

Beitrag zur Optimierung des Pelletieverhaltens von Gärresten und Landschaftspflegeheu sowie deren Mischungen

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Claudia Kirsten

an der Fakultät III Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Harald Kruggel-Emden, Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens-Uwe Repke, Berlin

Gutachter: Prof. Dr. mont. Michael Nelles, Rostock

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 03. Juni 2021

Berlin 2021

Referat

Biomasse ist verfügbar, flexibel einsetzbar und stellt einen wesentlichen Baustein der Energiewende der Bundesregierung dar. Die Veredlung von Rest- und Abfallstoffen in der dezentralen Wärmeerzeugung bietet einen hohen Zugewinn an Nachhaltigkeit und kann Konflikte zwischen stofflicher und energetischer Nutzung von Biomasse vermindern. Landschaftspflegeheu als halmgutartige und Gärreste aus Biogasanlagen als faserarme und ligninreiche Biomasse sind potentielle Reststoffe für eine thermische Verwertung. Die Entwicklung qualitativ hochwertiger Festbrennstoffe aus Landschaftspflegeheu und/oder Gärresten kann die Brennstoffpalette über Holz hinaus erweitern und ist Untersuchungsgegenstand der Arbeit. Mit Hilfe standardisierter Aufbereitungsverfahren wurden die Reststoffe zu Pellets verarbeitet und so weit optimiert, dass die physikalisch-mechanischen Mindesteigenschaften der ISO 17225-6 [20] für nicht-holzartige Biomassepellets vollständig eingehalten werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt im verbesserten Verständnis der „Theorien der Bindemechanismen und -kräfte“. Sowohl theoretisch als auch mit umfangreichen praktischen Untersuchungen wird der Frage „Wie hält ein Pellet zusammen?“ nachgegangen. Dazu werden Nachweismöglichkeiten erarbeitet und getestet, wobei vor allem bildgebende Analysemethoden wie Stereomikroskopie (SM), Rasterelektronenmikroskopie (REM), Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) und Mapping im Vordergrund stehen.

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Prof. Dr.-Ing. habil. Jens-Uwe Repke, Technische Universität Berlin, Betreuer
- Prof. Dr. mont. Michael Nelles, Universität Rostock, Gutachter
- Dr.-Ing. Volker Lenz, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH Leipzig
- Dr.-Ing. Hans-Werner Schröder, TU Bergakademie Freiberg

Praktikumsarbeit

- 2012 Künne, Anne: Untersuchungen zum Zerkleinerungsverhalten von Landschaftspflegeheu, HTWK Leipzig

Projektarbeit

- 2013 Meister, Patrick und Heinze, Daniel: Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten von Heu und Gärresten, TU Bergakademie Freiberg

Bachelorarbeiten

- 2009 Buhl, Marcus: Pelletierung von Miscanthus - Untersuchungen verschiedener Einflussfaktoren auf den Pelletierprozess, HTWK Leipzig
- 2012 Breuß, Mathias: Energetische Verwertung von Gärresten, FH Merseburg
- 2013 Künne, Anne: Pelletierverhalten von Landschaftspflegeheu, HTWK Leipzig
- 2013 Dempwolf, Christoph: Untersuchungen zur Herstellung von Mischpellets aus Landschaftspflegeheu und Gärresten, FH Nordhausen
- 2013 Kemnitzer, Jan: Untersuchung zur Herstellung von Mischpellets aus Heu und Gärresten, Hochschule Hof
- 2015 Gropengießer, Martin: Herstellung von Energiepellets: Analyse der einflussreichsten Rohstoff- und Prozessparameter, FH Nordhausen

- 2015 Walter, Simon: Untersuchungen zur Entwicklung einer Methodik zur Festigkeitsprüfung von Biomassepellets, HTWK Leipzig

Diplom-/Masterarbeiten

- 2013 Marek, Johannes: Optimierung des Herstellungsprozesses von Mischpellets aus Gärresten und Landschaftspflegeheu, TU Bergakademie Freiberg
- 2014 Kruse, Sabrina: Untersuchungen zur Theorie der Bindemechanismen bei der Verdichtung von Heu, TU Bergakademie Freiberg

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt.

Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

03. Juni 2021

Dipl.-Ing. Claudia Kirsten

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand maßgeblich während meines Industriestipendiums, gefördert durch die Sächsischen Aufbaubank (SAB) und in Kooperation mit dem Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik (ITUN) der TU Bergakademie Freiberg sowie dem Deutschen Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) Leipzig. Die Fertigstellung der Dissertationsschrift erfolgte berufsbegleitend mit meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am DBFZ. In diesem Sinne danke ich der SAB für die finanzielle Unterstützung sowie den Kooperationspartnern für die Bereitstellung von Materialien und Techniken, um praxis- und anwendungsbezogene Wissenschaft und Forschung durchzuführen.

Ich möchte mich herzlichst bei meinem Betreuer und Gutachter Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Jens-Uwe Repke (2010-2016 Direktor am ITUN, ab 03/2016 Leiter des Fachgebiets Dynamik und Betrieb technischer Anlagen an der TU Berlin) bedanken, der mir jederzeit mit hilfreichem Rat zur Seite stand sowie mit seiner wertvollen Erfahrung und konstruktiven Kritik die Qualität dieser Arbeit geprägt hat.

Mein besonders herzlicher Dank gilt Dr.-Ing. Volker Lenz, der mit viel Geduld und fachlichen Anregungen mein Promotionsvorhaben stets begleitet und gefördert hat. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr. mont. Michael Nelles, der Universität Rostock und wissenschaftlicher Geschäftsführer des DBFZ, für die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens.

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mich in vielseitiger Weise bei meiner Tätigkeit im Rahmen meines Promotionsvorhabens sowohl an der TU Bergakademie Freiberg als auch am DBFZ unterstützt und somit einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Für die interessante und abwechslungsreiche Zusammenarbeit in einer sehr angenehmen Atmosphäre danke ich Dr.-Ing. Hans-Werner Schröder und dem gesamten Team der Arbeitsgruppe Naturstoffverfahrenstechnik. Ohne die vielseitige Unterstützung der Labormitarbeiterin Frau Carmen Müller wäre die Vielfalt an Experimenten nicht möglich gewesen. Ein großes Dankeschön geht auch an die Mitarbeitenden der Arbeitsgruppe Innovative Festbrennstoffe am DBFZ, die für verschiedene Fragestellungen stets ein offenes Ohr hatten. Für die wertvolle Hilfe bei der Lösung technischer Probleme bedanke ich mich bei Uwe Langbein und Michael Junold. Bei allen ehemaligen und heutigen Mitarbeitenden der AGs und allen hier nicht Aufgeführten danke ich für die Unterstützung, die gute Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft sowie das positive Arbeitsklima.

Weiterer Dank gebührt den Studierenden, die als Hilfskräfte oder durch Anfertigung ihrer Graduiertenarbeit zahlreiche experimentelle und theoretische Vorbetrachtungen durchgeführt und damit einen erheblichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Ein besonderes Dankeschön gilt meiner Familie, vor allem meinem Mann Ulf, der mich stets mitfühlend unterstützt und motiviert hat. Ohne den familiären Rückhalt wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einleitung	13
1.1 Hintergrund und Motivation	13
1.2 Aufgabenstellung	14
1.2.1 Zielsetzung	14
1.2.2 Vorgehensweise	15
2 Grundlagen der Agglomerationstechnik	17
2.1 Bindekräfte und Bindemechanismen	17
2.2 Agglomerationsverfahren	19
2.2.1 Allgemeines zu Agglomerationsverfahren	19
2.2.2 Pelletierung als Agglomerationsprozess	20
2.2.3 Herstellung von Biomassepellets	21
2.3 Einflussgrößen auf die Pelletqualität	26
2.3.1 Rohstoffliche Einflussparameter	28
2.3.2 Prozessparameter	36
3 Versuchsmaterial und Methodik	41
3.1 Rohstoffe	41
3.1.1 Gärreste	41
3.1.2 Landschaftspflegeheu	41
3.2 Versuchsplan zur Verarbeitung von Heu, Gärresten und Mischungen	42
3.2.1 Versuchskomplex I - Pelletierbarkeit	42
3.2.2 Versuchskomplex II - Prozessoptimierung	44
3.2.3 Versuchskomplex III - Bindemechanismen	46
3.3 Versuchstechnik zur Herstellung der Pellets	47
3.3.1 Apparate zur Vorbehandlung	47
3.3.2 Techniken zur Verdichtung	50

3.3.3	Apparate zur Nachbehandlung	54
3.4	Methodiken und Prüfverfahren zur Beurteilung der Pelletqualität	55
3.4.1	Bestimmung der Korn- und Faserlängenverteilung	55
3.4.2	Ermittlung physikalisch-mechanischer Pelleteigenschaften	56
3.4.3	Bildgebende Analyseverfahren	60
3.4.4	Erfassung und Ermittlung prozessbegleitender Parameter	60
3.5	Fehlerbetrachtung	62
4	Versuchsergebnisse und Diskussion	65
4.1	Versuchskomplex I: Untersuchungen zur Pelletierfähigkeit von Heu und Gärresten	65
4.1.1	Untersuchungen zum Zerkleinerungs- und Pelletieverhalten der Einzelrohstoffe (1. Versuchsreihe)	65
4.1.2	Untersuchungen zum Pelletieverhalten der binären Mischung aus Heu und Gärresten (2. Versuchsreihe)	76
4.2	Versuchskomplex II: Prozessoptimierung mithilfe statistischer Versuchsplannung (DoE)	81
4.2.1	Allgemeines zu Versuchskomplex II	81
4.2.2	Beurteilung der Höhenlinienplots der 1. statistischen Versuchsreihe	81
4.2.3	Beurteilung der Höhenlinienplots der 2. statistischen Versuchsreihe	87
4.3	Versuchskomplex III: Bindemechanismen als Ursache für qualitativ hochwertige Biomassepellets	92
4.3.1	Allgemeines zu Versuchskomplex III	92
4.3.2	Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtungstemperatur	92
4.3.3	Untersuchungen zum Einfluss des Wassergehaltes	96
4.3.4	Untersuchungen zum Einfluss der Partikelgröße	100
4.3.5	Untersuchungen zum Einfluss von Inhaltsstoffen	107
5	Zusammenfassung und Ausblick	115
5.1	Zusammenfassung	115
5.2	Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	119
	Tabellenverzeichnis	128
	Abbildungsverzeichnis	130
	Anhang	137

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	mm^2	Fläche
A_0	mm^2	freie Siebfläche
b	—	Koeffizient
BD	kg/m^3	bulk density (Schüttdichte)
CR	%	compressive resistance (Druckfestigkeit)
d	mm	Durchmesser
DU	$Ma.\%$	durability (Abriebfestigkeit)
E_{spez}	Wh/kg	spezifische Energie
F	N	Kraft
f	Hz	Frequenz
GD	g/cm^3	gross density (Roh- oder Partikeldichte)
HE	—	Haupteffekte
l	mm	Länge
m	kg	Masse
$\dot{m}$	kg/h	Massendurchsatz
$m_{P,A}$	kg	abgesiebte Pelletmasse vor mechanischer Beanspruchung
$m_{P,E}$	kg	abgesiebte Pelletmasse nach mechanischer Beanspruchung
p	MPa	Druck
$p\text{-Wert}$	—	Wahrscheinlichkeit
$Q_3(x)$	$Ma.\%$	Verteilungssumme
R^2	—	Bestimmtheitsmaß
s	mm	Weg
T	mm	Teilung
t	s	Zeit
V	m^3	Volumen
W	Nm	Arbeit
w	$Ma.\%$	Wassergehalt
WW_{ij}	—	Wechselwirkungseffekte
x	mm	Korngröße
x_{50}	mm	mittlere Korngröße
s	mm	Weg
x_{Cmin}	mm	kleinste Breite eines Partikels

$x_{F_{max}}$	mm	maximaler Feret-Durchmesser eines Partikels
y	—	Modellgleichung

Griechische Symbole

ρ	kg/dm^3	Dichte
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatur

Indizes

1	Zustand 1
2	Zustand 2
3	Zustand 3
A	Ausgangsstoff
B	Messbehälter
D	Durchstoß
eff	effektiv
F	Feinanteil
i	Inkrement bzw. Anzahl 1
j	Inkrement bzw. Anzahl 2
M	Matrize
max	Maximum
min	Minimum
N	Gesamtanzahl
n	Inkrement bzw. Abstufung
MV	Materialverformung
P	Pellets
Pel	Pelletierung
PR	Pressenraum
S	Schnecke
$spez$	spezifisch
V	Verdichtung
x	Orientierung in x-Richtung
y	Orientierung in y-Richtung
z	Orientierung in z-Richtung
Z	Zerkleinerung

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
ATR-FTIR	attenuated total reflection Fourier transform infrared
Äq.	Äquivalent
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	design of experiments
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EE	Erneuerbare Energien
el	elektrisch
EN	Europäische Norm
EPK	Einzelpresskanal
FM	Frischmasse
FMP	Flachmatrizenpresse
H	Häcksler
HM	Hammermühle
IEC	Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen
ISO	International Organization for Standardization
ITUN	Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstofftechnik
K/M	Abstand Koller/Matrize
mA	mit Aspiration
oA	ohne Aspiration
PM	Prallmühle
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RMP	Ringmatrizenpresse
SAB	Sächsische Aufbaubank
SLW	Sieblochweite
SM	Stereomikroskopie

spezif.	spezifisch
StSM	Stabschwingmühle
StVR	Statistische Versuchsreihe
Tab.	Tabelle
th	thermisch
THG	Treibhausgas
TK	Thermo-chemische Konversion
TS	Trockensubstanz
TU BAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg
UV	ultraviolett
wf	wasserfreier Zustand

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Der Klimawandel ist durch anthropogene Treibhausgasemissionen (THG) die zentrale Bedrohung unseres gewohnten Lebens. Ein Umdenken ist erforderlich, um bis 2050 eine THG-neutrale Gesellschaft zu werden. Das Pariser Abkommen von 2015 ist dabei ein maßgeblicher Schritt in Richtung weltweitem Klimaschutz. Der in Deutschland vollständige Rückzug aus der Atomenergie bis 2022 sowie der Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038 stellt eine erhebliche Herausforderung für Politik und Gesellschaft dar und läutet die Energiewende ein. Dabei steht die umweltverträgliche Nutzung regenerativer Energien im Fokus. 2017 betrug der Anteil erneuerbarer Energien (EE) am deutschlandweiten Bruttostromverbrauch 36,2 %, wobei Biomasse 8,9 % davon abdeckt [79]. Beim Wärmeverbrauch lag der EE-Anteil 2017 bei 12,9 % - hier ist die Bioenergie mit 85,7 % mit Abstand der wichtigste Faktor [79].

Die Bioenergie bietet im Vergleich zu anderen EE die Möglichkeit der Speicherung und kann somit Schwankungen im Energiebedarf abdecken. Zudem wird das bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzte CO₂ bei einer nachhaltigen Nutzung durch nachwachsende Rohstoffe gebunden, sodass es zu keiner Verstärkung des Treibhausgaseffektes kommt. Allein bei der Wärme- und Kältebereitstellung konnten 2019 36,4 Mio. t CO₂-Äq. vermieden werden (THG-Minderung durch Nutzung EE gesamt: 203,4 Mio. t CO₂-Äq.) [24].

Die Wärmebereitstellung erfolgt bisher größtenteils aus biogenen Festbrennstoffen wie Scheitholz, Holzhackschnitzel oder Holzpellets. Laut dem Deutschen Energieholz- und Pellet-Verband steigt die Anzahl installierter Pelletfeuerungsanlagen stetig. Somit hat sich die Anlagenanzahl von 2011 (ca. 240.000) zu 2019 (492.000) mehr als verdoppelt [9]. Diese Anlagen verbrauchten 2019 2,3 Mio. t Holzpellets [10]. Neben den aus der land- und forstwirtschaftlich bereitgestellten Biomassen sowie traditionellen Sägerestprodukten stehen Reststoffe und Abfälle biogenen Ursprungs für die energetische Nutzung zur Verfügung. Hierbei wären z.B. Alt- und Gebrauchtholz, Bioabfälle, Gülle und Festmist, Getreidestroh oder Landschaftspflegematerial zu nennen. Das ungenutzte, technische Biomassepotenzial liegt bei 30,9 Mio. t TS (von insgesamt: 151,1 Mio. t TS) [7]. Die energetische Nutzung dieser Rest- und Abfallstoffe kann dazu beitragen, mögliche Konflikte zwischen stofflicher und

energetischer Nutzung von Biomasse zu reduzieren. Vielversprechende und kaum erprobte Reststoffe sind Heu aus der Landschaftspflege und Gärreste aus Biogasanlagen.

