Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Fraunhofer IKTS	03EI5403A
ATS - Agro Trading & Solutions GmbH	03EI5403B
Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz e.G.	03EI5403C
DBFZ Deutsches Biomasseforschungs-zentrum gemeinnützige GmbH	03EI5403D
Rückert NatUrgas GmbH	03EI5403E

Vorhabenbezeichnung:

Behandlung und kombinierter Einsatz von Stroh- und Getreideausputzmischungen für eine Biogas-Technologiekette mit Zukunft - KoSaTZ

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2020 – 31.12.2021 (verlängert bis 31.03.22: DBFZ)

Berichtszeitraum: 01.01.2020 – 31.12.2021

Dresden, 29.07.2022

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren (Zuwendungsempfänger)

Inhalt

1 Aufgabenstellung 3

2 Voraussetzungen 5

2.1 Förderpolitische Voraussetzungen 5

2.2 Kompetenzen und Ausstattung 5

2.2.1 Fraunhofer IKTS 5

2.2.2 ATS 6

2.2.3 Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz 6

2.2.4 DBFZ 7

2.2.5 Ingenieurbüro Rückert 7

3 Planung und Ablauf des Vorhabens 8

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn 9

4.1 Kostenstruktur von Biogasanlagen und Rolle der Einsatzsubstrate 9

4.2 Einsatzsubstrat Stroh und mögliche Vorbehandlungsmethoden 9

4.3 Einsatzsubstrate Spelzen und Ausputz in Biogasanlagen 11

4.4 Zwischennutzung von Stroh in der Tierhaltung 11

4.5 Zusammenfassung und Neuheitsgrad 12

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 13

6 Ergebnisse 14

6.1 Neue Substratmischungen und angepasste Aufbereitung 14

6.1.1 Charakterisierung von Stroh sowie alternativen Reststoffströmen aus der Getreideverarbeitung 14

6.1.2 Pelletierung im kleintechnischen Maßstab 19

6.1.3 Kleintechnische Versuche zur Brikettierung 43

6.2 Zwischennutzung als Einstreumatte und Einfluss auf den Biogasertrag 53

6.2.1 Pelletproduktion – Großchargen 53

6.2.2 Einstreuversuche 63

6.2.3 Analyse der Stoffströme aus der Stallhaltung und Energiebilanz für die Einstreupellets im Stall 69

6.3 Quellverhalten und Einmischung von Misch- und Strohpellets in Rundfermentern 76

6.3.1 Untersuchungen zum Quell- und Einmischverhalten 76

6.3.2 Ingenieurtechnisches Upscaling – Ableitungen für großtechnischen Betrieb 89

6.4 Demonstrationsversuche zur Vergärung 91

6.4.1 Technische und organisatorische Vorbereitung eines großtechnischen Tests 91
6.4.2 Einsatz von Gülle-Einstreu-Mischung und Festmist in der Praxis-BGA 92
6.4.3 Direkter Einsatz von Mischpellets in der Praxis-BGA 101
6.5 Ökologische und ökonomische Bewertung des Gesamtverfahrens 106
6.5.1 Treibhausgasbilanz 106
6.5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen 110
6.6 Zusammenfassung 112

7 Zahlenmäßiger Nachweis 117

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 117

9 Nutzbarkeit der Ergebnisse 118

10 Fortschritte bei anderen Stellen 119

11 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 119

12 Tabellenverzeichnis 120

13 Abbildungsverzeichnis 121

14 Abkürzungsverzeichnis 125

15 Literatur 126

Anhang 130

1 Aufgabenstellung

Die Biogasbranche in Deutschland steht spätestens seit dem EEG 2014 und nachfolgenden Novellierungen an einem Scheideweg. Aufgrund der stark rückläufigen EEG-Erlöse sowie einem zunehmenden Kostendruck besteht die reale Gefahr, dass es zukünftig einen Rückbau von technisch intakten Biogasanlagen aus wirtschaftlichen Gründen geben wird. Und dies ist der Fall, obwohl Biogasanlagen einen sehr wichtigen Beitrag zur Einhaltung der CO_2-Einsparziele leisten, indem sie sowohl selbst regenerativen Strom und Wärme bereitstellen als auch zur Integration der fluktuierenden Energiequellen (Sonne, Wind) maßgeblich beitragen, indem sie deren Schwankungen ausgleichen.

Vor dem Hintergrund des Ukrainekrieges 2022 und der Veröffentlichung des RePowerEU Planes kommt der Bereitstellung von Biomethan aus BGAs bis 2030 eine wichtige Rolle zu. Insofern gibt es tragfähige Post-EEG Konzepte, die auch politisch gewollt sind.

Als Folge der EEG-Änderungen und der aktuellen Politik im Hinblick auf das EEG gibt es zwei Optionen: noch stärkere Überbauung und Flexibilisierung oder Aufbereitung zu Biomethan und Einspeisung ins Erdgasnetz (auch durch EU anvisiert). Beides erhöht aber den Kostendruck auf die Substrate. In Verbindung mit dem Ukrainekrieg und den sich daraus ergebenden Verwerfungen auf den internationalen Nahrungsmittelmärkten wird die Verfügbarkeit bezahlbarer Anbaubiomasse für Biogasanlagen abnehmen.

Betreiber von Biogasanlagen suchen vor diesem Hintergrund dringend nach alternativen, nachhaltigen und kostengünstigen Einsatzstoffen, um den Betrieb auch nach der EEG-Förderphase aufrechterhalten zu können. Für Betriebe mit eigenem Überschuss an Stroh bietet sich dessen Nutzung in einer Biogasanlage an. In bereits abgeschlossenen Projekten (EFFIGEST 2016, STEP 2019) wurde nachgewiesen, dass dies eine wirtschaftliche Möglichkeit darstellt und dafür eine spezielle Aufbereitungstechnologie entwickelt. Neben den sehr positiven Eigenschaften der entwickelten strohbasierten Biogaspellets wurde im Praxistest jedoch festgestellt, dass:

1. Die Kosten des Gesamtverfahrens zur Herstellung eines verkaufs- und einsatzfähigen Einsatzstoffes für Biogasanlagen allein auf Basis von Stroh aufgrund des regionalen und in Abhängigkeit von der Witterung z.T. hohen Bezugspreises von Stroh häufig noch zu hoch liegen.

2. Die Einmischung von großen Mengen Strohpellets in praktischen Anlagen zu Problemen führen kann, wenn das starke Quellverhalten nicht mit angepasster Rührungsintensität und abgestimmter Zuführung von Verdünnungsmedium kompensiert wird

Beide Punkte hemmen die breitenwirksame Nutzung von Stroh in Biogasanlagen und sollten daher im Projekt „KoSaTZ“ gezielt adressiert werden. Folgende Punkte sollten innerhalb des Projektes untersucht werden:

1. Neue Substratmischungen: Nutzung und Beimischung von Reststoffen aus der Getreideverarbeitung bei der Herstellung von Pellets für Biogasanalgen (Kostenreduktion)

2. Optimale Substrataufbereitung: Vergleich von Pelletierung und Brikettierung bei der Verarbeitung von Stroh und Reststoffen

3. Kaskadennutzung: Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit durch Zwischennutzung der Stroh- oder Mischpellets als Einstreumatten in der Tierhaltung mit anschließender Verwertung in der Biogasanlage

4. Einmischprozess und Quellverhalten: Erstellung von praktischen Empfehlungen für die Einmischung von Stroh- oder Mischpellets in großtechnischen Biogasanlagen zur Einsparung von Energie und zur Vermeidung von Havarien

Abbildung 1 veranschaulicht den Projektansatz sowie die Hauptzielstellungen.

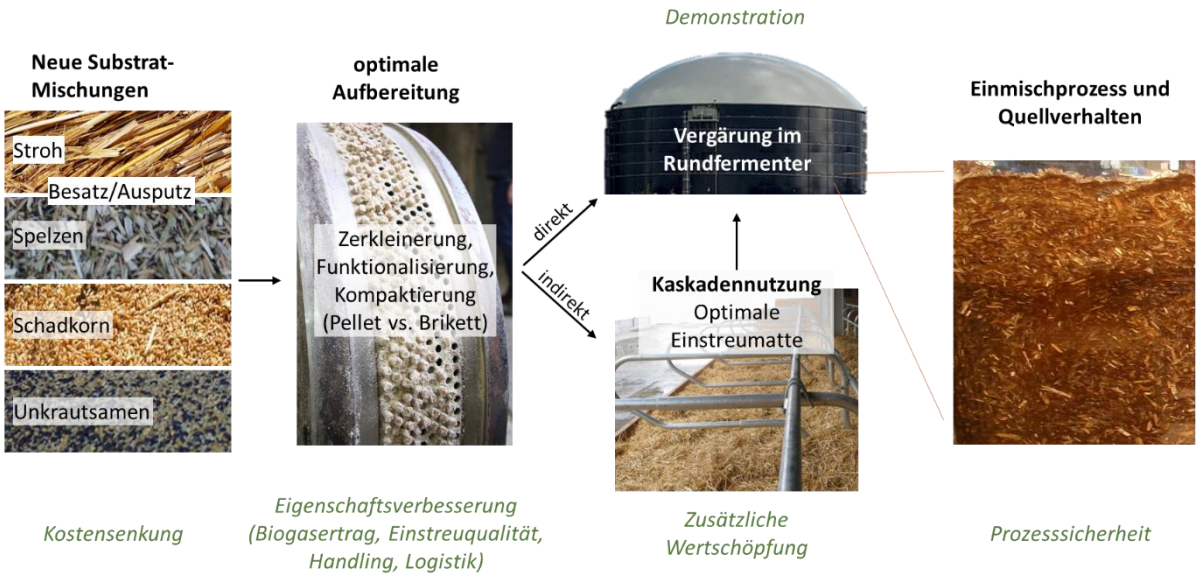


Abbildung 1: Verfahrensschema und Zielstellungen im Projekt KoSaTZ

2 Voraussetzungen

2.1 Förderpolitische Voraussetzungen

Das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung ist eines der strategischen Elemente der Energiepolitik. Es soll unmittelbar dazu beitragen, dass die Ziele des Klimaschutzplanes (u.a. Verminderung des Ausstoßes von Treibhausgasen um 80% bis 2050) erreicht werden. Es soll u.a. durch finanzielle Unterstützung die Einsatzfähigkeit von Energietechnologien beschleunigt werden. Das skizzierte Vorhaben KoSaTZ ordnet sich im Förderschwerpunkt II (Energiebereitstellung) bei der Bioenergie ein. Durch die angestrebte Zielstellung für einen nachhaltigen und wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen wird ein wichtiger Beitrag für diesen Sektor geleistet.

Konkret sollte das Substrateinsatzspektrum für Bioenergieanlagen erweitert und die Ressourceneffizienz durch eine Kaskadennutzung der Stoffe gesteigert werden. Dies entspricht dem Anspruch des Abschnittes 3.7.1 („Erschließung biogener Rest- und Abfallstoffe") in der aktuellen Bekanntmachung des BMWi. Außerdem deckt sich die geplante Optimierung und Anpassung der Aufbereitung mittels Zerkleinerung, Aufschlusschemie und Kompaktierung mit den weiteren Zielsetzungen desselben Abschnittes.

Das skizzierte Projekt bezieht sich auch auf die strategischen Ziele der Energieforschungspolitik:

- Energiewende voranbringen → Energetische Nutzung von Reststoffen, Stabilisierung von Energienetzen durch flexible und speicherfähige Energie (Biogas),
- Industriestandort stärken → Sicherung von Arbeitsplätzen in der Biogasbranche,
- Gesamtgesellschaftliche Risikovorsorge → Kreislaufschließung (Energie und Nährstoffe) in der Landwirtschaft.

2.2 Kompetenzen und Ausstattung

2.2.1 Fraunhofer IKTS

Das Fraunhofer IKTS (Institut für Keramische Technologien und Systeme) ist seit vielen Jahren auf den Gebieten der Umweltverfahrens- und Energietechnik tätig. Die Verfahrens- und Systementwicklung auf den Gebieten Trinkwasseraufbereitung, Abwasser- und Klärschlammbehandlung sowie der regenerativen Energieerzeugung durch Fermentationsprozesse (z.B. Biogas) gehören zur Kernkompetenz. Im Team arbeiten Verfahrenstechniker, Siedlungswasserwirtschaftler, Bioverfahrenstechniker und Umwelttechniker interdisziplinär zusammen, um die innovativen Entwicklungen bis zur Anwendungsreife zu führen. Insbesondere im Bereich der Vergärung von alternativen Reststoffen (v.a. Getreidestroh) hat sich

das IKTS in den letzten 10 Jahren innerhalb mehrerer Verbundprojekte ein unikales Knowhow erworben, welches auf Fachveranstaltungen und in Fachzeitschriften mehrfach publiziert wurde (Schwarz 2016c; Friedrich et al. 2010; Schwarz und Reinhold 2012). Im Projekt KoSaTZ konnte das IKTS vor allem das analytische und verfahrenstechnische Knowhow sowie die zugehörigen Labor- und Versuchstechnologien (Biogasertrag, Nährstoffe, Quellverhalten, Strömungsverhalten (Prozesstomographie)) einbringen.

2.2.2 ATS

Die ATS – Agro Trading & Solutions GmbH ist ein innovatives Unternehmen, welches sich mit der Produktion, Recycling und dem Handel von Stoffen & Produkten von und für die Land- und Energiewirtschaft beschäftigt. Vornehmlich werden Düngemittel, Holzbrennstoffe, sowie Biogassubstrate hergestellt oder auch nur disponiert. Die ATS hat es sich zum Ziel gesetzt, eine große Bandbreite spezieller Stoffströme im Agrarbereich sinnvoll zu verwerten bzw. zu handeln. Seit der Aufnahme des operativen Betriebes im Jahr 2015 wurde vor allem in zwei Standorte in Hardegsen in Form von einer Vielzahl an Maschinen zur Eingangsstoffaufbereitung, sowie in Form von Lagerkapazitätenaufbau investiert. ATS besitzt die notwendige Infrastruktur zur Düngemittelproduktion aus Sekundärrohstoffen, Aufbereitung von Holzbrennstoffen, sowie der Herstellung von Biogassubstraten. Die ATS beschäftigt derzeit 11 Mitarbeiter in Vollzeit, sowie zwei Teilzeit Laborkräfte. Ein von ATS gepachtetes ehemaliges Zementlabor wird schrittweise zu einem betriebseigenen Labor für F&E Maßnahmen, Handling von Spurennährstoffen und dem unternehmensinternen Qualitätsmanagement ausgebaut. Die ATS hat bereits eine Vielzahl an Biogaseinsatzstoffmischungen für das In- & Ausland, sowie Spurenelement- & Blattdüngermischungen für Biogasanlagen & die Landwirtschaft entwickelt sowie als Projektpartner im Vorgängerprojekt STEP agiert. Im Projekt KoSaTZ konnte ATS vor allem Kompetenzen und Technologien zur Mischung, zum Aufschluss und zur Pelletierung von verschiedenen Inputstoffen in der Größenordnung von Insgesamt 150 t einbringen. Zusätzlich wurde das bestehende Netzwerk in die Landwirtschaft für den Erwerb der verschiedenen Stoffströme genutzt.

2.2.3 Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz

Die Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz (AGC) gehört zu den Pionieren der erneuerbaren Energien und der Biogasverstromung. Seit 2001 wird in Clausnitz Biogas aus Gülle produziert. Mittlerweile gehören drei Biogasanlagen zum Betrieb (Rundfermenteranlage mit 706 KWel. (flüssig) und zwei 75 kWel – Klein-BGA für die Güllervergärung). Als landwirtschaftlicher Betrieb (ca. 1.100 ha Ackerbau, ca. 600 Milchkühe mit entsprechender Nachzucht) versucht die Genossenschaft ganzheitliche Wertschöpfungsketten zu schließen. Dabei sollen stets innovative Wege gefunden werden, um Kreisläufe noch besser schließen zu können. Durch Kontakte zu Forschung und Wissenschaft versucht das Unternehmen frühzeitig Innovationen zu erkennen und entsprechend in die praktische Umsetzung zu überführen. Für das Projekt KoSaTZ stellte AGC die Möglichkeit des Einsatzes und der Bewertung der produzierten Rohstoffe in den eigenen Ställen und großtechnischen Biogasanlagen bereit.

2.2.4 DBFZ

Das DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH) wurde am 28. Februar 2008 als gemeinnützige GmbH gegründet. Das Forschungszentrum hat den Auftrag der Bundesregierung, die effiziente Nutzung von Biomasse als regenerativer Energieträger der Zukunft im Rahmen angewandter Forschung theoretisch und praktisch voranzutreiben. Das wissenschaftliche Bemühen zur Etablierung und Integration von Biomasse in die Reihe der bereits bestehenden Energieträger erfolgt unter Einschluss technischer, ökologischer, ökonomischer, sozialer sowie energiewirtschaftlicher Aspekte. In enger Kooperation mit Wirtschaftspartnern sowie mit Forschungseinrichtungen erfolgt die Entwicklung neuer Prozesse, Verfahren und Konzepte im Bereich der energetischen Biomassenutzung. Damit sollen auch die bestehenden Forschungsnetzwerke zwischen der Wirtschaft und der Wissenschaft weiter gefördert werden. Darüber hinaus erfolgt eine wissenschaftliche Vernetzung mit der Forschung im Agrar-, Forst- und Umweltbereich, u. a. mit der BMEL-Ressortforschung, der außeruniversitären Großforschung (insbesondere dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)), den Landesforschungseinrichtungen, ausgewählten Universitäten wie auch mit anderen deutschen, europäischen und internationalen Institutionen im Bereich der energetischen Biomasseforschung. Das Institut ist zertifiziert nach DIN EN ISO 9001. Derzeit arbeiten am DBFZ rund 179 wissenschaftliche Mitarbeiter in den Bereichen „Bioenergiesysteme“, „Bio-chemische Konversion“, „Thermo-chemische Konversion“ und „Bioraffinerien“. Das DBFZ war bereits Partner im Vorgängerprojekt STEP. Für das Projekt KoSaTZ wurden vor allem die Kompetenzen und Versuchsanlagen im Bereich der mechanischen Zerkleinerung und Kompaktierung von biogenen Feststoffen in Form der Pelletierung und Brikettierung sowie die zugehörige Analytik eingebracht.

2.2.5 Ingenieurbüro Rückert

Die Ingenieurbüro Rückert GmbH plant seit 1993 Biogasanlagen nach dem Rückert NatUrgas®-Verfahren und hat in dieser Zeit die Anlagenentwicklung stets vorangetrieben. In dieser Zeit sind über 87 Biogasanlagen nach dem EU-weit patentierten Rückert-NatUrgas®-Verfahren von 100kW bis 2,48 MW geplant, genehmigt, gebaut und in Betrieb genommen worden. Ca. 230 Mio. € wurden investiert. Rückert NatUrgas®-Anlagen finden sich bereits in den Ländern Deutschland, Österreich, Tschechien, Slowakei, Slowenien und Japan. USA, Türkei und Italien kommen demnächst hinzu. Weiterhin ist durch langjährige Zugehörigkeit bei diversen Forschungsvorhaben (z.B. Vorläuferprojekte EFFIGEST und STEP) zum Thema Substratvielfältigkeit, Abfallvergärung, Gärrestaufbereitung ein breiter Wissensschatz und Erfahrung vorhanden. Im Projekt KoSaTZ wurden die einzelnen Prozessstufen durch Rückert im Hinblick auf großtechnische Umsetzbarkeit hinsichtlich Genehmigung und sicherheitsrelevanter Fragen bewertet.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Tabelle 1 zeigt die geplanten Arbeitspakete und Bearbeitungszeiten.

Tabelle 1: Arbeits- und Zeitplan des Projektes KoSaTZ

	Arbeitspakete Projekt		2020												2021											
			1. QT			2. QT			3. QT			4. QT			1. QT			2. QT			3. QT			4. QT		
AP			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	**Neue Substratmischungen und angepasste Aufbereitung**																									
1.1	Organisation und Charakterisierung von Stroh sowie alternativen Reststoffströmen aus der Getreideverarbeitung (Spelzen, Ausputz, Schadkorn) Analyse: Mengen- und Energiepotenzial, Stoffeigenschaften	ATS, IKTS, Rück																								
1.2	Pelletierung im kleintechnischen Maßstab (Variation von Mischung, Zerkleinerung und Zugabe von Hilfsstoffe (z.B. NaOH)) - Analyse der Pelleteigenschaften (inkl. Auflösevermögen und Biogasertrag)	ATS, IKTS, DBFZ																								
1.3	Kleintechnische Versuche zur Brikettierung von Stroh und Substratmischungen als Alternative zur Pelletierung - Analyse und Vergleich der Produkteigenschaften zu AP 1.2	DBFZ, IKTS																								
2	**Zwischennutzung als Einsteumatte und Einfluss auf den Biogasertrag**																									
2.1	Produktion von jeweils bis zu 20 t Einstreupellets (3 verschiedene Qualitäten (Zusammensetzung, Aufbereitung) - Bewertung der Betriebsparameter (Pelletierung) und Pelleteigenschaften	ATS, IKTS, DBFZ																								
2.2	Praktischer Einsatz der Einstreupellets aus AP 2.1 in (a)Tiefliegeboxen und (b)Tiefstreustall - Bewertung der Eignung (Saugvermögen, Hygiene, Tierwohl und Austrag ((a)Güllerinnen bzw. (b)Festmist))	AGC, Rück																								
2.3	Bilanzierung der Veränderung von Masse- und Energiepotenzial während der Zwischennutzung im Stall - Analyse von Biogasertrag und stofflicher Zusammensetzung	AGC, IKTS																								
3	**Quellverhalten und Einmischung von Misch- und Strohpellets in Rundfermentern**																									
3.1	Systematische Untersuchungen zum Quell- und Einmischverhalten von Strohpellets, Mischpellets, Briketts und Festmist nach Zwischennutzung im 1m³ Rundfermenter (Prozesstomographie)	IKTS, DBFZ																								
3.2	Ingenieurtechnisches Upscaling der Ergebnisse von AP 3.1 und Ableitung von Maßnahmen für den großtechnischen Einsatz von Pellets in Rundfermentern	Rück																								
4	**Demonstrationsversuch zur Vergärung von Misch- und Strohpellets (direkt und nach Zwischennutzung als Einstreu)**																									
4.1	Technische und organisatorische Vorbereitung eines großtechnischen Tests auf der BGA der AG "Bergland" Clausnitz (AGC) (Logistik, Analytik, Betriebssicherheit)	AGC, Rück																								
4.2	Einsatz von (a) Gülle-Einstreu-Mischung und (b) Festmist aus AP 2.2 in der Praxis BGA - Bewertung von Gasertrag und Betriebsverhalten	AGC, Rück, IKTS																								
4.3	Einsatz von Stroh- und Mischpellets (ohne Zwischennutzung) in der Praxis BGA unter Ansatz der Empfehlungen aus AP 3.2 - Bewertung von Gasertrag und Betriebsverhalten	AGC, ATS, Rück IKTS																								
5	**Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen**	ALLE																								
6	**Veröffentlichungen, Berichte, Projekttreffen**	ALLE									X MS1				X MS2											

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

4.1 Kostenstruktur von Biogasanlagen und Rolle der Einsatzsubstrate

Die Kostenstruktur für eine erzeugte Kilowattstunde am Beispiel einer 1 MW-Biogasanlage (Abbildung 2), zeigt deutlich, dass die Substratgestehungskosten den größten Variabilitätsfaktor darstellen. Selbst für das vergleichsweise hohe Vergütungsniveau des EEG 2012, wie in Abbildung 2 dargestellt, ist die Vergärung von NawaRo-Silagen nur bedingt lukrativ. Das kontinuierlich reduzierte Vergütungsniveau (aktuell 14,88 ct pro kWh (EEG 2017)) kann nur noch mit Reststoffen erwirtschaftet werden.

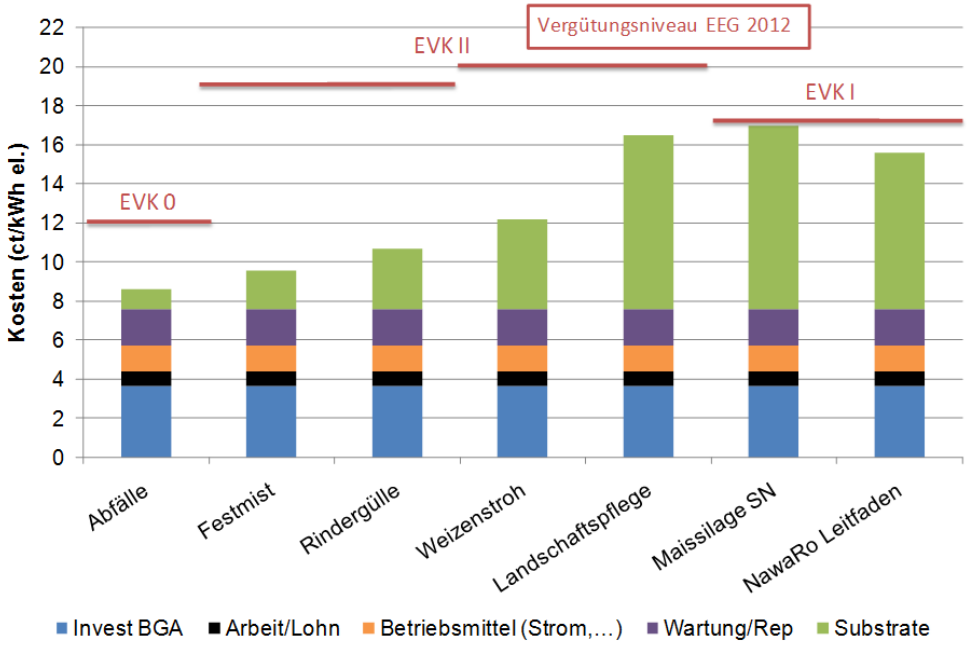


Abbildung 2: Kostenstruktur einer 1-MW-Biogasanlage und Erlöse nach EEG 2012 (EVK…Einsatzstoffvergütungsklasse) (IKTS)

Hier liegt auch das größte Optimierungspotenzial von Biogasanlagen: eine Veränderung des Substratmixes sowie dessen bessere Ausnutzung hinsichtlich der Biogasausbeute. Die größten bisher ungenutzten Potenziale für die energetische Nutzung von Biomasse in Biogasanlagen liegen im Bereich Stroh und Wirtschaftsdünger (Brosowski et al. 2015).

4.2 Einsatzsubstrat Stroh und mögliche Vorbehandlungsmethoden

Das jährliche energetische Potenzial für Getreidestroh wird laut Brosowski et al. (2015) mit 141 PJ eingeschätzt. Dies entspricht in etwa der Energiemenge, welche 2017 durch alle deutschen Photovoltaikanlagen erzeugt wurde. Berechnungen des Antragstellers IKTS gelangen zu einem maximalen Energiepotenzial von 1,4 GW aus Stroh (Friedrich et al. 2013). Auch wenn dieses Potenzial praktisch nicht komplett ausgeschöpft werden kann, so stellt allein die Größenordnung eine sehr interessante Option für Biogasanlagen dar. Insbesondere die niedrigen Gestehungskosten von ca. 40 bis 50 EUR pro t Stroh (Ballenlinie) und der Erhalt

der Humusreproduktionswirkung bei Rückführung der Gärreste spricht für eine verstärkte Nutzung von eigenem Stroh in der eigenen Biogasanlage.

Beim Einsatz von Stroh in Biogasanlagen ist der Betreiber mit einer Reihe von Herausforderungen konfrontiert (Schwarz 2017).

- Hohes Transportvolumen → teurer Transport
- Vergleichsweise geringe Abbaubarkeit (Lignin Schutzschichten)
- Stickstoffmangel
- Starke Neigung zur Schwimmschichtbildung
- Schwieriges Handling (z.B. Staubbildung, schwieriges Dosieren und Fördern)

Zur Überwindung dieser Herausforderungen gibt es nach dem Stand der Technik unterschiedliche Ansätze zur Aufbereitung von Stroh oder zur Veränderung des Reaktorsystems. In Tabelle 2 sind verschiedene Verfahren gegenübergestellt, welche bisher im praktischen Maßstab entweder getestet wurden oder bereits am Markt verfügbar sind.

Tabelle 2: Gestehungs- und Behandlungskosten für verschiedene Verfahren zur Strohvergärung (Schwarz 2017)

	Bergung (ct/kWh$_{el}$)	Vorbe-handlung (ct/kWh$_{el}$)	Summe (ohne Vergärungsstufe) (ct/kWh$_{el}$)	Reichweite (bzgl. bestehender BGA's und Strohpotenziale)
Maisstroh	5*	1,5	**6,5**	15% (begrenzte Mengen)
Halmstroh - Co-Silierung	5	2*	7	30%(?) (Co-Substrate?)
Halmstroh - Spezial-Fermenter	5	1,5 + 1**	7,5	15%(?) (Neubau, Größenklasse)
Halmstroh - Thermischer Aufschluss	5	3	8	15%(?) (Wärmeüberschuss?, Größenklasse?)
Halmstroh - Biogaspellet	5	5	10	100%
Halmstroh - Spreu-Stroh-Ernte	4		**6 - 9**	100%
Silomais	10*		**10**	

* inkl. Silierung
** Aufschlag für Fermenter

Trotz der Vielfalt der möglichen Verfahrensansätze hat sich bisher noch keines am Markt durchgesetzt bzw. zu einem signifikanten Anstieg des Stroheinsatzes in Biogasanlagen geführt. Zum einen ist dies auf die Kosten der Verfahren zurückzuführen (z.B. Thermischer Aufschluss) und zum anderen führen einige Behandlungsverfahren (wie. z.B. die rein mechanische Zerkleinerung (nicht in Tabelle 2)) nur zu teilweisen Verbesserungen, aber auch neuen Handlingsproblemen, wie z.B. Staubemissionen.

Die Herstellung von Strohpellets insbesondere durch den Einsatz als biogener Festbrennstoff und Tierfuttermittel wurde in mehreren Untersuchen durchgeführt (Thomas, M. van der Poel 1996; Pradhan et al. 2018a; Whittaker und Shield 2017; Mostafa et al. 2019). Üblicherweise wird Getreidestroh zuerst mit einem Häcksler grob zerkleinert (15 – 30 mm) und anschließend mit der Hammermühle mit 2 oder 4 mm Siebeinsatz gemahlen. Eine Pelletierung findet üblicherweise mit Wassergehalten zwischen 9 bis 15% mit einer 6 oder 8 mm Matrize statt (Pradhan et al. 2018b). Dabei sind Pressdrücke von 30 – 40 MPa während der Pelletierung im Presskanal erforderlich (Lu et al. 2014). Der spezifische Energieverbrauch während der Pelletierung liegt in diesem Fall bei 0,3 bis 0,35 kWh/kg.

Die auf diese Art hergestellten Pellets haben eine Rohdichte von 1-1,3 g/cm³ bzw. eine Schüttdichte zwischen 500 und 550 kg/m³ (Adapa et al. 2009).

Anders als bei der Pelletierung reicht für die Brikettierung eine Grobzerkleinerung mittels Häcksler auf 15 bis 30 mm Sieblochweite (Tumuluru et al. 2014). Die Verdichtung findet bei ähnlichen Wassergehalten wie die Pelletierung statt (Zhang et al. 2018). Bei der Strangpressbrikettierung wird ein Pressdruck von 25 - 35 MPa auf das Stroh aufgebracht (Tumuluru et al. 2010). Der spezifische Energieeintrag zur Herstellung von Strohbriketts liegt damit bei 0,2 - 0,3 kWh/kg (Guo et al. 2016; Rahaman und Salam 2017). Eine Brikettierung ist in diesem Zusammenhang energieschonender sowohl bei der Vorbehandlung der Einsatzstoffe da das Häckseln ausreichend ist als auch in Bezug auf den Energieverbrauch der Presse selbst.

4.3 Einsatzsubstrate Spelzen und Ausputz in Biogasanlagen

Nach bisherigem Stand der Technik werden Spelzen (oder Spreu) sowie Getreideausputz kaum in Biogasanlagen eingesetzt. Der Antragsteller ATS ist u.a. spezialisiert auf die flexible Veredelung und Verwertung von landwirtschaftlichen, sowie industriellen Reststoffströmen. Dabei werden in letzter Zeit vermehrt Spelzen und Getreideausputz angeboten, welche aufgrund des schwierigen Handlings (Transport und Förderung) kaum anderweitigen Einsatz finden.

Im Biogassektor finden diese Stoffströme aus gleichem Grund bisher wenig Verwendung. Hier kommt noch hinzu, dass diese Stoffe ähnlich wie Stroh zum Aufschwimmen neigen und häufig als Substrate mit geringem Energiegehalt wahrgenommen werden. Letzteres konnte vom Antragsteller IKTS in eigenen Untersuchungen widerlegt werden, da beispielsweise Dinkelspelzen mit 285 Nl Methanertrag pro kg organische Trockensubstanz mehr als 80% der spezifischen Gasrate von Mais erreichen.

Zur Ressource Spelzen bzw. Spreu wurde im Jahr 2016 ein BMBF Innovationsforum „SpreuStroh“ von verschiedenen Akteuren durchgeführt. Der Antragsteller IKTS beteiligte sich aktiv an diesem Forum mit Vorträgen zum Thema der Verwertung von (Spreu)Stroh in Biogasanlagen (Schwarz 2016a, 2016b). Grundlage für die deutliche Erhöhung des generellen Nutzungsgrades von Spreu wäre jedoch die Änderung des bisherigen Ernteverfahrens (Mähdrusch) in eine Kompakternte, welche aktiv von Rumpler (2018) seit vielen Jahren verfolgt wird. Die großen Vorteile hinsichtlich Kosten, Feldhygiene und Verwertungspotenzial konnten bisher nicht breitenwirksam genutzt werden, da Gesamtlogistik (insbesondere Lagerung) und entsprechende Investoren fehlten. Der Ansatz wird dennoch als viel versprechend angesehen. Bei erfolgreicher Umsetzung ergäben sich auch für Biogasanlagen Chancen für die Akquise neuer alternativer Substrate, da mit ca. 10 Mio. t pro Jahr ein sehr großer Stoffstrom bisher keine Verwendung findet.

4.4 Zwischennutzung von Stroh in der Tierhaltung

Die Nutzung von Stroh in der Tierhaltung hat eine sehr lange Tradition und auch wesentliche Vorteile wie die Aufnahme von Feuchtigkeit, die Bildung eines warmen und elastischen Untergrundes als „Matratze“ sowie als Beschäftigungssubstrat (Lehmann et al. 1992b). Entwicklungen zu mehr einstreulosen Systemen (Spaltboden/Gülle) aus Gründen der Einsparung von Arbeitsaufwand verloren in letzter Zeit wieder etwas an Bedeutung. Ermöglicht durch Verbesserungen in der

Mechanisierung der Stroh-Einstreu-Festmist-Kette fand vor allem aus Sicht des Tierwohls eine Rückbesinnung statt (Lehmann et al. 1992a).

Der Stand der Technik bei der Rinderhaltung ist der Einsatz von gehäckseltem Stroh unter Zusatz von Kalk und etwas Wasser. So werden auch die Milchkühe beim Projektpartner AGC versorgt. Jedoch ist, trotz neuer Systeme (Denk 2001), die Einstreuung ein vergleichsweise aufwendiger Prozess mit einer hohen Staubbelastung. Die Nutzung von Pellets zeigt hier große Vorteile. Erste Vortests mit einfachen Strohpellets beim Partner AGC zeigten Verbesserungen hinsichtlich Arbeitsaufwandes und Tierkomfort. Eine gezielte Modifizierung von Einstreupellets durch neue Mischungen und NaOH-Zusatz für die Kostenreduktion und die Verbesserung der Biogasausbeute im Anschluss an die Verwendung im Stall ist bisher nicht bekannt.

4.5 Zusammenfassung und Neuheitsgrad

In Tabelle 3 ist der Stand von Wissenschaft und Technik den Neuheiten des skizzierten Projektansatzes gegenübergestellt.

Tabelle 3: Stand der Technik und Neuheit der Projektidee

Problembeschreibung	Stand Technik/Wissenschaft	Neuheit und Vorteil KoSaTZ
• Substratbereitstellung für Biogasanlagen ○ i.d.R. teuer ○ Transformation von NaWaRo zu Reststoffen ○ Stroh als Alternative ist regional teuer und schwer zu händeln (Logistik, Abbau, Aufschwimmen → Vorbehandlung) ○ Reststoffe aus der Getreideverarbeitung werden aufgrund des schlechten Händlings bisher kaum genutzt	• Stroh stellt bzgl. Menge und Gaspotenzial eine gute Alternative für BGA's dar • Verfahren der Co-Silierung sind günstig, aber kaum praktisch eingesetzt (Aufwendige Homogenisierung und Silierverluste) • Strohpelletierung (mit NaOH) ist praktisch sehr effektiv (Nachweis im Projekt STEP), aber aufgrund der Strohkosten häufig zu teuer • Kein Vorbehandlungsverfahren für Getreideausputz in Biogasanlagen (Projektpartner ATS hat testweise Mischungen mit Stroh pelletiert → Wirtschaftlichkeit möglich)	• Gezielte Mischung von Stroh mit Reststoffen aus Getreideverarbeitung ○ Kostenminimierung • Anpassung von praktisch entwickeltem Aufschlussverfahren für neue Mischungen ○ Erschließung von neuen Reststoffen (besseres Händling, höhere Gasausbeute) ○ Vergrößerung des wirtschaftlich nutzbaren Strohpotenzials im Mischpellet • Test der Brikettierung von Stroh- und Mischpellets als kostengünstige Alternative zur Pelletierung
• Im landwirtschaftlichen Kontext wird Stroh häufig als Einstreu verwendet • Qualität und Kosten des Einstreus wirken sich auch auf das betriebswirtschaftliche Gesamtergebnis aus	• Eingestreut wird gehäckseltes Stroh (Staub, lange Fasern, mittlere Saugfähigkeit) • Zugabe von Kalk für die Hygienisierung im Einstreu (Kalkablagerungen stören) • Festmist wird mittels mechanischer Zerkleinerung (z.B. Querstromzerspaner) vor der BGA behandelt (Aufwand	• Einsatz von Pellets (Stroh und Mischungen) im Stall und nachfolgend in der BGA ○ Weniger Staub im Stall und höhere Saugkraft ○ Hygienisierung durch NaOH statt Kalk (+ Aufschluss) ○ Mehr Tierwohl • Entstehende Mischung aus Pellets und Gülle bzw. Festmist ist

• Der Einsatz von Festmist in Biogasanlagen ist ähnlich anspruchsvoll, wie beim Stroh (lange Fasern stören den Betrieb)	und trotzdem erhöhter Rühraufwand und begrenzter Abbaugrad)	wesentlich einfacher in Biogasanlagen einzusetzen (sehr kleine Partikel + Flüssigkeit) • Kosteneinsparung durch Zweifachnutzung
• Die Zugabe und Einmischung von quellfähigen Substraten in Biogasfermenter ist mit einem erhöhten technischen Risiko verbunden • Im Falle von ungünstigen Bedingungen droht das Blockieren von Leitungen sowie die Bildung von Feststoffansammlungen im Fermenter mit der Folge von Technischen Schäden	• Praxistest mit Einsatz von 200 t NaOH-Stroh-Pellets in einen Hochleistungsreaktor (Fa. Rückert) hat neben dem Nachweis der sehr guten Gasausbeute auch zu einer Beschädigung der sehr robusten Rührwerke geführt, da das Quellverhalten unterschätzt wurde (STEP) • Allgemeine Vorschriften für Strohpellets in Rundfermentern existieren nicht	• Quell-, Absink- und Mischverhalten werden auf Basis des Projektes für verschiedene Substratmischungen und Vorbehandlungsmaßnahmen vorhersagbar • Anleitung für praktische Dosierung, Flüssigkeitszugabe und Rührintensität wird erstellt → Mehr Sicherheit bei der praktischen Anwendung

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit mit Dritten erfolgte vor allem im Rahmen von Unteraufträgen an Speditionen oder Analytiklabore für Dienstleistungen, welche nicht von den Partnern erbracht werden können.

Vernetzungs- und Kooperationsmöglichkeiten bieten sich vor allem durch die aktive Teilnahme an Fachtagungen, Messen und durch die Publizierung von Ergebnissen. Eine Mitarbeit in der Arbeitsgruppe Strommarkt durch das IKTS findet bereits statt. Der Projektpartner DBFZ ist in zahlreichen Arbeitsgruppen und Gremien vertreten.

6 Ergebnisse

6.1 Neue Substratmischungen und angepasste Aufbereitung

6.1.1 Charakterisierung von Stroh sowie alternativen Reststoffströmen aus der Getreideverarbeitung

Es ist ein erklärtes Ziel der Bundesregierung den Einsatz der Reststoffe in Deutschland stärker zu fördern, um damit erneuerbare Energie zu erzeugen. Dies spiegelt sich ebenfalls in den letzten Gesetzen wider. So wurde beispielsweise der „Maisdeckel" eingeführt, während Reststoffströme unbegrenzt eingesetzt werden dürfen. Außerdem wird der Einsatz von Reststoffen verstärkt vergütet. Dies führt insgesamt dazu, dass ein größerer Markt für den Absatz von Reststoffen entsteht. Zu diesen noch ungenutzten Reststoffen gehören Gülle, Mist, Stroh sowie Reststoffe aus der Getreideverarbeitung, welche vorranging lokal bzw. regional – je nach Verarbeitungsort – anfallen und für eine weitere Nutzung bereitstehen.

Bei Dinkel fällt beispielsweise ein Viertel des Korngewichts als Spelz an. Für diesen Stoffstrom kann als theoretisches Mengenpotenzial Folgendes angenommen werden: In Deutschland wird Dinkel auf einer Fläche zwischen 50.000 und 70.000 ha angebaut, was mit 75 dt/ha ca. 450.000 t Körnern bzw. 150.000 t (TS = 89% oTS = 94,5%) Dinkelspelzen entspricht. Bei 285 Nm³ Methan / t oTS entspricht dies 36 Mio m³ Biomethan, also 385.000 MWh im Kraftstoffsektor (Brennwert 10,7 kWh / m³). Mit einem Energieverbrauch eines Gasautos von 60 kWh / 100 km könnten damit theoretisch 642 Mio. km gefahren werden.

Zunächst wurde mit sämtlichen Projektpartnern eine Vielzahl von Substraten aus dem Bereich Landhandel und der Landwirtschaft nachgeschalteter Produktionsbetriebe betrachtet, bewertet und auf diverse Parameter analysiert. Die ATS unterhält Kontakte in eine Vielzahl von Produktionsbetrieben, welche landwirtschaftliche Produkte verarbeiten. Darin beinhaltet sind Landhandelsbetriebe, welche Getreide in großen Mengen aufnehmen und für den Weiterverkauf aufreinigen, windsichten u.ä.. Ferner sind dabei Betriebe aus dem Bereich Biofuels (Biodiesel- & Bioethanolproduktion), Mühlenbetriebe, Schälbetriebe, Mälzereibetriebe und vieles mehr. In einer ersten Abstimmung der Projektpartner wurden folgende Substratströme ausgewählt:

- ÖM … Getreiderest Ölmühle+Mälzerei (ATS)
- LH … Getreiderest Landhandel (ATS)
- DS … Getreiderest Dinkelschälbetrieb (ATS)
- PfS … Getreiderest biolog. Pflanzenschutz (ATS)
- BE … Getreiderest Bioethanol (ATS)
- MB … Getreiderest Mühlenbetrieb (ATS)
- HS … Haferschalen (Agrargenossenschaft Clausnitz)
- Su … Stroh unbehandelt (ATS)

Abbildung 3: Reststoffe von oben links nach unten rechts: ÖM, LH, DS, PfS, BE, HS, MB

Die Analyse der Ausgangsstoffe ergab folgende Parameter.

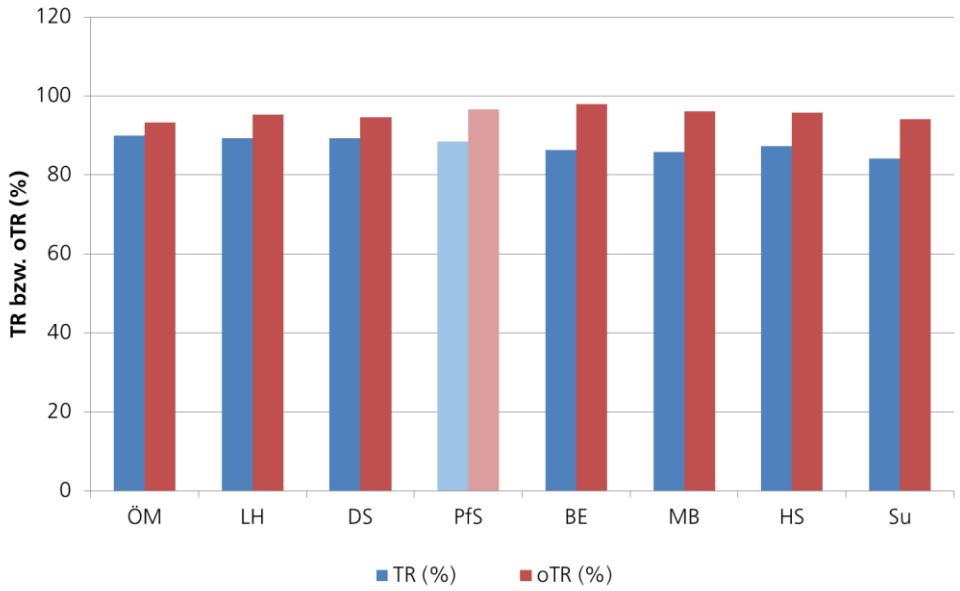


Abbildung 4: TR, oTR-Gehalte der Reststoffe

Die ausgewählten Substrate weisen alle einen hohen Feststoffgehalt von mind. 84% auf → gute Voraussetzung für Wasseraufnahme. Die Substratcharge aus der Anzucht von biologischen Pflanzenschutzmitteln (PfS) wurde bereits in der ersten Auswahlrunde aussortiert, da hygienische Vorbehalte bezüglich einer Eignung als Einstreu bestanden. Es handelte sich dabei um leere Körner, welche zu Aufzucht von Nutzinsekten genutzt wurden.

Für den Einsatz als Einstreumaterial interessierte auch das maximale Wasseraufnahmevermögen der verschiedenen Ausgangssubstrate. Zunächst wurde ein Messverfahren für diese Bewertung konzipiert und getestet. Dabei wurden die Substrate eine längere Zeit mit Wasser in Kontakt gebracht und anschließend das Haftwasser durch Abtropfen entfernt.

Versuche mit Substrat + Wasservollfüllung (=> Substrat steht komplett unter Wasser) wurden mit Versuchen der Teilfüllung (=> Substrat steht zum Teil im Wasser (+regelmäßiges Schütteln des Ansatzes)) verglichen.

Die Vergleichswerte für unbehandeltes Stroh zeigen gute Übereinstimmung der Varianten „Teilfüllung“ und „Vollfüllung“ und der Literatur (LEHMANN et al 1992a) sowie eine gute Sättigung der Proben für Verweilzeiten ab 48 h (Abbildung 5).

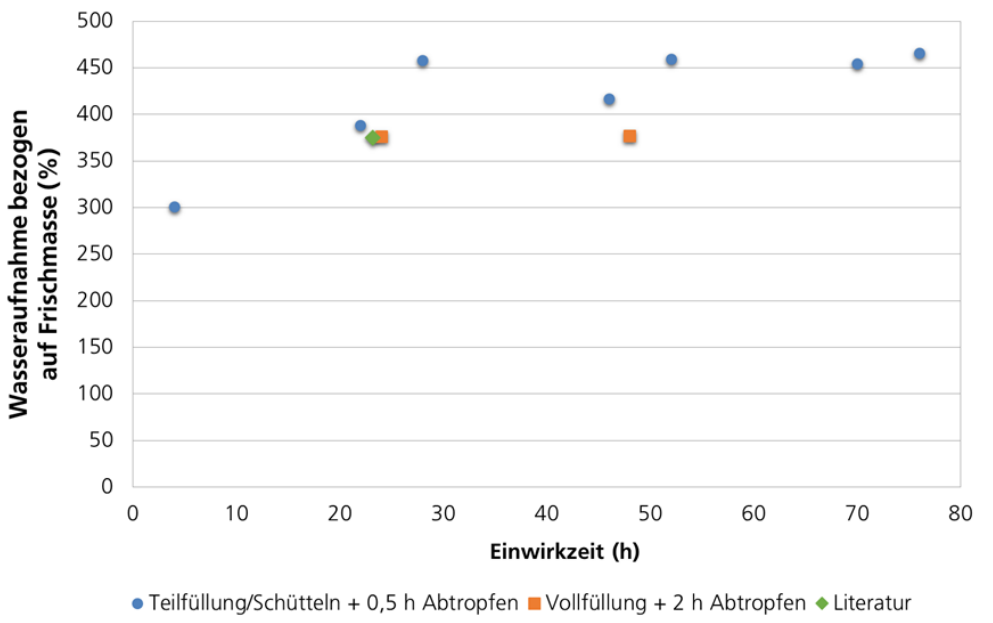


Abbildung 5: Erreichte Wasseraufnahme für verschiedene Einweichzeiten

In einer zweiten Versuchsreihe wurde der Einfluss der Abtropfzeit des freien Haftwassers durch ein 1 mm – Sieb auf den Messwert der Wasseraufnahme untersucht (Abbildung 6).

Innerhalb der ersten 60 min erhöht sich der gemessene Feststoffgehalt aufgrund des kontinuierlichen Abtropfens von oberflächlich anhaftendem Wasser leicht. Zwischen 60 min und 120 min Abtropfdauer zeigt sich eine relative Konstanz des gemessenen Feststoffgehaltes. Bei längeren Zeiten als 2 h für das Abtropfen der Probe auf einem 1 mm Sieb zeigt sich insbesondere für gröbere Proben (hier unbehandeltes Stroh) eine Zunahme des Feststoffgehaltes, was wahrscheinlich auf die Verdunstung von Wasser zurückzuführen ist.

FAZIT: Für die Bestimmung der maximalen Wasseraufnahme von potenziellen Einstreusubstraten wurden folgende Parameter festgelegt:

- Einweichen mittels „Vollfüllung“ (Probe komplett mit Wasser bedeckt)
- Einweichzeiten: 24 und 48 Stunden
- Abtropfzeit nach Einweichen: 90 min auf 1 mm Sieb
- Bestimmung des TR-Gehaltes

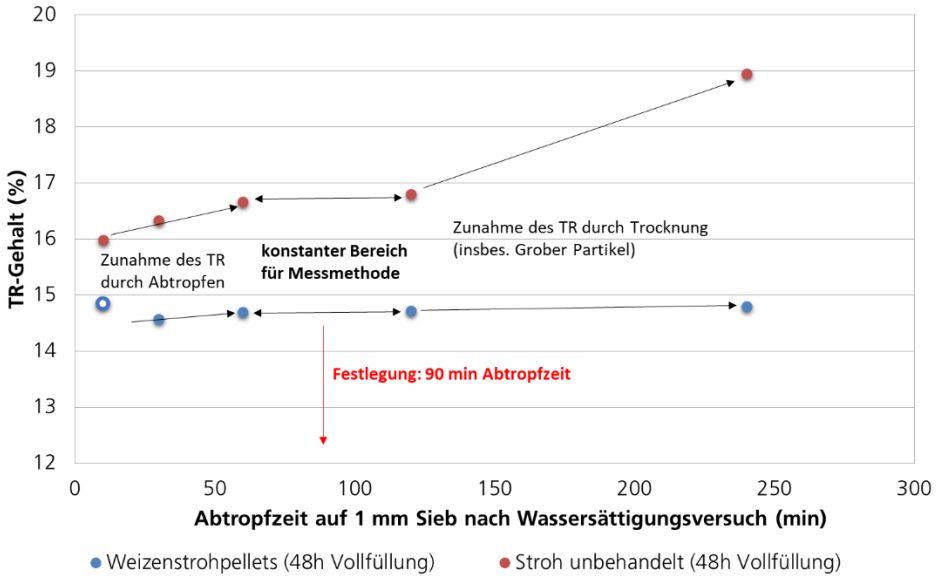


Abbildung 6: zeitliche Entwicklung des gemessenen Feststoffgehaltes beim Abtropfen der Probe

Das Wasseraufnahmevermögen im originalen Zustand der potenziellen Substrate ist sehr unterschiedlich. Insbesondere Substrate mit hohem Spelzenanteil (MB, DS, HS), aber auch das Restprodukt aus der Bioethanolherstellung (BE) weisen eher geringe Kapazitäten zur Wasseraufnahme auf. Das Produkt aus dem **Landhandel (LH)** zeigt eine verzögerte Wasseraufnahme, liegt aber nach 48 h in einem interessanten Bereich für die Wasseraufnahme, ähnlich wie **Stroh** und **Ölmühle (ÖM)** (Abbildung 7).

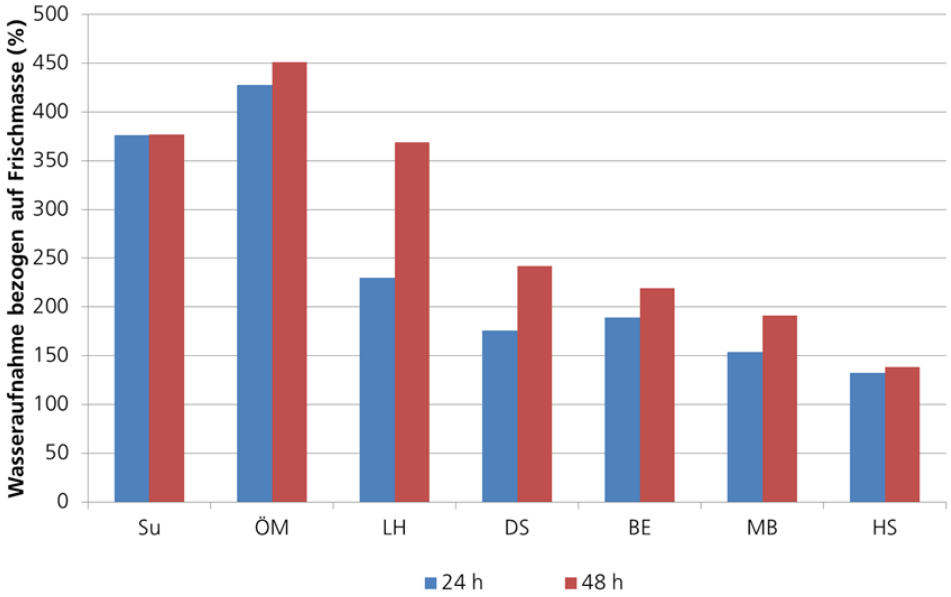


Abbildung 7: Maximales Wasseraufnahmevermögen der verschiedenen Reststoffe

Für die Einschätzung, welche der potenziellen Substrate eine erhöhte Gasausbeute versprechen, wurde eine Futtermittelanalytik durchgeführt. Hohe Gehalte

an Rohprotein und Rohfett sowie möglichst niedrige Gehalte an Rohfasern sowie Lignin gelten potenziell als gut anaerob abbaubar. Wie in der folgenden Abbildung zu sehen, scheinen insbesondere die Substrate **BE, LH, MB und ÖM interessant**. Hohe Gehalte an Rohfasern und Lignin (ADL) sprechen potenziell gegen eine energetische Nutzung von Spelzen aus Dinkel (DS) und Hafer (HS). Jedoch zeigt auch Stroh ähnliche Eigenschaften, wie die zuletzt genannten Spelzen. Aus den Erfahrungen der Projektpartner ist aber bekannt, dass Stroh trotzdem vergleichsweise gute Gasausbeuten ermöglicht, weshalb an dieser Stelle noch kein abschließendes Urteil gefällt werden sollte.

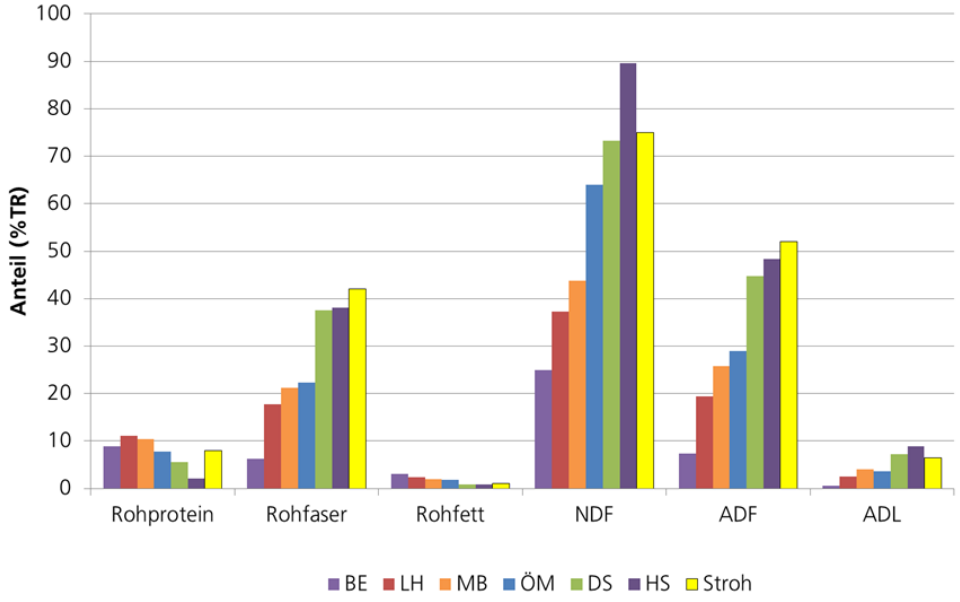


Abbildung 8: Anteile verschiedener Biopolymere in den Reststoffen

Die einzelnen Substrate wurden auch hinsichtlich der potenziellen Biogaserträge in Batchtest nach VDI-Richtlinie 4630 bewertet (Abbildung 9).

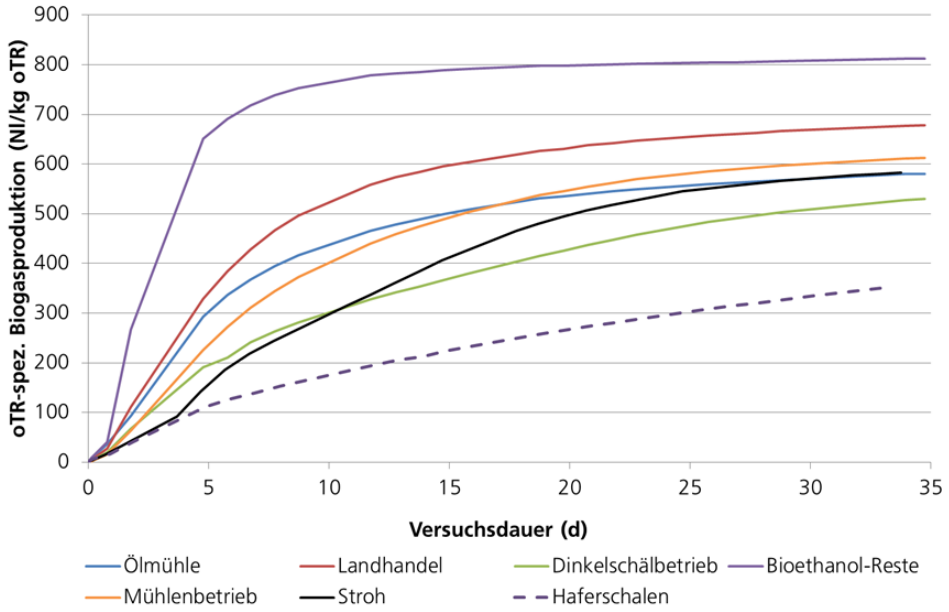


Abbildung 9: Summarische Biogasproduktion im Batchversuche

Wie zu erkennen, weisen die Bioethanolreste einen sehr hohen Gasertrag auf, was auf die geringen Anteile an Fasern zurückzuführen ist. Dies lässt auf einen

größeren Anteil leicht verfügbarer organischer Anteile schließen, welche schnell in Biogas umsetzbar sind. Allerdings muss auch davon ausgegangen werden, dass diese leicht abbaubaren Anteile zu unkontrollierten biologischen Reaktionen im Stall führen können (Schimmel, Bakterien), wenn das Material als Einstreu genutzt wird. Aus dieser Tatsache heraus und aufgrund des vergleichsweise niedrigen Wasseraufnahmevermögens wurde Bioethanolrest (BE) für die weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt. Des Weiteren wurden die Substrate des Mühlenbetriebes (MB) und die Dinkelspelzen (DS) aussortiert aufgrund des relativ geringen Gasertrages und des geringen Wasseraufnahmevermögens.

