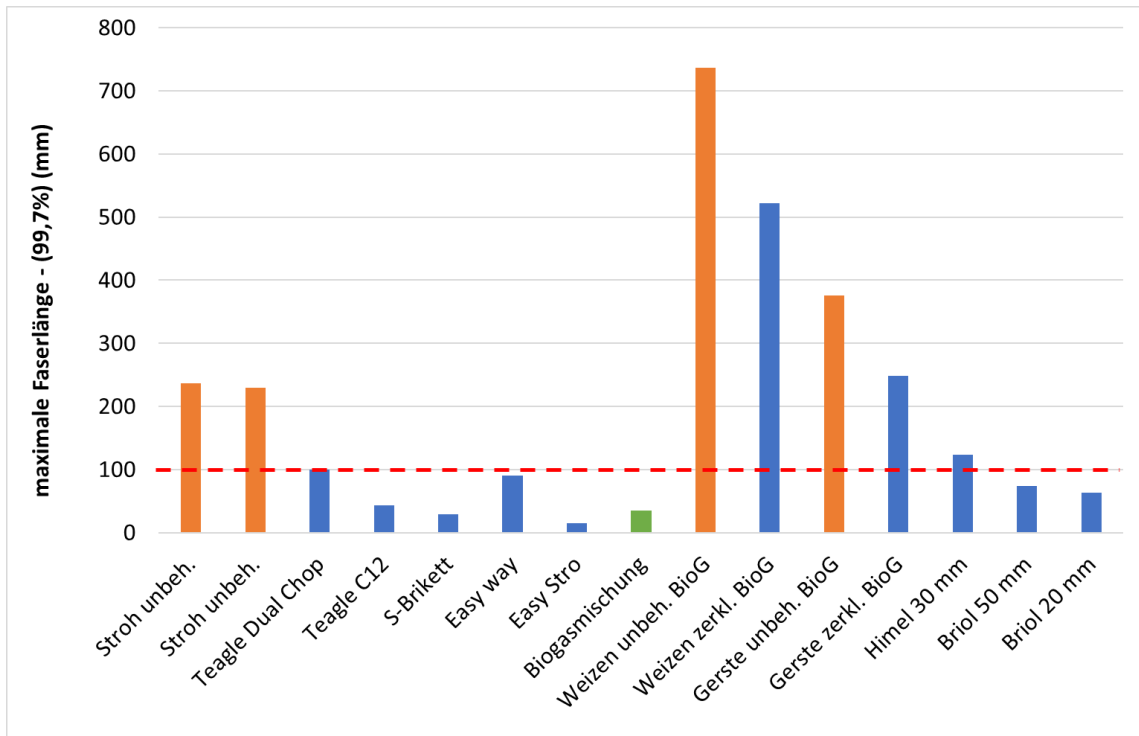


Abbildung 38: maximale Faserlänge ($X_{99,7}$) für verschiedene Substrate (Großtechnik)

Die Faserdicke ist dabei eher untergeordnet. Trotzdem wurde auch hierfür ein mittlerer Grenzwert von 0,7 mm festgelegt bzw. empfohlen, welcher mit Ausnahme der groben Behandlung durch BioG von allen Aggregaten und Produkten erreicht wird.

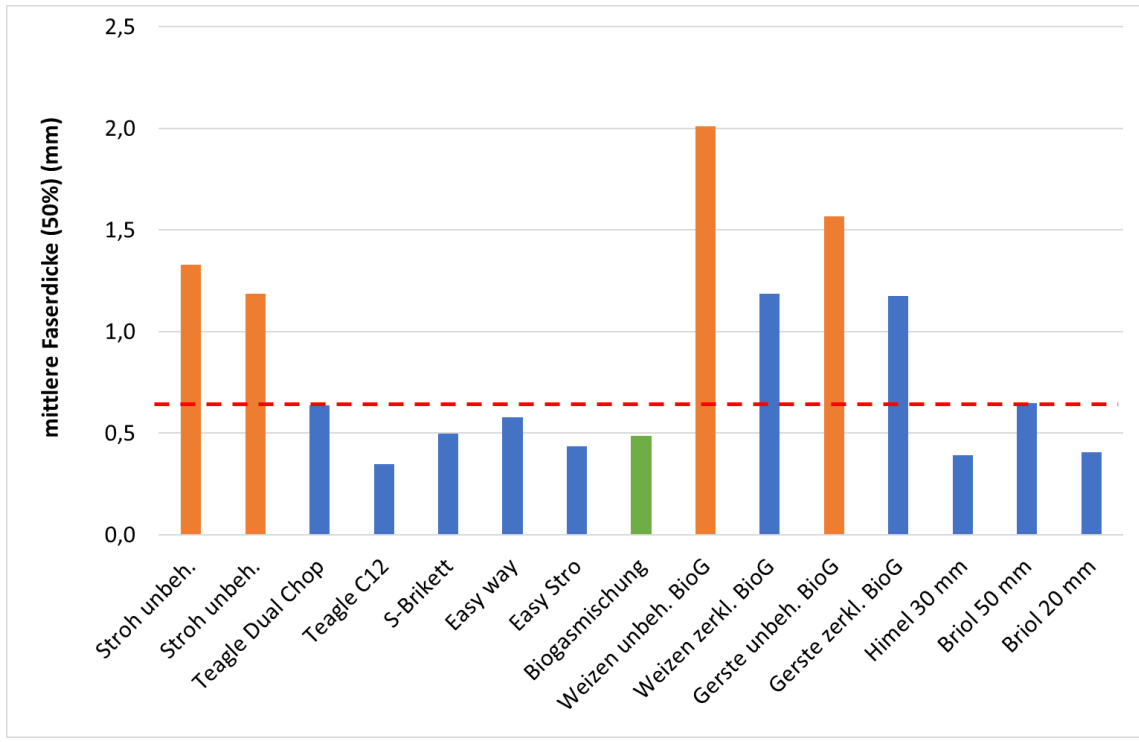


Abbildung 39: mittlere Faserdicke (X_{50}) für verschiedene Substrate (Großtechnik)

Arbeitspaket 3: Reaktorkonzept und Durchmischung

Aus den Ergebnissen von AP 1 sowie aus den Projektzielen ging hervor, dass eine Zugabe von maximal 20 % an trockenem Reststoff, wie z.B. Stroh zur Gülle ein interessantes Mischungsverhältnis darstellt, welches durch den Vergärungsprozess in eine gerade noch mischbare Konsistenz überführt werden kann.

Im AP 3 interessierte zunächst die Qualitätsentwicklung und das mögliche Handling von verschiedenen **Stroh/Gülle-Mischungen** bei unterschiedlichen Randbedingungen. Dazu wurden definierte Mischungen angesetzt und rheologisch bewertet.

Ausgang der Untersuchungen war eine Mischung der dünnsten verfügbaren Gülle (Schweinegülle von Betrieb B1) mit Stroh in einem Verhältnis von 7% Stroh (100 g) auf 93 % Gülle (1350 g). In Abbildung 40 ist links gut ersichtlich, welches Volumen durch 100 g Stroh (20 mm Schneidmühle) eingenommen wird. Trotz der großen Zugabemenge von Gülle, war eine vollständige Benetzung nur durch aktives Zusammendrücken des Strohs möglich. Die Konsistenz der Mischung ähnelte einem feuchten Festmist-Haufwerk und war praktisch nicht rühr- oder pumpfähig.

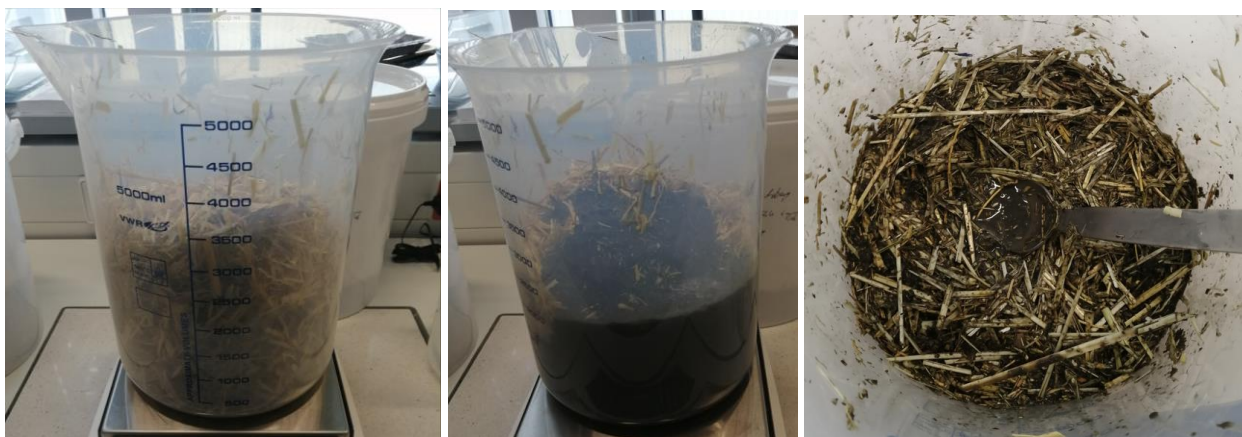


Abbildung 40: Mischung von 7 % Stroh (20 mm Schneidmühle) mit Schweinegülle (links: Stroh, Mitte: Güllezugabe)

Die gleichen Mischungsverhältnisse mit zerkleinertem Stroh (8 mm oder 4 mm) waren zwar etwas leichter zu benetzen, aber für ein Rühren oder Pumpen immer noch nicht geeignet (Abbildung 41).



Abbildung 41: Mischung von 7 % Stroh (Schneidmühle 8 mm links und 4 mm rechts) mit Schweinegülle

Aus diesem Grund wurde zusätzlich Schweinegülle zugegeben, bis ein Verhältnis von nur noch 4 % Stroh erreicht wurde. Damit lag die Mischung bei 10 % TR und enthielt deutlich weniger Stroh als der angepeilte Zuschlag von 20 %. Die eingestellten 4 % Strohzugabe lagen jedoch in einem Bereich, welcher in anderen Untersuchungen an einer großtechnischen Vorgrube bereits als maximale Zugabemenge für Strohpellets in Rindergülle ermittelt worden war. Offensichtlich sind höhere Mischungsverhältnisse als frische Mischung schwer zu realisieren, weshalb im praktischen Einsatz eine Direktzugabe zum Fermenter zu favorisieren wäre, um die bereits mehrfach erwähnte Abbauaktivität im Fermenter zur TR- und Viskositätsreduktion zu nutzen.

Dennoch wurde dieses Mischungsverhältnis (4 % Stroh) verwendet, um die Viskositäten in Abhängigkeit von der Partikelgröße zu bestimmen, um zu bewerten, welche Art und Intensität der Vorzerkleinerung den größten

Effekt auf Mischbarkeit und Pumpfähigkeit besitzt. Dabei wurden mehrere Messkörper und Messgeräte für die Bestimmung der Viskosität miteinander verglichen. Zum Einsatz kamen ein Blattrührer an einem ViscoPact sowie die Rotationskörper MVDIN und FL10 für das Viskosimeter VT 550 (Abbildung 42).

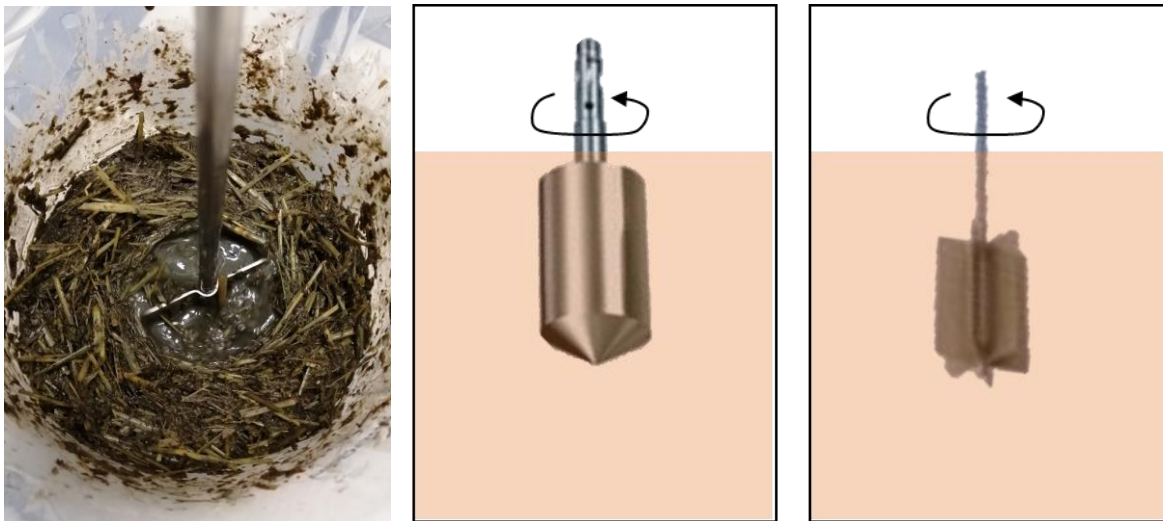


Abbildung 42: Viskositäts-Messkörper von links: Blattrührer, MVDIN und FL 10

Alle Messungen fanden in 2 Liter Bechergläsern mit Temperierung statt. Sehr dünnflüssige Substrate, wie z.B. Gülle lassen sich nur mit MVDIN messen (vgl. AP 1), da es beim Einsatz von Flügel- oder Blattrührern zu hohen Turbulenzen kommt, was die Messung negativ beeinflusst.

Für Mischungen aus Stroh und Gülle kommt es darauf an, dass sich der Drehkörper nicht nur freidreht und im eigenen Saft rührt. Dies kann am besten durch den Einsatz des Blattrührers vermieden werden. In Abbildung 43 ist links zunächst zu erkennen, wie stark die Viskosität ansteigt, wenn ledig 4 % Stroh in Schweinegülle gegeben werden. Aufgrund des Freidrehens der Messkörper, insbesondere MVDIN mit glatter Wandung, sind die gemessenen Viskositäten tendenziell zu gering. Die mittels Blattrührer gemessenen Viskositäten (im rechten Diagramm) sind deutlich höher und bilden auch den Unterschied zwischen 4 mm und 8 mm Stroh besser ab. Die schwarzen Linien im Diagramm stellen Trendlinien dar.

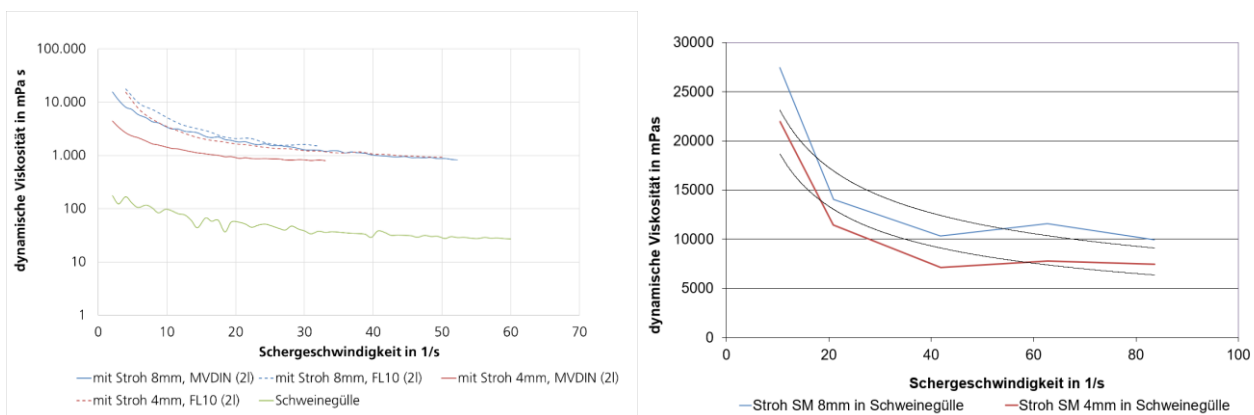


Abbildung 43: Viskosität links mit MVDIN oder FL 10 sowie rechts mit Blattrührer (4 % Stroh in Schweinegülle)

Für die Mischung von Rindergülle mit 4,6 % Stroh in verschiedenen Zerkleinerungsstufen sind die Viskositätskurven mittels MVDIN und FL10 in Abbildung 44 dargestellt. Ähnlich wie bei Schweinegülle ist die Steigerung der Viskosität durch Strohzugabe deutlich zu erkennen, die Unterschiede der Zerkleinerungsgrade sind aber auch wenig differenziert.

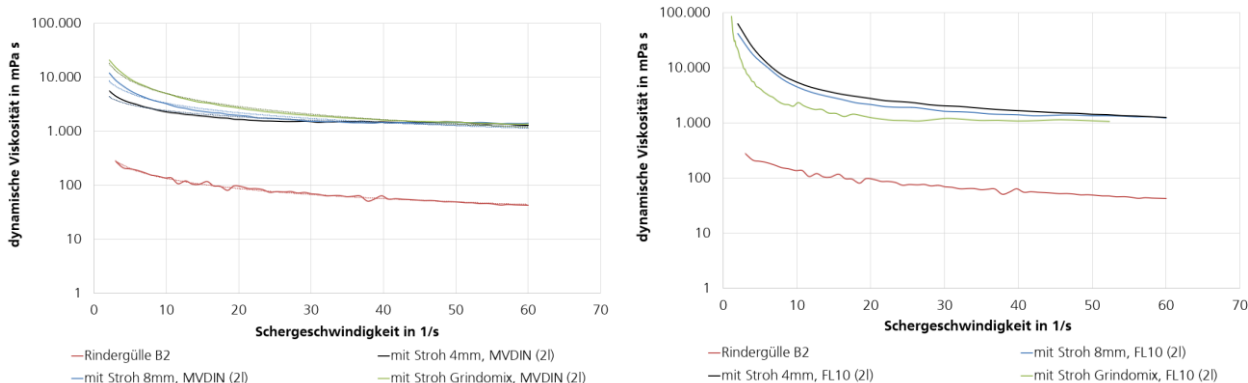


Abbildung 44: Viskosität links mit MVDIN und rechts mit FL 10 (4,6 % Stroh in Rindergülle (6,34 % TR))

Im Gegensatz dazu liegen die Viskositäten aus den Messungen mittels Blattrührer höher, da verstärkt Fasern und Partikel mit bewegt werden (Abbildung 45). Die ebenfalls ermittelten Drehmomente (rechte Abbildung) zeigen eine besonders gute Differenzierung zwischen den einzelnen Zerkleinerungsstufen des zugegebenen Strohs.

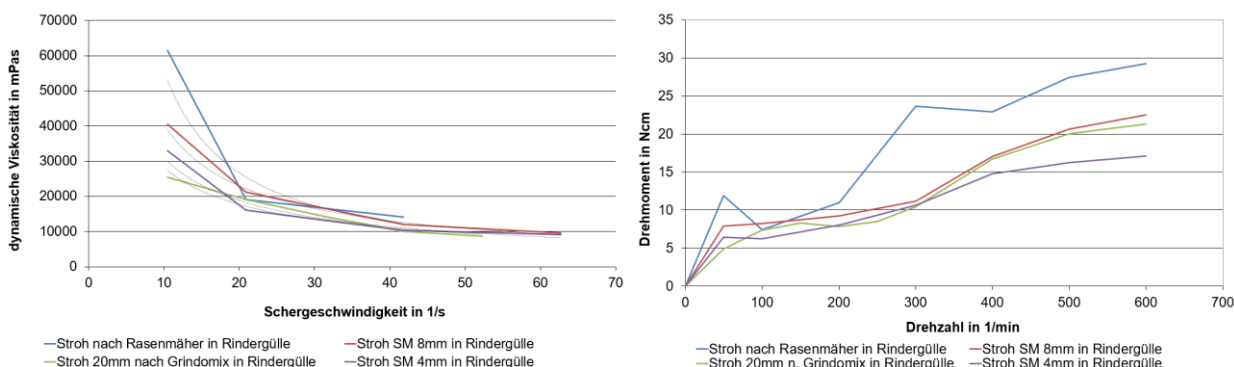


Abbildung 45: Messung mit Blattrührer Viskosität links und Drehmoment rechts (4,6 % Stroh in Rindergülle (6,34 % TR))

Dieser qualitative Unterschied der Messmethoden konnte auch für Mischungsversuche mit dicker Rindergülle (9,6% TR) und verschieden zerkleinertem Stroh gefunden werden. Aufgrund des höheren TR-Gehaltes der Gülle konnten nur 2 bis 3 % an Stroh zugegeben werden bis limitierende Viskositäten erreicht wurden (vgl. Abbildung 46). Die zu erwartenden Unterschiede zwischen den Mischungen mit unterschiedlichem Zerkleinerungsgrad fallen nur sehr gering aus, was erneut auf einen Mangel dieser Messmethode hindeutet.