Landschaftspflegeheu ist überschüssiges Gras aus extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen, Gewässer- und Biotopenpflege. Aufgrund des Natur- und Landschaftsschutzes müssen diese Flächen in regelmäßigen Abständen beschnitten werden [8], [22]. Durch den zumeist späten Schnitt weist das Gras einen hohen Verholungsgrad auf, ist damit als Futtermittel eher ungeeignet [77] und stellt demzufolge einen potentiellen Reststoff für eine thermische Nutzung dar.

Gärreste sind feste und flüssige Gärprodukte, die bei der anaeroben Vergärung von unterschiedlichen Substraten in Biogasanlagen (BGA) entstehen. Rund 8.700 BGA in Deutschland produzieren etwa 82 Mio. *t* Gärprodukte [23]. Da die Trockensubstanz (TS) je nach Fermentationsart bei 5 - 30 *Ma*.-% liegt, werden knapp 60 % der Gärreste zumeist in flüssiger Form nahe der Biogasanlage als Dünger und Bodenverbesserungsmittel in der Landwirtschaft eingesetzt [52]. Durch die zusätzlich gesteigerte Tierhaltung wurden 2017 in Summe 208 Mio. *m*³ Gülle, Jauche und Gärreste auf Feldern als Dünger ausgebracht, was teils zu erheblichen Grundwasserverunreinigungen geführt hat [29]. 2017 wurden im Dünge-Paket das Düngegesetz und die Düngeverordnung novelliert, um die Überdüngung von landwirtschaftlich genutzten Flächen stärker zu reglementieren. Sperrzeiten für das Ausbringen, strengere Nährstoffkontrollen, Mengengrenzungen und standortspezifische Obergrenzen für die Stickstoffdüngung stellen teils große Herausforderungen an die Ausbringung von Gärresten dar. Bei einem regionalen Überangebot können Gärreste durch verschiedene mechanische Verfahren separiert, durch intelligente Abwärmenutzungskonzepte getrocknet und lagerfähig aufbereitet werden. Folglich sind Gärreste als potentielles Ausgangsmaterial für die thermische Verwertung einzustufen.

1.2 Aufgabenstellung

1.2.1 Zielsetzung

Als Ziel der Arbeit steht die Entwicklung qualitativ hochwertiger Festbrennstoffe mit definierten physikalisch-mechanischen Eigenschaften aus Landschaftspflegeheu und/oder Gärresten. Für die thermischen Nutzung in automatisch bestückten Feuerungsanlagen ist die Verarbeitung der Materialien zu homogenen Brennstoffpellets vorteilhaft (Erhöhung der volumetrischen Energiedichte, verbesserte Förderfähigkeit und Homogenisierung). Durch den Aufbereitungs- und Veredelungsprozess der Pelletherstellung sollen Eigenschaften generiert werden, die vor allem Transport- und Lager- aber auch Brennstoffqualitäten positiv beeinflussen können. Für einen erleichterten Marktzugang ist der Pelletherstellungsprozess

so auf die Rohstoffe abzustimmen, dass die physikalisch-mechanischen Eigenschaften die Mindestanforderungen der ISO 17225-6 [20] für nicht-holzartige Pellets einhalten. Weiter bietet eine energiespezifische Optimierung, die Möglichkeit den Produktionsenergieeinsatz zu minimieren.

Neben der Betrachtung des Herstellungsprozesses als Ganzes soll der Verdichtungsprozess in Matrizenpressen untersucht werden. Dabei wird der Frage „Was und wie hält ein Pellet zusammen?“ nachgegangen. Die Bedeutung der „Theorien der Bindemechanismen und -kräfte“ liegt hier im Fokus der Arbeit. Die Agglomeration der Untersuchungsmaterialien und die zugehörigen Theorien sollen durch Tests und Analysen verifiziert werden. Landschaftspflegeheu steht dabei als Beispiel für Halmgüter (geringer Ligningehalt, hoher Faseranteil) und Gärreste als ein ligninreicher und faserarmer Vertreter für die Untersuchungen zur Verfügung.

1.2.2 Vorgehensweise

Beginnend mit der Darstellung der „Theorien der Bindemechanismen und -kräfte“, wird anschließend der Fokus auf die Pelletherstellung als relevantes Agglomerationsverfahren gelegt. Anhand einer Literaturrecherche werden die wichtigsten Verfahrensschritte und Techniken für die Aufbereitung der Rohstoffe hin zu Brennstoffpellets dargestellt. Dabei gliedert sich der Verarbeitungsprozess maßgeblich in Zerkleinerung und Pelletierung. Um die wichtigsten Einflussgrößen auf die Pelletqualität zu ermitteln, erfolgt parallel eine umfassende Literaturrecherche zur Verdichtung verschiedener biogener Rohstoffe. Dabei sollen Wissenslücken für die Anwendungsbeispiele Landschaftspflegeheu und Gärreste identifiziert werden - die Variationsmöglichkeiten von Rohstoff- und Prozessparametern stehen hier im Vordergrund.

Die Verarbeitung der Materialien erfolgt im Technikumsmaßstab, wobei Maschinen gemäß dem Stand der Technik genutzt werden. Durch einzelne Versuchsreihen und eine umfangreiche statistische Versuchsplanung und Versuchsdurchführung soll ein Brennstoff mit qualitativ hochwertigen und normkonformen Pelleteigenschaften bei geringem Energieaufwand erzeugt werden. Als Qualitätsmerkmale sind vor allem hohe Abriebfestigkeiten und hohe Schüttdichten zu erzielen.

Um den Verdichtungsprozess mit Matrizenpressen besser verstehen zu können, werden umfangreiche Untersuchungen am Einzelpresskanal mit den Reststoffen durchgeführt. Dabei spielen vorrangig Parameter wie Verdichtungstemperatur, Wassergehalt und Partikelgröße des Rohstoffes sowie Inhaltsstoffe eine wichtige Rolle. Anhand von ausgewählten Nachweismöglichkeiten soll ein Beitrag zur Wirkung relevanter Bindemechanismen erarbeitet werden.

Die Verknüpfung der Herstellung von normkonformen Brennstoffpellets und der Untersuchung der Wirkung von Bindemechanismen in Pellets ist schematisch in Abb. 1.1 zusammengefasst.

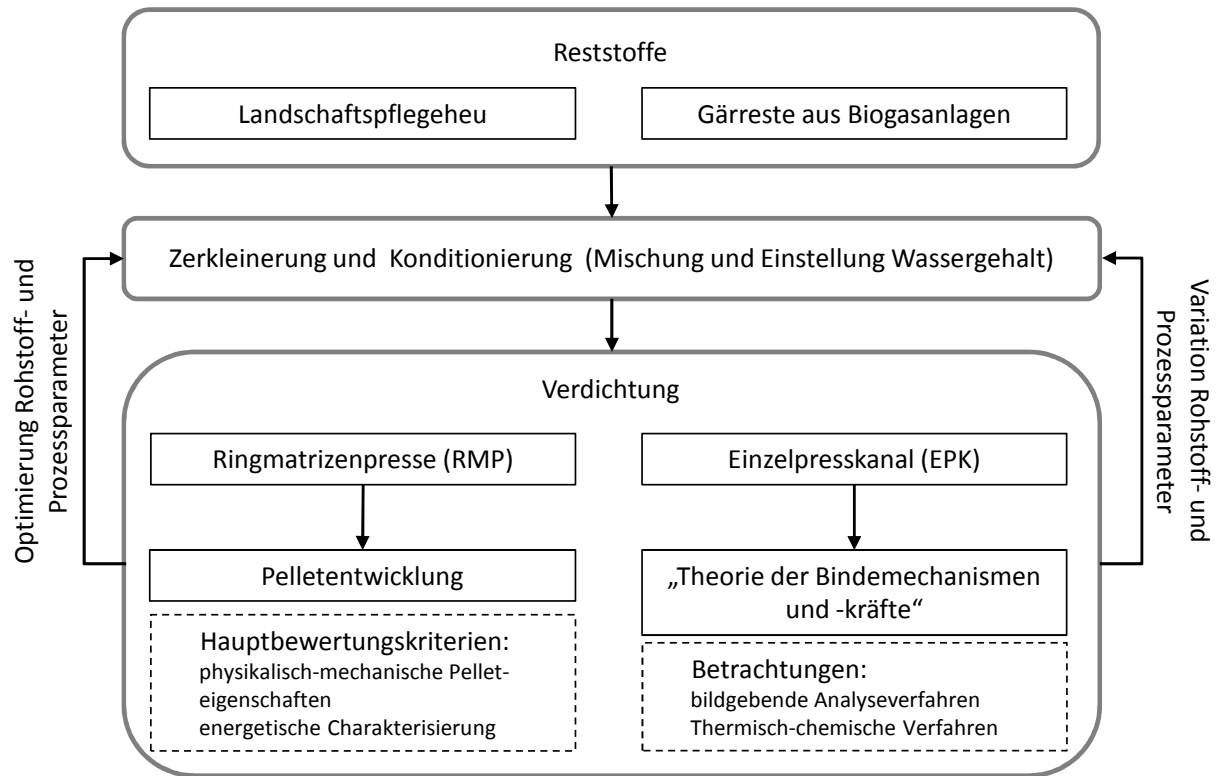


Abb. 1.1: Fließbild zur Aufgabenstellung

2 Grundlagen der Agglomerationstechnik

2.1 Bindekräfte und Bindemechanismen

Je nach Ausgangsmaterial und Agglomerationsprozess sind unterschiedliche Bindemechanismen und Bindekräfte für den Zusammenhalt der einzelnen Partikel und Fasern verantwortlich. Durch das Etablieren eines optimalen Faser- bzw. Partikelverbundes im Agglomerat, werden die geforderten physikalisch-mechanischen Eigenschaften erzeugt. Beim Zusammenhalt von feinen Partikeln bzw. Fasern zu Agglomeraten treten die in Abb. 2.1 dargestellten Bindemechanismen bzw. -kräfte auf, wobei diese erstmals 1958 [63] systematisiert wurden und bis heute Anwendung finden.

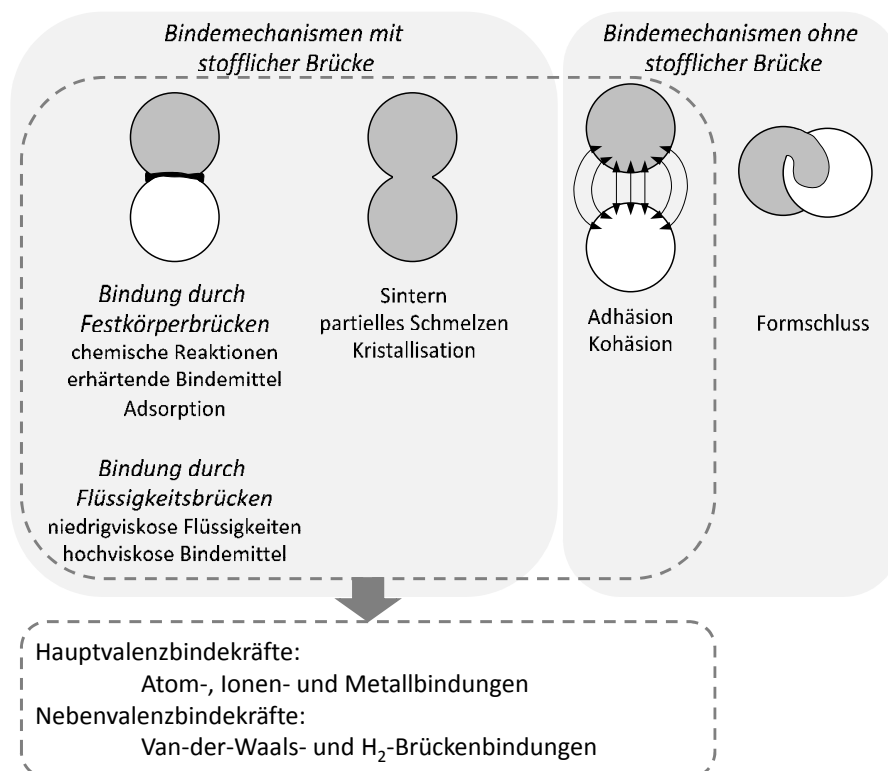


Abb. 2.1: Auftretende Bindemechanismen und -kräfte bei der Agglomeration [63]

Die Grundlagen der Bindemechanismen werden durch HEINZE [30], PIETSCH [57] und SCHUBERT [66] umfangreich beschrieben und im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

Festkörperbrücken

Festkörperbrücken können im Agglomerat durch Sinterung, Schmelzhaftung, chemische Reaktionen, erhärtende Bindemittel oder Kristallisation gelöster Stoffe durch Trocknung hervorgerufen werden. Bindemittel können einerseits Bestandteil des zu agglomerierenden Stoffes (z.B. Lignin, Protein oder Stärke) und andererseits extra Zuschlagsstoffe, wie Melasse, Paraffine, Protein, Stärke, Zellstoff oder Sulfitablauge, sein. Durch Temperaturerhöhung des Partikelverbandes auf etwa zwei Drittel der Schmelztemperatur werden Atome und Moleküle so angeregt, dass Diffusionsvorgänge an den Kontaktstellen der Partikel entstehen. Dies führt zur Bildung von Sinterbrücken. Die für diesen Effekt benötigte Wärme kann zum einen durch externe Materialerwärmung und zum anderen durch Reibungsarbeit zugeführt werden. Bei weiterer Temperaturerhöhung schmilzt der Stoff und bildet zunächst Flüssigkeitsbrücken (Schmelzen) aus, die sich beim Auskühlen zu Festkörperbrücken wandeln. Wenn Flüssigkeitsbrücken austrocknen, kristallisieren die gelösten Stoffe und bilden Festkörperbrücken. Je höher die Trocknungsgeschwindigkeit, desto beständiger sind die Bindungen, was von größeren Partikeln eher begünstigt wird. Festkörperbrücken können sich auch durch chemische Reaktionen ausbilden. Typisch hierfür ist die Verkleisterung von Stärke - dem Zusammenspiel von Polysacchariden und Wasser unter Temperatureinwirkung. Stärke kann zum einen natürlich im Rohstoff vorliegen und zum anderen als Zusätze dem Agglomerationsprozess zugeführt werden. Unterschiedliche Stärken weisen dabei variierende Verkleisterungstemperaturen auf: Weizenstärke 65°C , Maisstärke 80°C und Kartoffelstärke 90°C [35].

Adhäsion zwischen Partikeln

Elektrostatische, magnetische oder Van-der-Waals-Kräfte sind Anziehungskräfte zwischen fein zerkleinerten Partikel ohne stoffliche Verbindung. Allerdings sind bei der Pressagglomeration (Fokus der Arbeit) lediglich die Van-der-Waals-Kräfte von Bedeutung. Durch Dipol-Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen benachbarter Partikeloberflächen wirken diese nur mit geringen Reichweiten ($< 100\text{ nm}$) zwischen sehr kleinen Partikeln. Dabei müssen die Partikeldurchmesser deutlich unter 100 nm liegen, um dauerhafte Bindungen erzeugen zu können.

Adhäsion zwischen freibeweglichen Flüssigkeiten

Ein typisches Beispiel für eine freibewegliche Flüssigkeit ist Wasser. Bei geringen Mengen bilden sich zunächst einzelne, nicht miteinander verbundene Brücken, die durch Kapillarkräfte zusammengehalten werden. Nimmt der Flüssigkeitsanteil zu, schließen sich Porenzwischenräume, der Partikel wird umschlossen und aufgrund des kapillaren Unterdrucks und der Oberflächenspannung zusammengehalten. Für jedes Agglomerat existiert ein optimaler Flüssigkeitsbedarf, da mit weiter zunehmendem Flüssigkeitsanteil die statische Festigkeit abnimmt.

Adhäsion zwischen nicht freibeweglichen Flüssigkeiten

Stärkere Bindungen können durch Zugabe von zähflüssigen, nicht freibeweglichen Zusätzen (z.B. Melasse als Bindemittel) generiert werden. Durch eine hohe Viskosität wirken neben Adhäsions- zusätzlich Kohäsionskräfte.

Formschlüssige Bindungen

Formschlüssige Bindungen können je nach Partikelstruktur durch Verhaken, Verfilzen, Umschlingen und vergleichbaren Mechanismen infolge von Druck- und/oder Temperatureinfluss entstehen.

2.2 Agglomerationsverfahren

2.2.1 Allgemeines zu Agglomerationsverfahren

Basierend auf den Bindemechanismen und -kräften lassen sich Agglomerationsprozesse entsprechend Abb. 2.2 in drei Gruppen einteilen.