Für weitergehende Untersuchungen zu Pelletierung und Einstreu wurden zunächst folgende Substratströme ausgewählt:

- Stroh (Su) = Referenzsubstrat
- Getreiderest Ölmühle+Mälzerei (ÖM) = hohe Wasseraufnahme, hohes Gaspotenzial
- Getreiderest Landhandel (LH) = hohe Wasseraufnahme, hohes Gaspotenzial
- Haferschalen (HS) = (eigentlich „schlechtestes" Substrat bzgl. Wasseraufnahme und Gasertrag) → aber günstiger Substratstrom im Betrieb des Projektpartners Clausnitz → hier sollte das Verbesserungspotenzial durch Aufschluss und Pelletierung bewertet werden

6.1.2 Pelletierung im kleintechnischen Maßstab

Während der Herstellung der Kleinchargen bestand stets ein enger Austausch des DBFZ mit der Fa. ATS, um mögliche Prozessparameter, wie geeignete Matrizengeometrie oder Zerkleinerungsgrad des Rohstoffes, für die Verarbeitung von Stroh, Getreideresten und Hafer-/Dinkelschalen zu Pellets zu definieren und zwischen klein- und großtechnischer Produktion abzustimmen. Die am DBFZ erzeugten Kleinchargen dienten dem IKTS für analytischen Voruntersuchung, um eine Auswahl geeigneter Materialen für die Großchargenpelletierung zu treffen.

<u>Pelletherstellung am DBFZ</u>

Zunächst wurden von den vier bereitgestellten Materialien Probesiebungen durchgeführt. Dabei zeigte, dass eine klare Trennung von Stroh und Spelzen bei den Getreideresten und damit die Bestimmung der Mengenanteile nicht möglich ist. Exemplarisch sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 verschiedene Siebfraktionen dargestellt. Abbildung 12 zeigt die resultierenden Partikelgrößenverteilungen der nach ISO 17827-2 (ISO 2016) durchgeführten Siebanalyse. Demnach ist ersichtlich, dass die Ausgangsmaterialien Getreidereste aus dem Landhandel bzw. aus dem Bereich Ölmühle & Mälzerei und auch die Haferschalen ähnliche Verteilungen und im Wesentlichen eine maximale Partikelgröße von 5 mm aufweisen. Die Zerkleinerung der reinen Haferschalen mittels Hammermühle und einem Siebeinsatz von 6 mm zeigt zum einen eine engere Verteilung (steilerer Kurvenverlauf in Abbildung 12) und zum anderen eine Reduzierung der Partikelgröße (von etwa 13 Ma.-% vor auf 0,6 Ma.-% nach Zerkleinerung bei $x > 5{,}0$ mm). Das Stroh, welches ebenso mithilfe der Hammermühle und dem 6 mm-Siebeinsatz zerkleinert wurde, weist mit 5 Ma.-% unterhalb von 10 mm

geringe Werte auf (nicht in Abbildung 12 dargestellt). Im Gegensatz zu Schalen-/Spelzenreste sind Strohfasern eher weich und flexible. Die Prallbeanspruchung während der Zerkleinerung in der Hammermühle zeigt hierbei geringere Effekte. Um höhere Zerkleinerungsgrade zu erzielen kann entweder eine kleinere Sieblochweite des Austragssiebes oder eine andere Zerkleinerungstechnik mit erhöhter Schneid- anstatt Prallwirkung (z. B. Schneidmühle) gewählt werden.

Aufgabe, 8 mm Sieb | 3,15 mm Sieb | 1,0 mm Sieb | 0,5 mm Sieb

Abbildung 10: Ausgewählte Siebfraktionen der Getreidereste aus dem Landhandel (©DBFZ:2021)

Aufgabe, 8 mm Sieb | 3,15 mm Sieb | 1,0 mm Sieb | 0,5 mm Sieb

Abbildung 11: Ausgewählte Siebfraktionen der Getreidereste aus dem Bereich Ölmühle & Mälzerei (©DBFZ:2021)

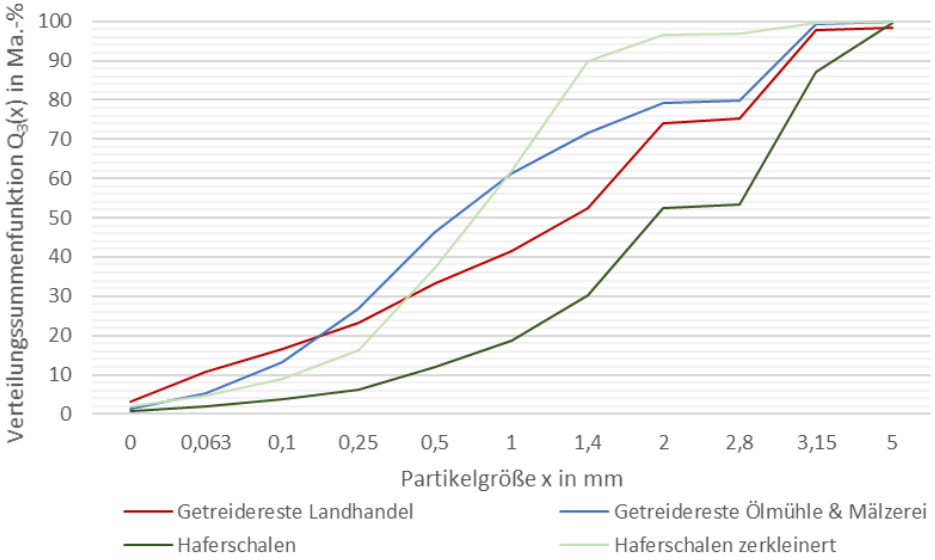


Abbildung 12: Partikelgrößenverteilung der Testmaterialien gemäß Siebanalyse nach ISO 17827-2 (ISO 2016)

Die Durchführung der Pelletierversuche folgte grundsätzlich immer dem in Abbildung 13 dargestellten Prozessablauf, beginnend mit der Zerkleinerung des Ausgangsmaterials, der Konditionierung (Mischen und Einstellen des Wassergehalts), dem Verdichten mithilfe einer Ringmatrizenpresse und dem abschließenden Kühlen der Pellets. Bei einem Teil der Charge entfiel der Prozessschritt der Zerkleinerung. Während der Konditionierung wurde einem Teil der Chargen

NaOH als Zuschlagsstoff hinzugegeben. Die relevanten prozesstechnischen Einstellungen sind Wassergehalt des Materials, Presskanallänge der Matrize, Abstand zwischen Koller und Matrize (KMA) und Drehzahl der Matrize bzw. Zuförderschnecke. Zielwerte der Pelletierung sind möglichst hohe Abriebfestigkeiten und Schüttdichten, um ausreichende Transportstabilität zu gewährleisten. Die Bestimmung für die Abriebfestigkeit erfolgt nach DIN EN ISO 1783 (DIN 2015a) und die Ermittlung der Schüttdichte nach DIN EN ISO 17828 (DIN 2015b). Der Wassergehalt der Pellets wurde nach der Ofenmethode DIN EN ISO 18134-1 (DIN 2015c) bestimmt. Für die Bestimmung des Ausgangswassergehaltes fand die vereinfachte Methode mittels Schnellfeuchtebestimmer (Dreifachbestimmung je Material/Versuchscharge) nach DIN EN ISO 18134-2 (DIN 2017) Anwendung.

Zielgrößen wie hohe Saugkraft bei gleichzeitiger mechanischer Stabilität in den Ställen (zwecks Entnahme aus den Ställen und Transport in die Biogasanlage) und anschließende leichte und vollständige Auflösung in der Biogasanlage untersucht und diskutiert das IKTS.

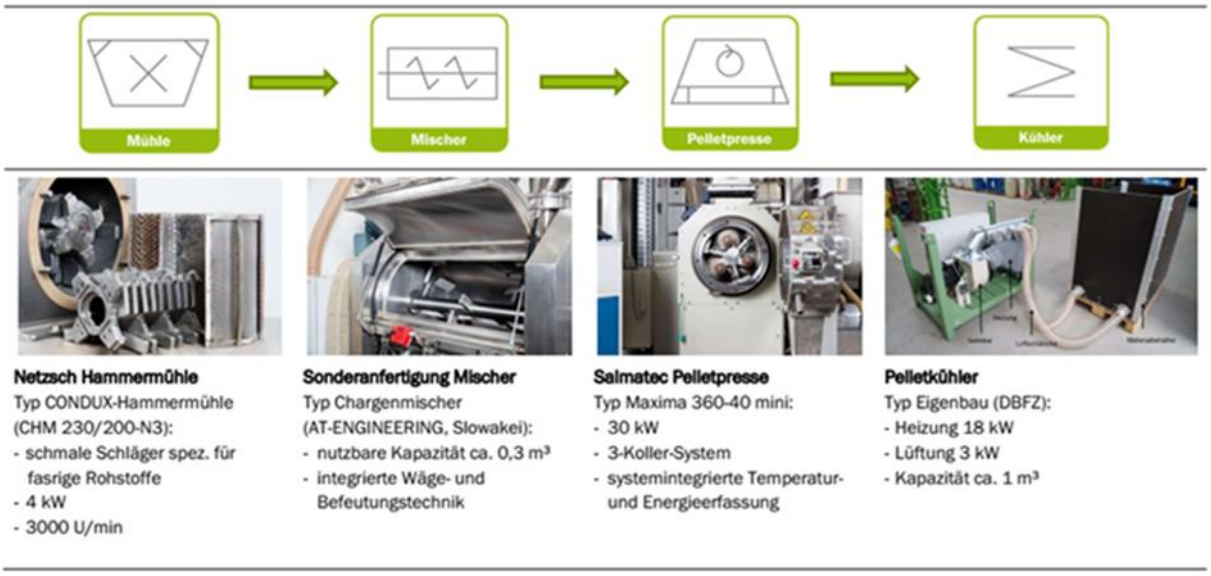


Abbildung 13: Pelletherstellungsprozess am DBFZ (©DBFZ: 2018)

Tabelle 4 zeigt die Variation der Rohstoff- und Prozessparameter für die Herstellung von Pellets am DBFZ, wobei die folgenden prozesstechnischen Einstellungen konstant gehalten wurden:

- Zuförderung in den Pressenraum: Einstellung bei 15-20 %,
- Drehzahl der Matrize: Einstellung bei 100 %,
- Abstand zwischen Koller und Matrize: 0,1 mm,
- Menge an Ausgangsmaterial: je Charge ca. 30 kg.

Die angegebenen Wassergehalte (Tabelle 4) beziehen sich auf den Ausgangswassergehalt des Rohmaterials, welcher zur Pelletierung genutzt wird. Mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 31,5 Ma.-% wurden die halmgutartigen Ausgangsstoffe mit verhältnismäßig hohen Wassergehalten (Holz z.B. 8 – 15 Ma.-%, Stroh: 20 – 25 Ma.-%) der Pelletierung zugeführt. Die Ursache hierfür lässt sich in den hohen Längen-/Durchmesserverhältnissen der Matrizen finden, welche mit 8,125 (8 x 65 mm Matrize) bzw. 8 (10 x 80 mm Matrize) eingestellt wurden.

Für die verwendeten Ausgangsmaterialien sollten bei der genutzten Technik Matrizen mit Bohrungen mit geringeren Längen-/Durchmesserverhältnissen in Verbindung mit geringeren Wassergehalten genutzt werden. Für die Pelletierung von Stroh konnten mit gleicher Versuchstechnik und einem Pressverhältnis von 6,5 (Matrize: 6 x 40, Wassergehalt 24 Ma.-%) sehr gute Ergebnisse (99 Ma.-% Abriebfestigkeit, Schüttdichten von nahezu 700 kg/m³, produktionsbedingte Feinanteil unter 3 Ma.-%) ermittelt werden (DBFZ 2019). Demnach wurde der Fa. ATS für seine Pelletierungsversuche ein Pressverhältnis von 6 bis maximal 7 empfohlen.

Tabelle 4: Rohstoff- und Prozessparameter für die Kleinpelletierungen am DBFZ

Substrat	Zerkleinerungs-grad (Siebeinsatz HM)	Ausgangswassergehalt in Ma.-%	Matrizen-geometrie (DxL)	NaOH (25 %ig) Zugabe in Ma.-%	Kurzbezeichnung
Haferschalen	unzerkleinert	25,3	8 x 65 mm	-	HS, 8 mm, o. NaOH
Haferschalen	unzerkleinert	28,5	8 x 65 mm	2,5 %	HS, 8 mm, m. NaOH
Haferschalen	unzerkleinert	35,3	10 x 80 mm	-	HS, 10 mm, o. NaOH
Haferschalen	unzerkleinert	34,9	10 x 80 mm	2,5 %	HS, 10 mm, m. NaOH
Haferschalen	zerkl. (HM 6 mm)	36,6	8 x 65 mm	-	HS 8, mm, o. NaOH, zerkl.
Haferschalen	zerkl. (HM 6 mm)	35,3	8 x 65 mm	2,5 %	HS, 8 mm, m. NaOH, zerkl.
Getreidereste aus der Ölmühle/Mälzerei	unzerkleinert	30,9	8 x 65 mm	2,5 %	GR Öl, 8 mm, m. NaOH
Getreidereste aus der Ölmühle/Mälzerei	unzerkleinert	30,2	8 x 65 mm	-	GR Öl, 8 mm, o. NaOH
Getreidereste aus der Ölmühle/Mälzerei	unzerkleinert	29,7	10 x 80 mm	2,5 %	GR Öl, 10 mm, m. NaOH
Getreidereste aus der Ölmühle/Mälzerei	unzerkleinert	28,5	10 x 80 mm	-	GR Öl, 10 mm, o. NaOH
Getreidereste aus dem Landhandel	unzerkleinert	28,1	8 x 65 mm	-	GR LH, 8 mm, o. NaOH
Getreidereste aus dem Landhandel	unzerkleinert	29,0	8 x 65 mm	2,5 %	GR LH, 8 mm, m. NaOH
Getreidereste aus dem Landhandel	unzerkleinert	28,7	10 x 80 mm	-	GR LH, 10 mm, o. NaOH
Getreidereste aus dem Landhandel	unzerkleinert	27,5	10 x 80 mm	2,5 %	GR LH, 10 mm, m. NaOH
Haferschalen/Stroh	zerkl. (HM 6 mm)	34,5	8 x 65 mm	-	HS/Stroh, 8 mm, o. NaOH, zerkl.
Haferschalen/Stroh	zerkl. (HM 6 mm)	34,4	8 x 65 mm	2,5 %	HS/Stroh, 8 mm, m. NaOH, zerkl.

HM – Hammermühle; DxL – Durchmesser x Länge des Presskanals; HS – Haferschalen; GR Öl – Getreidereste aus der Ölmühle/Mälzerei; GR LH – Getreidereste aus dem Landhandel

Pelletierung bei ATS

Die Pelletieranlage der Firma ATS kann sehr variabel mit Rohstoffen beschickt werden. Es ist sowohl möglich halmgutartige Schüttgüter über eine Hammermühlenlinie als Nachzerkleinerung einzusetzen, aber auch feinteilige Schüttgüter über einen separaten Befülltrichter mit frequenzgesteuerter Förderschnecke direkt auf den Mischkonditionierer vor der Pelletpresse zu fördern. Als dritte Möglichkeit kann man über eine spezielle Bigbagaufnahme mit pneumatischer Auflockerungstechnik und Schneckenfördertechnik staubförmige Stoffe in die Pelletieranlage einfahren.

Der Mischkonditionierer, der eigentlichen Pelletpresse vorgeschaltet, ist mit einer Flüssigkeitsdosierung ausgestattet, so dass z.B. Natronlauge zu dem eigentlichen Eingangssubstrat zudosiert und mit diesem vermischt werden kann. Dadurch können eine Vielzahl an unterschiedlichen Biomassen in dem Werk zu Pellets verarbeitet werden. Nach dem Pelletiervorgang fallen die fertigen Pellets auf einen Bandkühler im Kellergeschoss des Pelletwerkes. Hier wird sowohl der bei der

Pelletierung anfallende Aspirationsdampf durch den Kühlluftventilator abgezogen als auch der fertige Pellet durch diesen abgekühlt, um die Pellethärte und Lagerfähigkeit zu erhöhen. Am Ende des Bandkühlers fällt der Pellet nochmals über ein Rüttelsieb, wo der Bruch- und Staubanteil aus dem Pellet entfernt wird. Danach wird der entstaubte und abgekühlte Pellet über Förderanlagen entweder in eine Silozelle oder in eine Schüttgutlagerhalle gefördert. Für die Versuche wurde der Pellet in die Schüttgutlagerhalle gefördert, um stets ein aktuelles optisches Ergebnis der Produktion zu erhalten. Das Prozessschema der Versuchsanlage ist in Abbildung 14 dargestellt.

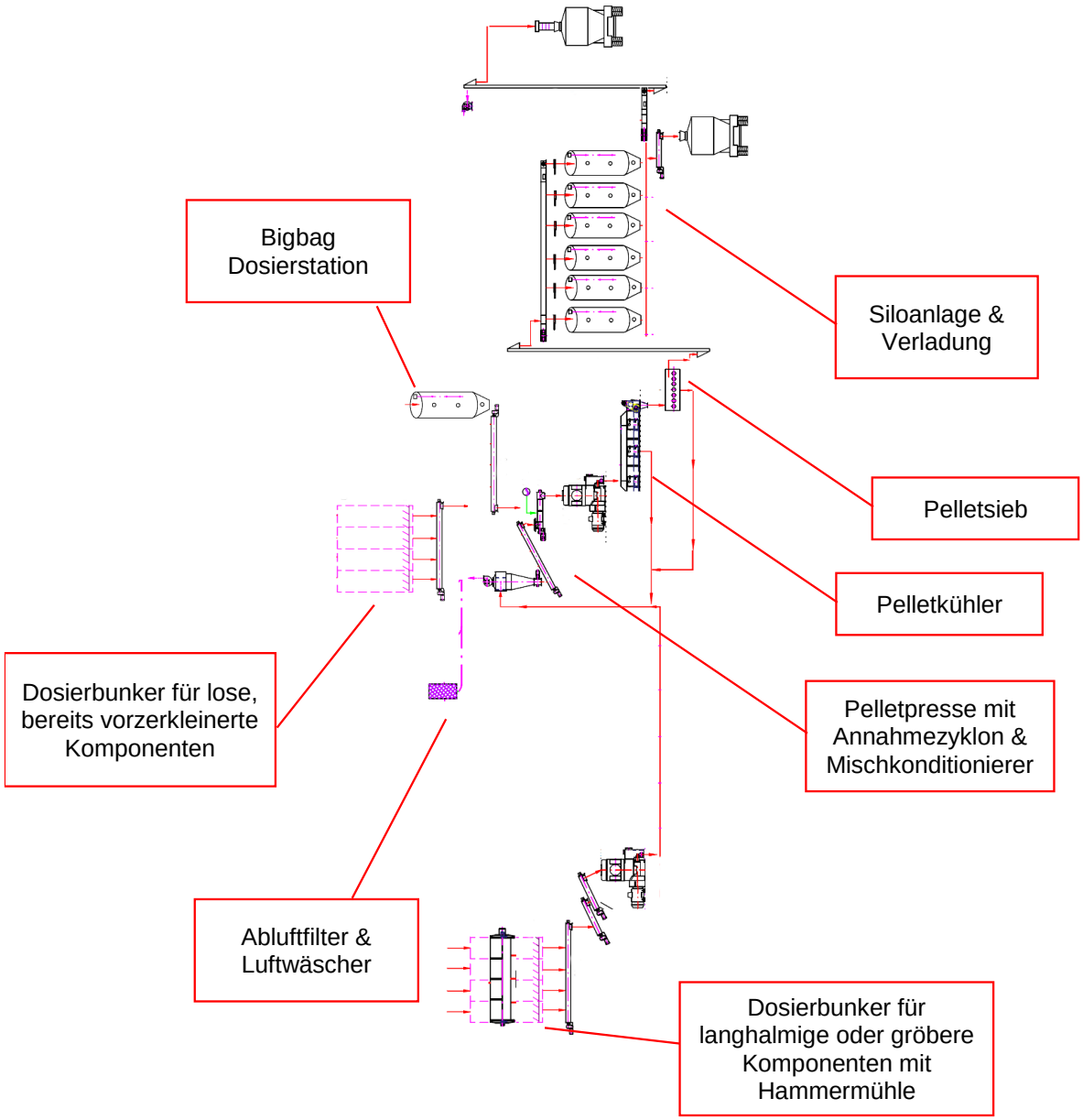


Abbildung 14: Übersicht über die Anlagenkomponenten der Pelletieranlage

Die Anlage wurde an diversen Stellen für den Einsatz im Projekt modifiziert. Es wurden Lagerbehälter und Pumpentechnik für Säuren und Laugen angeschafft. Ferner ist die Homogenisierung vor dem Pelletierprozess ein wichtiger Erfolgsfaktor für ein positives Pelletierergebnis. Zusätzlich wurden Stromzähler installiert,

um die exakten Energieverbräuche der einzelnen Aggregate während der Versuchsreihen, unabhängig von der Stromaufnahme von Pelletpresse und Hammermühle, auswerten zu können (Abbildung 15).

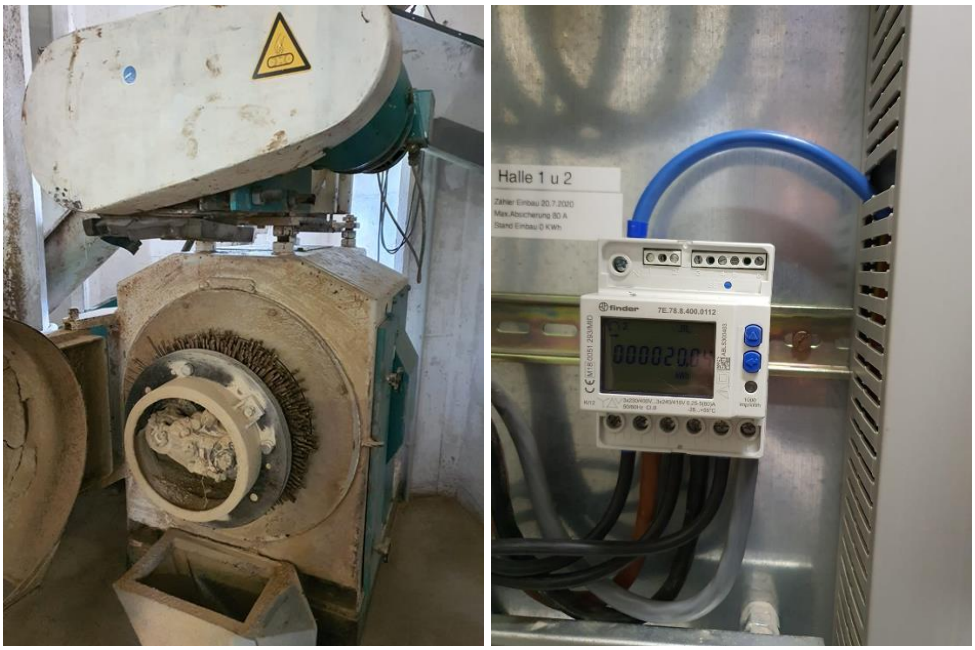


Abbildung 15: Bühler DPCA 7850 Pelletpresse mit darüberliegenden Mischkonditionierer und Stromzähler

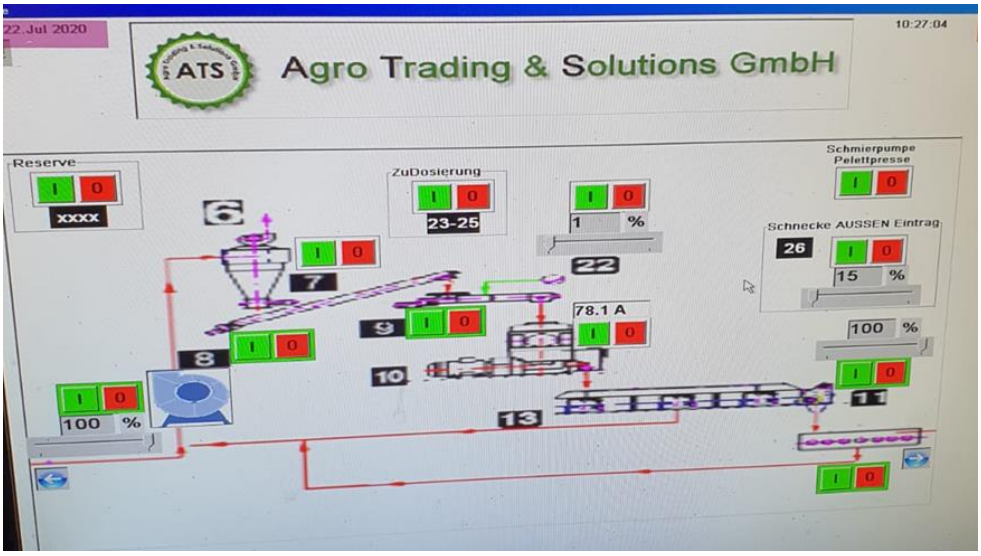


Abbildung 16: Anlagenvisualisierung, Pelletpresse mit 78,1 A Stromaufnahme im Pelletierbetrieb

Ein wichtiger und nicht ganz trivialer Aspekt war das Einfahren der Mischungen, um den richtigen NaOH-Gehalt im fertigen Pellet zu erzielen. Hierbei musste stets die Dosierpumpe für die Natronlauge auf den jeweiligen Anlagendurchsatz eingestellt werden. Dabei musste der Feuchtegehalt des zu verpelletierenden Gemischs stets so gehalten werden, dass dieser einen, in Bezug auf das Kompaktieren, akzeptablen Pellet auf der einen Seite, aber auch einen entsprechenden Natronlaugenaufschluss der Rohstoffe auf der anderen Seite gewährleisten konnte. Daher mussten stets die Pellets im Nachgang zu dem jeweiligen Pelletierversuch im betriebseigenen Labor der ATS mittels eines Flammenphotometers auf den Natriumgehalt analysiert werden. Teilweise hat es dann mehrere Tage gedauert, bis eine Unter- bzw. Überdosierung der Natronlauge im fertigen Pellet durch Ändern der Pelletierparameter ausgeglichen werden konnte. Hierbei

konnte der Anlagenfahrer entweder die Dosierpumpe für die Natronlauge im Durchsatz variieren oder die frequenzgesteuerte Dosierschnecke aus dem Aufgabebunker auf Drehzahl und damit Förderleistung steuern.

Die Testläufe wurden stets auf die Parameter Chargenmenge, Natronlaugenverbrauch, Stromeinsatz, sowie Natriumgehalt der Pellets dokumentiert und ausgewertet.

Ferner wurden verschiedene Pressverhältnisse hinsichtlich der Matrizenauslegung getestet. Da die 8mm Pellets mit einer 8 x 52mm Matrize (Pressverhältniss 1:6,5) teilweise nicht hart genug schienen, wurde bei der 6mm Matrize das Pressverhältnis erhöht auf 6 x 72mm & 6 x 60mm (Pressverhältnis 1:12 & 1:10).

Hierbei hat sich durch die Praxisversuche herausgestellt, dass mit der 8 x 52mm Matrize verpressten Pellets durch die Einlagerung und anschließenden Transport nicht formstabil blieben und zu einem stark erhöhten Feinanteil im Produkt am Zielort geführt hat.

Bei den vorläufigen Versuchsreihen konnte bereits festgestellt werden, dass die Nachzerkleinerung mittels Hammermühle einen teilweise signifikanten Einfluss auf das Pressverhalten der Rohstoffe hat. Der hohe Strohanteil verhindert teilweise den Pelletierprozess, da die Pelletpresse zu viel Energie in das Zerkleinern des Strohanteils aufbringen muss. Das zur Erntezeit rapsstrohreiche Produkt aus der Ölmühle/Mälzerei konnte somit nur nach einer Vorzerkleinerung durch die Hammermühle zu einem akzeptablen Pellet verpresst werden.

Das in Abbildung 17 dargestellte Rohmaterial aus der Ölmühle wurde sowohl unzerkleinert als auch mittels Hammermühle zerkleinert der Pelletierung zugeführt. In Abbildung 18 ist das Pelltierergebnis dargestellt. Links ist das Material unzerkleinert unter Zugabe von NaOH verpelletiert worden, welches zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führte. Rechts ist derselbe Rohstoff vor dem Pelletierprozess mittels Hammermühle zerkleinert und anschließend verpelletiert worden und es hat sich ein deutlich besseres Kompaktierungsergebnis eingestellt.

Abbildung 17: Material aus Ölmühle/Mälzerei

Abbildung 18: Material aus Ölmühle/Mälzerei nach Pelletierung (links: ohne, rechts: mit Vorzerkleinerung)

Es wurde zudem eine neue Aufbereitungs- / Separationsschaufel vom Fabrikat ALLU als DS 3-17 TSX für die vorhandenen Betriebsradlader angeschafft (Abbildung 19). Die Schaufel hat eine Siebfläche von 1,4 m² und ein Volumen von ca. 1,5 m³. Damit ist es möglich in kurzer Zeit und ohne viel Mehraufwand das teilweise sehr staubige und auch inhomogene (Fremdstoffbehaftete) Material zu sortieren und zu homogenisieren. Dies ist wichtig, damit zum einen keine größeren Fremdstoffe in die Pelletierung gelangen und dieses im Vorhinein bereits etwas homogenisiert wird.

Abbildung 19: Links: Separationsschaufel im Einsatz, Rechts: Ergebnis der Vorzerkleinerung / Siebung/ Homogenisierung

Zudem wurde nach dem Durchlauf des Materials durch die Separationsschaufel eine Mischanlage aus dem Maschinenbestand der ATS genutzt um die zu verpelletierenden Rohstoffe ausreichend zu homogenisieren (folgende Abbildung). Die Anlage vom Fabrikat Doppstadt / Komptech Mashmaster ist mit vier gegenläufigen Schnecken ausgerüstet und dafür konzipiert Biomassen wie z.B. Kompostfraktionen o.ä. zu zerkleinern und zu mischen. Das Vorschalten dieser Mischanlage war essenziell, um ein homogenes Produktgemisch für die Pelletierstrecke zu erhalten.

Abbildung 20: Mischanlage vom Fabrikat Doppstadt / Komptech Mashmaster zum vorzerkleinern und homogenisieren

Im Folgenden finden Sie beispielhaft aufgezeichnete Daten aus den Pelletierversuchen mit der später auch vorrangig produzierten Mischung aus Getreideresten aus dem Landhandel und Weizenstroh.

Produktion von Pellets aus Mischung Getreiderest Landhandel + Stroh

Datum:	**09.09.2020**		
Substrat:	**Mischung aus 50 % Getreidekaff + 50 % Stroh (vorzerkleinert)**		**zerkleinert**
Produktion:			
Matrize:	8 mm		Stromstärke Pelletpresse [A]
Beginn:	11.15 Uhr		Uhrzeit / angezeigter Wert [A]
Ende:	11.49 Uhr	(d.h. Produktionszeit = 34 Minuten)	11:15 / 60 A
Verbrauch Mischung (Getreidekaff + Stroh):	je ca. 120 l Getreidekaff und Stroh		11:30 / 60 A
Verbrauch NaOH:	19 l	(berechnet über Füllhöhe IBC: 1,9 cm)	11:40 / 62 A
produzierte Menge:	100 kg	(je ca. 50 kg 1. + 2. Charge)	11:45 / 62 A
			11:47 / 60 A
Stromzähler 1:	715 kWh	Beginn	
	717 kWh	Ende	
Summe:	2 kWh		
			lt. aushängender Liste
Stromzähler 2:	190 kWh	Beginn	Pelletpresse Strohmehl: 70,00 kW Motorleistung
	191 kWh	Ende	
Summe:	1 kWh		
Summe Stromverbrauch:	3 kWh		
Spezifischer Stromverbrauch:	33 kWh/t		
Probenahme Pellets:			
Probe 1 (= 1. Charge)	11.30 Uhr	nach 15 min	
Probe 2 (= 2. Charge)	11.45 Uhr	nach 30 min	Stromstärke Hammermühle [A]
			Uhrzeit / angezeigter Wert [A]
			11:15 / 26 A
Schüttdichte:			11:30 / 26 A
Mischung (Getreidekaff + Stroh), zerkleinert	180 g/l		11:40 / 26 A
Pellets - Probe 1	520 g/l		11:47 / 26 A
Pellets - Probe 2	530 g/l		

Trockensubstanz:		Wassergehalt:
Mischung (Getreidekaff + Stroh), zerkleinert	84,78 %-TS	15,22%
Pellets - Probe 1	59,53 %-TS	40,47%
Pellets - Probe 2	61,29 %-TS	38,71%

	Natrium als Na_2O	Kalium als K_2O
Pellets - Probe 1	10,01%	0,48%
Pellets - Probe 2	9,93%	0,55%

NaOH-Gehalt:	
Pellets - Probe 1	12,9%
Pellets - Probe 2	12,8%

*(der Natriumgehalt entspricht diesem NaOH-Gehalt, unter der Annahme, dass das gesamte Na aus der Natronlauge stammt)

Weitere Daten zur Pelletierung bei ATS sind im Anhang zu finden.

Pelletanalytik am DBFZ

Nachfolgend werden der Herstellungsprozess und die Analyseergebnisse der im DBFZ erzeugten Pellets bewertet. In Tabelle 5 sind die relevanten Pelletanalysen und sowie die relevante Prozessgroßen, wie spezifischer Energieverbrauch und Durchsatz der Technikumsanlage zusammengefasst.

Tabelle 5: Übersicht der Pellet- sowie Prozessanalysen (DBFZ)

Kurzbezeichnung	spezif. Energieverbrauch	Massestrom Outputmaterial	prod. Feinanteil	Schüttdichte	Abrieb-festigkeit	Gesamtmasse Pellets	Verdichtungsverhältnis	Pelletwassergehalt
	in kWh/kg P	in kg P/h	in Ma.-% P	in kg P/m³	in Ma.-% P	in kg P	-	in Ma.-%
HS, 8 mm, o. NaOH	n.n.	n.n.	37,1	518	89,9	17,7	3,5	14,1
HS, 8 mm, m. NaOH	n.n.	n.n.	14,9	660	95,2	20,5	3,7	11,5
HS, 10 mm, o. NaOH	0,77	22,6	27,3	559	94,3	22,5	2,9	13,1
HS, 10 mm, m. NaOH	0,84	20,8	25,9	512	93,4	16,6	2,8	12,7
HS 8, mm, o. NaOH, zerkl.	0,66	22,9	6,0	660	97,2	29,0	3,5	12,1
HS, 8 mm, m. NaOH, zerkl.	0,64	25,4	3,2	679	97,7	25,8	3,5	10,0
GR Öl, 8 mm, m. NaOH	0,26	47,8	7,8	498	98,4	28,7	2,3	22,6
GR Öl, 8 mm, o. NaOH	0,18	54,4	6,6	459	98,3	30,8	1,9	28,5
GR Öl, 10 mm, m. NaOH	0,30	46,6	4,4	540	95,9	23,3	2,4	12,5
GR Öl, 10 mm, o. NaOH	0,49	29,7	2,4	627	97,6	18,8	2,7	11,4
GR LH, 8 mm, o. NaOH	0,30	39,2	5,3	489	95,2	24,2	2,4	15,3
GR LH, 8 mm, m. NaOH	0,21	47,4	2,8	470	97,7	24,2	2,0	14,7
GR LH, 10 mm, o. NaOH	0,40	38,4	8,4	568	95,3	21,8	2,6	11,5
GR LH, 10 mm, m. NaOH	0,27	37,1	9,0	403	95,7	26,6	1,8	12,9
HS/Stroh, 8 mm, o. NaOH, zerkl.	0,43	35,1	3,4	568	98,6	25,7	3,8	14,1
HS/Stroh, 8 mm, m. NaOH, zerkl.	0,24	40,2	0,6	507	99,0	31,5	3,2	19,0

Verdichtungsverhältnis ist das Verhältnis von Schüttdichte losem Ausgangsmaterial zur Schüttdichte Pellets.
P – Pellets (mit entsprechendem Wassergehalt)
HS – Haferschalen; GR Öl – Getreidereste aus der Ölmühle/Mälzerei;
GR LH – Getreidereste aus dem Landhandel o. – ohne, m. - mit

Der spezifische Energieverbrauch der Pelletpresse ist eng verknüpft mit dem Durchsatz während der Kompaktierung, weshalb beide Kennwerte in der Abbildung 21 gemeinsam dargestellt sind. Entscheidend zur Erklärung beider Kennwerte sind die sich während der Pelletierung einstellenden Reibkräfte zwischen den Partikeln (Partikel/Partikel) und zwischen Partikel und Matrize (Partikel/Wand). Die Reibkräfte wirken dem von den Kollern aufgebachten Materialvorschub entgegen und bilden mit diesem den Pressdruck, der auf das Rohmaterial wirkt. Ein entscheidender Faktor zur Einstellung der Reibkräfte ist das Längen-/Durchmesserverhältnisse, da ein längerer Presskanal in größerer Reibung zwischen Partikel/Wand resultiert.

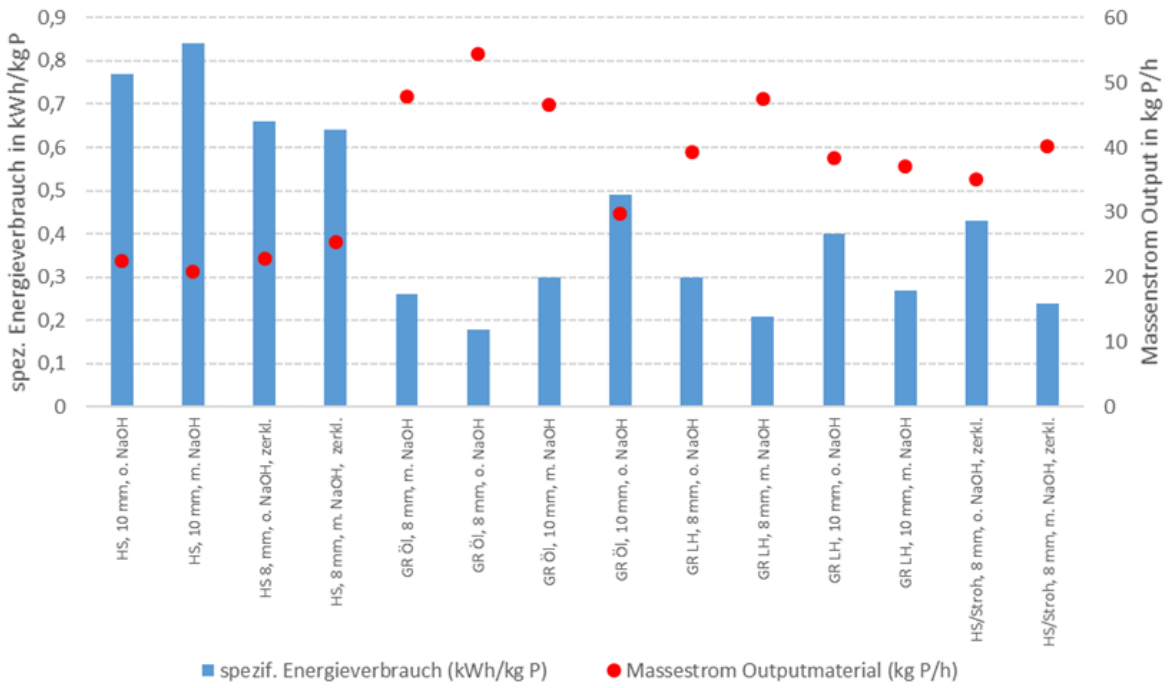


Abbildung 21: Spez. Energieverbrauch und Durchsatz für die einzelnen Kleinpelletchargen (P – Pellets mit entsprechendem Wassergehalt) (DBFZ)

In Tabelle 6 sind die Durchschnittswerte der Pelletierversuche mit der 8 x 65 mm bzw. der 10 x 80 mm Matrize sowie mit und ohne NaOH-Zugabe (durchschnittlich über beide Matrizen) miteinander vergleichend dargestellt.

Tabelle 6: Vergleich der Nutzung einer 8 x 65 mm und einer 10 x 80 mm Matrize, sowie die Zugabe von NaOH (durchschnittlich über beide Matrizen) (DBFZ)

Kurzbezeichnung	Ausgangs-wassergehalt	spezif. Energie-verbrauch	Massenstrom Outputmaterial	prod. Fein-anteil	Schüttdichte	Abriebfestig-keit
	in Ma.-%	in kWh/kg P	in kg P/h	in Ma.-% P	in kg P/m³	in Ma.-% P
8 mm Matrize	28,7	0,24	47,2	12,4	516	95,8
10 mm Matrize	30,8	0,51	32,5	12,9	535	95,4
Pelletierung mit NaOH	31,3	0,39	37,9	8,6	534	96,6
Pelletierung ohne NaOH	30,9	0,46	34,6	12,1	556	95,8

P – Pellets (mit entsprechendem Wassergehalt)

Bei ähnlichen Längen-/Durchmesserverhältnisse (8,125 und 8) der genutzten Matrizen ist der durchschnittlich höhere Energieverbrauch der 10 x 80 mm Matrize (0,51 kWh/kg) sowie der durchschnittlich geringere Durchsatz (32,5 kg/h) auffällig. Durchschnittswerte der 8 x 65 mm Matrize belaufen sich für den spez. Energieverbrauch auf 0,24 kWh/kg und für den Durchsatz auf 47,2 kg/h. Die leicht erhöhten Wassergehalte im Ausgangsmaterial bei der Pelletierung mit der 10 x 80 mm Matrize könnte zu einer Verschlechterung der Pelletierbedingungen und der damit verbundenen leichten Erhöhung der Reibkräfte geführt haben.

Ebenso wesentlich für die sich einstellenden Reibkräfte ist der natürliche Binde- bzw. Schmiermittelgehalt im Rohmaterial. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der

Futtermittelanalyse. Hohe Protein- oder Ligningehalte haben bei entsprechenden Temperaturen (Protein Denaturierung ab 60°C (SCHUCHMANN und SCHUCHMANN 2012), Ligninerweichung ist wassergehalts- und temperaturabhängig: 85 – 110°C bei einem Wassergehalt von 15 Ma.-%). (SAKATA und SENJU (1975); WELTE (1980))

Die im Weizen insbesondere im Korn enthaltene Stärke verflüssigt sich bei den vorherrschenden Pressdrücken und -temperaturen (Verkleisterung ab 65 – 90°C, KALTSCHMITT et al. 2016) und verklebt zum einen die Partikel und reduziert zum anderen die Reibkräfte. Dies wiederum führt zur Erhöhung des Durchsatzes bei geringerem spez. Energieverbrauch. Einen Schmiermitteleffekt hat auch das im Korn enthaltene Öl, welches die Reibung im Pelletierprozess verringert, aber zusätzlich nachteilige Wirkung auf die Pelletfestigkeit hat. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere bei den Getreideresten (aus der Ölmühle und dem Landhandel) aufgrund des hohen Kornanteil im Verhältnis zum Stroh die natürlichen Binde- und Schmiermittelanteile im Rohmaterial hoch sind. Aus diesem Grund sind die sich bei diesen Rohmaterialien einstellenden hohen Durchsätze bei geringem spez. Energieverbrauch begründbar. Einen weiteren positiven Effekt auf die Pelletierung hinsichtlich des spez. Energieverbrauchs sowie des Durchsatzes hat die Zugabe von NaOH. Das NaOH verhält sich bei der Pelletierung wie ein zusätzlich anorganisches Binde- und Schmiermittel, auch wenn es nur in sehr geringen Mengen hinzugefügt wurde.

Wie auch bei den Zusammenhängen aus der Abbildung 21 sind die Reibkräfte, die sich bei der Pelletierung ausbilden wesentlicher Bestandteil für die Begründung der entstehenden Schüttdichten und Festigkeiten (Abbildung 22) der produzierten Pellets. Es gilt dabei: Je größer die Reibung im Presskanal, desto höher die Schüttdichten der Pellets (und deren Pelletabriebfestigkeit). Die Vermutung, dass die erhöhten Wassergehalte bei der Pelletierung mit der 10 x 80 mm Matrize zu einer verstärkten Reibung im Presskanal geführt hat, konnte sich durch die Betrachtung der Schüttdichten bestätigen. Die Pelletierung mit der 10 x 80 mm Matrize erzeugte im Schnitt Pellets eine etwas höhere Schüttdichte (535 kg/m³) (vgl. Pellets aus 8 x65 mm Matrize: 516 kg/m³).

Durch Optimierung prozesstechnischer (Matrizengeometrie – Veränderung der Presskanallänge, Zuförderraten des Materials in den Pressenraum) und rohstoffseitiger (Zerkleinerungsgrad und Wassergehalt des Ausgangsmaterials) Parameter können erfahrungsgemäß sehr gute physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften eingehalten werden. Untersuchungen zu den Haferschalen bestätigen dies eindeutig – eine Zerkleinerung des Materials sowie eine Erhöhung des Wassergehaltes führen zur Steigerung der Schüttdichten und Abriebfestigkeiten sowie zur deutlichen Reduzierung des produktionsbedingten Feinanteils. Inwieweit Saugfähigkeit und gleichzeitige Stabilität gewährleistet wird, diskutiert das IKTS nachfolgend.

Die Zugabe von NaOH als zusätzliches Bindemittel (auch in sehr geringen Mengen) kann empfohlen werden, da es die Abriebfestigkeit der Pellets erhöht und damit für eine ausreichende Transportstabilität sorgt. Die mit dem Einsatz von NaOH verbundene geringe Reduktion der Schüttdichten sollte ebenfalls zur Kenntnis genommen werden.

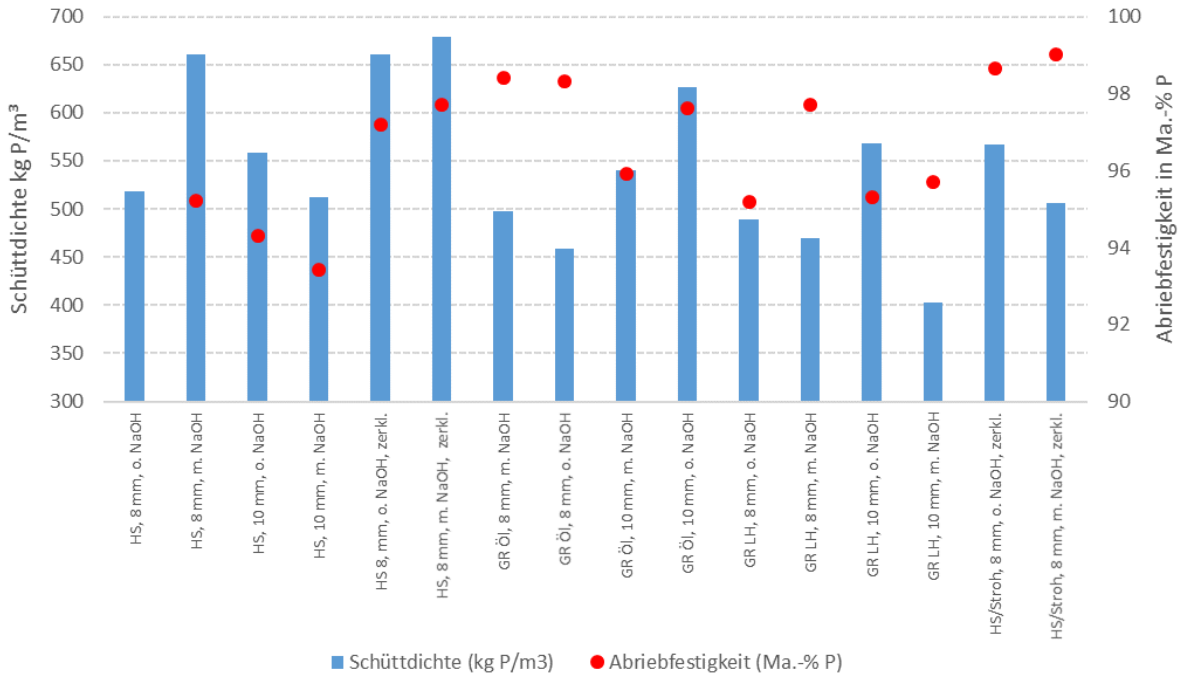


Abbildung 22: Schüttdichte und Abriebfestigkeit der erzeugten Pellets (DBFZ)

Beispielhaft sind in Abbildung 23 drei produzierte Pelletchargen zu sehen, welche dem IKTS für weitere Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurden.

Abbildung 23: v.ln.r. Beispiele produzierter Pelletchargen: Haferschalen HS 8 mm o. NaOH zerkl., Getreidereste GR Öl 10 mm o. NaOH, Mischung Haferschalen/Stroh HS/Stroh 8 mm m. NaOH zerkl.

Analysen der extern Pelletchargen (am DBFZ)

Die bei Fa. ATS produzierten Pellets und im Landhandel beschafften Pellets wurden hinsichtlich physikalisch-mechanischer Eigenschaften (Abriebfestigkeit nach DIN EN ISO 17831 (DIN 2015a) und Schüttdichte nach DIN EN ISO 17828 (DIN 2015b)). sowie Wassergehalt nach DIN EN ISO 18134-1 (DIN 2015c) am DBFZ analysiert und bewertet. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der in Abbildung 24 dargestellten, abgesiebten Pellets.

Tabelle 7: Wassergehalt und die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der externen Pelletschargen

Beschreibung	Feinanteil	Schüttdichte	Abriebfestigkeit	Pelletwasser-gehalt
	in Ma.-% P	in kg P/m³	in Ma.-% P	in Ma.-%
8 mm Pellets aus Dinkelschalen/Spelzen, Fa. ATS	5,2	521	95,0	11,7
6 mm Pellets aus Haferschalen unzerkleiner, Fa. ATS	28,8	578	89,2	11,8
6 mm Pellets 50% Stroh + 50% Getreideausputz (Landhandel)	12,7	601	92,0	13,5
6 mm Pellets 100% Getreideausputz (Landhandel)	1,6	703	97,6	10,4

Abbildung 24: v.l.n.r. Externe Pellets aus Dinkelspelzen bzw. Haferspelzen (hergestellt bei Fa. ATS), Mischpellets Stroh und Getreideausputz sowie Getreideausputzpellets (beschafft im Landhandel) (©DBFZ:2021)

Die Pellets aus 100 % Getreideausputz, welche extern im Landhandel beschafft wurden, weisen mit 703 kg/m³ die höchste Schüttdichte und mit 97,6 Ma.-% die höchste Abriebfestigkeit bei geringstem Wassergehalt auf. Die bei Fa. ATS produzierten Pellets weisen zumeist schlechtere Eigenschaften auf. Vor allem der hohe Feinanteil der 6 mm Pellets aus Haferschalen von 28,8 Ma.-% ist hier zu nennen.

<u>Pelletanalytik im IKTS</u>

Im Folgenden werden chemische, physikalische und biologische Analysenwerte für einen Großteil der bewerteten Pellets und Stoffströme dargestellt. Es handelt sich sowohl um Pellets aus dem Technikum des DBFZ als auch um großtechnisch hergestellte Pellets von der Fa. ATS. Für eine bessere Einordnung der einzelnen Proben wurde folgende Kurzbezeichnung eingeführt:

Probe benannt nach: Hersteller_Material_Behandlungen:

- Hersteller:
  - A…ATS
  - D…DBFZ
- Material:
  - HS…Haferschalen
  - LH…Getreidereste Landhandel
  - ÖM…Getreidereste Ölmühle
  - Sz…Strohzerkleinert
- Behandlungen
  - o…original
  - z…zerkleinert
  - z6…zerkleinert auf 6 mm
  - P…pelletiert
  - P8…pelletiert mit 8 mm Matrize
  - Na…mit NaOH

→ pH-Wert

Die Dosierung von Natronlauge bei der Pelletierung führt zu einer Anhebung des pH-Wertes, welcher sowohl für den Substrataufschluss von Bedeutung ist als auch im Stall möglicherweise Einfluss auf Hygienisierung und Geruchsbelastung hat. Daher wurde für die im Projekt hergestellten Pellets der pH-Wert im Eluat (Pellet + dest. Wasser) nach 2 h bestimmt.

In Abbildung 25 sind die pH-Werte für ausgewählte Proben dargestellt. Aus vorherigen Projekten war bekannt, dass für den pH-Wert ein Erwartungsbereich von ca. 9 nach NaOH-Behandlung existiert. Dies konnte für die Proben aber nur zum Teil nachgewiesen werden. Ursache war ein Berechnungsfehler beim Projektpartner DBFZ, welcher erst nach einigen Monaten (zeitverzögerte Analysen) auffiel und korrigiert wurde.

Leider waren dadurch viele Vergleichsproben mit einer nur sehr geringen NaOH-Menge behandelt worden (ca. 0,6% Zugabe statt 2,5%), was praktisch keinerlei Bewertung des NaOH-Effektes für den Biogasertrag zuließ. Eine Wiederholung der Versuche war aufgrund der begrenzten Ressourcen des DBFZ nicht möglich.

In der Grafik sind die Proben mit Unterdosierung (DBFZ (I)) sehr gut von den Proben mit gewünschter NaOH-Anreicherung zu unterscheiden. Eine Probe von ATS wurde durch ein Versehen bei der Versuchsdurchführung mit einer deutlich zu hohen NaOH-Menge behandelt (Überdosierung), was sich mit einem pH-Wert von 12 zeigt.

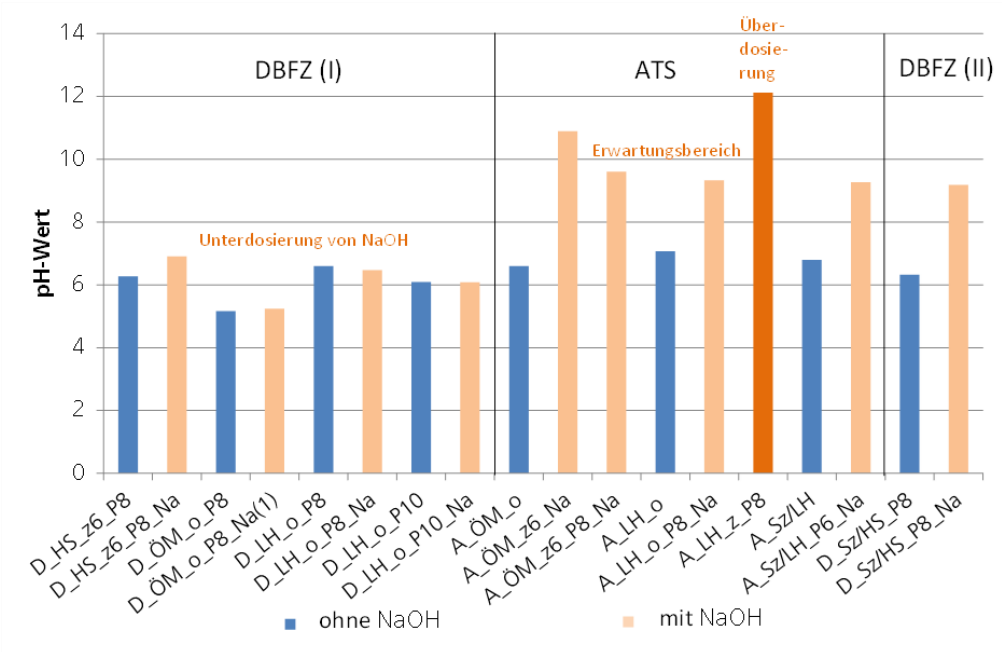


Abbildung 25: pH-Werte verschiedener Pelletchargen

→ elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit als Maß für den Ionen- oder Salzgehalt hat vor allem für die Biologie im Stall und im Fermenter eine Bedeutung hinsichtlich des osmotischen Druckes und der Toleranz. In Abbildung 26 sind die Werte für ausgewählte Proben dargestellt.

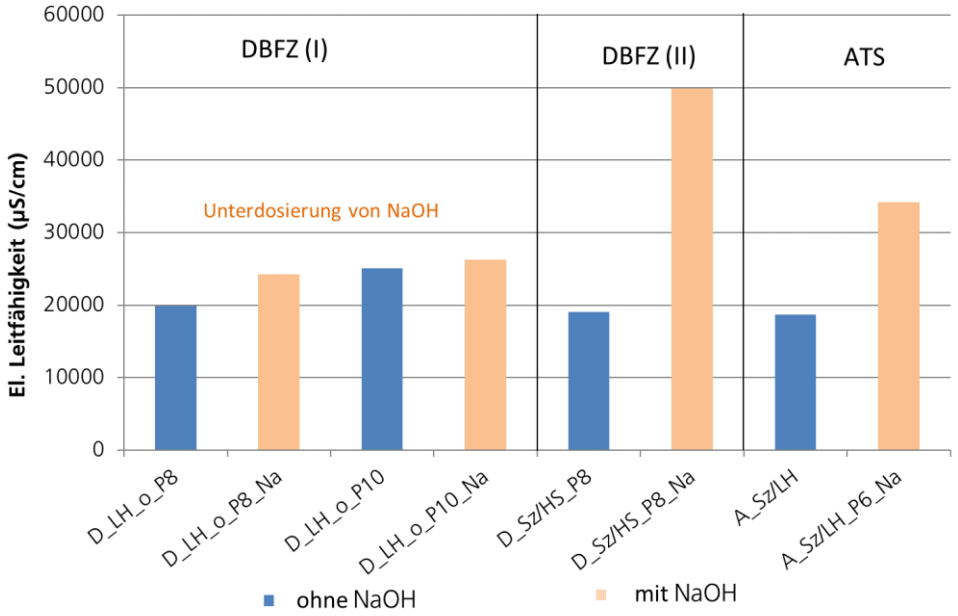


Abbildung 26: Elektrisch Leitfähigkeit ausgewählter Pelletproben

Die Unterdosierung von NaOH ist ebenso zu erkennen, wie beim pH-Wert. Außerdem ist für eine Probe ein sehr hoher Wert detektiert worden. Dies wäre beim Einsatz im Fermenter zu beobachten, da zu hohe Salzfrachten den Prozess hemmen könnten.

→ Wassersaugvermögen

Im Folgenden ist das maximale Wasserhaltevermögen in Relation zur Frischmasse der Substrate für verschiedene Materialien aufgetragen.

Für das Produkt **Haferschalen** kann man eine sehr deutliche Steigerung der Wasseraufnahme durch die Pelletierung (unabhängig von Zerkleinerung oder NaOH-Zugabe (Unterdosierung)) erkennen (Abbildung 27). Eine Übertragbarkeit dieses Effektes von Technikum (DBFZ) auf die Praxisanlage (ATS) scheint gegeben. Die Beimengung von zerkleinertem Stroh zu den Haferschalen führt nur zu einer geringen Verbesserung der Saugleistung. Für das **Mischpellet** führte die NaOH-Zugabe (im gewünschten Dosierbereich) offensichtlich zu einer Art Imprägnierung und Verschlechterung der Wasseraufnahme.