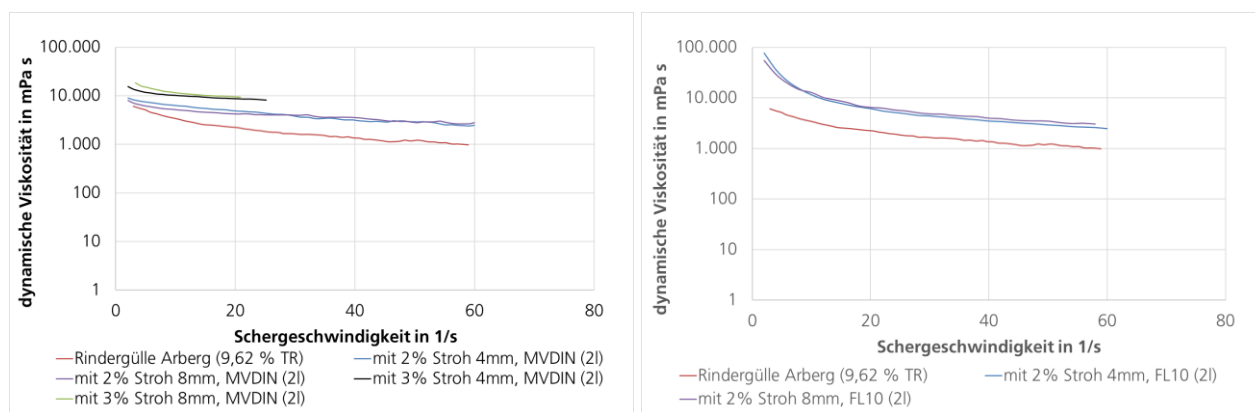


Abbildung 46: Viskosität links mit MVDIN und rechts mit FL 10 (2-3 % Stroh in Rindergülle (9,6 % TR))

Die Unterschiede aus der Zerkleinerung des zugegebenen Strohs werden erneut durch die Betrachtung des Drehmomentes am Blattrührer deutlich (Abbildung 47).

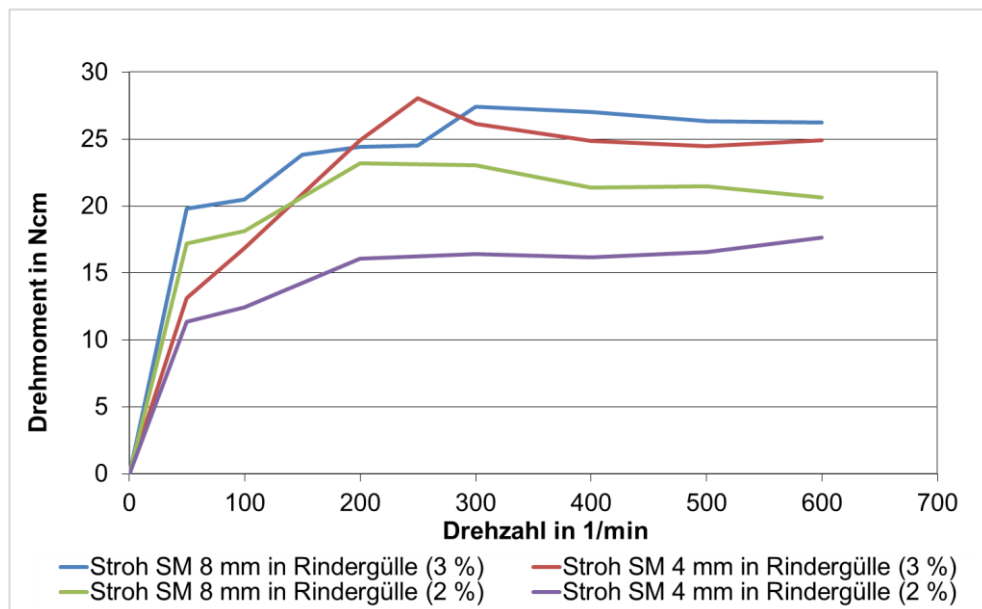


Abbildung 47: Drehmoment aus Messung mit Blattrührer (2-3 % Stroh in Rindergülle (9,6 %TR))

Aus diesem Grund wurde für die weiteren Untersuchungen festgelegt, für Mischungen aus Feststoffen mit Gülle oder anderen Prozessflüssigkeiten, die Drehmomente für ausgewählte Drehzahlen als Vergleichsgröße heranzuziehen.

Zweites Fazit der Mischungsversuche war die Limitierung der Zugabemenge von Stroh zu Gülle, um die Rühr- und Pumpfähigkeit zu erhalten. Mehr als 5 % Stroh können für die bisher getesteten Güllen und Zerkleinerungszustände nicht ohne weiteres zugegeben werden.

Neben einer weitergehenden Strohzerkleinerung, welche aber energieaufwendig ist, wäre ein möglicher Lösungsansatz die Direktdosierung in den Fermenter und Ausnutzung des mikrobiologischen Abbaus, um die Rührfähigkeit zu erlangen. Dies führt zu einem zur Reduzierung des TR-Gehaltes (vgl. Abbildung 12) sowie zur Veränderung von Partikelgröße und -struktur. Beides beeinflusst die Viskosität.

Um diesen Effekt besser quantifizieren zu können, wurden vergleichende Mischversuche mit und ohne Vergärung im Batch durchgeführt. Dazu wurden zwischen 3,3 % und 6,7 % an Stroh oder Heu zu kommunalem Faulschlamm (Standard-Inokulum für Gärtests mit 3,29 % TR-Gehalt) gegeben und diese Mischungen zum einen frisch und nach bis zu 3 d Standzeit mittels Blattrührer vermessen. Zum anderen wurden identische Vergleichsmischungen über 38 Tage bei 38 °C anaerob vergoren. Nach der Vergärung wurde zusätzlich zum TR-Gehalt auch das Drehmoment am Blattrührer als Maß für die Viskosität bestimmt.

In Abbildung 48 sind die Vergleichsdrehmomente für die frischen und vergorenen Faulschlamm/Heu-Mischungen dargestellt. Zum einen kann festgestellt werden, dass für den höher konzentrierten Ansatz die Viskosität durch Quellungsprozesse über die 3 Tage Einmisch- bzw. Standzeit noch ansteigt, während die dünnen Mischung diesen Effekt nicht aufweisen. Zum anderen zeigt sich ein deutlicher Rückgang des Drehmomentes um 50 % bis 70 % durch die Vergärung, was eine größere Reduktion als der alleinige Rückgang des TR-Gehaltes (bis 40 %) darstellt.

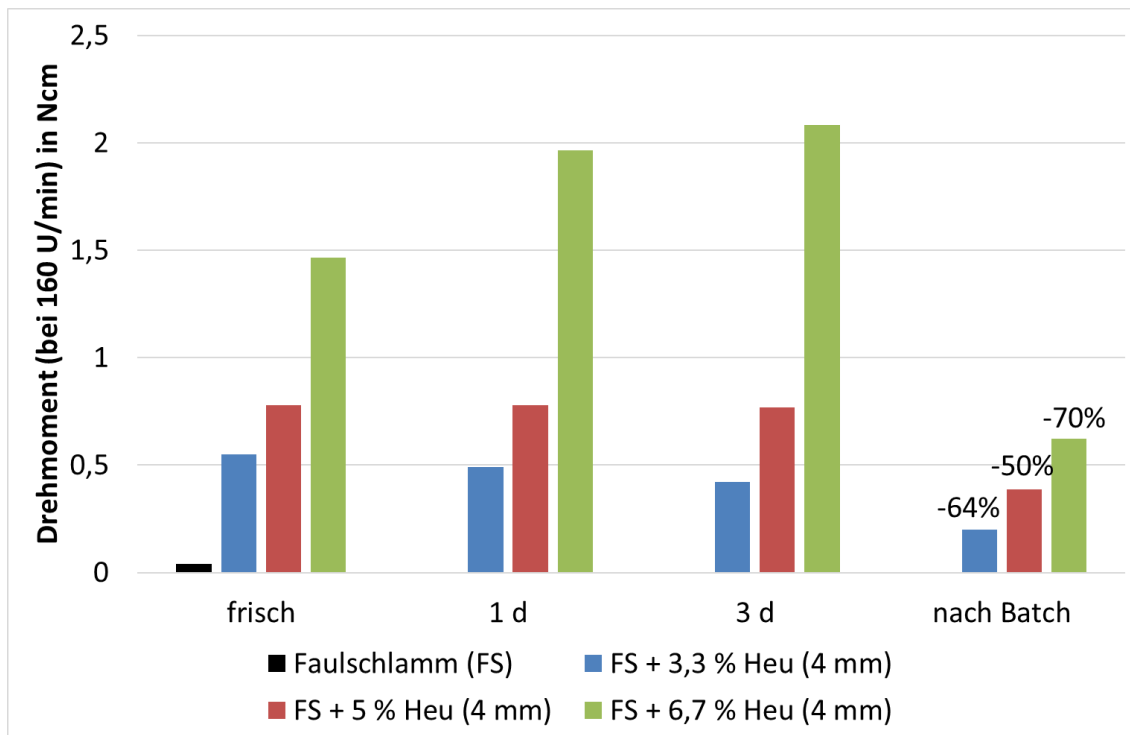


Abbildung 48: Drehmoment Blattrührer für verschiedene Mischungen aus Faulschlamm und Heu (4 mm)

Gleiche Mischungen mit Stroh zeigen nach der Vergärung sehr ähnliche Drehmomente für die Durchmischung mittels Blattrührer (Abbildung 49). Außerdem liegen die Drehmomente für Mischungen mit größerem Stroh (8 mm) nach der Vergärung in der gleichen Größenordnung wie die 4 mm Proben. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Vorzerkleinerung in diesem Größenbereich eine untergeordnete Rolle für die Durchmischbarkeit spielt, sobald die Proben vergoren wurden.

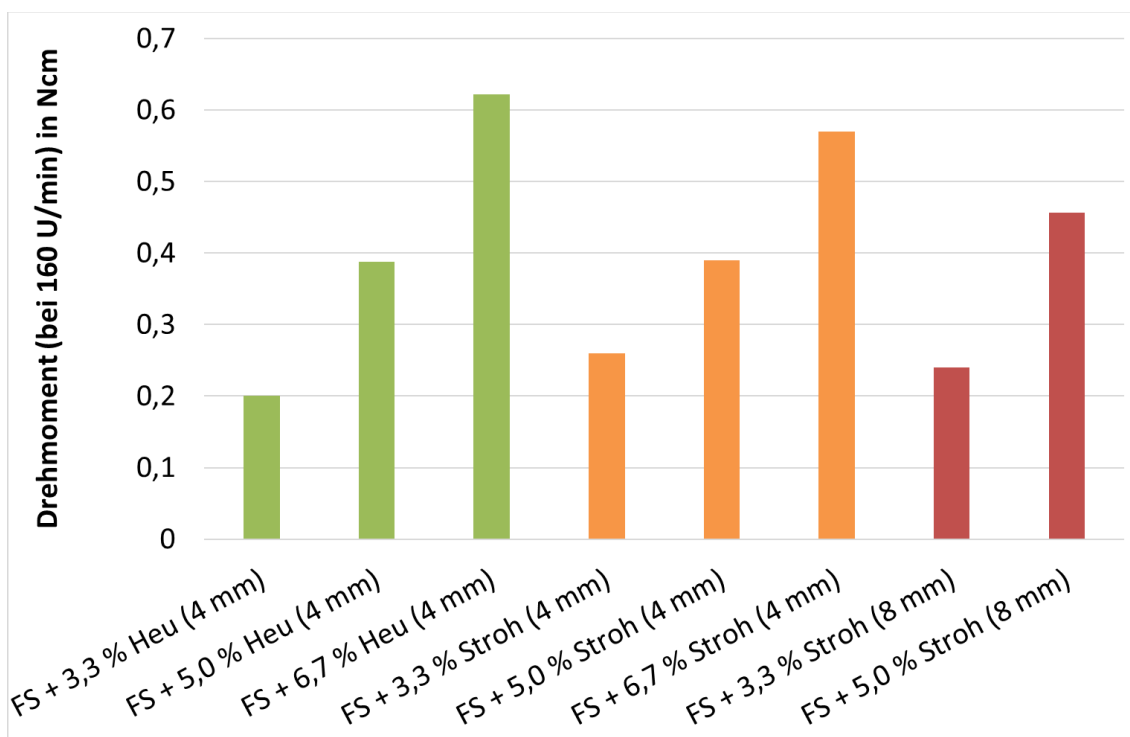


Abbildung 49: Drehmomente Blattrührer für verschiedene Mischungen nach der Vergärung im Batchgärtest

Damit konnte gezeigt werden, dass insgesamt eine vorherige Vermischung von Gülle und Stroh (z.B. in Vorgruben) nicht sinnvoll bzw. nicht in ausreichendem Maße möglich ist. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der TR-Abbau im Biogasfermenter höhere Beimengungen von Stroh (bis 20 %) theoretisch ermöglicht. Der praktische Effekt der Viskositätsniedrigung während der Fermentation ist größer als die reine Abnahme des TR-Gehaltes im Fermenter. Ursache hierfür sind Erweichungs- und Auflösungsprozesse für die eingesetzten Fasern. Dabei spielt die Ausgangspartikelgröße offensichtlich eine untergeordnete Rolle, so dass eine grobe Vorzerkleinerung zur Vermeidung von sehr langen Fasern im praktischen Betrieb ausreichen sollte.

Für die **labortechnischen Untersuchungen zur Durchmischbarkeit** im Fermenter wurde seitens Rückert auf Basis des eigenen Patentes (DE 10 20212 213 990 B4) ein Rundfermenter mit speziell angepassten Paddelrührwerken vorgeschlagen und konzipiert. Diese Reaktorausführung vereint zwei Vorteile. Zum einen können runde Behältergeometrien einfacher und kostengünstiger hergestellt werden als die typischen rechteckigen Großbehälter der Fa. Rückert. Zum anderen soll die Anpassung und Integration eines 2-welligen Paddelrührwerkes die Durchmischung von hoch viskosen Medien ermöglichen. Im Projekt GülleHebel sollte ein entsprechendes Modell im Labormaßstab hergestellt werden, welches Strömungsuntersuchungen anhand der Messung von Leitfähigkeitsunterschieden ermöglicht.

Dieser **Prozesstomograph** besteht aus drei Hauptkomponenten von drei verschiedenen Herstellern:

1. Plexiglasreaktor
2. Bohrplan und Elektroden für die Leitfähigkeitsmessung
3. Rührer

All diese Komponenten mussten exakt aufeinander abgestimmt werden. Ein erstes zeichnerisches Modell wurde seitens des Unterauftragnehmers RVT erstellt (Abbildung 50). Der Bohrlochplan wurde seitens des UAN its so konzipiert, dass keine Überlagerung von der Aufhängung der Rührachsen mit den Elektroden auftritt. Abbildung 51 zeigt die finale Geometrie des Behälters.

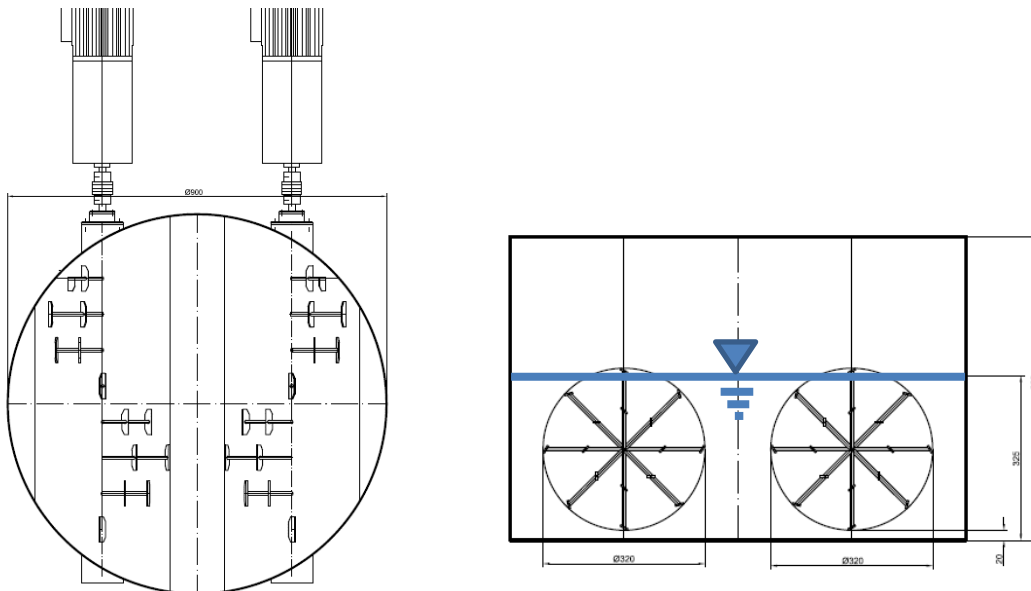


Abbildung 50: Technische Zeichnung Tomographie-Reaktor Draufsicht (links), Schnitt (rechts)

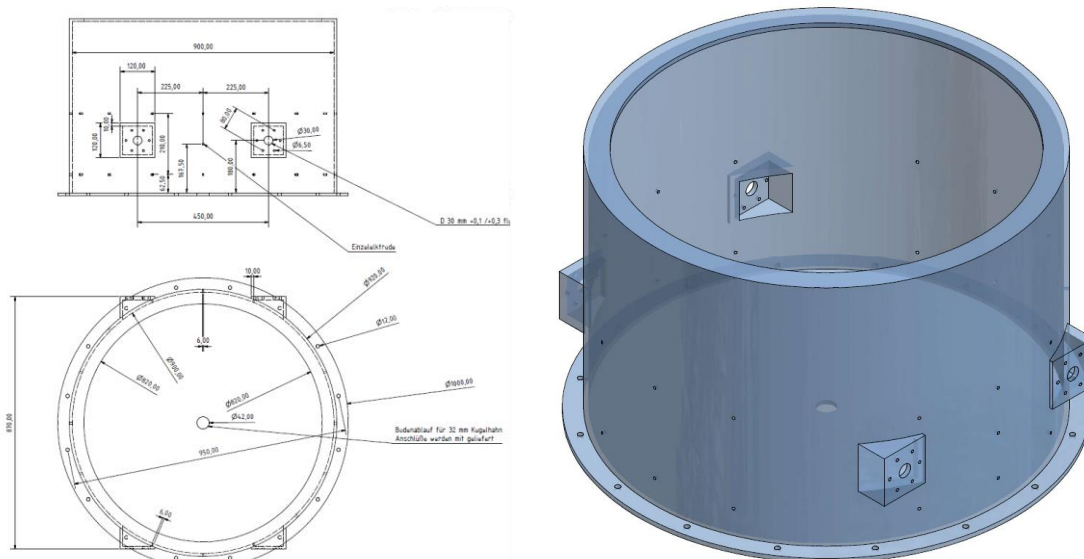


Abbildung 51: Finale Form und Abmessungen des Plexiglasreaktors

Abbildung 52 zeigt den Reaktor mit der installierten Rühr- und Messtechnik bei einem Testlauf mit Wasser. Die installierten Elektroden bilden 2 Messebenen mit jeweils 16 Elektroden, wobei Messebene 1 den oberen Reaktorbereich erfasst und Messebene 2 den unteren Reaktorbereich.

Die Prozess-Tomographie ermöglicht es, Misch- und Strömungsprozesse in Reaktoren zu visualisieren und zu quantifizieren. Bei dem vorliegenden Tomographie-System handelt es sich um ein ERT-System (electrical resistance tomography), d.h. die Messungen erfolgen auf Grundlage von Widerstandsänderungen infolge unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeiten. Voraussetzung für die Visualisierung der Mischprozesse sind unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten zwischen der im Reaktor befindlichen kontinuierlichen und der einzumischenden dispersen Phase.