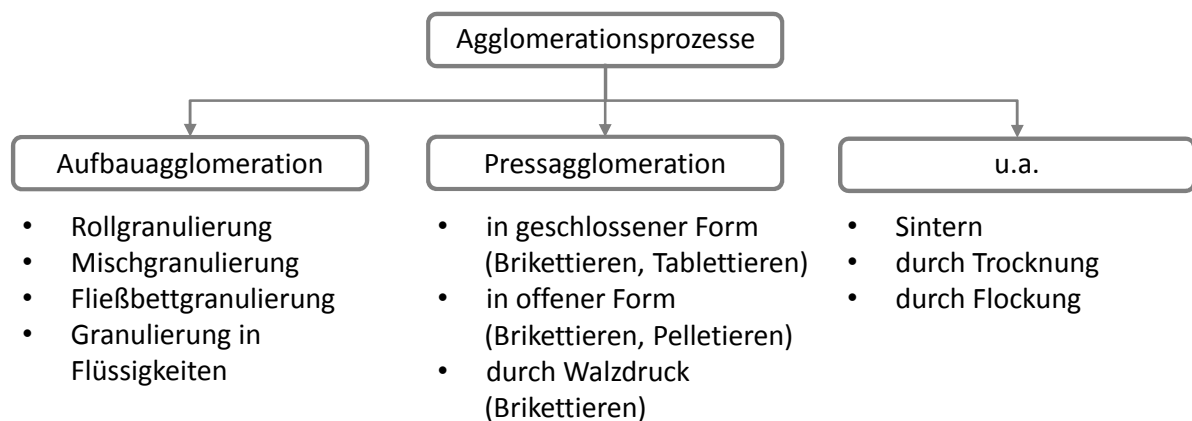


Abb. 2.2: Einteilung der Agglomerationsprozesse [57], [66]

Im Fokus der Arbeit steht die Pressagglomeration mit dem Ziel, die folgenden gewünschten Produkteigenschaften zu erreichen [30], [57]:

- hohe Festigkeiten, geringer Abrieb und staubfrei,
- hohe Energie- und Schüttdichten,
- Formstabilität und Größe,
- Lagerstabilität und Wasserbeständigkeit,
- hohe Dichten und niedrige Porosität,
- gute Dosier- und Fließeigenschaften,
- Homogenität und keine Entmischungsgefahr von verschiedenen Komponenten im Agglomerat.

Zur Aktivierung von Bindemechanismen und -kräften und somit dem Erreichen optimaler, physikalisch-mechanischer Produkteigenschaften sind Druckkräfte im Bereich von 10- 1000 *MPa* [66] in Verbindung mit hohen spezifischen Energieeinträgen erforderlich. Diese liegen bei der Brikettierung in Bereichen von 2- 20 *kWh/t* und bei der Pelletierung bei 6- 80 *kWh/t* [30]. Entsprechend dem zu erwartenden Energiebedarf in Verbindung mit steigenden Stromkosten stellt die Optimierung von Rohstoff- und Prozessparametern ein ökonomisches Einsparpotenzial dar. Des Weiteren gilt es, Verschleißerscheinungen und -kosten durch optimale Parameterkombinationen zu reduzieren.

2.2.2 Pelletierung als Agglomerationsprozess

Die Pelletierung, auch als Strangpressverfahren bezeichnet, zählt zur Pressagglomeration im mittleren Druckbereichen von 210 bis 450 *MPa* [55]. Grundsätzlich erfolgt der Pressvorgang mit Hilfe von gelochten Matrizen (Pressform) und Kollern (Pressrollen, üblicherweise 2- 3 Stück). Durch die Gestaltung der Matrize als flache Scheibe (Flachmatrize) oder als Ring (Ringmatrize) wird der Pressentyp definiert. Die Matrize der Flachmatrizenpresse (FMP) ist horizontal gelagert und zumeist mit rotierenden Kollern ausgestattet. Dagegen ist die Matrize der Ringmatrizenpresse (RMP) meistens vertikal angeordnet. Die Koller laufen durch die Rotation der Matrize auf der Ringinnenseite. Matrizenpressen sind Stand der Technik bei der Herstellung von Holzpellets [56] sowie von Futter- und Einsteupellets [36].

Unabhängig von der Anordnung von Matrize und Koller zeigt Abb. 2.3 den Verdichtungsprozess des Rohstoffs zu Pellets - dem Produkt. Das Material wird in den Pressenraum gespeist. Durch das Überrollen der Koller über die Matrizenoberfläche entsteht ein Materialteppich, der schubweise durch die Bohrungen der Matrize (Presskanal) ge-

presst wird. Nach Austritt der Presslinge (Pellets) werden diese auf die gewünschte Länge gekürzt.

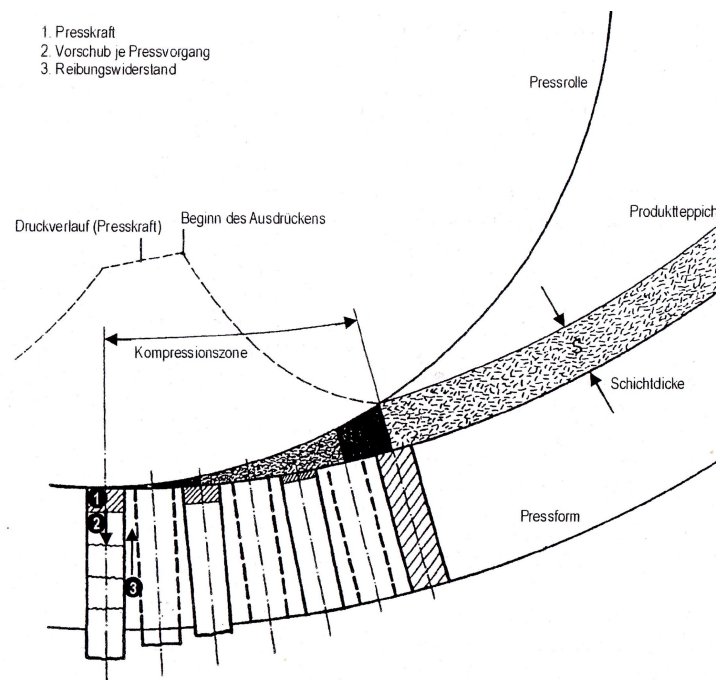


Abb. 2.3: Schematische Darstellung des Pressvorgangs in Matrizenpressen [36]

2.2.3 Herstellung von Biomassepellets

Die Herstellung von Biomassepellets umfasst mehrere Teilschritte, welche als Fließbild in Abb. 2.4 dargestellt sind. Je nach Rohstoff sind die wesentlichen Hauptverfahrensschritte: Vorzerkleinerung (bei Bedarf), Trocknung (bei Bedarf), Zerkleinerung, Konditionierung, Pelletierung, Kühlung, Sieben und Lagerung. Vor der Vermarktung und Lieferung zum Endkunden wird der Feinanteil der Pellets i.d.R. nochmals abgesiebt, um die Qualitätsanforderungen einzuhalten.

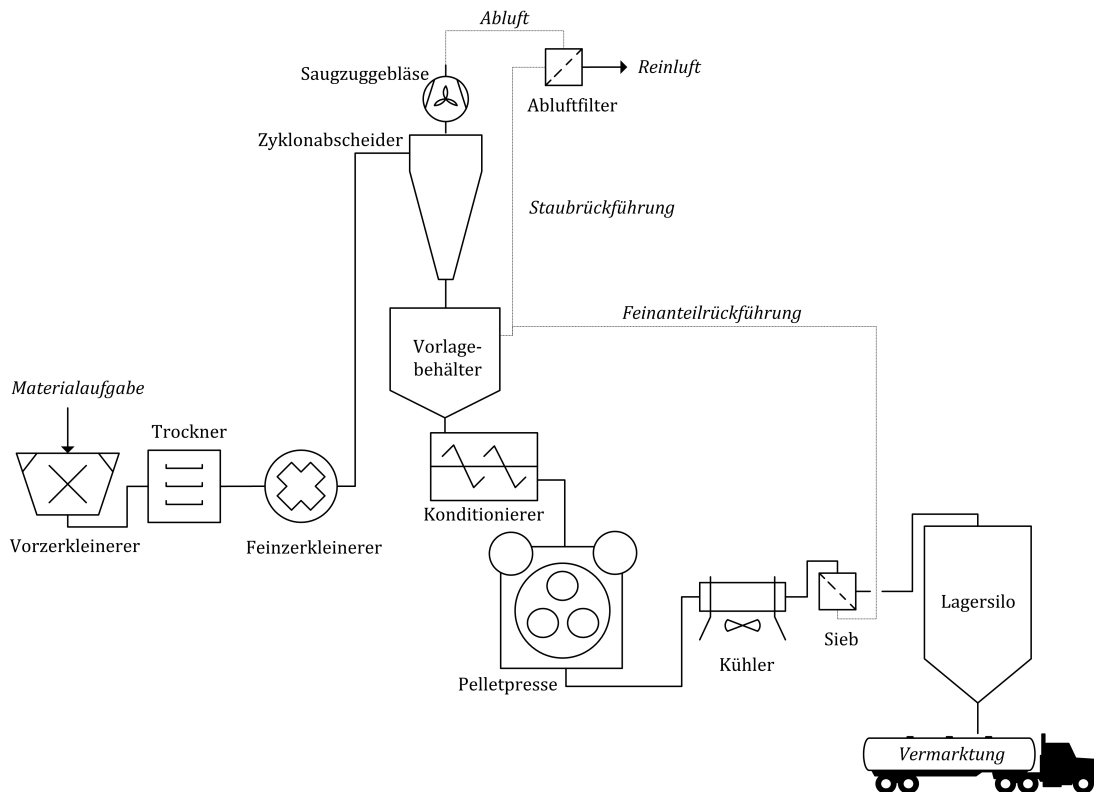


Abb. 2.4: Fließbild zur Herstellung von Biomassepellets [59]

Der Vorteil der Pelletierung ist das Erzielen reproduzierbar qualitativ hochwertiger Produkteigenschaften. Allerdings birgt der komplexe Herstellungsprozess einen deutlichen Nachteil beim Energieaufwand und den Kosten. Die höheren Produktionskosten der Pellets stehen den höheren Transport- und Lagerkosten sowie höheren Anlagenkosten bei gleichem Energieinput der Konversionsanlage bei unverdichteten oder nur teilverdichteten Materialien (Hackschnitzel oder Ballen) gegenüber [35]. Abb. 2.5 zeigt die prozentuale Verteilung der spezifischen Pelletproduktionskosten am Beispiel der Verarbeitung von nassen Sägespänen als Rohmaterial. Aus der Darstellung geht deutlich hervor, dass die größeren Kostenpositionen die Materialbeschaffung mit knapp 43 % sowie die Materialtrocknung mit rund 35 % sind. Gleichzeitig bedarf die Pelletproduktion aus nassen Sägespänen einen spezifischen Energieaufwand von $1.315 \text{ kWh}/t_P$ ($115 \text{ kWh}_{el}/t_P$ und $1.200 \text{ kWh}_{th}/t_P$) [56]. Davon entfallen etwa 93 % auf die Trocknung, 1,4 % auf die Zerkleinerung, 3,9 % auf die Pelletierung, 0,2 % auf die Kühlung und 1,4 % stellt den Peripherieanteil dar [56]. Entfällt die Trocknung, reduziert sich der spezifische Energiebedarf des gesamten Prozesses auf $91 \text{ kWh}_{el}/t_P$, wobei der Pelletievorgang dann mit etwa 56 % den größten Anteil am Prozess darstellt. Grundsätzlich werden 3-10 % des Energiegehaltes der Biomasse zur Pelletproduktion benötigt (ohne Trocknung) [76].

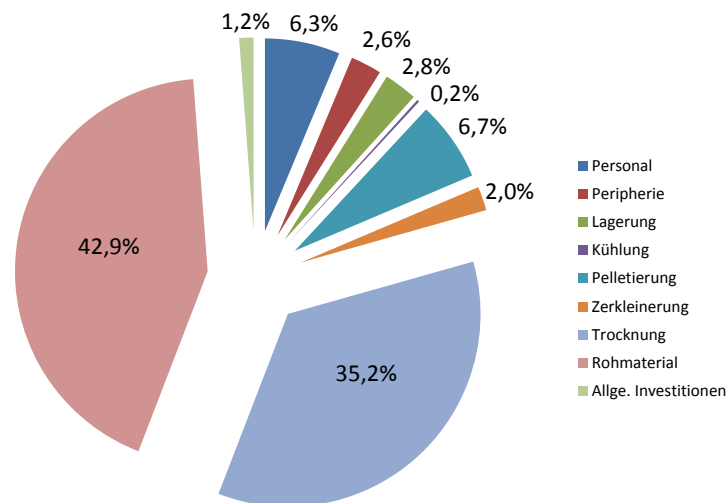


Abb. 2.5: Spezifische Pelletproduktionskosten unterteilt nach den einzelnen Prozessschritten bei Verwertung von nassen Sägespänen als Rohmaterial [56]

Vorzerkleinerung

Die Vorzerkleinerung erfolgt oft in Vorprozessen, in denen die Späne bzw. Holzhackschnitzel als Nebenprodukt anfallen (holzverarbeitende Gewerke). Beim Einsatz von Schadholz als Stammholz ist eine zusätzliche Vorzerkleinerung notwendig. Dies erfolgt zumeist durch Spalt-, Hack- und Schreddersysteme. Für halmgutartige Rohstoffe in Ballenformat sind hingegen Ballenauflöser erforderlich, um eine Grobzerkleinerung zu ermöglichen.

Trocknung

Der Wassergehalt des Rohmaterials hat eine wichtige Bedeutung für die Lagerprozesse und bei der Verdichtung zu Pellets. Für holzartige Reststoffe, wie Sägespäne, Hackschnitzel oder Waldrestholz, sind Wassergehalte von 35 - 45 *Ma.-%* üblich. Der Zielwassergehalt für die Pelletierung liegt bei 10 - 14 *Ma.-%* [35]. Zum Erreichen dieser Werte ist oftmals eine energie- und kostenintensive Trocknung erforderlich, wie am Beispiel der Verarbeitung von nassen Sägespänen aus Abb. 2.5 hervorgeht. Dieser Kostenfaktor kann deutlich reduziert werden, indem anfallende Abwärme, z.B. aus BHKWs an Biogasanlagen, zur Trocknung genutzt wird. Werden bereits trockene hochwertige Rohstoffe, wie Hobelspäne, zur Herstellung von Holzpellets verwendet, erhöht sich der Anteil des Rohmaterials am Gesamtpreis deutlich von 43 auf 73 % [56]. Dies entspricht einer Erhöhung der Rohmaterialkosten von rund 59 auf 100 €/t_{FM}. Einen Kostenvorteil bietet daher die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen (z.B. Stroh, Landschaftspflegematerial, industrielle Reststoffe aus der Lebensmittelproduktion, Reststoffe aus der Biogasanlage u.a.), die zumeist günstige

Preise aufweisen. Die meisten halmgutartigen Reststoffe wie Stroh oder Landschaftspflegeheu besitzen außerdem durch die natürliche Trocknung auf dem Feld Wassergehalte von 10-20 *Ma*-% [56].

Die Trocknung kann direkt, indem heiße Gase auf das Gut strömen, oder indirekt über Wärmetauscher erfolgen. Üblicherweise finden Band- oder Trommeltrockner Anwendung. Bandtrockner arbeiten im niedrigen Temperaturniveau von 75-110 °C - das Material wird schonend, aber zeitintensiv getrocknet [35]. Trommeltrockner werden hingegen bei Temperaturen von bis zu 600 °C betrieben. Durch die schnelle Materialtrocknung wird dieser Trocknertyp bei der Wassergehaltsreduzierung von Sägenebenprodukten favorisiert [35].

Zerkleinerung

Für die Zerkleinerung auf ein pelletierfähiges Material, auch als Feinzerkleinerung bezeichnet, werden zumeist Hammermühlen eingesetzt, wobei die empfohlene Partikelgröße möglichst den Pelletdurchmesser nicht überschreiten sollte. Für Standardpellets von 6 mm im Durchmesser wird eine Sollpartikelgröße von 4 mm empfohlen [56]. Die Feinzerkleinerung hat dabei folgende Ziele [31]:

- Erhöhung der Feinheit, d.h. abnehmende Partikelgröße und Oberflächenvergrößerung,
- Verbesserung der Partikelgrößen- und Partikelformverteilung,
- Aufschluss und Freisetzen natürlicher Bindemittel wie Lignin, Stärke und Proteine,
- Erhöhung des energetischen Zustandes durch mechanische Aktivierung.