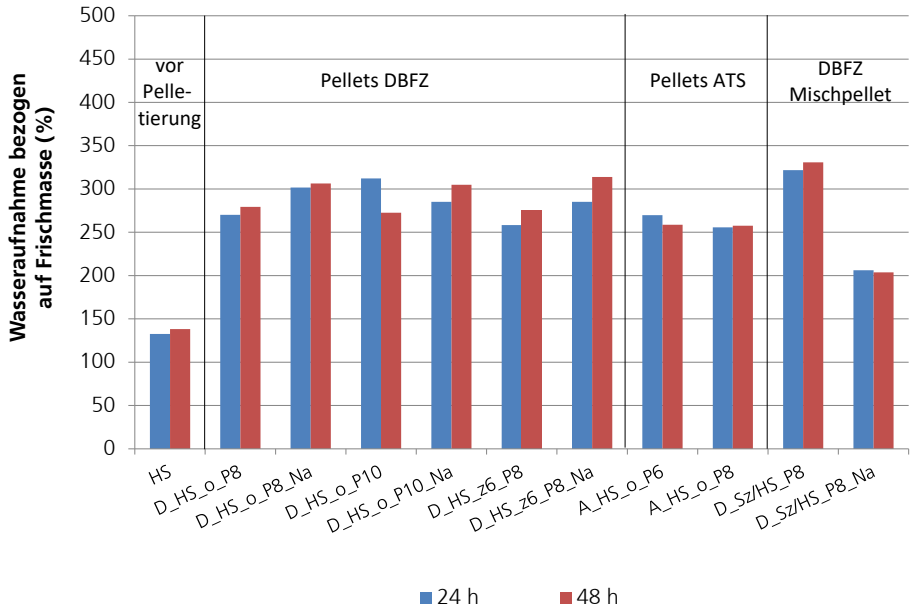


Abbildung 27: Wassersaugvermögen für Haferschalen und Pellets aus Haferschalen

Die **Getreidereste aus der Ölmühle** stellten sich als sehr inhomogen dar, da saisonal sehr unterschiedliche Substrate verarbeitet werden (Abbildung 28 – vor Pelletierung). Vor allem der Rest an Rapskörnern und Öl wirkte sich sehr stark auf das Wasseraufnahmevermögen aus. Eine Pelletierung mit kleinen Matrizen (8 mm) führt bei diesem Material zu einer Verringerung der Wasseraufnahme, da möglicherweise der hohe Pressdruck in Kombination mit Ölanteilen zu einer Versiegelung der Pellets führt. Insgesamt scheint eine Pelletierung bei 10 mm Matrizen von Vorteil zu sein.

Die Versuche im praktischen Maßstab (Abbildung 29) bestätigen die Aussage, dass die Pressung in 8 mm Matritzen zu einer Verringerung der Wasseraufnahme führen. Die Zugabe von NaOH führt im praktischen Versuch tendenziell zu einer Verminderung der Wasseraufnahmekapazität.

Generell war das Material aus der Ölmühle aufgrund der erhöhten Inhomogenität sowie der teilweise schlechten Wasseraufnahmeeigenschaften nicht als Einstreumaterial zu empfehlen und wurde daher im Projekt nicht weiter untersucht.

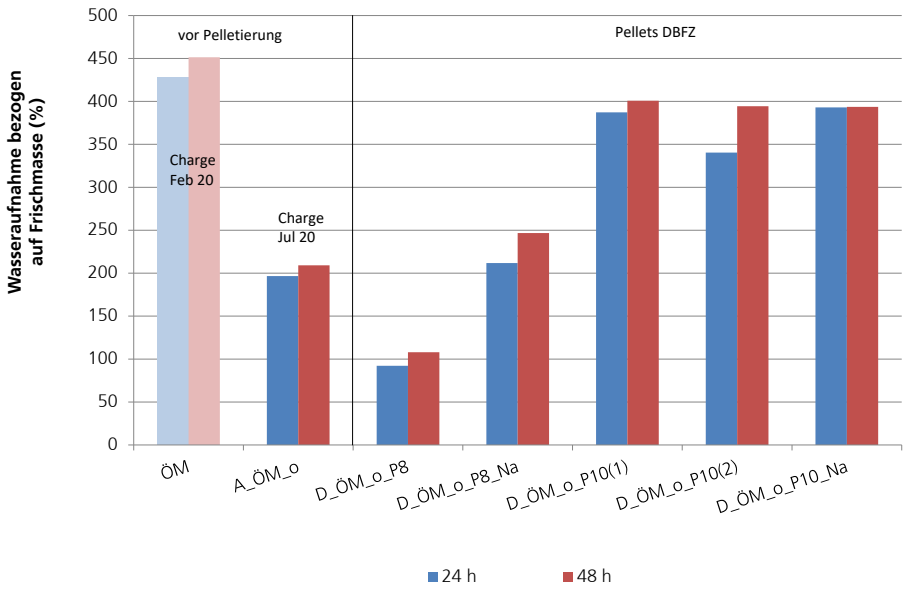


Abbildung 28: Wassersaugvermögen für Reststoffe aus Ölmühlen – Technikumsversuche (DBFZ)

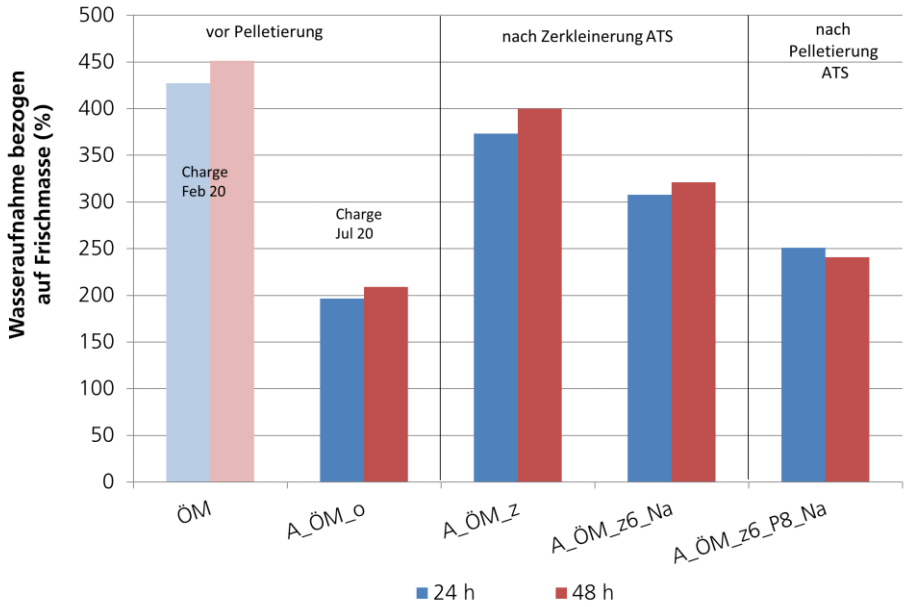


Abbildung 29: Wassersaugvermögen für Reststoffe aus Ölmühle – praktische Versuche (ATS)

Getreidereste aus dem Landhandel (Abbildung 30) zeigen ein deutlich homogeneres Bild mit sehr gutem Wasseraufnahmevermögen. Die Ergebnisse aus Technikum und Praxisversuchen sind vergleichbar. Der Einsatz von NaOH ist für die Wasseraufnahme nicht entscheidend.

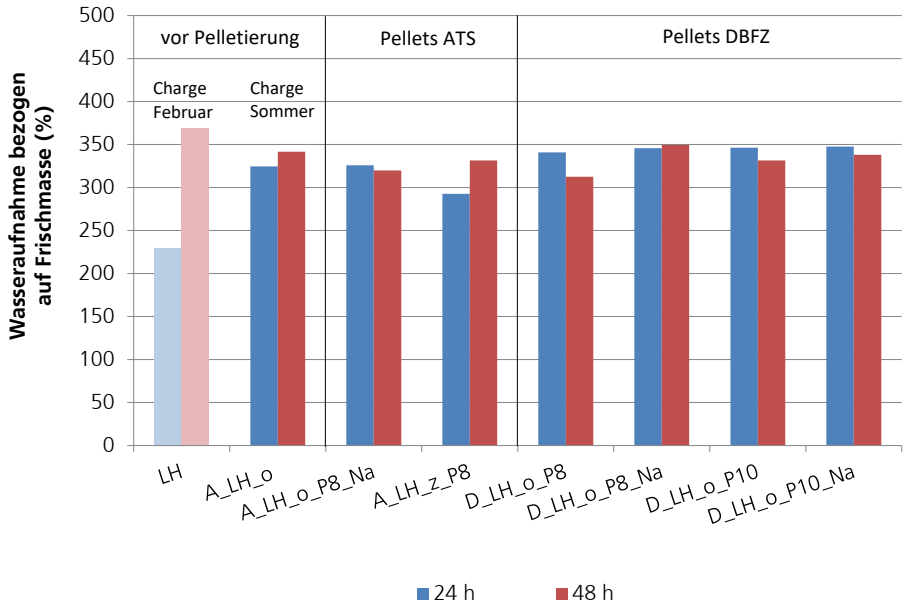


Abbildung 30: Wassersaugvermögen für Reststoffe aus dem Landhandel

→ Wasserlösegeschwindigkeit

Die Wasserlösegeschwindigkeit wurde durch das Einweichen der Pellets in Wasser ermittelt. Dabei wurde nach verschiedenen Verweilzeiten in Wasser mittels Siebung festgestellt, welcher Masseanteil der Pellets noch nicht aufgelöst war. Es ergeben sich zeitabhängige Kurven ausgehend von 100% Massenanteil (t=0) bis maximal zur vollständigen Auflösung bei 0% Massenanteil. Insbesondere für die direkte Nutzung von Pellets in der Flüssigfermentation ist diese Eigenschaft von Bedeutung, um ausreichend Rührenergie bereitzustellen und Sinkschichten mit intakten Pelletbestandteilen zu verhindern. Im Folgenden werden die Kurven für die ausgewählten Pellets dargestellt.

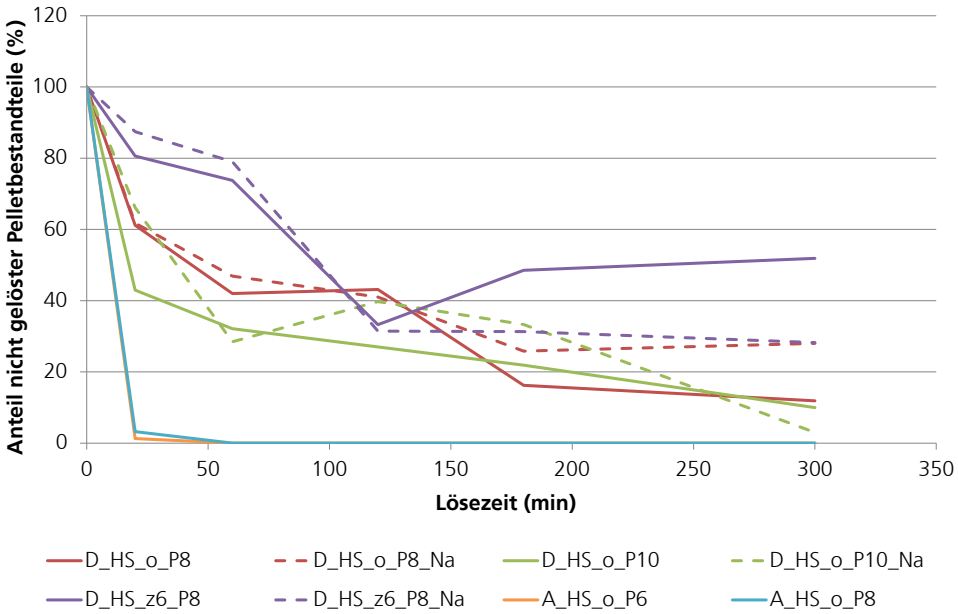


Abbildung 31: Wasserlösegeschwindigkeit von Pellets aus Haferschalen

Für die im Technikum des DBFZ hergestellten Pellets aus **Haferschalen** konnte ermittelt werden, dass ein Großteil der Pellets nach etwa 2 h aufgelöst werden

konnte. Allerdings blieb ein Anteil von 10 bis 30 % auch nach 5 h noch ungelöst zurück. Ausreichende Einmischzeiten in Fermentern sind daher zu berücksichtigen. Die Praxisproben vom Partner ATS wiesen eine sehr schnelle Auflösung in Wasser auf, was aber eher auf instabile Pellets hinweist.

Für die Produkte aus der **Ölmühle** werden die Ergebnisse aus der Wasseraufnahme auch bei der Wasserlöslichkeit bestätigt (Abbildung 32). Die 8 mm – Pellets lösen sich nicht in Wasser auf. Die 10 mm – Pellets erreichen eine vergleichbare Löslichkeit, wie die Produkte aus Haferschalen.

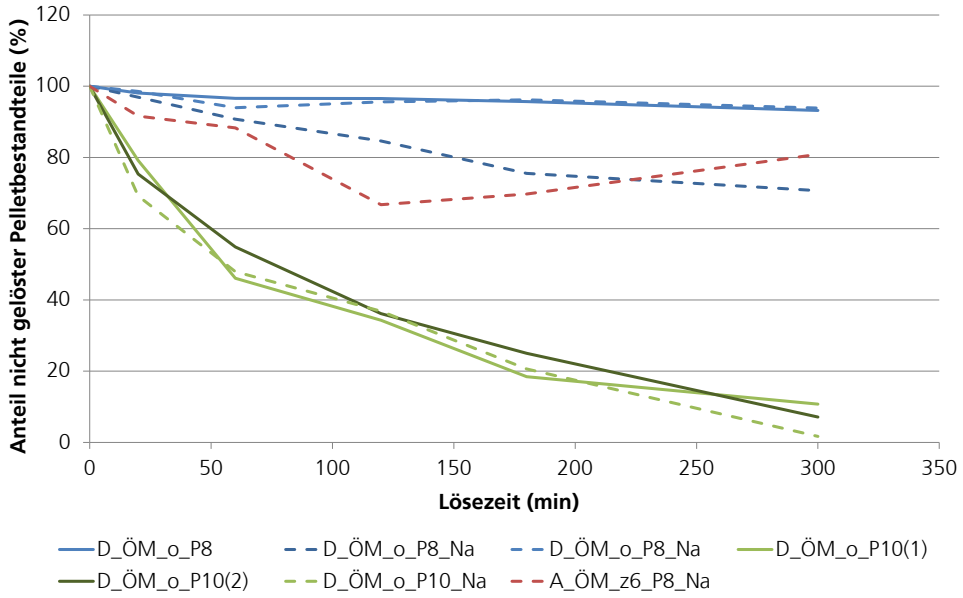


Abbildung 32: Wasserlösegeschwindigkeit von Pellets aus Reststoffen der Ölmühle

Eine vergleichsweise schnelle und vollständige Wasserlöslichkeit zeigen die Getreidereste aus dem **Landhandel** (Abbildung 33). Nach etwa 2 h sind die Pellets nahezu komplett aufgelöst.

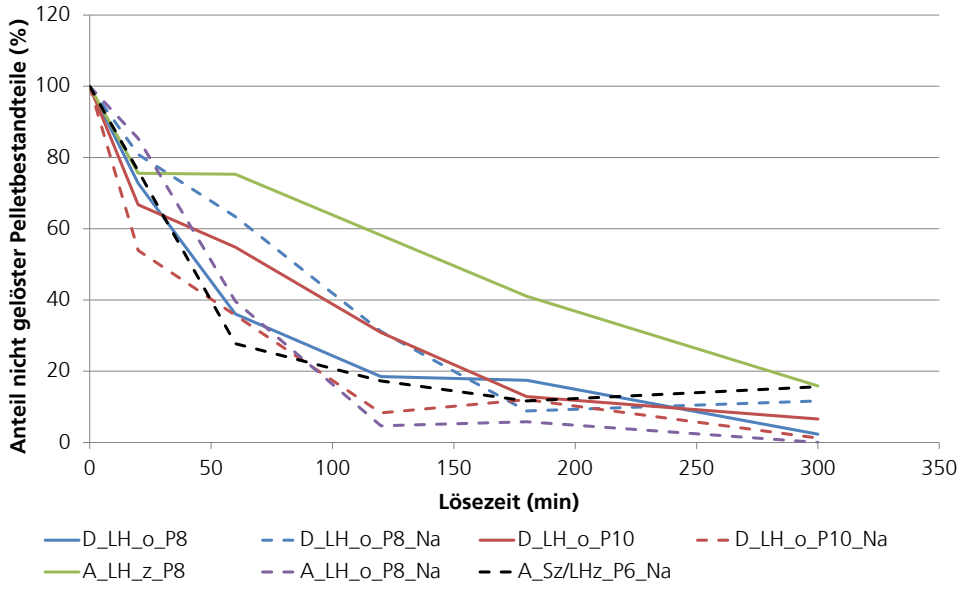


Abbildung 33: Wasserlösegeschwindigkeit von Pellets aus Reststoffen des Landhandels

Der Einsatz von Natronlauge führt bei der Wasserlösegeschwindigkeit offenbar nicht zu einer Veränderung. Einschränkend muss dazu erwähnt werden, dass bei den untersuchten Pellets ein Großteil mit sehr niedriger Konzentration an NaOH behandelt wurde (vgl. unter pH-Wert)

→ Granulometrische Kenngrößen

Ausgewählte Proben wurden im Projekt auch hinsichtlich der Partikelgrößen bewertet. Dabei interessierte vor allem, inwieweit sich die Pelletierung sowie die eventuelle Vorzerkleinerung auf die Partikelgröße auswirkt. In Abbildung 34 sind die Ergebnisse dargestellt. Es handelt sich nicht um die Abmessungen der Pellets, sondern um die Größe der Primärpartikel, welche im Pellet verpresst wurden. Dazu werden die Pellets vor der Analyse in Wasser komplett aufgelöst.

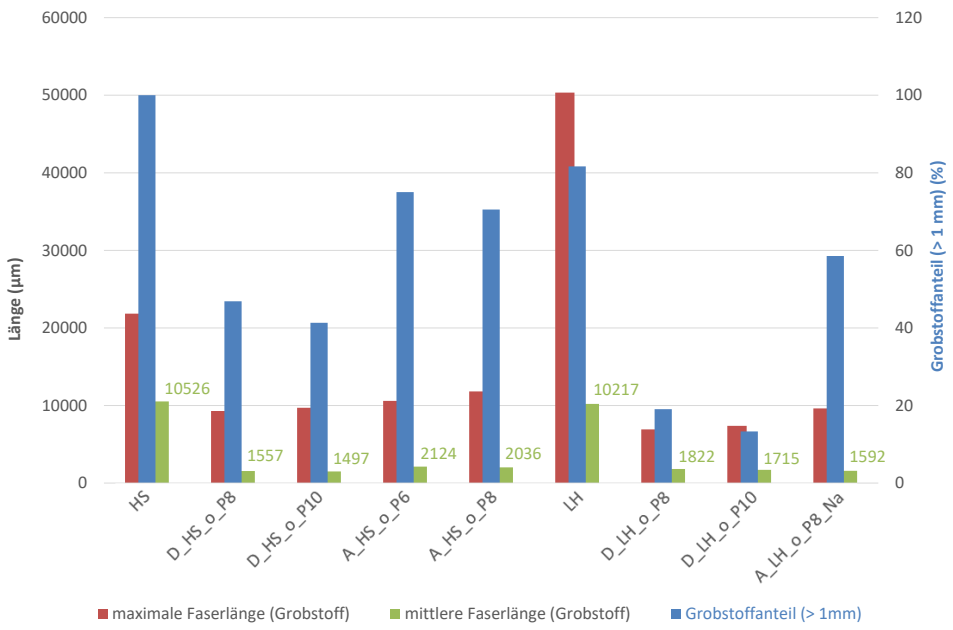


Abbildung 34: Granulometrische Kenngrößen der primären Partikel

Es zeigt sich, dass die ausschließliche Pelletierung von Haferschalen und Getreideresten aus dem Landhandel (ohne mechanische Vorzerkleinerung) bereits zu einer deutlichen Reduktion der Faserlängen führt. Der Anteil von Partikeln > 1 mm reduziert sich um bis zu 60 % (HS) bzw. 80 % (LH). Die verbliebenen Grobpartikel (> 1 mm) weisen eine deutlich reduzierte Faserlänge auf (Max und Mittel). Dies ist i.d.R. von Vorteil für Wasseraufnahme und Biogasertrag.

Die Pelletierung im Technikum des DBFZ erreicht prinzipiell eine intensivere Zerkleinerung der Fasern als die Praxisversuche beim Partner ATS. Dies liegt aller Wahrscheinlichkeit nach an der geringeren Baugröße der Pelletierung im DBFZ sowie des kleineren Abstandes zwischen Koller und Matrize von 0,25 mm im DBFZ. Dadurch wird das unzerkleinerte Inputmaterial stärker mechanisch beansprucht als bei ATS mit etwas größeren Spaltmaßen.

→ Biogasertrag

Im Folgenden sind die Methanerträge für verschiedene KoSaTZ-Materialien dargestellt. Diese wurden im Batch-Gasrtragstest nach VDI-Richtlinie 4630 in Dreifachbestimmung ermittelt.

Für die **Haferschalen** (Abbildung 35) ist durch die mechanische Beanspruchung bei der Pelletierung mit einer deutlichen Steigerung der Methanausbeute zu rechnen. Die Dosierung von NaOH (Unterdosierung (I) und „richtige" Dosierung (II)) spielt offensichtlich keine große Rolle. Die Pellets von ATS weisen einen etwas geringeren Gasertrag auf, was mit den geringeren Partikelgrößen (s. Auswertung Granulometrie) korreliert.

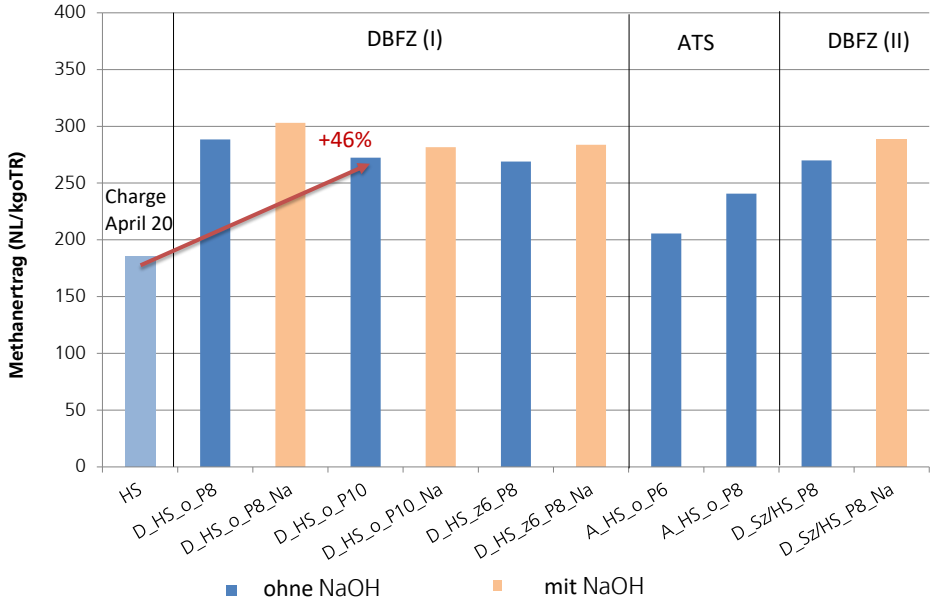


Abbildung 35: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets aus Haferschalen

Trotz der teilweise schlechten Eigenschaften bezüglich der Wasseraufnahme konnten auch Pellets aus **Getreideresten der Ölmühle** (Abbildung 36) gute Gaserträge erreichen. Das heißt, dass dieser Rohstoff zwar nicht als Einstreu, aber eventuell als Biogassubstrat direkt genutzt werden kann.

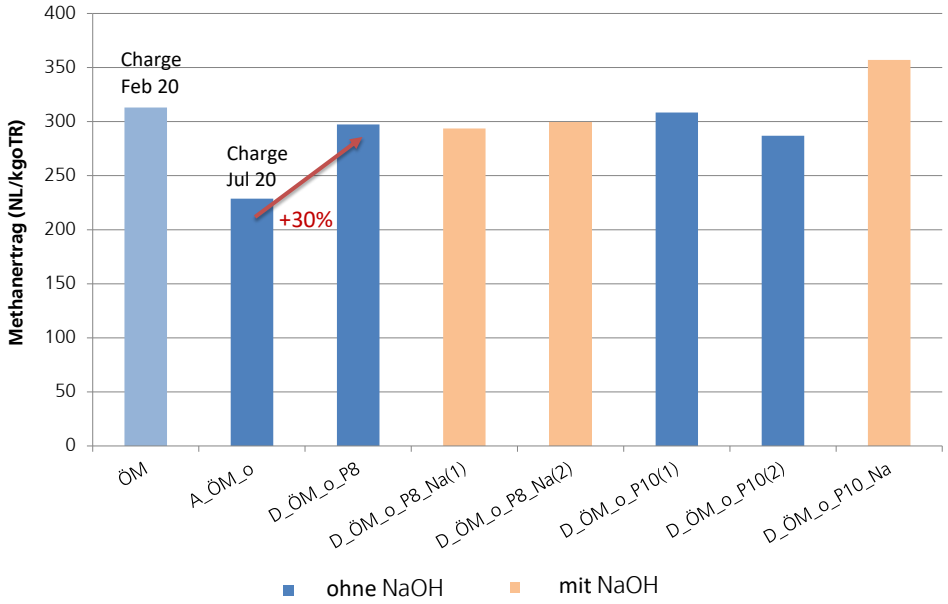


Abbildung 36: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets aus Reststoffen der Ölmühle

Die Ausgangschargen der Getreidereste aus dem **Landhandel** weisen saisonal ebenfalls schwankende Eigenschaften auf, was z.T. an noch vorhandenen Körnerresten liegt (vgl. Charge Feb und Jul in Abbildung 37). Die bereits gute anaerobe Abbaubarkeit kann durch die reine Pelletierung (DBFZ) um knapp 10 % gesteigert werden. Aufgrund der bereits beschriebenen zu niedrigen NaOH-Dosierung kann an dieser Stelle kein weiterer Methan-Mehrertrag generiert werden.

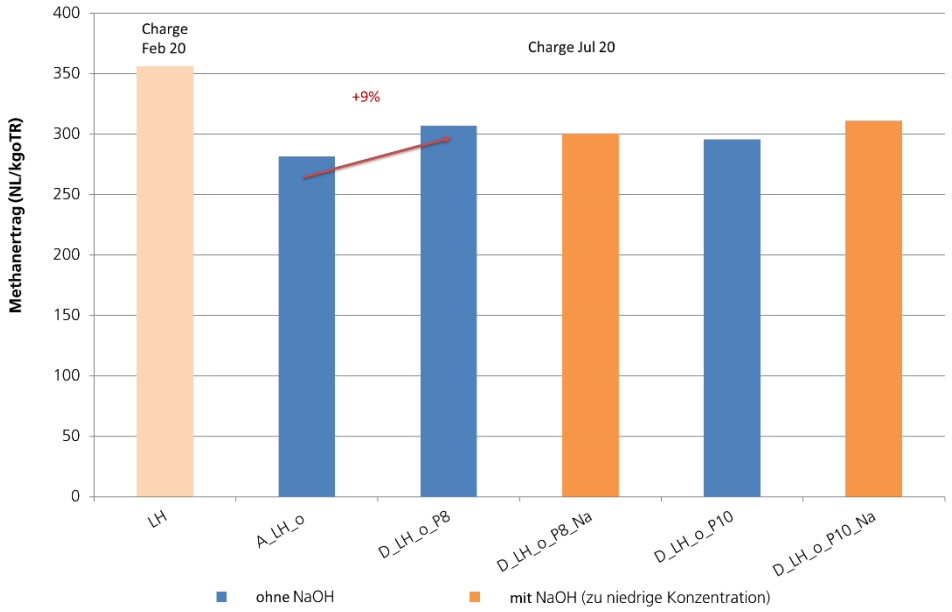


Abbildung 37: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets aus Reststoffen des Landhandels

Die Praxisversuche bei ATS mit Material aus der Ölmühle (Abbildung 38) bestätigten die Ergebnisse aus dem Technikum des DBFZ. Durch Kombination von Zerkleinerung und NaOH sind sogar noch größere Steigerungen im Gasertrag möglich.

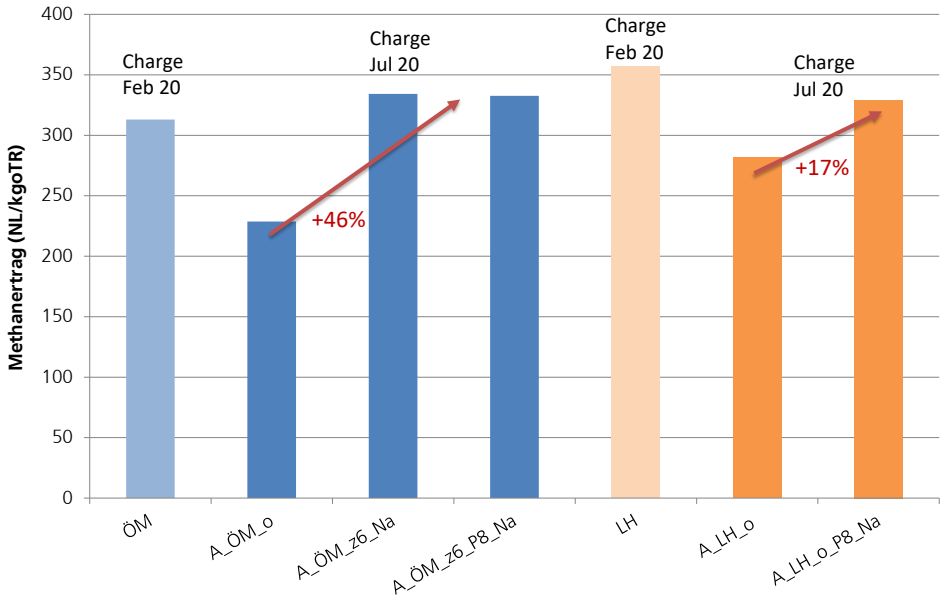


Abbildung 38: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets – Praktische Versuche bei ATS

Auch für das Produkt aus dem Landhandel ist mit NaOH-Zugabe eine Steigerung des Gasertrages gegenüber der reinen Pelletierung möglich.

Prinzipiell lässt sich festhalten:

- Die im Projekt erzeugten Pellets aus Reststoffen der Getreideproduktion und Verarbeitung zeigen i.d.R. gute physikalisch-mechanische Eigenschaften auf.
- Die Pelletierung und die damit einhergehende mechanische Beanspruchung führt
    - zu einer Zerkleinerung der Partikel
    - zum Teil zu einer deutlichen Verbesserung des Wasseraufnahmevermögens (Insbesondere Haferschalen) → damit werden Dinkelspelzen wieder interessanter für die projektspezifischen Betrachtungen
    - zu einer Steigerung des Gasertrages
- Der Zusatz von NaOH führt
    - zu einer Steigerung des pH-Wertes
    - zu keiner signifikanten Änderung des Auflöseverhaltens in Wasser
    - zu einer Steigerung des Gasertrages (bei ausreichender Dosiermenge)
- Die untersuchten Pellets weisen alle ein vergleichsweise hohes Gasertragspotenzial auf und stellen somit einen interessanten Inputstoff für Biogasanlagen dar
- Aufgrund der etwas geringeren Wasseraufnahme und des erhöhten Ölgehaltes sowie der stark schwankenden Eigenschaften wird für den Einsatz als Einstreu das Substrat aus der Ölmühle ausgeschlossen

6.1.3 Kleintechnische Versuche zur Brikettierung

Als alternatives und verschleißärmeres Kompaktierungsverfahren sollte im Projektrahmen die Brikettierung getestet werden. Aufgrund der anhaltenden COVID-19-Pandemie konnte ein erster Brikettierversuch mit Stroh erst im April 2021 bei ATNA Industrial Solutions GmbH durchgeführt werden. Dafür stand der von ATNA entwickelte Prototyp mit einer Anschlussleistung von 30 kW und einem Materialabhängigem Durchsatz von 50 – 80 kg/h zur Verfügung. Verwendet wurde das gleiche Stroh wie für die Pelletierung (wurde von Fa. ATS in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt), nur fand eine Zerkleinerung mittels Hammermühle nicht mit einer Sieblochweite von 6 mm (Pelletierung) sondern von 10 mm statt. Für die Brikettierung ist eine gröbere Zerkleinerung ausreichend.

Für die Verdichtung der Briketts wurde ein Vorpressdruck von 40 MPa und ein Hauptpressdruck von 200 MPa mit einer Haltezeit von 2 Sekunden bei einem Presswerkzeug von 50 mm im Durchmesser verwendet. Abbildung 39 zeigt die Strohbriketts. Etwa 100 kg Briketts wurden produziert. Nach Lieferschwierigkeiten trafen die Briketts im Juni 2021 am DBFZ ein, wovon eine Probe für analytische Zwecke dem IKTS zur Verfügung gestellt wurde.

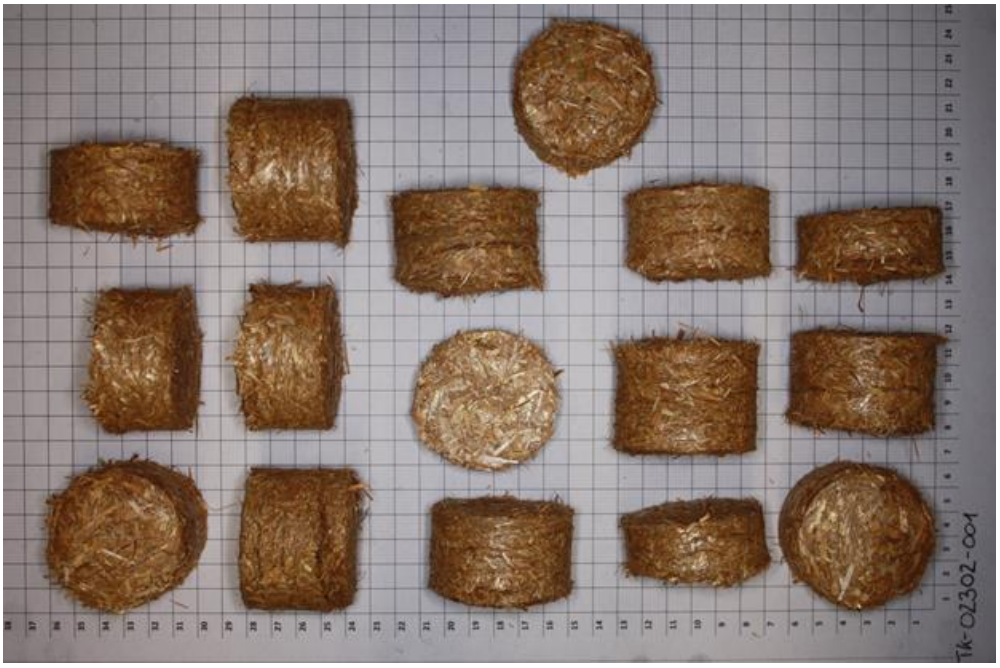


Abbildung 39: Strohbriketts hergestellt bei ATNA Industrial Solution GmbH (©DBFZ:2021)

Die Strohbriketts wurden physikalisch-mechanisch hinsichtlich ihrer Abriebfestigkeit DIN EN ISO 17831 (DIN 2015a), abgeändert [a]) und Rohdichte (Stereometrieuntersuchung nach DIN EN ISO 18847 (DIN 2016)) untersucht und Holzbriketts (Referenzbriketts, Herstellung mit vergleichbaren Parametereinstellungen der Brikettieranalge von ATNA Industrial Solution GmbH) gegenübergestellt (Tabelle 8). Dabei ist ersichtlich, dass bei gleicher Abriebfestigkeit die Rohdichte der Strohbriketts deutlich geringer ist als bei den Holzbriketts, welche als Referenzbriketts dienen.

Tabelle 8: Abriebfestigkeit und Rohdichte der Stroh- und Holzbriketts

Eigenschaften	Strohbriketts	Holzbriketts[1]
Abriebfestigkeit in Ma.-% P [a]	86,3	86,5
Rohdichte g/cm³ [b]	0,754	1,022

[1] DBFZ-interne Referenzcharge, feinkörniges Einstreumaterial (Kiefer-/Fichte-Gemisch)

[a] Die Bestimmung der Abriebfestigkeit wurde die nach DIN EN ISO 17831-1 vorhandene Abriebtrommel verwendet. 10 Briketts mit einer Gesamtmasse von um die 450 g wurden 500 U/min^{-1} beansprucht und im Anschluss mit einem 3,15 mm Sieb abgesiebt. n = 3

[b] Für die Ermittlung der Rohdichte wurde das Prinzip der Stereometrie angewendet (DIN EN ISO 18847). n = 10

Parallel zum ersten externen Brikettierversuch wurde am DBFZ seit Januar 2021 eine von ATNA Industrial Solutions GmbH konstruierte Forschungsbrikettieranlage GreenLine S50 aufgebaut und in Betrieb genommen (Abbildung 40). Aufgrund pandemiebedingter Lieferengpässe von Bauteilen der Anlage ergaben sich zeitliche Verzögerungen im Aufbau. Bei ersten Voruntersuchungen zur Verdichtung von Stroh und Haferspelzen wurden vor allem Wassergehalt und Korngröße des Ausgangsmaterials sowie verschiedene Prozessparameter (Vor- und Hauptpressdruck, Haltezeit) variiert. Dabei wurden Konstruktionsmängel in der Förderschnecke und im Fallschacht festgestellt, welche vom Hersteller zeitverzögert behoben wurden. So konnten erst Anfang 2022 erste statistische Versuchsreihen (DoE) zur Verdichtung von Stroh und Haferspelzen mit dem 50 mm Presswerkzeug durchgeführt werden. Abbildung 41 zeigt das Verdichtungsprinzip der Brikettierung mit der Forschungsanlage. Im ersten Schritt (1) wird das Material vorverdichtet (geringer Druck bis 40 MPa). Danach erfolgt die Hauptpressung (bis 200 MPa) mit einer definierten Haltezeit von wenigen Sekunden. Im dritten Schritt (3) wird das Brikett ausgestoßen.

Abbildung 40: Brikettieranlage GreenLine S50 am DBFZ, © Wolfgang Grote / ATNA Industrial Solutions GmbH

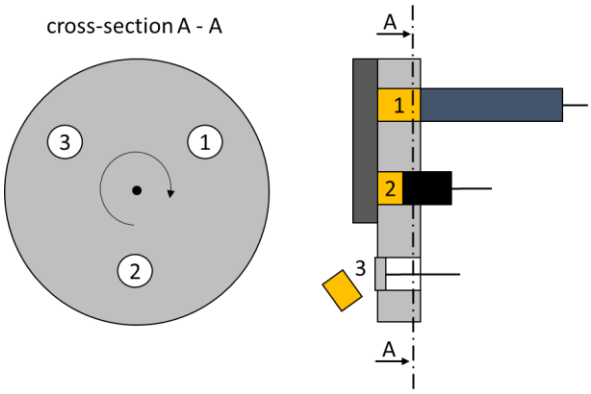


Abbildung 41: Verdichtungsprinzip der Brikettieranlage

Aufgrund geringer Erfahrungen zur Verdichtung mit der Brikettieranlage wurden die Versuche nur mit Haferschalen (zerkleinert mit der Hammermühle und einem 6 mm Siebeinsatz und unzerkleinert) sowie Stroh durchgeführt. Beide Materialen stammen von der Fa. ATS und wurde ebenso für die Kleinpelletierungen verwendet. Die Partikelgrößenverteilung der Haferschalen kann Abbildung 12 entnommen werden. Das Stroh wurden viel für den Versuch bei ATNA mit einem Siebeinsatz von 10 mm in der Hammermühle zerkleinert.

Die Durchführung von statistischen Versuchsreihen dient der optimalen Parameterfindung, um qualitativ hochwertige Produkte mit möglichst wenig Energieeintrag zu erzeugen. Aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Versuchsplänen fand Box-Behnken-Plan (SIEBERTZ 2010 und KLEPPMANN) Anwendung. Hierbei handelt es sich um einen reduzierten vollfaktoriellen 3^n-Plan (drei Einflussgrößen mit je drei Abstufungen n), der nichtlineare Zusammenhänge erkennen lässt. Die Reduktion beinhaltet das Wegfallen der Eckpunkte des Versuchsraumes welche sich allerdings über ein Regressionspolynom darstellen lassen. Somit reduziert sich der Versuchsumfang von 27 auf 13. Die Planung und Auswertung der statistischen Versuche wurde mit Hilfe der Software Design-Expert 12 realisiert. Anhand der berechneten p-Werte können Aussagen zur Signifikanz der Modellkoeffizienten abgeleitet werden, d.h. p-Wert ≤ 0,05) Des Weiteren werden die Bestimmtheitsmaße R^2 als formale Beurteilung der Anpassungsgüte der Regression angegeben.

Tabelle 9 zeigt die Faktoren (variierende Prozessparameter), die in drei Einstellungsstufen variiert wurden, sowie die Rohstoffparameter je Versuchsreihe.

Tabelle 9: Brikettierparameter der statischen Versuchsreihen

Konstante Rohstoffparameter je DoE		1. DoE	2. DoE	3. DoE
Ausgangsmaterial		Haferschalen	Haferschalen zerkleinert	Stroh zerkleinert
Zerkleinerung	-	keine	SM 6 mm-Sieb	HM 10 mm-Sieb
Wassergehalt	Ma.-%	11,3	10,5	9,2
Schüttdichte	kg/m³	198	231	98
Variierenden Faktoren: Prozessparameter				
Vorpressdruck	MPa	20/30/40		
Hauptpressdruck	MPa	150/175/200		
Haltezeit	MPa	2/4/6		

SM – Schneidmühle, HM - Hammermühle

Als Ergebnis der statistischen Versuchsplanung werden die physikalisch-mechanischen Briketteigenschaften (Abriebfestigkeit und Rohdichte) als Qualitätsmerkmale sowie der spezifische Energiebedarf als quadratische Funktionen graphisch in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Je Versuchspunkt (in Summe 13 je statistische Versuchsreihe) wurden 40 Briketts für analytische Untersuchung hergestellt. Die Ermittlung der Abriebfestigkeit in Anlehnung an die DIN EN ISO 17831-1 (DIN 2015a) durchgeführt wurde. Die vorhandene Abriebtrommel wurde mit 10 Briketts und einer Gesamtmasse von etwa 450 g bestückt und bei 500 U/min^{-1} beansprucht. Im Anschluss fand eine Absiebung mit einem 3,15 mm Sieb statt. Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte nach dem Prinzip der Stereometrie (Verhältnis Masse zu Volumen) wobei je Versuchspunkt 10 Briketts analysiert wurden (DIN EN ISO 18847) (DIN 2016).

Die Brikettierung von unzerkleinerten Haferschalen (1.DoE) stellt keine besonderen Herausforderungen dar. Die 40 Briketts je Versuchspunkt konnten kontinuierlich produziert werden. Die höchsten Rohdichten von 0,91 g/m^3 konnten bei hohen Haltezeiten (6s), hohen Vorpressdruck und geringstem Hauptpressdruck (150 MPa) erzielt werden (Abbildung 42). Die Abriebfestigkeit liegt bei dieser Parameterkombination bei etwa 64 Ma.-%. Die höchsten Abriebfestigkeiten von 66 Ma.-% konnten bei hohen Haltezeiten (6s), hohen Vorpressdruck und hohem Hauptpressdruck (200 MPa) erreicht werden (Abbildung 43). Der 2 Ma.-%-Unterschied kann auch auf die Anwendungsmethodik zurückgeführt werden. Für die Bestimmung der Brikettabriebfestigkeit ist eigentlich die DIN EN ISO 17831-2 (DIN 2015d) anzuwenden. Eine nach dementsprechend größere und speziell für Brikettabmaße konzipierte Abriebtrommel stand nicht zur Verfügung. Der Haupteinflussfaktor für den spezifischen Energieeintrag ist die Haltezeit – geringe Haltezeiten resultieren in geringen Energieeinträgen (Abbildung 44)

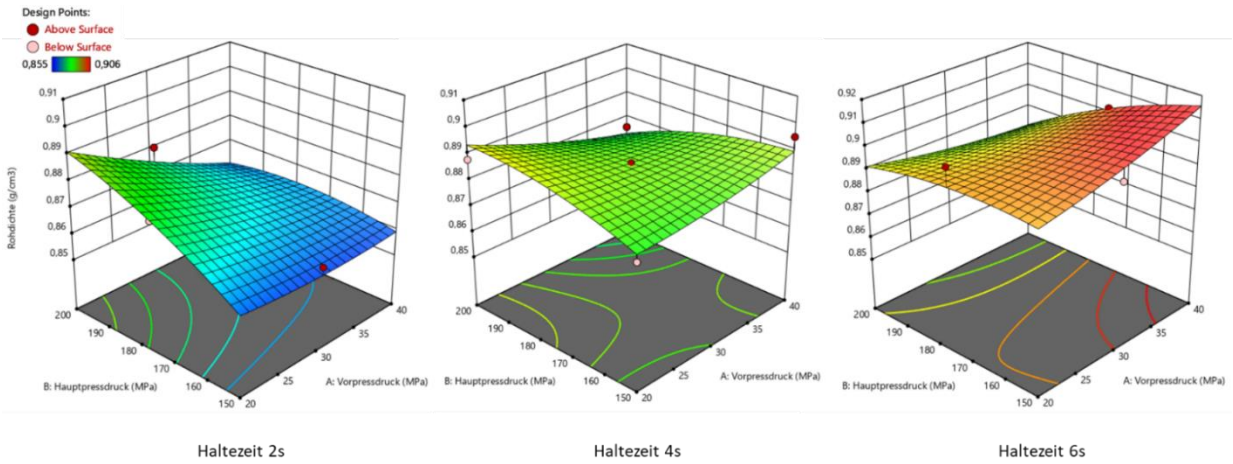


Abbildung 42: 1. DoE: Brikettierung von unzerkleinerten Haferschalen – Modellierte Rohdichte (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck)

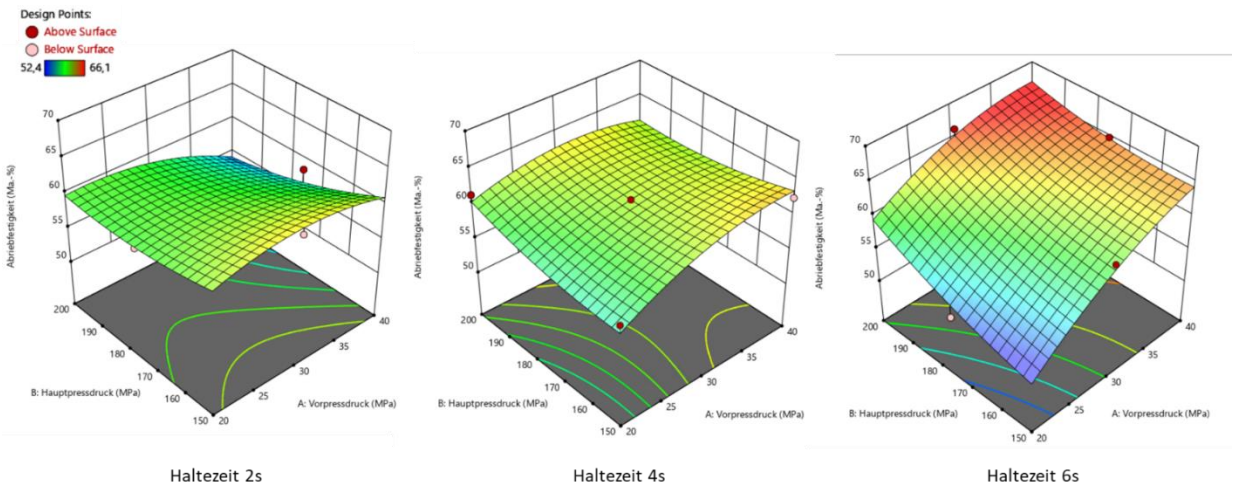


Abbildung 43: 1. DoE: Brikettierung von unzerkleinerten Haferschalen – Modellierte Abriebfestigkeit (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck)

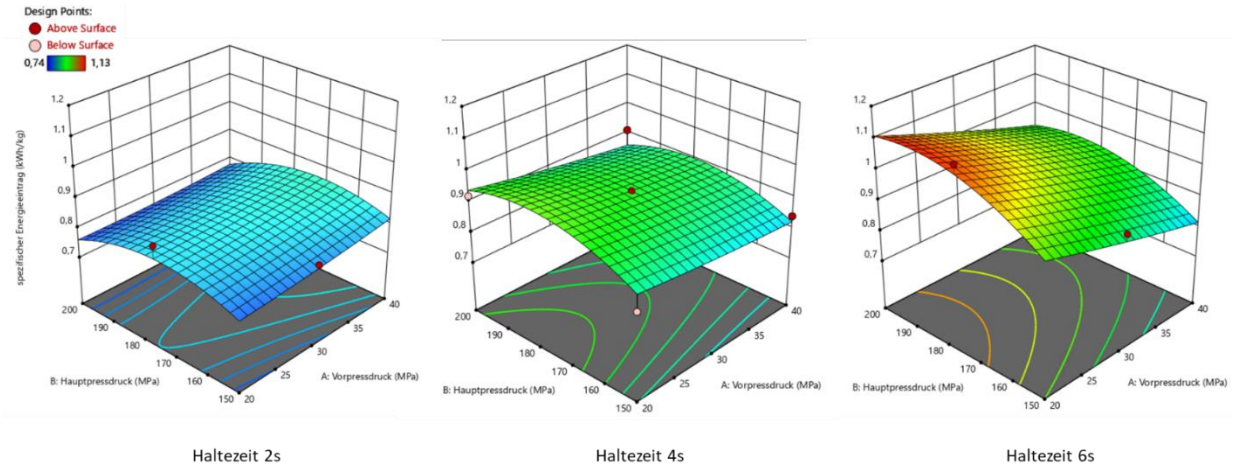


Abbildung 44: 1. DoE: Brikettierung von unzerkleinerten Haferschalen – Modellierter spezifischer Energieeintrag (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Haupt-pressdruck, Applikate Vorpressdruck)

Auch die Verarbeitung der zerkleinerten Haferschalen stellt keine besonderen Herausforderungen dar. Durch die Zerkleinerung können die Partikel unter Druck näher zusammengebracht werden, sodass generell höhere Rohdichten und höhere Abriebfestigkeiten erreicht werden konnten. Durch hohe Haltezeiten (6s) können auch hier die höchsten Rohdichten mit 0,98 g/m³ (Abbildung 45) und die höchsten Abriebfestigkeiten mit etwa 77 Ma.-% (Abbildung 46) erzielt werden. Dabei zeigt sich auch hier, dass die Haltezeit der größte Einflussparameter auf die spezifischen Energieeintrag hat – hohe Haltezeiten von 6s benötigen die meiste Energie (Abbildung 47).

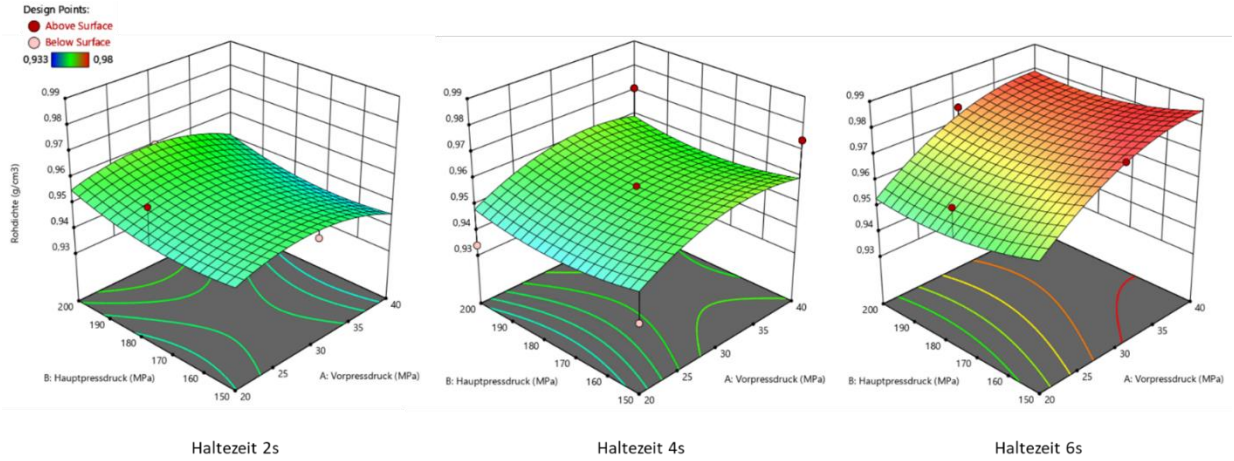


Abbildung 45: 2. DoE: Brikettierung von zerkleinerten Haferschalen – Modellierte Rohdichte (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck)

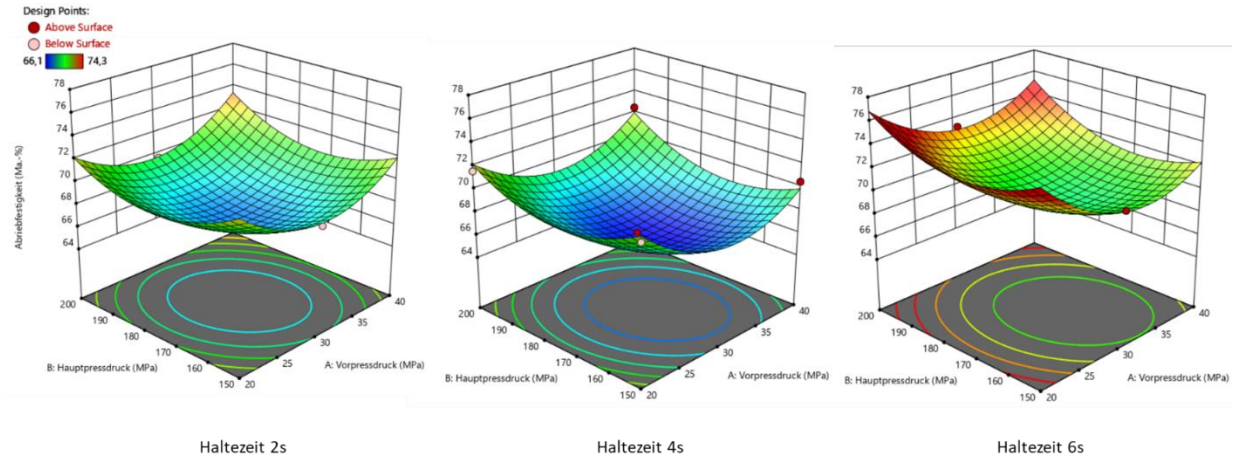


Abbildung 46: 2. DoE: Brikettierung von zerkleinerten Haferschalen – Modellierte Abriebfestigkeit (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applika-te Vorpressdruck)

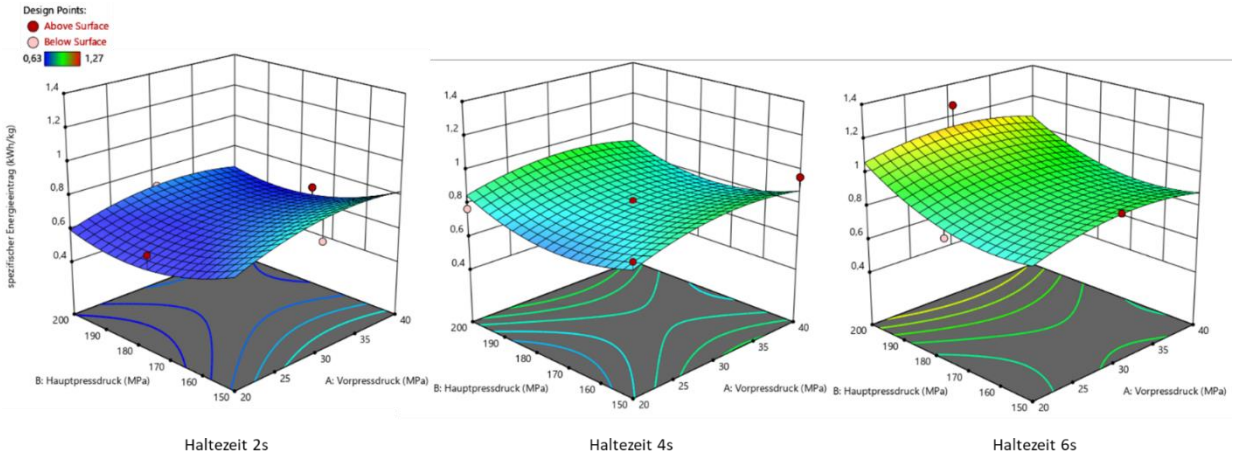


Abbildung 47: 2. DoE: Brikettierung von zerkleinerten Haferschalen – Modellierter spezifischer Energieeintrag (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpress-druck, Applikate Vorpressdruck)

Die Brikettierung von zerkleinertem Stroh gestaltete sich hinsichtlich Förderung in den Verdichtungsraum etwas schwierig. Es konnten nur 20 Briketts je Versuchspunkt kontinuiert produziert werden. Danach wurden das Material im Vorlagebehälter nachgeschoben und weiter 20 Briketts wurden hergestellt. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf (z.B. Veränderung der Geometrie und Drehzahl der Förderschnecke) bei der Förderung von gröberen Materialien.

Wie bei der Verdichtung der Haferschalen ist auch bei der Strohbrikettierung die Haltezeit der größte Einflussfaktor – hohe Haltezeiten von 6s erzielen hohe Rohdichten von 1 g/cm^3 (Abbildung 48) und hohe Abriebfestigkeiten von 94 Ma.-% (Abbildung 49). Allerdings resultieren auch hier die höchsten spezifischen Energieeinträge (Abbildung 50) – mit 2 – 3 kWh/kg auch deutlich höher als bei der Brikettierung der Haferschalen (unabhängig vom Zerkleinerungsgrad).