Nach Anlegen einer definierten Stromstärke zwischen jeweils zwei benachbarten Elektroden kann die resultierende Spannungsdifferenz zwischen den restlichen Elektrodenpaaren gemessen werden. Dies wird für alle Elektrodenpaare innerhalb einer Ebene durchgeführt, so dass sich über den Reaktorquerschnitt ein räumliches Potenzialfeld aufbaut, welches durch die elektrischen Leitfähigkeiten des Mehrphasensystems unterschiedlich stark beeinflusst wird. Im Ergebnis dessen wird die Verteilung der Leitfähigkeit bzw. Volumenkonzentration der dispersen Phase im Reaktorsystem orts aufgelöst für jeden Punkt im Reaktor ermittelt.



Abbildung 52: Tomographie-Reaktor mit installierter Mess- und Rührtechnik

In Absprache mit dem Projektpartner Rückert wurden die Versuchsbedingungen definiert und Variationen festgelegt. Die Ausgangsbedingungen am Tomographiereaktor zeigen Abbildung 53 und Abbildung 54. Die Drehrichtung der Rührer war zunächst gegenläufig, an der Oberfläche zur Reaktorwand hin. Für einen Versuch (Versuch 5) wurde die Drehrichtung des rechten Rührwerks geändert, sodass in diesem Versuch beide Rührer im Gleichlauf betrieben werden konnten.

Als Flüssigphase wurde für alle Versuche das Modellmedium Xanthan in einer Konzentration von 5 g/L gewählt. Dies entspricht einem gut fließfähigen Gärsubstrat. Das Fließverhalten lässt sich nach dem Potenzansatz von Ostwald de Waele mit dem Konsistenzfaktor $K \sim 5 \text{ Pa s}$ und dem Fließindex $m \sim 0,14$ beschreiben. Durch den Einsatz des Modellmediums wird sichergestellt, dass die Fließeigenschaften der Flüssigphase für die verschiedenen Versuche nahezu identisch sind, sodass die Variation der Versuchsbedingungen bewertet werden kann. Zur vorgelegten Flüssigphase im Reaktor wurde per Schlauchpumpe 5 L gefärbte und aufgesalzte Xanthanlösung hinzugegeben, mit identischen Fließeigenschaften wie die Flüssigphase im Reaktor. Die Verteilung und Einmischung dieser aufgesalzten Zugabe wurde anschließend bewertet. Außerdem wurde während der Zugabe an anderer Stelle im Reaktor (Abzug) Flüssigphase ebenfalls kontinuierlich mittels Pumpe entnommen, um zum einen den Füllstand konstant zu halten und zum anderen eine Art Durchflussbetrieb zu erhalten. Der Durchflussbetrieb ist auch in der Praxis die gängige Vorgehensweise. Nach dem Ende der Zugabe des gefärbten und hoch leitfähigen Materials wurde der Kreislauf geschlossen und permanent vom Abzug zur Zugabestelle gepumpt, um einen längerfristigen hydraulischen Betrieb der Vergärung zu simulieren.

Weiterhin wurde die Position des Abzugs (Abbildung 53) und die Drehzahl der Rührer variiert. In Tabelle 8 sind die Versuchsbedingungen gegenübergestellt.

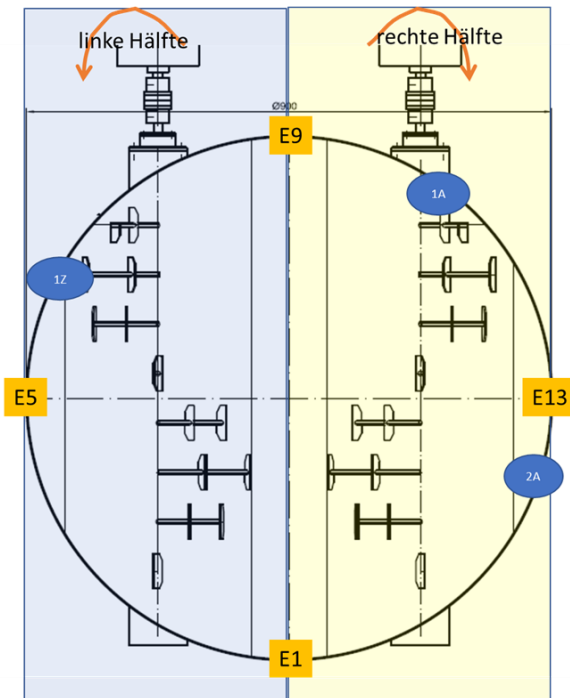


Abbildung 53: Draufsicht Tomographiereaktor mit Elektrodenposition (E) sowie Zugabe (1Z) und verschiedenen Abzugsvarianten (1A und 2A)

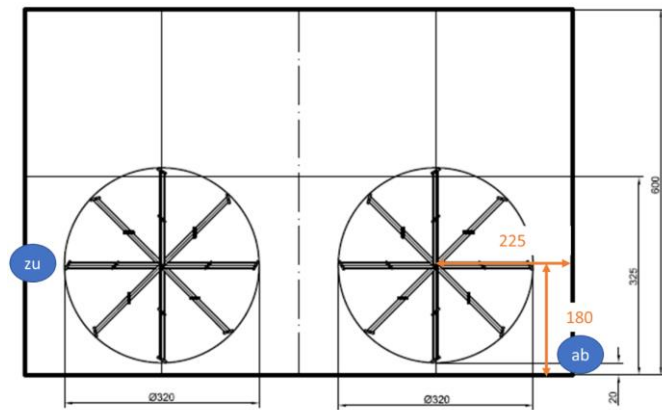


Abbildung 54: Seitenansicht und vertikale Position von Zugabe (zu) und Abzug (ab)

Tabelle 8: Übersicht der durchgeführten Versuche zur prozesstomographischen Bewertung (schattiert: Änderung zum vorherigen Versuch)

| | Versuch 1 | Versuch 2 | Versuch 3 | Versuch 4 | Versuch 5 | Versuch 6 | Versuch 7 |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|-------------|
| Drehzahl | 32 U/min | 32 U/min | 40 U/min | 54 U/min | 54 U/min | Keine Auswertung | 54 U/min |
| Drehrichtung | gegenl. | gegenl. | gegenl. | gegenl. | gleichl. | | gegenl. |
| Anordnung der Paddel | parallel zur Welle | parallel zur Welle | parallel zur Welle | parallel zur Welle | parallel zur Welle | | 45° gedreht |
| Position Zu- & Ablauf | 1Z & 1A | 1Z & 2A | 1Z & 2A | 1Z & 2A | 1Z & 2A | | 1Z & 2A |
| Durchsatz Zu- & Ablauf | 55 L/h | 55 L/h | 98 L/h | 98 L/h | 98 L/h | | 98 L/h |

Für den Vergleich der unterschiedlichen Versuchsbedingungen wurde zum einen die Tomogramme zu bestimmten Zeitpunkten miteinander verglichen. Zum anderen diente der Verlauf der Leitfähigkeiten und die optische Bewertung des Einmischens als Bewertungskriterium.

Nachfolgend dargestellt sind die Tomogramme der Ebene 1 und 2 zu verschiedenen Zeitpunkten. Dabei besteht jedes Tomogramm aus 316 Pixeln und für jedes Pixel ist für jeden Versuchszeitpunkt eine Leitfähigkeit hinterlegt. Die Skalierung der Tomogramme wurde so gewählt, dass die Leitfähigkeitsskala ein Delta von 0,7 mS/cm aufweist. Die Ausrichtung der einzelnen Tomogramme ist identisch mit der Ausrichtung des Reaktors in Abbildung 53.

Blau steht für Bereiche mit geringerer Leitfähigkeit, demnach wurde in diese Bereiche wenig der zugegebenen aufgesalzenen Phase eingemischt. Die roten Bereiche hingegen stehen für Areale mit einer hohen Leitfähigkeit, wo größere unvermischte Anteile der zugegebenen aufgesalzenen Phase vorherrschen. Dies ist für alle Versuche besonders zum Zeitpunkt unmittelbar nach der Zugabe in Ebene 2 gut als rote Teilfläche „links oben“ im Tomogramm zu erkennen. Grüne Bereiche repräsentieren gut durchmischte Areale. Einfach ausgedrückt: Je grüner die Tomogramme, desto besser die Durchmischung, was für alle Versuche mit zunehmender Verweilzeit in verschiedener Intensität zu beobachten ist.