Konditionierung

Die Konditionierung dient hauptsächlich der Homogenisierung sowie der Einstellung des optimalen Wassergehaltes für die anschließende Pelletierung. Die Wasserzugabe kann in Form von flüssigem Wasser oder Dampf erfolgen, mit dem Ziel Bindemechanismen im Rohstoff anzuregen und Haftmechanismen zu verbessern. Durch eine Dampfzugabe erhöht sich zusätzlich die Rohmaterialtemperatur, Reibungskräfte während der Verdichtung werden reduziert und der spezifische Energiebedarf der Pelletierung sinkt [36]. Eine wichtige Einflussgröße der Konditionierung ist die Verweilzeit. Die Kurzzeitkonditionierung hat eine Verweilzeit von 10-20 s unmittelbar vor der Pelletierung [36], wobei der Rohstoff maximal 2 *Ma*-% Wasser aufnehmen kann. Während einer Langzeitkonditionierung liegt die Verweilzeit bei 10-20 min [56]. Durch Reifung kann mehr Wasser in und auf das Material gebracht werden. Weiterhin können während dem Prozessschritt Zuschlagsstoffe

zugeführt und in der Schüttung homogen verteilt werden. Dazu zählen zum einen Additive, die im Allgemeinen das Verbrennungsverhalten, und zum anderen Bindemittel, die die Pelletqualität positiv beeinflussen können. Auch bietet sich die Möglichkeit, verschiedene Rohmaterialien homogen miteinander zu mischen.

Für die Konditionierung werden überwiegend liegende Paddelmischer konzipiert und als Durchlaufmischer eingesetzt. Dabei entscheidet die Dimensionierung des Mixers über die Verweilzeit des Materials. Ist eine länger Reifezeit erforderlich sind Zwischenbunker einzuplanen. [56]

Pelletierung

Der Prozessschritt Pelletierung wurde bereits im Kapitel 2.2.2 erläutert. Die Kosten der Pelletierung sind nach dem Rohmaterial und der Trocknung der größte Einflussfaktor (6,7 % gemäß Abb. 2.5). Bei Verwendung trockener Hobelspäne (Trocknung als Prozessschritt entfällt) steigt dieser Wert auf 9,0 % [56]. Bei der Produktion von Halmgutpellets steigen die Pelletierkosten aufgrund des zusätzlichen Verschleißes durch die Verdichtung von aschereichen Rohstoffen. Allerdings entfallen die hohen Trocknungskosten.

Die wichtigsten Kenngrößen der Pelletierung sind das Pressverhältnis (Durchmesser zu Länge des Presskanals), der Koller/Matrizen-Abstand (Spalt zwischen Koller und Matrizie) und die Anzahl der Bohrungen je Matrizenfläche und damit die zur Verfügung stehende offene Lochfläche. Das Pressverhältnis sollte bei holzartigen Rohstoffen zwischen 1:3 bis 1:5 liegen. Bei Halmgütern wird oftmals ein längerer Presskanal verwendet. Die Anzahl der Bohrungen und die offene Lochfläche wirken direkt auf die Antriebsleistung und den damit verbundenen Durchsatz der Presse aus. Wichtig ist dabei eine kontinuierlich Speisung der Presse. [56]

Kühlen, Sieben und Lagern

Die Pellets verlassen die Presse mit Temperaturen teils über 100°C [56]. Um einem Qualitätsverlust entgegenzusteuern, ist eine schnellstmögliche Kühlung auf maximal 5 K über Umgebungstemperatur erforderlich [21]. Hierfür kommen häufig Gegenstrom- oder Bandkühler zum Einsatz. Anschließend wird der produktionsbedingte Feinanteil mittels Siebung abgetrennt und ggf. in den Verarbeitungsprozess zurückgeführt. Die Pellets werden in 15 kg -Säcken abgepackt oder in Silos bzw. Hallen trocken gelagert.

2.3 Einflussgrößen auf die Pelletqualität

Qualitativ hochwertige Biomassepellets definieren sich u. a. über standardisierte physikalisch-mechanische Eigenschaften, welche einen störungsfreien Betrieb in Konversionsanlagen sicherstellen können. Die Mindestanforderungen der Pelleteigenschaften sind entsprechend der ISO 17225-2 [19] für holzartige und der ISO 17225-6 [20] für nicht-holzartige Biomassepellets normiert und in Tab. 2.1 zusammengefasst. Da vor allem die mechanische Festigkeit, auch als Abriebfestigkeit bezeichnet, sowie die Schüttdichte durch den Pelletierprozess stark beeinflusst werden, gelten diese Eigenschaften als wichtigste Qualitätsparameter. Pelleteigenschaften wie Länge, Durchmesser, Feingut und Wassergehalt können im Zweifel durch nachgeschaltete Prozesse, wie Sortierung, Siebung oder Trocknung, positiv beeinflusst werden.

Tab. 2.1: Relevante Qualitätsanforderungen entsprechend der ISO 17225-2 [19] für holzartige und der ISO 17225-6 [20] für nicht-holzartige Biomassepellets

Eigenschaftsklasse/ Bestimmungsverfahren	Einheit	holzartige Pellets			nicht-holzartige Pellets	
		A1	A2	B	A	B
Mechanische Festigkeit DU DIN EN 15210-1 [17]	$Ma.-%$	$DU97.5 \geq 97,5$			$DU97.5 \geq 97,5$	$DU96.0 \geq 96,0$
Durchmesser D , Länge L DIN EN 16127 [18]	mm	$D06,6 \pm 1; 3,15 \leq L \leq 40,0$ $D08,8 \pm 1; 3,15 \leq L \leq 40,0$			$D06$ bis $D25$, $D \pm 1$; $3,15 \leq L \leq 40,0$ (von $D06$ bis $D10$) $3,15 \leq L \leq 50,0$ (von $D12$ bis $D25$)	
Wassergehalt w DIN EN 14774-1 [12], DIN EN 14774-2 [13]	$Ma.-%$	$w10 \leq 10,0$			$w12 \leq 12,0$	$w15 \leq 15,0$
Feingut F DIN EN 15210-1 [17]	$Ma.-%$	$F1.0 \leq 1,0$			$F2.0 \leq 2,0$	$F3.0 \leq 3,0$
Schüttdichte BD DIN EN 15103 [14]	kg/m^3	$BD600 \leq 600$			$BD600 \leq 600$	

Die Einflussnahme auf die Pelletqualität kann sowohl technischer als auch rohstoffseitiger Natur sein - sogenannte Prozess- und Rohstoffparameter, welche in den folgenden Abschnitten näher betrachtet werden. Abb. 2.6 zeigt eine umfangreiche Zusammenstellung aller Einflussgrößen auf das Verdichtungsverhalten, das Auslösen von Bindemechanismen und -kräfte und somit auf die Pelletqualität. Beide Parametergruppen verfolgen das Ziel, Bindemechanismen im Pellet hervorzurufen, um hochwertige physikalisch-mechanische Eigenschaften zu erhalten. Diese Eigenschaften werden nur durch eine, für den jeweiligen Rohstoff, optimale Parameterkombination erreicht. Die wichtigsten Einflüsse der Rohstoff- und Prozessparameter werden nachfolgend anhand wissenschaftlicher Publikationen beleuchtet.

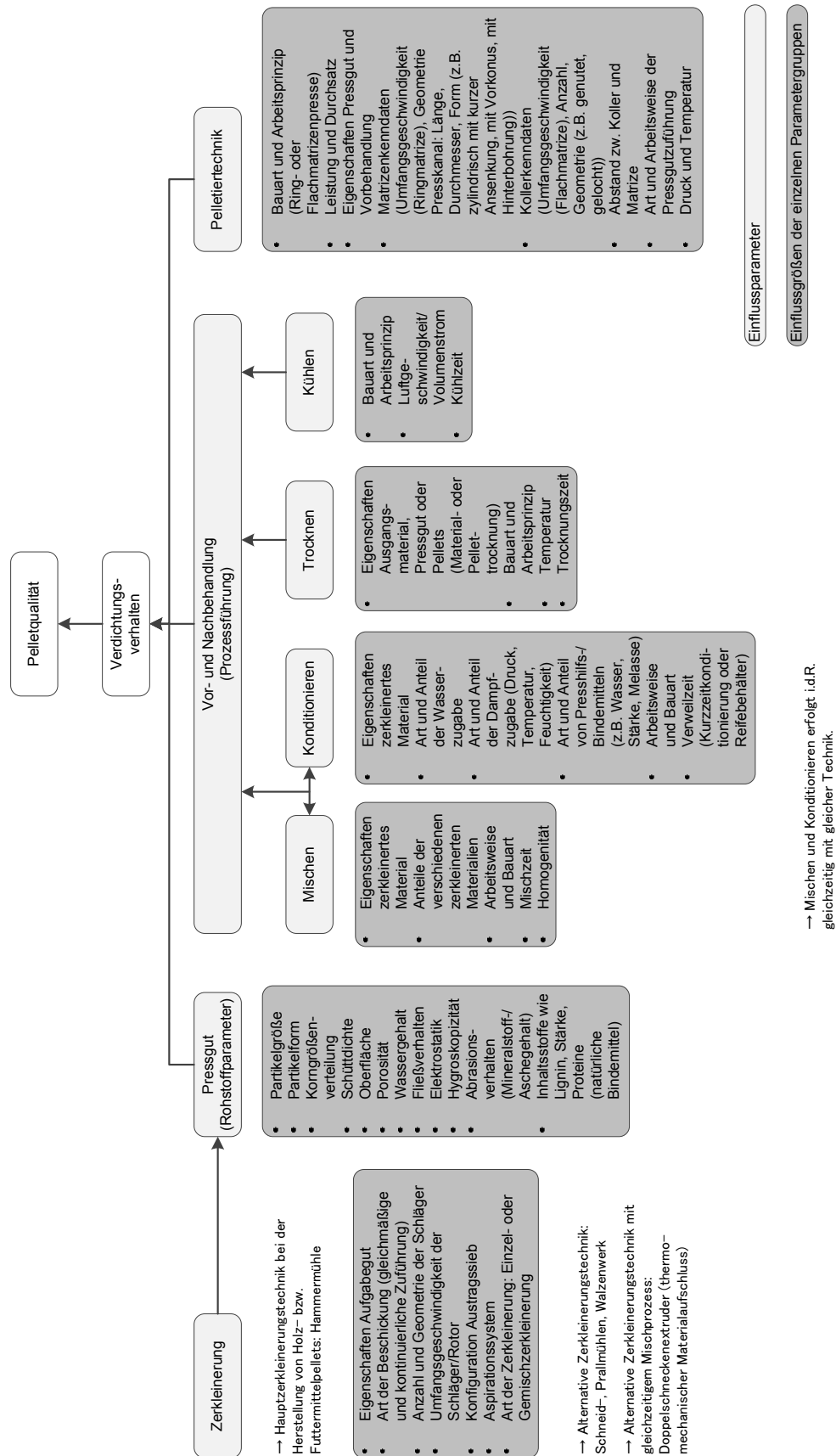


Abb. 2.6: Zusammenstellung wesentlicher Einflussgrößen auf die Pelletqualität [36]

2.3.1 Rohstoffliche Einflussparameter

Rohstoffparameter beinhalten zwei Gruppen: zum einen diejenigen rein rohstofflicher Natur, wie chemische Zusammensetzung und Inhaltsstoffe, die die Funktion natürlicher Bindemittel aufweisen (z.B. Lignin, Extraktstoffe wie Proteine, Fette, Stärke und Harze). Zum anderen gibt es Parametergruppen, die durch technische Prozesse, wie Zerkleinern und Konditionieren, beeinflusst werden. Dazu zählen folgende Eigenschaften: Partikelgröße, -form, -verteilung, Schüttdichte, Oberfläche, Porosität und Wassergehalt. Nachfolgend wird beschrieben, welche Kennwerte variiert werden können, um Qualitätsverbesserungen zu erzielen. Aus Sicht der aktuellen Forschung wird das bekannte Wissen diskutiert.

Biomasse besteht im Wesentlichen aus organischen Verbindungen mit Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff. Molekular betrachtet bilden Zellulose, Hemizellulose und Lignin die Grundstruktur. Bei holzigen Biomassen liegt der Anteil dieser Struktur bei etwa 95 %. Die verbleibenden 5 % sind anorganische Bestandteile und Extraktstoffe [35]. Nicht-holzartige Rohstoffe weisen dagegen einen verminderten Ligningehalt auf. Dafür erhöht sich der Anteil an Extraktstoffen und Asche. Tab. 2.2 zeigt zur Orientierung die chemische Zusammensetzung ausgewählter holz- und nicht-holzartiger Biomassen.

Tab. 2.2: Chemische Zusammensetzung ausgewählter Biomassen [4]

Material	Zellulose	Hemizellulose	Lignin <i>Ma.-%, wf</i>	Extraktstoffe	Proteine	Asche
<i>holzartige Biomassen</i>						
Kiefer	23,56	44,16	28,46	6,00	0,52	0,96
Eukalyptus	19,15	34,33	30,31	6,85	1,15	2,83
Eiche	21,94	36,44	24,44	5,32	2,91	3,10
Pappel 1	20,33	42,65	25,19	4,62	0,93	2,79
Pappel 2	20,81	37,62	27,48	5,17	2,96	1,73
Rebschnitt	19,66	32,38	24,87	9,24	2,05	4,11
<i>nicht-holzartige Biomassen</i>						
Haferspelzen	24,53	26,86	10,59	30,87	5,74	6,12
Triticale	20,86	34,75	11,07	28,39	4,95	6,88
Reisstroh	24,08	37,09	13,82	13,98	3,88	12,35

Pappel 1 und 2 unterscheiden sich im Standort.

Die Inhaltsstoffe der einzelnen Biomassen können nur bedingt addiert werden, da z.B. Extraktstoffe u.a. Proteine enthalten und somit doppelt gewertet werden würden. Weiterhin wurden nicht alle Komponenten analysiert - z.B. Pektine fehlen.

Lignin

Lignin verleiht Pflanzen ihre notwendige Stabilität und Festigkeit. Es ist ein schwer abbaubares Biopolymer, was nur durch Pilze mineralisiert werden kann. Zudem findet kaum ein anaerober Abbau in Biogasanlagen statt [35].

Bei der Verdichtung von Biomasse spielt Lignin mit seinem thermoplastischen Verhalten, vor allem bei holzartigen Materialien aufgrund des hohen Anteils, eine wichtige Rolle. Ein erhöhter Ligningehalt führt i.d.R. zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit

der Pellets. Durch thermische Aktivierung erweicht das Lignin und wirkt wie eine Art Klebstoff, verbindet die einzelnen Biomassepartikel miteinander und trägt somit zur Bildung von Festkörperbrücken bei. Wobei der Erweichungspunkt entsprechend Abb. 2.7 neben temperatur- auch wassergehaltsabhängig ist.

Im Presskanal können in Abhängigkeit des Materials und der entstehenden Reibungseffekte Temperaturen von 90 [69] bis 130 °C [35] entstehen. Lignin erweicht bei Temperaturen von 85-110 °C (bei w 15 Ma.-%) [64], [80]. Partielle Schmelzen können bereits ab Temperaturen von 75 °C [27] auftreten.

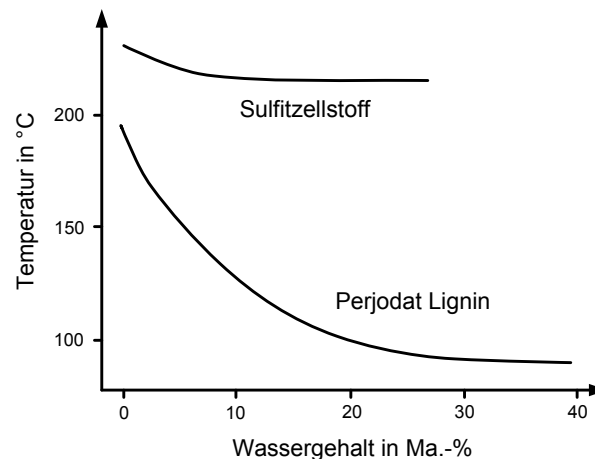


Abb. 2.7: Temperatur- und Wassergehaltsabhängigkeit der Erweichung von Lignin [80]

LEHTIKANGAS [47] hat einen Zusammenhang zwischen erhöhter Abriebfestigkeit der Pellets bei steigendem Ligningehalt holziger Biomassen dargestellt. LEE ET AL. [44] bestätigt diese Ergebnisse - bei der Pelletierung von Lärchenholz (Ligningehalt 31,6 Ma.-%, wf) konnten unter vergleichbaren Prozessbedingungen höhere Abriebfestigkeiten im Vergleich zum Holz des Tulpenbaumes (Ligningehalt 22,3 Ma.-%, wf) erreicht werden. REM-Aufnahmen zeigen dabei deutlich eine bessere Verteilung von Lignin im Pellet bei zunehmender Pressdauer und -temperatur. Auch CASTELLANO ET AL. [4] untersuchte neun verschiedene Rohstoffe und konnte die besten Pelletqualitäten bei hohen Ligningehalten erzielen. Demzufolge ist der Ligningehalt ein wichtiger, aber offensichtlich nicht der einzige Einflussparameter. STELTE ET AL. [73] zeigte unter gleichbleibenden Bedingungen, dass Buchenpellets (Ligningehalt 19,3 Ma.-%, wf) höhere Druckfestigkeiten als Fichtenpellets (Ligningehalt 21,6 Ma.-%, wf) aufweisen. Die Untersuchungen fanden im EPK statt, wobei aufgrund der Mindermengen an erzeugten Pellets keine Abriebfestigkeit ermittelt werden konnte.