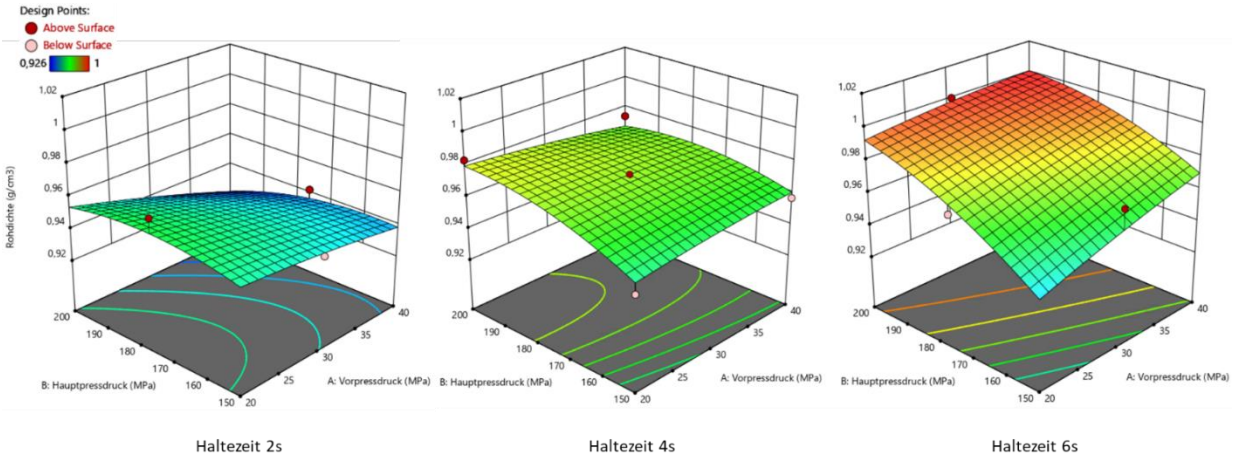


Abbildung 48: 3. DoE: Brikettierung von zerkleinertem Stroh – Modellierte Rohdichte (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck)

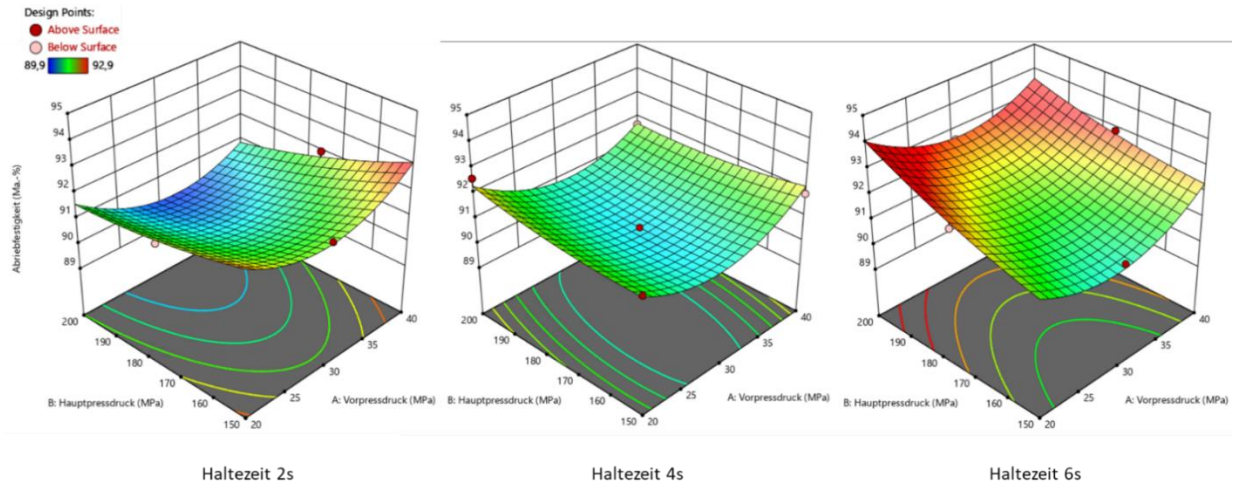


Abbildung 49: 3. DoE: Brikettierung von zerkleinertem Stroh – Modellierte Abriebfestigkeit (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck)

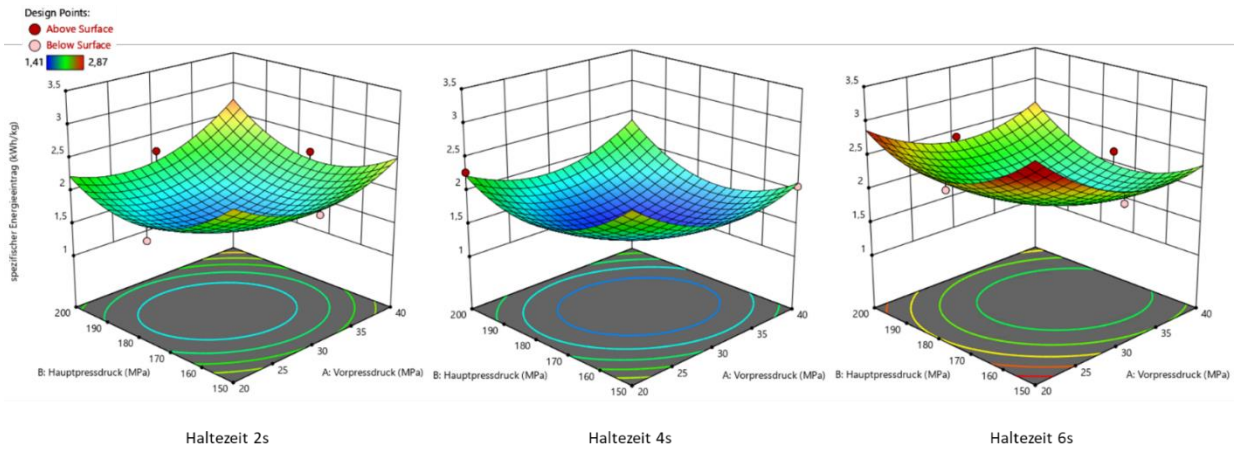


Abbildung 50: 3. DoE: Brikettierung von zerkleinertem Stroh – Modellierter spezifischer Energieeintrag (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck)

Den beschriebenen, größten Einflussfaktor Haltezeit spiegelt sich auch in der Betrachtung der p-Werte wider. Bei allen Betrachtungen ist der p-Wert immer kleiner 0,05. Bei den Faktoren Haupt- und Vorpressdruck liegt ist der p-Wert größer 0,05 und zeigt damit den geringeren Einfluss bei gewählten Modell R^2 liegt zumeist zwischen 0,8 und 0,9 und zeigt damit eine gute Anpassungsgüte des gewählten quadratischen Modellansatzes. Dennoch sollten in Zukunft andere Versuchspläne getestet werden.

Mit großen zeitlichen Verzögerungen (Anfang 2022) wurde des Weiteren vom Pressenhersteller ATNA Industrial Solutions GmbH ein 20 mm-Presswerkzeug zur Herstellung kleineren Briketts geliefert, eingebaut und anschließend getestet. Eine Zeichnung mit Abmaßen ist in Abbildung 51(links) zu sehen. Allerdings hat es bereits bei den ersten Testläufen eine Deformation des konzipierten Pressstempel gegeben, sodass er nicht weiterverwendet werden konnte. Abbildung 51zeigt deutlich die plastische Verformung der Querstege. Infolgedessen wird ein neuer Vorschlag für einen Pressstempel für kleinformatigen Briketts vom Hersteller erarbeitet. Dieser ist nicht mehr Gegenstand des Projektes.

Abbildung 51: links: Zeichnung Kleiner Press-stempel (5 x 20 mm) für Brikettieranlage GreenLine S50 am DBFZ (©ATNA:2022), rechts: Deformation am kleiner Pressstempel (5 x 20 mm) (©DBFZ:2022)

Brikettanalytik (IKTS)

Folgende Analysewerte konnten für 50 mm Strohbriketts ermittelt werden:

- TR= 90,5 %, oTR= 92,8 %
- Max. Wasserhaltevermögen
  - 24 h einweichen = 395 % der Frischmasse
  - 48 h einweichen = 460 % der Frischmasse
- Biogasertrag
  - Biogas: 502 NL/kg oTRzu
  - Methan: 258 NL/kg oTRzu (51,3 %)
- Wasserauflösegeschwindigkeit
  - Kontinuierliche Auflösung der stark verdichteten Briketts über die Versuchszeit:

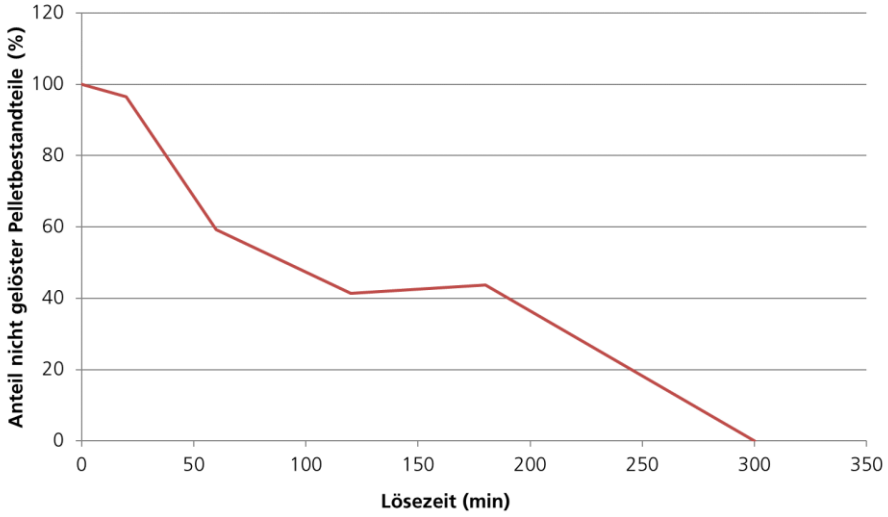


Abbildung 52: Wasserlösegeschwindigkeit für 50 mm Strohbriketts

Insgesamt wurden vergleichbare Werte wie für die Pellets und Ausgangssubstraten erhalten.

Für die Partikelgröße konnten folgende Aussagen getroffen werden:

Der Grobstoffanteil liegt erwartungsgemäß höher als bei Pellets, da bei der Pelletierung stärker zerkleinert wird. Aber die mittlere Dicke der Fasern wird kaum verändert (Abbildung 53).

Die mittlere Länge der Fasern ist etwa doppelt so groß wie bei den Pellets, da vor allem längere Fasern (> 10.000 µm) bei der Pelletierung zerkleinert werden (siehe maximal Länge in Abbildung 54)

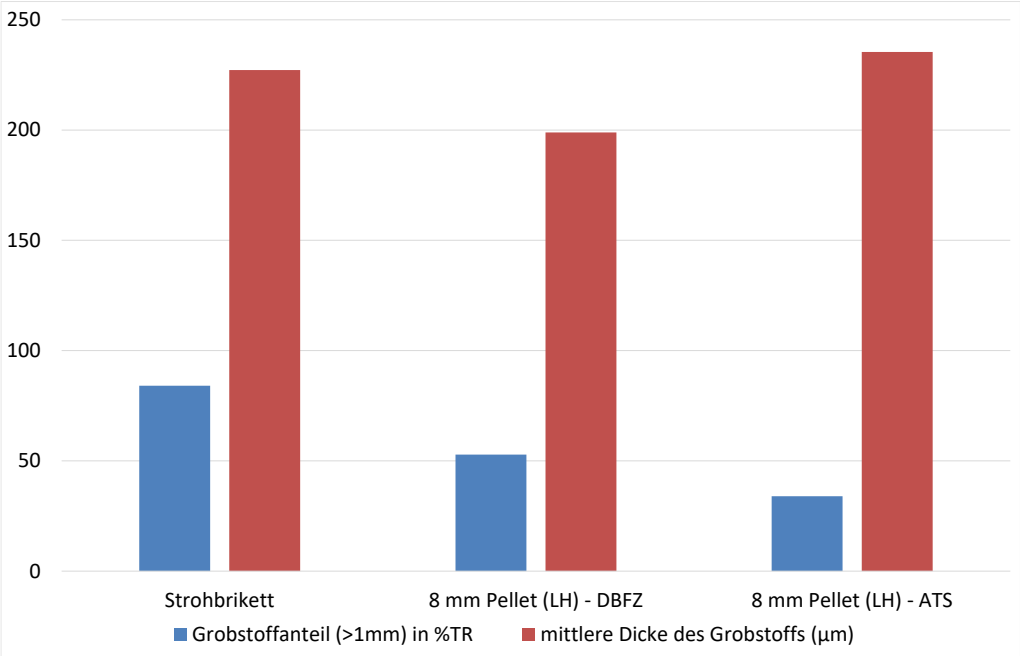


Abbildung 53: Grobstoffanteil und mittlere Dicke der Grobstoffe für 50 mm Strohbriketts

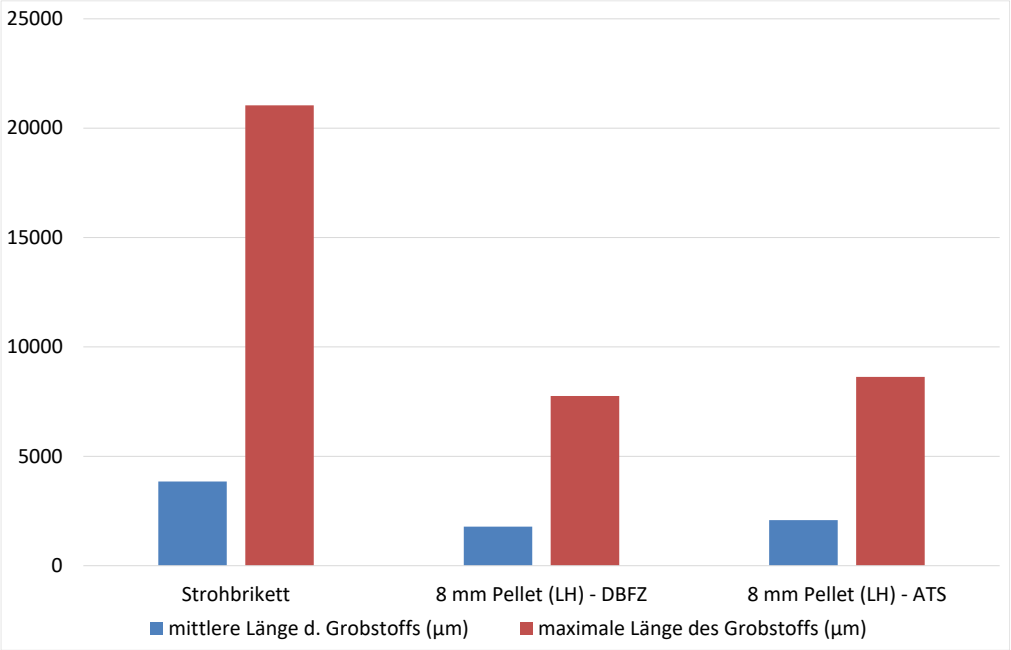


Abbildung 54: mittlere und maximal Länge der Grobstoffe für 50 mm Strohbriketts

Ursprünglich geplante Tomographieversuche zur Einmischung der Briketts beim IKTS konnten aufgrund der Größe der Briketts nicht durchgeführt werden, da dies zur Beschädigung der Laborrührorgane geführt hätte.

6.2 Zwischennutzung als Einstreumatte und Einfluss auf den Biogasertrag

6.2.1 Pelletproduktion – Großchargen

Für die Versuche zur Einstreu im Stall wurden durch das Konsortium zusätzlich zu kommerziellen Referenzpellets aus 100 % Stroh drei weitere Mischungen aus Reststoffen ausgewählt und getestet:

1. Pellets aus einer Mischung von 50 % zerkleinertes Stroh und 50 % Reststoffe aus dem Landhandel (Sz + LH)

2. Pellets aus 100 % Reststoffen aus dem Landhandel (100% LH)

3. Pellets aus 100 % Dinkelspelzen

Nachdem Dinkelspelzen auf Grund der Ausgangseigenschaften zunächst nicht weiter betrachtet wurden (sondern Haferschalen), wurden diese beim praktischen Einstreuversuch doch wieder eingesetzt. Ursache hierfür war zum einen, dass die kleintechnischen Versuche gezeigt hatten, dass auch vergleichsweise ungünstige Substrate (wie Haferschalen) durch die Pelletierung eine deutlich verbesserte Saugfähigkeit und einen erhöhten Gasertrag erzielen. Zum anderen besitzen Dinkelspelzen hinsichtlich der Anfallmenge eine zunehmende Bedeutung im deutschen Markt und lohnen sich als Einsatzstoff deutlich mehr als der Reststoff Haferschalen.

<u>Pelletierung</u>

Für den **ersten Großversuch** mit 20 t wurde die Mischung aus Stroh (vorzerkleinert) und Getreideresten aus dem Landhandel im Mischungsverhältnis 1:1 versetzt mit Natronlauge gewählt. Die Gesamtmenge wurde im Laufe des Versuchs auf 40 t erhöht, um eine bessere Datenlage in den nachgeschalteten Versuchsreihen zu erhalten. Der Zielgehalt an NaOH im fertigen Pellet sollte 2,5 % betragen. Der Versuch wurde aufgeteilt in zwei Chargen. Die erste Charge wurde mit einer **6 x 72 mm Matrize** verpelletiert. Dabei war zu beobachten, dass der spezifische Stromverbrauch bei der Pelletierung mit durchschnittlich **21,7 kWh/$t_{Pellets}$** relativ hoch lag.

Die vorhomogenisierte Mischung wurde ohne den Einsatz einer weiteren Hammermühle nach dem Aufmahlen des Strohs mittels mobiler Zerkleinerungstechnik (fahrbare Hammermühle Haybuster H-1130 - Abbildung 55) verpelletiert. Das Aufmahlen mittels mobiler Hammermühle hatte sich als deutlich effektiver herausgestellt als die Zerkleinerung mittels des firmeneigenen Schredders (Jenz AZ55). Aus diesem Grund wurde dann auch auf den Einsatz der im Pelletwerk integrierten Hammermühle zunächst verzichtet, um den Energieeintrag im Pelletierprozess zu reduzieren.

Abbildung 55: Vorzerkleinerung von Stroh in einen Abrollcontainer für die Pelletierung von der Mischung von Stroh und Getreideresten aus dem Landhandel

Für die zweite Charge wurde wieder eine **8 x 52 mm Matrize** gewählt. Hierbei konnte der Energieeintrag auf **15,51 kWh/t** reduziert werden. Da die erzeugten Pellets ebenfalls eine annehmbare Härte aufwiesen, wurde diese Konfiguration weiter beibehalten, um die zweite Großcharge Stroh-Getreiderestpellets für den Einsatz bei den Projektpartnern zu erzeugen.

Auszüge aus der Datenerfassung und Aufbereitung für die jeweiligen Pelletierchargen sind im Anhang aufgelistet. Neben den Analysen, welche seitens der Projektpartner IKTS und DBFZ durchgeführt wurden, sind im ATS-Labor kontinuierlich orientierende Analysen durchgeführt worden. Im Folgenden sind diese beispielhaft für die ersten Großchargenversuche dargestellt.

Tabelle 10: Schüttdicht und TR-Gehalt für die einzelnen Versuchstage

Datum	Matrize	Pressverhältnis	Pellet-Probe	Schüttdichte:	Trockensubstanz:
			Mischung 50/50 (Getreidekaff + Stroh)	140 g/l	87,15 %-TS
08.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 1	610 g/l	89,59 %-TS
09.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 2	keine Analyse, da keine Veränderung der Einstellungen	
10.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 3	650 g/l	89,59 %-TS
11.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 4	640 g/l	87,27 %-TS
14.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 5	600 g/l	87,28 %-TS
15.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 6	620 g/l	87,35 %-TS
16.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 7	520 g/l	86,05 %-TS
17.12.2020	8 mm	8 x 52mm	Probe 8	460 g/l	85,12 %-TS
18.12.2020	8 mm	8 x 52mm	-		
21.12.2020	8 mm	8 x 52mm	-		
20.01.2021	6 mm	6 x 70mm	Probe 9 (9.30 Uhr)	520 g/l	85,42 %-TS
			Probe 10 (16.00 Uhr)	540 g/l	87,78 %-TS
21.01.2021	6 mm	6 x 70mm	-		
26.01.2021	6 mm	6 x 70mm	Probe 11	520 g/l	84,34 %-TS
27.01.2021	6 mm	6 x 70mm	Probe 12	440 g/l	78,72 %-TS
28.01.2021	6 mm	6 x 70mm	Probe 13	520 g/l	84,77 %-TS
29.01.2021	6 mm	6 x 70mm	Probe 14	530 g/l	87,47 %-TS
01.02.2021	6 mm	6 x 70mm	Probe 15	520 g/l	86,07 %-TS

Tabelle 11: Na- und Kalium-Gehalt

Datum	Matrize	Pressverhältnis	Natrium als Na_2O		Kalium als K_2O		NaOH-Gehalt:
08.12.2020	8 mm	8 x 52mm	0,027%		0,91%		0,035%
09.12.2020	8 mm	8 x 52mm					
10.12.2020	8 mm	8 x 52mm	0,075%		0,91%		0,097%
11.12.2020	8 mm	8 x 52mm	0,40%		1,22%		0,51%
14.12.2020	8 mm	8 x 52mm	0,77%		1,06%		1,00%
15.12.2020	8 mm	8 x 52mm	0,91%		1,12%		1,17%
16.12.2020	8 mm	8 x 52mm	1,49%		0,55%		1,92%
17.12.2020	8 mm	8 x 52mm	1,28%		0,93%		1,65%
18.12.2020	8 mm	8 x 52mm					
21.12.2020	8 mm	8 x 52mm					
20.01.2021	6 mm	6 x 70mm	0,19%		0,80%		0,25%
			0,10%		0,89%		0,13%
21.01.2021	6 mm	6 x 70mm					
26.01.2021	6 mm	6 x 70mm	1,13%		0,81%		1,46%
27.01.2021	6 mm	6 x 70mm	2,13%		0,69%		2,74%
28.01.2021	6 mm	6 x 70mm	2,12%		0,84%		2,74%
29.01.2021	6 mm	6 x 70mm	1,20%		0,58%		1,55%
01.02.2021	6 mm	6 x 70mm	1,39%		0,72%		1,79%

Man kann an dieser Stelle die kontinuierliche Erhöhung des NaOH-Gehaltes während der Pelletierläufe deutlich erkennen. Bei den Schüttdichten ist ein deutlicher Unterschied zwischen der hohen Verdichtung mit der 6 x 72 mm Matrize und der vergleichsweisen geringen Verdichtung mittels der 8 x 52 mm Matrize zu erkennen. Dabei sind die Pellets auch bei der 8 mm-Variante optisch sehr gut verpresst, was sicherlich auch mit dem Einsatz der Natronlauge als Aufschluss- und Bindemittel zusammenhängt. Beobachten kann man ebenfalls, dass der Trockengehalt mit der Zunahme der NaOH-Konzentration zunimmt. An dieser Stelle findet man auch die Schwierigkeit wieder, die Balance aus NaOH-Aufschluss und Pelletierbarkeit in der Anlage herzustellen. Dies war ebenfalls mit der 8 x 52 mm Matrizenvariante deutlich besser darzustellen als mit der 6 mm-Variante, da mit dieser der gewünschte NaOH-Gehalt von 2,5 % kaum bzw. nicht erreicht werden konnte.

Für den **zweiten Großversuch** mit insgesamt 30 t Produktionsmenge, wovon 22 t an den Projektpartner Agrargenossenschaft Bergland ausgeliefert wurden, wurden Getreidereste aus dem Landhandel mit Natronlauge versetzt verpelletiert. Der Zielgehalt an NaOH im fertigen Pellet sollte ebenfalls 2,5 % betragen. Die Charge wurde mit einer 8 x 52mm Matrize verpelletiert. Dabei war zu beobachten, dass der spezifische Stromverbrauch bei der Pelletierung mit durchschnittlich 9,47 kWh/$t_{Pellets}$ sehr niedrig lag im Vergleich zu den Mischungen mit Stroh. In Summe wurden 284 kWh für die Produktion von 30t Pellets verbraucht. Auch der Verzicht auf den Einsatz der Hammermühle wird diesen geringen Stromverbrauch sicherlich mit beeinflusst haben. Das eingelagerte Material wurde ohne den Einsatz einer weiteren Hammermühle verpelletiert, da dieses von der Struktur her fein genug war, um durch eine 8 mm Matrize verpelletert zu werden.

Für die **dritte Charge** aus Dinkelspelzen wurde erneut eine 8 x 52 mm Matrize gewählt. Hierbei wurde der Energieeintrag mit 11,01 kWh/t leicht erhöht. Dies liegt vermutlich and der Struktur der Dinkelschalen, sowie dem fehlenden stärkehaltigen Korn-Anteil in diesem Material im Vergleich zu dem Getreideresten aus dem Landhandel. Zudem war der Wassergehalt in den Dinkelschalen mit

12% um drei Prozent niedriger als bei den Getreideresten, was den Pelletierprozess ebenfalls ein wenig bremst.

Bei beiden Großchargen sind jedoch formstabile, lagerfähige Pellets hergestellt worden, welche dann als Einstreumatte bzw. anschließend als Biogaseinsatzstoff bei dem Projektpartner in Clausnitz eingesetzt werden konnten. Auch gab es bei beiden Produktionsdurchgängen keinerlei größere Probleme bzw. Auffälligkeiten während des Produktionsprozesses.

Lediglich das Schüttgewicht mit im Durchschnitt ca. 450 g/l ist bei beiden Großchargen relativ gering im Vergleich zu herkömmlichen Stroh-, Holzpellets o.ä.. An dieser Stelle stand für uns jedoch nicht die Pressfestigkeit, sowie die Pelletdichte im Vordergrund, sondern ein handelbares Produkt, welches sich auch als Einstreumaterial hinsichtlich der Saugfähigkeit einsetzen lässt und unter energetischen sowie ökonomischen Gesichtspunkten herstellen lässt. Der vergleichsweise geringe Energieaufwand für das verpressen sowie die positiven Berichte hinsichtlich der Verwendbarkeit der Pellets durch die Projektpartner spricht an dieser Stelle für die verwendete Herstellungskonfiguration in der Pelletieranlage.

Während der Pelletierung der Großchargen wurden kontinuierlich Proben gezogen und auf Ihre mechanischen und teilweise chemischen Eigenschaften untersucht. Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigen Eingangsmaterial und Pellets für Großcharge 2 und 3. Die dunkle Einfärbung der Pellets rührt aus dem Bedüsen der Rohstoffe mit Natronlauge im Durchlaufmischer her.

Abbildung 56: Eingangsmaterial für die Getreidreste aus dem Landhandel links und rechts die fertigen Pellets

Abbildung 57: Eingangsmaterial für die Dinkelspelzenpellets links und rechts die fertigen Pellets

Im Anhang befinden sich aufgezeichnete Daten aus der Herstellung von Pelletierchargen aus Dinkelspelzen bzw. Getreideresten aus dem Landhandel, welche mittels NaOH aufgeschlossen wurden.

Nachfolgend die Wiedergabe von Auszügen der chemischen und physikalischen Parameter während des Durchgangs der Pelletierung von 8mm Pellets aus Dinkelspelzen sowie Getreideresten aus dem Landhandel:

Produktion von Pellets aus Getreiderest Landhandel

Pellets - Probenahme und Analysen

Substrat: **Getreidekaff**

Datum	Matrize	Pellet-Probe	Schüttdichte:	Wassergehalt:
11.03.2021	8 mm	Probe 1	440 g/l	12,65%
12.03.2021	8 mm	-		
16.03.2021	8 mm	Probe 2 (I NaOH 80/20)	500 g/l	13,60%
		Probe 3 (II NaOH 60/20)	500 g/l	12,84%
17.03.2021	8 mm	-		
18.03.2021	8 mm	-		
19.03.2021	8 mm	Probe 4	440 g/l	17,64%
23.03.2021	8 mm	Probe 5	380 g/l	22,47%
24.03.2021	8 mm	Probe 6	390 g/l	14,83%
25.03.2021	8 mm	-		
Durchschnitt:			**442 g/l**	**15,67%**

Datum	Matrize	Natrium als Na_2O	Kalium als K_2O	NaOH-Gehalt:
11.03.2021	8 mm	0,46%	0,83%	0,59%
12.03.2021	8 mm			
16.03.2021	8 mm	1,44%	0,53%	1,86%
		1,62%	0,39%	2,08%
17.03.2021	8 mm			
18.03.2021	8 mm			
19.03.2021	8 mm	1,95%	0,77%	2,52%
23.03.2021	8 mm	4,00%	0,75%	5,16%
24.03.2021	8 mm	1,03%	0,79%	1,33%
25.03.2021	8 mm			
Durchschnitt:		**1,75%**	**0,68%**	**2,26%**

Produktion von Pellets aus Dinkelschalen

Pellets - Probenahme und Analysen

Substrat: **Dinkelschalen/-spelzen**

Datum	Matrize	Pellet-Probe	Schüttdichte:	Wassergehalt:
		Dinkelspelze	150 g/l	10,51%
07.04.2021	8 mm	Probe 1	480 g/l	15,72%
08.04.2021	8 mm	Probe 2	570 g/l	10,13%
09.04.2021	8 mm	-		
16.04.2021	8 mm	Probe 3 (S: 15% NaOH 20/24)	600 g/l	9,80%
		Probe 4 (S: 25% NaOH 20/40)	580 g/l	10,07%
21.04.2021	8 mm	Probe 5	580 g/l	10,88%
22.04.2021	8 mm	Probe 6	290 g/l	16,01%
23.04.2021	8 mm	Probe 7	390 g/l	13,32%
28.04.2021	8 mm	Probe 8	370 g/l	12,31%
05.05.2021	8 mm	Probe 9	420 g/l	12,43%
11.05.2021	8 mm	Probe 10	460 g/l	12,42%
18.05.2021	8 mm	Probe 11 (S15 20/40)	530 g/l	11,03%
		Probe 12 (S20 20/50)	490 g/l	11,92%
19.05.2021	8 mm	Probe 13	520 g/l	10,61%
20.05.2021	8 mm	Probe 14	420 g/l	12,45%
21.05.2021	8 mm	Probe 15	430 g/l	12,36%
Durchschnitt:			**455 g/l**	**12,00%**

Datum	Matrize	Natrium als Na_2O	Kalium als K_2O	NaOH-Gehalt:
07.04.2021	8 mm	1,76%	0,61%	2,26%
08.04.2021	8 mm	1,69%	0,61%	2,18%
09.04.2021	8 mm			
16.04.2021	8 mm	0,93%	0,49%	1,20%
		1,49%	0,45%	1,91%
21.04.2021	8 mm	1,42%	0,46%	1,83%
22.04.2021	8 mm	1,77%	0,47%	2,29%
23.04.2021	8 mm	1,64%	0,46%	2,12%
28.04.2021	8 mm	1,72%	0,45%	2,22%
05.05.2021	8 mm	2,11%	0,49%	2,72%
11.05.2021	8 mm	1,25%	0,49%	1,62%
18.05.2021	8 mm	1,76%	0,47%	2,27%
		1,53%	0,37%	1,97%
19.05.2021	8 mm	1,03%	0,32%	1,33%
20.05.2021	8 mm	1,71%	0,56%	2,21%
21.05.2021	8 mm	1,68%	0,56%	2,17%
Durchschnitt:		**1,57%**	**0,48%**	**2,02%**

Analyse

Durch den Projektpartner AG Bergland Clausnitz wurden auf Grundlage eines gemeinsam abgestimmten Beprobungsplanes über die gesamte Versuchsdauer Proben genommen. Die Proben wurden durch IKTS regelmäßig vor Ort abgeholt und analysiert.

In Abbildung 58 sind die **TR- und oTR-Gehalte** der eingesetzten Pellets sowie die Zeiträume für die einzelnen Chargen dargestellt. Bezüglich des Feststoffgehaltes weisen die Pellets verlässlich hohe (trockene) Werte von etwa 90 % (+/- 5 %Pkt.) auf und eigneten sich daher sehr gut für den Einsatz als Einstreu. Leichte Schwankungen im Gehalt an organischen Feststoffen (oTR) begründen sich durch die z.T. schwankenden NaOH-Zugabe sowie mehr oder weniger Anteil an Kornresten im Getreideausputz. Ein signifikanter Eigenschaftsunterschied zwischen den einzelnen Chargen ist anhand des TR-/oTR-Gehaltes nicht festzustellen.

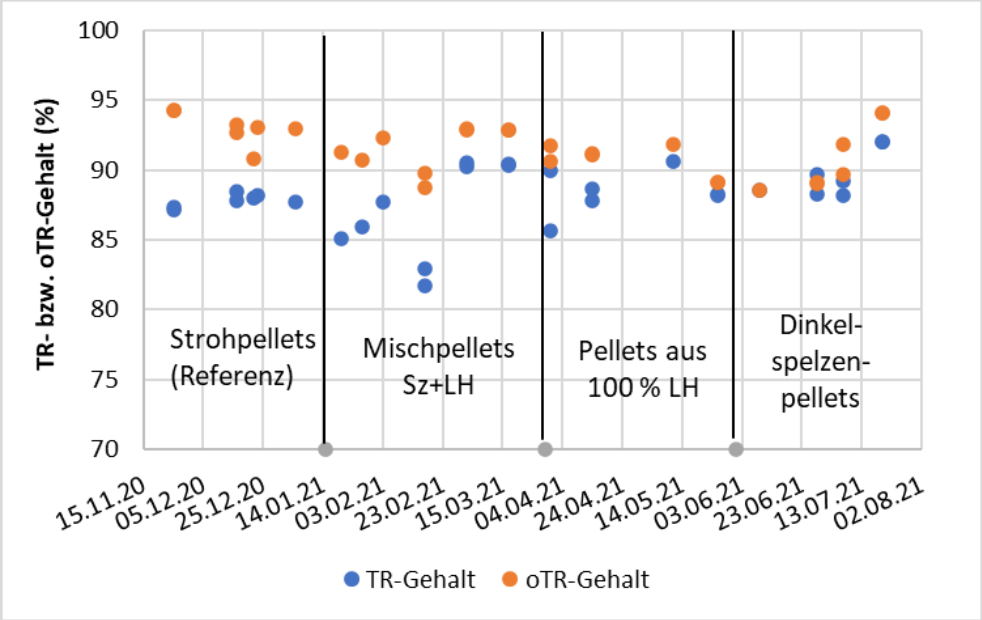


Abbildung 58: TR, oTR der verschiedenen Pelletchargen über die Versuchsdauer – Praxisversuch

Aus TR-Gehalt und Partikelgrößenverteilung ergibt sich ein **Wasserhaltevermögen**, welches in Abbildung 59 dargestellt ist. Für die Referenzpellets (Stroh, im Bild links) konnte ein sehr gutes Wasserhaltevermögen ermittelt werden, welches etwa 50 % über dem Ausgangswert für unbehandeltes Stroh lag. Für die Mischpellets aus Stroh und Reststoffen des Landhandels wurden für die 8 mm Pellets ähnlich gute Werte erreicht. Die anfangs hergestellten 6 mm Pellets aus der gleichen Mischung lagen deutlich schlechter.

Für Pellets aus 100 % Landhandel-Reststoffen konnten aufgrund von Material-Schwankungen Wasseraufnahmen zwischen 400 und 500 % erreicht werden, was für einen Einsatz als Einstreu ebenfalls sehr gut Werte darstellten.

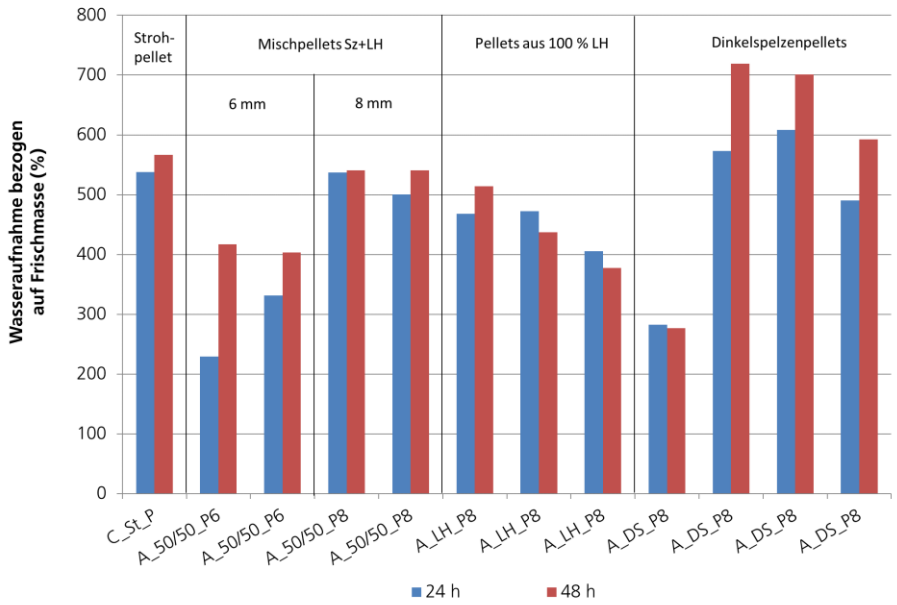


Abbildung 59: Maximales Wasserhaltevermögen für die verschiedenen Pelletchargen – Praxisversuch

Die getesteten Pellets aus Dinkelschalen zeigten sehr inkonsistente Ergebnisse. So wurde eine Probecharge mit knapp 300 % Wasserhaltevermögen und einer Steigerung gegenüber dem unbehandelten Ausgangsmaterial um etwa 50% bewertet. Dies scheint im Vergleich zu Haferschalen und Stroh (mit gleichen Steigerungsraten) plausibel zu sein. Jedoch wurde zum Ende der Versuche ein Großcharge mehrfach beprobt und bewertet, welche unplausibel hohe Wasserhaltevermögen von z.T. deutlich über 500 % aufwies. Eine Erklärung könnte ein erhöhter Anteil an Kornresten sein, welche über Quelleffekte viel Wasser halten können. Die hohen Messwerte für Dinkelspelzenpellets sind daher mit Vorsicht zu betrachten.

Für einen direkten Einsatz der Pellets in Biogasfermentern spielt die **Geschwindigkeit der Auflösung** eine Rolle. Diese Kenngröße ist in Abbildung 60 für die verschiedenen Praxischargen dargestellt. Dabei wurden die Pellets analog der Beschreibung unter 6.1.2 eingeweicht und gesiebt. Alle eingesetzten Pellets wiesen eine gute bis sehr gute Auflösungsgeschwindigkeit in Wasser auf. Lediglich die Pellets aus 100 % Landhandel benötigen zum Teil etwas länger, wobei es sich um die letzten 20 bis 30 % der noch nicht aufgelösten Pelletmasse handelte. Die Auflösezeiten in anderen Medien (wie Gülle oder höher viskosem Modellsubstrat) werden in Abschnitt 6.3.1 bewertet.

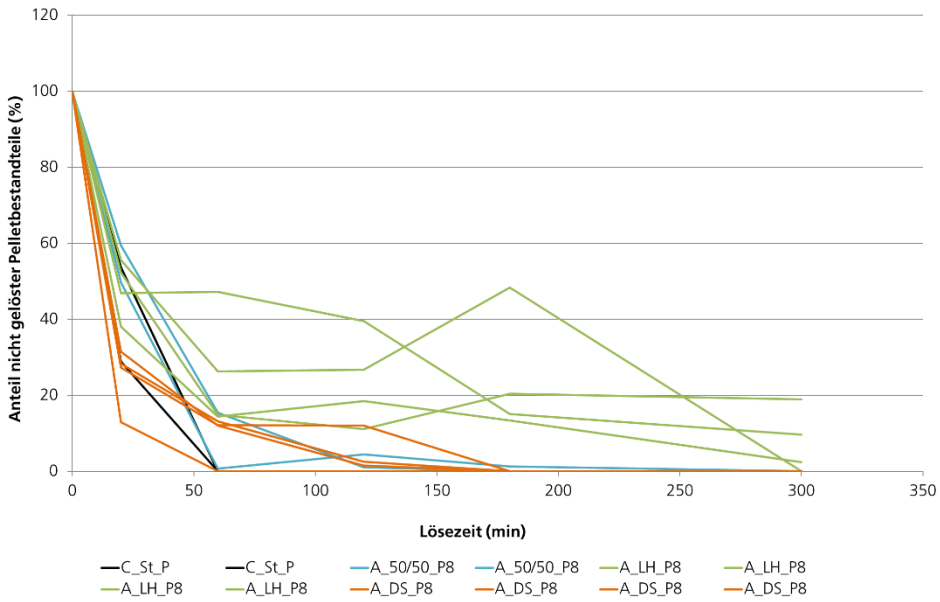


Abbildung 60: Wasserlösegeschwindigkeit in Wasser für die verschiedenen Pelletchargen - Praxisversuch

In Abbildung 61 sind pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit für die beprobten Einstreupellets dargestellt. Gegenüber den Referenzpellets aus Stroh weisen die Mischpellets durch die Behandlung mittels Natronlauge eine höhere Leitfähigkeit und einen höheren pH-Wert auf. Allerdings schwanken die Werte sehr stark und liegen zum Teil niedriger als aus den Vorversuchen zu erwarten war. Die Dinkelspelzenpellets haben offensichtlich im Vergleich die höchste NaOH-Dosierung erhalten, aber auch mit einer davon stark abweichenden Probe. Offensichtlich ist eine konstante Zugabe und homogene Vermischung von NaOH im großtechnischen Pelletierbetrieb anspruchsvoll und sollte zukünftig evtl. weiter technisch optimiert werden.

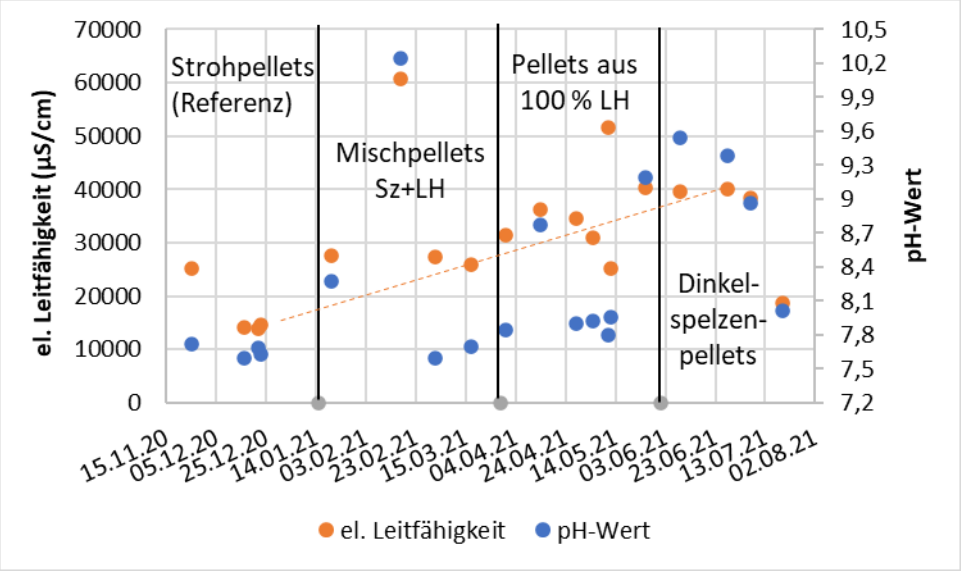


Abbildung 61: Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert der Pelletchargen - Praxisversuch

Der Einsatz von NaOH aber auch der Einsatz von Co-Substraten mit z.B. Kornanteilen spiegelt sich im Anstieg des Natrium- und Ammonium-Gehaltes der analysierten Einsteupellets wider (Abbildung 62). Die Messwerte schwanken z.T. sehr stark. Ursache könnten die Inhomogenität der genutzten Reststoffe sowie eine schwankende NaOH-Zugabe gewesen sein.

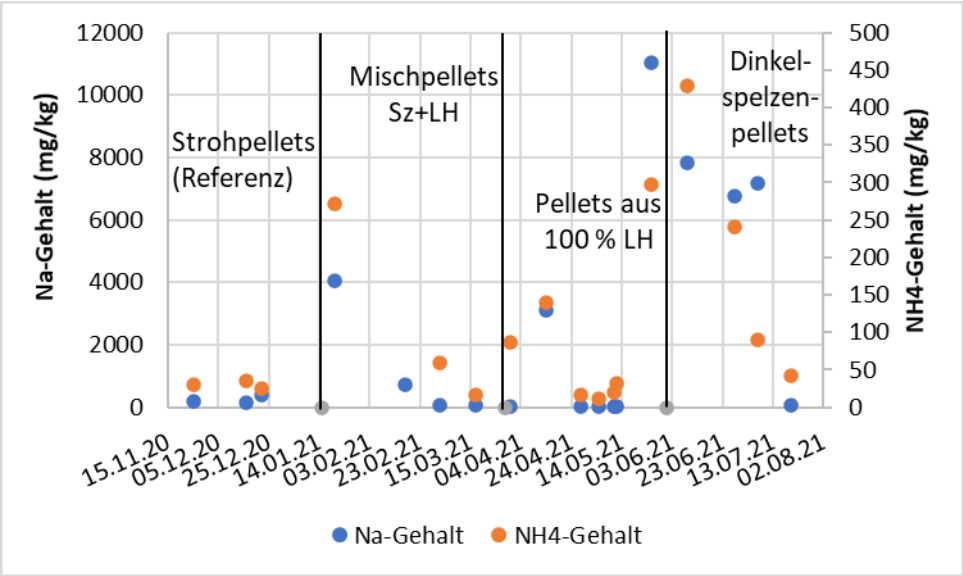


Abbildung 62: Na- und NH_4-Gehalt für die Einstreupellets - Praxisversuch

Die Analysen der Biogaserträge der Pellets werden gemeinsam mit den Erträgen der im Stall entstehenden Substrate (Festmist, Gülle) im Abschnitt 6.2.3 dargestellt und bewertet.

6.2.2 Einstreuversuche

Der Grundlegende Gedanke Strohpelltes als Liegeboxeneinstreu einzusetzen basiert auf den Ansprüchen an die Liegeboxenqualität einer Milchkuh. Voraussetzung für eine erfolgreiche Milchkuhhaltung ist, Voraussetzungen zu schaffen, die der Kuh möglichst lange Liegezeiten je Tag (>12h) ermöglichen. Dafür muss die Liegebox möglichst bequem sein. Die Eigenschaften von Strohpellets bringen ein weiches Liegebett hervor. Durch die Quelleigenschaft beim Kontakt mit Wasser sowie durch mechanische Zerkleinerung bildet sich aus den einzelnen Pellets eine bequeme Liegematratze. Darüber hinaus ist das Handling mit Strohpellets sehr einfach und reduziert damit den Arbeitszeitaufwand zur Pflege der Liegeboxen. Das hohe Quellvermögen sichert auch beim Einsatz in einem Tiefstreustall geringeren Rohstoffverbrauch gegenüber dem Einsatz von Langstroh. Lagerung, Transport und Verteilung von Strohpellets gestaltet sich sehr einfach, besonders, da der Kompaktierungsgrad sehr hoch ist (Abbildung 63).

Abbildung 63: Pelletlagerung (kompakt, staubarm)

Tiefliegeboxen

Ab November 2020 wurde mit der Referenzeinstreu „Strohpellets ohne Zuschlagstoffe“ die Datenaufnahme begonnen. Die normalen Strohpellts weisen eine sehr gute Saugkraft auf und es kommt zu einer ordentlichen Matratzenbildung in der Liegebox. Eine Herausforderung bleibt bei dieser Einstreu die richtige Dosierung, um die Viskosität entsprechend der Anforderungen von Güllekanälen und Güllepumpen zu gewährleisten. Hier hat sich folgende Einstreumenge als funktionsfähig erwiesen:

1,6 kg Strohpellets/Liegebox*Tag entsprechend 22,5 kg in 14 Tagen je Liegebox

Die optimale Einstreumenge wurde in einer Vorbilanzierung wie folgt festgestellt:

Anzahl Tiefliegeboxen mit Strohpelletseinstreu	[Stk.]	279
Ø Anzahl Milchkühe im Bilanzierungszeitraum	[Stk.]	279
kalkulatorischer Gülleanfall	[m³/Tier*a]	21
Bilanzierungsbeginn	[Datum]	21.04.2020
Bilanzierungsende	[Datum]	30.07.2020
Bilanzierungsumfang	[d]	100
Gülleanfall im Bilanzierungszeitraum	[m³]	1.605
	[m³/d]	16
Verbrauch Strohpellets im Bilanzzeitraum	[kg]	45.000
Spezifischer Verbrauch Strohpellets	[kg/d]	450
	[kg/Liegebox*d]	1,6
	[kg/Tier*d]	1,6
	[kg/m³ Gülle]	28,0
Preis Strohpellets	[€/t]	130
Spezfische Kosten Einstreu	[€/Kuh*d]	0,2

Bei dieser Einstreumenge konnte ein gutes Liegeverhalten festgestellt werden. Die Tiere liegen stets trocken und es ist immer ausreichend Material vorhanden. Der Austrag ist konstant. Bei zu hoher Dosierung kommt es rasch zu Verstopfungen im Güllekanal. Beim Versuchsstall handelte es sich um einen dreireihigen Liegeboxenlaufstall mit planbefestigtem Boden. Die Entmistung erfolgt per Mistschieber in einen vorhandenen Mittelkanal. Um Verstopfungen zu lösen, kann ein solcher Kanal mit einer Ringleitung versehen werden. Da eine solche Ringleitung im Versuchsstall nicht vorhanden ist, wird durch Wasserbeimengung bei Bedarf die Viskosität gesenkt und damit Verstopfungen vorgebeugt.

Abbildung 64: Kopfbereich der Liegebox mit frisch eingestreuten Pellets

Die Pellets werden im Kopfbereich nachgestreut und "rutschen" dann sukzessive in die Box. Dadurch lösen sich die Pellets langsam auf und bilden durch Feuchtigkeitskontakt eine stabile "Matratze". Ein besonderer Vorteil ist, dass die Klaue der Kuh mit dem Strohmehl "eingepudert" wird. Damit trocknet die Klaue in der Liegezeit sehr gut ab, was für die Klauengesundheit essenziell ist. Weiterhin sind die Kühe sehr sauber (Euterspiegel).

Abbildung 65: Pelletmatratze, hohe Sauberkeit (Euterspiegel), trockene gesunde Klauen

Der Umfang des Austrages der Pellets aus den Boxen lässt sich lediglich durch Einhalten der definierten Einstreumenge und konsequente Boxenpflege minimieren. Dahingehend wurden keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Pelletchargen erkannt.

Abbildung 66: Liegeboxenstall

Die Liegeboxen werden täglich in Handarbeit eingerichtet. Das Strohmehl macht diese Arbeit deutlich einfacher als bei der Nutzung einer Kalk-Stroh-Matratze. Sehr gutes Liegeverhallten wird erkennbar, wenn die Kühe sich rasch ablegen und hohe Liegezeiten erreicht werden.

Abbildung 67: Gutes Liegeverhalten beim Pelleteinsatz

Tiefstreustall

Abbildung 68: Tiefstreustall

Im Tiefstreustall hat sich erwiesen, dass die Strohpellets mit geringem Materialaufwand die Liegefläche trocken halten. Besonders auffällig ist eine sehr hohe Sauberkeit der Tiere und im Besonderen der Euterspiegel. Die Einbringung mit Radlader sowie die Entmistung ist gegenüber der klassischen Stroheinstreu aus arbeitswirtschaftlicher Sicht sehr effektiv einzuschätzen. Folgende Einstreumenge hat sich als praktikabel erwiesen:

7 kg Strohpellets/Tier*Tag, wöchentliches Nachstreuen

Beim Einsatz der verschiedenen Einstreusubstrate konnte praktisch kein Unterschied zwischen den einzelnen Pelletchargen festgestellt werden. Alle Einstreuvarianten haben die Funktion im gleichen Maße erfüllt. Hinsichtlich des Saugvermögen, Hygiene, Tierwohl und Austrag konnten zwischen den verschiedenen Substraten keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden.

Auch bei der Nutzung im Tiefstreustall sind die Kühe auffallend sauber. Es herrscht ein ausgezeichnetes Liegeverhalten, solange die korrekte Einstreumenge aufrechterhalten wird.

Abbildung 69: Sauberkeit und Tierhygiene durch Pellets

Es wurde im Versuchszeitraum festgestellt, dass es zu einer deutlichen Erwärmung der Einstreu im Tiefstreustall gekommen ist. Hier findet bereits im Stall ein intensiver mikrobiologischer Abbau statt. Diese Erwärmung ist in der Liegebox kaum festzustellen, da diese stets trocken bleibt. Die intensive aerobe Rotte lässt vermuten, dass Biogaspotezial des Rohstoffes verloren geht.

Hinsichtlich der bakteriologischen Untersuchungen im Einstreuzeitraum zeigt sich wiederum auch im Tiefstreustall eine deutliche Verschlechterung des bakteriologischen Zustandes des Einstreusubstrates. In den Liegeboxen konnte ein gutes bakteriologisches Niveau festgestellt werden. Bei den Liegeboxen hat die Boxenpflegeintensität wesentlichen Einfluss auf das mikrobiologische Niveau. Zwischen den verschiedenen Pelletchargen ergaben sich keine Unterschiede hinsichtlich der Bakteriologie. Untersucht wurde die Einstreu vor dem Nachstreuen bzw. vor dem Austausch hinsichtlich mesophiler Gesamtkeimzahl, coliformen Bakterien und äskulinpositiven Streptokokken.

Das Tierwohl, welches durch eine Liegeboxenqualität erreicht wird, wurde durch den Einsatz der verschiedenen Einstreuvarianten nicht positiv oder negativ beeinflusst. Die Liegequalität war stets vergleichbar. Vorsicht ist geboten, sollten die Tiere die Einstreu in besonderem Maße verzehren. Dies konnte im Versuchszeitraum jedoch nicht beobachtet werden.

Für den praktischen Einsatz von Stroh- bzw. Strohpelletvarianten kann festgestellt werden, dass im Besonderen die Anwendung in einer klassischen Tiefliegebox zu empfehlen ist. Im Tiefstreustall kann der Einsatz von Strohpellets den Rohstoffverbrauch deutlich absenken.

6.2.3 Analyse der Stoffströme aus der Stallhaltung und Energiebilanz für die Einstreupellets im Stall

Eigenschaften der Stoffströme aus den Stallanlagen

Durch die Nutzung der verschiedenen Pellets im Projekt KoSaTZ wurden die Eigenschaften der Stallprodukte Gülle (aus den Liegeboxen) und Festmist (aus dem Tiefstreustall) beeinflusst und bewertet. Analog zu den unter 6.2.1 beschriebenen Pelletchargen ergeben sich auch für die Stallprodukte die Versuchszeiträume 1 (Referenzpellet Stroh) bis 4 (Dinkelspelzenpellet).

Die **TR-Werte** für die flüssigen Güllen (Pelletgülle (Clausnitz) und Gülle ohne Einstreu (Cämmerswalde)) sind Abbildung 70 dargestellt. Für die Gülleproben mit Pelleteinstreu liegen die mittleren TR-Werte bei etwa 10% wobei im Bilanzzeitraum 1 (Stroh/Referenz) der Wert geringfügig niedriger ist (9,6 %) und im Bilanzzeitraum 2 etwas höher (10,9 %). Im Gegensatz dazu zeigt die beprobte Gülle ohne Einstreu erwartungsgemäß einen deutlich niedrigeren TR-Wert von etwa 6,4 %. D.h., dass die Zugabe von Strohpellets in die Liegeboxen die Gülle deutlich mit Feststoff und auch organischem Feststoff anreichern, was sich auch im Biogasertrag widerspiegeln sollte.

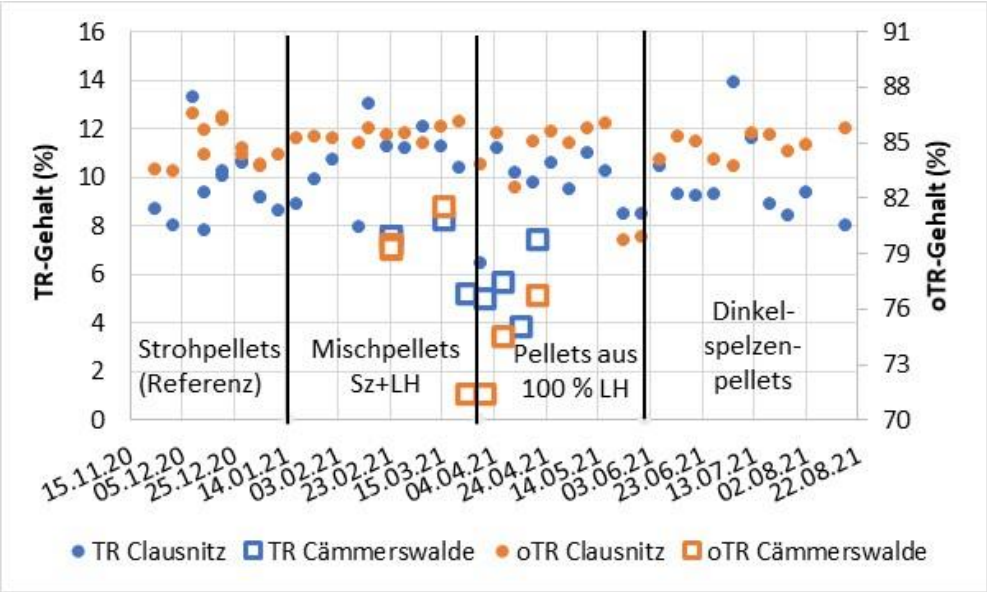


Abbildung 70: TR-, oTR-Gehalte für Güllen aus Liegeboxen mit (Clausnitz) und ohne Einstreu (Cämmerswalde)

Beim Pellet-Festmist aus der Nutzung im Tiefstreustall schwankt je nach Einsatzdauer der TR-Gehalt zwischen 28 % und 45 % (Abbildung 71). Insgesamt handelt es sich aber um einen vergleichsweise homogenen Einsatzstoff für die Nutzung beispielsweise in Biogasanlagen. Aufgrund des hohen Pelletanteiles liegt der oTR-Gehalt mit 80 bis 90 % erwartungsgemäß hoch.

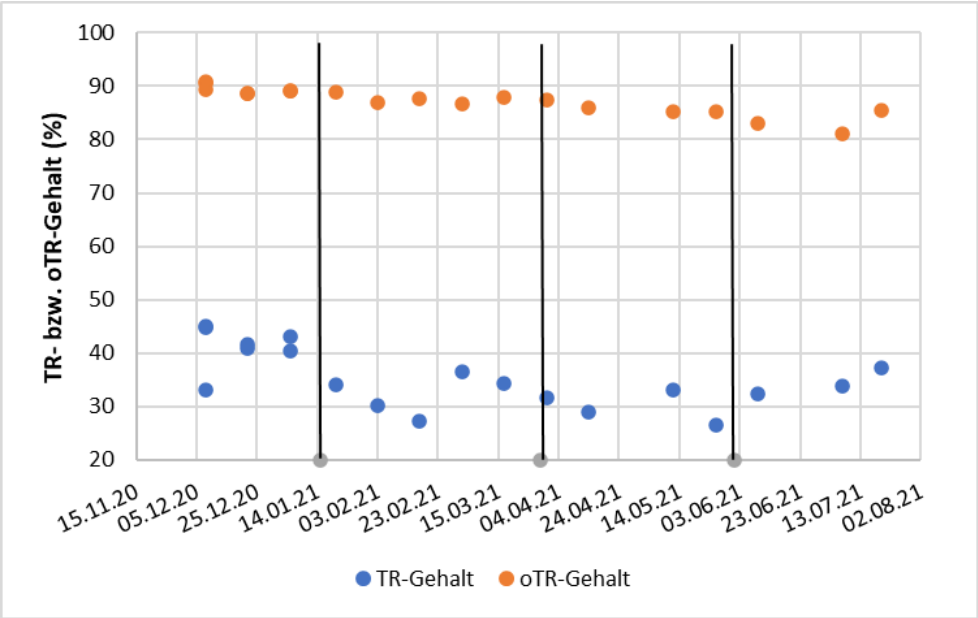


Abbildung 71: TR, oTR-Gehalt des Festmist aus der Pelleteinstreu im Tiefstreu-Stall

In Abbildung 72 sind die Werte für **pH und elektrische Leitfähigkeit** für die Flüssiggüllen aus dem Liegeboxstall dargestellt. In Clausnitz führt der Wechsel der Pelletsubstrate zu keiner Änderung der pH-Werte in der Gülle. Der geringe Pelletanteil von ca. 3,5 Masse-% im Güllestrom sowie die vergleichsweise geringe NaOH-Dosierung von 2,5% in den verwendeten Pellets hat offensichtlich keinen Effekt auf den pH-Wert der Mischung. Die Leitfähigkeit steigt in den Versuchsphasen 3 und 4 leicht an gegenüber Versuchsphasen 1 und 2. NaOH-Anteile sowie einsetzende Mineralisierung der Strohbestandteile könnten dazu führen.

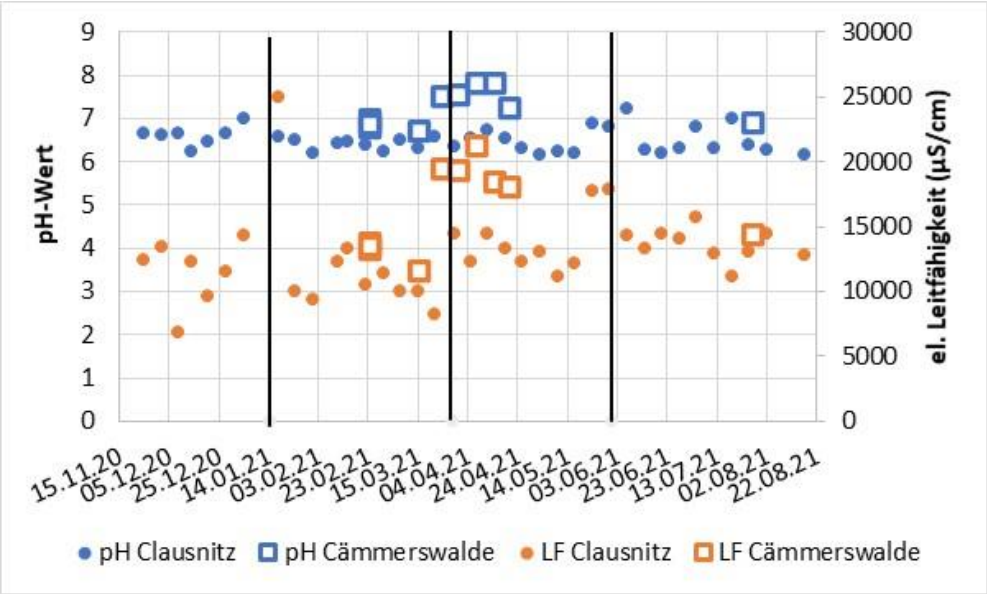


Abbildung 72: el. LF und pH-Wert für die Flüssiggüllen

Die ebenfalls dargestellten Werte für die Referenzanlage in Cämmerswalde (ohne Pelleteinstreu) zeigen tendenziell einen höheren pH-Wert, welcher möglicherweise durch CO_2-Austrag und geringes Versäuerungsvermögen in der Gülle ohne Einstreu hervorgerufen wird. Denkbar ist eine leichte Versäuerung von Pelletbestandteilen in der Gülle mit Einstreu, so dass gebildete organische Säuren

und CO_2 zu einer leichten Absenkung des pH-Wertes führen, was vorteilhaft zur Verminderung von Ammoniak-Ausgasungen im Stall wäre.