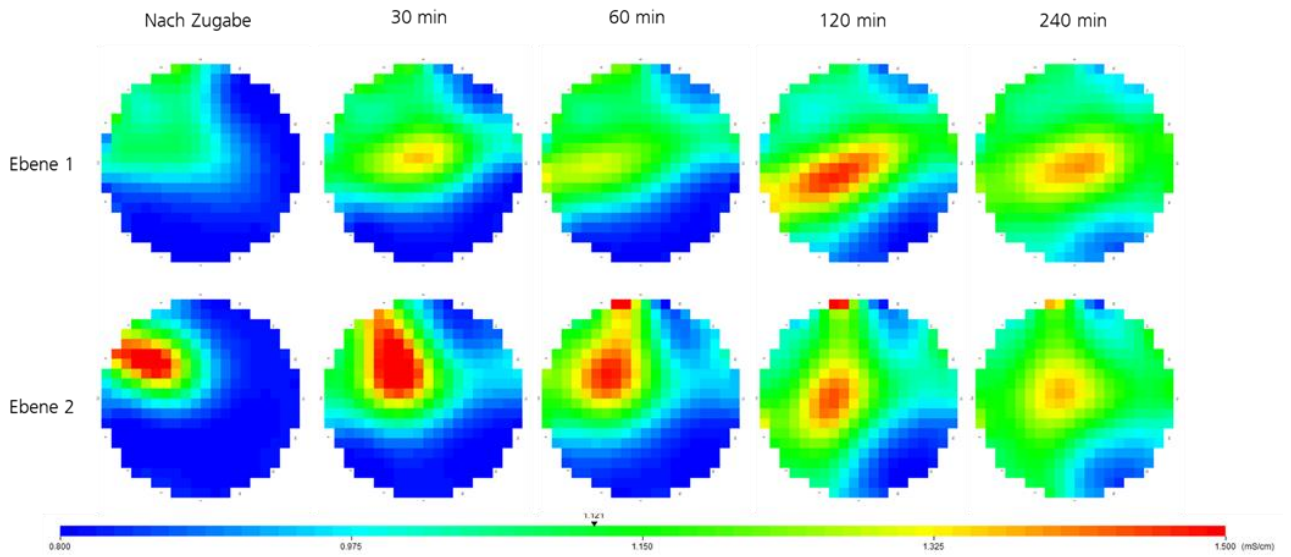


Abbildung 55: Versuch 1

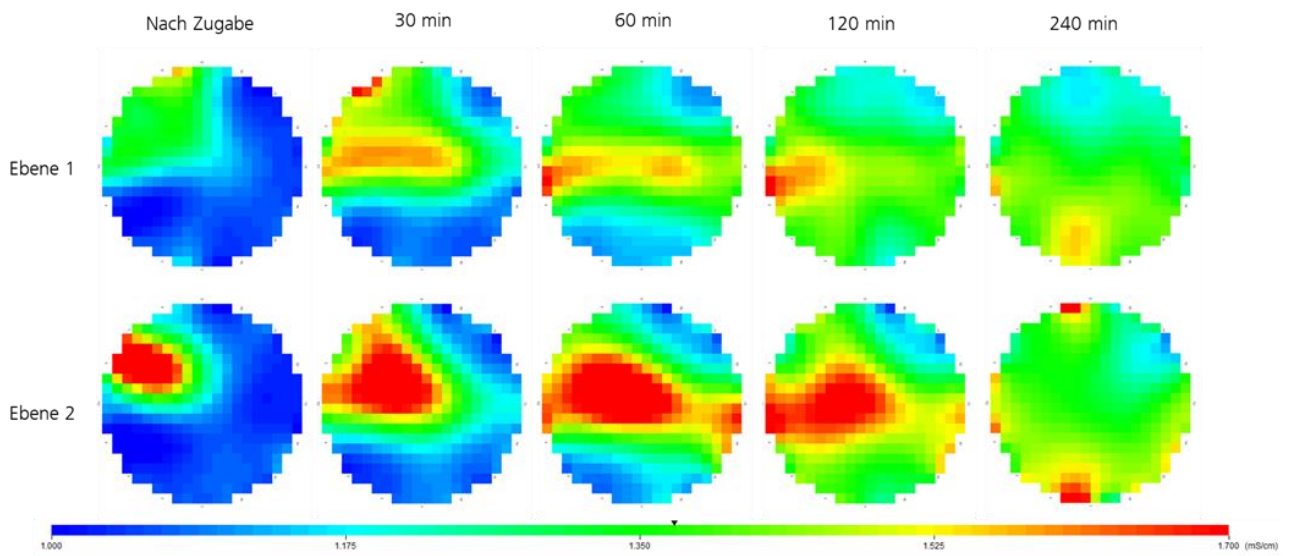


Abbildung 56: Versuch 2

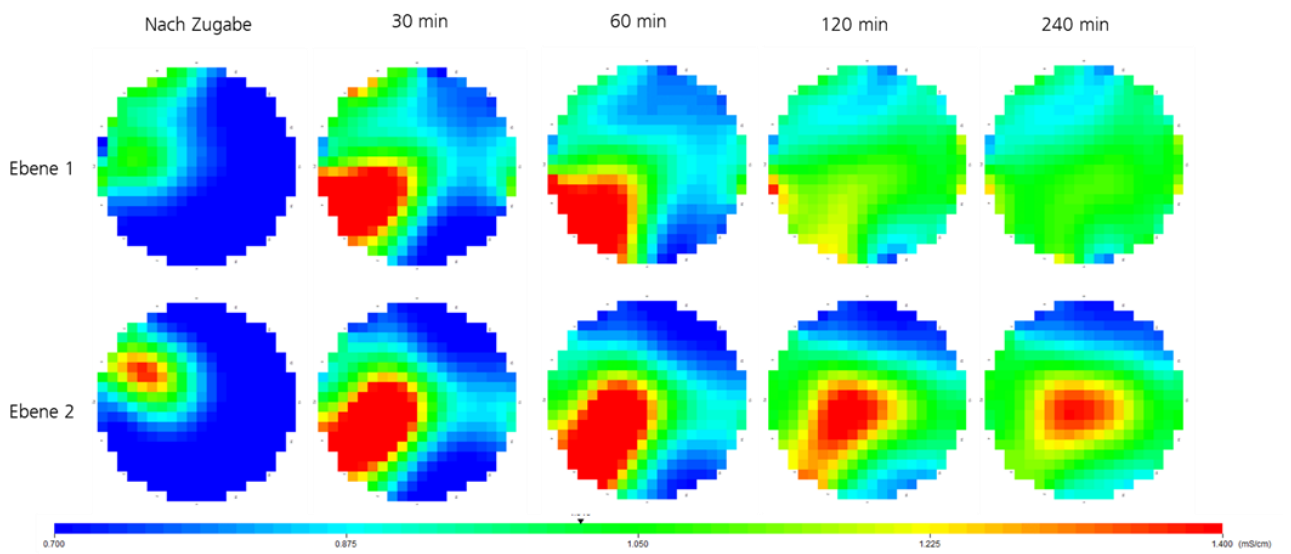


Abbildung 57: Versuch 3

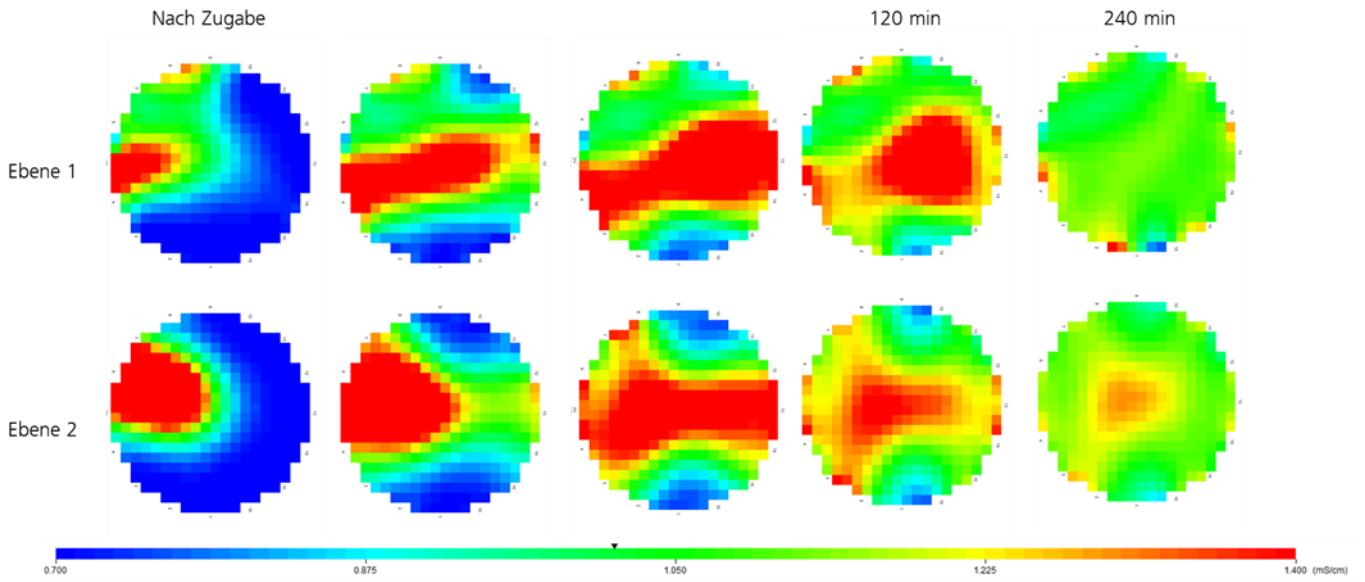


Abbildung 58: Versuch 4

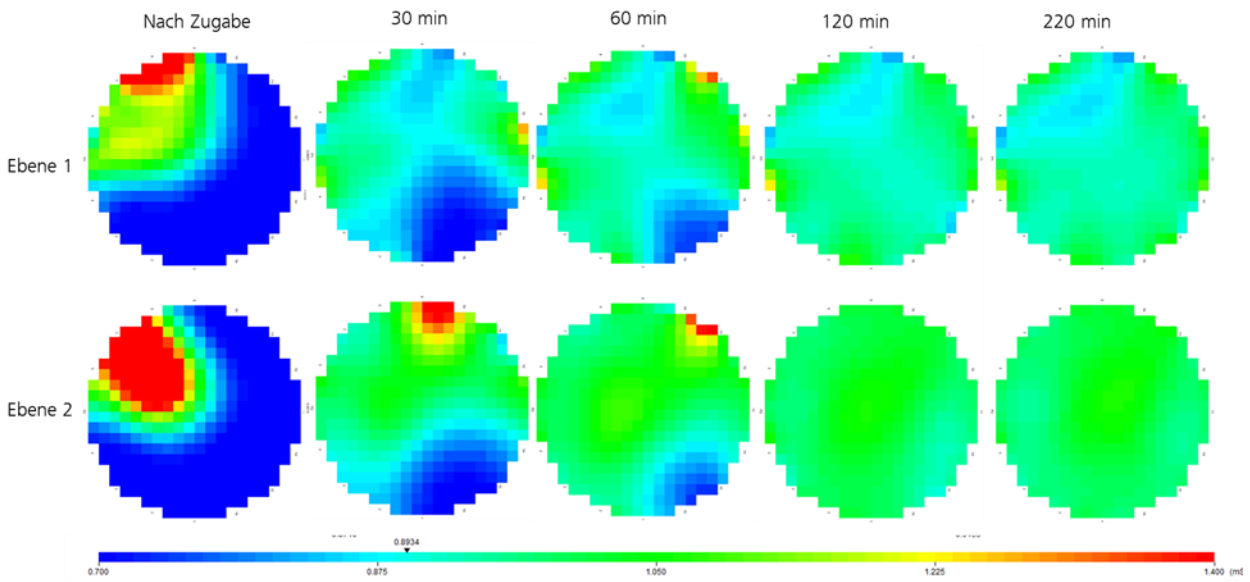


Abbildung 59: Versuch 5

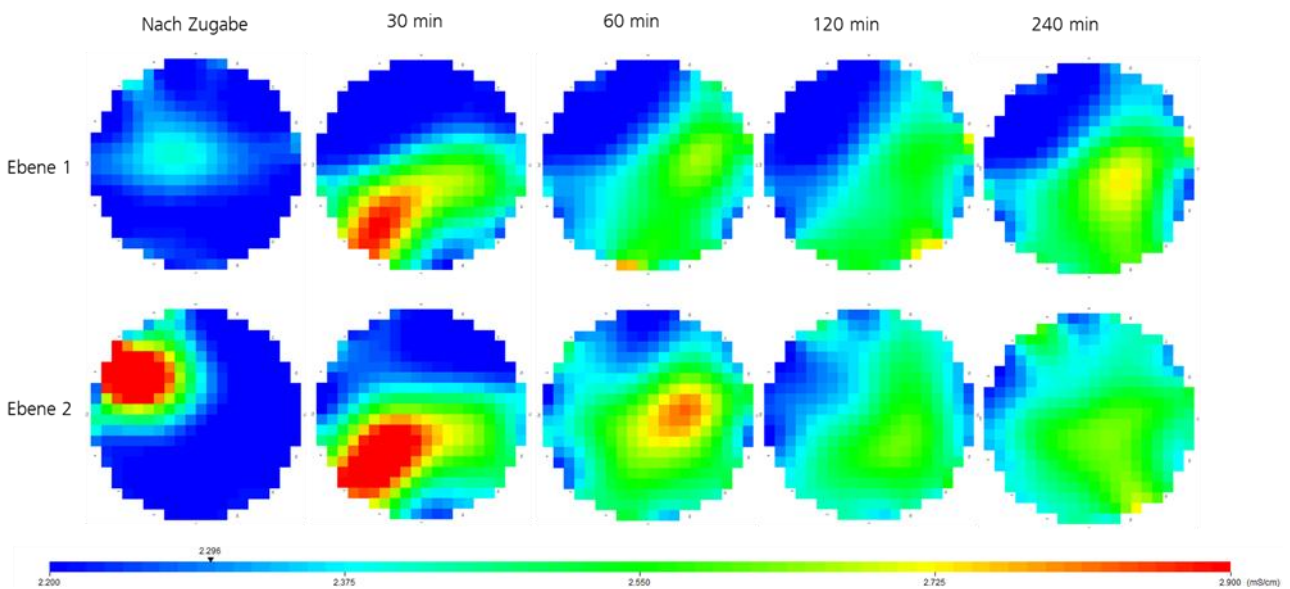

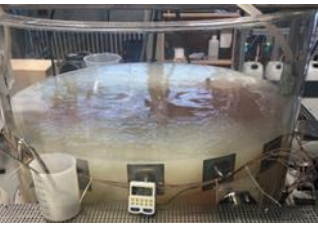
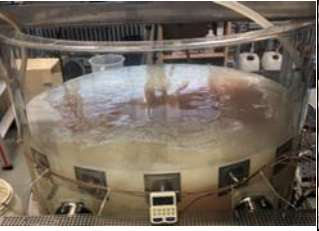








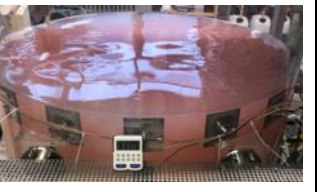


Abbildung 60: Versuch 7

Bei allen Versuchen konnte beobachtet werden, dass sich die zugegebene Phase verstärkt in der unteren Messebene (Ebene 2) bewegt. Es findet zwar auch ein Austausch zwischen den beiden Messebenen statt, aber infolge der erhöhten Dichte der Zugabe und der geringen Turbulenz im Reaktor geschieht dies nur langsam. Anhand der Tomogramme konnte in Versuch 5 das beste Mischergebnis erzielt werden.

Parallel zur tomographischen Messung wurden während der Versuche immer wieder Fotos des Reaktors gemacht. Tabelle 9 zeigt die Bilder der ersten drei Versuche.

Tabelle 9: Vergleich der Einmischung in den ersten drei Versuchen

| | 30 min | 60 min | 120 min | 240 min |
|-----|--|--|---|--|
| V 1 |  |  |  |  |
| V 2 |  |  |  |  |
| V 3 |  |  |  |  |

Trotz der scheinbar vollständigen Durchmischung in Versuch 3, können bei genauer Betrachtung des Reaktors Zonen mit weniger zugegebener gefärbter Lösung gefunden werden (Abbildung 61). Diese Bereiche decken sich mit den Tomogrammen aus Abbildung 57.

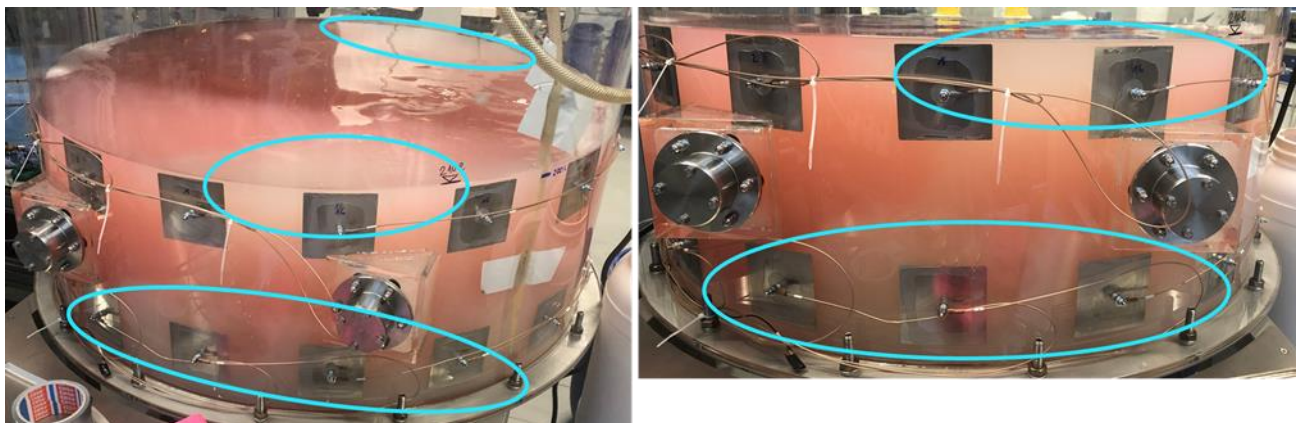


Abbildung 61: Reaktorbereich mit schlechter Durchmischung nach 240 min Mischzeit in Versuch 3

Zur Quantifizierung dieser Aussage und zur Veranschaulichung des zeitlichen Verlaufs der Einmischung wurden die Tomogramme in 12 Zonen unterteilt (siehe Abbildung 62) und für diese Zonen Z1 bis Z12 die mittlere Leitfähigkeit berechnet. Der zeitliche Verlauf dieser mittleren Leitfähigkeiten in den einzelnen Zonen der beiden Messebenen wurde anschließend grafisch aufgetragen. Abbildung 63 bis Abbildung 68 zeigen die Leitfähigkeitsverläufe der Zonen in den einzelnen Messebenen.

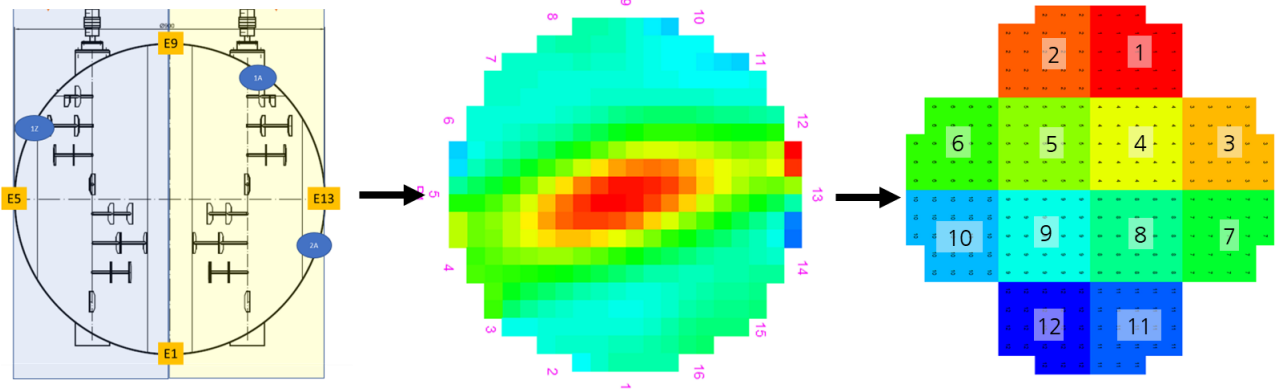


Abbildung 62: Position der 12 Leitfähigkeitszonen (rechts) und Ausrichtung des Reaktors

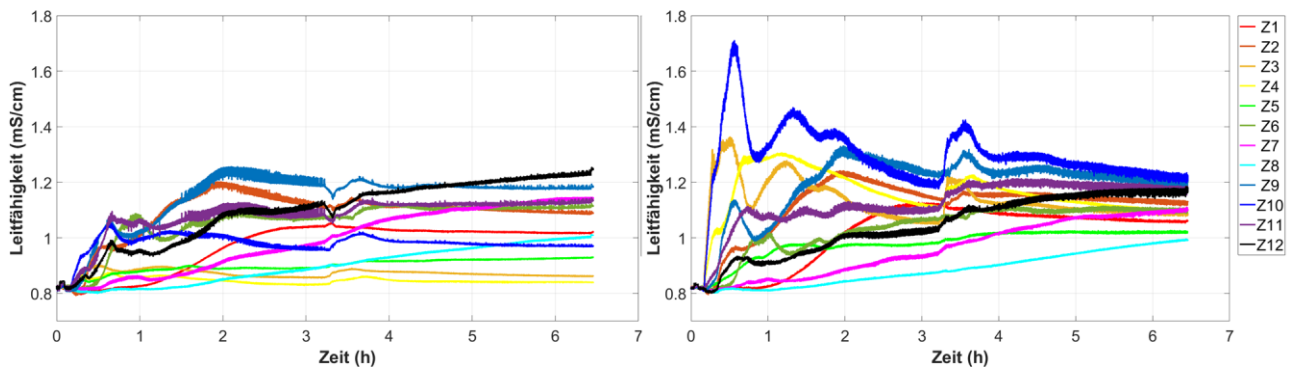


Abbildung 63: Versuch 1, Leitfähigkeitsverläufe in den Zonen (links: Ebene 1 (obere Reaktorhälfte), rechts: Ebene 2)

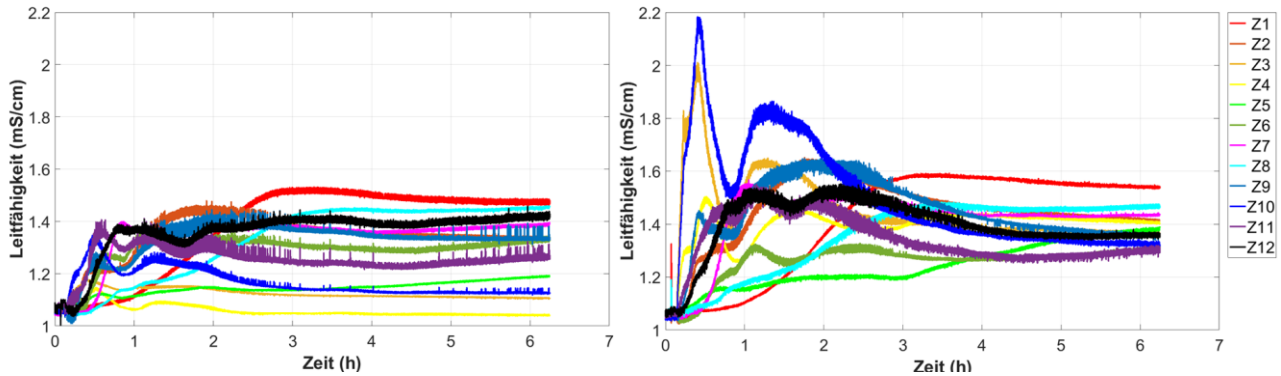


Abbildung 64: Versuch 2, Leitfähigkeitsverläufe in den Zonen (links: Ebene 1 (obere Reaktorhälfte), rechts: Ebene 2)

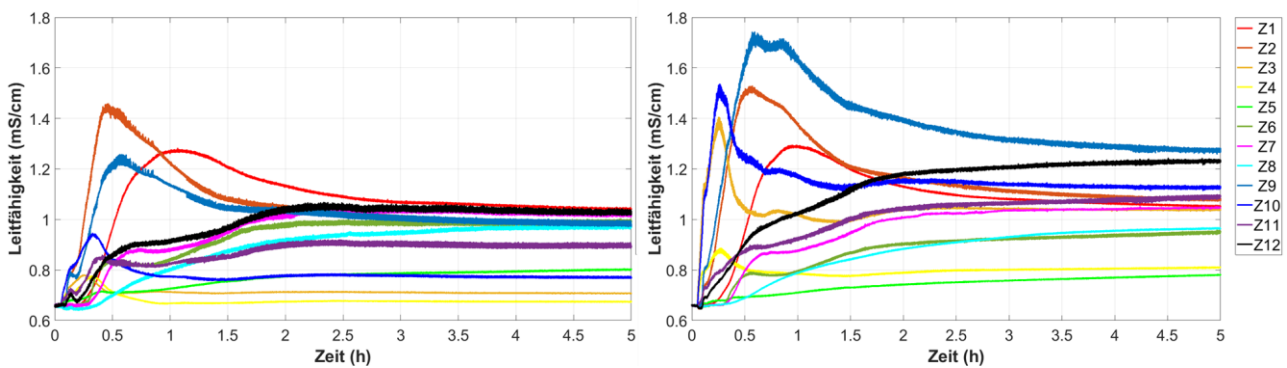


Abbildung 65: Versuch 3, Leitfähigkeitsverläufe in den Zonen (links: Ebene 1 (obere Reaktorhälfte), rechts: Ebene 2)

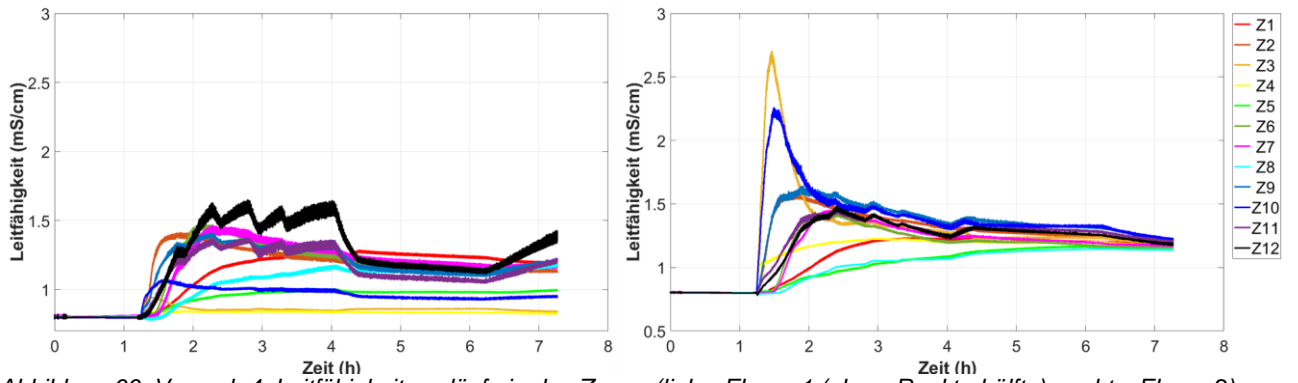


Abbildung 66: Versuch 4, Leitfähigkeitsverläufe in den Zonen (links: Ebene 1 (obere Reaktorhälfte), rechts: Ebene 2)

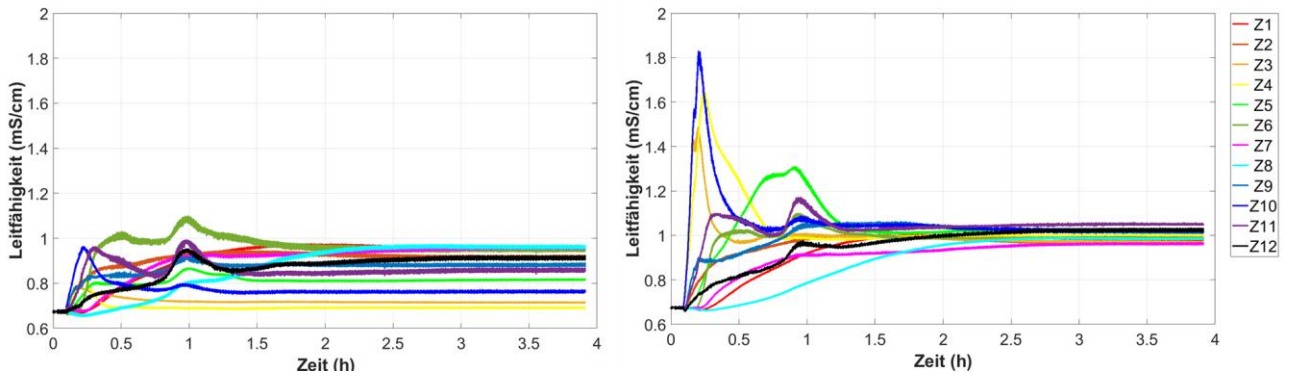


Abbildung 67: Versuch 5, Leitfähigkeitsverläufe in den Zonen (links: Ebene 1 (obere Reaktorhälfte), rechts: Ebene 2)

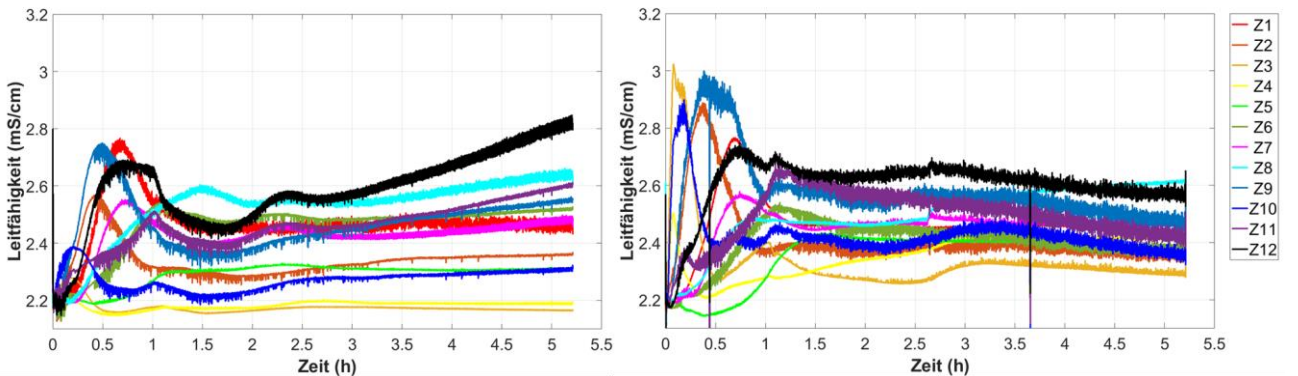


Abbildung 68: Versuch 7, Leitfähigkeitsverläufe in den Zonen (links: Ebene 1 (obere Reaktorhälfte), rechts: Ebene 2)

Anhand der Abbildungen wird deutlich, dass in Messebene 2 die Kurven der einzelnen Zonen in den Versuchen aufeinander zustreben, wohingegen in Messebene 1 teilweise gegenteilige Effekte auftreten und die Differenzen zwischen den Zonen mit maximaler und minimaler Leitfähigkeit größer sind als in Ebene 2. Daher wurden die Versuche auch anhand der Differenz aus maximaler und minimaler Leitfähigkeit nach einer Mischzeit von 4 h verglichen (Abbildung 69).