Extraktstoffe

Extraktstoffe sind u.a. Fette, Proteine, Stärke, Wachse und Harze, welche die Pelletqualität sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können. Ähnlich dem Lignin können einige dieser Inhaltsstoffe die Funktion eines natürlichen Bindemittels übernehmen. Zum einen können Extraktstoffe als Gleit- und Schmiermittel wirken und positiv den Durchsatz und Energieverbrauch der Pelletpresse beeinflussen. Zum anderen können sich diese, aufgrund ihrer teils wasserabweisenden Eigenschaft (z.B. Fette und Harze), negativ auf die Bindungen zwischen den einzelnen Partikeln auswirken und somit die Festigkeit der Pellets reduzieren [78].

NIELSEN ET AL. [55] bestätigt die Reduzierung der Pelletfestigkeit - aus extraktstoffärmeren Buchenholz konnten im Vergleich zu Waldkiefer stabilere Pellets erzeugt werden. Weiterhin untersuchte NIELSEN ET AL. [54] eine Reduzierung der Extraktstoffe durch Auswaschung mit Aceton von verschiedenen Hölzern. Je geringer der Anteil an Extraktstoffen war, desto bruchfester wurden die Pellets. Allerdings war mehr Energie für die Verdichtung der Holzspäne notwendig. Den Abbau der Extraktstoffe durch Lagerung untersuchte SAMUELSSON ET AL. [65]. Auch diese Forschergruppe bestätigte, dass mit abnehmendem Gehalt an Extraktstoffen härtere Pellets bei höherem Energieverbrauch erzeugt werden. CASTELLANO ET AL. [4] legt auf Basis seiner Untersuchungen zu holz- und nicht-holzartigen Rohstoffen einen Anteil an Extraktstoffen von 5-10 *Ma*-% als optimal in Bezug auf die Abriebfestigkeit fest.

Allerdings ist zu erwähnen, dass bei allen Untersuchungen, neben dem Anteil an Extraktstoffen, auch andere Rohstoffparameter betrachtet wurden (z.B. Zerkleinerungsgrad in Verbindung mit höherem Aufschluss und Verfügbarkeit der Inhaltsstoffe bei CASTELLANO ET AL. [4]). So gestaltet sich die Bewertung der Einflussnahme rein durch Extraktstoffe als schwierig.

Anorganische Bestandteile

Anorganische Bestandteile (Asche) sind relevant für die Verbrennung der Biomassen und die Bildung von Abgasemissionen. Ein direkter Einfluss auf den Verdichtungsprozess ist bisher nicht bekannt. Allerdings geht ein hoher Anteil an anorganischen Mineralien mit extremen Verschleißerscheinungen der angewandten Technik einher. Vor allem die Standzeiten der Pressorgane leiden unter hohen Aschegehalten. Entsprechend den Erfahrungen für Flachmatizenpressen [74] sind in Abb. 2.8 die durchschnittlichen Standzeiten für Koller und Matrice in Abhängigkeit des Aschegehaltes zusammengestellt. Neben dem Aschegehalt sind diese Angaben von vielen weiteren Randbedingungen abhängig. Generell spielt die Anlagengröße, die Betriebsart, die Häufigkeit der Aufarbeitung (z.B. Nachschleifen)

von Matrize und Koller sowie weitere Faktoren eine Rolle und können die genannten Standzeiten stark beeinflussen [74]. Abb. 2.9 und 2.10 zeigen exemplarisch Verschleißerscheinungen an Koller und Matrize der am DBFZ vorhandenen Ringmatrizenpresse, mit der regelmäßig aschereiche Rohstoffe pelletiert werden.

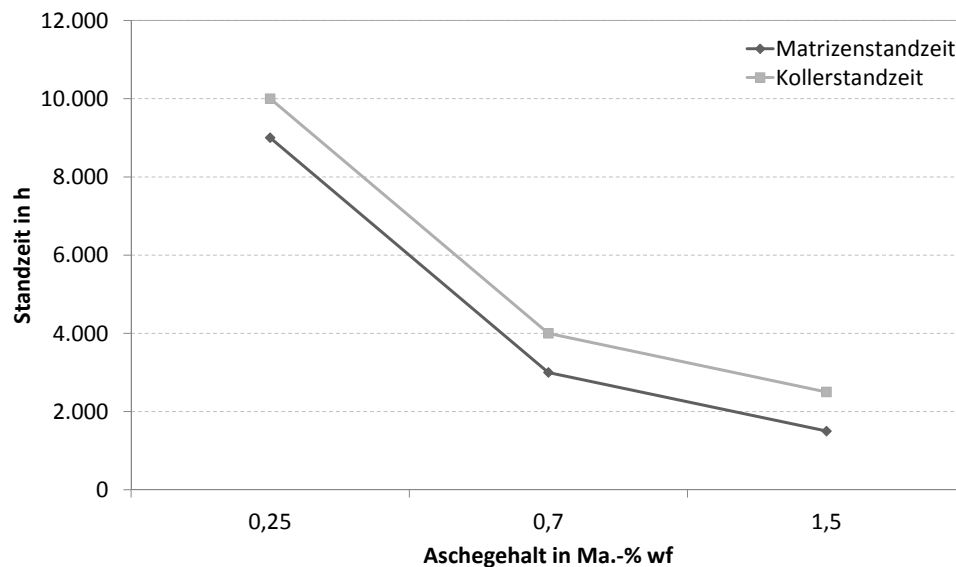


Abb. 2.8: Standzeiten von Koller und Matrize in Abhängigkeit des Ascheanteils in der zu verarbeitenden Biomasse [74]

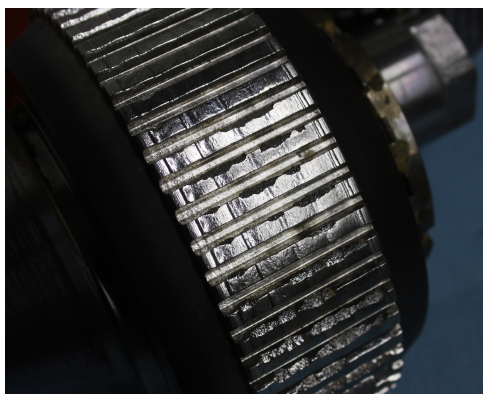


Abb. 2.9: Verschleißerscheinungen an einem geriffelten Koller - Ausbrüche (Riffelbreite der Koller 44 mm)



Abb. 2.10: Verschleißerscheinungen an einer Ringmatrize - eingeschliffene Kollerlaufläche (Durchmesser Matrizenbohrungen 6 mm, Breite der gelochten Laufläche 38 mm)

Wassergehalt

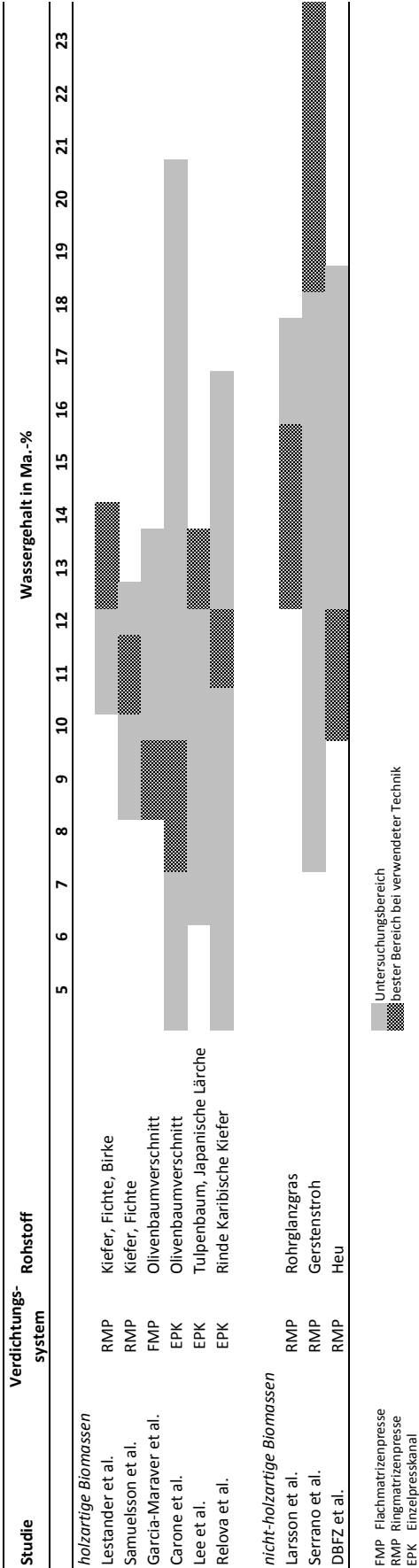
Der Wassergehalt ist ein sehr wichtiger Rohstoffparameter, da Wasser als natürliches Hilfsmittel bei der Verdichtung von biogenen Materialien gilt. Neben Schmier- und Gleiteigenschaften trägt Wasser essentiell zur Ausbildung von Bindemechanismen bei. Hierfür sind

folgende Effekte zu nennen: Verkleisterung der Stärke (natürlich im Rohstoff vorhanden oder als Bindemittel zugesetzt), Denaturierung der rohstoffeigenen Proteine, Herabsetzen der Erweichungstemperatur des Lignins und Ausbildung von H_2 -Brückenbindungen.

Die Wasserzugabe erfolgt im Konditionierprozess in Mischern, wobei Kurz- und Langzeitkonditionierungen unterschieden werden. Erfahrungsgemäß können bei einer Kurzzeitkonditionierung (Verweilzeit von 10 - 20 s vor Pelletierung [36]) biogene Materialien i.d.R. nur etwas 2 *Ma.*-% an Wasser aufnehmen. Dabei liegt es lediglich als Flüssigkeitsfilm an der Oberfläche der Partikel vor. Es gleicht Unebenheiten aus und minimiert vor allem Reibungseffekte im Presskanal [56]. Muss das Material mehr als 2 *Ma.*-% befeuchtet werden oder soll das Wasser tiefer in die Partikel eindringen, um für Bindemechanismen (Ausbildung von H_2 -Brücken oder Van-der-Waals-Kräfte) zur Verfügung zu stehen, ist eine Langzeitkonditionierung von 10 - 20 *min* erforderlich [56].

Der benötigte Wassergehalt, um qualitativ hochwertige Biomassepellets zu erzeugen, variiert je Rohstoff. Ein höherer Anteil an wasserlöslichen und -abhängigen Bindemitteln erfordert eine höhere Wassermenge zur Aktivierung dieser [34]. Tab. 2.3 zeigt einen Ausschnitt wissenschaftlicher Untersuchungen zum optimalen Wassergehaltsbereich unterschiedlicher Biomassen. Dabei wird deutlich, dass bei der Pelletierung von holzartigen Materialien der Wassergehalt entsprechend den Erfahrungswerten zwischen 8 und 14 *Ma.*-% [35], [56] liegt. Bei halmgutartigen Rohstoffen variiert der Wassergehalt je nach Material stärker.

Tab. 2.3: Untersuchungen zu Wassergehaltsvariationen unterschiedlicher Biomassen für die Pelletherstellung [3], [8], [26], [43], [44], [48], [61], [65], [69]



Aus den Studien in Tab. 2.3 geht deutlich hervor, dass der Wassergehalt der Parameter mit sehr großem Einfluss auf die Pelletqualität ist. Ein zu geringer Wassergehalt führt zwar zu hohen Schüttdichten, reduziert aber die Abriebfestigkeit bei erhöhtem Energieverbrauch [65]. Reduzierte Reibungskräfte mit der Folge sinkender Energiebedarfe durch höhere Wassergehalte sind sowohl für Halmgüter [8] als auch für Hölzer [55], [65] zu beobachten.

Eine weitere Möglichkeit der Wasserzugabe ist das Eindüsen von Wasserdampf während der Konditionierung oder direkt im Pelletierprozess. Die Dampfzugabe ist vergleichbar mit der Kurzzeitkonditionierung, bei der der Rohstoff maximal 2 *Ma.*-% aufnehmen kann. Allerdings bietet sie den Vorteil, dass durch gleichzeitige Vorwärmung und Befeuchtung natürliche Bindemittel angeregt werden [35]. Dabei wirkt sich der Dampf bei der Verdichtung von holzartigen [25], [65] und auch halmgutartigen [41], [43] Materialien positiv auf die Abriebfestigkeit, den Feinanteil und den spezifischen Energieverbrauch, aber negativ auf die Schüttdichte aus. Eine Erhöhung des Wassergehaltes bewirkt i.d.R. die gleichen Verbesserungen wie eine Dampfzugabe [41], [43]. Entsprechend ist eine Dampfzugabe zweckmäßig, wenn die Pressentemperaturen nicht ausreichend hoch für eine vollständige Aktivierung von Bindemechanismen sind oder die Erhöhung des Wassergehaltes nicht den gewünschten Effekt erzielt.

Partikelgröße

Jedes pelletierfähige Material besitzt im Abgleich zwischen geforderter Pelletqualität und Energieaufwand eine optimale Partikelgröße. Durch die größere Oberfläche von kleinen Partikel können mehr interpartikuläre Bindungen entstehen und mehr Wasser aufgenommen werden [78], sodass stabile Pellets hergestellt werden können. Im Gegensatz dazu benötigt die Verdichtung und auch die Herstellung (Zerkleinerung) der kleinen Partikel mehr Energie. Somit ist die benötigte Pelletqualität den Produktionskosten gegenüber zu stellen. In der Praxis der Holzpelleterzeugung werden oftmals kleine nahezu kugelhähnliche und größere eher faserähnliche Partikel miteinander vermischt, um optimale Eigenschaften bei möglichst geringem Energieeintag zu generieren.

Erfahrungsgemäß sollte die Partikelgröße unter dem Durchmesser der Matrizenlochbohrungen liegen. Eine Nachzerkleinerung zu großer Partikel zwischen Koller und Matrize, bevor das Material in die Matrize gedrückt wird, kann sich negativ auf die Energiebilanz des Herstellungsprozesses auswirken [35]. Des Weiteren bilden zu große Partikel potentielle Schwachstellen im Pellet, welche oftmals als Risse in Verbindung mit erhöhtem Bruchrisiko des Pellets einhergehen. Für die Herstellung von 6 *mm*-Holzpellets wird als Richtwert eine maximale Partikelgröße von 4 *mm* angegeben [56]. Auch ist eine breite Verteilung der Partikelgrößen vorteilhaft, sodass sich die unterschiedlich großen Partikel gut ineinanderfügen

und vermehrt formschlüssige Bindungen ausbilden können [33].

In Tab. 2.4 sind wissenschaftliche Untersuchungen zum Einfluss der Partikelgröße für unterschiedliche Rohstoffe zusammengefasst. Der Großteil der Publikationen bestätigt den Richtwert für die Zerkleinerung mittels Sieblochweiten von 4 mm. Dennoch ist der Einfluss der Partikelgröße, im Vergleich zu Temperatur oder Wassergehalt, bei der Verdichtung holzartiger Biomassen eher gering [1], [4]. Bei nicht-holzartigen Rohstoffen variiert die Pelletqualität in Abhängigkeit der Partikelgröße stärker. Beispielsweise resultiert eine Zerkleinerung von Körnern auf 2 mm (anstatt 4 mm) in höheren Abriebfestigkeiten [4]. Bei Gerstenstroh verbessert eine feine Aufmahlung (4 anstatt 7 mm) hingegen nicht die Qualität der Pellets [69]. Bei der Pelletierung von Heu konnte ein Zerkleinerungsgrad von 4 mm (im Vergleich zu 2 bzw. 6 mm) die höchsten Schüttdichten und Abriebfestigkeiten erzielen, wobei der Einfluss auf den Abrieb geringer ausfällt [38]. Allerdings muss bei großen Partikeln und Fasern mit Zerkleinerungseffekten zwischen Koller und Matrizie gerechnet werden. Dies führt zu kleineren Partikeln im Pellet, steht aber in Verbindung mit einem erhöhten Energiebedarf der Pelletierung [21].