Die pH-Werte im Festmist aus dem Tiefstreustall (Abbildung 73) liegen mit 7,8 bis 8,4 etwas höher als in der Pelletgülle. Zum einen liegt die Einstreukonzentration hier deutlich höher (25 bis 30 %), so dass NaOH-Anteile wirksam werden können. Zum anderen sorgt die gute Belüftung im Einstreubett zu einem raschen aeroben Abbau von evtl. entstehenden organischen Säuren.

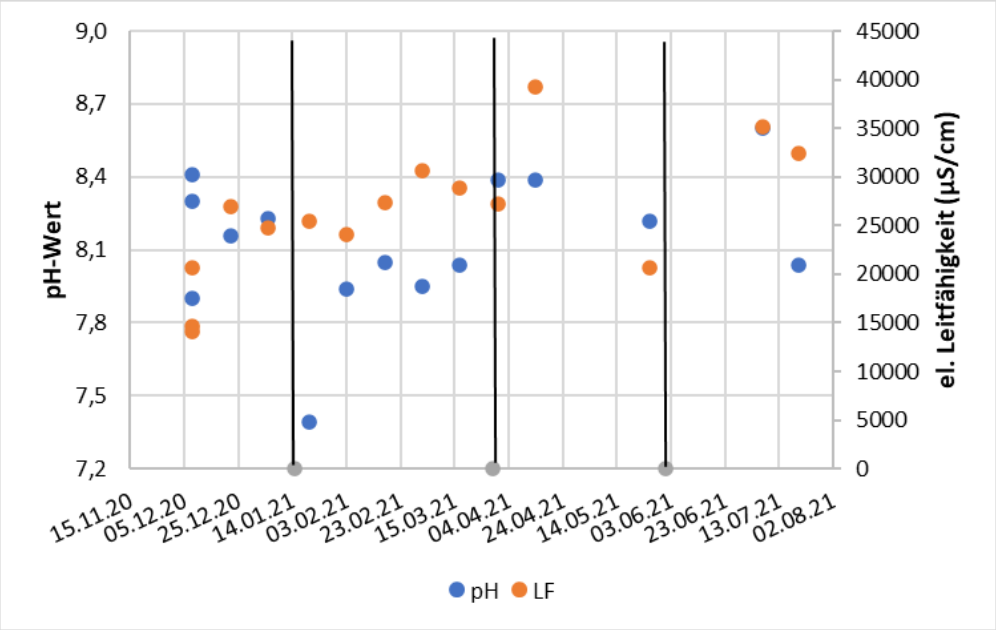


Abbildung 73: el. LF und pH-Wert für den Festmist

Auch bei den Gehalten für **Natrium und Ammonium** zeigen die Güllen mit Pelletzugaben keine Unterschiede zu den Güllen ohne Pelletzugabe (Abbildung 74). Die zugeführten Pelletmengen sind dafür zu gering.

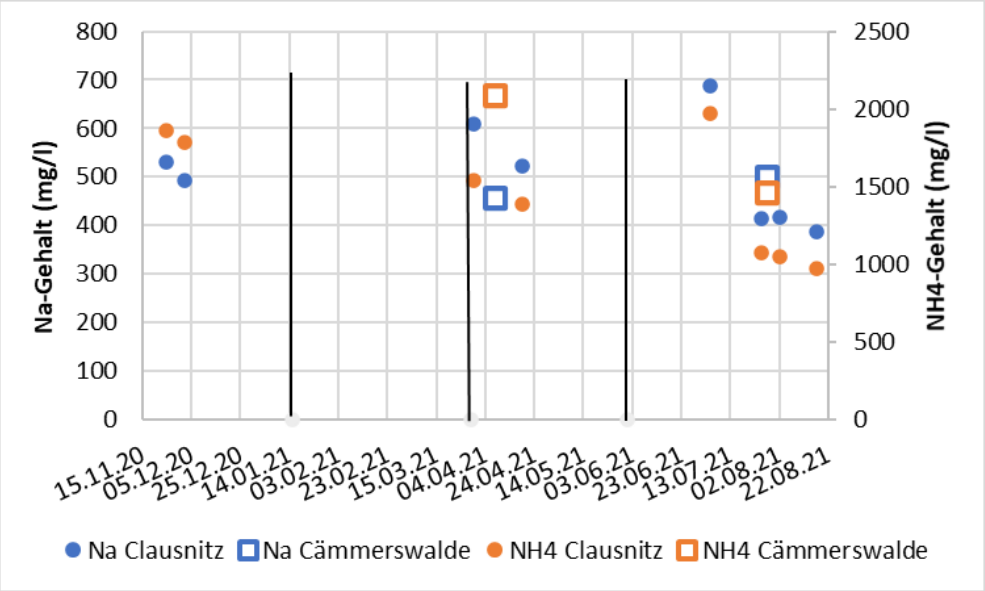


Abbildung 74: Na- und NH4-Gehalt für die Flüssiggülle

Aufgrund der deutlich höheren Einsatzmenge im Tiefstreustall spiegeln sich die Natrium-Werte aus dem NaOH-Anteil im Festmist wider (Abbildung 75). Insbesondere in den Versuchszeiträumen 3 und 4 ist ein Anstieg zu verzeichnen. Gleichzeitig sinkt der Ammoniumgehalt ein wenig, was durch verstärkten Austrag (höherer pH-Wert) und/oder durch verstärkte mikrobiologische Aktivität hervorgerufen wurde.

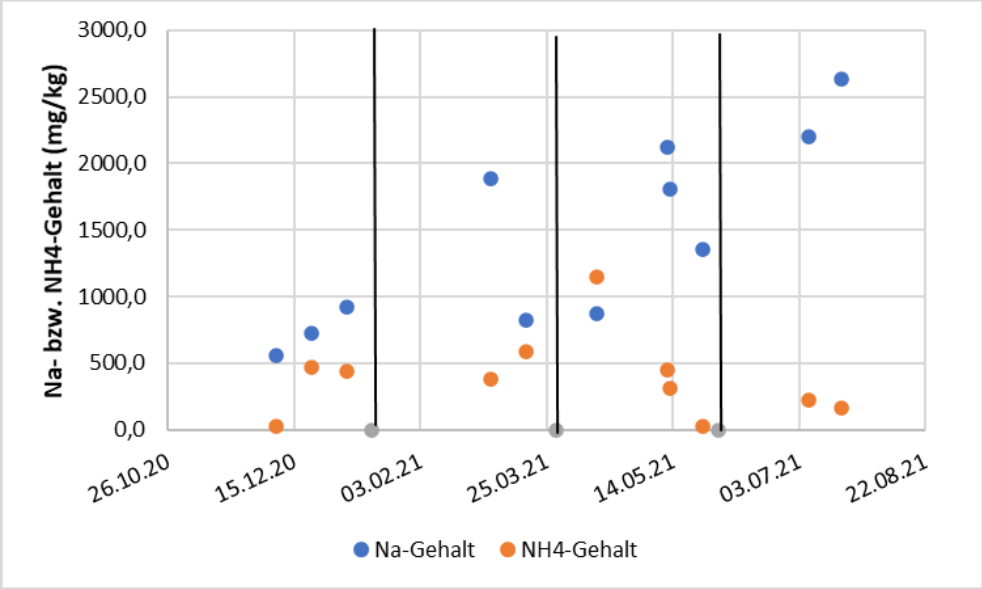


Abbildung 75: Na- und NH4-Gehalt für den Festmist

Die mittels Gasertragstest ermittelten **Methanerträge** für die verschiedenen Input und Outputsubstrate der Ställe sind in den folgenden Diagrammen dargestellt.

Die verschiedenen Einstreupellets zeigen ein relativ konstantes und gutes Methanpotenzial von ca. 250 NL/kg oTR (Abbildung 76). Offensichtlich steigt mit zunehmendem NaOH-Einsatz gegen Ende der Versuchszeit auch die Gasausbeute nochmals etwas an auf Werte bis 300 NL/kg oTR.

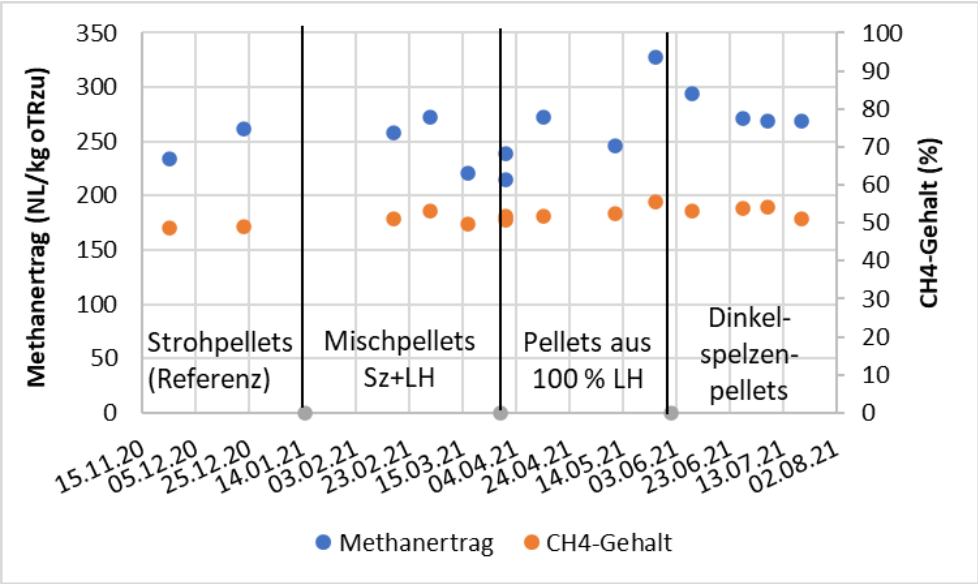


Abbildung 76: Methanertrag und CH4-Gehalt im Biogas für die Einstreupellets

Die Flüssiggüllen mit Pelleteinstreu zeigen ähnlich hohe spezifische Gasausbeuten pro kg oTR (ca. 250 NL zum Ende hin sogar bis 275 NL). Abbildung 77 zeigt auch Vergleichswerte für die Gülle ohne Einstreu (Cämmerswalde). Es zeigt sich ein leicht vermindertes Gaspotenzial durch die fehlende Einstreu. 4 weitere Vergelichswerte aus einem späteren Beprobungszeitraum zeigten im Mittel ein Methanpotenzial von 220 Nl/kg oTR, also eine Steigerung von ca. 14 % oTR-spezifisch. Legt man die TR- und oTR-Werte zugrunde so ergibt sich bezogen auf die Frischmasse der Gülle eine deutliche Steigerung des Methanpotenzials von ca. 10 NL auf 21 NL Methan pro kg Frischmasse. D.h., dass trotz der relativ kleinen massespezifischen Zugabemenge von ca. 3,5% Pellets in die Frischgülle der Gasertrag bereits verdoppelt wird.

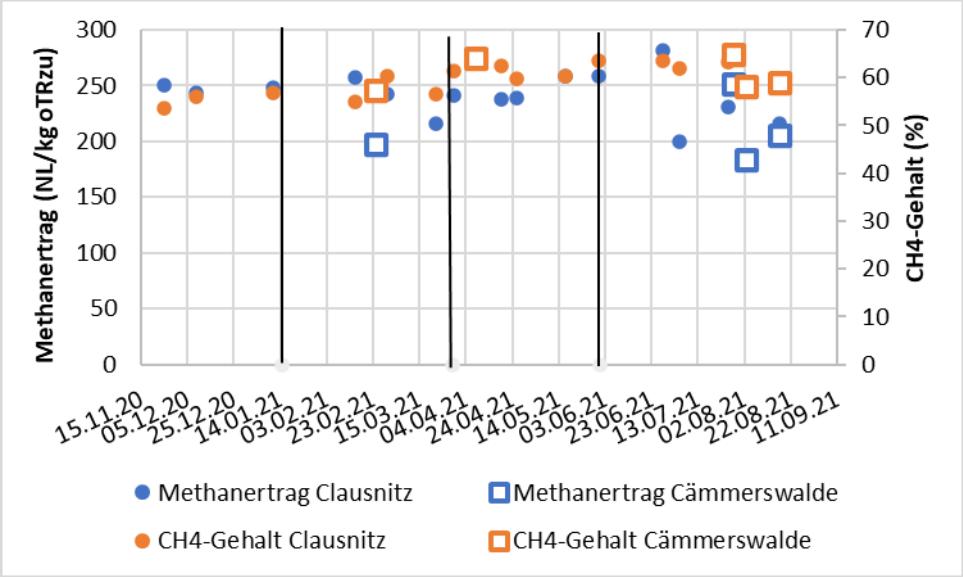


Abbildung 77: Methanertrag und CH4-Gehalt im Biogas für die Flüssiggüllen

Der Methanertrag des Festmistes (Abbildung 78) ist mit knapp 200 NL/kg oTR deutlich niedriger als die Inputstoffe (Einstreupellets und Gülle).

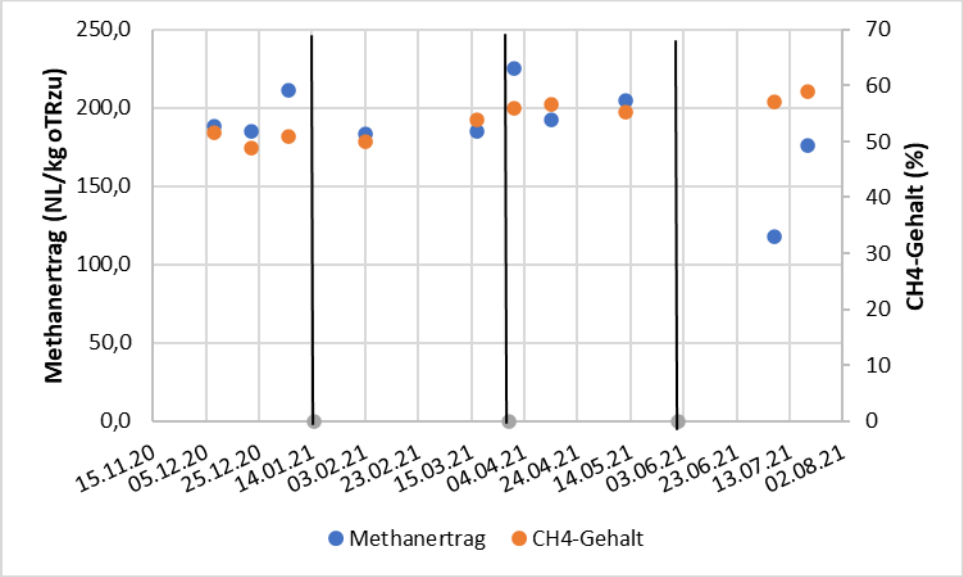


Abbildung 78: Methanertrag und CH4-Gehalt im Biogas für den Festmist

Aufgrund der langen Liegezeit des Einstreus im Tiefstreustall (bis 14 d) sowie der guten Durchlüftung kommt es offensichtlich zu einem beträchtlichen Abbau von

Gaspotenzial. Die durch AGC detektierte Erwärmung des Einstreu-Festmistgemisches bestätigt diesen Verdacht. Aerobe Rotteprozesse sind dafür verantwortlich.

Um diesen Effekt etwas näher zu quantifizieren, wurden im Labor des IKTS die Verhältnisse des Tiefstreustalles nachgestellt. Dabei wurden Dinkelspelzenpellets (Versuchs 1 und 2) bzw. Strohpellets (Versuch 3) in offenen Bechergläsern über 14 Tage regelmäßig mit Gülle vermengt. In Summe wurden ca. 1170 g Gülle auf 400 g Pellets dosiert und dieser „Festmist" regelmäßig händisch durchmischt.

Die zeitliche Verteilung der Güllezugabe ist in Abbildung 79 dargestellt. Ansatz 1 erhielt im Gegensatz zu den anderen Ansätzen bereits zu Beginn eine besonders hohe Güllemenge. In der Praxis erfolgt im Gegensatz dazu die Zugabe durch die Tiere sehr kontinuierlich. Im Labor sollte nur eine prinzipielle Annäherung an die Praxis erfolgen.

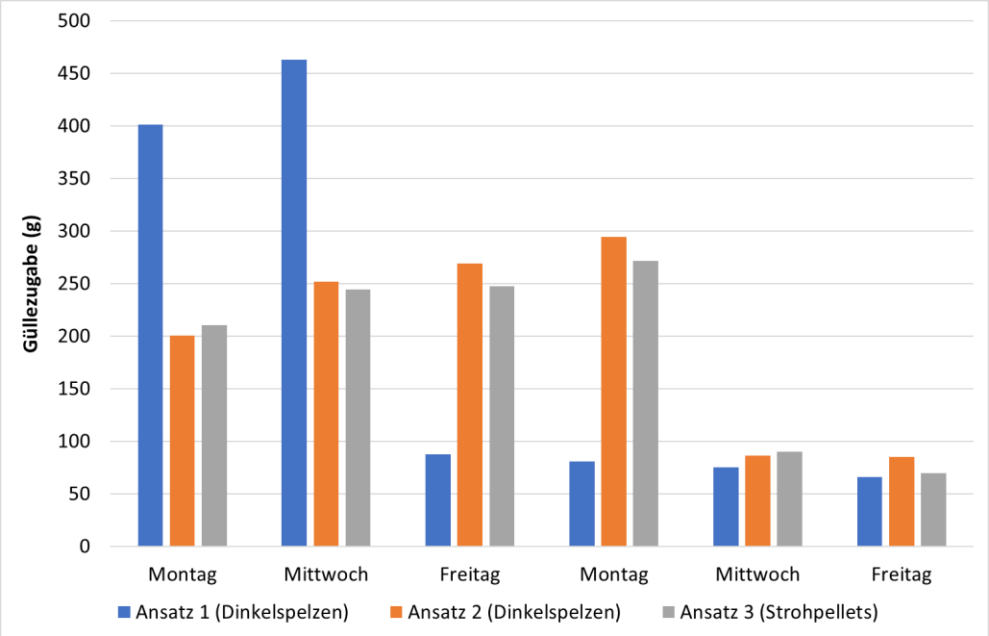


Abbildung 79: Zugabemengen und Zeitpunkte der Gülle zu jeweils 400 g Pellets

Die Ausgangssubstrate sowie die nach 14 Tagen erhaltenen „Festmist"-Produkte wurden hinsichtlich des Gasertrages bewertet (Abbildung 80). Für die Ansätze 2 und 3, welche vom Zugaberegime näher an der Praxis lagen konnten Ertragseinbußen von ca. 12 % ermittelt werden. Dies entsprach zwar nicht ganz den im Praxisstall erreichten spezifischen Ertragsverlusten von etwa 20 %, konnte aber die Tendenz klar bestätigen.

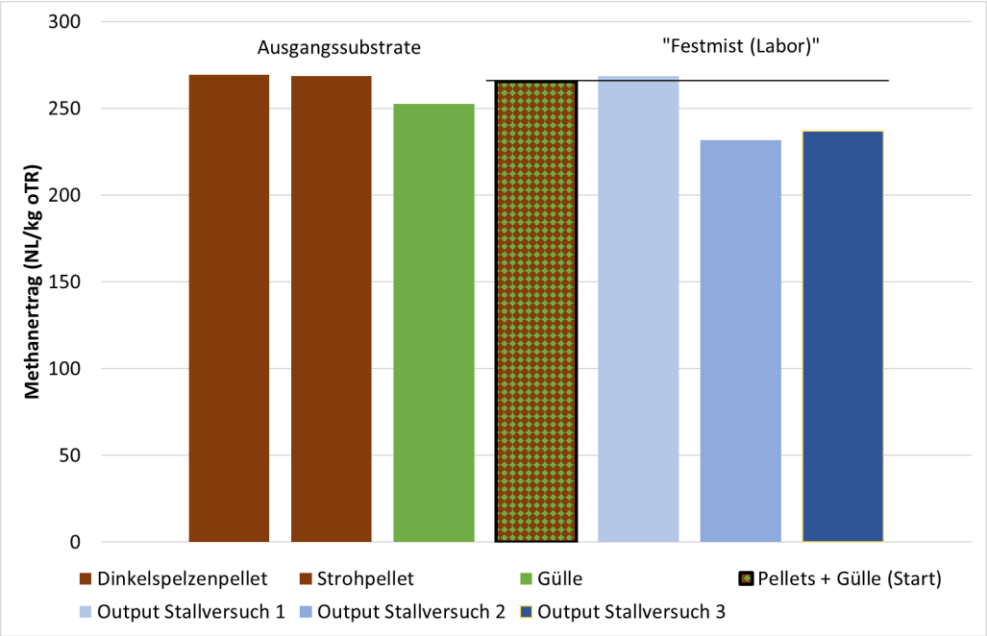


Abbildung 80: Methanertragspotenzial der Stoffströme im Laborversuch „Tiefstreustall-Rotte“

Stallversuch 1 wies keinerlei spezifische Ertragsverluste auf. Eine Erklärung dafür konnte nicht gefunden werden, zumal der ebenfalls bilanzierte Verlust an organischer Feststoffmatrix bei allen 3 Versuchen gleich hoch lag (Abbildung 81). Masseverlust und spezifischer Methanertragsverlust zusammen ergeben bis zu 25 % Energieverlust im Tiefstreustall.

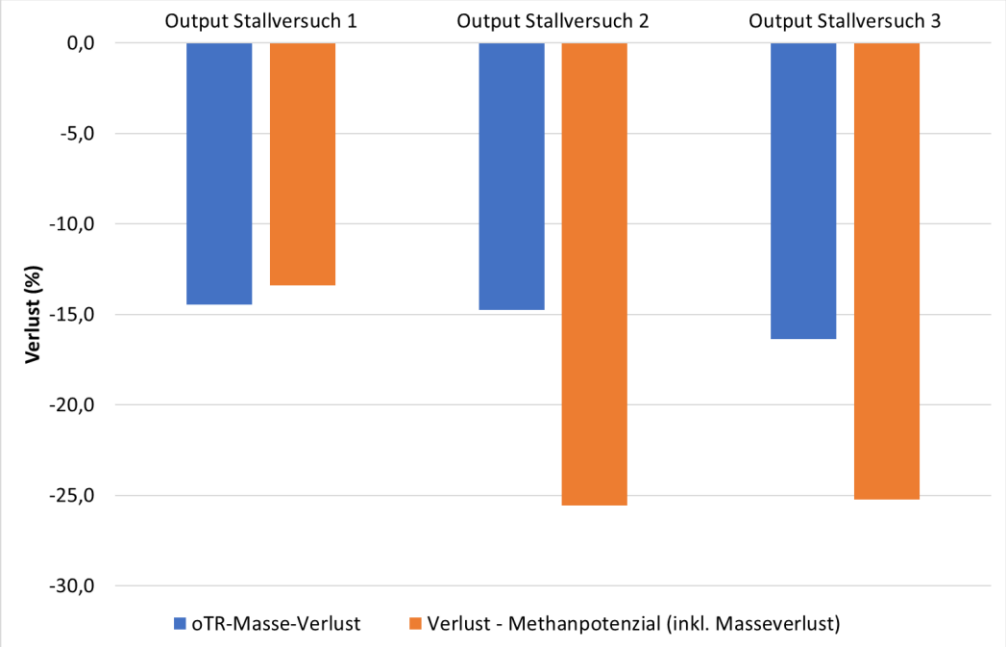


Abbildung 81: oTR- Masseverlust und Methanertragsverlust im Laborversuch „Tiefstreustall – Rotte“

Für die Liegeboxen mit Flüssiggüllenaustrag kann mit und ohne Einstreu von einem sehr geringen, vernachlässigbaren Energieverlust ausgegangen werden, da die Aufenthaltszeiten bis zur Verwendung in der Biogasanlage sehr kurz sind (< 2 Tage) und Temperaturen sowie Sauerstoffeintrag eher gering sind. Außerdem konnte bei der Bewertung der Güllefraktionen kein vermindertes Biogasertragspotenzial festgestellt werden.

6.3 Quellverhalten und Einmischung von Misch- und Strohpellets in Rundfermentern

6.3.1 Untersuchungen zum Quell- und Einmischverhalten

Charakterisierung der Substrateigenschaften

Als Grundlage für die Bewertung der Einmischung von Strohpellets erfolgte eine messtechnische Bewertung der Inputmaterialien und des Fermenterinhalts des Anmischbehälters in Clausnitz. Dabei wurden sowohl die Fließeigenschaften als auch der granulometrische Zustand bewertet.

Granulometrie

Infolge der komplexen Zusammensetzung biogener Substrate (hochkonzentriert, langfaserig) können kommerzielle Messsysteme nur bedingt zur Bewertung des granulometrischen Zustandes und der Fließeigenschaften derartiger Stoffsysteme herangezogen werden. Im Rahmen eines abgeschlossenen SAB-Förderprojektes (IKTS 2011) wurden intensive methodische Entwicklungen bei der granulometrischen und rheologischen Bewertung faseriger biogener Substrate betrieben, die in der vom DBFZ (2012) veröffentlichten Messmethodensammlung Biogas zusammengestellt wurden.

Die in der Biogastechnik eingesetzten Stoffsysteme sind hinsichtlich ihrer Partikelgrößen sehr breit verteilt, sodass eine Erfassung der granulometrischen Kenngrößen mit einem einzelnen Messverfahren nicht möglich wird. Am Fraunhofer IKTS wird der Ansatz verfolgt, zwei Messverfahren miteinander zu kombinieren, um die Substrate in ihrer Gesamtheit granulometrisch bewerten zu können.

Dafür erfolgt eine Fraktionierung der zu untersuchenden Stoffsysteme in einen Feinanteil und einen Grobanteil bei einem Trennschnitt bei 0,5 mm oder 1 mm.

Der bei der Fraktionierung auf dem Sieb verbleibende Rückstand wird in einem Trockenschrank getrocknet. Daraus wird, unabhängig von der granulometrischen Bewertung der Fein- und Grobfraktion, der Grobstoffanteil ermittelt. Dieser kann mit Hilfe von nachfolgender Gleichung berechnet werden und bezieht sich auf den Trockenrückstandsgehalt, welcher nach DIN 38414 Teil 2 ermittelt wird.

$$GS = \frac{\left(m_{Sieb-getrocknet} - m_{Sieb-leer}\right) \cdot 100}{TR \cdot m_{Einwaage}}$$

GS	Grobstoffanteil
$m_{Sieb\text{-}leer}$	Masse leeres Sieb
$m_{Sieb\text{-}getrocknet}$	Masse Sieb mit getrockneter Probe
$m_{Einwaage}$	Einwaage
TR	Trockenrückstand

Wie bereits angeführt, wird die Fein- und Grobfraktion mit unterschiedlichen Analyseverfahren untersucht.

Der Feinanteil wird mittels quantitativen Bildanalyse (Gerät Qicpic - LIXELL) und der Grobanteil mit Hilfe einer quantitativen Bildanalyse (Gerät Qicpic - Gradis)

bewertet. Anschließend erfolgt die Kombination beider Messungen, wobei die Faserlänge LEFI als einheitliche Partikelgröße zur Anwendung kommt. Im Ergebnis der Untersuchungen liegt dann eine Verteilung Q1(xLEFI) zur Beschreibung des gesamten Stoffsystems vor.

Mit Hilfe von Softwaretools können beide Dichtefunktionen und Summenfunktionen unter Berücksichtigung der, aus dem Parameter Grobstoff, abgeleiteten Mengenanteile für die Grob- und Feinfraktion zu einer gemeinsamen Dichtefunktion und Summenfunktion zusammengeführt werden. Diese Gesamtverteilung ist in folgender Abbildung für den Fermenter und den Anmischbehälter in Clausnitz dargestellt.

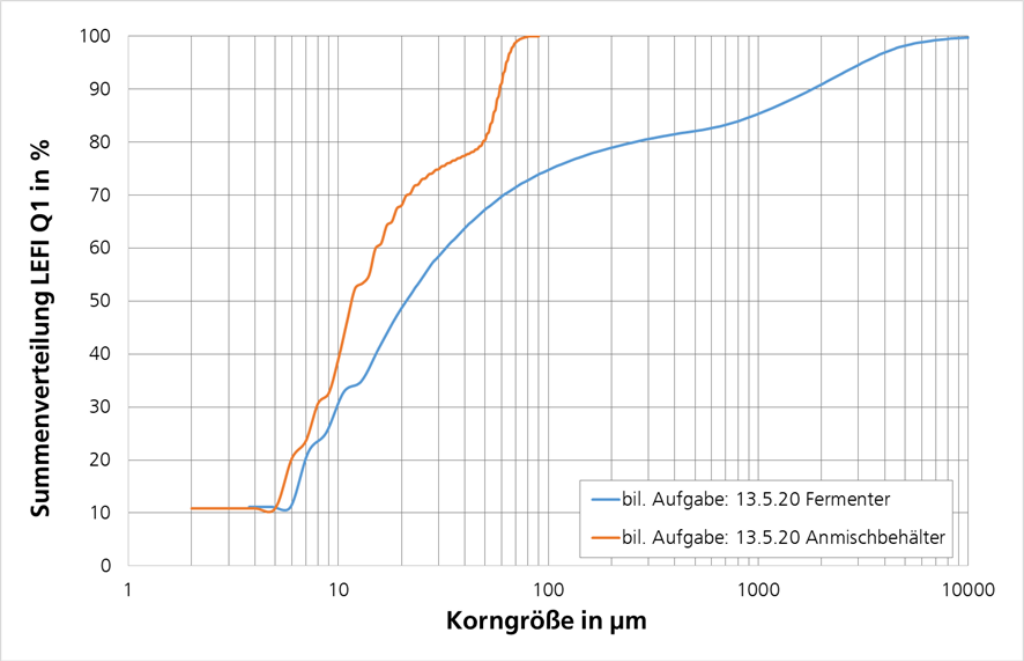


Abbildung 82: Vergleich der Summenverteilungen hinsichtlich der Faserlänge von Fermenter und Anmischbehälter

Dabei ist zu erkennen, dass im Fermenter deutlich längere Fasern enthalten sind als im Anmischbehälter. Dies deutet auf eine schwankende Beschickung hinsichtlich der Faserqualitäten hin.

Rheologie

Die dynamische Viskosität der untersuchten Stoffsysteme kann durch den Potenzansatz nach Ostwald-de-Waele mit K als Konsistenzfaktor und m als Fließindex beschrieben werden (folgende Gleichung)

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{m-1}$$

Aufgrund der unterschiedlichen Betriebstemperaturen von Fermenter und Anmischbehälter wurde das Fließverhalten bei der entsprechenden Betriebstemperatur bewertet.

Zum besseren Vergleich der Daten wurden im Bericht sowohl die Beschreibung nach Ostwald-de-Waele gewählt als auch ein visueller Vergleich mittels Diagramm.

Zur Nachbildung der fluiddynamischen Verhältnisse beim Einmischen der Strohpellets wurden Proben aus dem Anmischbehälter, dem Fermenter sowie das Input-Substrat Gülle hinsichtlich der Fließeigenschaften bewertet.

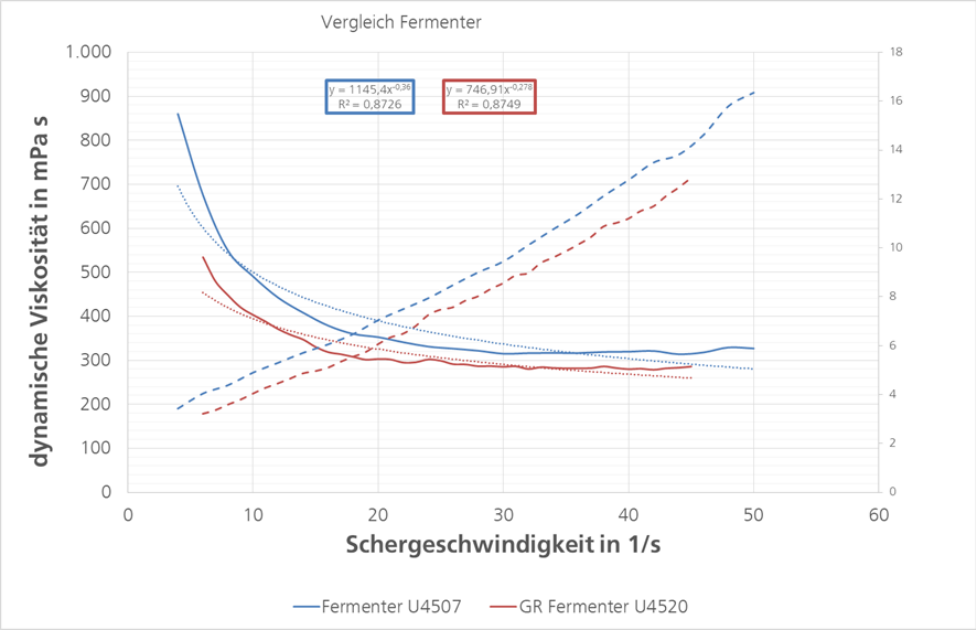


Abbildung 83: Vergleich der Fließkurven des Fermenterinhalts bei 40 °C

Die beiden dargestellten Fließkurven des Fermenterinhalts (verschiedene Probenahme-Daten) weisen Abweichungen infolge wechselnder Input-Substrate auf.

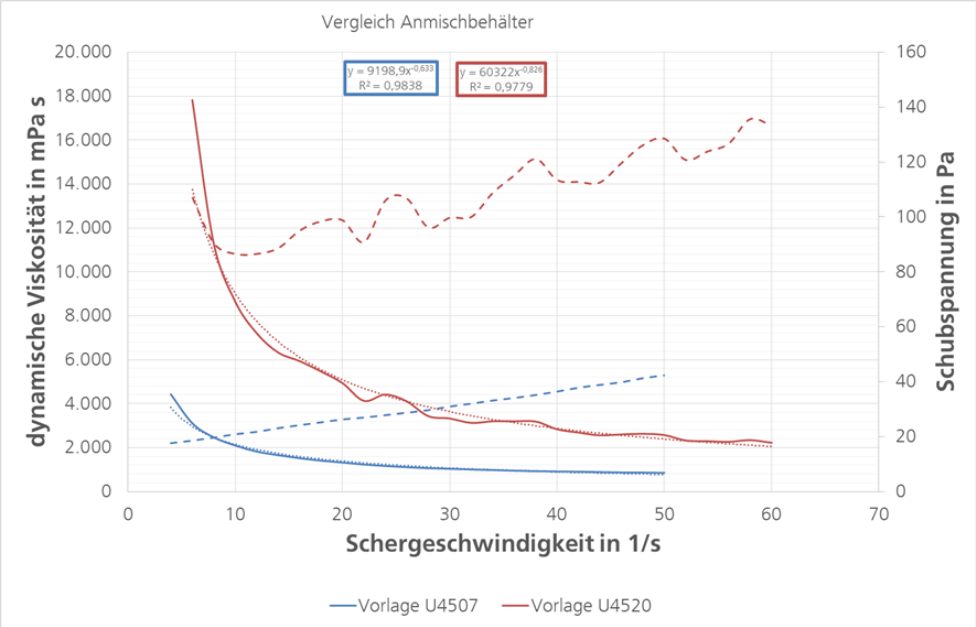


Abbildung 84: Vergleich der Fließkurven des Anmischbehälters bei 20 °C

Beim Vergleich der Fließkurven des Anmischbehälters sind große Abweichungen der dynamischen Viskosität zu beobachten. Eine Ursache dafür ist, dass der An-

mischbehälter etwa alle drei Tage beschickt wird. Zum Zeitpunkt der Probennahme von U4507 war die Mischung im Vorlagebehälter ca. drei Tage alt, während zur Probenahme von U4520 die Mischung nur etwa einen Tag alt war. Die Ursachen liegen zum einen in dem Quelleverhalten des Substrates zum anderen könnte auch eine inhomogene Verteilung des Substrates im Anmischbehälter in Frage kommen. So weist der Verlauf der Schubspannungen (gestrichelt) bei U4520 auf größere Partikelagglomerate hin.

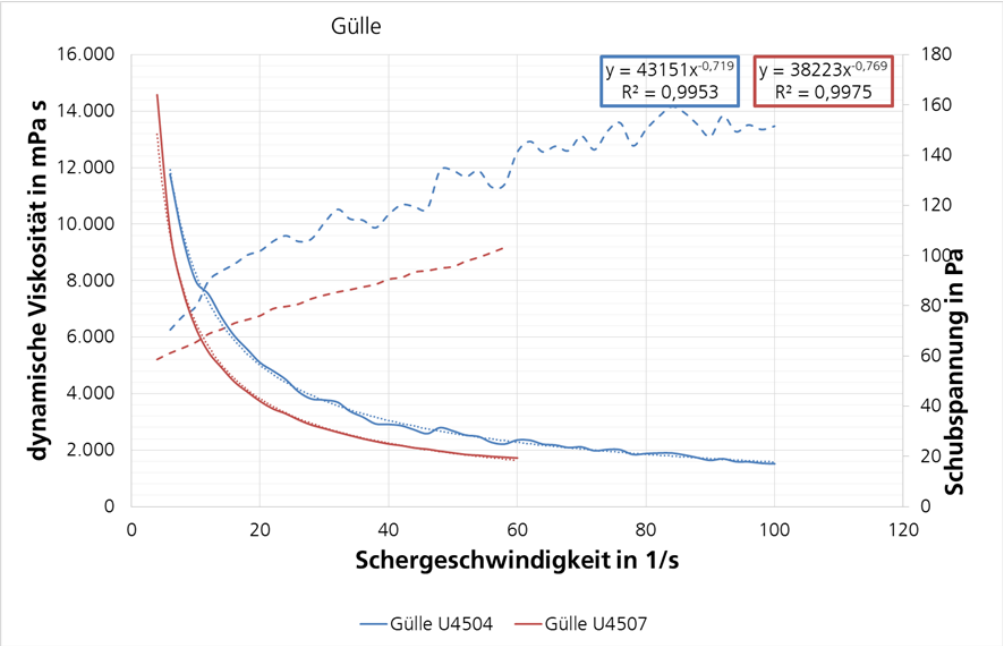


Abbildung 85: Vergleich der Fließkurven von Gülle bei 20 °C

Als Input-Material für den Anmischbehälter dient auch Gülle. Infolge des enthaltenen Einstreus ist die vorhandene Gülle sehr viskos, weshalb die messtechnische Bewertung der Gülle schwer möglich war (Abbildung 85).

In der nachfolgenden Tabelle sind die ermittelten Werte zusammengefasst.

Tabelle 12: Rheologische Kennwerte

	Konsistenzfaktor K in mPa s	Fließindex m	Trockenrückstand TR in %	Organischer Trockenrückstand oTR in %
Fermenter 13.5.20 (U4507)	1.145	0,64	6,36	76,3
Fermenter 9.6.20 (U4520)	804	0,505	6,20	75,7
Anmischbehälter 13.5.20 (U4507)	8.412	0,401	14,37	89,9
Anmischbehälter 9.6.20 (U4520)	76.054	0,109	14,11	90,1
Gülle* 4.5.20 (U4504)	43.767	0,278	11,61	83,9
Gülle* 13.5.20 (U4507)	38.222	0,231	10,04	83,2
Gülle* 9.6.20	-	-	12,05	73,7
Gülle* 14.9.20 (U4563)	51.089	0,065	9,86	84,7
Gülle* 17.11.20 (U4588)	74.793	0,176	10,59	84,3

*Gülle mit Einstreu

Entsprechend dem strukturviskosen Fließverhalten der Original-Substrate wurden Modellfluide aus CMC (Carboxymethylcellulose) für die Versuche im Labormaßstab hergestellt.

Skalierung

Bei der Besichtigung der Anlage in Clausnitz am 04.05.20 wurden die Möglichkeiten zur Bewertung des Einmischens von Strohpellets eruiert. Dabei stellte sich heraus, dass die Zugabe der Pellets nicht direkt in den Fermenter erfolgt. Die Pellets werden zusammen mit Gülle in einen Anmischbehälter dosiert. Aus diesem Behälter erfolgt die Beschickung der Biogasanlage. Somit wurde festgelegt, dass der Anmischbehälter zur prozesstomographischen Bewertung der Einmischung von Strohpellets als Grundlage dienen soll. Dieser ist in Abbildung 86 schematisch dargestellt. Die Bewertung des Anmischbehälters macht zunächst eine Skalierung in den Labormaßstab erforderlich. Um den Prozess gezielt nachstellen zu können, ist die geometrische Ähnlichkeit zwischen Anmischbehälter und Laborreaktor erforderlich. Tabelle 13 fasst die Skalierung des Anmischbehälters in den Labor- und Technikumsmaßstab zusammen. Der Reaktor, der zur prozesstomographischen Bewertung der Misch- und Strömungsverhältnisse genutzt wurde, ist Abbildung 87 dargestellt.

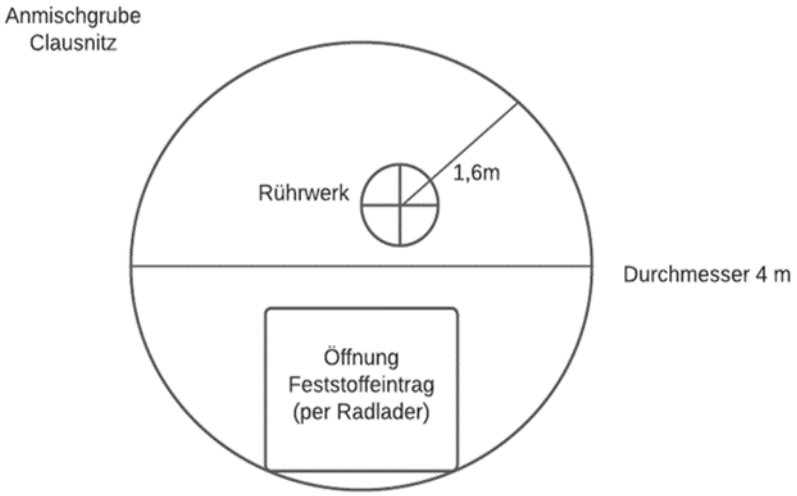


Abbildung 86: Schematische Darstellung der Anmischgrube in Clausnitz (Quelle: Herr Hänel von AGC)

Tabelle 13: Skalierung des Anmischbehälters in den Labor- und Technikumsmaßstab

	Anmischbehälter Claußnitz	**Tomographie 100L hoher Reaktor**
Durchmesser (m)	4	0,49
Höhe (m)	4,5	
Füllhöhe (m)	4	0,49
Volumen (m³)	50,27	0,09
Maßstabsfaktor	8,16	
Rührwerk	Propeller (Tauchmotorrührwerk, höhenverstellbar)	Propeller (Nachbildung Tauchmotorrührwerk)
Durchmesser (mm)	640	78,4
Drehzahl (U/min)	350	2857
Rührerumfangsgeschwindigkeit (m/s)	11,73	

Für die Nachbildung des Verhältnisses von Füllhöhe zu Reaktordurchmesser (H/D) zwischen Anmischbehälter (H/D = 1) und Tomographie-Reaktor war eine Versuchsdurchführung im 100 L-Maßstab am besten geeignet. Planmäßig sollten auch Versuche im 1 m³-Maßstab statt-finden. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Prozessführung und der Möglichkeit im 100 L-Maßstab mehrere Versuche durchzuführen, wurde auf Versuche im 1 m³-Maßstab verzichtet.

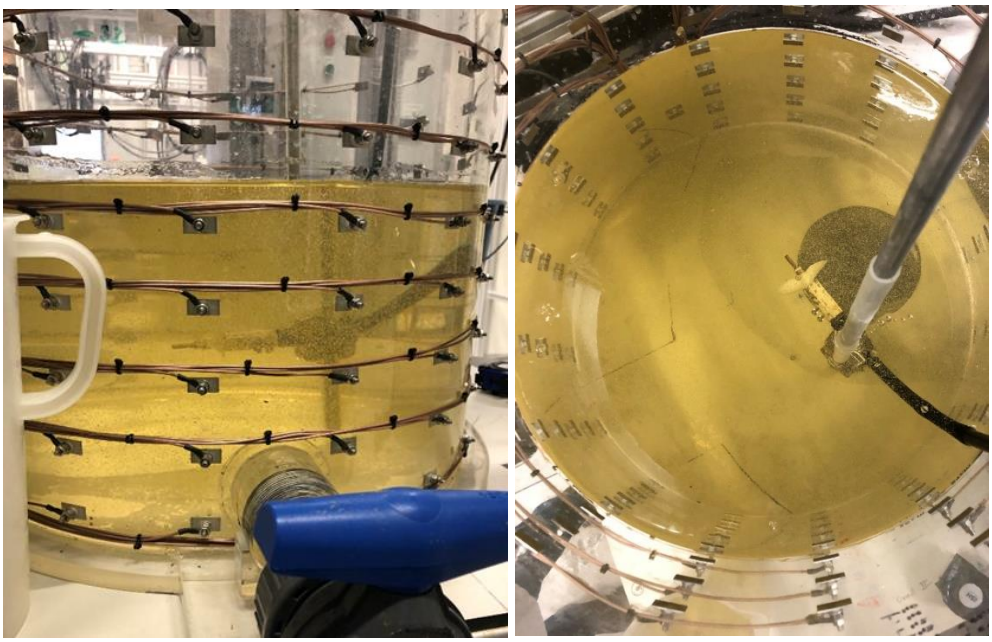


Abbildung 87: Reaktor zur prozesstomographischen Bewertung des Mischprozesses im 100 L-Maßstab mit installierter Rührtechnik

Bewertung der Auflösung der Pellets in verschiedenen Medien

Zur Charakterisierung des Auflöseverhaltens unterschiedlicher hergestellter Pellets wurden Vergleichsversuche in unterschiedlichen Medien durchgeführt:

- Wasser,
- Modellsubstrat CMC (Carboxymethylcellulose),
- Gülle des Anmischbehälters in Clausnitz.

Die Versuchsbedingungen in CMC und Gülle sind analog zu denen in Wasser. Das Modellsubstrat CMC wurde dabei hinsichtlich der Konzentration so angepasst, dass damit die Fließeigenschaften der Gülle des Anmischbehälters nachgestellt werden können (Abbildung 88).

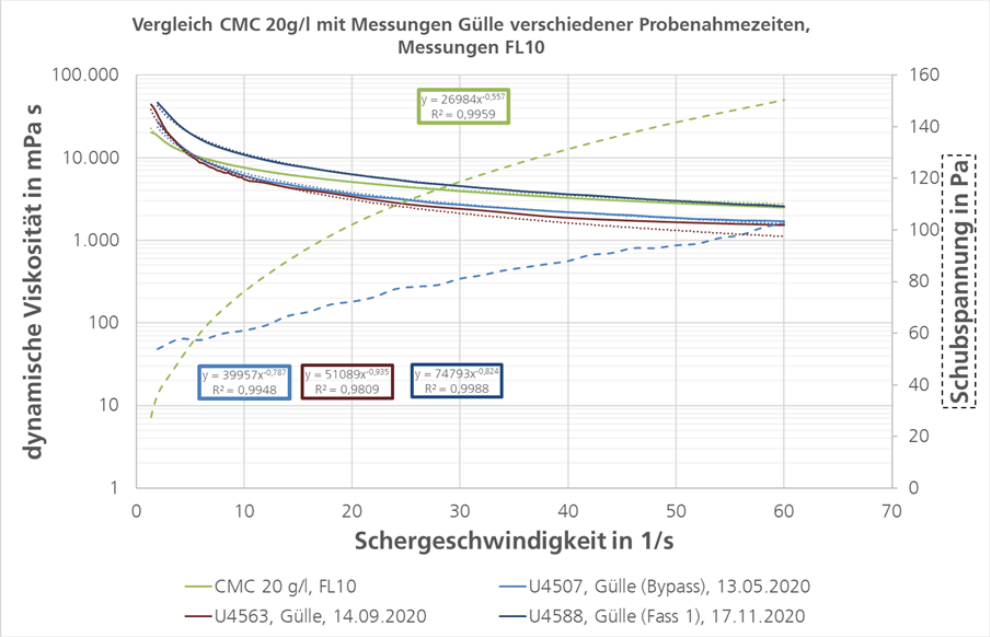


Abbildung 88: Vergleich der Fließeigenschaften von CMC und Gülle

In Abbildung 89 wird die Auflösegeschwindigkeit drei verschiedener Pellets (C_St_P: Strohpellet; D_HS_z6_P8_Na: 8mm Pellets aus Haferschalen, zerkleinert + NaOH; D_ÖM_o_P10: 10mm Pellets aus Getreideresten) in den Medien Wasser, CMC und Gülle miteinander vergleichen.

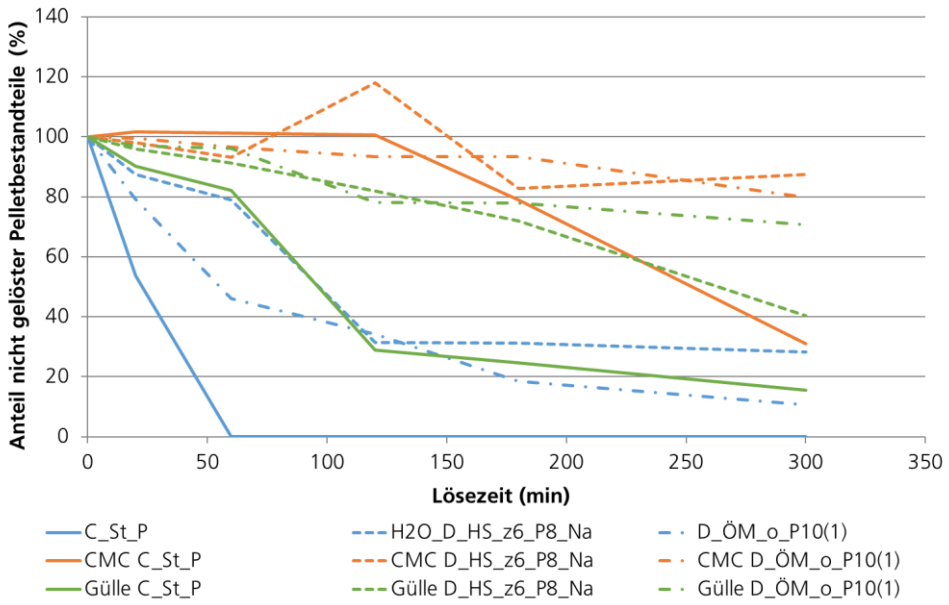


Abbildung 89: Vergleich der Auflösegeschwindigkeit in Wasser (blau), CMC und Gülle für 3 verschiedene Pellets

Dabei kann festgestellt werden, dass die Auflösegeschwindigkeit in den Medien CMC und Gülle deutlich langsamer ist als in Wasser. Die Pellets können in diesen Medien aufgrund der deutlich erhöhten Viskosität und der Oberflächenspannung schlechter benetzt werden, wodurch die Flüssigkeit, die für das Auflösen der Pellets essenziell ist, wesentlich langsamer in die Pellets eindringen kann. Mit Bezug zur Vergleichbarkeit der Medien CMC und Gülle sind die Pellets D_HS_z6_P8_Na am besten für die weiteren Versuche geeignet, da sowohl in CMC als auch in Gülle die Auflösegeschwindigkeit sehr ähnlich ist. Insgesamt

scheinen sich die 8 mm Pellets in den hochviskosen Medien etwas besser zu lösen als die 10 mm Pellets.

Aufgrund der transparenten Eigenschaften des CMC konnte das Auflösen der Pellets in diesem Medium, ähnlich zu Wasser, gut beobachtet werden. In Abbildung 90 ist das Auflösen der Pellets in CMC dargestellt. Daran wird deutlich, dass die Pellets auch ohne Rührenergie in hochviskosen Medien aufquellen und danach auch in die einzelnen Fasern zerfallen.

Abbildung 90: Auflöseverhalten Pellets D_HS_z6_P8_Na in CMC nach 180 min (links) und 300 min (rechts)

Das Einmischen der Pellets in hochviskose Medien wie CMC oder Gülle hat auch eine entsprechende Erhöhung der Viskosität zur Folge, welche mit zunehmender Auflösung der Pellets steigt. Daher wurden in Vorfeld der prozesstomographischen Versuche auch Untersuchungen zur Änderung des Fließverhaltens infolge der Pelletzugabe durchgeführt.

Für diese Versuche wurden die Pellets im Verhältnis von 1:8 in Gülle bzw. CMC eingemischt (dies entsprach dem Mischungsverhältnis Getreideschrot:Gülle im Anmischbehälter in Clausnitz, was aber einen relativ hohen Anteil an Pellets darstellt) und der zeitliche Verlauf der Fließeigenschaften bei einer konstanten Scherrate von 10 s^{-1} bewertet. Die Ergebnisse dazu zeigt Abbildung 91. Es scheint, dass nach einer Quellzeit von ca. 60 min ein deutlicher Anstieg der Viskosität zu verzeichnen ist. Ausgehend von einer gleichen Viskosität zu Versuchsbeginn sind die Kurven von Gülle (14.10.20) und CMC sehr gut vergleichbar. Allerdings ist bei CMC zu beachten, dass es durch die Pelletzugabe auch zu einer enzymatischen Zersetzung des CMCs kommt. Dies wird besonders deutlich nach einer Versuchsdauer von ca. 1400 min.

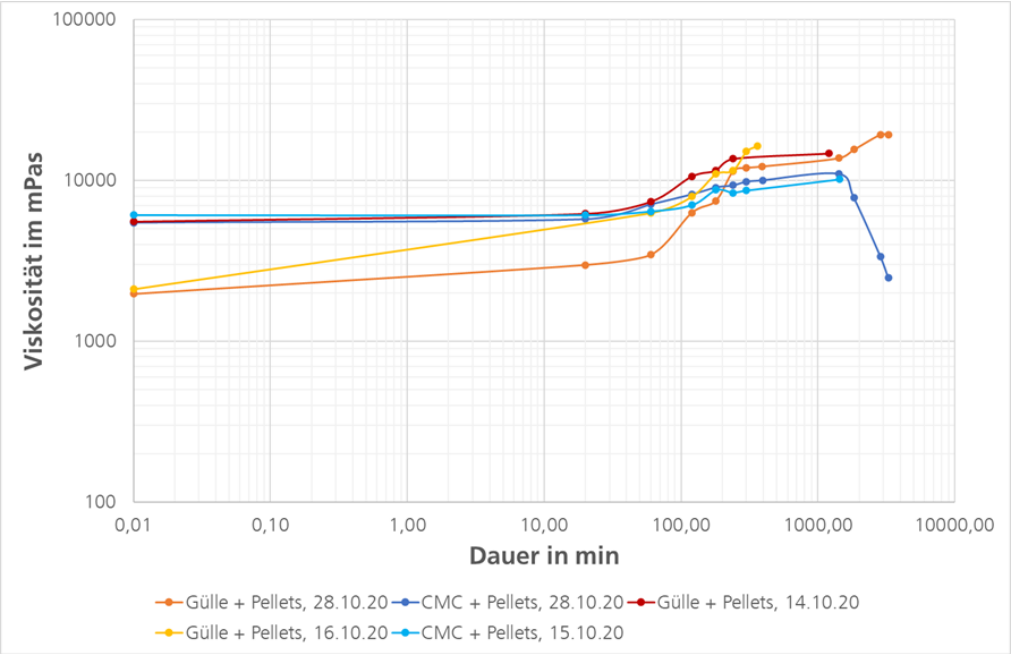


Abbildung 91: Zeitlicher Verlauf (logarithmisch) der Fließeigenschaften bei Scherrate 10 s-1 für das Einmischen von Pellets in Gülle und CMC (20 g/L)

Zur Vergleichbarkeit und Einordnung der Ergebnisse sind in Tabelle 14 die Viskositäten zu Versuchsbeginn und nach 240 min miteinander verglichen. Demnach ist nach 240 min mit einer Steigerung der Viskosität um Faktor 1,4 – 5,8 zu rechnen, wobei die Zunahme abhängig von der Viskosität zu Versuchsbeginn zu sein scheint. So war die Steigerung in den Versuchen mit Gülle vom 16.10.20 und 28.10.20 deutlich stärker ausgeprägt. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass infolge der geringeren Viskosität zu Versuchsbeginn eine stärke Benetzung und damit Quellung der Pellets erfolgen konnte.

Tabelle 14: Vergleich der Viskosität zu Versuchsbeginn und nach 240 min bei Scherrate 10 s-1

	t = 0 min	t = 240 min	Änderungsfaktor
Gülle + Pellets, 14.10.20	5553,3	13666,7	2,5
Gülle + Pellets, 16.10.20	2106,7	11533,3	5,5
Gülle + Pellets, 28.10.20	1970,0	11400,0	5,8
CMC + Pellets, 15.10.20	6100,0	8396,7	1,4
CMC + Pellets, 28.10.20	5480,0	9330,0	1,7

Bewertung des Einmischverhaltens mittels Prozess-Tomographie

Mittels Prozess-Tomographie wurde das Einmischverhalten von Strohpellets in Gülle und dem Modellsubstrat CMC bewertet. Dabei wurden der Füllstand des Reaktors, Zugabemenge und Art der Pellets, Position des Rührwerks und die Fließeigenschaften variiert. Außerdem wurde die Durchmischung des Reaktors für zwei verschiedene Füllstande vergleichen.

Bei den in der nachfolgenden Tabelle aufgezeigten Versuchen wurde das Rührwerk als Tauchmotorrührwerk betrieben mit einem Bodenabstand von 37 mm, die entspricht einem Bodenabstand von 30 cm in der Anmischgrube in Clausnitz. Bei vorhergehenden Versuchen wurde das Rührwerk als Zentralrührwerk betrieben, dies entspricht allerdings nicht dem Anwendungsfall. Vergleich mit der Positionierung des Rührwerks als Tauchmotorrührwerk konnte aber festgestellt werden, dass sich die Pelletzugaben mit der Positionierung Zentralrührwerk schlechter eingemischt haben.

Entsprechend der Fließeigenschaften der Gülle des Anmischbehälters wurde eine CMC -Lösung als Modellsubstrat hergestellt. In einem ersten Versuch (Versuch 1) mittels Tomographie wurde das Einmischen der HS 8mm Pellets in CMC bewertet. Dabei war eine deutliche Bildung einer Schwimmschicht zu beobachten, die auch nach längerer Zeit nicht eingerührt werden konnte.

Der Versuch wurde unter Verwendung von Gülle wiederholt (Versuch 2). Dabei sollte die Durchmischung des Reaktors durch die Zugabe einer CMC-Lösung mit gleicher Viskosität aber unterschiedlicher Leitfähigkeit bewertet werden. Die Zugabe konnte gleichmäßig im Reaktor verteilt werden. Auffallend war weiterhin, dass an der Flüssigkeitsoberfläche des Reaktors keine Strömung visuell wahrnehmbar war. Nach Rücksprache mit dem Projektpartner AGC von der BGA in Clausnitz ist eine solche Strömung auf der Anlage aber zu beobachten. Daher wurde in einem weiteren Versuch (Versuch 3) der Füllstand des Reaktors so weit herabgesetzt, bis an der Flüssigkeitsoberfläche eine deutliche Bewegung ersichtlich war. Dies entspricht einem Füllstand von 24 cm im Labor (ca. 2 m im originalen Anmischbehälter). Trotz der deutlich sichtbaren Bewegungen an der Flüssigkeitsoberfläche des Reaktors konnte die Pellet-Zugabe nicht vollständig eingemischt werden. Als störend erwiesen sich auch lange Fasern, die in der Gülle enthalten waren. Dies hatte zur Folge, dass zum einen der Leistungsbedarf des Rührers deutlich anstieg, zum anderen wurde auch eine Reduktion der Drehzahl des Rührers beobachtet. Weiterhin können diese Umwicklungen des Rührers zu Defekten an der Antriebswelle oder am Rührer selbst führen. Deshalb wurde in einem weiteren Versuch (Versuch 5) die Gülle abgesiebt und somit Fasern > 16 mm entfernt. Somit konnten die Pellets in diesem Versuch und auch aufgrund des reduzierten Füllstandes schnell eingemischt werden. Die Absiebung der Fasern führt auch zu einer deutlichen Reduktion der Fließeigenschaften (Abbildung 92).