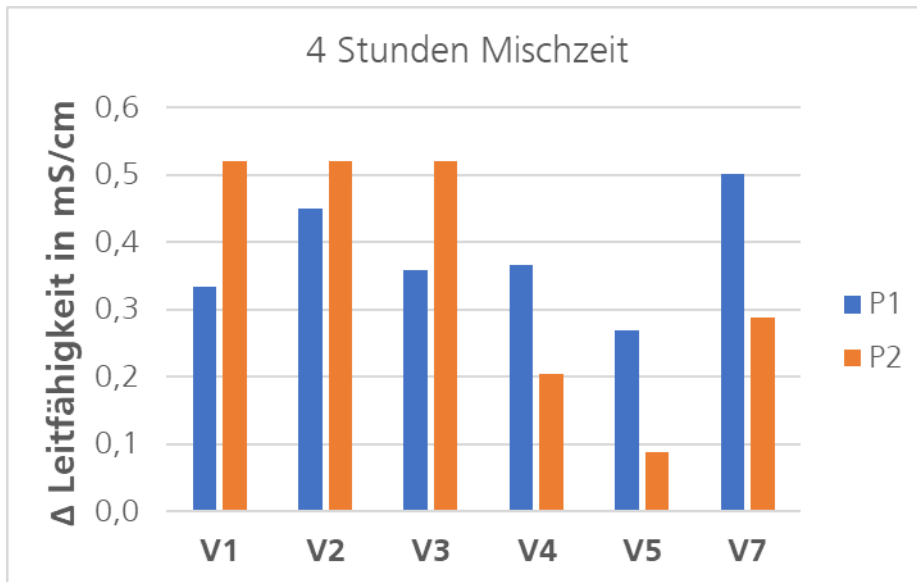


Abbildung 69: Differenz aus maximaler und minimaler Leitfähigkeit nach 4 h Mischzeit in den Messebenen

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass sich die Änderungen der Versuchsbedingungen in Messebene 2 stärker auswirken als in Messebene 1.

Werden die beiden Messebenen separat betrachtet, kann festgestellt werden, dass mit der Variation der Versuchsbedingungen für Ebene 2 in den ersten 3 Versuchen keine Verbesserung der Durchmischung erzielt werden kann. Dies betrifft die Position des Ablaufs, die Erhöhung des Pumpendurchsatzes und eine Steigerung der Rührerdrehzahl. Mit der weiteren Steigerung der Rührerdrehzahl (Versuch 4) und der Änderung der Drehrichtung kann dann eine deutliche Verbesserung der Durchmischung in der unteren Messebene erzielt werden. Mit der Schrägstellung der Paddel (Versuch 7) wurde erwartet, dass sich durch die Einstellung einer Förderrichtung im Reaktor (längs zu den Rührerachsen) insgesamt die Durchmischung verbessert. Dies konnte aber anhand der Versuche nicht bestätigt werden.

Für die Leitfähigkeitsdifferenzen in Messebene 1 kann ebenfalls festgestellt werden, dass mit den Versuchsbedingungen in Versuch 5 das beste Mischergebnis erzielt werden konnte.

Weiterhin konnte für die spezielle Kombination aus rundem Fermenter mit liegenden Paddelrührwerk festgestellt werden, dass die Durchmischung insbesondere in den Bereichen der Rührlager mangelhaft war. Dies lag an der verkürzten Ausführung der Paddel an der Rührwelle in diesem Bereich. Diese Einkürzung war notwendig, da sonst eine Kollision zwischen Paddel und Behälterwand gedroht hätte.

Für die kleintechnischen Versuche mit realem Substrat konnte abgeleitet werden, dass die Paddel der Rührer nicht schräg gestellt werden müssen. Eine Änderung von Kugelform (Bestand an Versuchsanlage) zu Rechteckpaddel wurde veranlasst.

Arbeitspaket 4: Kleintechnische Vergärung

Neben den Untersuchungen im Labor wurde im Projekt planmäßig ein kleintechnischer Vergärungsversuch von Gülle und Stroh organisiert und durchgeführt, um auf Basis der Voruntersuchungen praktische Erfahrungen hinsichtlich des Handlings- und der Prozesssicherheit zu sammeln.

Für die geplante Nutzung und den Umbau eines bestehenden Biogasermenters (liegender Zylinder mit Paddelrührwerk) wurden mehrere Vor-Ort-Termine durchgeführt und eine Leistungsbeschreibung erstellt. Abbildung 70 zeigt die Ausgangssituation des Fermenters, welcher in ein Leitungssystem fest eingebunden war und sowohl schräg gestellte Paddel als auch kugelförmige Paddel an der Rührwelle aufwies. Letztere sollten für eine intensivere Mischung ebenfalls als rechteckige Paddel ausgeführt werden und parallel zur Rührachse ausgerichtet werden. Weiterhin sollte die Möglichkeit zur separaten und sicheren Einbringung von Stroh und von Gülle geschaffen werden. Außerdem sollte eine praktikable Möglichkeit für eine manuelle Probenahme und Ausschleusung für Gärreste mit geplant hohen Feststoffgehalten ergänzt werden.



Abbildung 70: bestehender Reaktor und Konfiguration der Rührwelle vor Umbau

Für die notwendigen Umbauten und Wartungsarbeiten musste der gesamte Fermenter in die Werkstatt eines Unterauftragnehmers transportiert werden (Abbildung 71). Dafür mussten sämtliche Leitungen (inkl. Elektrik) getrennt werden. Aufgrund der Ergänzung der neuen Probenahmemöglichkeit für besonders dicke Gärreste am Boden des Fermenters musste dieser außerdem höher gelegt werden, weshalb die Wiedereinbindung in die Gasstrecke sowie in die Beheizung über flexible Leitungen ausgeführt werden mussten.



Abbildung 71: Fermenter in der Werkstatt bei UIT mit neuem Anschluss für die Gölledosierung und Probenahmestutzen (rechts)

Im Zuge des Umbaus musste festgestellt werden, dass am Lager der Welle durch Undichtigkeiten bei vorherigen Versuchen starke Korrosion sowie Schäden an Kugellager und Wellenhülsen vorzufinden waren (Abbildung 72). Dies musste außerplanmäßig ersetzt werden.



Abbildung 72: Starker Verschleiß am Wellenlager

In Abbildung 73 ist die Versuchsanlage nach Umbau und Wartung am Standortort Helmsgrün zu sehen. Die Beschickung mit Stroh erfolgte händisch über den neuen Trichter und die Stopfschnecke direkt in den Fermenter. Die eingesetzte Rindergülle wurde von einem lokalen Landwirtschaftsbetrieb bereitgestellt und in einem IBC gelagert. Von dort wurde die Gülle mittels Exzentrerschneckenpumpe in den Fermenter gepumpt.

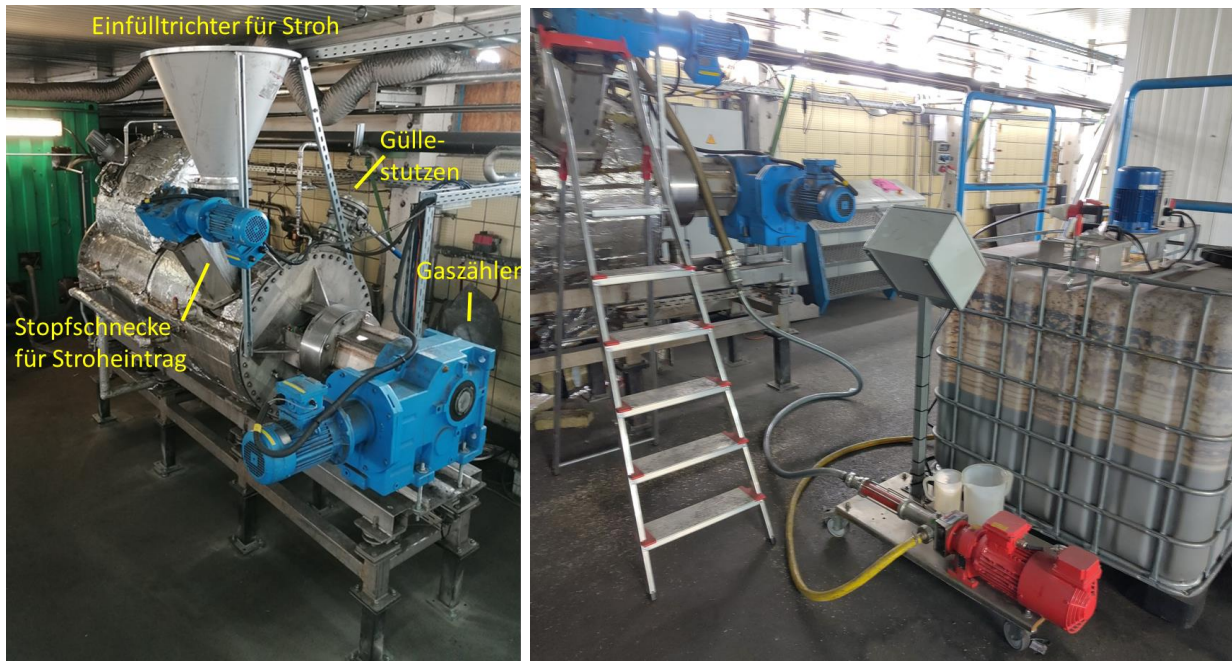


Abbildung 73: Fermenter nach Umbau und Wartung (links), Güllevorlage mit Dosierpumpe (rechts)

Für den Start der Versuche wurden ca. 700 Liter frischer Gärrest aus dem Nachfermenter einer lokalen Biogasanlage in den Fermenter gefüllt. Um möglichst schnell in Bereiche mit hoher Viskosität zu gelangen, wurde für die ersten 30 Tage nur Stroh zugeführt (und keine Gülle). Danach erfolgte die Beschickung von Gülle und Stroh parallel. Dabei wurden montags, mittwochs und freitags (Abweichungen an Feiertagen) jeweils 5 kg Stroh und (ab Versuchstag 30) 25 Liter Rindergülle zugegeben (Abbildung 74).

Der Abzug von Gärrest fand einmal pro Woche statt. Dabei wurde auch eine Gärrestprobe für die analytische Bewertung abgefüllt und im Labor des IKTS vermessen.

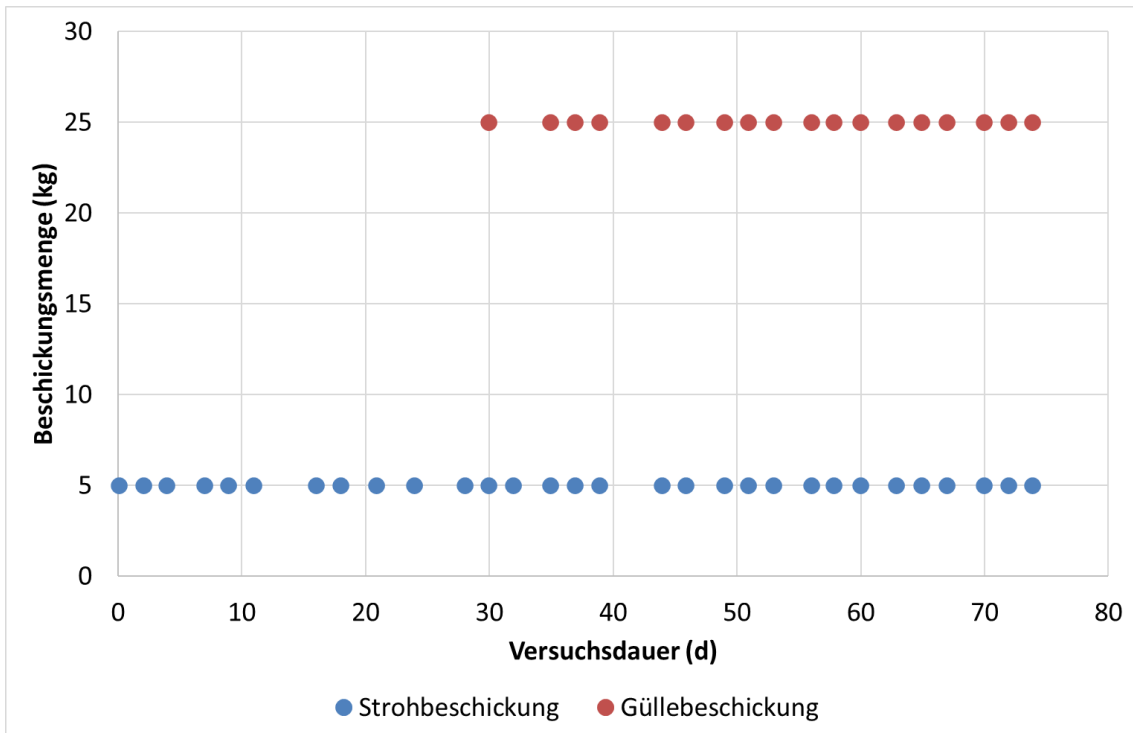


Abbildung 74: Zeitpunkte und Mengen der Beschickung in den kleintechnischen Fermenter

Als Stroh wurde ein kommerziell erhältliches Einstreuprodukt aus Weizenstroh verwendet (Abbildung 75). Dieses war bereits zerkleinert und entstaubt, was das Handling während der Versuche vereinfachte.



Abbildung 75: Verwendetes Strohhacksel für die kleintechnische Vergärung in Helmsgrün (HG)

Hinsichtlich der Partikelgröße wurde bewusst ein etwas kürzer geschnittenes Stroh ausgewählt, um möglichst keine Verzopfungen um die Rührorgane zu erhalten. Denn trotz einer gewissen Anlagengröße waren die Rührorgane kleiner und schmaler als im großtechnischen Bereich. Vor allem die maximale Faserlänge lag mit knapp 3 cm deutlich unter den größten Fasern aus der praktischen Strohzerkleinerung. Die mittleren Faserlängen lagen in einer ähnlichen Größenordnung, wie die Vergleichsproben (Abbildung 76).

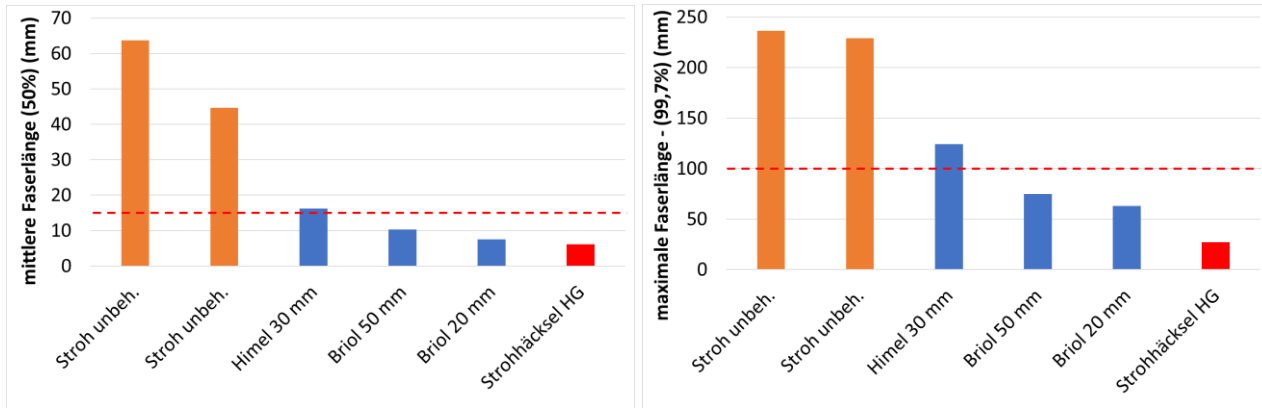


Abbildung 76: mittlere (links) und maximale (rechts) Faserlänge Strohhäcksel Helmsgrün (HG) im Vergleich

Im Vergleich zu anderen Strohproben war der potenzielle Gasertrag für das verwendete Strohhäcksel im Batchtest niedriger (Abbildung 77). Außerdem war die Abbaugeschwindigkeit vergleichsweise gering. Dies ist im Schwankungsbereich von verschiedenen Strohartem nicht unplausibel, sollte aber bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

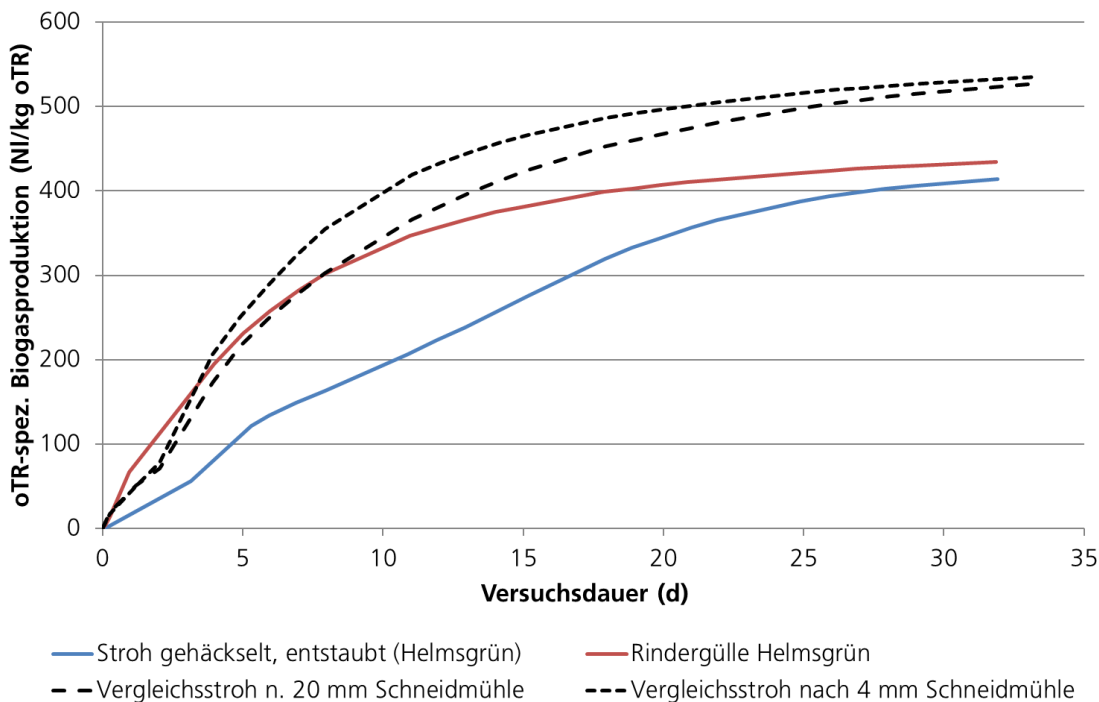


Abbildung 77: Gasertragstest für die eingesetzten Substrate Strohhäcksel und Rindergülle im Vergleich

Die tägliche Biogasproduktion im kleintechnischen Vergärungsversuch (Abbildung 78) lag anfangs bei etwa 700 Liter pro Tag und steigerte sich auf etwa 1000 Liter, welche stabil gehalten werden konnte. Der Anstieg hatte folgende Ursachen:

1. Die Biozönose adaptierte sich an das neue Substrat
2. Stroh generell und insbesondere das verwendete Stroh wurde sehr langsam abgebaut (vgl. Abbildung 77), so dass mit zunehmendem Strohgehalt im Fermenter auch eine Zunahme der täglichen Gasausbeute zu verzeichnen war, da auch aus Strohanteilen, welche bereits längere Zeit im Fermenter verweilten immer noch Biogas gebildet wurde
3. Mit Einführung der Güllebeschickung stieg der Gasertrag ebenfalls erwartungsgemäß etwas an, da damit das Substratangebot erhöht wurde

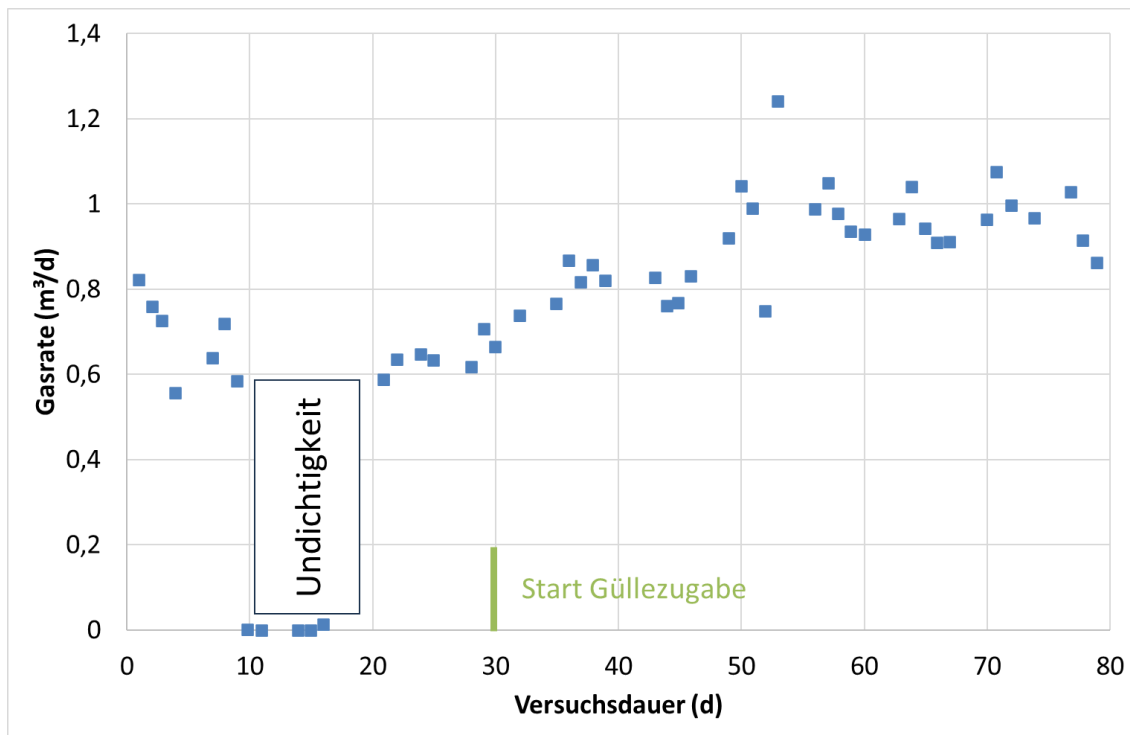


Abbildung 78: Biogasrate des kleintechnischen Fermenters

Abbildung 79 zeigt ausgewählte Wochenbilanzen für die Raumbelastung und die substratspezifische Gasausbeute. Bezogen auf die zugeführte organische Fracht wurden in den letzten 3 Versuchswochen mit konstantem Betrieb etwa 400 Liter Biogas pro kg oTR produziert. Diese Werte entsprechen in etwa den Erwartungswerten aus den Batchversuchen. Eine leichte Verringerung der Werte gegenüber dem Batchversuch resultiert aus dem verlorenen Restgaspotenzial, welches durch den wöchentlichen Gärrestabzug aus dem Reaktor entfernt wurde.