Tab. 2.4: Untersuchungen zu Variationen der Partikelgröße unterschiedlicher Biomassen für die Pelletherstellung [1], [4], [38], [44], [51], [69]

Studie	Zerkleinerungs-system	Verdichtungs-system	Pellet-durchmesser mm	Rohstoff	Partikelgröße (Sieblochweite der Mühle)				
					≤ 1 mm	≤ 2 mm	≤ 4 mm	≤ 6 mm	> 6 mm
<i>holzartige Biomassen</i>									
Castellano et al.	HM	FMP	6	Seekiefer, Roter Eukalyptus, Pyrenäeneiche, Pappel, Rebschnitt					
Bergström et al.	HM	RMP	8	Kiefer					
Lee et al.	HM	EPK	7	Tulpenbaum, Japanische Lärche					
Miao et al.	HM	EPK	12,7/25,4	Weide					
<i>nicht-holzartige Biomassen</i>									
Castellano et al.	HM	FMP	6	Reisstroh, Hafer, Triticale					
Serrano et al.	HM	RMP	6	Gerstenstroh					
Kirsten et al.	HM, PM	RMP	6	Heu					
Miao et al.	SM	EPK	12,7/25,4	Miscanthus, Rutenhirse, Maisstroh					

HM

PM

SM

FMP

RMP

EPK

Hammermühle

Prallmühle

Schneidmühle

Flachmatrizenpresse

Ringmatrizenpresse

Einzelpresskanal

Untersuchungsbereich

bestser Bereich bei verwendeter Technik

Die Partikelgröße und -verteilung wird maßgeblich durch die Zerkleinerungstechnik und die verwendeten Siebeinsätze bestimmt. In der Praxis haben sich Hammermühlen durchgesetzt [36], [56]. Dennoch können sich bei der Verarbeitung von Halmgütern schneidende und scherende Werkzeuge (schmale Schläger bei Hammermühlen [59], Schneidmühle [27] oder Doppelschneckenextruder [46]) positiv auf die Energiebilanz des Produktionsprozesses oder die Qualität der Pellets auswirken.

Rohstoffmischung

Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit holzartiger Rohstoffe und dem Potential an holz- und nicht-holzartigen Rest- und Nebenstoffen werden oftmals Mischungen verschiedener Biomassen untersucht. Neben dem Verbrennungsverhalten wird dabei auch der Herstellungsprozesse der Pellets deutlich beeinflusst.

Durch Zumischung von Rapspresskuchen (bis zu 30 *Ma.*-%) zu Kiefernholz konnte zwar der spezifische Energiebedarf der Presse um 30 % reduziert werden, jedoch geht diese Zumischung mit einer verminderten Pelletqualität einher [75]. Qualitätsverluste der Pellets, durch Zumischung von nicht-holzartigen Materialien, kann auch LEHMANN ET AL. [46] bei dem Zusatz von Miscanthus (bis zu 20 *Ma.*-%) zu Kiefernholz bestätigen. FILBAKK ET AL. [25] vermischte verschiedene Rindenanteile (0 - 100 *Ma.*-%) mit Kiefernholz. Hier konnten reduzierte Abriebfestigkeiten bei gesteigerter Schüttdichten mit zunehmendem Rindenanteil dokumentiert werden. Im Unterschied dazu kann die mechanische Stabilität von Gerstenstohpellets durch Zumischung von Kieferspänen (bis zu 12 *Ma.*-%) von 95,5 auf 97,8 *Ma.*-% gesteigert werden [69].

Die Herstellung von hochwertigen Pellets aus Brennstoffmischungen erfordert offensichtlich eine Anpassung anderer Einflussgrößen, z.B. durch Veränderung des Wassergehaltes oder Anpassung prozesstechnischer Größen [58]. Somit müssen für jeden Rohstoff bzw. Mischung aufeinander abgestimmte Parameterkombinationen konzipiert werden.

2.3.2 Prozessparameter

Prozessparameter sind i.d.R. mit der Pelletpresse verbundene, maschinenspezifische Einflussgrößen. Aus Abb. 2.6 geht eine Vielzahl von Einflussparametern hervor. Dabei sind die wichtigsten, deren Einflüsse zumeist in wissenschaftlichen Untersuchungen betrachtet werden, im Folgenden kurz umrissen.

Prozesstemperaturen

Im Wesentlichen gibt es zwei Gruppen von relevanten Prozesstemperaturen. Zum einen die Temperatur im Pressenraum, die durch alle anderen Prozessparameter beeinflusst wird, und zum anderen die Matrizentemperatur, welche durch externe Beheizung gesteuert werden kann und auch abhängig von den Reibungskräften im Presskanal ist. Die Erfassung der Matrizentemperatur ist bislang nur bei stationären Matrizen möglich [42]. Eine Alternative bietet ein beheizter Einzelpresskanal, um Temperatureinflüsse zu simulieren, sodass viele Forschungsgruppen diesen Ansatz betrachten.

Die Prozesstemperaturen sind entscheidend für die Aktivierung natürlicher oder zugesetzter Bindemittel und Presshilfsmittel (z.B. Stärke). Bei industriellen Pelletieranlagen

liegen diese zwischen 80 und 130 °C [56]. Begründet durch geringere, realisierbare Drücke und in Abhängigkeit, wo genau die Temperatur erfasst wird, kann diese im Labormaßstab niedriger ausfallen. Bei ausreichenden Temperaturen kann der Energieverbrauch der Presse gesenkt werden. Allerdings verursachen hohe Temperaturen und das im Rohstoff vorhandene Wasser teils große Wasserdampfmengen, welche i.d.R. abgeführt werden müssen, um Überhitzungen zu vermeiden. Dieser Effekt muss bei der Konditionierung auf erforderliche Wassergehalte beachtet werden, um eine ausreichende Aktivierung der Bindkräfte und -mechanismen zu gewährleisten.

GARCIA-MARAVAR ET AL. [26] studierte das Verdichtungsverhalten verschiedener Olivenbaumreste im Labormaßstab. Dabei stellte sich heraus, dass bei der Verarbeitung von Olivenbaumstammholz Prozesstemperaturen von 40 - 60 °C für qualitativ hochwertige Pellets ausreichen. Hingegen sind für die Pelletierung der Blätter und Äste Temperaturen von über 60 °C notwendig. Laut GILBERT ET AL. [27] liegt ein optimaler Temperaturbereich bei der Pelletierung von Rutenhirse bei 75 - 95 °C. Bei Temperaturen von über 100 °C nahm die Pelletqualität wieder ab. Anders verhält es sich bei der Holzverdichtung. NIELSEN ET AL. [55] identifizierte einen linearen Zusammenhang zwischen Energiereduzierung und verbesserter Pelletfestigkeit in Verbindung mit zunehmender Temperatur. Dabei kristallisierte sich eine optimale Verdichtungstemperatur für Kiefernpellets von 120 °C und Buchenpellets von 150 °C heraus. Auch STELTE ET AL. [73] bestätigt, dass bei 100 °C (im Vergleich zu 20 °C) bessere Pelletqualitäten aus Buche, Fichte und Stroh erzeugt werden können. CARONE ET AL. [3] ist sogar der Meinung, dass die Temperatur, im Vergleich zu Wassergehalt und Partikelgröße, den größten Einfluss auf die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften hat. KALIYAN ET AL. [34] und LEE ET AL. [44] untermauern diese These durch den Nachweis der Aktivierung von Bindemechanismen in Form von verbesserter Rohstoffverteilung und weniger Lücken im Pellet (durch REM- bzw. EDX-Aufnahmen).

Bei holzartigen Rohstoffen wird deutlich, dass Temperaturen von über 100 °C notwendig sind, um eine optimale Bindung im Pellet für beste Qualitäten zu erzeugen. Die Ursache liegt in der bereits erläuterten temperatur- und wassergehaltsabhängigen Ligninerweichung (Kapitel 2.3.1). Bei Halmgütern hingegen reichen geringere Temperaturen. Offensichtlich dominieren andere rohstoffeigene Bindemittel wie Stärke (Verkleisterung ab 65 - 90 °C [35]) oder Proteine (Denaturierung ab 60 °C [67]), die den Formschluss der Fasern unterstützen.

Druck

Neben der Temperatur ist der Pressdruck, der auf das Rohmaterial ausgeübt wird, essentiell für die Pelletqualität. Er hat die Aufgabe natürliche Bindemittel aus den Zellen der

Partikel herauszupressen [33]. Des Weiteren werden die Partikel geordnet und verformt, um möglichst viele Kontaktstellen und Haftkräfte zu generieren [68]. Somit führen höhere Drücke zu besseren physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften. Allerdings stehen höhere Drücke in Verbindung mit einem höheren Energieverbrauch des Herstellungsverfahrens.

In industriellen Pelletpressen sind Drücke von 210 bis 450 *MPa* typisch für die Verdichtung von Holz [55]. Mit entsprechender Antriebsleistung der Presse müssen Koller und Matrize möglichst nah zusammengebracht werden, um den Druckaufbau im Materialteppich zu realisieren und aufrecht zu halten. Eine direkte Druckmessung im industriellen Maßstab ist eher selten [75]. Untersuchungen zum Druckeinfluss lassen sich dagegen, wie auch bei den Temperaturbetrachtungen, im Labor über die Verdichtung mittels Einzelpresskanal ableiten.

RELOVA ET AL. [61] untersuchte das Zusammenspiel von Druck, Korngröße und Wassergehalt bei der Verdichtung von Rinde der Karibische Kiefer im Einzelpresskanal. Dabei wurde der Pressdruck zwischen 160 - 400 *MPa* variiert. Mittels Varianzanalyse konnte der Druck mit rund 31 % als größter Einflussparameter detektiert werden, wobei die besten Pelletqualitäten bei maximaler Druckaufwendung erzielt wurden. CARONE ET AL. [3] stellte hingegen eine höhere Abhängigkeit von der Temperatur als vom Pressdruck (Untersuchungsbereich 71 - 176 *MPa*) bei der Verdichtung von Olivenbaumverschnitt fest. Bei hohen Temperaturen (150 °C) ist ein geringerer Pressdruck von 71 *MPa* ausreichend, um hohe Pelletdichten zu erzielen. Auch GILBERT ET AL. [27] bestätigt den größeren Einfluss der Temperatur im Vergleich zum Druck.

Die Studien zeigen deutlich, dass bei der Pressagglomeration ein entsprechender Mindestdruck zur Verdichtung der Rohstoffe erforderlich ist, dieser aber im Zusammenwirken mit anderen Einflussfaktoren meist einen weniger starken Einfluss auf die Pelletqualität hat.

Matrizengeometrie

Die Gestaltung der Matrizengeometrie hängt im Wesentlichen vom zu verdichtenden Material ab. Dabei ist das Verhältnis von Presskanaldurchmesser und -länge (d/l) in Verbindung mit den entstehenden Reibungskräften zwischen Partikel und Kanalwand entscheidend. Bei der Pelletierung von holzartigen Biomassen wird ein Verhältnis von 1:3 bis 1:5 empfohlen [56]. Bei nicht-holzartigen Rohstoffen sind oftmals Voruntersuchungen notwendig. KALIYAN ET AL. [33] zitiert einige Studien zur Pelletierung von halmgutartigen Biomassen, in denen das d/l -Verhältnis der Matrize variiert wurde. Dabei stellte sich für Luzerne ein d/l von 1:9 und für Gerstenkorn d/l von 1:7 als optimal heraus. KALIYAN ET AL. [34] untersucht weiter die Verdichtung von Maisstroh und Rutenhirse, wobei er

ein Pressverhältnis von 1:6 wählt. Auch bei der Pelletierung von Weizenstroh ist ein, im Vergleich zu holzigen Biomassen, längerer Presskanal notwendig ($d/l = 1:6,67$ [6]).

Längere Presskanäle führen i.d.R. zu härteren Pellets, wobei mit stärkeren Reibungskräften in Verbindung mit hohen Temperaturen zu rechnen ist. Zusätzlich steigt der spezifische Energiebedarf. Bei holzartigen Rohstoffen findet eine stärkere Lignifizierung statt. Durch die erforderliche höhere Pressenleistung ist eine mögliche Folge das Festfahren der Presse. Bei halmgutartigen Biomassen ist dieser Effekt, aufgrund des geringen Lignin gehaltes, nicht relevant. Durch den Formschluss als möglicher Hauptbindemechanismus müssen entsprechend zur Verformung der Fasern längere Presskanäle verwendet werden. Zusätzlich begründet sich der längere Presskanal mit der geringeren Schüttdichte des zu verdichtenden Halmgutes (z.B. Weizenstroh 87 kg/m^3 bei $w = 24 \text{ Ma.-%}$ [6] und Waldrestholz 270 kg/m^3 bei $w = 20 \text{ Ma.-%}$ [5] und gleichem Zerkleinerungsgrad - Hammermühle (HM) Sieblochweite (SLW) 4 mm).

Eine weitere Matrizeneigenschaft ist die Geometrie von Ein- und Auslauf des Presskanals. Eine Vielzahl unterschiedlicher Matrizengestaltungen zeigt Abb. 2.11. Hierzu gibt es kaum Variationsuntersuchungen in Bezug auf den Einfluss auf die Pelletqualität bzw. den spezifischen Energieeintrag. Allerdings kann in Abhängigkeit der Fließeigenschaften des zu verdichtenden Materials die Form des Presskanals Einfluss auf die Pelletfestigkeit nehmen [30]. Eine Absenkung (Abb. 2.11, Varianten A bis C) dient der Vorverdichtung und erhöht dadurch das Kompressionsverhältnis im Presskanal. Bei Materialien mit geringen Schüttdichten finden üblicherweise Matrizen mit großen Absenkungen (Abb. 2.11, Varianten B und C) Anwendung. Für hohe Schüttdichten werden eher kleinere Absenkungen verwendet (Abb. 2.11, Varianten A, D bis F). [36] PILZ ET AL. [59] zeigt, dass die Presskanallänge und die Gestaltung des Auslaufes bei der Pelletierung von Miscanthus sowohl einen Einfluss auf die Schüttdichte, als auch auf die Festigkeit hat. Erwähnenswert ist die Halbierung des spezifischen Energieverbrauchs bei der Anwendung einer hinterbohrten Matrize ($6 \times 30 + 10 \text{ mm}$, Presskanallänge 40 mm , vergleichbar mit Variante D, Abb. 2.11) im Vergleich zu einer nicht-hinterbohrten Matrize mit gleicher Länge ($6 \times 40 \text{ mm}$, vergleichbar Abb. 2.11, A). Durch leichte Erweiterung der Auslauföffnung des Presskanals werden zum einen Reifungskräfte minimiert. Zum anderen wird die Rückexpansion vor allem von faserigen Materialien reduziert, was sich in einer höheren Abriebfestigkeit widerspiegelt [59].

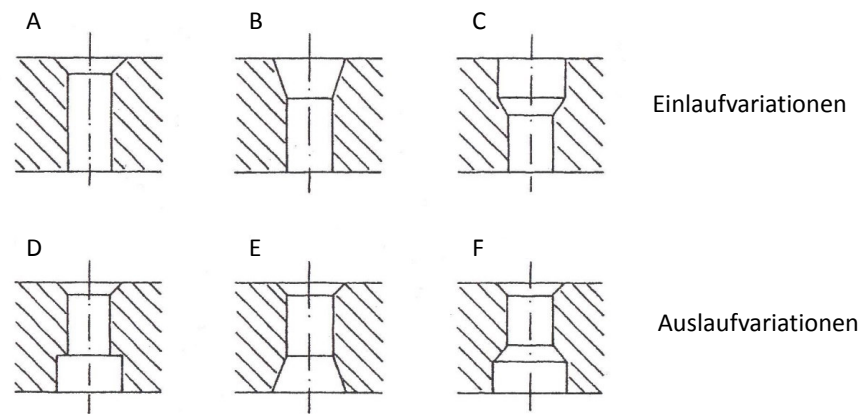


Abb. 2.11: Gestaltungsmöglichkeiten des Presskanals einer Matrize [30]

3 Versuchsmaterial und Methodik

3.1 Rohstoffe

3.1.1 Gärreste

Die Auswahl der Biogasanlage (BGA) und somit der Gärreste beruhte auf der vom DBFZ durchgeführten Betreiberbefragung von 2011/12. Dabei waren die Auswahlkriterien vorrangig: Substrateinsatz von mindestens 70 *Ma.*-% biogene Rohstoffe, eine Möglichkeit zur Trocknung der Gärreste an der BGA und die Nähe zu den Versuchsstandorten DBFZ und ITUN. Die Gärreste stammen aus einer BGA, bei der die Eingangssubstrate zu 90 *Ma.*-% biostämmigen Ursprungs sind. Hauptanteil ist dabei Maissilage, weitere Substrate sind Grassilage, Getreideausputz, ausgelaugte Zuckerrübenschnitzel und Futterreste von Milchkühen. Die restlichen 10 *Ma.*-% sind Rinderfestmist. Der hohe Wassergehalt der Gärreste (> 80 *Ma.*-%) wird an der BGA über eine großflächige Hallentrocknung auf < 15 *Ma.*-% reduziert. Für die Untersuchungen werden drei Gärrestchargen zu unterschiedlichen Zeiten von der BGA bezogen: Charge 1 TK-1381 (07/2012), Charge 2 TK-1388 (08/2012) und Charge 3 TK-1480 (06/2013). Optisch unterscheiden sich die Gärrestchargen nicht. Zur Vergleichbarkeit wurden von allen Gärrestchargen chemische und brennstoffrelevante Analysen sowie Faseranalysen durchgeführt (siehe Anhang C).