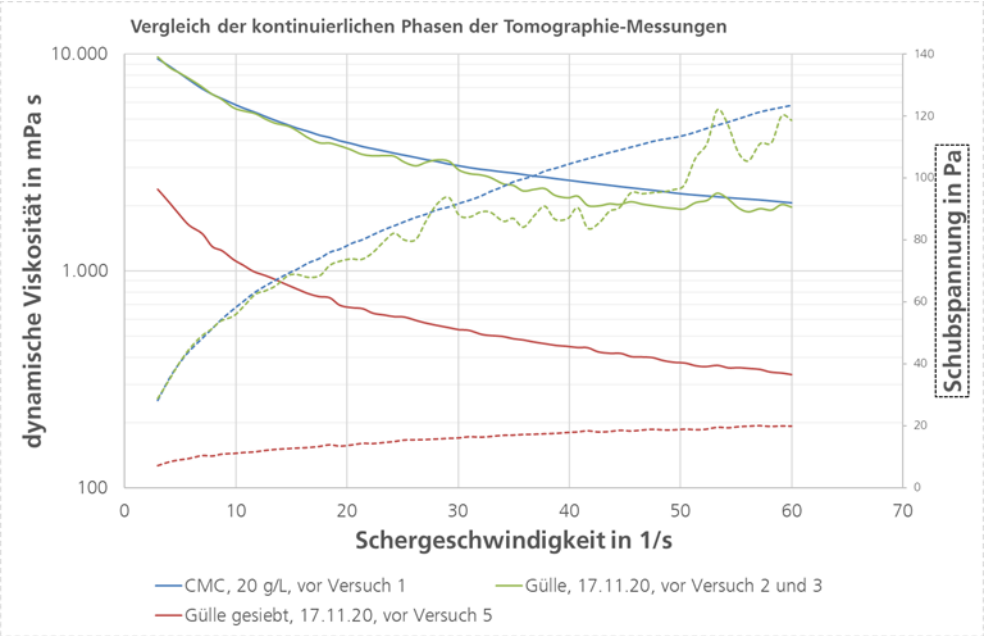


Abbildung 92: Vergleich der Fließeigenschaften vor den Tomographie Versuchen

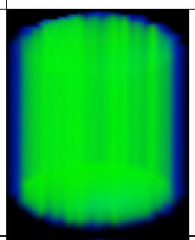
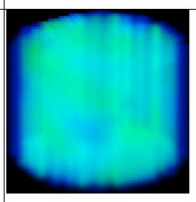
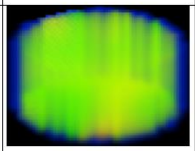
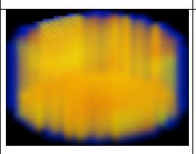
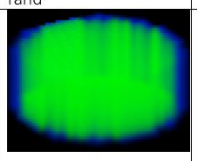
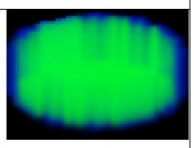
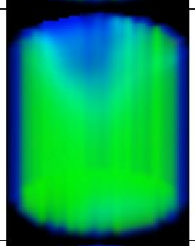
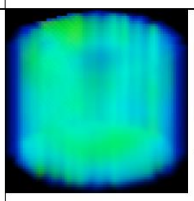
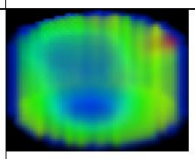
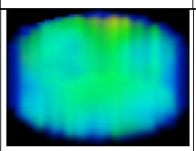
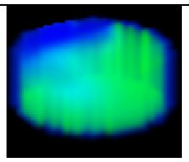
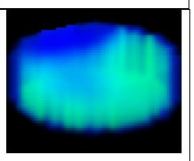
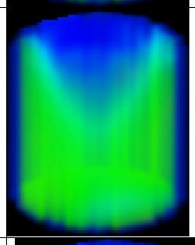
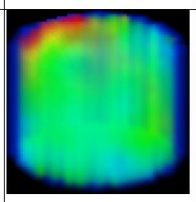
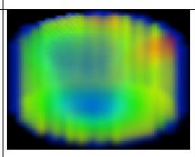
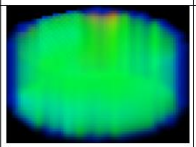
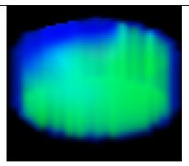
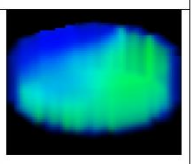
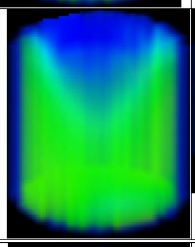
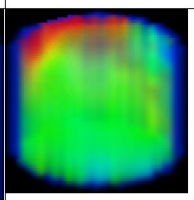
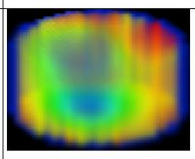
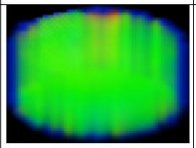
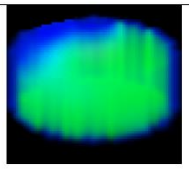
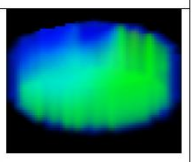
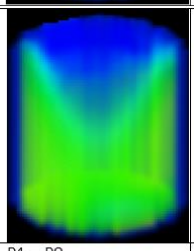
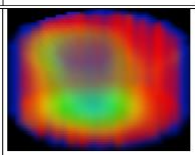
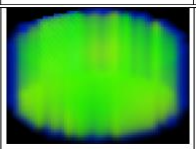
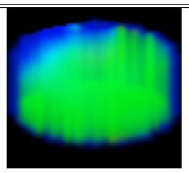
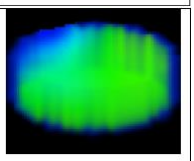
Abbildung 93 zeigt die noch nicht aufgelösten Pelletreste nach Versuch 5 mit einer Einmischdauer von ca. 4 h. Diese waren nahezu komplett aufgelöst.

Abbildung 93: Pellets nach Versuch 5, Versuchsdauer 4 h

Bei den Versuchen 6 und 7 wurde das Modellsubstrat CMC verwendet. Im Unterschied zu den vorhergehenden Versuchen wurde die Menge an Pellets erhöht, indem zwei Zugaben in zeitlichen Abstand zudosiert wurden.

Tabelle 15 fasst die Versuchsbedingungen und die Ergebnisse der durchgeführten Tomographieversuche zusammen. Die dargestellten blauen Bereiche zeigen Zonen mit niedriger Leitfähigkeit, wie Ansammlungen von Pellets. Rot sind Bereiche mit hoher Leitfähigkeit, beispielsweise hervorgerufen durch die Erhöhung der Temperatur infolge des Energieeintrags durch das Rühren.

Tabelle 15: Überblick Tomographieversuche

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7
Kont. Phase	CMC 20 g/L	Gülle	Gülle	Gülle (Absiebung langer Fasern)[1]	CMC 20 g/L	CMC 20 g/L
Füllhöhe	46 cm	46 cm	24 cm	24 cm	24 cm	20 cm
Disperse Phase	D_HS_z6_P8_Na	CMC (+ NaCl)	D_HS_z6_P8_Na	D_HS_z6_P8_Na	D_HS_z6_P8_Na	A_LH_P8
Zugabe Pellets	3 Zugaben	200 mL CMC	1,5 kg (mittig)	1,5 kg (mittig, große Höhe)	2*1,5 kg Pellets; mit ca. 5 min Abstand	2*1,5 kg Pellets; mit ca. 3 min Abstand
Ergebnis	Ausbildung einer kompakten Schwimmschicht	Ziel: Bewertung der Durchmischung im Reaktor Vollständige Durchmischung des Reaktors nach ca. 30 min	Einmischen einiger Pellets, dann Ausbildung einer Schwimmschicht	Pellets werden rasch eingemischt und gleichmäßig im Reaktor verteilt	Pellets können nicht vollständig eingemischt werden, es bleibt auch nach 60 min Mischzeit eine kleinere Schwimmschicht am Reaktorrand	Pellets können nicht vollständig eingemischt werden, die Schwimmschicht ist aber nochmals deutlich kleiner als im Versuch 6
Vor Zugabe						
Nach Zugabe						
15 min Mischzeit						
30 min Mischzeit						
60 min Mischzeit						
	P1 – P8	P2 – 7	P1 – P4 LF 15 – 19 mS/cm	P1 – P5	P1-P5	

[1] Aufgrund von Verzopfungen am Rührer konnte dieser nur eingeschränkt Rühren, daher wurden lange Fasern mit einem 16 mm Sieb entfernt, wobei sich das Fließverhalten geändert hat.
[2] Aufgrund des Rührens kommt es in den gut durchmischten Bereichen zu einer Erwärmung, dies wird durch die rötliche Färbung deutlich

Als Fazit der durchgeführten Tomographie-Versuche kann festgestellt werden, dass eine Einmischung der Pellets bei maximalem Füllstand (46 cm) sowie bei

hohen Viskositäten der Gülle im Labormaßstab nicht möglich ist. Durch ein Absenken des Füllstandes sowie die Reduktion der Fließeigenschaften konnte das Einmischverhalten der Pellets verbessert werden. Aber auch die Zugabemenge ist entscheidend ob und in welchem Maß eine Schwimmschicht ausgebildet wird. Diesen Gegebenheiten sind auch in der Praxis besondere Bedeutung zu schenken, da eine einmal ausgebildete Schwimmschicht sehr stabil ist und daher unbedingt vermieden werden sollte.

Praxisversuch

Ausgehend von den Laborversuchen zur Bewertung des Einmischverhaltens der Strohpellets mittels Tomographie wurde auf der Anlage in Clausnitz (Anmischbehälter) das Einmischen ebenfalls bewertet (Abbildung 94). Dazu wurden 270 kg Pellets per Radlader in den Anmischbehälter zu ca. 40 m³ Gülle gegeben. Dies entspricht einem Verhältnis von 1:150 (Pellets:Gülle). Damit wurden im Vergleich zu den durchgeführten Tomographieversuchen deutlich weniger Pellets zugegeben (Verhältnis Pellets:Gülle ca. 1:30). Auch die Viskosität der Gülle vor Zugabe der Pellets war mit einem Konsistenzfaktor von 5.322 mPa s und einem Fließindex von 0,34 deutlich niedriger als bei den durchgeführten Tomographieversuchen.

Bei dem Versuch hat sich herausgestellt, dass das installierte Rührwerk in der Höhe verstellbar ist. Dadurch kann der Einmischvorgang erheblich verbessert und damit die Ausbildung einer Schwimmschicht verhindert werden. Weiterhin wurden während des Versuchs oberflächliche Pelletansammlungen mit einer Schaufel händisch unter die Flüssigkeitsoberfläche gedrückt und konnten somit ebenfalls augenscheinlich gut eingemischt werden. Trotz der veränderten Position des Rührwerks und dem Unterdrücken kleinerer Schwimmschichten bildeten sich an den vertikalen Stangen im Reaktor Pelletansammlungen, die aber im weiteren Verlauf weitestgehend eingemischt werden konnten.

Abbildung 94: Reaktoroberfläche ca. 10 min nach Zugabe der Pellets

Durch die Zugabe der Pellets konnte nach dem Einmischen keine wesentliche Eindickung anhand der Viskosität festgestellt werden, siehe Abbildung 95. Dies

ist vermutlich auf die geringe Menge der Pellets zurückzuführen. Bei einer Probennahme nach Zugabe der Pellets konnten im Fermenterinhalt keine einzelnen unaufgelösten Pellets mehr gefunden werden.

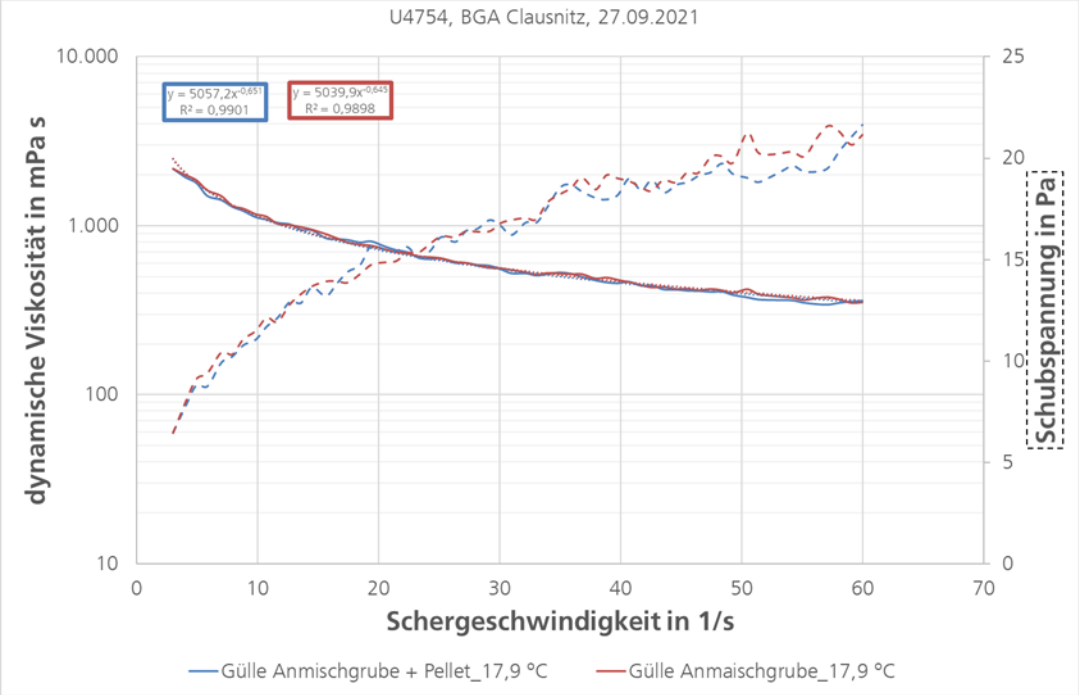


Abbildung 95: Vergleich der Fließeigenschaften vor und nach der Zugabe der Pellets

6.3.2 Ingenieurtechnisches Upscaling – Ableitungen für großtechnischen Betrieb

Im Folgenden werden nochmals kurz die Ergebnisse bzw. das Vorgehen des Fraunhofer IKTS bezüglich des prozesstomographischen Versuchs dargestellt. Aufgrund dieser Erkenntnisse basieren die weiteren Handlungsempfehlungen:

- Zugabe der Pellets im Verhältnis 1:8 (Pellet:Gülle bzw. CMC) für Quellversuche → absolutes Maximum
    - Das Auflösen der Pellets beginnt nach ca. 60 Minuten, dann nimmt die Viskosität deutlich zu und erreicht ein Plateau nach etwa 4 bis 5 h
- Zugabe der Pellets im Tomographie-Reaktor baugleich zur Anmischgrube im Verhältnis 1:25 bzw. 1:30 (Pellets : Reaktorflüssigkeit)
    - Zwei Zugaben, je 1,5 kg Pellets (aus Haferspelzen)
- Bei verminderter Füllhöhe des Anmischbehälters wird schneller eine Mischgüte von >95% erreicht. (Füllhöhe 24 cm = 1,96 m in Clausnitz: 43 min, Füllhöhe 20 cm = 1,63 m in Clausnitz: 11 min)
- Sobald sich eine kompakte Schwimmschicht gebildet hat, löst sich diese nur sehr schwer bis gar nicht mehr auf.
    - Der Versuch eine Schwimmschicht durch den zusätzlichen Einsatz von Gülle nach der Pelletdosierung aufzubrechen ist gescheitert. Auch kontinuierliches langes Rühren führte nicht zum Erfolg.
    - Die Bildung einer Schwimmschicht muss unbedingt vermieden werden.

Handlungsempfehlungen für die Praxis:

In den Laborversuchen wurden, die im Vergleich zur „normalen" Mischgülle etwas höher viskose Pelletgülle verwendet. Der freie Wasseranteil in der Pelletgülle ist etwas niedriger als er in der Mischgülle des Hofes ist. Die Mischgülle besteht aus allen anfallenden Güllen am Hof, mit einem geringen Anteil an Einstreu. Wie das Fraunhofer IKTS feststellte, lösen sich die Pellets in Wasser schneller als in viskosen Medien. In Wasser liegt die Auflösezeit bis 80% der Landhandel-Pellets aufgelöst sind (H2O_A_LH_P8) zwischen zwei bis drei Stunden. In den Versuchen zur Auflösegeschwindigkeit wurde eine 80% Auflösung in CMC oder Gülle erst nach 5 Stunden nicht erreicht.

➔ Handlungsempfehlung (1):

In den Versuchen zur reinen Dosierung von Pellets sollte in der Anmischgrube Mischgülle anstelle von Pelletgülle verwendet werden. Hierdurch wird schon im Voraus eine Reduktion der Viskosität erreicht. Optionale Möglichkeit wäre die Zuführung von Wasser, um die Auflösegeschwindigkeit zu erhöhen.

Es wurde außerdem festgestellt, dass sich die Pellets bei einem geringeren Füllstand besser einmischen lassen bzw. die Mischgüte nach kürzerer Zeit erreicht ist.

➔ Handlungsempfehlung (2):

Der Füllstand soll vor der Zuführung der Pellets abgesenkt werden. Am Fraunhofer IKTS wurde eine Mischgüte von > 95% bei einer zum Versuch analogen Höhe von 1,63m erreicht. Wie weit der Füllstand innerhalb des Anlagenmanagements abgesenkt werden kann, muss noch geklärt werden.

➔ Zusätzliche Handlungsempfehlungen

- Zugabe im Verhältnis 1:25 bzw. 1:30 (Pellets:Gülle)
- Geeigneter zeitlicher Abstand zwischen den Zugaben
- Positionierung des Rührwerks möglich nah an der Oberfläche, sodass Turbulenzen entstehen, die ein rasches Einmischen bzw. Benetzen der Zugabe ermöglichen
- Möglichkeit des Einsatzes eines weiteren Rührwerks prüfen
- Pellets mit geringerem Pressdruck oder geringerer Länge testen
- Pellets vor dem Einsatz aufmahlen / cracken, damit diese sich schneller auflösen und einmischen
- Da der Einsatz von Feststoffen – speziell pelletierter Feststoffe – in der Regel zu einem wesentlich höherem TS-Gehalt im Fermenter führt, sollte man überlegen, auch die Rührtechnik einem Feststoff-Mischer anzupassen. Siehe RVT Rührwerke, Haspelrührwerke, etc. Hier kann das Einmischverhalten positiv beeinflusst bzw. erst möglich gemacht werden.

6.4 Demonstrationsversuche zur Vergärung

6.4.1 Technische und organisatorische Vorbereitung eines großtechnischen Tests

Für die Bewertung des Einflusses der Substratwechsel der Pelleteinstreu wurden die zwei vorhandenen und baugleichen 75-kW – Kleingülleanlagen genutzt (Standort Clausnitz (Abbildung 96) und Cämmerswalde). Auf Grundlage der Versuchsplanungen und Empfehlungen der Projektpartner IKTS und Rückert wurden die Versuchssubstrate (Gülle und Festmist) gezielt in die Anlagen gefahren und die Betriebsdaten erfasst. Die digitalisierten Betriebsdaten wurden den Projektpartnern zur weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt. Die 75kW-Biogasanlagen wurden nach dem EEG 2012 vergütet. Durch die Anpassung der Einsatzsubstrate im Rahmen des Forschungsprogramms fand keine Änderung der Einsatzstoffvergütungsklassen statt, da eine Beschickung mit mindestens 80 % Gülleanteil beibehalten wurde und die restlichen 20 % mit anderer Biomasse aufgefüllt wurde (Auskunft des FvB).

Abbildung 96: BGA Clausnitz

Die Erfassung und Bilanzierung des Einstreuversuches richtete sich nach den praktischen Gegebenheiten der Agrargenossenschaft Bergland Clausnitz eG.

Der Liegeboxen-Laufstall wurde aller vierzehn Tagen mit Strohpellets oder entsprechenden Varianten eingestreut. Die eingestreute Menge wurde im Versuchszeitraum dokumentiert. Der Austrag des Einstreusubstrates durch Tierbewegung und Boxenpflege gelangt durch Mistschieber unmittelbar in den Güllekanal. Für den Versuchszeitraum ist die Gülle, welche in der Versuchsbiogasanlage Clausnitz eingesetzt wurde, stets direkt aus dem Kanal des Versuchsstalles gezogen worden, um eine Vermischung mit Gülle anderer Herkunft zu vermeiden. Wöchentlich wurde die „Pelletgülle“ zur Versuchsbiogasanlage transportiert und die entsprechende Menge dokumentiert. An der Biogasanlage wurden die Einsatzmengen sowie die täglichen Betriebsdaten der Anlage erfasst.

Auch der Tiefstreustall wird vierzehntägig gemistet und mit neuer Einstreu versehen. Der Festmist wurde dann direkt zur Versuchsbiogasanlage verbracht.

6.4.2 Einsatz von Gülle-Einstreu-Mischung und Festmist in der Praxis-BGA

Folgende zwei Abbildungen stellen die Startphase der großtechnischen Vergärungsversuche ab November 2020 dar und zeigen Quantitäten wichtiger Stoff- und Energieströme.

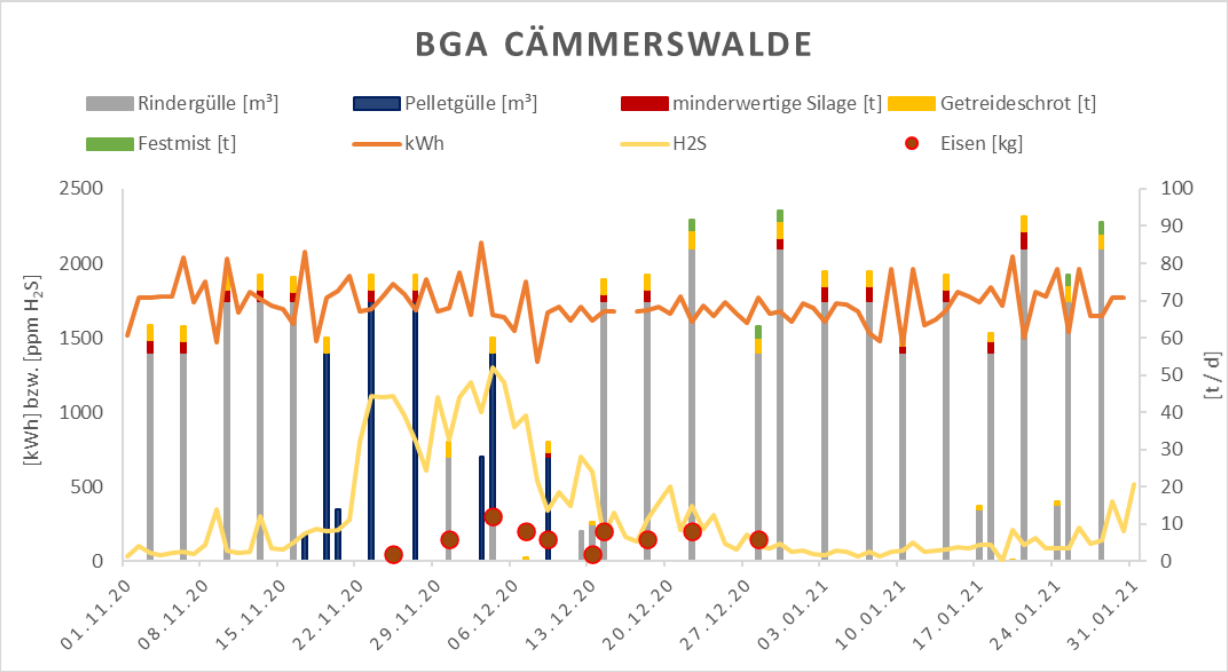


Abbildung 97: Stoffströme BGA Cämmerswalde Nov 20 bis Jan 21

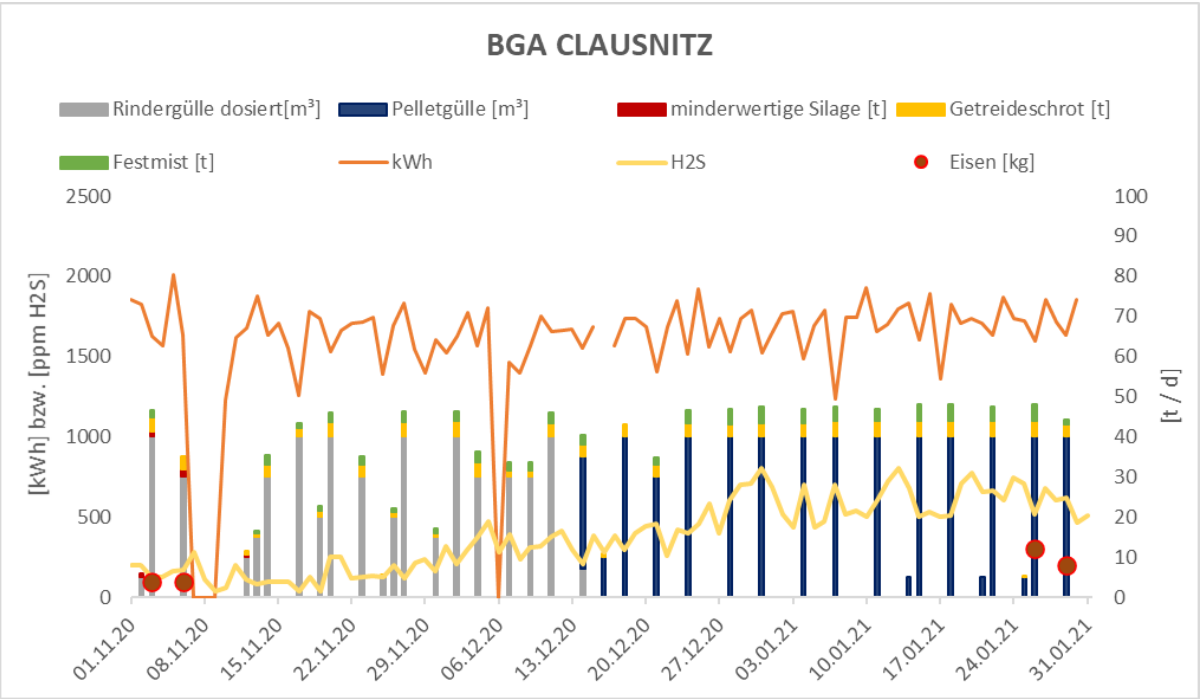


Abbildung 98: Stoffströme BGA Clausnitz Nov 20 bis Jan 21

Angedacht war, dass in der BGA Cämmerswalde die Pelletgülle, bestehend aus Rindergülle mit den jeweils eingesetzten Pellets, dosiert wird, während in der BGA Clausnitz der Hauptanteil des Festmists verarbeitet wird. Jedoch musste dies aufgrund technischer Schwierigkeiten umstrukturiert werden, so dass ab Mitte Dezember sowohl die Pelletgülle als auch der Großteil des Festmistes in die BGA Clausnitz dosiert wurde. In beiden Fällen konnte die produzierte Gasmenge konstant gehalten werden. Der kurzzeitige Stillstand des BHKWs an der BGA Clausnitz resultiert aus der Wartung von Gemischkühler und BHKW.

Nach anfänglichen Veränderungen der Substratbeschickung in den Vergleichsanlagen wurde ab Mitte Dezember 2020 folgendes Regime eingestellt:

<u>BGA Cämmerswalde: „Referenzanlage“</u>

- Rindergülle ohne Einstreu (Mutterkühe auf Matten) (fließt direkt aus dem Stall zur BGA)
- Minderwertige Silage und Getreideschrot

<u>BGA Clausnitz: „Pelletanlage“</u>

- Pelletgülle (Rindergülle mit Pelleteinstreu in Tiefliegeboxen)
- Pellet-Festmist (aus dem Tiefstreustall)
- Getreideschrot

Die Versuche wurden in 4 Abschnitte aufgeteilt, in welchen jeweils eine bestimmte Art an Pellets in den Versuchsställen eingesetzt wurde:

1. Referenz - Strohpellets vom 25.11.20 bis ca. 19.01.21
2. Mischpellets aus 50% zerkleinertes Stroh und 50% Getreideausputz (Landhandel) von 20.01.21 bis ca.29.03.21
3. Pellets aus 100% Getreideausputz (Landhandel) von 30.03.21 bis ca.08.06.21
4. Pellets aus 100% Dinkelspelzen von ca. 09.06.21 bis ca. 20.07.21

<u>Betriebsdaten</u>

Die folgenden Tabellen geben die mittleren Beschickungsmengen und Methanerträge für die Versuchszeiträume an.

Tabelle 16: Vergärung - Bilanzzeitraum 1 (Strohpellet als Einstreu)

BGA	*Einheit*	*Summe*	*Rinder-gülle*	*Mind. Silage*	*Getreide-schrot*	*Festmist*	*Pellet-gülle*	*Methan [m³/d]*
Cämmersw	[t/d]	18,5	13,8	0,5	1,0	0,2	3,1	406
Clausnitz	[t/d]	14,5	4,7	0,0	1,1	0,9	7,9	395

Tabelle 17: Vergärung - Bilanzzeitraum 2 (Mischpellet Stroh/Getreideausputz als Einstreu)

BGA	*Einheit*	*Summe*	*Rinder-gülle*	*Mind. Silage*	*Getreide-schrot*	*Festmist*	*Pellet-gülle*	*Methan [m³/d]*
Cämmersw	[t/d]	17,9	16,5	0,4	0,9	0,1	0,0	417
Clausnitz	[t/d]	12,7	0,0	0,0	0,9	0,3	11,4	413

Tabelle 18: Vergärung - Bilanzzeitraum 3 (Getreideausputz-Pellet als Einstreu)

BGA	Einheit	Summe	Rinder-gülle	Mind. Silage	Getreide-schrot	Festmist	Pellet-gülle	Methan [m³/d]
Cämmersw	[t/d]	18,1	16,6	0,4	1,1	0,0	0,0	414
Clausnitz	[t/d]	12,8	0,0	0,0	0,9	0,0	11,8	414

Tabelle 19: Vergärung - Bilanzzeitraum 4 (Dinkelspelzen-Pellet als Einstreu)

BGA	Einheit	Summe	Rinder-gülle	Mind. Silage	Getreide-schrot	Festmist	Pellet-gülle	Methan [m³/d]
Cämmersw	[t/d]	12,0	10,1	0,6	1,3	0,0	0,0	408
Clausnitz	[t/d]	12,6	5,9	0,0	0,9	0,0	5,9	411

Der Methanertrag wurde aus dem Mittelwert für die Stromerzeugung im BHKW über den jeweiligen Zeitraum berechnet. Ausfälle aufgrund von technischen Störungen wurden herausgerechnet.

Bei der minderwertigen Silage handelte es sich um Grassilage. Im Folgenden sind die konkrete Masseverteilung der einzelnen Beschickungssubstrate über den gesamten Versuchszeitraum sowie die Versuchsphasen als Nummern dargestellt.

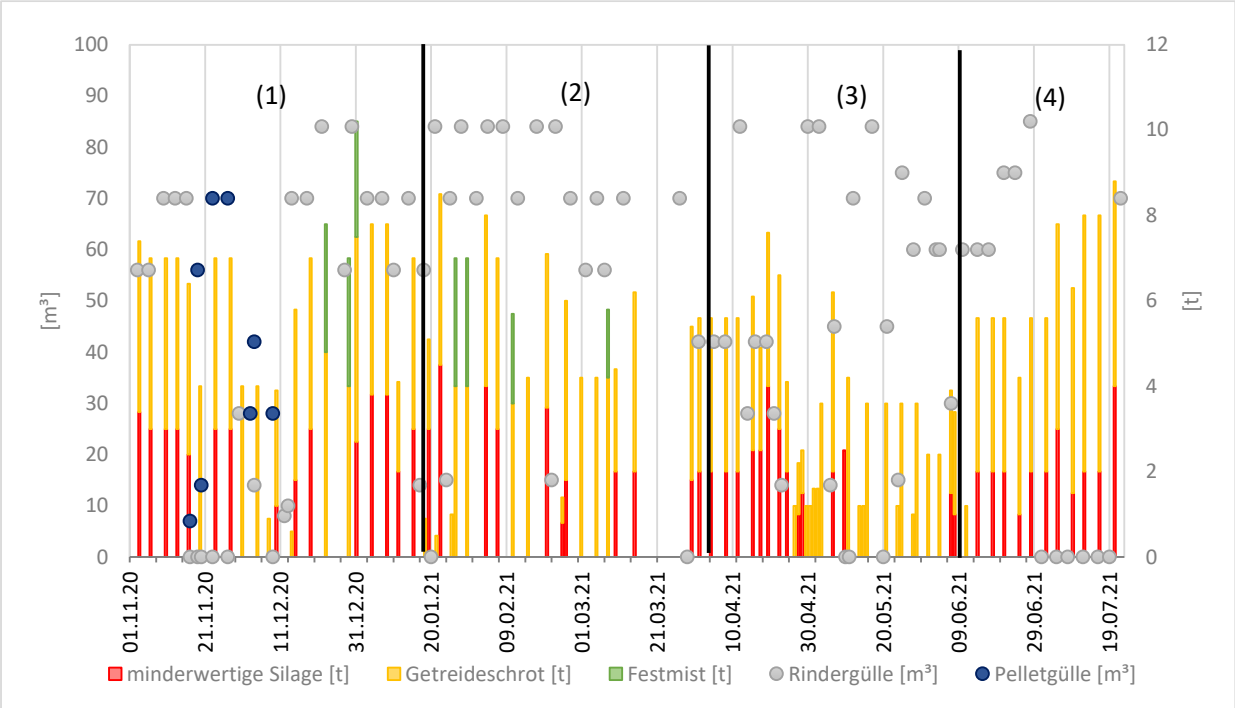


Abbildung 99: Inputsubstrate Cämmerswalde (Gesamtzeitraum) – Dosierung in Anmischgrube

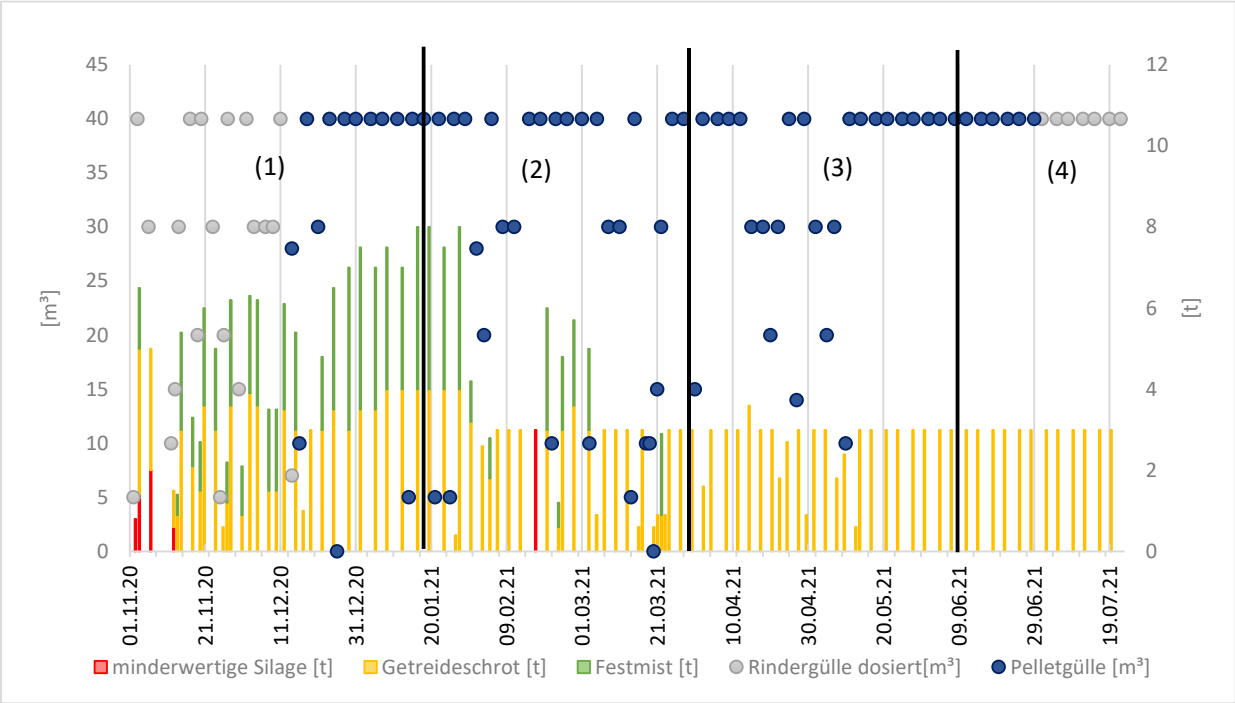


Abbildung 100: Inputsubstrate Clausnitz (Gesamtzeitraum) – Dosierung in Anmischgrube

Über den gesamten Zeitraum betrachtet lag die Stromproduktion in beiden Anlagen bei ca. 1.700 kWh/d. Es wird ersichtlich, dass in der BGA Cämmerswalde ca. 50% der festen Substrate Silagen ausmachen, während in der BGA Clausnitz anstelle der Silage Festmist oder pellethaltige Gülle eingesetzt wird. Somit wird in die BGA Clausnitz ein deutlich höherer Gehalt an Stroh, über den Festmist und die Pelletgülle, eingebracht.

Bei gleichzeitigem Einsatz von „Pelletgülle" (Liegeboxenstall) sowie „Pellet-Festmist" (Tiefstreustall) ist die Rühr- und Pumpfähigkeit des Inputmaterials sehr deutlich abgesunken, sodass die einzusetzenden Festmistmengen reduziert bzw. nach mehrmaligen Mischproblemen auch ganz eingestellt werden mussten. Ab dem 02.03.2021 wurde aus technischen Gründen kein Festmist mehr eingesetzt.

Es lässt sich festhalten, dass selbst augenscheinlich gequollene Strohpellets durch die aktive Einmischung noch weiteres Quellvermögen aufweisen und damit auch nach Entnahme aus den Stallungen noch nicht ihr Wasseraufnahmevermögen ausgeschöpft haben. Dies lässt sich durch die Einstreumenge je Kuh und Tag in Abhängigkeit zur angestrebten Liegeplatzqualität steuern.

In den folgenden Diagrammen sind die berechnete Methanmenge und der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas aufgetragen.

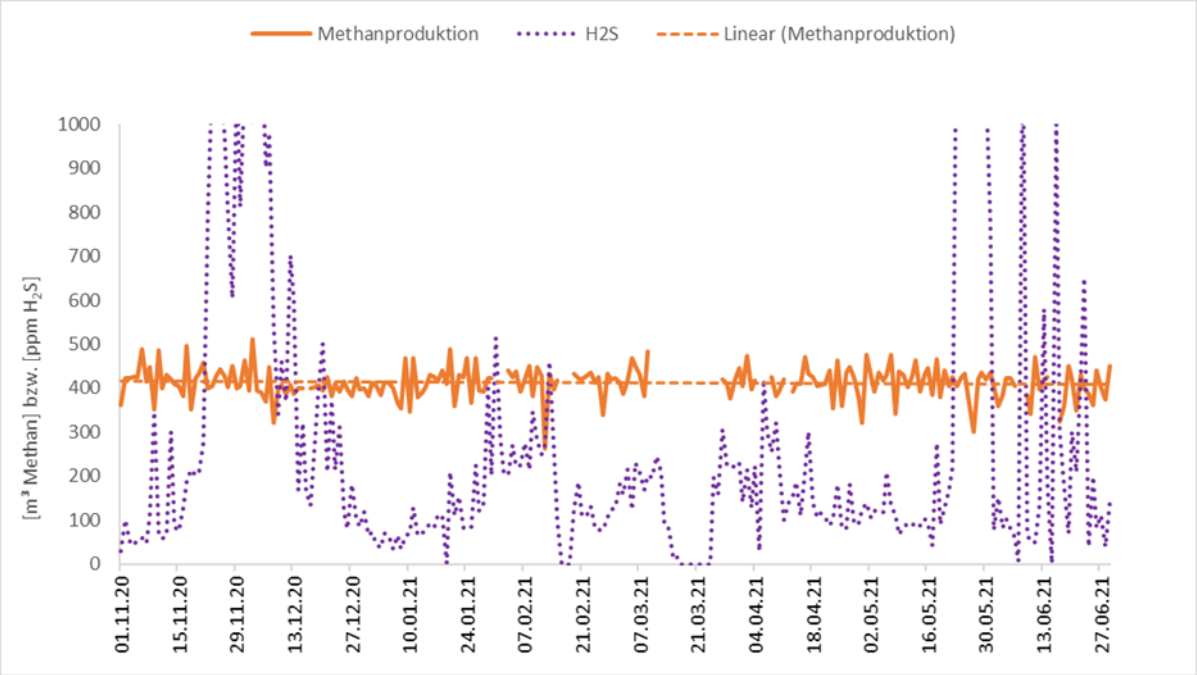


Abbildung 101: Methanertrag und H2S-Gehalt Cämmerswalde (Gesamtzeitraum)

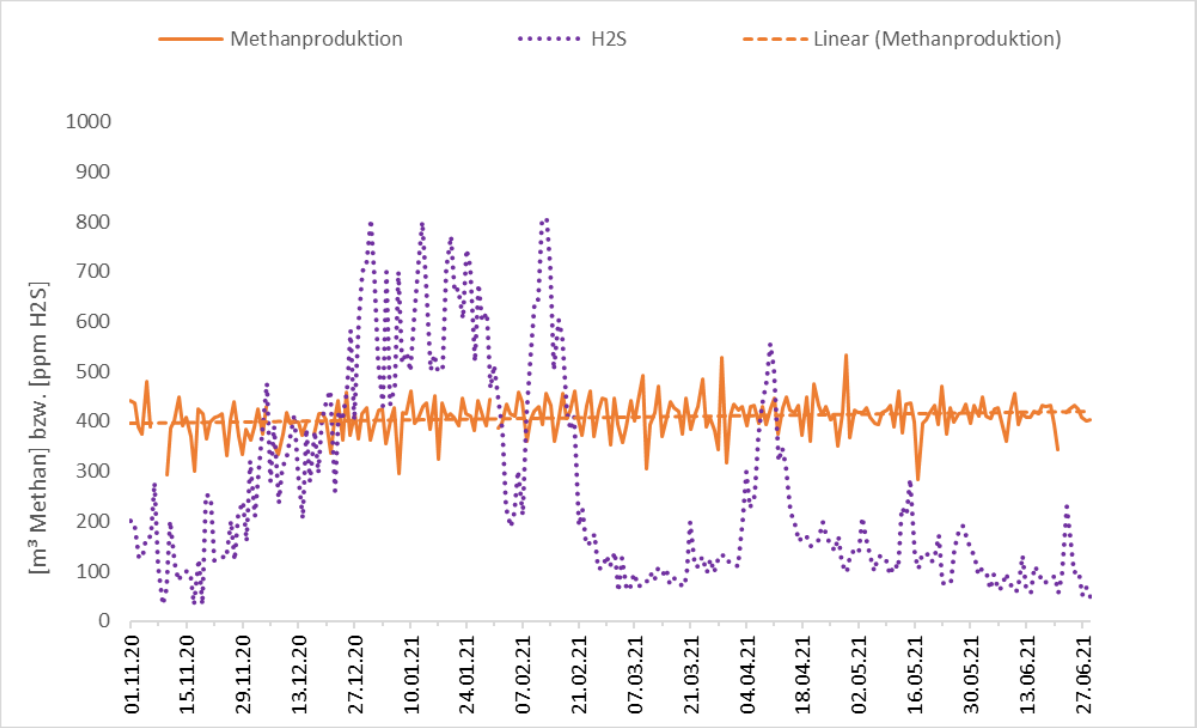


Abbildung 102: Methanertrag und H2S-Gehalt Clausnitz (Gesamtzeitraum)

Der Gehalt an H_2S zeigte in beiden Fermentern mehrere Maxima, welchen durch die Zudosierung von Eisenpräparaten entgegengewirkt wurde. Ein direkter Zusammenhang zum Einsatz von Pelletgülle oder Festmist konnte nicht hergestellt werden. Vermutet wurde aber, dass sich eine verminderte Dosierung von langfaserigen Produkten (wie Grassilage) auf die Bildung einer geringen Schwimmschicht auswirkte. Wenn sich diese Schwimmschicht im Fermenter nicht ausbildet, dann kann eine Besiedlung mit Bakterien für eine biologische Entschwefelung nicht in ausreichendem Maße erfolgen. Der H_2S-Gehalt steigt an und muss mit eisenhaltigen Fällmitteln erniedrigt werden.

In den letzten 3 Versuchsmonaten (April – Juni 21) wurde in beiden Vergleichsreaktoren etwa gleich viel Eisen dosiert. Während diese Dosierung im Pelletraktor (Clausnitz) ausreichte, um den H_2S-Gehalt niedrig zu halten, so ergaben sich im Referenzraktor (Cämmerswalde) größere H_2S-Spitzen. Möglicherweise hat hier die Anreicherung mit Stroh- bzw. Spelzenpartikeln einen positiven Einfluss gehabt.

Der Methanertrag konnte für beide Varianten und über alle Einsatzsubstrate konstant gehalten werden, wobei dafür die Anlagenfahrer ihre Erfahrung zur Regelung der Anlage und Beschickung eingebracht haben.

Ein Fütterungsregime „nach Plan" konnte nicht umgesetzt werden. Das Fütterungsregime wurde in Abhängigkeit der Viskosität in der Anmischgrube geregelt. Die Schwankungsbreite des Zustandes des Ausgangsmateriales war schlichtweg zu hoch. Als Grund dafür ist festzuhalten, dass unmittelbar nach Einstreu der Liegeboxen der Austrag tendenziell etwas höher ist als nach zehn bis vierzehn Tagen. Damit ist die Viskosität der Gülle in Abhängigkeit zum Zeitpunkt des Einstreuvorganges zu beurteilen. Entsprechend ist es entscheidend, dass der Anlagenfahrer in der Lage ist, die Fütterung anhand der optimalen Gesamtviskosität einzustellen. Dies kann zum Beispiel durch das Einmischen von Rezirkulat sichergestellt werden.

Messtechnische Bewertung

In den folgenden beiden Abbildungen sind die **TR- und oTR-Gehalte** für die Gärprodukte aus den beiden Vergleichsanlagen sowie die nummerierten Versuchsphasen dargestellt.

Die BGA Clausnitz weist dabei einen höheren TR-Gehalt auf, da verstärkt strohhaltige Substratanteile über die Einstreuprodukte zugeführt wurden. Wie bereits beschrieben wurde ab 02.03. kein Festmist mehr in die Anlage dosiert, da es zu Durchmischungsproblemen kam. Dies ist auch am Rückgang des TR-Gehaltes gut zu erkennen. Der oTR-Gehalt verhält sich zeitverzögert analog.

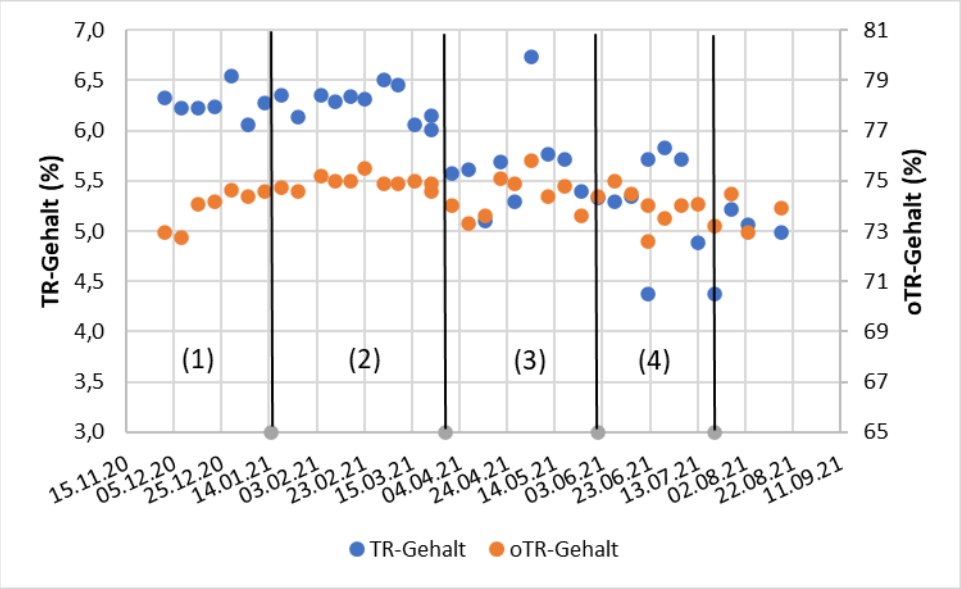


Abbildung 103: TR, oTR-Gehalt BGA Clausnitz

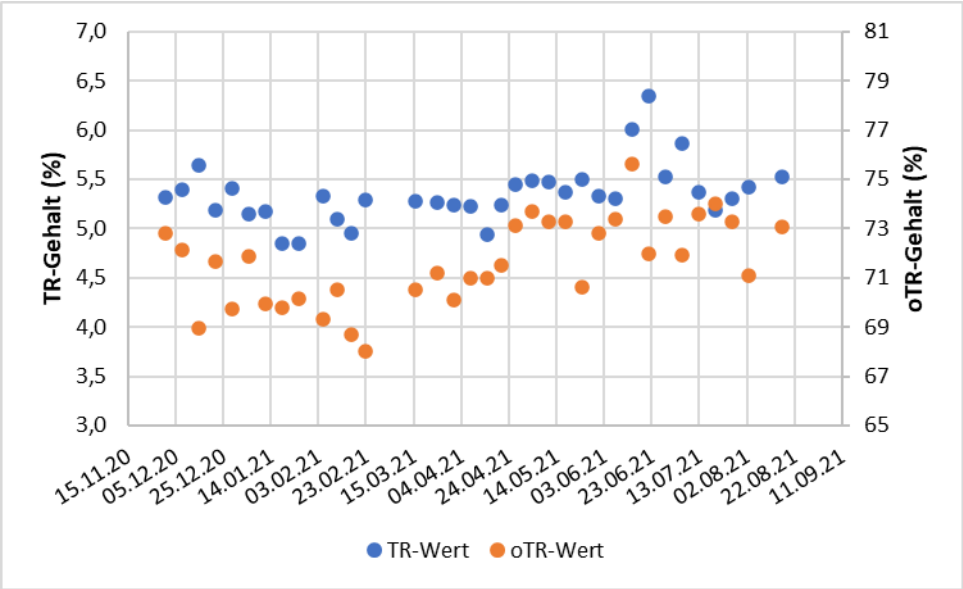


Abbildung 104: TR, oTR-Gehalt BGA Cämmerswalde

Die in den folgenden beiden Abbildungen dargestellten Werte weisen darauf hin, dass eine Beimengung von Strohpellets zu Gülle oder Festmist keine signifikanten Änderungen von **pH-Wert und el. Leitfähigkeit** in den Fermentern hervorruft. Die Eigenschaften des Hauptsubstrates (Gülle) sind hier eher relevant. Wie bereits bei den Analysen der Rohgüllen (vgl. 6.2.3) gezeigt, wirkt sich die relativ kleine Menge an zugesetzten Pellets (mit einem kleinen Anteil an NaOH) nicht signifikant auf pH und LF aus.

Damit liegen die gut gepufferten pH-Werte über die gesamte Versuchsdauer in einem stabilen Bereich um 8. Dies weist auf eine stabile Fermenterbiologie hin.

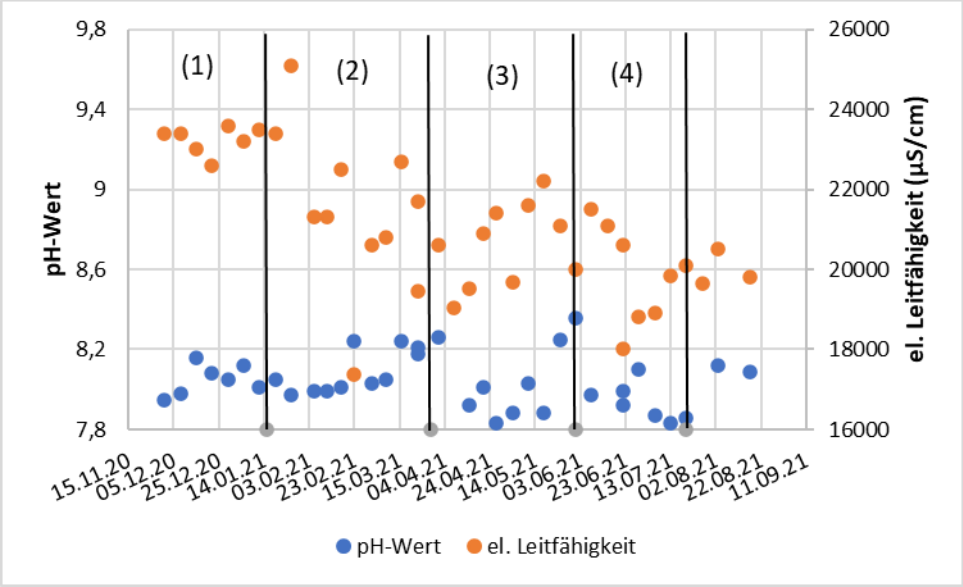


Abbildung 105: pH, el. Leitfähigkeit BGA Clausnitz

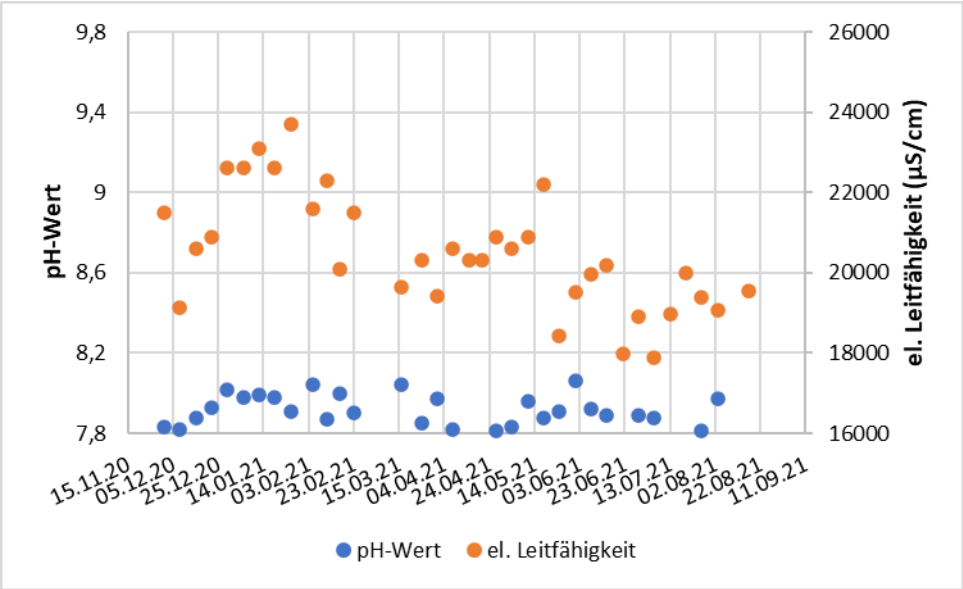


Abbildung 106: pH, el. Leitfähigkeit BGA Cämmerswalde

Die gemessenen Gehalte an **Natrium und Ammonium** (folgende Abbildungen) zeigen keine Auswirkungen des Pelleteinsatzes im Stall auf die Biogaserzeugung. Der ebenfalls gemessene **CSB-Gelöst** als Maß für Restgaspotenzial und Prozessstabilität zeigt nur geringe Unterschiede zwischen den Vergleichsreaktoren. Tendenziell liegt der CSB in Clausnitz geringfügig niedriger, was auf eine leicht verbesserte Prozessstabilität hindeuten könnte.

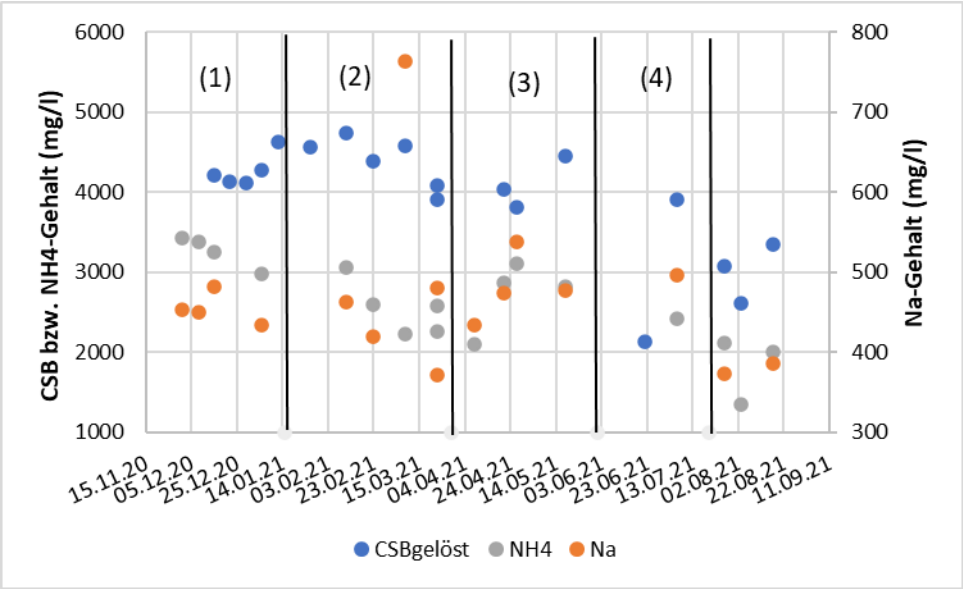


Abbildung 107: CSB-, Ammonium- und Natriumgehalt BGA Clausnitz

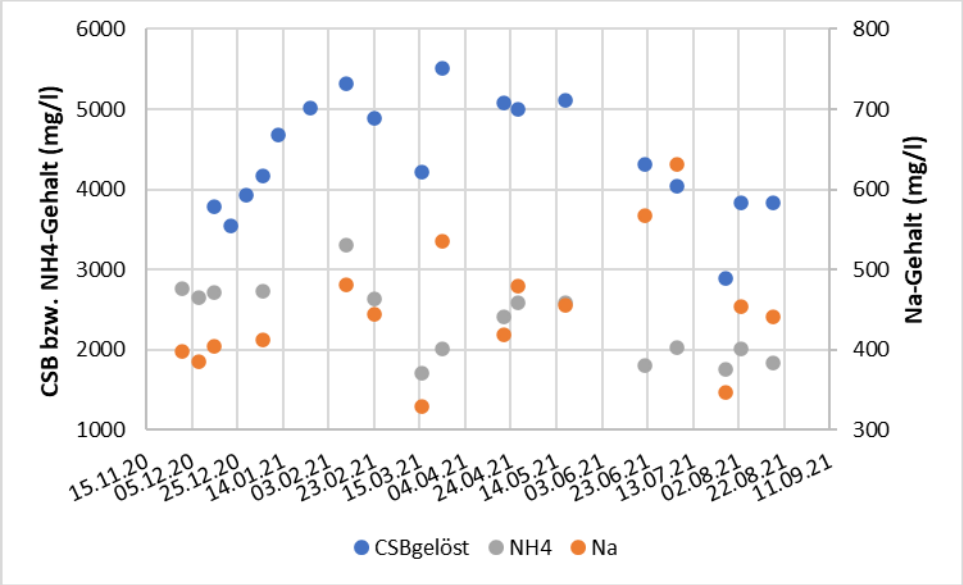


Abbildung 108: CSB-, Ammonium- und Natriumgehalt Cämmerswalde

Für die 4 Versuchsphasen wurde anhand der Beschickungsmengen und der Analysewerte eine Bilanz der zugeführten oTR-Frachten und der spezifischen Gaserträge erstellt (Tabelle 20 und Tabelle 21).