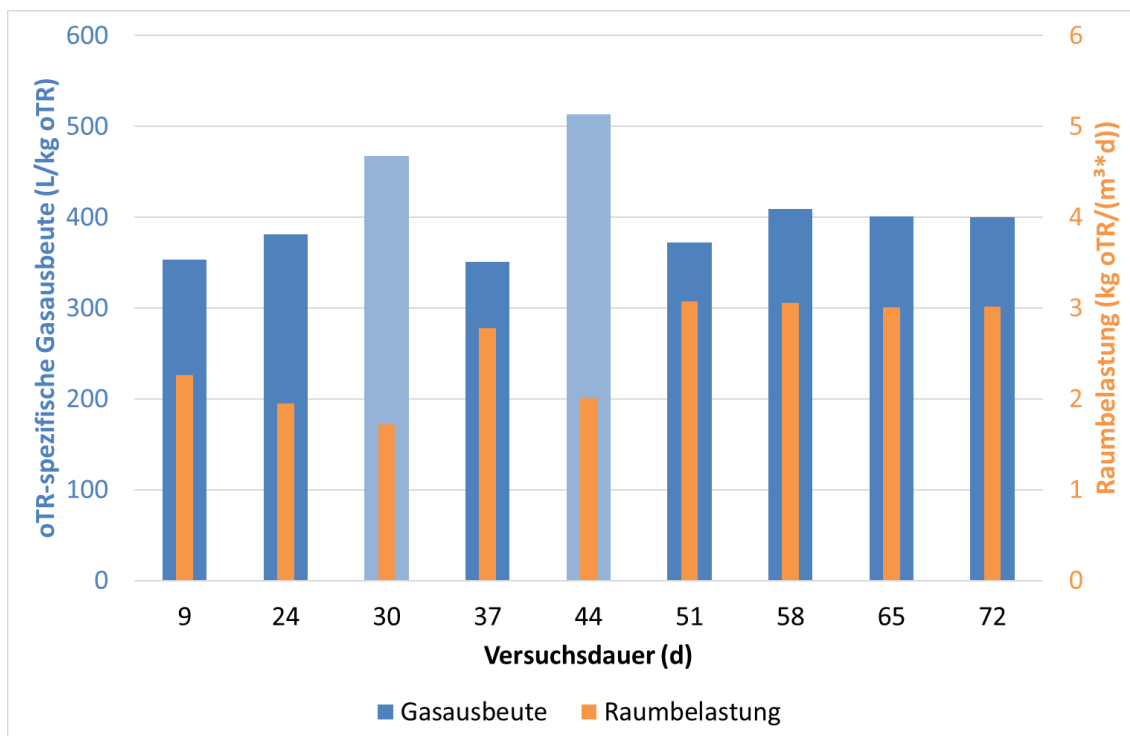


Abbildung 79: organische Raumbelastung und oTR-spezifische Biogasausbeute (jeweils 7 d -Bilanz)

Die Raumbelastung lag bei maximal 3 kg oTR/(m³*d), was für eine Gülle-Kleinanlage einem höheren Wert entsprach. Diese erhöhte Raumbelastung resultierte vor allem aus der Strohzugabe, welche zwar nur knapp 17 % der Masse, aber etwa 73 % der organischen Fracht im Input und damit der Raumbelastung entsprach. In Abbildung 79 ist zu erkennen, dass die Wochen vor dem 30. und vor dem 44. Versuchstag aufgrund von geringeren Beschickungsmengen niedrigere Raumbelastungen aufweisen. Die darauf bezogene

Gasausbeute fällt höher aus (hellblaue Balken), da noch viel Restgas aus den Vorwochen zur Bilanz beitrug. Trotz einer relativ hohen hydraulischen Verweilzeit von 62 d war das Restgaspotenzial im Gärrest noch vergleichsweise hoch (Abbildung 80). Ursache hierfür war vor allem die relativ schlechte Abbaubarkeit des verwendeten Stroh.

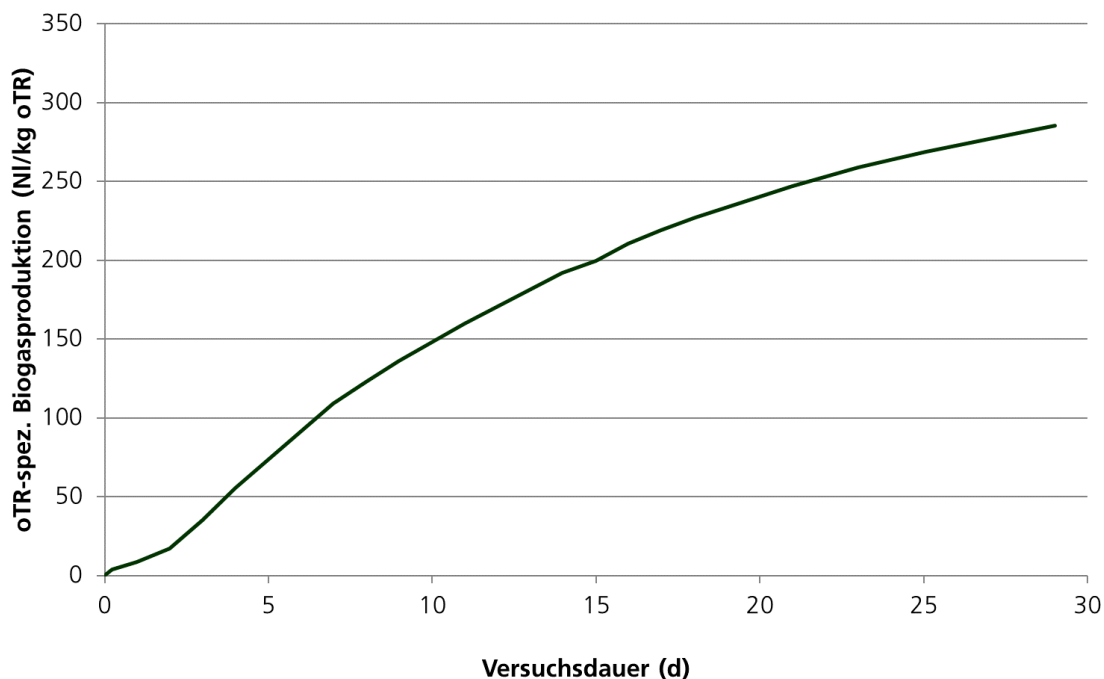


Abbildung 80: Restgaspotenzial des Gärrestes aus dem Pfropfenströmer

Der pH-Wert im Fermenter blieb während des gesamten Versuchsbetriebes stabil im Bereich zwischen 7,5 und 8 (Abbildung 81). Ausgangsgärrest und Güllezugabe führten zu einer guten Pufferung und zu einem stabilem Prozess. Die elektrische Leitfähigkeit sank zum Ende etwas ab und näherte sich damit dem Leitfähigkeitsniveau der zugegebenen Gülle.

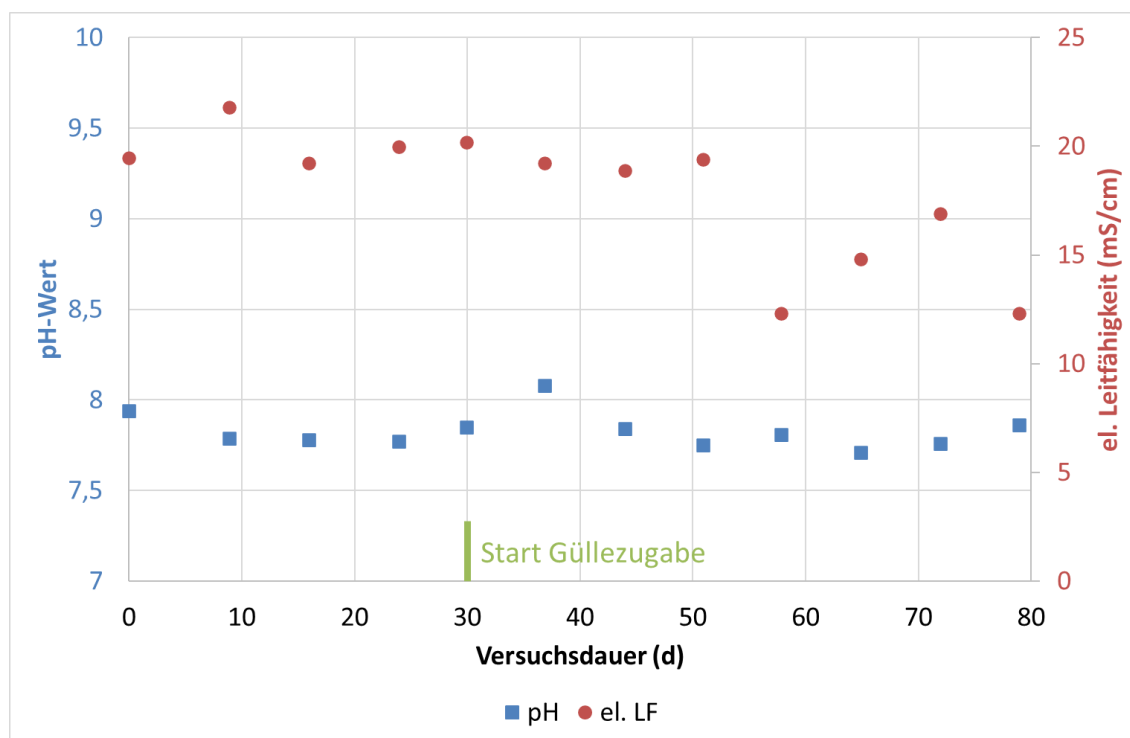


Abbildung 81: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit im Fermenter

Auch der Gehalt an gelöstem CSB zeigte mit einem konstanten Niveau einen stabilen Prozess an (Abbildung 82). Hinsichtlich der organischen Säuren wurden 495 mg/l an Essigsäure und 44 mg/l an Propionsäure

gemessen, was ebenfalls auf einen ungestörten Abbau hindeutet. Beim Rest-CSB von bis zu 8 g/l handelt es sich möglicherweise um Bruchstücke verschiedener Lignocellulose-Bestandteile, welche schwer abbaubar sind.

Der Gehalt an Ammonium-Stickstoff nahm während des Versuches stetig ab. Hauptursache hierfür war zum einen der relativ niedrige Ammoniumgehalt in der eingesetzten Gülle von 1,15 g/l NH₄-N sowie zum anderen der Stroheinsatz, welcher Stickstoff zehrt. Trotzdem wäre auch für einen längeren Betrieb nicht mit einem Stickstoffmangel zu rechnen, da über die Gülle ausreichend Stickstoff zugeführt wird.

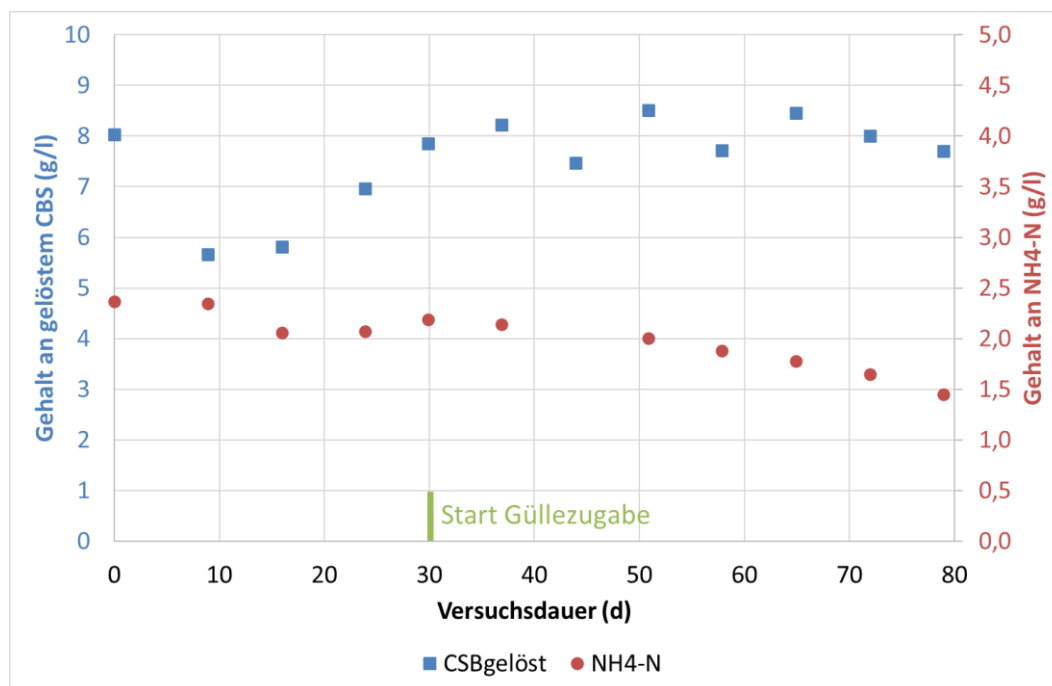


Abbildung 82: Gehalt an gelöstem CSB und Ammonium-Stickstoff im Fermenter

Ein wichtiges Ziel des Versuches war neben der Bewertung von Gasertrag und Prozessstabilität die Maximierung des TR-Gehaltes sowie die Analyse der Viskosität. In Abbildung 83 ist der schnelle Anstieg des TR-Gehaltes durch die ausschließliche Zuführung von Stroh zu erkennen. Nach dem Start der zusätzlichen Güllebeschickung verlangsamte sich dieser Anstieg und erreichte zum Ende der Versuche maximale Werte von ca. 13 % TR im Gärrest. Damit wurde das Maximum aus der praktischen Erfahrung für Biogasanlagen erreicht (vgl. auch Abbildung 12). Der oTR-Gehalt blieb die gesamte Zeit über konstant bei etwa 81 %, was auf einen stabilen Abbau hindeutet.

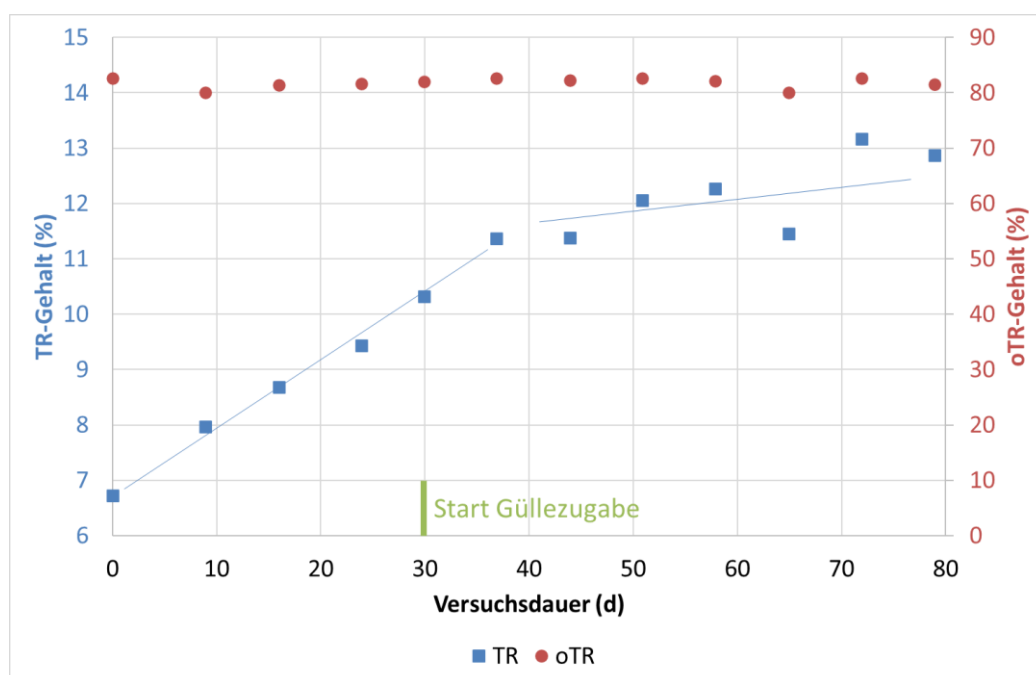


Abbildung 83: TR- und oTR-Gehalt im Fermenter

Der TR-Gehalt allein sagt allerdings nicht genug über die Qualität des Gärrestes hinsichtlich der Pump- oder Rührfähigkeit aus. Die Art und Qualität der Feststoffe sind entscheidend. Bereits der optische Eindruck vom Gärrest zum Ende der Versuche zeigt die hohe Viskosität und den hohen Strukturanteil aus Stroh und Strohresten (Abbildung 84). Dank der robusten Paddelrührer konnte jedoch die Durchmischung sowie der Gasaustrag sicher gewährleistet werden. Die Probenahme sowie die Ausschleusung von überschüssigem Gärrest erfolgte über Schwerkraft und einen DN 150 Kugelhahn am Boden des Fermenters (Abbildung 85). Der Beprobte Gärrest zeigte bereits Tendenzen zur Haufwerkbildung, was auch durch die Separierungsneigung der Fasern verursacht wurde.



Abbildung 84: Blick durch Schauglas in Gasdom des Fermenters, links: die Wölbung des liegenden Zylinders, Pfeil markiert kurz auftauchendes Paddel vom Rührwerk



Abbildung 85: Probenahme Gärrest mit ca. 13 % TR

Die Viskositäten stiegen mit zunehmender Versuchszeit erwartungsgemäß an (Abbildung 86). Zum Ende der Versuchszeit lagen die Viskositäten in Bereichen, welche als Grenzwert der Durchmischung charakterisiert

werden können (schwarze Kurven). Diese beiden Kurven sind auch in Abbildung 87 dargestellt. Zusätzlich sind dort noch Viskositätskurven aus den Mischungen von Stroh und Gülle vor der Fermentation sowie andere Gärreste zum Vergleich angegeben.