3.1.2 Landschaftspflegeheu

Zur Vereinfachung wird im weiteren Verlauf der Arbeit Landschaftspflegeheu lediglich als Heu betitelt. Das für die Versuche zur Verfügung stehende Heu stammt zum einen aus einem Niedermoorgebiet nordwestlich von Berlin - Heu 1, Charge 1 TK-1164 (08/2010). Zum anderen wird das Heu von einer Feuchtwiese in Sachsen aus drei aufeinanderfolgenden Jahren bezogen - Heu 2, Charge 1 TK-1393 (08/2011), Charge 2 TK-1394 (09/2012) und Charge 3 TK-1545 (08/2013). Die Mahd erfolgte stets im Spätsommer und weist aufgrund eines hohen Verholzungsgrades eine geringe Futterqualität auf. Optisch unterscheiden sich die Heuchargen nicht. Faseranalysen sowie chemische und brennstofftechnische Analysen sind im Anhang C aufgeführt. Beide Grünflächen werden extensiv mit (Heu 1) und ohne (Heu 2) dem Einsatz von Mineraldünger bewirtschaftet.

3.2 Versuchsplan zur Verarbeitung von Heu, Gärresten und Mischungen

3.2.1 Versuchskomplex I - Pelletierbarkeit

Der erste Versuchskomplex soll die prinzipielle Pelletierbarkeit der Einzelrohstoffe sowie Mischungen zeigen und bewerten. Im Rahmen vorgelagerter Betrachtungen zum Zerkleinerungs- und Pelletierverhalten von Heu [38] wurden zunächst verschiedene Zerkleinerungstechniken auf Eignung untersucht. Dabei spielten Beanspruchungsarten wie Reibung, Scherung, Schneiden oder Prall, welche sich für fasrige Biomassen eignen [71], die entscheidende Rolle. Im Labor- bzw. Technikumsmaßstab wurden Schneid-, Hammer- und Schlagnasenmühlen mit unterschiedlichen Einflussgrößen (Variation Austragssieb, Schlägergeometrie und Aspirationssystem) getestet. Ausgewählte Zerkleinerungsergebnisse sind im Anhang in Tab. A.2 zusammengestellt. Daraus geht hervor, dass die untersuchte Hammermühle den höchsten Durchsatz bei geringstem Energieaufwand für die Zerkleinerung von Heu besitzt. Des Weiteren kann der Durchsatz durch das zusätzlich getestete Absaugungssystem noch gesteigert werden, wobei sich der spezifische Energiebedarf leicht reduziert. Tab. A.2 zeigt exemplarisch die Faserlängenverteilung der zerkleinerten Heuchargen bei Anwendung eines Austragssiebes mit 4 mm Sieblochweite (SLW) bei allen Mühlenarten. Die breiteste Verteilung (flachster Kurvenanstieg) kann durch die untersuchte Hammermühle mit Aspiration erzeugt werden. Weitere Vorbetrachtungen fanden zum Einfluss des Wassergehaltes auf die Pelletqualität statt [8]. Dabei kristallisiert sich ein optimaler Wassergehalt von $12 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$ für die Verdichtung von Heu mit der vorhandenen Technik heraus. Aufgrund der spröden und wenig bis kaum fasrigen Struktur des Gärreste, findet für die Zerkleinerungsversuche ebenso die Hammermühle Anwendung. Unter Einbezug der erwähnten Vorbetrachtungen zur Verarbeitung von Heu, ergibt sich der Versuchskomplex I, welcher schematisch in Abb. 3.1 dargestellt ist.

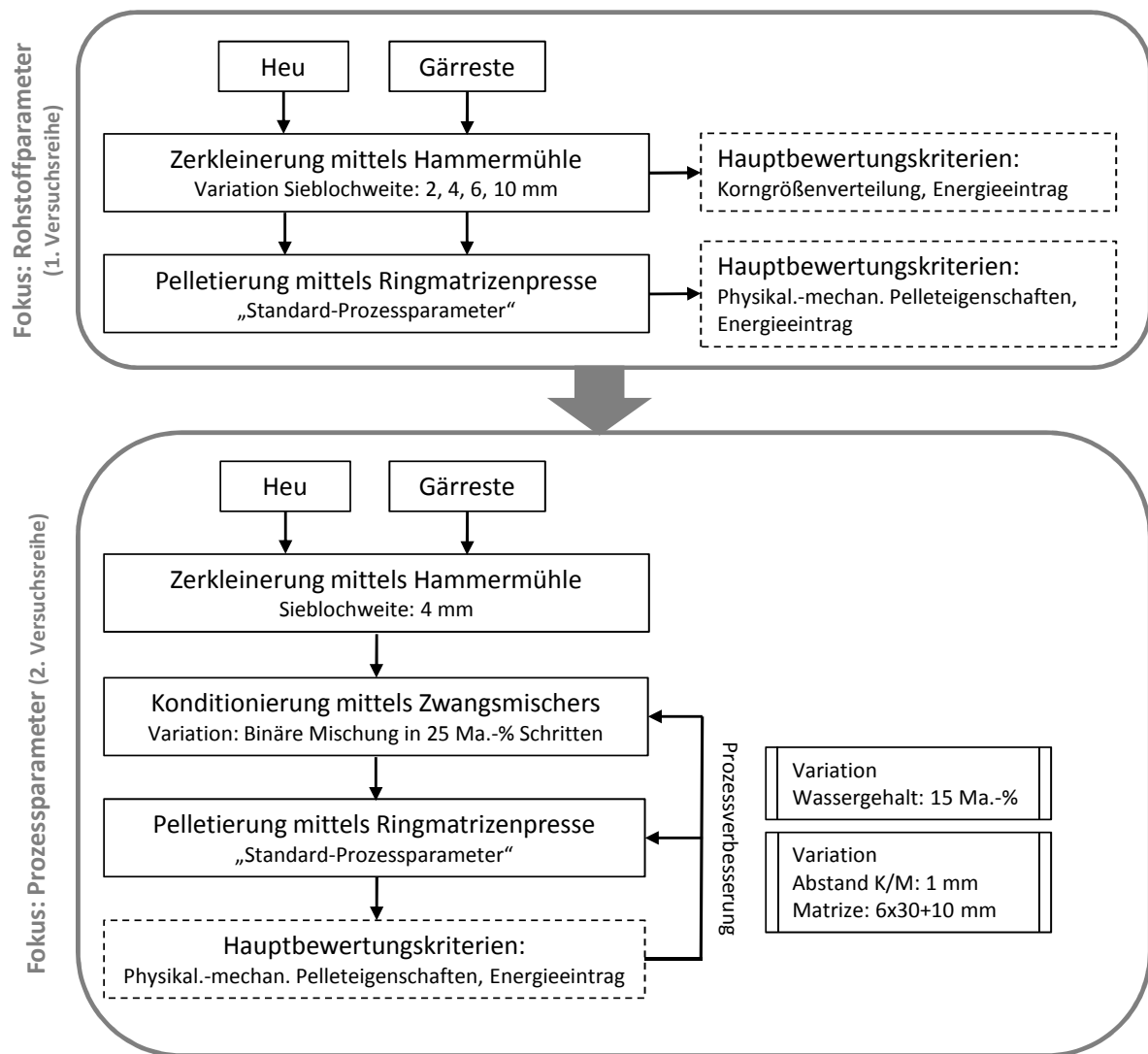


Abb. 3.1: Versuchskomplex I - Versuchsplan zur Machbarkeit der Herstellung von Heu- und Gärrest- bzw. Heu/Gärrest-Mischpellets

Wie aus Abb. 3.1 hervorgeht, wurden zur Herstellung qualitativ hochwertiger Biomassepellets zwei Versuchsreihen durchgeführt:

1. Zerkleinerung und Pelletierung (Variation Zerkleinerungsgrad) der Einzelrohstoffe mit dem Ziel:
 - eine geeignete Korngrößenverteilung in Abhängigkeit vom Zerkleinerungsgrad zu detektieren, um optimale Bindemechanismen hervorzurufen,
 - die physikalisch-mechanischen Mindestpelleteigenschaften entsprechend der ISO 17225-6 [20] zu erreichen und
 - den spezifischen Energieverbrauch des Herstellungsprozesses möglichst gering zu halten.

2. Pelletierung der Mischungen in 25 *Ma.*-%-Schritten (Prozessverbesserung durch Variation Wassergehalt und Prozessparameter) mit dem Ziel:
 - die physikalisch-mechanischen Mindestpelleteigenschaften entsprechend der ISO 17225-6 [20] zu erreichen und
 - den spezifischen Energieverbrauch möglichst gering zu halten.

3.2.2 Versuchskomplex II - Prozessoptimierung

Im zweiten Versuchskomplex soll die Variation von Rohstoff- und Prozessparameter zum einen vertieft und zum anderen hinsichtlich des spezifischen Energieaufwandes der Pelletierung von Heu und Gärresten in Mischung optimiert werden. Um ein möglichst breites Versuchsfeld darstellen zu können, findet die Methodik der statistischen Versuchsplanung (DoE) Anwendung, welche im Forschungsbereich der Aufbereitung von Biomassen oft genutzt wird. Nach eingehender Recherche, welche Arten es an Versuchsplänen gibt und unter Einbezug relevanter Einflussgrößen (*Faktoren*) und deren Variationsmöglichkeiten (*Stufen*), findet für die Versuchsdurchführung ein Box-Behnken-Plan Anwendung [40], [70]. Näheres zur Herleitung und Berechnung findet sich im Anhang F.1 bzw. F.2. Der Box-Behnken-Plan ist durch Reduktion eines vollfaktoriellen 3^n -Plans abgeleitet, wobei es sich bei den Untersuchungen um drei Einflussgrößen mit je drei Abstufungen (n) handelt und nichtlineare Zusammenhänge erkennen lässt. Die Reduktion beinhaltet das Wegfallen der Eckpunkte des Versuchsraumes (Abb. 3.2), welche sich allerdings über ein Regressionspolynom darstellen lassen. Somit reduziert sich der Versuchsumfang von 27 (3^3) auf 13 Tests, wobei diese im Fall der Pelletierung hinsichtlich Reproduzierbarkeit jeweils als Doppelversuch durchgeführt werden. Da die Orthogonalität des Versuchsraumes gewährleistet werden soll, wird der zentrale Punkt (Abb. 3.2 (0, 0, 0)) zweifach wiederholt. Die Planung und Auswertung der statistischen Versuche wurde mit Hilfe der Software STAVEX realisiert. Anhand der berechneten p -Werte können Aussagen zur Irrtumswahrscheinlichkeit der Modellkoeffizienten abgeleitet werden. Wichtige *Faktoren* haben einen p -Wert $\leq 0,05$; über 0,05 sind scheinbare Effekte. Dabei ist die Nullhypothese H_0 die Annahme der Abhängigkeit der jeweiligen *Zielgröße* (Qualitätsmerkmale) von den dazugehörigen *Faktoren*. Des Weiteren werden die Bestimmtheitsmaße R^2 als formale Beurteilung der Anpassungsgüte der Regression angegeben. Zur graphischen Darstellung in Form von Höhenlinienplots dient die Software Origin.

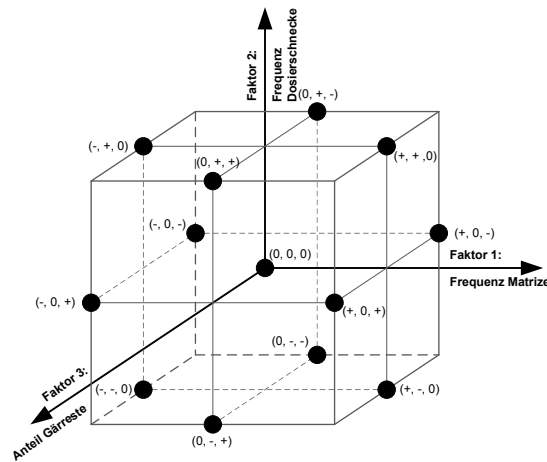


Abb. 3.2: Box-Behnken Versuchsplan für drei *Faktoren* (Frequenz Matrice, Frequenz Dosierschnecke und Anteil Gärreste) nach KLEPPMANN [40] bzw. SIEBERTZ [70]

Zur Herstellung qualitativ hochwertiger Mischpellets aus Heu und Gärresten, unter Einbezug der Ergebnisse des Versuchskomplexes I und einer angestrebten energiespezifischen Optimierung, wurden zwei statistische Versuchsreihen mit Hilfe der Box-Behnken-Planung durchgeführt. Tab. 3.1 zeigt die *Faktoren*, die in drei Einstellungsstufen („-“ als Minimal-, „0“ als Mittel- und „+“ als Maximalwert) variiert werden, sowie die konstanten Rohstoff- und Prozessparameter. Der entsprechend codierte Box-Behnken-Plan ist im Anhang in Tab. F.1 zusammengefasst. Die Auswahl der Versuchsparameter basiert auf den Ergebnissen des Versuchskomplex I und den technischen Möglichkeiten der Pelletpresse für die zu untersuchenden Materialien.

Tab. 3.1: Pelletierparameter der statistischen Versuchsreihen

	Einheit	1. statistische Versuchsreihe			2. statistische Versuchsreihe		
		Einstellungen					
		-	0	+	-	0	+
Variierende Faktoren							
1. Frequenz Matrice	Hz	20	25	30	20	25	30
2. Frequenz Dosierschnecke	Hz	1	2	3	6	8	10
3. Anteil Gärreste	Ma.-%	75	85	95	10	40	70
Konstante Rohstoff- und Prozessparameter							
Abstand Koller/Matrice	mm	0,25			0,25		
Matrizengeometrie (DxL)	mm	6x30			6x30		
Abstand Abschermesser	mm	30			30		
Wassergehalt	Ma.-%	15			12		
Zerkleinerung mittels Hammermühle							
Sieblochweite für Gärreste ¹	mm	6			10		
Sieblochweite für Heu ²	mm	4			4		

¹ Als Gärreste wurde die Charge TK-1480 verwendet.

² Für die 1. statistische Versuchsreihe wurde die Heu-Charge TK-1394 genutzt. Infolge zahlreicher Versuchsdurchführungen und Reduzierung des Heubestandes erfolgte für die 2. statistische Versuchsreihe ein Wechsel auf die Charge TK-1545.

Als Ergebnis der statistischen Versuchsplanung werden für die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften als Qualitätsmerkmale sowie für den spezifischen Energiebedarf quadratische Funktionen erstellt. Damit kann der komplette Versuchsraum modelliert und die Berechnung von nicht durchgeführten *Faktor*kombinationen prognostiziert und das Optimum ermittelt werden.

3.2.3 Versuchskomplex III - Bindemechanismen

Der dritte Versuchskomplex dient dem besseren Verständnis des Materialzusammenhaltes aufgrund der Druckverdichtung. Wie aus dem umfangreichen Literaturstudium (Kapitel 2.3) hervorgeht, weist das Thema Bindemechanismen eine hohe Komplexität auf. Die Relevanz möglicher Bindemechanismen für qualitativ hochwertige Pellets bedingt oftmals die Überlagerung einzelner Effekte, sodass ein abschließender Nachweis kaum möglich ist. Die durchgeführten Versuche dienen lediglich zur Untermauerung aufgestellter Thesen. Aufgrund des komplexen Themas werden gezielte Einflussparameter auf die Verdichtung von Heu als Faserbeispiel und Gärreste als Beispiel für ligninreiche Materialien betrachtet. Die Verdichtungen wurden hauptsächlich im Einzelpresskanal (EPK) durchgeführt. Zusätzlich dienten einzelne Versuche an der Ringmatrizenpresse (RMP) dazu, bestimmte Ergebnisse zu verifizieren. Die verwendeten Rohstoffparameter können der Tab. 3.2 entnommen werden. Anschließend zeigt Abb. 3.3 das Untersuchungsfeld am EPK.