Tabelle 20: Stoffstrom und Gasbilanz – Versuchszeiträume 1 und 2

		Strohpellets		***Mischpellets 50/50***	
		25.11.- 19.01.		***20.01.-29.03.***	
		BGA	BGA	BGA	BGA
		Cämmersw	Clausnitz	Cämmersw	Clausnitz
Rindergülle (ohne Einstreu)	t oTR/d	0,74	0,25	0,89	
Pelletgülle	t oTR/d	0,25	0,64		1,06
Minderwertige Silage	t oTR/d	0,14		0,10	
Getreideschrot	t oTR/d	0,84	0,92	0,78	0,78
Festmist	t oTR/d	0,06	0,33	0,04	0,09
SUMME oTR-Fracht	t oTR/d	2,03	2,13	1,81	1,93
Methan	m³/t oTR	200,1	185,1	230,2	214,0
Anteil Pellets in Gülle	t oTR/d	0,09	0,22	0,00	0,32
Anteil Pellets in Festmist	t oTR/d	0,04	0,20	0,03	0,07
Anteil Pellets in Gülle	% oTR-Fracht	4	10	0	16
Anteil Pellets in Festmist	% oTR-Fracht	2	9	2	4

Für den Versuchszeitraum 1 mit klassischen Strohpellets war die Trennung nach Referenz- und Pelletreaktor aufgrund von logistischen Überlegungen nicht konsequent, wodurch in beide Reaktoren Anteile von Pellets zugeführt wurden. Die spezifische Gasaubeute pro oTR-Zufuhr lag vergleichsweise niedrig, was auf einen Eingewöhungseffekt (langsamerer Abbau der Strohbestandteile) zurückzuführen ist. Mit zunehmender Versuchsdauer erhöhte sich der Gasertrag im Pelletreaktor (Clausnitz) auf plausible Werte um 230 bis 264 NL Methan pro kg oTR. Dies liegt im Bereich der Ergebnisse aus den Batchversuchen. Es zeigt, dass das Gaspotenzial, welches in den Pellets steckt, auch nach Nutzung im Stall in der Biogasanlage freigesetzt werden kann. Was ebenfalls zu erkennen ist, dass der Einsatz von größeren Anteilen an Festmist aufgrund der Vorrotte im Stall ein möglicher Grund für abnehmende Gasausbeuten in den Versuchszeiträumen 1 und 2 war.

Tabelle 21: Stoffstrom und Gasbilanz – Versuchszeiträume 3 und 4

		100 % Landhandel		***Dinkelspelzenpellets***	
		30.03.-08.06.		***09.06. - 20.07.***	
		BGA	BGA	BGA	BGA
		Cämmersw	Clausnitz	Cämmersw	Clausnitz
Rindergülle (ohne Einstreu)	t oTR/d	0,89		0,54	0,31
Pelletgülle	t oTR/d		0,99		0,50
Minderwertige Silage	t oTR/d	0,12		0,18	
Getreideschrot	t oTR/d	0,93	0,80	1,07	0,74
Festmist	t oTR/d				
SUMME oTR-Fracht	t oTR/d	1,94	1,79	1,79	1,56
Methan	m³/t oTR	213,7	231,0	227,6	264,0
Anteil Pellets in Gülle	t oTR/d	0,00	0,33	0,00	0,16
Anteil Pellets in Festmist	t oTR/d	0,00	0,00	0,00	0,00
Anteil Pellets in Gülle	% oTR-Fracht	0	18	0	10
Anteil Pellets in Festmist	% oTR-Fracht	0	0	0	0

Bilanziell wurde insbesondere in den Versuchszeiträumen 3 und 4 weniger oTR-Fracht in die BGA Clausnitz als in die Referenzanlage Cämmerswalde eingebracht. Da die Gasausbeute trotzdem ähnlich hoch ausfiel, konnte unter anderem durch den (relativ geringen) Pelletanteil ein gute spezifische Gasausbeute erreicht werden.

6.4.3 Direkter Einsatz von Mischpellets in der Praxis-BGA

Das Kompaktieren von Mischungen aus Agrarnebenprodukten und Strohfraktionen bietet ein enormes Energiepotential für Biogasanlagen. Durch die Kompaktierung wird ein kaum nutzbares Substrat für den Biogaseinsatz nutzbar gemacht. Dies hat vor allem mit Aspekten des Handlings vor dem Einsatz in der BGA, z.B. Staub, Lagerhaltung etc., sowie der Wirkungsweise in der BGA, z.B. Dosierung, Schwimmschichtbildung, zu tun. Bei der Herstellung der Mischpellets wurde seitens ATS stets auf Energieeffizienz im Pelletierprozess geachtet. Daher wurde meistens die Hammermühle zum Nachzerkleinern umfahren, um weniger elektrischen Energieeintrag in den Pellet zu haben. Ferner wurde versucht ein möglichst geringes Pressverhältnis beim Pelletieren zu nutzen, um ebenfalls mehr Produkt in gleicher Zeit durch die Anlage zu fahren bzw. auch an dieser Stelle einen niedrigeren elektrischen Energieeintrag zu erhalten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass durch den Transport und die Lagerhaltung Pellets mit einer geringen Kompaktierung nicht Lagerstabil bleiben und verstärkt wieder auflösen und in Ihre Einzelbestandteile zerfallen.

Der Vorteil beim Einsatz von Pellets ohne vorherige Nutzung als Einstreu liegt darin, dass es sich um einen homogenen Einsatzstoff handelt. Damit ist der Anlagenfahrer in der Lage, die optimale Viskosität in der Anmischgrube einzustellen. Da das Wasseraufnahmevermögen der reinen Pellets entsprechend hoch ausfällt, muss allerdings eine exakte Dosierung sichergestellt sein. Eine Überdosierung kann in kürzester Zeit zu einem raschen Viskositätsanstieg führen und damit im Extremfall den störungsfreien Anlagenbetrieb gefährden.

Die skalierten Mengen aus den Rührversuchen des Fraunhofer IKTS (vgl. Abschnitt 6.3.2) ergeben für die BGA Clausnitz folgende maximale Mengen in der Anmischgrube (Tabelle 22).

Tabelle 22: Skalierte Pelletmengen aus Versuch des Fraunhofer IKTS

	Zugabe	Fermenterflüssigkeit / CMC	Verhältnis
Versuch CMC	1,5 kg Pellets	45 L	1:30
Versuch CMC	1,5 kg Pellets	37 L	1:25
Versuch BGA	0,8 t	24,6 m³	1:30
Versuch BGA	0,8 t	20,5 m³	1:25

In der Biogasanlage Clausnitz wurden standardmäßig pro Tag ca. 0,9 t Getreideschrot und ca. 11,8 m³ Gülle eingesetzt. Das Biogas, welches aus dem Getreideschrot produziert wird, sollte bis zu einem maximal möglichen Anteil durch Biogas aus Pellets ersetzt werden. Für die Versuche wurde entschieden, nur eine Pelletart einzusetzen. Es handelte sich um Pellets welche zu 100% aus Landhandelsresten (Stroh, Spreu – Mix) hergestellt wurden. Die Eigenschaften der Substrate sind in Tabelle 23 aufgelistet.

Tabelle 23: Eigenschaften der Einsatzstoffe

Stoff	TR	oTR	Gasertrag	Methanertrag	Wassersaugvermögen
	%	%	Nl / kg oTR	Nl / kg oTR	% OS
Pellet Landhandel	84,7	88,2	696,2	380,7	319,9
Getreideschrot	87,3	97,7	751	383,0	n.a.

Im tatsächlichen Betrieb zeigte sich, dass die Handlungsempfehlung (Abschnitt 6.3.2), einen niedrigeren Füllstand einzustellen, um die zunächst schwimmenden Pellets gut einzumischen auch alternativ mit hohem Füllstand realisiert werden könnte. Dafür wurde das Rührwerk deutlich höher eingestellt, um ausreichend Turbulenz an der Oberfläche zu erreichen (Abbildung 110).

Abbildung 109: Dosierung von Pellets (mit erhöhtem Staubanteil) in die Vorgrube Clausnitz

Abbildung 110: Oberfläche Mischgrube mit anfangs schwimmenden Pellets und Turbulenzen

Trotz aller Vorversuche und theoretischer Berechnungen, konnte im laufenden Betrieb des Agrar-Partners kein Risiko hinsichtlich von Verstopfungen eingegangen werden. Die Anlagenfahrer haben daher nach Sichtkontrolle entschieden, wieviel Pellets zur Mischgrube zudosiert wurden. Dabei wurden im Maximum 1,6 t Pellets auf 40 m³ Gülle zugegeben, was der Handlungsempfehlung von 1:25 entsprach. Jedoch musste danach die Pelletmenge wieder verringert werden, da das Substrat im Anmischbehälter nur noch schwer zu durchmischen war.

Die einzelnen Dosiermengen und Zeitpunkte für die verschiedenen Inputsubstrate sind in Abbildung 111 dargestellt. Über knapp 3 Monate wurden immer wieder Pellets direkt in die Vorgrube der BGA Clausnitz dosiert. Das Aussetzen der Dosierung in der ersten Novemberhälfte resultierte aus einer technischen Störung. Die Mischung wurde am 26.10. insgesamt zu dick. Es wurde eine Verstopfung der Leitung von der Vorgrube zum Fermenter befürchtet, weshalb für 2 Wochen keine Pelletdosierung erfolgte. Mit diesen Einschränkungen mussten die praktischen Versuche durchgeführt und ausgewertet werden.

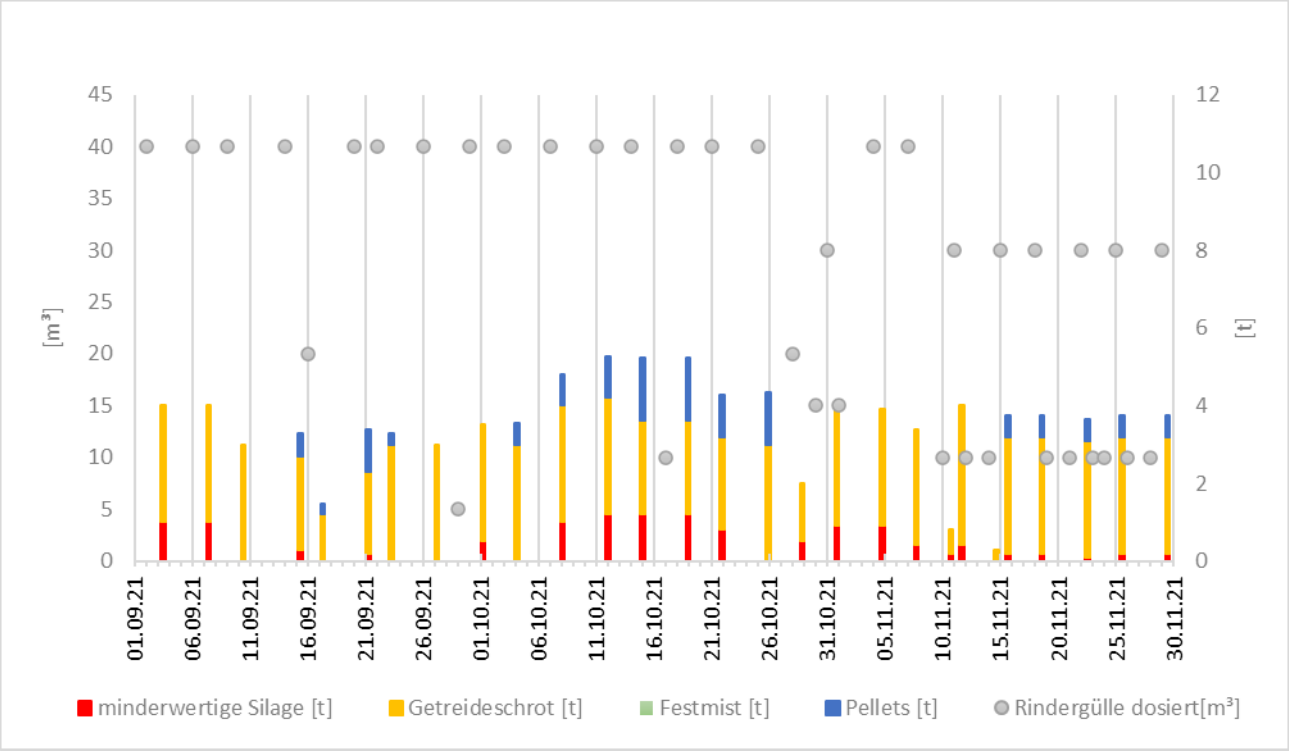


Abbildung 111: Zeitpunkte und Mengen der Substratzugabe in die BGA-Vorgrube in Clausnitz

Die eingesetzte Gülle enthielt anfangs noch Anteile von Einstreu. Später wurde ausschließlich dünnere Gülle eingesetzt, um möglichst viel Pellets zudosieren zu können (Abbildung 112).

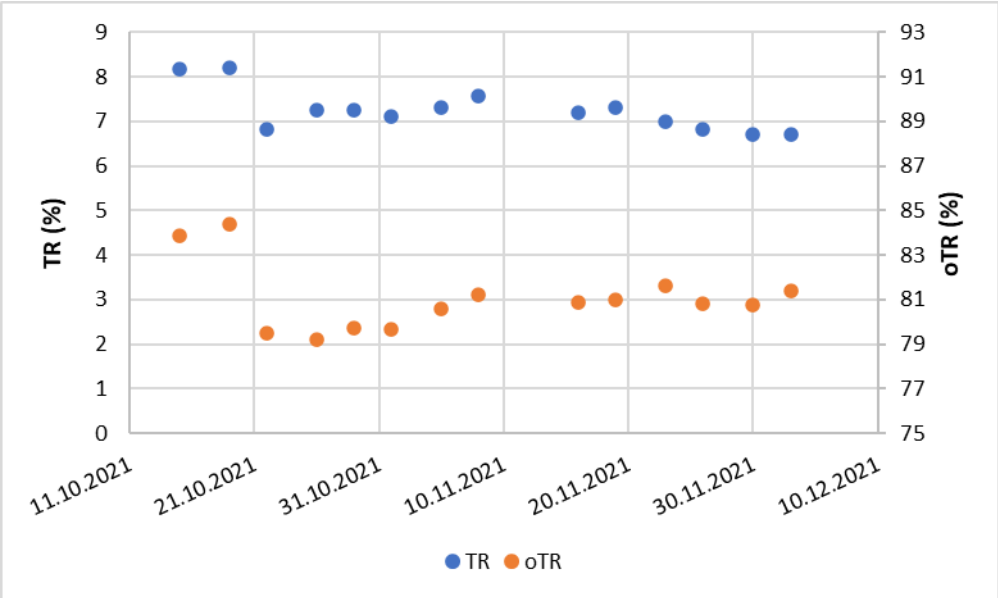


Abbildung 112: TR, oTR der Gülle zur Anmischgrube Clausnitz

In Abbildung 113 sind TR- und oTR-Werte für die Mischung der Vorgrube dargestellt. Zu erkennen sind die relativ hohen Werte Mitte Oktober, welche zum einen aus der etwas dickeren Gülle, aber auch aus den höchsten Zugabemengen an Landhandel-Pellets resultierten.

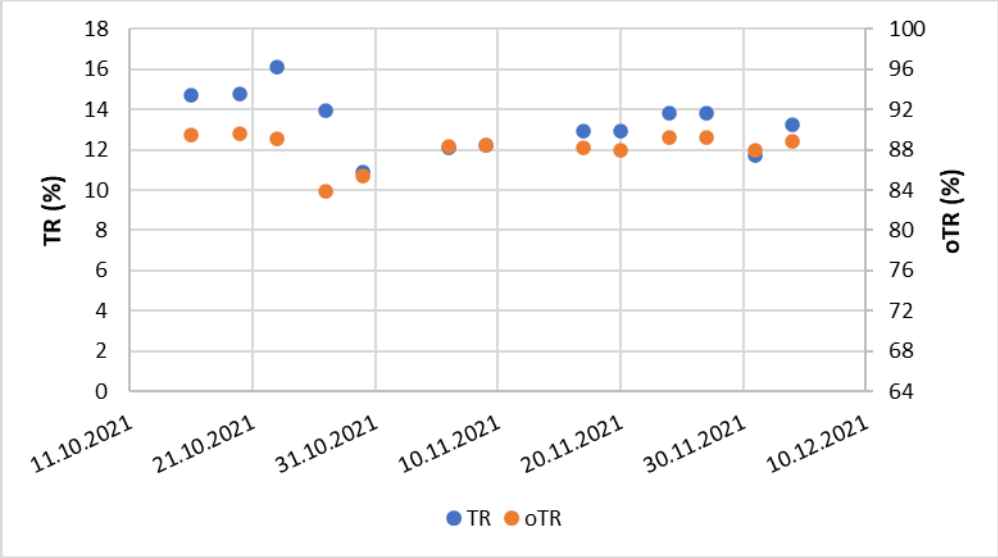


Abbildung 113: TR, oTR der Anmischgrube (ca. 1 Tag nach Zugabe der Pellets und anderer Co-Substrate)

Die sich daraus ergebenden Eigenschaften im Gärrest der BGA Clausnitz wurden ebenfalls analytisch untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Werte TR (5,3 %), oTR (74,8 %), pH (7,9), el. Leitfähigkeit (19,8 mS/cm), CSBgelöst (3,6 g/l), NH4 (2959 mg/l) und Natrium (516 mg/l) sehr konstant und vergleichbar mit den Versuchen aus Abschnitt 6.4.2 (Einstreu-Nutzung) lagen.

Tabelle 24 gibt die zugegebenen Stoffströme quantitativ wieder. Aufgrund der technischen Störung konnten im Mittel des Bilanzzeitraumes nur vergleichsweise geringe Mengen an Pellets zugegeben werden. Trotzdem wurden gegenüber der Referenzanlage (Cämmerswalde) 85 % an Silage und 20 % an Getreideschrot eingespart.

Tabelle 24: Stoffströme für BGA Clausnitz (direkte Pelletzugabe 15.09.21 bis 30.11.21)

BGA	*Einheit*	*Summe*	*Rinder-gülle*	*Mind. Silage*	*Getreide-schrot*	*Festmist*	*Pellets*	*Methan [m³/d]*
Cämmersw	[t/d]	13,5	11,8	0,7	1,0	0,0		391
Clausnitz	[t/d]	13,0	11,8	0,1	0,8	0,0	0,173	408

In der Vergleichsanlage Cämmerswalde hatte ein Holzbalken das Rührwerk blockiert. Zudem wurde ein Leck in der Gashaube festgestellt, weshalb im Oktober die Methanproduktion vermindert war, beziehungsweise sehr schwer zu beziffern. Am 28.10. wurde die Gasblase erneuert und das BHKW gewartet. Diese Arbeiten liefen über mehrere Tage und fallen in den Zeitraum des Pelletversuchs, weshalb ein direkter Vergleich mit der Methanproduktion in der BGA Clausnitz nur bedingt möglich war. Unplausible Lücken in der Gasproduktion wurden nicht zur Mittelwertbildung herangezogen.

Für die vorliegenden Betriebsdaten sowie für die Analysewerte des IKTS konnten die in Tabelle 25 dargestellten Stoffstrombilanzen erstellt werden.

Tabelle 25: Stoffstrom- und Gasbilanz BGA Clausnitz (direkte Pelletzugabe 15.09.21 bis 30.11.21)

		100 % Landhandel	
		15.09.-30.11.	
		BGA	BGA
		Cämmersw	Clausnitz
Rindergülle Mix	t oTR/d	0,67	0,70
Pellets (Direktzugabe)	t oTR/d	0,00	0,13
Minderwertige Silage	t oTR/d	0,18	0,04
Getreideschrot	t oTR/d	0,86	0,68
Festmist	t oTR/d		
SUMME oTR-Fracht	t oTR/d	1,72	1,54
Methan	m^3/t oTR	227,8	265,6
Anteil Pellets	% oTR-Fracht	0,0	8,2

Die spezifische Gasausbeute pro zugeführter oTR-Fracht lag in Clausnitz höher. Aufgrund der Unsicherheiten bei Betrieb und Betriebsdatenerfassung sind diese Werte nicht als absolut anzusehen. Jedoch zeigt sich ein Trend, dass die eingesetzten Pellets aus Reststoffen des Landhandels einen guten Beitrag zur Gaserzeugung leisten können.

Insgesamt bleibt die Herausforderung hinsichtlich einer robusten Misch- und Rührauslegung für größere Anteile an Stroh- oder Reststoffpellets bestehen.

6.5 Ökologische und ökonomische Bewertung des Gesamtverfahrens

6.5.1 Treibhausgasbilanz

Für die Berechnung der Treibhausgasbilanz wurden insgesamt 4 Szenarien vergleichend betrachtet. Das erste Referenz-Szenario in Abbildung 114 geht von einer einstreulosen Rinderhaltung aus. Die entstehende Gülle wird gemeinsam mit Nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Maissilage oder Getreideschrot) vergoren.

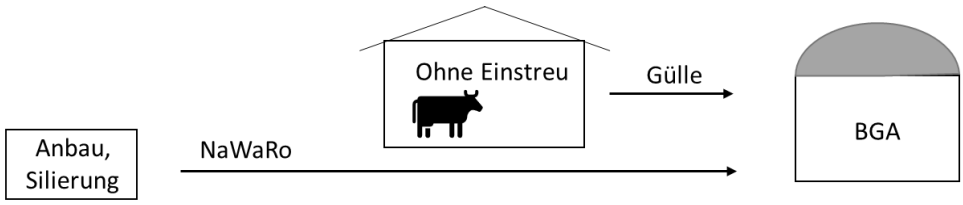


Abbildung 114: Referenzszenario 1: Gülle ohne Einstreu + NawaRo

Im zweiten Referenzszenario Abbildung 115 wird Strohhäcksel + Kalk im Stall eingestreut. Die damit beladene Gülle und der Festmist werden in der Biogasanlage genutzt. Dabei werden auf 20 kg Stroh etwa 60 bis 100 kg gemahlener Kalk gegeben.

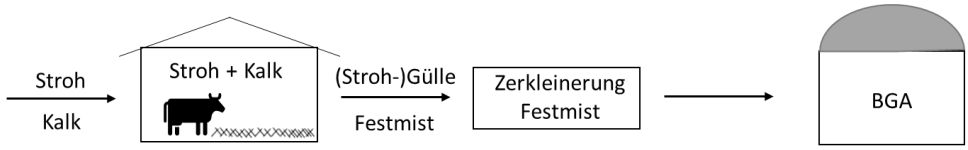


Abbildung 115: Referenzszenario 2: Einstreu von Stroh/Kalk

Das dritte Szenario stellt das im Projekt KoSaTZ untersuchte Verfahren zur Nutzung von Stroh- oder Reststoffpellets als Einstreu dar (Abbildung 116). Pellet haltige Gülle und Festmist werden anschließend in der Biogasanlage genutzt.

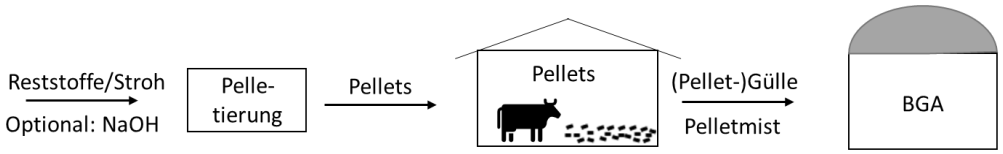


Abbildung 116: KoSaTZ-Verfahren Pelleteinstreu-Kaskade

Im vierten Szenario wurde der KoSaTZ-Ansatz der direkten Nutzung von Pellets in einer Biogasanalage gemeinsam mit Gülle ohne Einstreu angenommen (Abbildung 117).

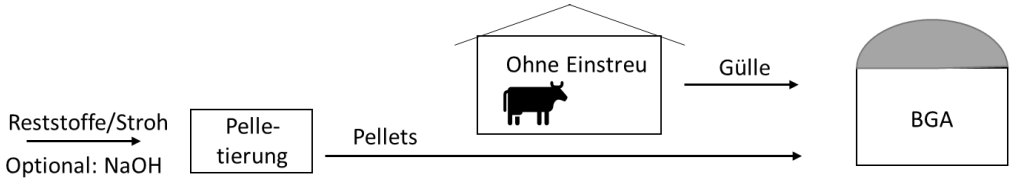


Abbildung 117: KoSaTZ-Verfahren direkter Einsatz von Reststoffpellets

Für alle Szenarien wurde der Substratmix zur Biogasanlage auf Basis der Betriebsdaten Clausnitz so gewählt, dass jeweils die gleiche Menge an Biogas produziert wird. In Tabelle 26 sind wichtige Parameter der täglichen Beschickung angegeben. Die unterschiedlichen Einsatzmengen für Stroh spiegeln indirekt die unterschiedlichen Gaspotenziale und Verluste im Stall wider. Bei der Input-Mischung weisen die Szenarien mit Stroh einen höheren TR-Gehalt auf, was möglicherweise zu höheren Aufwendungen für das Einmischen und Rühren führt, aber in der THG-Bilanz nicht berücksichtigt wurde.

Tabelle 26: Wichtige Parameter für die Szenarien der THG-Bilanz

	Input _Mischung		Kalk	NaOH	Strohmenge in Gülle und Mist
	TR	Menge			
	(%)	t/d	t/d	t/d	t/d
Szenario 1 (Getreideschrot)	12,4	18,1			
Szenario 1 (Maissilage)	11,7	20,4			
Szenario 2 (Kalk/Stroh)	14,7	21,9	7,6		1,91
Szenario 3 (Pellet-Einstreu)	14,3	21,4		0,04	1,77
Szenario 4 (Pellet-Direkteinsatz)	14,3	18,2		0,04	1,63

Weiterhin ist der hohe Bedarf an Kalk zur Herstellung der Kalk-Stroh-Matratze im zweiten Szenario zu entnehmen. Im Vergleich dazu sind die benötigten NaOH-Mengen (Szenario 3 und 4) sehr gering. Für die notwendige Vorzerkleinerung von Festmist im Szenario 2 wurden 10 kWh/t angesetzt. Für die Pelletierung in Szenario 3 und 4 wurde mit 72 kWh/t gerechnet, was den Erfahrungswerten der Fa. ATS entspricht. Dieser Wert ist deutlich höher als die in den Untersuchungen aufgenommenen Stromverbräuche. Durch das Weglassen der Hammermühle könnte hier aber eine deutliche Reduzierung des Stromverbrauches gelungen sein. Bis zum Ende des Projektes konnten letzte Unsicherheiten diesbezüglich nicht abschließend geklärt werden, weshalb mit dem höheren Stromverbrauch gerechnet wurde.

Die Sachbilanzen wurden mit Datensätzen der Datenbank Ecoinvent® im Programm Umberto LCA+® hinterlegt und die Berechnungen der THG-Emissionen durchgeführt. Für alle Szenarien wurde für eine 20 %ige Nutzung der BHKW-Abwärme eine Gutschrift für den Ersatz von fossiler Wärmeerzeugung gegengerechnet. Weiterhin wurde für alle pflanzlichen Produkte, welche in die Biogasanlage gelangen (NawaRo und Strohanteile) die Nährstoffe gegenüber mineralischen Düngerprodukten gutgeschrieben.

Abbildung 118 zeigt beispielhaft für Szenario 1 die Größenordnungen (Pfeildicken) der THG-Belastung für die Erzeugung einer kWh an Strom aus dem BHKW. Im Beispiel wurde als NawaRo-Co-Substrat 100 % Getreideschrot verwendet.

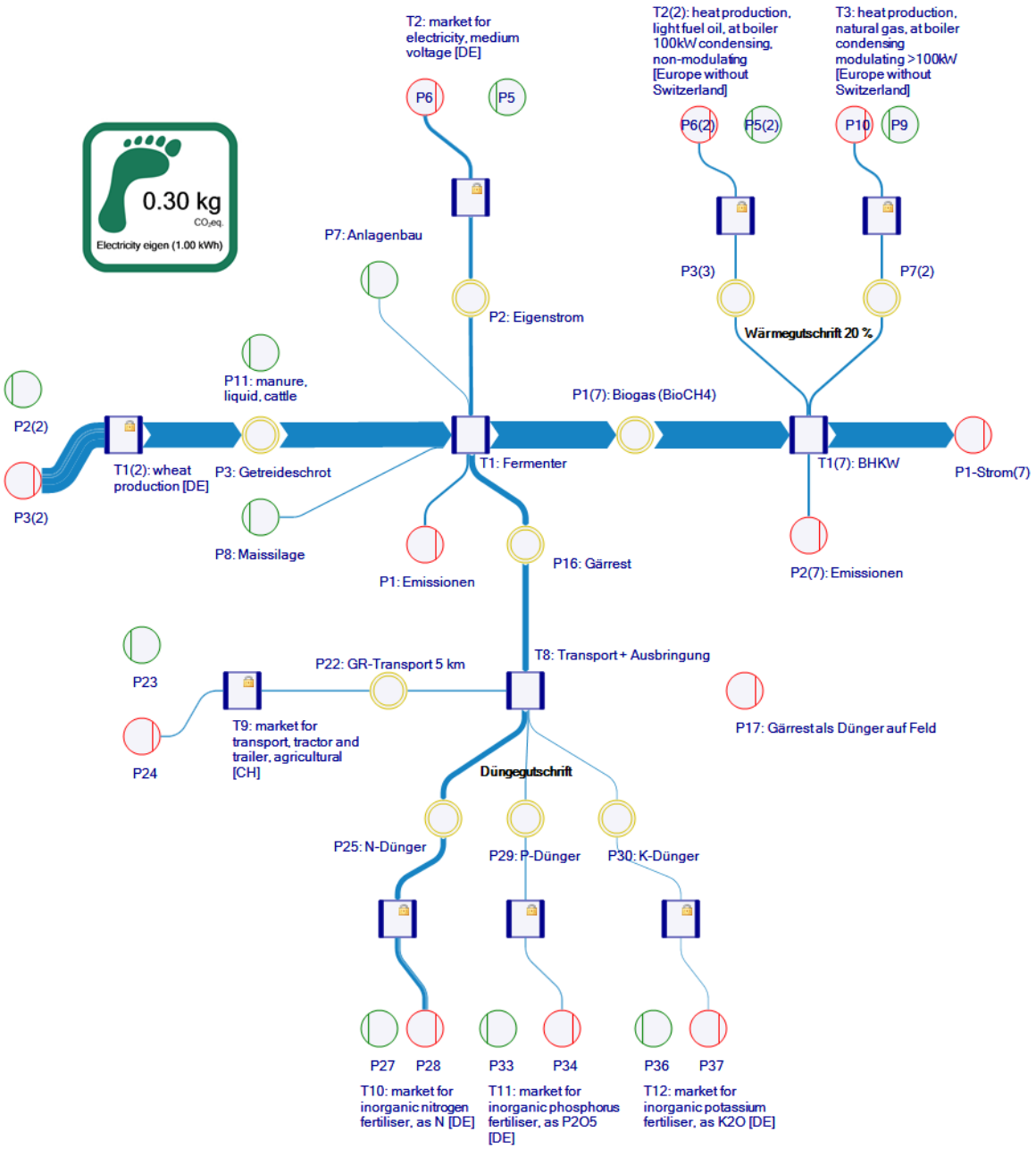


Abbildung 118: THG-Bilanz – Sankeydiagramm für Szenario 1 (Gülle + Getreideschrot)

Sehr gut zu erkennen ist die Dominanz des Einflusses des Inputsubstrates Getreideschrot, welches durch Aufwendungen bezüglich Anbau und Ernte einen erheblichen CO_2-Rucksack in die Bilanz einbringt. Dagegen fallen die Abzüge durch Dünge- und Wärmegutschriften relativ klein aus. In Summe werden 0,30 kg CO_2-Äquivalente für dieses Referenzszenario erhalten und liegt damit vergleichsweise ungünstig.

Für alle anderen Szenarien sind die entsprechenden Sankey-Diagramme im Anhang zu finden. In Abbildung 119 sind die resultierenden THG-Emissionen pro kWhel für alle betrachteten Szenarien dargestellt.

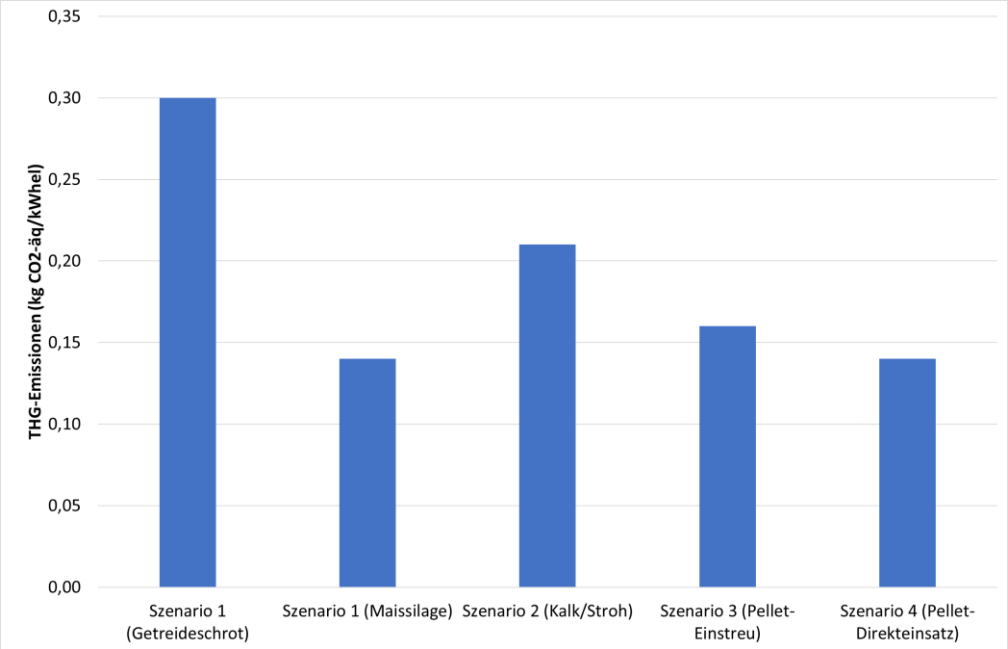


Abbildung 119: THG-Bilanzen für die verschiedenen Szenarien

Auch wenn für den Anbau und die Ernte von Maissilage auch ein signifikanter Aufwand betrieben werden muss, so ist aufgrund der Verwendung der Ganzpflanze und dem damit verbundenen höheren Flächenerträgen der CO2-Fußabdruck pro kWhel geringer als beim Getreideschrot. Aus diesem Grund liegt die Bilanz im Referenzszenario 1 mit Maissilage mit 0,14 kg CO2-äq deutlich besser und ordnet sich gut in vorhandene Literaturwerte ein.

Die klassische Einstreu mit Kalk und Strohhäcksel (Szenario 2) weist aufgrund des hohen Kalkverbrauches eine höhere CO2-Emission auf.

Die Szenarien 3 und 4 bringen zwar über die genutzten Reststoffe keinen CO2-Fußabdruck in die Verfahrenskette, aber die Aufbereitung der Produkte zu Pellets benötigt Energie und NaOH. In Summe weisen diese beiden KoSaTZ-Varianten ein ähnliches Niveau auf, wie die klassische Variante Gülle + Mais, was prinzipiell eine gute Einsparung gegenüber fossiler Energieerzeugung (0,7 bis 1,1 kg CO2-äq pro kWh_{el}). Allerdings entsteht durch die ausschließliche Nutzung von Reststoffen keine Flächenkonkurrenz, was ökobilanziell einen deutlichen Vorteil darstellt. Da alle Szenarien beim Eigen-Energieverbrauch mit deutschem Strommix berechnet wurden, ist zukünftig mit einer Verminderung der hier berechneten Emissionen zu rechnen, da der Strommix zukünftig immer weniger CO2 verursachen wird. Setzt man PV-Strom für die Deckung des Eigenenergiebedarfes der BGA (Rühren,…) und die Pelletierung in die Berechnungen ein, so liegen beispielsweise folgende Gesamt-Emissionen vor:

- Referenzszenario 1 (Gülle + Maissilage): 0,10 kg CO_2-äq/kWh_{el}
- Szenario 4 (Gülle + Reststoffpellets): 0,07 kg CO_2-äq/kWh_{el}

Zusätzliche Einsparpotenziale ergeben sich durch weitere Verminderung von Methanschlupf und Transportemissionen. Mit diesen Kennzahlen bleibt die Nutzung von nachhaltig erzeugten Biomassen, aber insbesondere von Reststoffen wie die projektspezifischen Reste aus der Getreideproduktion in Biogasanlagen eine empfehlenswerte Option zur Erzeugung von Energie oder Kraftstoffen.

6.5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Aufwand für Stall-Einstreu

Die Kosten für eine Tiefliegebox belaufen sich auf ca. 140 € pro Kuh und Jahr. Die Einstreu mit Kalk-Strohgemisch verursacht höhere Arbeitskosten, dafür aber geringere Substratkosten. Bei der Einstreu mit Strohpellets verhält es sich umgekehrt. Schließlich ist in beiden Verfahren mit Kosten in Höhe von ca. 140 € je Kuh und Jahr zu kalkulieren.

Tabelle 27: Kostenvergleich Einstreu Pellets vs. Kalk/Stroh

		Stand	KoSaTZ
		Kalk/Stroh	Pellets
Einstreumenge	kg/Liegbox*d	1,6	1,6
	kg/Kuh*a	584	584
Substratpreis	EUR/t	70	130
Einstreukosten	EUR/Liegebox*a	41	76
Arbeitszeit Einbringung/Boxenpflege	Akh/d	1,8	1,1
Arbeitskosten	EUR/Liegebox*a	100	64
SUMME der Kosten	**EUR/Liegebox*a**	**141**	**140**

Es zeigen sich aber weitere Vorteile beim Einsatz von Strohpellets, welche monetär schwer zu quantifizieren sind:

- Höhere Liegeplatzqualität
- keine Kalkablagerung in den Güllekanälen oder der Biogasanlage
- leichtere Handhabung und dadurch Arbeitszeiteinsparung
- deutlich geringere Verschmutzung von PV-Anlagen auf den Dächern der Ställe, da keine Kalkstäube mehr auftreten, welche im Referenzfall (Kalk/Stroh) zu einem Erhöhten Reinigungsaufwand geführt haben

Demnach wäre aus der Sicht der Tierhaltung der Einsatz von Stroh- und Reststoffpellets anstelle von Kalk/Strohhäcksel mindestens Kostenneutral sowie mit weiteren praktischen Vorteilen verbunden. Insbesondere die Einsparung von Arbeitskräften für die verringerte Aufwendungen zur Einrichtung und Pflege des Stalls sowie Reinigung von Kanälen und PV-Modulen ist ein wichtiges Argument in Zeiten von Fach- und Arbeitskräftemangel.

Kosten für die Biogaserzeugung

Zu den praktischen sowie monetären Vorteilen im Stall kommt die Option der Verwertungsmöglichkeit der entstehenden Güllen und des Festmistes in Biogasanlagen. Wird der Nutzen im Stall zunächst außen vorgelassen, so können für den direkten Einsatz von Pellets die Substratkosten, wie in Tabelle 28 angegeben, berechnet werden.

Tabelle 28: Substratpreise für Stroh- und KoSaTZ-Pellets

	Substrat	Behandlung				Summe
		Personal	Strom	NaOH	Afa, Overhead, Verschleiß	
Strohpellets	100,00 €/t	36,50 €/t	27,50 €/t	7,00 €/t	25,00 €/t	**196,00 €/t**
Reststoffpellets Getreideproduktion	48,00 €/t	29,70 €/t	18,00 €/t	7,00 €/t	12,00 €/t	**114,70 €/t**

Für den KoSaTZ-Ansatz der Verwendung von Reststoffen aus der Getreideproduktion können zum einen der Substratpreis und zum anderen auch die Kosten für die Behandlung reduziert werden, da keine Vorzerkleinerung mittels Hammermühle notwendig wird. Somit ergibt sich gegenüber klassischen Strohpellets eine Einsparung um etwa 40 %.

Dies wirkt sich folgerichtig auf die Kosten der Stromgestehung in Biogasanlagen aus. Der reine Kostenanteil aus der Substratgestehung ist im Vergleich zum Referenzfall Maissilage in Tabelle 29 angegeben.

Tabelle 29: Stromgestehungskosten ohne Kaskadennutzung als Einstreu im Stall

	Kosten			CH4-Ertrag	Stromertrag	Stromgestehung
	Substrat	Behandlung	Summe (oTR)			
	EUR/t FM	EUR/t FM	EUR/t oTR	NL/kg oTR	kWh/t oTR	ct/kWh
Benchmark (Maissilage)	**41,00**		**133,55**	**338**	**1314,2**	**10,2**
Strohpellets	100,00	96,00	225,29	290	1127,6	20,0
Reststoffpellets (KoSaTZ)	48,00	66,70	131,84	290	1127,6	11,7

Damit liegen die Kosten für den direkten Pelleteinsatz für die KoSaTZ-Reststoffe in der Größenordnung von Maissilage.

Kaskadennutzung Stall/Biogasanlage

Bei der Variante der vorherigen Nutzung der Pellets im Stall kann jedoch ein signifikanter Anteil der Substratkosten der Tierhaltung zugeordnet werden. Theoretisch wäre eine Kostenteilung denkbar.

Somit ergäben sich für den **Stall** statt 130 EUR/t (Endverbraucherpreis) nur 65 EUR Substratkosten und damit statt 140 EUR pro Jahr und Liegeplatz nur 102 EUR, eine **Ersparnis von 27 %.**

Für das Substrat Reststoffpellet (in Gülle und Festmist) als **Input zu Biogasanlage** wären ebenfalls nur 65 statt 130 EUR/t anzusetzen. Dadurch ergibt sich ein Stromgestehungspreis (nur aus der Substratbereitstellung) von **6,6 ct/kWhel**, eine **Einsparung um etwa 40 %** und ein durchaus konkurrenzfähiger Preis.

6.6 Zusammenfassung

Neue Substratmischungen und angepasste Aufbereitung

- Charakterisierung von Stroh sowie alternativen Reststoffströmen aus der Getreideverarbeitung
  - Neben Stroh wurden zunächst 7 verschiedene Reststoffströme aus der Weiterverarbeitung von Getreide ausgewählt und analysiert
  - Für die Bestimmung des Wasserhaltevermögens wurde eine vereinfachte Vergleichsmethode konzipiert und angewendet
    - Insbesondere Ausgangsmaterialien mit hohem Spelzenanteil weisen unbehandelt eine eher geringe Wasseraufnahmekapazität auf. Die Oberflächen sind zum Teil eher wasserabweisend.
  - Auf Basis der durchgeführten Analysen wurden folgende Stoffströme für die weiteren Untersuchungen ausgewählt:
    - Stroh (Su) = Referenzsubstrat
    - Getreiderest Ölmühle+Mälzerei (ÖM): hohe Wasseraufnahme, hohes Gaspotenzial
    - Getreiderest Landhandel (LH): hohe Wasseraufnahme, hohes Gaspotenzial
    - Haferschalen (HS): eigentlich „schlechtestes" Substrat bzgl. Wasseraufnahme und Gasertrag, aber günstiger Substratstrom im Betrieb des Projektpartners Clausnitz → hier sollte das Verbesserungspotenzial durch Aufschluss und Pelletierung bewertet werden
    - Dinkelspelzen (DS): eigentlich auch Substrat mit wenig Wasseraufnahme und Gaspotenzial, aber großes Stoffstrompotenzial sowie mögliches Verbesserungspotenzial
- Pelletierung im kleintechnischen Maßstab
  - Die ausgewählten Reststoffe wurden systematisch im kleintechnischen Maßstab (DBFZ) sowie auf der praktischen Pelletieranlage (ATS) verpresst unter Variierung folgender Parameter:
    - Wassergehalt
    - Pressverhältnis
    - Matritzenlänge und -durchmesser
    - Vorzerkleinerung
    - Dosierung von NaOH
  - Eine Vorzerkleinerung der Stoffströme (z.B. mittels Hammermühle) ist nur dann notwendig, wenn größere Anteile langfaseriger Komponenten vorhanden sind.
  - Die Zugabe von (auch geringen Mengen) an NaOH führte i.d.R. zu einem günstigeren Pelletierverhalten (Stabilität)
  - Im Technikum (DBFZ) konnten aufgrund der kleineren Chargen unter idealen Bedingungen, aber mit spezifisch höherem Energieverbrauch i.d.R. qualitativ höherwertige Pellets hergestellt werden
  - Aus der Analyse der Pelletprodukte ließen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

        - Die im Projekt erzeugten Pellets aus Reststoffen der Getreideproduktion und Verarbeitung zeigen i.d.R. gute physikalisch-mechanische Eigenschaften.
        - Die Pelletierung und die damit einhergehende mechanische Beanspruchung führt
            - zu einer Zerkleinerung der Partikel
            - zum Teil zu einer deutlichen Verbesserung des Wasseraufnahmevermögens (Insbesondere Haferschalen) → damit wurden Dinkelspelzen wieder interessanter für die weitergehenden projektspezifischen Betrachtungen
            - zu einer Steigerung des Gasertrages
        - Der Zusatz von NaOH führt
            - zu einer Steigerung des pH-Wertes (Aufschlusswirkung + Hygienisierung)
            - zu keiner signifikanten Änderung des Auflöseverhaltens in Wasser
            - zu einer Steigerung des Gasertrages (bei ausreichender Dosiermenge von mindestens 2,5 % bezogen auf Substratgewicht)
        - Die untersuchten Pellets wiesen alle ein vergleichsweise hohes Gasertragspotenzial auf und stellen somit einen interessanten Inputstoff für Biogasanlagen dar
        - Aufgrund der etwas geringeren Wasseraufnahme und des erhöhten Öl-gehaltes sowie der stark schwankenden Eigenschaften wurde für den Einsatz als Einstreu das Substrat aus der Ölmühle ausgeschlossen
- Kleintechnische Versuche zur Brikettierung
    - Insbesondere pandemiebedingt konnte die im Projekt beim Partner DBFZ geplante Brikettieranlage nur mit großer zeitlicher Verzögerung aufgebaut und genutzt werden
    - Aus diesem Grund wurde nur wenige grundlegende Versuche mit grob zerkleinertem Stroh und Haferschalen durchgeführt
    - Variation folgender Parameter:
        - Wassergehalt, Korngröße, Vor (40 MPa)- und Hauptpressdruck (200 MPa), Haltezeit
    - Dabei wurden 50 mm Briketts erfolgreich hergestellt und analysiert
        - Rohdichten von bis zu 1 g/cm³ konnten erreicht werden --> geringe Aufschwimmneigung zu erwarten
        - Schüttdichten lagen aufgrund der Größe der Briketts nur bei maximal 231 kg/m³, was in der Größenordnung von Quaderballen liegt
        - Biogasertrag und Auflöseverhalten zeigten sich vergleichbar zu den Pelletvarianten desselben Materials, aber keine Steigerung durch geringe Zerkleinerung
    - Praktisch interessante Briketts von 20 mm Durchmesser konnten aufgrund von Deformationen des konzipierten Pressstempels nicht durchgeführt werden --> Neuentwicklung notwendig

<u>Zwischennutzung als Einstreumatte und Einfluss auf den Biogasertrag</u>

- Pelletproduktion – Großchargen
  - Für die Versuche zur Einstreu im Stall wurden durch das Konsortium zusätzlich zu kommerziellen Referenzpellets aus 100 % Stroh drei weitere Mischungen aus Reststoffen ausgewählt und getestet:
    - Pellets aus einer Mischung von 50 % zerkleinertes Stroh und 50 % Reststoffe aus dem Landhandel (Sz + LH)
    - Pellets aus 100 % Reststoffen aus dem Landhandel (100% LH)
    - Pellets aus 100 % Dinkelspelzen
  - Herstellung von jeweils mindestes 20 t und Erfassung der Betriebsparameter
  - Strohanteile wurden mittels mobiler Strohmühle vorzerkleinert
  - Analytik:
    - Alle Reststoffpellets erreichten ähnlich gute Eigenschaften hinsichtlich Wasseraufnahme, Auflöseverhalten und Gasertrag
    - pH-Werte und Natriumgehalte lagen zum Teil niedriger als erwartet, was auf praktische Probleme bei Dosierung von NaOH und Zuführung der Reststoffe zurückzuführen war
- Einstreuversuche
  - Einstreu der Großchargen für jeweils 6 bis 8 Wochen in Tiefliegeboxen (Austrag mit der Gülle in flüssiger Form) und in den Tiefstreustall (Austrag als Festmist)
  - Sehr gute Eignung aller Reststoffpellets auch als Einstreu
    - Gutes Saugverhalten
    - Hohe Tiersauberkeit
    - Gutes Hygieneniveau
  - Im Tiefstreustall finden generell verstärkt aerobe Rotteprozesse statt, welche die Hygiene etwas verschlechtern, aber insbesondere zu einem Energieverlust beim Materials führen (bis - 25%) --> dies wäre bei energetischer Bilanz in Biogasanlage zu berücksichtigen
  - Im Stall mit Tiefliegeboxen und Gülleaustrag ist die Verweilzeit deutlich geringer und der auch der Sauerstoffeintrag, so dass es praktisch zu keinem Energieverlust kommt, wenn die Gülle kontinuierlich und zügig in einer Biogasanlage verarbeitet wird.

<u>Quellverhalten und Einmischung von Misch- und Strohpellets in Rundfermentern</u>

- Ausgewählte Pellets wurden im IKTS systematisch in verschieden viskosen Medien aufgelöst und eingemischt
  - Starke Abhängigkeit der Auflösegeschwindigkeit vom Grundmedium
    - In Wasser schneller als in Gülle oder Modellmedium (CMC-Lösung)
- Für die Vorgrube der Biogasanlage des Projektpartners Agrar Clausnitz wurden maßstäbliche Tomographieversuche zur Einmischung von Pellets in Gülle durchgeführt
  - Variation von:
    - Viskosität
    - Rührerposition
    - Füllstand

        - Pelletgrößen
- Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:
    - Zugabe der Pellets im Verhältnis 1:8 (Pellet:Gülle bzw. CMC) für Quellversuche → absolutes Maximum
        - Das Auflösen der Pellets beginnt nach ca. 60 Minuten, dann nimmt die Viskosität deutlich zu und erreicht ein Plateau nach etwa 4 bis 5 h
    - Zugabe der Pellets im Tomographie-Reaktor baugleich zur Anmischgrube im Verhältnis 1:25 bzw. 1:30 (Pellets : Reaktorflüssigkeit)
    - Bei verminderter Füllhöhe des Anmischbehälters wird schneller eine Mischgüte von >95% erreicht. (Füllhöhe 24 cm = 1,96 m in Clausnitz: 43 min, Füllhöhe 20 cm = 1,63 m in Clausnitz: 11 min)
    - Sobald sich eine kompakte Schwimmschicht gebildet hat, löst sich diese nur sehr schwer bis gar nicht mehr auf.
        - Der Versuch eine Schwimmschicht durch den zusätzlichen Einsatz von Gülle nach der Pelletdosierung aufzubrechen ist gescheitert. Auch kontinuierliches langes Rühren führte nicht zum Erfolg.
        - Die Bildung einer Schwimmschicht muss unbedingt vermieden werden.
- Entsprechende Ableitungen für die Praxis und den ebenfalls im Projekt durchgeführten direkten Einsatz von Reststoffpellets in die Anmischgrube wurden getroffen und festgehalten

<u>Demonstrationsversuche zur Vergärung</u>

- Einsatz von Gülle-Einstreu-Mischung und Festmist in der Praxis-BGA
    - Nutzung von zwei identischen Vergleichsanlagen (jeweils 75 kW Gülle-Kleinanlage mit Vorgrube zur Anmischung von Gülle und max. 20 % Cosubstrate)
    - BGA Cämmerswalde: „Referenzanlage“
        - Rindergülle ohne Einstreu (Mutterkühe auf Matten) (fließt direkt aus dem Stall zur BGA)
        - Minderwertige Silage und Getreideschrot
    - BGA Clausnitz: „Pelletanlage“
        - Pelletgülle (Rindergülle mit Pelleteinstreu in Tiefliegeboxen
        - Pellet-Festmist (aus dem Tiefstreustall)
        - Getreideschrot
    - Aufbauend auf den Versuchen zur Variation von Einstreu im Stall wurden 4 Versuchszeiträume realisiert (insgesamt 7 Monate):
        - Referenzpellets aus 100 % Stroh
        - Pellets aus einer Mischung von 50 % zerkleinertes Stroh und 50 % Reststoffe aus dem Landhandel
        - Pellets aus 100 % Reststoffen aus dem Landhandel
        - Pellets aus 100 % Dinkelspelzen
    - Der gleichzeitige Einsatz von Pelletgülle und Pelletfestmist führte in der "Pellet"-BGA zu Durchmischungsproblemen, weshalb die Dosierung von Festmist nach 3 Monaten eingestellt werden musste.

        - Zwar lag der Feststoffgehalt im Maximum nur etwa 1,5 % Punkte über dem Vergleichsreaktor, aber in der Mischgrube sowie für bestimmte Maximalwerte ergaben sich trotzdem Probleme
    - Ein Fütterungsregime „nach Plan" konnte nicht umgesetzt werden. Das Fütterungsregime wurde in Abhängigkeit der Viskosität in der Anmischgrube geregelt. Als Grund dafür ist festzuhalten, dass unmittelbar nach Einstreu der Liegeboxen der Austrag tendenziell etwas höher ist als nach zehn bis vierzehn Tagen, wodurch sich starke Unterschiede in der Viskosität ergeben.
    - Die Biogasproduktion und -qualität konnte in beiden Reaktoren sehr gut erhalten werden. Kleiner Trend zu besserer Entschwefelung beim Einsatz von Pellets im Stall
    - pH-Wert, el. Leitfähigkeit und Natrium-Gehalt zeigten keine signifikante Erhöhung für den Pelletreaktor
    - Der Anteil der Pellets in der Inputmischung an der Gesamt-oTR-Fracht lag zwischen 10 und 20 %
    - Mit zunehmender Versuchsdauer (Adaptionsprozesse) konnten im Pelletreaktor höhere spezifische Gasausbeuten als im Referenzreaktor erreicht werden. --> Pelletanteil sehr gut verwertbar.
- Direkter Einsatz von Mischpellets in der Praxis-BGA
    - Nutzung von Pellets aus 100 % Resten des Landhandels
    - Mischung mit vergleichsweise dünner Gülle (ohne Einstreu), um Rührprobleme zu vermeiden
    - Rührwerk konnte in der Höhe verstellt werden, um Pellets sicher einzumischen
    - Maximale Einsatzmenge von 1,6 t Pellets auf 40 m³ Gülle entsprach den Empfehlungen aus den Voruntersuchungen zur Einmischung (1:25)
        - Auf Dauer konnte dieses Mischverhältnis aber nicht aufrechterhalten werden
        - Es wurden Havarien befürchtet und daher teilweise mit der Beschickung von Pellets ausgesetzt
    - Trotz lückenhaftem Pelleteinsatz konnten 85 % der ursprünglich eingesetzten Silage und 20 % des ursprünglich eingesetzten Getreideschrots ersetzt werden.
    - Prozess- und Gasproduktion verlief sehr stabil
    - Insgesamt bleibt die Herausforderung hinsichtlich einer robusten Misch- und Rührauslegung für größere Anteile an Stroh- oder Reststoffpellets bestehen.

<u>Ökologische und ökonomische Bewertung des Gesamtverfahrens</u>

- Für 2 Referenzszenarien und 2 KoSaTZ-Szenarien wurden Sachbilanzen und daraus abgeleitete THG-Emissionen mit Hilfe der Datenbank Ecoinvent® im Programm Umberto LCA+® berechnet.
- Bezugsgröße für die THG-Emissionen ist die Erzeugung eine kWhel aus dem BHKW der Biogasanlage.
    - Szenario 1: Gülle (ohne Einstreu) + NaWaRo
        - Dominanz der Anbauaufwendungen für NaWaRo
        - THG: 0,30 kg CO_2-äq/kWh_{el} (Nawaro=Getreideschrot)

        - THG: 0,14 kg CO_2-äq/kWh_{el} (Nawaro=Maissilage)
    - Szenario 2: Gülle/Festmist mit Einstreu Kalk/Stroh
        - Dominanz der Aufwendungen für Kalkherstellung
        - THG: 0,21 kg CO_2-äq/kWh_{el}
    - Szenario 3: Gülle/Festmist mit Einstreu Reststoffpellets
        - Leichte Dominanz der Eigenstromverbräuche (u.a. Pelletierung)
        - THG: 0,16 kg CO_2-äq/kWh_{el}
    - Szenario 4: Gülle (ohne Einstreu) + Direktnutzung Reststoffpellets
        - Leichte Dominanz der Eigenstromverbräuche (u.a. Pelletierung)
        - THG: 0,14 kg CO_2-äq/kWh_{el}
    - Verbesserung der Ökobilanz aller Szenarien durch Kalkulation mit Erneuerbarem Strom statt aktuellem dt. Strommix (Zukunftsmodell):
        - Referenzszenario 1 (Gülle + Maissilage): 0,10 kg CO2-äq/kWhel
        - Szenario 4 (Gülle + Reststoffpellets): 0,07 kg CO2-äq/kWhel
- Der Einsatz von Reststoffen der Getreideverarbeitung spart gegenüber der Strohnutzung deutlich an Kosten für Substratkauf und Aufbereitung.
- Die Aufteilung der Substratkosten auf Stall und Biogasanlage sind für beide Anwendungen mit deutlichen Kosteneinsparungen verbunden
- Eine Wirtschaftlichkeit ist gegeben

7 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgte separat durch die einzelnen Projektpartner.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag detailliert dargelegten Planung entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewandt werden.

9 Nutzbarkeit der Ergebnisse

ATS: Auf Basis der Projektergebnisse sehen wir große Perspektiven, um Koppelprodukte aus der Landwirtschaft bzw. der Verarbeitung von landwirtschaftlichen im Rahmen einer mehrstufigen Nutzungskaskade zu konditionieren und zu pelletieren, um diese somit für vorher genannte Zwecke nutzbar zu machen. Insbesondere durch die RED II werden diese Koppelprodukte nach der Nutzung im Stall deutlich interessanter für den Einsatz in Biogasanlagen. Damit werden die Ergebnisse auch in der Praxis nutzbar, da die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sich deutlich verbessern. Nicht nur der Aufbereiter / Produzent dieser Materialien profitiert von dieser Entwicklung, sondern auch der Landwirt, sowie der Bioenergieanlagenbetreiber haben an dieser Stelle eine deutlich verbesserte Wertschöpfung.

DBFZ: Die Erfahrungen zur Verarbeitung von Stroh, Schalen/Spelzen und Getreideresten zu hochwertigen Kompaktaten (Pellets und Briketts) fließen am DBFZ in laufende Projekte, die sich mit der Kompaktierung von halmgutartigen Biomassen befassen, ein. Durch die Erweiterung der DBFZ-internen Datenbank mit den Datensätzen der durchgeführten Pelletierversuche, kann der Versuchsaufwand in zukünftige Projekten mit vergleichbaren Biomassen reduziert und optimiert werden. Bei der Brikettierung mit der am DBFZ vorhandenen Forschungsanlage besteht noch erheblicher F&E-Bedarf. Allerdings stellen die durchgeführten Versuche mit dem 50 mm-Presswerkzeug eine gute Basis für weitere Versuchsreihen dar.