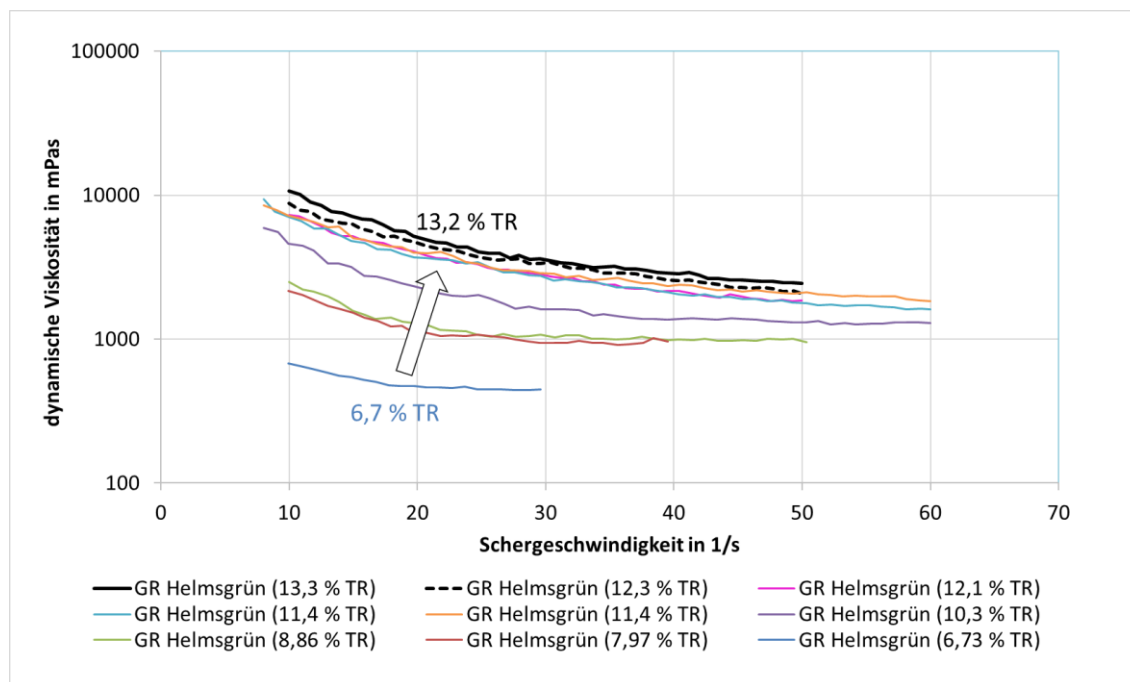


Abbildung 86: Entwicklung der Viskosität im Gärrest der Versuchsanlage in Helmsgrün

Zum einen zeigte sich, dass unabhängig von der Art der Substrate (vor oder nach Fermenter sowie verschiedene Gärreste) offensichtlich eine Grenzviskosität existiert, welche nicht überschritten werden sollte, um die Pump- und Rührfähigkeit noch zu gewährleisten. Zum anderen wird sehr deutlich, dass die Mischungen vor Fermentation (vgl. auch Arbeitspaket 3) mit lediglich 4,6 % Stroh in der Mischung mit Gülle angesetzt werden konnten, bis eine maximale Viskosität erreicht wurde. Höhere Viskositäten können mit der verwendeten Messtechnik nicht mehr gemessen werden, da das Drehmoment zu groß wird. Gleichzeitig zeigt sich auch optisch, dass Pumpen und Rühren nicht mehr möglich ist. Für die kleintechnische Vergärung in Helmsgrün konnten immerhin 16,7 % Stroh dauerhaft mit 83,3 % Gülle dem Reaktor zugeführt werden, ohne dass Probleme beim Handling auftraten bzw. dass der entstehende Gärrest im Limit bzgl. der Viskosität blieb.

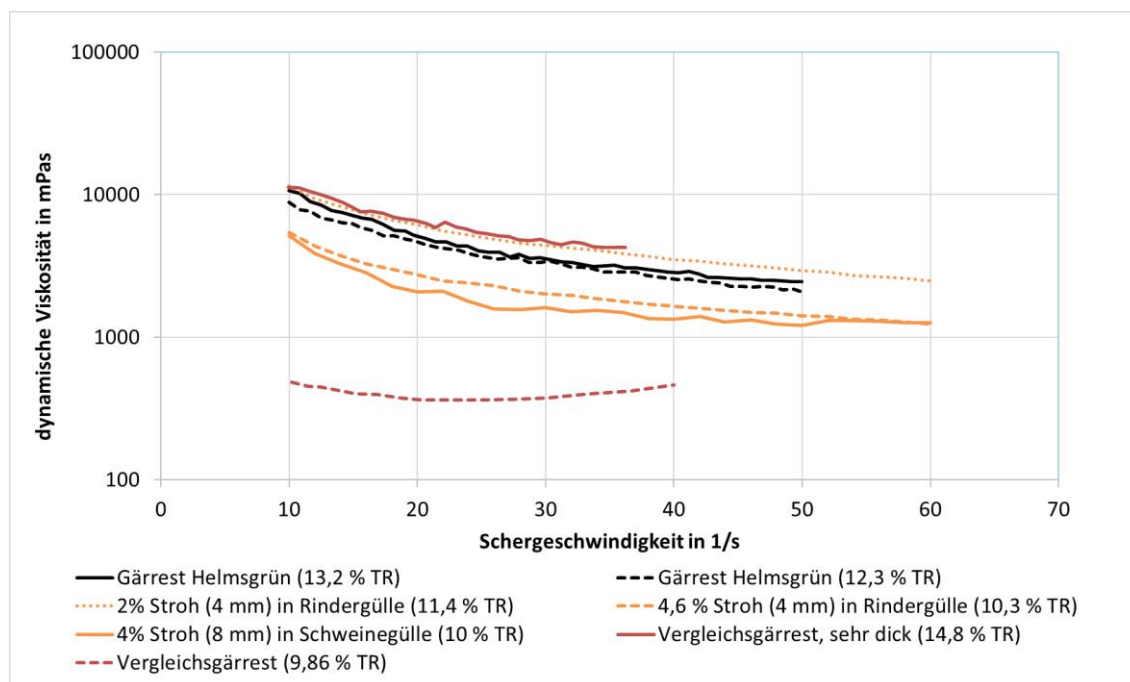


Abbildung 87: Vergleich der Viskositäten Helmsgrün (schwarz) mit Mischungen vor Fermentation (orange) und Vergleichsgärresten (rot)

Herkömmliche Fermenter werden bei deutlich niedrigeren Viskositäten und TR-Gehalten gefahren, was die rote gestrichelte Linie in Abbildung 87 verdeutlichen soll. Wie weiter oben ausgeführt, war die Abbaubarkeit des eingesetzten Strohvergleichsweise schlecht. Mit höheren Abbaugraden bei anderen Strohsorten sowie höheren Zerkleinerungsgraden wäre ein noch höherer Strohanteil in der Mischung (bis 20 %) denkbar. Allerdings muss insbesondere bei der Zerkleinerung der dann nötige Energieaufwand berücksichtigt werden.

Arbeitspaket 5: Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen

Wirtschaftlichkeit

Sowohl in den labortechnischen als auch in den kleintechnischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Vergärung von bis zu 20 % Stroh mit Gülle aus verfahrenstechnischer Sicht eine interessante Möglichkeit für Kleingülleanlagen bietet. Ob dies auch aus wirtschaftlicher Sicht gilt, wurde im Projekt ebenfalls betrachtet. Dazu wurde seitens der Ingenieurbüro Rückert GmbH ein Upscaling der Anlage nach Vorbild des klassischen Rundfermenters mit liegenden Paddelrührwerken durchgeführt, welches bereits bei den prozessstomographischen Untersuchungen im Projekt zugrunde lag (vgl. AP 3).

In Abbildung 88 ist der Lageplan für einen landwirtschaftlichen Musterbetrieb dargestellt. Vorhanden sind u.a. Rinderstall, Stroh- und Mistlager. In roter Farbe sind die Komponenten der Biogasanlage dargestellt:

- Stroh wird leicht vorzerkleinert mittels Feststoffdosierer zugeführt, die Gülle wird separat aus dem Stall zur Anlage gepumpt.
- Der runde Fermenter ist für 150 kW_{el} dimensioniert und hat mit 14 m Durchmesser und 6 m Höhe ein Nutzvolumen von ca. 850 m³. Je nach Substratzusammensetzung liegt die hydraulische Verweilzeit bei 42 bis 50 d
- Im Mistlager wird der Gärrest aus dem Fermenter mittels Schneckenpresse separiert. Der Feststoff wird in der Halle gelagert. Die Flüssigphase gelangt in das Endlager. Die Separation ist Voraussetzung für eine einfache Lagerung der Flüssigphase ohne Schwimmschichtbildung.
- Der kombinierte Lagerbehälter mit innenliegendem Gasspeicher (als Sack) hat einen Außendurchmesser von 22 m und eine Höhe von 7 m. Abzüglich Gasspeicher können dort ca. 2.200 m³ separierter Gärrest über 6 Monate gelagert werden.
- Das BHKW ist in einem Standardcontainer integriert.

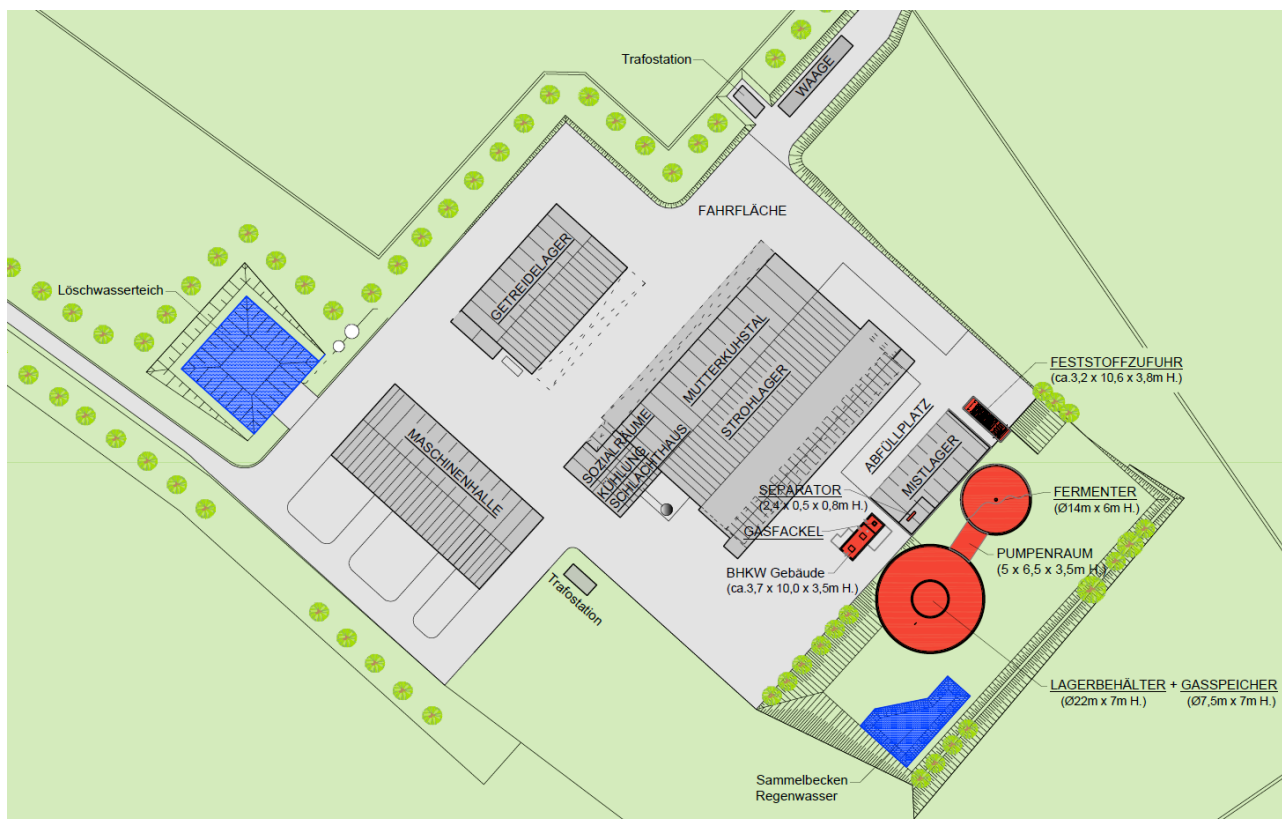


Abbildung 88: Lageplan für die Integration einer GülleHebel-BGA (rot markiert), © Ingenieurbüro Rückert GmbH

In Abbildung 89 sind die genannten Komponenten nochmals in 3D-Perspektive dargestellt. Gut zu erkennen sind die liegenden Rührwerke im Fermenter nach Vorbild der Voruntersuchungen im Prozessstomographen. Für die gelegentliche Durchmischung der separierten Flüssigphase im Endlager reicht ein kleines Rührwerk aus.

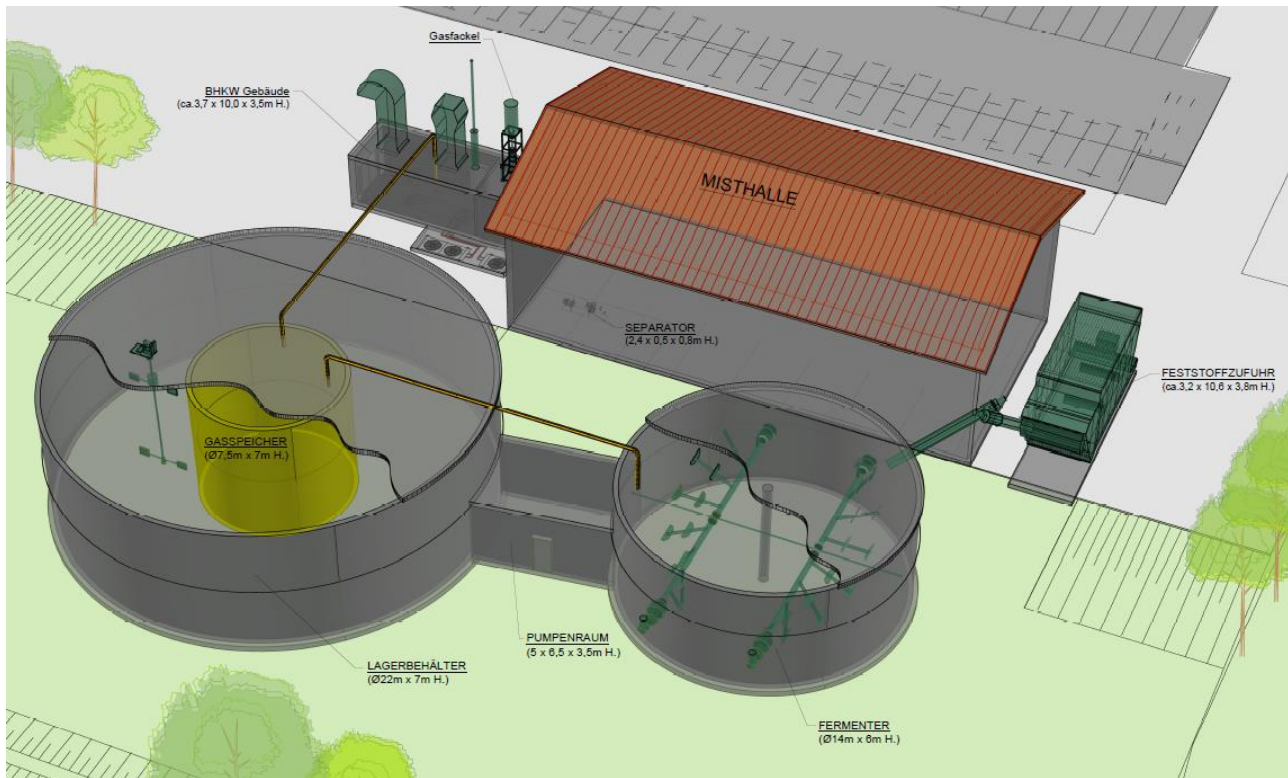


Abbildung 89: GülleHebel-BGA in 3D-Perspektive, © Ingenieurbüro Rückert GmbH

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurden zwei verschiedene Anlagengrößen mit unterschiedlichem Substratmix angenommen (Tabelle 10). In Szenario 1 wurde eine Biogasanlage für 75 kW_{el} ausgelegt mit einem Strohanteil von knapp 15 % im Substratmix. In Szenario 2 wurde die maximal mögliche Anlagengröße für Güllekleinanlagen mit 150 kW_{el} ausgelegt. In Szenario 2 wurden neben Rindergülle auch Schweinegülle und Festmist als Substrate angesetzt. Der Strohanteil liegt mit knapp 17 % etwas höher als in Szenario 1.

Tabelle 10: Beschickungsmengen der Beispielanlagen

| | | Beschickungsmenge | | Anteil |
|---------------------------------------|---------------|-------------------|------|-------------|
| | | t/a | t/d | % |
| Szenario 1 (75 kW _{el}) | Rindergülle | 3200 | 8,77 | 85,3 |
| | Stroh | 550 | 1,51 | 14,7 |
| Szenario 2 (150 kW _{el}) | Schweinegülle | 2200 | 6,03 | 35,4 |
| | Rindergülle | 2200 | 6,03 | 35,4 |
| | Festmist | 760 | 2,08 | 12,2 |
| | Stroh | 1050 | 2,88 | 16,9 |

Für die Bereitstellung bzw. den Erwerb der Substrate wurden die in Tabelle 11 angegebenen Werte angesetzt. Mit etwa 80 % Anteil stellt Stroh erwartungsgemäß den größten Kostenfaktor innerhalb der Substrate dar. Hier besteht Einsparungspotenzial, wenn eigenes Stroh, alternative Reststoffe oder mehr Stroh über den „Umweg“ im Stall als Festmist eingesetzt wird.

Tabelle 11: jährliche Substratkosten

| | Szenario 1 75 kW _{el} | Szenario 2 150 kW _{el} |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Kosten Schweinegülle (3 €/t) | - € | 6.600,00 € |
| Kosten Rindergülle (3,5 €/t) | 11.200,00 € | 7.700,00 € |
| Kosten Mist (15 €/t) | - € | 11.400,00 € |
| Kosten Stroh (100 €/t) | 55.000,00 € | 105.000,00 € |
| SUMME | 66.200,00 € | 130.700,00 € |

Die zusammenfassende Bilanz von Kosten und Erlösen ist in Tabelle 12 dargestellt. Die ermittelten Investitionskosten basieren auf Kosten für 26 verschiedene Positionen von Substratdosierer über Behälter, Medien und Technik bis zur Planungsleistung. Die Abschreibung erfolgt über 15 Jahre mit Fremdkapital zu einem Zinssatz von 4 %. Die Betriebskosten enthalten neben den Substratkosten alle Aufwendungen für den sicheren Betrieb der Anlage. Die Erlöse aus Strom basieren auf den Vergütungen des EEG 2023 bis zum Stichtag 30.06.2024. Danach sinkt die Vergütung um 0,5 % pro Jahr. Bei der Nutzung der Wärme wird von einem Eigenbedarf von 20 % ausgegangen. Der Rest kann für 4 ct/kWh verkauft werden.

Tabelle 12: Kosten- und Erlösbilanz

| | Szenario 1 75 kWel | Szenario 2 150 kWel | Bemerkungen |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|---|
| Investitionskosten | 1.445.328,00 € | 2.201.565,00 € | inkl. Planung |
| Betriebskosten | - 121.021,00 € | - 207.179,00 € | Substr., Personal, Betriebsst., Wartung, Versicherung |
| AfA-Abschreibung (lin.) | - 96.355,20 € | - 146.771,00 € | 15 Jahre |
| Zinsen | - 33.639,19 € | - 51.240,18 € | Fremdkapital mit 4 % Zinssatz |
| Erlöse (Strom + Wärme) | 160.516,00 € | 305.468,00 € | Strom: 22* oder 19** ct/kWh, Wärme: 4ct/kWh |
| Betriebsergebnis vor Steuern | - 90.499,39 € | - 99.722,18 € | |

* bis 75 kWel

** 76 bis 150 kWel

Es wird ersichtlich, dass sich für beide Szenarien in der jährlichen Bilanz ein Fehlbetrag (Verlust) von 90.000 bis 100.000 EUR ergibt. Dies ist zunächst nicht wirtschaftlich. Durch folgende Änderungen der Randbedingungen könnte ein besseres Ergebnis erreicht werden:

1. Höhere Erlöse:

a. Notwendige Erlöse für Strom (bei ansonsten unveränderten Randbedingungen):

- i. Szenario 1 → 36 ct/kWh für vollen Ausgleich der Verluste
- ii. Szenario 2 → 28 ct/kWh für vollen Ausgleich der Verluste

b. Erlöse für THG-Einsparung → z.B. 6 ct pro kWh (s. Tabelle 14)

2. Geringere Investitionskosten: Für den vollen Ausgleich der Verluste (bei ansonsten unveränderten Randbedingungen) müssten die Investitionskosten für Szenario 1 um 70 % sinken (auf 445.000 EUR) und für Szenario 2 um 50 % auf 1.100.000 EUR. → Dies ist sehr unrealistisch und soll zeigen, dass die Investitionskosten nur einen kleinen Hebel zur Verbesserung darstellen

3. Geringere Substratkosten: Hier könnte, wie bereits erwähnt nur bei den Strohkosten gespart werden, wenn eigenes Stroh, alternative Reststoffe oder mehr Stroh über den „Umweg“ im Stall als Festmist eingesetzt wird. Eine Halbierung des Strohpreises von 100 auf 50 EUR/t (bei ansonsten unveränderten Randbedingungen) würde den jährlichen Verlust in Szenario 1 um etwa 30 % und in Szenario 2 um etwa 50 % verringern.

Die genannten Einspar- und Verbesserungspotenziale sind hier einzeln ohne die gleichzeitige Änderung anderer Faktoren betrachtet worden. Im Einzelfall wäre zu prüfen, ob durch die Kombination der Faktoren sowie politische Entscheidung (Stichwort: Vergütung und THG-Zertifikate) eine wirtschaftliche Lösung gefunden werden kann.

Ökologische Auswirkungen

Für die Bewertung der ökologischen Auswirkungen des GülleHebel-Ansatzes wurde der Fokus auf die Veränderung der Treibhausgasfreisetzung durch die Einführung einer Biogasanlage in kleinen landwirtschaftlichen Betrieben gelegt. Dabei sind mehrere Ebenen zu betrachten bzw. zu vergleichen. Allein durch die Nutzung von Gülle in Biogasanlagen werden im Vergleich zur direkten Güllelagerung und -ausbringung CH₄- und N₂O-Emissionen vermieden (Abbildung 90). Bereits bei der Lagerung der unbehandelten Gülle ist mit THG-Emissionen von 45,9 bis 68,7 kg CO₂-äq/m³ Gülle zu rechnen, was gegenüber 6,6 kg CO₂-äq bei der Lagerung von Gärrest⁴ recht hoch ist.

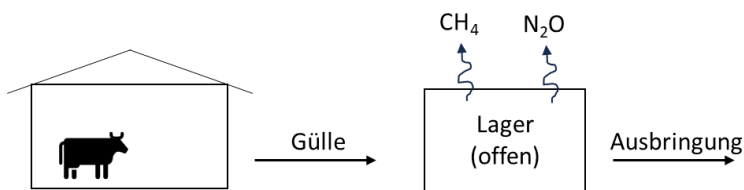


Abbildung 90: Güllewirtschaft ohne Biogaserzeugung

⁴ ROTH, U.: „Voraussetzungen für eine effektive THG Minderung durch die Vergärung von Gülle“, FNR-Online-Infoveranstaltung „Vergärung von Wirtschaftsdüngern“, 23. März 2023

Neben dieser Emissionsvermeidung wird durch die energetische Nutzung des hergestellten Biogases Strom und Wärme produziert, welche fossile Energiequellen ersetzen. Gegenüber der Güllewirtschaft ohne Biogas werden aber keine Transporte vermieden, da sowohl Gülle als auch Gülle-Gärreste ausgebracht werden müssen. Die Nährstoffe aus der Gülle gelangen in beiden Fällen auf den Ackerflächen und bei guter fachlicher Praxis auch bei den Pflanzen im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Qualitative Unterschiede bei der Ausbringung von Gülle oder Gärrest (z.B. Geruch, Ammoniak, Nährstoffverfügbarkeit) wurden im Projekt nicht mit einbezogen. Die Zuführung von (externem) Stroh zur Biogasanlage führt zu einer zusätzlichen Nährstofffracht, welche bei der Ausbringung der Gärreste andere Düngemittel einspart und daher weitere Treibhausgasemissionen vermieden werden.

Abbildung 91 zeigt schematisch das GülleHebel-Verfahren. Als Basis für die ökologische Bewertung dient eine 75 kW-Anlage nach dem Szenario 1 der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (vgl. Tabelle 10). Die Sachbilanzen wurden mit Datensätzen der Datenbank Ecoinvent® im Programm Umberto LCA+® hinterlegt und die Berechnungen der THG-Emissionen durchgeführt.

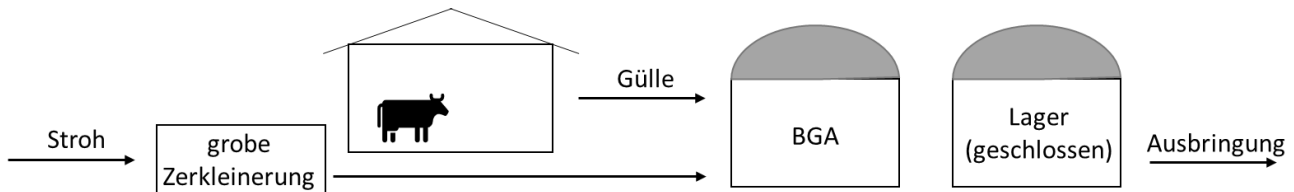


Abbildung 91: GülleHebelansatz: Güllewirtschaft mit Biogaserzeugung und Co-Substrat Stroh

Aufgrund der effizienten Paddelrührwerke kann mit einem niedrigen Eigenstrombedarf der Biogasanlage von 5 % gerechnet werden. Zusätzlich wurden auch Szenarien mit 10 % Eigenstromverbrauch gerechnet. Für die kleinen dezentralen Anlagen kann tendenziell ein größerer Anteil der erzeugten Wärme im BHKW für Heizzwecke und Warmwasser nahegelegener Verbraucher benutzt werden. Der überproportional große Stromertrag aus dem Stroh (71 % des Gesamtertrages) führt zu einem erhöhten Wärmeüberschuss, da bereits aus dem Gülleanteil genug Biogas für die Erwärmung der Rohgülle produziert werden kann⁵. Aus diesen Gründen wurde mit hohen Wärmenutzungsgraden von 80 % und 50 % gerechnet bzw. diese als Ersatz für fossile Wärmequellen (Erdgas und Heizöl) gutgeschrieben.

Der Einsatzstoff Gülle weist keinen THG-Fußabdruck auf, da er einen Reststoff darstellt und gegenüber der direkten Güllelagerung und Ausbringung keine zusätzlichen Transporte anfallen. Das eingesetzte Stroh wird anhand eines Ecoinvent®-Datensatzes mit 90 kg CO₂-äq pro t für Bergung und Transport bewertet. Für Stroh aus unmittelbarer Nähe zur Anlage könnte dieser Wert niedriger liegen, da es sich um einen Marktdatensatz für Europa handelt. Die Bilanz wurde trotzdem nur mit diesem Marktdatensatz durchgeführt. Zusätzlich wurde für die Strohaufbereitung (grobes Häckseln) ein Stromverbrauch laut Recherche von 22,5 kWh pro t Stroh angesetzt. Dieser Stromverbrauch wurde, wie auch der Eigenstrombedarf der Fermentation mit einem THG-Fußabdruck des deutschen Strommixes inklusive Netz und Vorketten bilanziert (Ecoinvent®-Datensatz mit 0,56 kg CO₂-äq/kWh_{el}).

Einen wichtigen Emissionsfaktor stellt der Methanschlupf dar. Für Fermenter und BHKW wurde jeweils mit 0,5 % Methanschlupf gerechnet. Die Lagerung und Ausbringung der Gärreste wurde gesondert und im Vergleich zur Güllelagerung betrachtet. Aller 1.040.000 m³ CH₄ ist laut ifeu-Studie⁶ mit 25 kg Lachgas aus dem BHKW zu rechnen. Dieser Wert fand in der Bilanz Berücksichtigung.

Der Bau der Biogasanlage wurde nach Bachmaier et al (2009)⁷ mit ca. 10 g CO₂-äq /kWh_{el} angesetzt.

In Abbildung 92 ist beispielhaft für die bilanzierte Biogasanlage (75 kW) mit 10 % Eigenstrombedarf und 50 % Wärmegutschrift das Sankey-Diagramm für die THG-Ströme nach IPCC 2013 dargestellt. Die Dicke der Linien repräsentiert die Größe der THG-Belastung. Die Richtung der Pfeile zeigt an, ob THG-Frachten auf dem Weg vom Rohstoff zum Produkt Strom emittiert oder gutgeschrieben (abgezogen) werden.

⁵ Lemmer, A.: „De-Methanisierung von Flüssigmist“, FNR-Statusseminar – Vergärung Wirtschaftsdünger, 02.02.2023, online

⁶ Vogt, R.: „Basisdaten zu THG-Bilanzen für Biogas-Prozessketten und Erstellung neuer THG-Bilanzen“, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2008

⁷ Bachmaier, H.: „Treibhausgasemissionen der Energieproduktion aus Biogas“, Biogas Forum Bayern, Nr. V – 03/2009

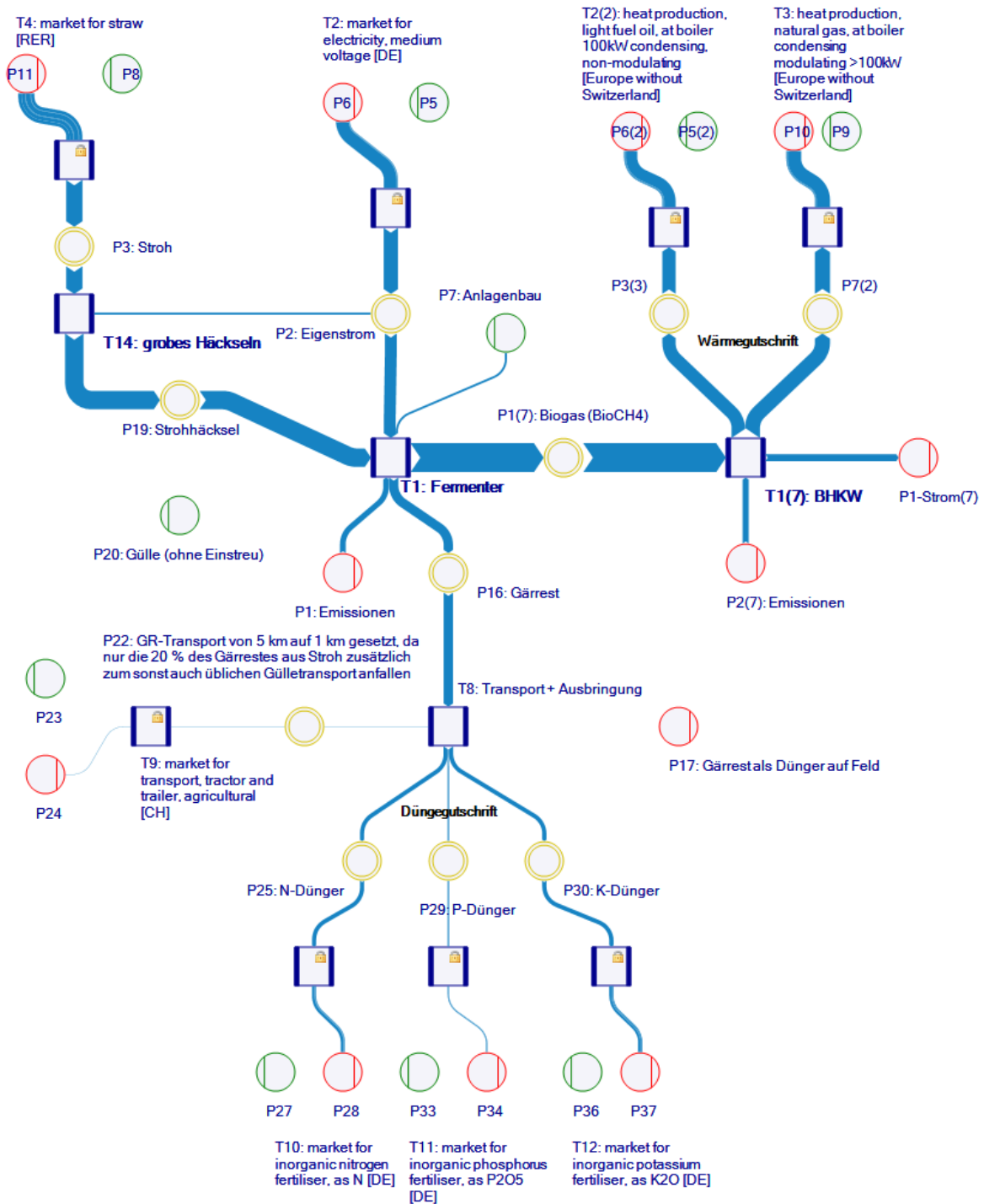


Abbildung 92: Sankey-Diagramm für die THG-Bilanz des Produktes Strom (Beispiel: 10 % Eigenstrom/50 % Wärme)

In Tabelle 13 sind ausgewählte Ergebnisse für den THG-Fußabdruck der Stromproduktion aus der Referenzvergärung von Gülle und Maissilage sowie verschiedener Varianten des GülleHebel-Ansatzes dargestellt.

Tabelle 13: THG-Bilanz pro kWh Stromerzeugung für Referenz und Güllehebel (85 % Gülle + 15 % Strohhäcksel)

| | THG-Bilanz kg CO ₂ -äq/kWh _{el} |
|---|--|
| Ref. Maissilage + Gülle (8 % Eigenstrom, 50 % Wärmenutzung) | 0,06 |
| GülleHebel (10% Eigenstrom, 50% Wärmenutzung) | 0,02 |
| GülleHebel (10% Eigenstrom, 80% Wärmenutzung) | -0,05 |
| GülleHebel (5% Eigenstrom, 80% Wärmenutzung) | -0,08 |

Gegenüber dem aktuellen dt. Strommix mit ca. 0,38 kg CO₂-äq/kWh_{el} kann durch alle Varianten eine sehr hohe THG-Einsparung erzielt werden. Die Emissionen aus dem Anbau der Maissilage erhöhen für den

Referenzfall den Bilanzwert. Im direkten Vergleich kann des GulleHebel-Verfahren aufgrund der nachhaltigeren Einsatzstoffe eine geringere THG-Freisetzung nahe Null erreichen. Voraussetzung für diese insgesamt sehr positiven Ergebnisse ist der Anteil der tatsächlichen Wärmenutzung. Durch eine weitere Erhöhung des Warmenutzungsgrades auf 80 % und/oder Senkung des Eigenstrombedarfes für die Fermentation können sogar negative Werte berechnet werden, weil theoretisch mehr eingespart wird als emittiert.

Es ist demnach davon auszugehen, dass der mittels GulleHebel-Ansatz produzierte Strom mindestens CO₂-neutral produziert werden kann. Wird zusätzlich davon ausgegangen, dass jeder Kubikmeter Gülle, welcher durch das GulleHebel-Verfahren in einer Biogasanlage genutzt wird, im Mittel etwa 50,7 kg CO₂-äq einspart (s. oben), so kann für die 75 kW-Anlage pro kWh_{el} nochmals 0,25 kg CO₂-äq eingespart werden (Tabelle 14). Auch wenn der aktuelle CO₂-Preis in Deutschland politisch und marktgetrieben geringer ausfällt, so empfiehlt das UBA⁸ einen Preis von 250 EUR/t, welcher die Folgeschäden der Emissionen beinhaltet. Legt man diesen Preis auf den produzierten Strom und dessen THG-Einsparung um, so ergibt sich eine Art CO₂-Bonus von ca. 6 ct pro kWh_{el}, welcher für die Kompensation der Mehraufwendungen bei der Biogasproduktion genutzt werden könnte.

Tabelle 14: Zusätzliche THG-Einsparung durch Gulleverwendung in 75 kW-BGA

| Gullemenge | THG-Einsparung | Stromproduktion | THG-Einsparung | CO ₂ -Preis* | |
|-------------------|---------------------------|----------------------|---|-------------------------|----------------------|
| | | | | EUR/t CO ₂ | ct/kWh _{el} |
| m ³ /h | kg CO ₂ -äq/h | kWh _{el} /h | kg CO ₂ -äq/kWh _{el} | EUR/t CO ₂ | ct/kWh _{el} |
| 0,365 | 18,52 | 75,0 | 0,25 | 250 | 0,062 |

* Empfehlung des UBA für Hohergewichtung der Wohlfahrt heutiger Generationen

Wichtet man die Wohlfahrt für aktuelle und zukünftige Generation gleich, dann sollte der CO₂-Preis sogar bei 860 EUR pro t liegen⁸, was auf den Strompreis umgelegt bis zu 21 ct/kWh bedeuten würde. Dies soll nur zeigen, welches Potenzial in der Anrechnung von CO₂-Vermeidungskosten steckt. Um also tatsächlich THG-Emissionen einzusparen, wäre bekanntermaßen die Nutzung von mehr Gülle in Biogasanlagen ein wichtiger Weg. Soll dies in größerem Umfang geschehen, könnten Einnahmen aus einer CO₂-Steuer oder aus Kompensationszahlungen zur Subventionierung Güllekleinanlagen genutzt werden.

⁸<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#klimakosten-von-treibhausgas-emissionen>

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Projekt wurden keine Schutzrechte angemeldet. Es ist auch keine Anmeldung geplant.

Genutzt wurde das Patent des Unterauftragnehmers Ingenieurbüro Rückert (DE 10 20212 213 990 B4) für das Fermenterdesign und die Rührkonfiguration des labortechnischen Prozesstomographen.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

- Keine direkte wirtschaftliche Verwertung als gemeinnütziger Verein (Fraunhofer)
- Mittelfristig (bis 3 Jahre nach Projektende):
 - Beratungsleistungen für Landwirte zur Etablierung der Güllevergärung
- Langfristig (ab 3 Jahre nach Projektende):
 - Möglichkeit für Landwirte, Dienstleister und Anlagenhersteller/Planer zur Generierung von Aufträgen und Umsatz durch Einführung von Biogasanlagen nach GülleHebel-Prinzip (Voraussetzung: Erreichung der Wirtschaftlichkeit)
 - Volkswirtschaftlich: Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien und Senkung des CO₂-Ausstoßes durch energetische Gülleverwertung

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

- Kurzfristig (direkt nach Projektende)
 - Schaffung von Know-how im Bereich des Substrataufschlusses, der Charakterisierung von Mischprozessen und der Vergärung von schwierigen Substraten
- Mittelfristig (bis 3 Jahre nach Projektende):
 - Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit/Kompetenz und Sichtbarkeit
- Langfristig (ab 3 Jahre nach Projektende):
 - Verbesserte Zusammenarbeit mit Firmen, Netzwerken und Forschungsstellen

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Kurzfristig (direkt nach Projektende)
 - Akquise von Drittmitteln
- Mittelfristig (bis 3 Jahre nach Projektende):
 - Know-how-transfer in Folgeprojekte (Biomassennutzung, Nährstoffrecycling)
- Langfristig (ab 3 Jahre nach Projektende):
 - Ausbau der Anwendungsfälle für die Methoden der Prozesstomographie (z.B. Misch- und Rührprozesse in der chemischen Industrie)

3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Projektlaufzeit wurden keine Erkenntnisse von Dritten bekannt, welche sich explizit mit der kombinierten Vergärung von Gülle und Stroh in Kleingülleanlagen befassten.

4. Veröffentlichungen

Die kompletten Ergebnisse werden im Abschlussbericht dargelegt und veröffentlicht.

Eine Präsentation der Ergebnisse für eine Fachveranstaltung oder in einem Fachblatt ist geplant

Eine Anfrage seitens der Fachzeitschrift LANDWIRT (Landmedien Deutschland GmbH) dazu läuft bereits.