IKTS: Aus Sicht der Biogaserzeugung konnte nachgewiesen werden, dass Reststoffe aus dem Bereich der Getreideverarbeitung ein nahezu ebenso hohes Energiepotenzial aufweisen wie Stroh und damit eine interessante Alternative zu NaWaRo-Anbaubiomassen darstellen. Mit der KoSaTZ-Vorbehandlung aus mechanischer Beanspruchung und moderatem NaOH-Einsatz konnten sowohl der Biogasertrag gesteigert als auch die Pelletierfähigkeit, die Wasseraufnahme im Stall und das Verhalten im Fermenter positiv beeinflusst werden. Die Einmischung von Stroh- und Reststoffpellets in bestehende Biogasfermenter hat allerdings klare Grenzen. Die bestehenden Rühr- und Fördersysteme sind z.T. nicht auf deutlich dickere (viskosere) Medien ausgelegt. Hier besteht weitere Anpassungs- und Entwicklungsbedarf.

AG Bergland: Das Konzept der kaskadischen Nutzung von Strohpellets als Einstreu und Bio-gassubstrat hat besondere praktische Relevanz. Als Einstreu haben Strohpelltes im praktischen Einsatz bereits positive Wechselwirkungen gezeigt. Beide Verfahren, der Einsatz als reine Einstreu sowie der Einsatz als Biogassubstrat haben es gemein, dass die Kosten gegenüber alternativen Verfahren oft zu hoch sind. Durch die gekoppelte Betrachtung des Aspektes der Nutzung als Einstreu und darauffolgenden Einsatz im Biogasprozess stellt sich die Wirtschaftlichkeit positiv dar. Damit hat die kaskadische Nutzung von Strohpellets praktische Relevanz. Die Verschiebung der Preisverhältnisse am Rohstoffmarkt bringt Biogasanlagen beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in wirtschaftliche Bedrängnis. In der Folge kann dieses Verfahren an Bedeutung gewinnen.

Rückert: Wir können die Ergebnisse sehr gut nutzen, vor allem weil es in der Branche momentan sehr stark darum geht Stroh oder lignocellulosehaltige Stoffe

im Stall und dann in der Biogasanlage einzusetzen. Dies liegt wie in Punkt 3 beschrieben, daran, dass Biogas aus Mist als fortschrittlicher Kraftstoff eingesetzt werden kann und dementsprechend vergütet wird. Das Projekt konnte einen Aufschluss darüber geben wie unterschiedlich sich die einzelnen Substrate sowohl im Stahl als auch in der Biogasanlage verhalten.

Das Interesse an der Verfahrenskette besteht im Landwirtschafts- und Biogassektor. Konkrete Anfragen durch Landwirtschaftsbetriebe (z.B. Agrargenossenschaft Seifhennersdorf) und durch Biogasfirmen (z.B. Grüngas GmbH) während des Projektes belegen dies.

10 Fortschritte bei anderen Stellen

Die Pelletierung von Stroh für die kombinierte Nutzung in Stall und Biogasanlage wird auch von anderen Anbietern verfolgt. Ein Beispiel wäre die Firma Keller GmbH & Co.KG

11 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

VORTRAG: „Vergärung von Getreidestroh und Hühnertrockenkot eine verfahrenstechnische Herausforderung“ auf der 4. Bayerischen Biogasfachtagung "Stroh, Gras => Biogas“ am 12. Februar 2020 in Dingolfing (Referent: Björn Schwarz, IKTS)

Geplante Veröffentlichung: KoSaTZ-Ergebnisse im Fokusheft „Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt“

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Arbeits- und Zeitplan des Projektes KoSaTZ	8
Tabelle 2:	Gestehungs- und Behandlungskosten für verschiedene Verfahren zur Strohvergärung (Schwarz 2017)	10
Tabelle 3:	Stand der Technik und Neuheit der Projektidee	12
Tabelle 4:	Rohstoff- und Prozessparameter für die Kleinpelletierungen am DBFZ	22
Tabelle 5:	Übersicht der Pellet- sowie Prozessanalysen (DBFZ)	28
Tabelle 6:	Vergleich der Nutzung einer 8 x 65 mm und einer 10 x 80 mm Matrize, sowie die Zugabe von NaOH (durch-schnittlich über beide Matrizen) (DBFZ)	29
Tabelle 7:	Wassergehalt und die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der externen Pelletschargen	32
Tabelle 8:	Abriebfestigkeit und Rohdichte der Stroh- und Holzbriketts	44
Tabelle 9:	Brikettierparameter der statischen Versuchsreihen	45
Tabelle 10:	Schüttdicht und TR-Gehalt für die einzelnen Versuchstage	54
Tabelle 11:	Na- und Kalium-Gehalt	55
Tabelle 12:	Rheologische Kennwerte	79
Tabelle 13:	Skalierung des Anmischbehälters in den Labor- und Technikumsmaßstab	80
Tabelle 14:	Vergleich der Viskosität zu Versuchsbeginn und nach 240 min bei Scherrate 10 s-1	84
Tabelle 15:	Überblick Tomographieversuche	87
Tabelle 16:	Vergärung - Bilanzzeitraum 1 (Strohpellet als Einstreu)	93
Tabelle 17:	Vergärung - Bilanzzeitraum 2 (Mischpellet Stroh/Getreideausputz als Einstreu)	93
Tabelle 18:	Vergärung - Bilanzzeitraum 3 (Getreideausputz-Pellet als Einstreu)	94
Tabelle 19:	Vergärung - Bilanzzeitraum 4 (Dinkelspelzen-Pellet als Einstreu)	94
Tabelle 20:	Stoffstrom und Gasbilanz – Versuchszeiträume 1 und 2	100
Tabelle 21:	Stoffstrom und Gasbilanz – Versuchszeiträume 3 und 4	101
Tabelle 22:	Skalierte Pelletmengen aus Versuch des Fraunhofer IKTS	102
Tabelle 23:	Eigenschaften der Einsatzstoffe	102
Tabelle 24:	Stoffströme für BGA Clausnitz (direkte Pelletzugabe 15.09.21 bis 30.11.21)	105
Tabelle 25:	Stoffstrom- und Gasbilanz BGA Clausnitz (direkte Pelletzugabe 15.09.21 bis 30.11.21)	106
Tabelle 26:	Wichtige Parameter für die Szenarien der THG-Bilanz	107
Tabelle 27:	Kostenvergleich Einstreu Pellets vs. Kalk/Stroh	110
Tabelle 28:	Substratpreise für Stroh- und KoSaTZ-Pellets	111
Tabelle 29:	Stromgestehungskosten ohne Kaskadennutzung als Einstreu im Stall	111

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verfahrensschema und Zielstellungen im Projekt KoSaTZ	4
Abbildung 2:	Kostenstruktur einer 1-MW-Biogasanlage und Erlöse nach EEG 2012 (EVK…Einsatzstoffvergütungsklasse) (IKTS)	9
Abbildung 3:	Reststoffe von oben links nach unten rechts: ÖM, LH, DS, PfS, BE, HS, MB	15
Abbildung 4:	TR, oTR-Gehalte der Reststoffe	15
Abbildung 5:	Erreichte Wasseraufnahme für verschiedene Einweichzeiten	16
Abbildung 6:	zeitliche Entwicklung des gemessenen Feststoffgehaltes beim Abtropfen der Probe	17
Abbildung 7:	Maximales Wasseraufnahmevermögen der verschiedenen Reststoffe	17
Abbildung 8:	Anteile verschiedener Biopolymere in den Reststoffen	18
Abbildung 9:	Summarische Biogasproduktion im Batchversuche	18
Abbildung 10:	Ausgewählte Siebfraktionen der Getreidereste aus dem Landhandel (©DBFZ:2021)	20
Abbildung 11:	Ausgewählte Siebfraktionen der Getreidereste aus dem Bereich Ölmühle & Mälzerei (©DBFZ:2021)	20
Abbildung 12:	Partikelgrößenverteilung der Testmaterialien gemäß Siebanalyse nach ISO 17827-2 (ISO 2016)	20
Abbildung 13:	Pelletherstellungsprozess am DBFZ (©DBFZ: 2018)	21
Abbildung 14:	Übersicht über die Anlagenkomponenten der Pelletieranlage	23
Abbildung 15:	Bühler DPCA 7850 Pelletpresse mit darüberliegenden Mischkonditionierer und Stromzähler	24
Abbildung 16:	Anlagenvisualisierung, Pelletpresse mit 78,1 A Stromaufnahme im Pelletierbetrieb	24
Abbildung 17:	Material aus Ölmühle/Mälzerei	25
Abbildung 18:	Material aus Ölmühle/Mälzerei nach Pelletierung (links: ohne, rechts: mit Vorzerkleinerung)	26
Abbildung 19:	Links: Separationsschaufel im Einsatz, Rechts: Ergebnis der Vorzerkleinerung / Siebung/ Homogenisierung	26
Abbildung 20:	Mischanlage vom Fabrikat Doppstadt / Komptech Mashmaster zum vorzerkleinern und homogenisieren	27
Abbildung 21:	Spez. Energieverbrauch und Durchsatz für die einzelnen Kleinpelletchargen (P – Pellets mit entsprechendem Wassergehalt) (DBFZ)	29
Abbildung 22:	Schüttdichte und Abriebfestigkeit der erzeugten Pellets (DBFZ)	31
Abbildung 23:	v.ln.r. Beispiele produzierter Pelletchargen: Haferschalen HS 8 mm o. NaOH zerkl., Getreidereste GR Öl 10 mm o. NaOH, Mischung Haferschalen/Stroh HS/Stroh 8 mm m. NaOH zerkl.	31
Abbildung 24:	v.l.n.r. Externe Pellets aus Dinkelspelzen bzw. Haferspelzen (hergestellt bei Fa. ATS), Mischpellets Stroh und Getreideausputz sowie Getreideausputzpellets (beschafft im Landhandel) (©DBFZ:2021)	32
Abbildung 25:	pH-Werte verschiedener Pelletchargen	33
Abbildung 26:	Elektrisch Leitfähigkeit ausgewählter Pelletproben	34
Abbildung 27:	Wassersaugvermögen für Haferschalen und Pellets aus Haferschalen	35
Abbildung 28:	Wassersaugvermögen für Reststoffe aus Ölmühlen – Technikumsversuche (DBFZ)	36
Abbildung 29:	Wassersaugvermögen für Reststoffe aus Ölmühle – praktische Versuche (ATS)	36
Abbildung 30:	Wassersaugvermögen für Reststoffe aus dem Landhandel	37

Abbildung 31: Wasserlösegeschwindigkeit von Pellets aus Haferschalen 37
Abbildung 32: Wasserlösegeschwindigkeit von Pellets aus Reststoffen der Ölmühle 38
Abbildung 33: Wasserlösegeschwindigkeit von Pellets aus Reststoffen des Landhandels 38
Abbildung 34: Granulometrische Kenngrößen der primären Partikel 39
Abbildung 35: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets aus Haferschalen 40
Abbildung 36: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets aus Reststoffen der Ölmühle 40
Abbildung 37: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets aus Reststoffen des Landhandels 41
Abbildung 38: Methanerträge (Batchversuch) für verschiedene Pellets – Praktische Versuche bei ATS 41
Abbildung 39: Strohbriketts hergestellt bei ATNA Industrial Solution GmbH (©DBFZ:2021) 43
Abbildung 40: Brikettieranlage GreenLine S50 am DBFZ, © Wolfgang Grote / ATNA Industrial Solutions GmbH 44
Abbildung 41: Verdichtungsprinzip der Brikettieranlage 45
Abbildung 42: 1. DoE: Brikettierung von unzerkleinerten Haferschalen – Modellierte Rohdichte (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck) 46
Abbildung 43: 1. DoE: Brikettierung von unzerkleinerten Haferschalen – Modellierte Abriebfestigkeit (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck) 47
Abbildung 44: 1. DoE: Brikettierung von unzerkleinerten Haferschalen – Modellierter spezifischer Energieeintrag (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Haupt-pressdruck, Applikate Vorpressdruck) 47
Abbildung 45: 2. DoE: Brikettierung von zerkleinerten Haferschalen – Modellierte Rohdichte (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck) 48
Abbildung 46: 2. DoE: Brikettierung von zerkleinerten Haferschalen – Modellierte Abriebfestigkeit (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applika-te Vorpressdruck) 48
Abbildung 47: 2. DoE: Brikettierung von zerkleinerten Haferschalen – Modellierter spezifischer Energieeintrag (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpress-druck, Applikate Vorpressdruck) 48
Abbildung 48: 3. DoE: Brikettierung von zerkleinertem Stroh – Modellierte Rohdichte (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck) 49
Abbildung 49: 3. DoE: Brikettierung von zerkleinertem Stroh – Modellierte Abriebfestigkeit (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck) 49
Abbildung 50: 3. DoE: Brikettierung von zerkleinertem Stroh – Modellierter spezifischer Energieeintrag (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Haltezeiten (Abszisse – Hauptpressdruck, Applikate Vorpressdruck) 50
Abbildung 51: links: Zeichnung Kleiner Press-stempel (5 x 20 mm) für Brikettieranlage GreenLine S50 am DBFZ (©ATNA:2022), rechts: Deformation am kleiner Pressstempel (5 x 20 mm) (©DBFZ:2022) 50
Abbildung 52: Wasserlösegeschwindigkeit für 50 mm Strohbriketts 51
Abbildung 53: Grobstoffanteil und mittlere Dicke der Grobstoffe für 50 mm Strohbriketts 52
Abbildung 54: mittlere und maximal Länge der Grobstoffe für 50 mm Strohbriketts 52

Abbildung 55: Vorzerkleinerung von Stroh in einen Abrollcontainer für die Pelletierung von der Mischung von Stroh und Getreideresten aus dem Landhandel 54
Abbildung 56: Eingangsmaterial für die Getreidreste aus dem Landhandel links und rechts die fertigen Pellets 56
Abbildung 57: Eingangsmaterial für die Dinkelspelzenpellets links und rechts die fertigen Pellets 57
Abbildung 58: TR, oTR der verschiedenen Pelletchargen über die Versuchsdauer – Praxisversuch 60
Abbildung 59: Maximales Wasserhaltevermögen für die verschiedenen Pelletchargen – Praxisversuch 61
Abbildung 60: Wasserlösegeschwindigkeit in Wasser für die verschiedenen Pelletchargen - Praxisversuch 62
Abbildung 61: Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert der Pelletchargen - Praxisversuch 62
Abbildung 62: Na- und NH_4-Gehalt für die Einstreupellets - Praxisversuch 63
Abbildung 63: Pelletlagerung (kompakt, staubarm) 63
Abbildung 64: Kopfbereich der Liegebox mit frisch eingestreuten Pellets 65
Abbildung 65: Pelletmatratze, hohe Sauberkeit (Euterspiegel), trockene gesunde Klauen 65
Abbildung 66: Liegeboxenstall 66
Abbildung 67: Gutes Liegeverhalten beim Pelleteinsatz 66
Abbildung 68: Tiefstreustall 67
Abbildung 69: Sauberkeit und Tierhygiene durch Pellets 68
Abbildung 70: TR-, oTR-Gehalte für Güllen aus Liegeboxen mit (Clausnitz) und ohne Einstreu (Cämmerswalde) 69
Abbildung 71: TR, oTR-Gehalt des Festmist aus der Pelleteinstreu im Tiefstreu-Stall 70
Abbildung 72: el. LF und pH-Wert für die Flüssiggüllen 70
Abbildung 73: el. LF und pH-Wert für den Festmist 71
Abbildung 74: Na- und NH4-Gehalt für die Flüssiggülle 71
Abbildung 75: Na- und NH4-Gehalt für den Festmist 72
Abbildung 76: Methanertrag und CH4-Gehalt im Biogas für die Einstreupellets 72
Abbildung 77: Methanertrag und CH4-Gehalt im Biogas für die Flüssiggüllen 73
Abbildung 78: Methanertrag und CH4-Gehalt im Biogas für den Festmist 73
Abbildung 79: Zugabemengen und Zeitpunkte der Gülle zu jeweils 400 g Pellets 74
Abbildung 80: Methanertragspotenzial der Stoffströme im Laborversuch „Tiefstreustall-Rotte“ 75
Abbildung 81: oTR- Masseverlust und Methanertragsverlust im Laborversuch „Tiefstreustall – Rotte“ 75
Abbildung 82: Vergleich der Summenverteilungen hinsichtlich der Faserlänge von Fermenter und Anmischbehälter 77
Abbildung 83: Vergleich der Fließkurven des Fermenterinhalts bei 40 °C 78
Abbildung 84: Vergleich der Fließkurven des Anmischbehälters bei 20 °C 78
Abbildung 85: Vergleich der Fließkurven von Gülle bei 20 °C 79
Abbildung 86: Schematische Darstellung der Anmischgrube in Clausnitz (Quelle: Herr Hänel von AGC) 80
Abbildung 87: Reaktor zur prozesstomographischen Bewertung des Mischprozesses im 100 L-Maßstab mit installierter Rührtechnik 81
Abbildung 88: Vergleich der Fließeigenschaften von CMC und Gülle 82
Abbildung 89: Vergleich der Auflösegeschwindigkeit in Wasser (blau), CMC und Gülle für 3 verschiedene Pellets 82
Abbildung 90: Auflöseverhalten Pellets D_HS_z6_P8_Na in CMC nach 180 min (links) und 300 min (rechts) 83
Abbildung 91: Zeitlicher Verlauf (logarithmisch) der Fließeigenschaften bei Scherrate 10 s-1 für das Einmischen von Pellets in Gülle und CMC (20 g/L) 84

Abbildung 92: Vergleich der Fließeigenschaften vor den Tomographie Versuchen 85
Abbildung 93: Pellets nach Versuch 5, Versuchsdauer 4 h 86
Abbildung 94: Reaktoroberfläche ca. 10 min nach Zugabe der Pellets 88
Abbildung 95: Vergleich der Fließeigenschaften vor und nach der Zugabe der Pellets 89
Abbildung 96: BGA Clausnitz 91
Abbildung 97: Stoffströme BGA Cämmerswalde Nov 20 bis Jan 21 92
Abbildung 98: Stoffströme BGA Clausnitz Nov 20 bis Jan 21 92
Abbildung 99: Inputsubstrate Cämmerswalde (Gesamtzeitraum) – Dosierung in Anmischgrube 94
Abbildung 100: Inputsubstrate Clausnitz (Gesamtzeitraum) – Dosierung in Anmischgrube 95
Abbildung 101: Methanertrag und H2S-Gehalt Cämmerswalde (Gesamtzeitraum) 96
Abbildung 102: Methanertrag und H2S-Gehalt Clausnitz (Gesamtzeitraum) 96
Abbildung 103: TR, oTR-Gehalt BGA Clausnitz 97
Abbildung 104: TR, oTR-Gehalt BGA Cämmerswalde 98
Abbildung 105: pH, el. Leitfähigkeit BGA Clausnitz 98
Abbildung 106: pH, el. Leitfähigkeit BGA Cämmerswalde 99
Abbildung 107: CSB-, Ammonium- und Natriumgehalt BGA Clausnitz 99
Abbildung 108: CSB-, Ammonium- und Natriumgehalt Cämmerswalde 100
Abbildung 109: Dosierung von Pellets (mit erhöhtem Staubanteil) in die Vorgrube Clausnitz 102
Abbildung 110: Oberfläche Mischgrube mit anfangs schwimmenden Pellets und Turbulenzen 103
Abbildung 111: Zeitpunkte und Mengen der Substratzugabe in die BGA-Vorgrube in Clausnitz 104
Abbildung 112: TR, oTR der Gülle zur Anmischgrube Clausnitz 104
Abbildung 113: TR, oTR der Anmischgrube (ca. 1 Tag nach Zugabe der Pellets und anderer Co-Substrate) 105
Abbildung 114: Referenzszenario 1: Gülle ohne Einstreu + NawaRo 106
Abbildung 115: Referenzszenario 2: Einstreu von Stroh/Kalk 106
Abbildung 116: KoSaTZ-Verfahren Pelleteinstreu-Kaskade 107
Abbildung 117: KoSaTZ-Verfahren direkter Einsatz von Reststoffpellets 107
Abbildung 118: THG-Bilanz – Sankeydiagramm für Szenario 1 (Gülle + Getreideschrot) 108
Abbildung 119: THG-Bilanzen für die verschiedenen Szenarien 109

14 Abkürzungsverzeichnis

BE	Getreiderest Bioethanol (ATS)
BGA	Biogasanlage
DS	Getreiderest Dinkelschälbetrieb (ATS)
GR	Gärrest
HS	Haferschalen (Agrargenossenschaft Clausnitz)
LH	Getreiderest Landhandel (ATS)
MB	Getreiderest Mühlenbetrieb (ATS)
ÖM	Getreiderest Ölmühle+Mälzerei (ATS)
oTR	organischer Trockenrückstand
oTS	organische Trockensubstanz
PfS	Getreiderest biolog. Pflanzenschutz (ATS)
Su	Stroh unbehandelt (ATS)

15 Literatur

Adapa, P.; Tabil, L.; Schoenau, G. (2009): Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. Biosystems Engineering 2009;104(3):335–44.

Brosowski, André; Adler, Philipp; Erdmann, Georgia; Stinner, Walter; Thrän, Daniela; Man-tau, Udo (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status Quo in Deutsch-land. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, 36).

DBFZ (2019): Abschlussbericht stROhgas: Entwicklung eines Verfahrens zur Vergasung von asche- und chlorhaltiger Biomasse am Beispiel Stroh (FKZ: 03KB085B). 2019

DBFZ/BMU (2012): Messmethodensammlung Biogas. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Band 7, Oktober 2012

Denk, K. H. (2001): Mechanisieren des Einstreuens - Überblick und Stand der Technik. Gumpensteiner Bautagung, 2001, zuletzt geprüft am 18.06.2019.

DIN (2015a): DIN EN ISO 17831-1: EN ISO 17831-1 (2015): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts - Teil 1: Pellets

DIN (2015b): DIN EN ISO 17828: EN ISO 17828 (2015): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte

DIN (2015c): DIN EN ISO 18134-1: EN ISO 18134-1 (2015): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser – Referenzverfahren

DIN (2015d): DIN EN ISO 17831-2: EN ISO 17831-1 (2015): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts - Teil 2: Briketts

DIN (2016): DIN EN ISO 18847: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikeldichte von Pellets und Briketts

DIN (2017): DIN EN ISO 18134-2: ISO 18134-2 (2017): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser - Vereinfachtes Verfahren

EFFIGEST- Entwicklung einer energetisch hocheffizienten Prozesskette zur Effizienzsteigerung bei der Vergärung von Geflügelmist unter Nutzung modifizierter Strohfraktionen und mit prozessintegrierter Gewinnung marktfähiger Dünger FKZ: 03KB081B, 09/2013 – 02/2016

Friedrich, E.; Friedrich, H.; Lincke, M.; Schwarz, B.; Wufka, A.; Faßauer, B. (2010): Verbes-serte Konvertierbarkeit lignocellulosehaltiger Substrate in der Nass-fermentation – Extrusion von Stroh. In: Chemie Ingenieur Technik, 2010 (8).

Friedrich, E.; Schwarz, B.; Wufka, A. (2013): 1,4 Gigawatt aus Stroh machbar. Biogas Jour-nal 2013(1):134–6.

Guo, L.; Tabil, L. G.; Wang, D.; Wang, G. (2016): Influence of moisture content and hammer mill screen size on the physical quality of barley, oat, canola and wheat straw briquettes. Bi-omass and Bioenergy 2016;94:201–8.

IKTS (2011): SMWA-Verbundprojekt Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der nachhaltigen Energieversorgung aus Biomasse. Fördernummer SAB: 12641/2094

ISO (2016): ISO 17827-2: ISO 17827-2 (2016): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe - Teil 2: Vertikales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darunter

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.(2016): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg : SpringerVieweg, 3., aktualisierte Aufl. 2016. http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47438-9

Kleppmann, W.: Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. München Wien: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. ISBN 978–3–446–44716–5

Lehmann, B.; Krause, R.; Schellert, C. (1992a): Untersuchungen zur Effizienz des Stroheinsatzes in der Tierhaltung. Universität Kassel, 1992.

Lehmann, B.; Popp, L.; Schürzinger, H. (1992b): Verfahren der Tierhaltung mit Einstreu - Anfordeerungen der Nutztiere an das Haltungssystem. KTBL-Arbeitspapier 182, 1992.

Lu, D.; Tabil, L. G.; Wang, D.; Wang, G.; Emami, S. (2014): Experimental trials to make whe-at straw pellets with wood residue and binders. Biomass and Bioenergy 2014;69:287–96.

Mostafa, M. E.; Hu, S.; Wang, Y.; Su, S.; Hu, X.; Elsayed, S. A. (2019): The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019;105:332–48.

Pradhan, P.; Arora, A.; Mahajani, S. M. (2018a): Pilot scale evaluation of fuel pellets produc-tion from garden waste biomass. Energy for Sustainable Development 2018;43:1–14.

Pradhan, P.; Mahajani, SM.; Arora, A. (2018b): Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. Fuel Processing Technology 2018;181:215–32.

Rahaman, S. A.; Salam, P. A. (2017): Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder. Fuel Processing Technology 2017;158:9–19.

Rumpler, J. (2018): Neue Perspektiven mit Stroh und Spreu. KTBL-Arbeitskreis "Referenten Land- und Energietechnik". Soest, 20.06.2018.

Sakata, I.; Senju, R. (1975): Thermoplastic behavior of lignin with various synthetic plasticizers. In: Journal of Applied Polymer Science 19 (1975), Nr. 10, 2799-2810. http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/app.1975.070191015. – DOI https://doi.org/10.1002/app.1975.070191015

Schuchmann, H. P.; Schuchmann, H (2012).: Lebensmittelverfahrenstechnik - Rohstoffe, Prozesse, Produkte. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. – ISBN 978–3–527–66054–4

Schwarz, B. (2016a): Stroh - Strohpellets - Biogaspellets. Leipzig; 2016. 2. Workshop des BMBF Innovationsforums SpreuStroh. Leipzig, 14.03.2016.

Schwarz, B. (2016b): Das Biogaspellet - Energie und Dünger aus SpreuStroh. Abschluss-veranstalltung des BMBF Innovationsforums SpreuStroh. Chemnitz, 20.05.2016.

Schwarz, B. (2016c): Strohbasierte Biogaspellets als alternatives Inputsubstrat in Biogasan-lagen. Fachtagung „Biogas aus Stroh". Heiden, 30.08.2016.

Schwarz, B. (2017): Vergärung von Stroh. FNR-Fachgespräch: Biogene Rest- und Abfallstof-fe für die Biogaserzeugung - Stand des Wissens und F&E-Bedarf. Gülzow, 18.05.2017.

Schwarz, B.; Reinhold, G. (2012): Potenziale und Wirtschaftlichkeit von Stroh als Substrat in Nassvergärungsanlagen. Energiepflanzentag. Trossin, 29.08.2012.

Siebertz, K.; Bebber, D. van ; Hochkirchen, T. (2010): Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE). Springer Verlag GmbH, 2010. SBN 978–3–642– 05493–8

STEP Verwertung strohbasierter Energiepellets und Geflügelmist in Biogasanlagen mit wärmeautarker Gärrestverede-lung FZK: 03KB116A, 08/2016 – 01/2019

Thomas, M. van der Poel (1996): AFB. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. Animal Feed Science and Technology 1996;61(1-4):89–112.

Tumuluru, J. S.; Tabil, L. G.; Song, Y.; Iroba, K. L.; Meda, V. (2014): Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws. Biomass and Bioenergy 2014;60:58–67.

Tumuluru, J. S.; Wright, C. T.; Kenney, K. L.; Hess, R. J. (2010): A Technical Review on Bi-omass Processing: Densification, Preprocessing, Modeling and Optimization. In: St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2010.

UBA (2017): Daten und Fakten zu Braun und Steinkohle.

UBA (2018): Entwicklung der spezifischen CO2-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2018.

Welte, M. (1980): Untersuchungen über den Einfluss der Holzbeschaffenheit auf die Eigenschaften von thermomechanischen Holzstoffen (TMP). Hamburg, Universität Hamburg, Diss., 1980

Whittaker, C.; Shield, I. (2017): Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durabi-lity – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;71:1–11.

Zhang, G.; Sun, Y.; Xu, Y. (2018): Review of briquette binders and briquetting mechanism. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;82:477–87.

Ergänzende Daten zur Pelletierung

Vorversuche Kleintechnische Pelletierung (ATS)

Produktion von Pellets aus Getreiderest Landhandel

Datum:	**22.07.2020**		
Substrat:	**Getreidekaff von Raiffeisen vom 16.07.2020**		**nicht zerkleinert**
Produktion:			
Matritze:	8 mm		
Beginn:	13.00 Uhr Vorlauf/ 13.10 Uhr Start		
Ende:	14.10 Uhr	(d.h. Produktionszeit = 1 Stunde)	
Verbrauch Getreidekaff:	3 Schaufeln = 3 m³ gesamt (1 Schaufel = 1 m³ / ca. 20 min)		
Verbrauch NaOH:	32 l gesamt	(berechnet über Füllhöhe IBC: 3,2 cm)	
produzierte Menge:	ca. 1 t		
Stromzähler 1:	20,11 kWh	Beginn	
	25,72 kWh	Ende	
Stromzähler 2:	8,79 kWh	Beginn	
	11,72 kWh	Ende	
Probenahme Pellets:			
Probe 1	13.25 Uhr	nach 15 min	
Probe 2	13.40 Uhr	nach 30 min	z. Zt. gerade fast keine Pellets, sondern nur unpelletierte Getreidereste
Probe 3	13.45 Uhr	nach 35 min	WH Probenahme, da wieder Pellets
Probe 4	14.00 Uhr	nach 50 min	nach 45 min gerade keine Pellets, da Kaff aufgebraucht und nachgefüllt
Probe 5	14.10 Uhr	nach 60 min	

Stomstärke Pelletpresse [A]		
Uhrzeit	angezeigter Wert [A]	
13:10:00	110	
13:13:00	80	
13:15:00	64	
13:20:00	77	
13:21:00	85	
13:25:00	62	
13:31:00	61	
13:34:00	75	(- 80)
13:40:00	62	
13:43:00	76	
13:47:00	66	
13:49:00	76	
13:50:00	60	
13:53:00	57	
13:56:00	75	
14:02:00	68	
14:03:00	72	(bis z.T.90)
14:07:00	79	(bis z.T.100)
14:09:00	62	

Schüttdichte:	
Getreidekaff	240 g/l
Pellets Probe 1	470 g/l
Pellets Probe 2	460 g/l
Pellets Probe 3	430 g/l
Pellets Probe 4	490 g/l
Pellets Probe 5	420 g/l

lt. aushängender Liste

Pelletpresse Strohmehl: 70,00 kW

Trockensubstanz:		Wassergehalt:
Getreidekaff	88,67%-TS	11,33%
Pellets Probe 1	85,29%-TS	14,71%
Pellets Probe 2	87,10%-TS	12,90%
Pellets Probe 3	84,13%-TS	15,87%
Pellets Probe 4	84,07%-TS	15,93%
Pellets Probe 5	83,70%-TS	16,30%

Schnecke Außen Eintrag	
Uhrzeit	angezeigter Wert
13:10	15%
13:17	20%
13:27	15%
13:36	17%
13:37	20%
13:38	15%
13:44	17%
13:51	15%
14:02	20%
14:08	23%

	Natrium als Na_2O	Kalium als K_2O
Pellets Probe 1	1,06%	0,92%
Pellets Probe 3	1,53%	0,94%
Pellets Probe 4	1,58%	0,91%
Pellets Probe 5	1,74%	0,96%

NaOH-Gehalt:	
Pellets Probe 1	1,37%
Pellets Probe 3	1,97%
Pellets Probe 4	2,04%
Pellets Probe 5	2,25%

*(der Natriumgehalt entspricht diesem NaOH-Gehalt, unter der Annahme, dass das ganze Na aus der Natronlauge stammt)

Produktion von Pellets aus Getreiderest Ölmühle/ Mälzerei

Datum:	**29.07.2020**						
Substrat:	**Rapskaff Cargill**		**zerkleinert**				
Produktion:							
Matrize:	8 mm					Stomstärke Pelletpresse [A]	
						Uhrzeit	angezeigter Wert [A]
Beginn:	13.50 Uhr Vorlauf/ 14.00 Uhr Start				1. Charge	13:50	58 A (Vorlauf)
Ende:	14.25 Uhr	(d.h. Produktionszeit = 25 Minuten)			1. Charge	14:02	63 A
Verbrauch Rapskaff (unzerkleinert):	ca. 1 BigBag (3/4 voll)				1. Charge		61-65 über den ganzen Verlauf
						14:25	59 A
Beginn:	15.00 Uhr				2. Charge		
Ende:	15.17 Uhr	(d.h. Produktionszeit = 17 Minuten)			2. Charge		
Verbrauch Rapskaff (unzerkleinert):	ca. 1/2 BigBag (3/4 voll)				2. Charge	14:57	60 A
						15:02	63 A
Verbrauch NaOH:	43 l gesamt	(berechnet über Füllhöhe IBC: 4,3 cm)				15:03	62 A
produzierte Menge:	ca. 400 kg					15:05	63 A
						15:13	60 A
Stromzähler 1:	195,84 kWh	Beginn					
	198,51 kWh	Ende					
						lt. aushängender Liste	
Stromzähler 2:	40,18 kWh	Beginn				Pelletpresse Strohmehl: 70,00 kW Motorleistung	
	41,81 kWh	Ende					
Probenahme Pellets:							
Probe 1	Mitte 1. Charge (nach ca. 15 min.)					Stomstärke Hammermühle [A]	
Probe 2	Ende 1. Charge					Uhrzeit	angezeigter Wert [A]
Probe 3	2. Charge					13:53	25
						14:00	30 Beginn Zugabe
						14:14	32
Schüttdichte:						14:15	28
Pellets Probe 1	380 g/l					14:20	26
Pellets Probe 2	410 g/l					14:21	27
Pellets Probe 3	430 g/l					14:25	24 BigBag aufgebraucht
						15:00	25 Beginn Zugabe
Trockensubstanz:			Wassergehalt:			15:03	29
Pellets Probe 1	80,07 %-TS		19,93%			15:05	30
Pellets Probe 2	79,76 %-TS		20,24%			15:13	24 BigBag aufgebraucht
Pellets Probe 3	82,20 %-TS		17,80%				
	Natrium als Na_2O		Kalium als K_2O				
Pellets Probe 1	3,50%		0,86%				
Pellets Probe 2	3,48%		0,86%				
Pellets Probe 3	2,41%		0,92%				
NaOH-Gehalt:							
Pellets Probe 1	4,51%		*(der Natriumgehalt entspricht diesem NaOH-Gehalt, unter der Annahme, dass das gesamte Na aus der Natronlauge stammt)				
Pellets Probe 2	4,49%						
Pellets Probe 3	3,11%						
Probenahme zerkleinerter Rapskaff + NaOH:							
Probe 1	Mitte 1. Charge						
Probe 2	Ende 1. Charge						
Probe 3	2. Charge						
Schüttdichte:							
zerkl. Rapskaff + NaOH Probe 1	280 g/l						
zerkl. Rapskaff + NaOH Probe 2	370 g/l						
zerkl. Rapskaff + NaOH Probe 3	270 g/l						

Großcharge 1 (Mischung 50% Reststoffe Landhandel + Stroh) – (ATS)

Matrize:	**6 mm**		**6 mm**		**6 mm**
Datum:	**08.12.2020**		**09.12.2020**		**10.12.2020**
Probenahme Pellets:	Probe 1		Probe 2		Probe 3
Produktion:					
Produktionszeit:	3 Std. 41 min		3 Std. 47 min		1 Std. 14 min
Verbrauch Mischung (Getreidekaff + Stroh):			8 Schaufeln		4 Schaufeln
	(1 Schaufel = 1 m³ / ca. 20-25 min)				
Errechnete Menge anhand der Schaufeln:			2000 kg		1000 kg
produzierte Menge/Zeit (aufgefangen in BigBag):			269 kg / 1,3 Std.		
produzierte Gesamtmenge:					
Verbrauch NaOH (berechnet über Füllhöhe IBC):	gegen 0		gegen 0		2 l
Stromzähler 1 - Stand Beginn:	3573,87 kWh		3628,76 kWh		3686,33 kWh
Stromzähler 1 - Stand Ende:	3600,58 kWh		3680,42 kWh		3742,36 kWh
Stromzähler 1 - Verbrauch:	26,71 kWh		51,66 kWh		56,03 kWh
Stromzähler 2 - Stand Beginn:	554,55 kWh		567,23 kWh		585,25 kWh
Stromzähler 2 - Stand Ende:	565,22 kWh		583,02 kWh		615,58 kWh
Stromzähler 2 - Verbrauch:	10,67 kWh		15,79 kWh		30,33 kWh
Summe Stromverbrauch:	37,38 kWh		67,45 kWh		86,36 kWh
Spez. Stromverbrauch / t:			33,72 kWh/t		86,36 kWh/t
Stromstärke Pelletpresse:	80 - 100 A		75 - 80 A		80 - 90 A
	85 - 95 A		80 - 95 A		85 - 100 A
					70 - 100 A

6 mm		**6 mm**		**6 mm**		**6 mm**		**6 mm**		**6 mm**	
14.12.2020		**15.12.2020**		**16.12.2020**		**17.12.2020**		**18.12.2020**		**21.12.2020**	
Probe 5		Probe 6		Probe 7		Probe 8					
4 Std. 54 min		3 Std. 21 min		2 Std. 40 min		4 Std. 26 min		4 Std. 32 min		0 Std. 32 min	
9 Schaufeln		6 Schaufeln		8 Schaufeln		11 Schaufeln		12 Schaufeln		2 Schaufeln	
2250 kg		1500 kg		2000 kg		2750 kg		3000 kg		500 kg	
		430 kg / 1 Std.									
									8. - 21.12.2020:	**ca. 15 t**	
42 l		47 l		56 l		63 l		79 l		kein Verbrauch	
3856,15 kWh		3894,48 kWh		3948,44 kWh		3983,09 kWh		4034,90 kWh		4177,97 kWh	
3871,03 kWh		3931,30 kWh		3974,90 kWh		4023,83 kWh		4071,87 kWh			
14,88 kWh		36,82 kWh		26,46 kWh		40,74 kWh		36,97 kWh			
615,58 kWh		631,74 kWh		650,64 kWh		668,27 kWh		688,10 kWh		711,56 kWh	
630,19 kWh		647,24 kWh		666,72 kWh		686,64 kWh		704,39 kWh			
14,61 kWh		15,50 kWh		16,08 kWh		18,37 kWh		16,29 kWh			
											Mittwelwert
29,49 kWh		52,32 kWh		42,54 kWh		59,11 kWh		53,26 kWh		0,00 kWh	
13,11 kWh/t		34,88 kWh/t		21,27 kWh/t		21,49 kWh/t		17,75 kWh/t		0,00 kWh/t	**21,70 kWh/t**
90 A		90 A		95 - 98 A		90 - 95 A		60 A		100 A	
95 - 100 A		90 - 95 A		78 - 85 A		95 - 100 A		85 A		100 A	
90 A		90 - 95 A		90 - 100 A		95 - 100 A		75 A			
85 - 90 A		90- 95 A		78 - 90 A		80 - 90 A		80 A			
95 A						95 A		85 A			
90 A						75 - 80 A		85 A			
						80 - 85 A		85 A			
								75 A			

8 mm	**8 mm**	**8 mm**	**8 mm**
20.01.2021	**21.01.2021**	**26.01.2021**	**27.01.2021**
Probe 9 (9.30 Uhr)		Probe 11	Probe 12
Probe 10 (16.00 Uhr)			
7 Std. 00 min	2 Std. 40 min	4 Std. 44 min	7 Std. 20 min
2 IBC / Trichter komplett gefüllt	1x Trichter komplett gefüllt	2 IBC	4x Trichter gefüllt
insges. 3x Trichter komplett gefüllt			
2800 kg	2800 kg	3100 kg	2920 kg
186 kg / 1 Std.			400 kg / 1 Std.
gegen 0		26. + 27.01.2021:	98 l
5020,52 kWh	5179,05 kWh	5377,37 kWh	5426,29 kWh
5179,05 kWh	5194,91 kWh	5409,03 kWh	5453,59 kWh
158,53 kWh	15,86 kWh	31,66 kWh	27,30 kWh
823,16 kWh	865,90 kWh	917,55 kWh	935,72 kWh
865,90 kWh	874,79 kWh	932,96 kWh	954,75 kWh
42,74 kWh	8,89 kWh	15,41 kWh	19,03 kWh
201,27 kWh	24,75 kWh	47,07 kWh	46,33 kWh
71,88 kWh/t	8,84 kWh/t	15,18 kWh/t	15,87 kWh/t
75 A	70 - 75 A	60 A	65 - 75 A
75 - 80 A	75 - 80 A	60 A	76 A
75 A		60 A	
		65 - 75 A	

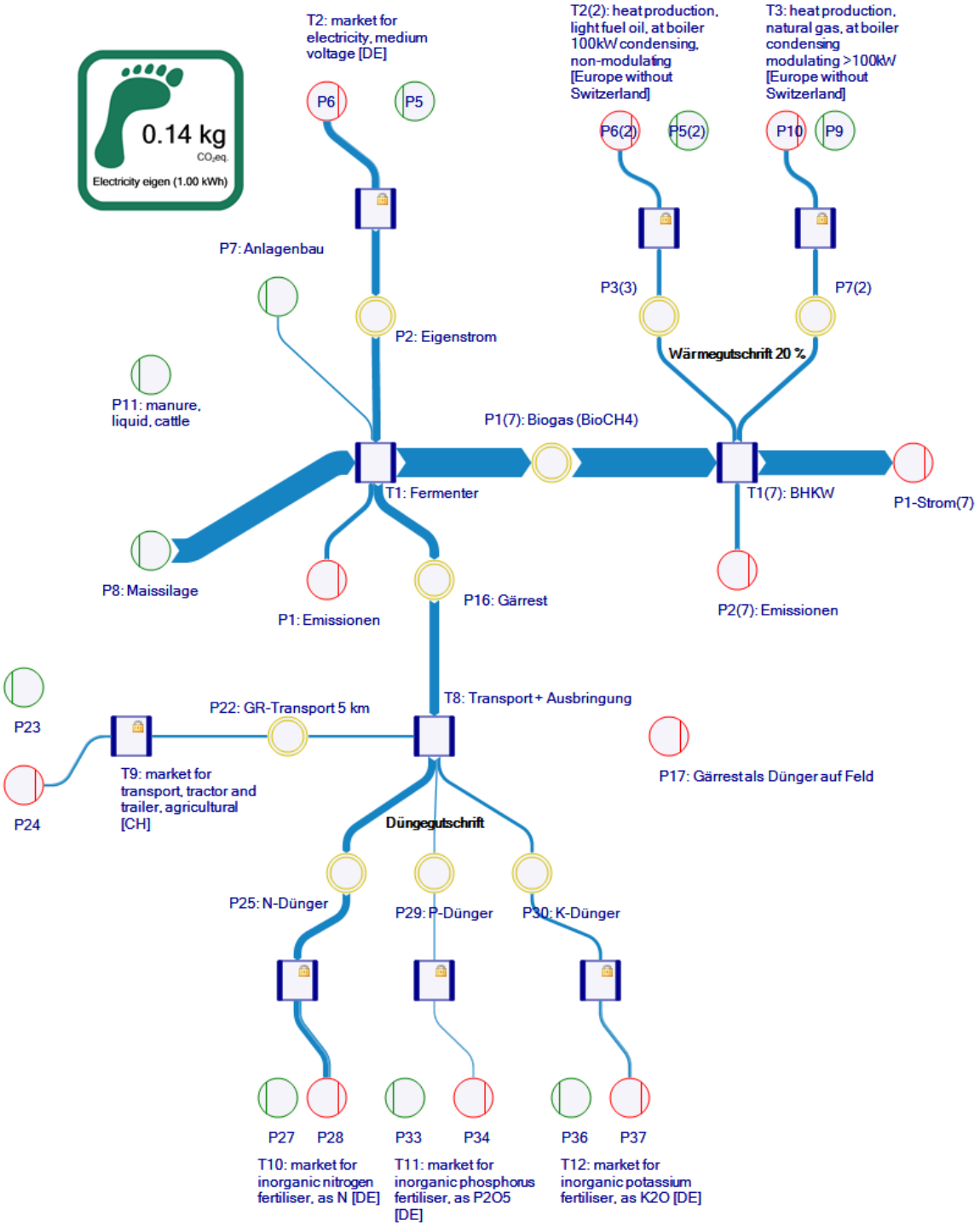
8 mm	**8 mm**	**8 mm**		
28.01.2021	**29.01.2021**	**01.02.2021**		
Probe 13	Probe 14	Probe 15		
8 Std. 40 min	8 Std. 45 min	6 Std. 25 min		
3440 kg	3500 kg	2600 kg		
	380 kg / 1 Std.			
	20.01. - 01.02.2021:	**ca. 21 t**		
108 l	74 l	50 l		
5467,26 kWh	5511,48 kWh	5610,52 kWh		
5504,46 kWh	5552,48 kWh	5643,11 kWh		
37,20 kWh	41,00 kWh	32,59 kWh		
957,25 kWh	979,24 kWh	1011,49 kWh		
977,24 kWh	1001,24 kWh	1027,18 kWh		
19,99 kWh	22,00 kWh	15,69 kWh		
				Mittwelwert
57,19 kWh	63,00 kWh	48,28 kWh		
16,63 kWh/t	18,00 kWh/t	18,57 kWh/t		**15,51 kWh/t**
65 - 75 A	75 - 80 A	75 - 80 A		
	60 - 70 A	80 - 85 A		

Großcharge 2 (100% Landhandel)

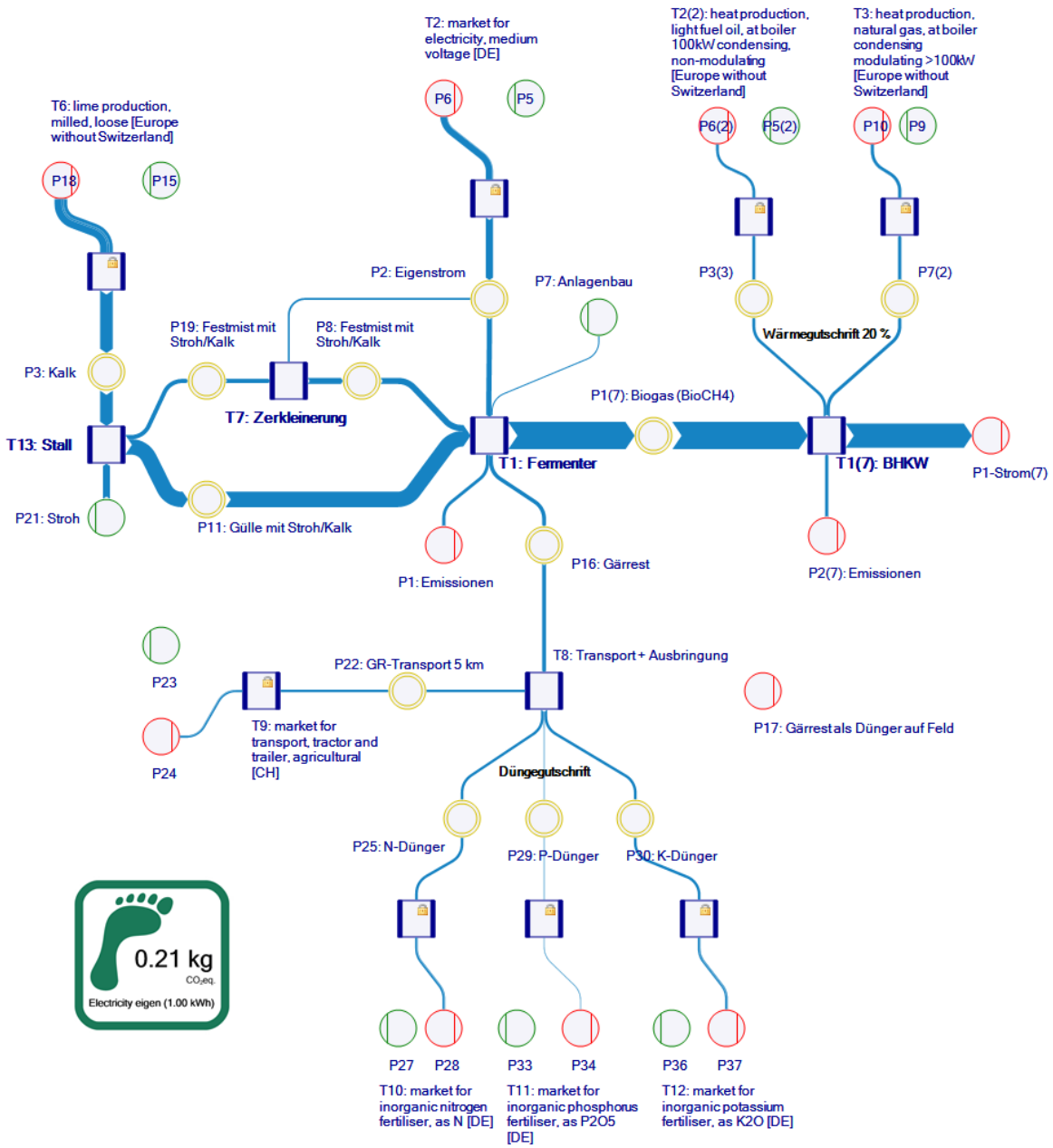
Produktion von Pellets aus Getreiderest Landhandel						
Produktionsdaten						
			ohne Hammermühle = unzerkleinert			
Substrat:	**Getreidekaff/ Spelze**					
Matrize:	**8 mm x 52 mm**	**8 mm x 52 mm**	**8 mm x 52 mm**	**8 mm x 52 mm**	**8 mm x 52 mm**	**8 mm x 52 mm**
Datum:	**26.08.2021**	**27.08.2021**	**30.08.2021**	**31.08.2021**	**01.09.2021**	**02.09.2021**
Probenahme Pellets:	Probe 1	Probe 3 (S15 20/30)	Probe 5		Probe 6	Probe 7
	Probe 2 (S15 20/30)	Probe 4 (S25 20/60)				
Produktion:						
Produktionszeit:	3 Std. 59 min	3 Std. 41 min	4 Std. 10 min	5 Std. 59 min	5 Std. 19 min	2 Std. 07 min
Verbrauch Getreidekaff:	17 Schaufeln	14 Schaufeln	20 Schaufeln	20 Schaufeln	18 Schaufeln	12 Schaufeln
	(1 Schaufel = 1 m³)					
produzierte Menge/Zeit (aufgefangen in BigBag):	800 kg/Std.					
produzierte Gesamtmenge:					**26.08. - 02.09.2021:**	**ca. 28 t**
Verbrauch NaOH (berechnet über Füllhöhe IBC):	**240 l**	**200 l**	**420 l**	**170 l**	**440 l**	**320 l**
Stromzähler 1 - Stand Beginn:	9570,95 kWh	9583,13 kWh	9616,68 kWh	9626,44 kWh		9658,52 kWh
Stromzähler 1 - Stand Ende:	9576,63 kWh	9584,95 kWh	9620,54 kWh	9636,01 kWh	9652,38 kWh	9662,62 kWh
Stromzähler 1 - Verbrauch:	5,68 kWh	1,82 kWh	3,86 kWh	9,57 kWh		4,10 kWh
Stromzähler 2 - Stand Beginn:	2613,68 kWh	2631,38 kWh	2652,21 kWh	2671,82 kWh		2712,73 kWh
Stromzähler 2 - Stand Ende:	2629,46 kWh	2643,65 kWh	2669,90 kWh	2691,87 kWh	2711,20 kWh	2723,03 kWh
Stromzähler 2 - Verbrauch:	15,78 kWh	12,27 kWh	17,69 kWh	20,05 kWh		10,30 kWh
Summe	**21,46 kWh**	**14,09 kWh**	**21,55 kWh**	**29,62 kWh**	**0,00 kWh**	**14,40 kWh**
Stromstärke Pelletpresse:	70 - 75 A	70 - 75 A	95 A	n.A.	75 - 80 A	75 A
		~ 85 A	85 - 90 A		70 A	
			95 A			
			80 - 90 A			
			95 - 100 A			
Schnecke Außeneintrag:	15%	15%	30%	15%	30%	30%
		25%	15%	15%	30%	
			30%	15%		
			15%			
			30%			
lt. aushängender Liste						
Pelletpresse Strohmehl: 70,00 kW Motorleistung						

Sankeydiagramme für Szenarien 1 (Mais) bis 4

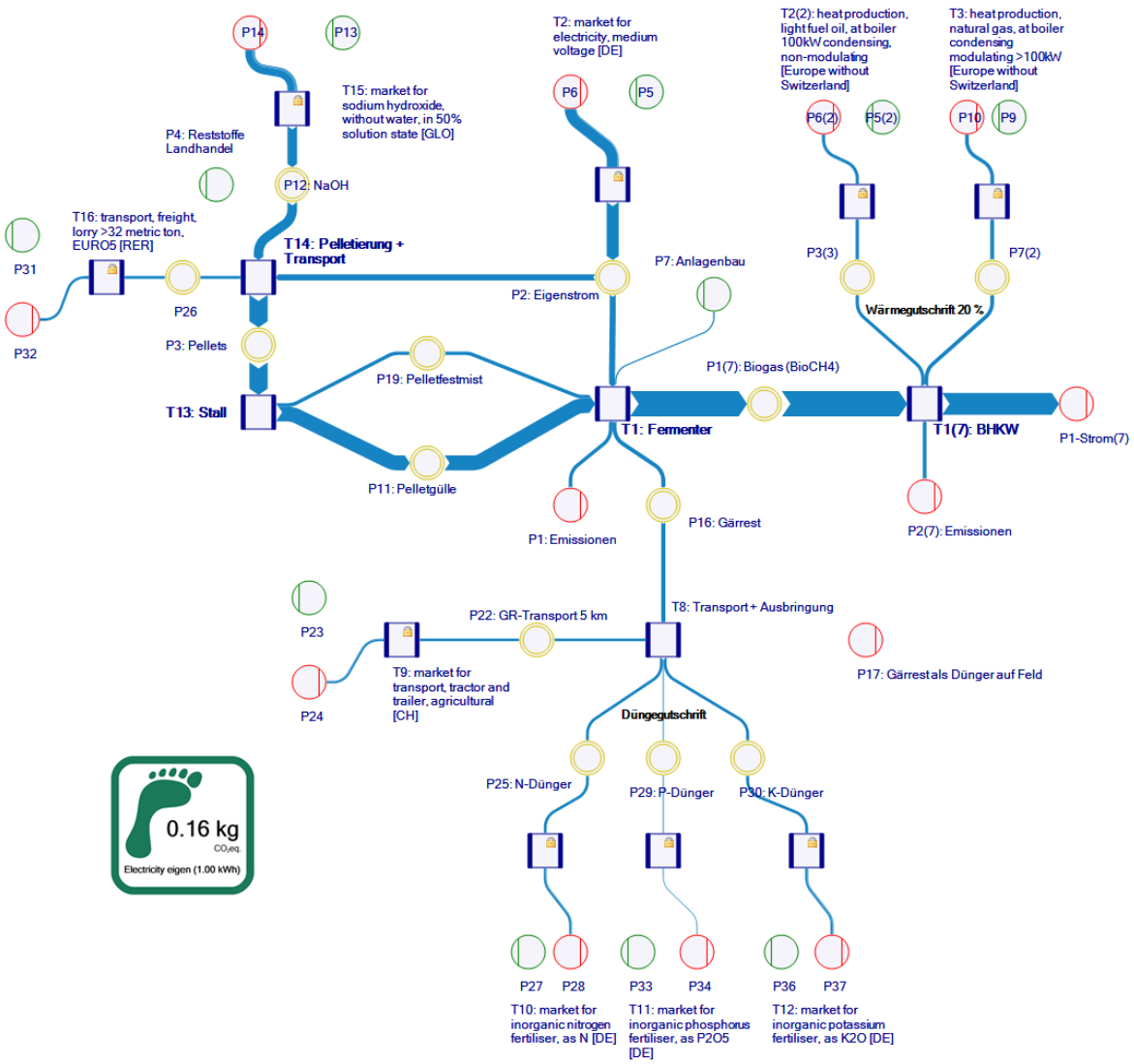
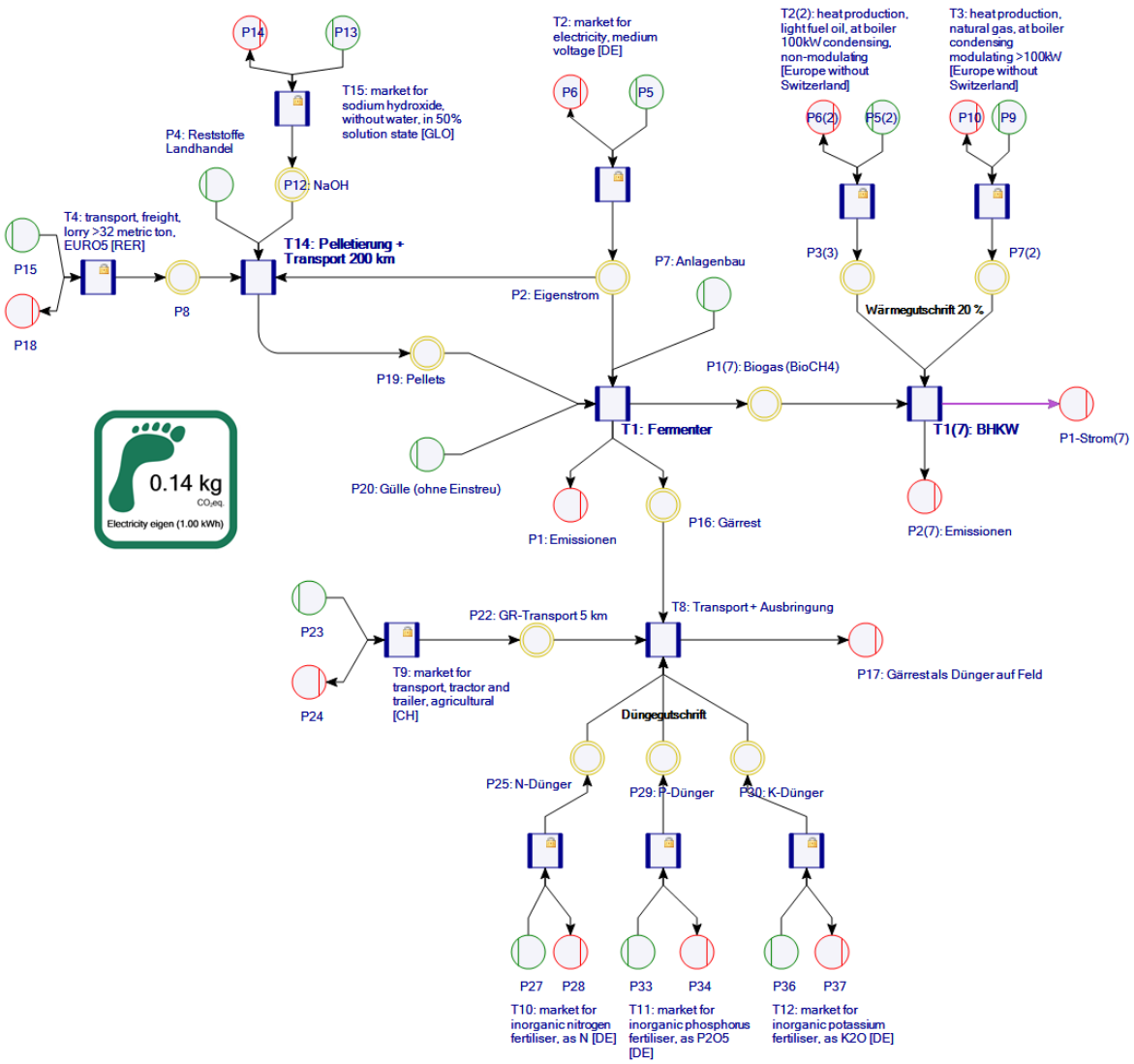
Szenario 1 (Maissilage)



Szenario 2 (Kalk/Stroh)



Szenario 3 (Pellet-Einstreu)



Szenario 4 (Pellet-Direkteinsatz)