Tab. 3.2: Versuchskomplex III - Rohstoffparameter für die Versuchsdurchführung am Einzelpresskanal (EPK)

Basisfaktoren	Einheit	Versuchsreihe		
		1.	2.	3.
Anteil Heu	Ma.-%	100	50	0
Anteil Gärreste	Ma.-%	0	50	100
Wassergehalt	Ma.-%	15	20	20
Zerkleinerungsgrad	mm	4	4	4

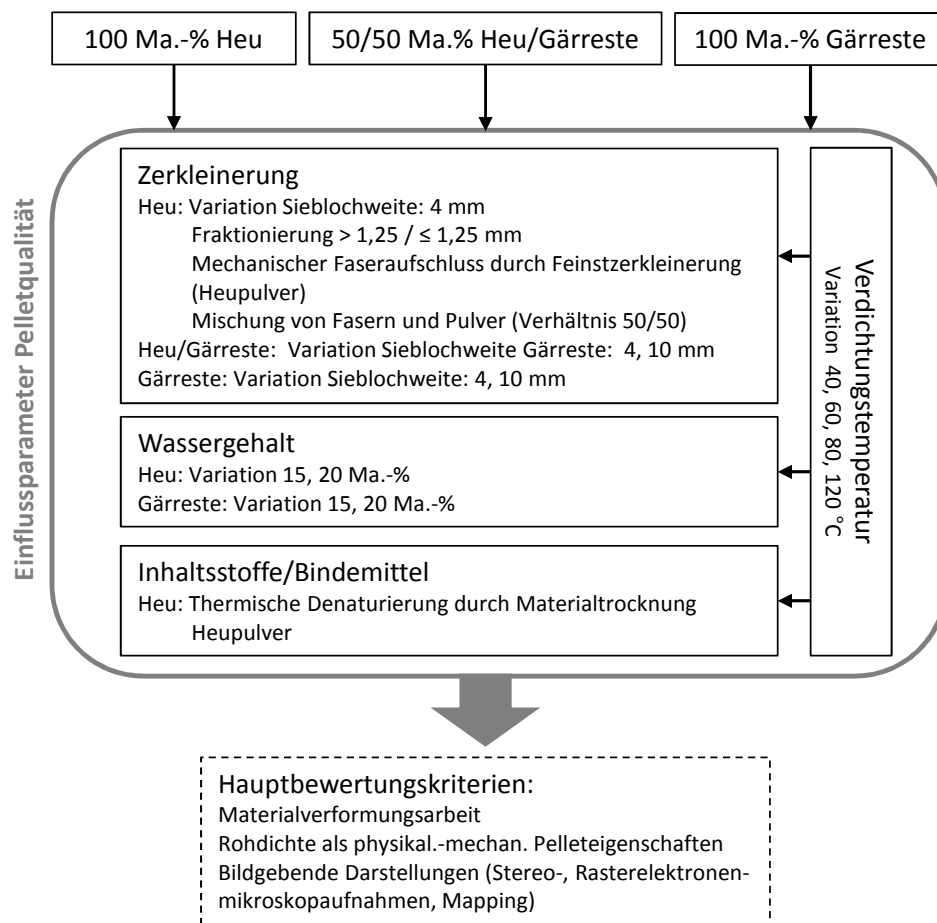


Abb. 3.3: Versuchskomplex III - Versuchsplan zum Parametereinfluss bei der Verdichtung von Heu und/oder Gärresten im Einzelpresskanal (EPK)

Um eine gewisse Repräsentativität zu gewährleisten, wurden bei jeder Variation eines Versuchsparameters fünf Pellets im EPK unter gleichbleibenden Bedingungen hergestellt. Allerdings variiert die Anzahl der Verdichtungshübe je untersuchtem Material, bedingt durch die unterschiedlichen Schüttdichten von Heu, Gärresten und der 50 Ma.-%igen Mischung aus beiden. Der Verdichtungsprozess wird stets bis zum Erreichen einer konstanten Kraft wiederholt. Ergänzende Versuche mittels RMP erfolgen in 2-facher Ausführung.

3.3 Versuchstechnik zur Herstellung der Pellets

3.3.1 Apparate zur Vorbehandlung

Häcksler

Das Heu wird händisch vom Ballen gelöst und mit Hilfe eines am DBFZ vorhandenen Häckslers (H, Typ Strohhexe SHE 10 der Firma Herlinger Landtechnik, Baujahr 2007) grob zerkleinert. Die Maschine mit einer Antriebsleistung von 7,5 kW und einer Drehzahl

von 1.455 min^{-1} wird von oben befüllt. Eine rotierende Scheibe erfasst und zerkleinert das Material und drückt es aufgrund vorherrschender Fliehkraft durch einen Siebring mit Lochweite von 25 mm . Die Zerkleinerung erfolgt durch schneidende und reißende Beanspruchung. Entsprechend der Herstellerangaben können Durchsätze von $100 - 200 \text{ kg/h}$ realisiert werden.

Hammermühle

Die verwendete Hammermühle (HM) im Technikumsmaßstab (Typ CHP 230/200-N3 der Firma Netzsch-Condux Mahltechnik GmbH, Baujahr 2010) eignet sich für die Zerkleinerung von weichen, fasrigen und spröden Materialien. Mit einer Anschlussleistung von 4 kW , einer Rotordrehzahl von 3.000 min^{-1} , einem Rotordurchmesser inkl. Schlägerwerk von 230 mm wird eine Umfangsgeschwindigkeit von $36,1 \text{ m/s}$ realisiert. Die Materialzerkleinerung findet im Mahlraum durch vier am Rotor befestigte Schlägerreihen mit beweglich aufgehängten Schlägern statt (Abb. 3.4). Das Material wird dabei hauptsächlich durch Prall beansprucht. Für die Zerkleinerung von Heu wurden aufgrund der Voruntersuchungen [38] schmale Schläger gewählt - 66 Schläger mit je 3 mm Breite (höherer Zerkleinerungsgrad durch Schneideffekte bei fasrigen Materialien, Abb. 3.5). Des Weiteren wurden Siebeinsätze mit unterschiedlichen Lochweiten ($2, 4, 6$, teils 10 mm für die Gärrestezerkleinerung) getestet (Anhang A). Entsprechend dem Hersteller ist mit dieser Mühle je nach Siebeinsatz ein materialabhängiger Durchsatz von $50 - 100 \text{ kg/h}$ realisierbar. Durch den Einsatz einer Absaugung kann der Durchsatz gesteigert werden [38].

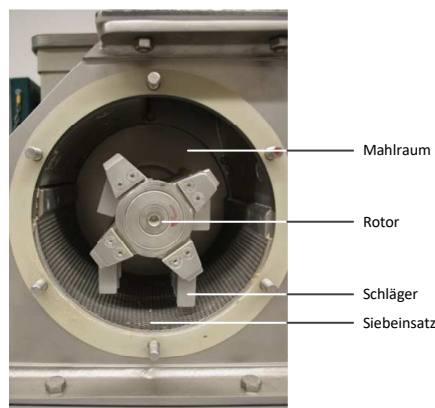


Abb. 3.4: Zerkleinerungsorgane der Hammermühle am DBFZ



Abb. 3.5: Rotor der Hammermühle mit schmalen Schlägern (3 mm)

Schwingmühle

Die Stabschwingmühle (StSM, Typ VMS der Firma KHD Humbold WEDAG, Baujahr 1993) eignet sich für die Erzeugung pulverähnlicher Produkte. Bei einer Antriebsleistung von $1,9\text{ kW}$ schwingt die Mühle mit einer Frequenz von $16,6\text{ Hz}$ bei einer Amplitude von $6,0\text{ mm}$. Die Mühle besteht aus einem zylindrischen Trog als Mahlraum der etwa ein Drittel mit Mahlstäben gefüllt ist (Abb. 3.6). Die Zerkleinerung erfolgt durch Prall-, Stoß- und Scherbeanspruchung primär zwischen den Mahlkörpern und der Mahlraumwand. Jeder Zerkleinerungsvorgang dauert 5 min , wobei der Trog mit $200\text{ - }300\text{ g}$ Material gefüllt wird.

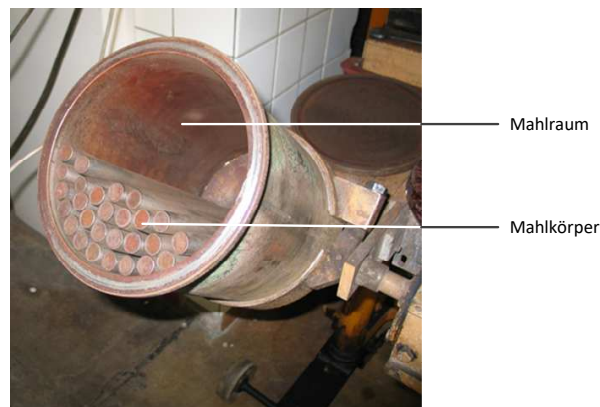


Abb. 3.6: Zerkleinerungsorgane der Stabschwingmühle am ITUN

Absaugung

Durch die Nutzung einer Absaugung kann der Durchsatz der Hammermühle erhöht und ein kontinuierlicher Abtransport des zerkleinerten Materials gewährleistet werden. Hierfür wird ein handelsüblicher Industriestaubsauger der Firma Starmix vom Typ IS Modell ARD 1450 (Baujahr 2008) mit einer Anschlussleistung von maximal $1,6\text{ kW}$ inkl. Saugfass verwendet. Die maximale Saugleistung wird bei einem Unterdruck von 259 hPa am Gebläse und einem Luftstrom von $230\text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Auf Basis von Erfahrungen wird für die Zerkleinerung von Heu ein Drittel der maximalen Saugleistung eingestellt.

Zwangsmischer

Zur Konditionierung der Materialien mit Wasser bzw. zur Herstellung der Mischungen kommt ein Zwangsmischer (Typ Collomatic XM 3-900 der Firma Collomix, Baujahr 2009) zur Anwendung. Bei einer Anschlussleistung von $1,5\text{ kW}$ findet die Homogenisierung in einer Mischwanne von 90 l statt. Dabei wird das Material durch zwei Rührwerkzeuge, welche

durch ein Planetenradgetriebe angetrieben werden, gemischt. Durch einen Randabstreifer, der mit einer Drehzahl von 40 min^{-1} rotiert, werden Ablagerungen am Wannenrand verhindert. Die Mischdauer beträgt für alle Versuche 10 min . Bis zur Weiterverarbeitung findet eine 30 minütige Reifung des Materials statt. Die Überprüfung der verschiedenen Wassergehalte vor und nach der Konditionierung erfolgt als Dreifachbestimmung mit Hilfe eines Schnellfeuchtebestimmers (Typ Kern MRS 120-3 der Firma Kern & Sohn GmbH) auf Grundlage der DIN EN 14774-2 [13].

3.3.2 Techniken zur Verdichtung

Ringmatrizenpresse

Für die Verdichtung im kleintechnischen Maßstab wird eine Ringmatrizenpresse (RMP, Modell RMP 250 der Firma Münch Edelstahl GmbH, Baujahr 2009) genutzt. Hierbei handelt es sich um ein Verdichtungssystem, bei der die Matrize angetrieben wird und die exzentrisch gelagerten Koller feststehend sind. Das Gesamtsystem Pelletieranlage besteht aus Vorlagebehälter, Dosierschnecke, Paddelmischer und der Pelletpresse (Abb. 3.7). In Tab. 3.3 sind die wichtigsten technischen Daten der Pelletieranlage aufgelistet. Laut Herstellerangaben kann ein materialabhängiger Durchsatz von $50 - 200 \text{ kg/h}$ realisiert werden. Über die Einstellung der Motorfrequenzen von Matrize und Dosierschnecke (jeweils von $0 - 50 \text{ Hz}$) lassen sich die Drehzahl der Matrize von $0 - 370 \text{ min}^{-1}$ bzw. der Dosierschnecke von $0 - 32 \text{ min}^{-1}$ umsetzen.

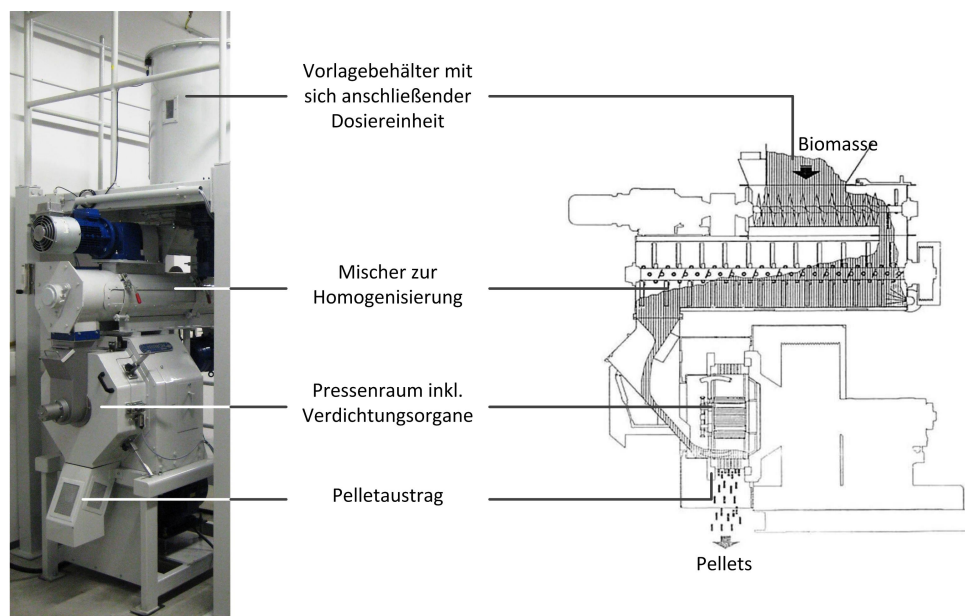
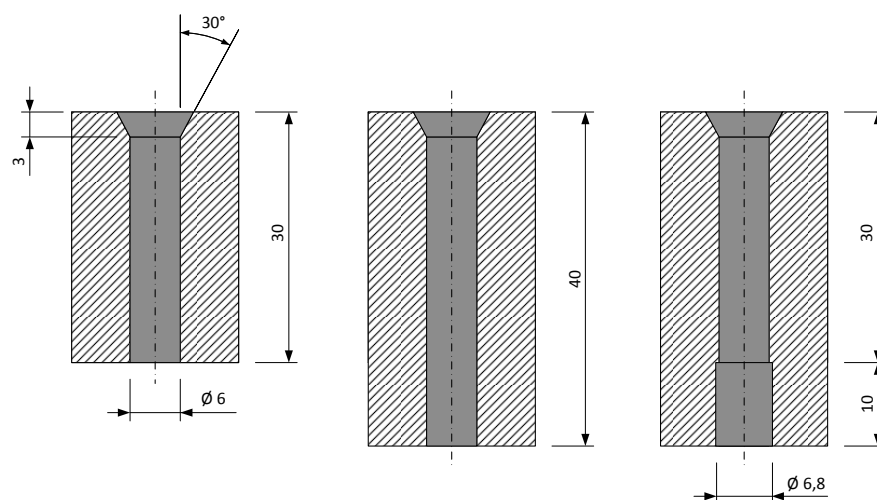


Abb. 3.7: Pelletieranlage am DBFZ (links) sowie der Materialfluss in schematischer Darstellung (rechts) [53]

Tab. 3.3: Technische Daten der Ringmatrizenpresse RMP 250 [53]

Pelletpresse RMP 250		
Anschlussleistung Presse	15	<i>kW</i>
Anschlussleistung Mischer	1,5	<i>kW</i>
Anschlussleistung Dosierer	0,37	<i>kW</i>
Innendurchmesser Matrize	250	<i>mm</i>
Breite Matrize	42	<i>mm</i>
Anzahl Koller	2	
Oberfläche Koller	geriffelt	
Durchmesser Koller	115	<i>mm</i>
Anzahl Abschermesser	2	
Abstand Abschermesser zur Matrize	30	<i>mm</i>

Das konditionierte Material aus dem Zwangsmischer wird in den Vorlagebehälter gefüllt und über die Dosiereinheit in den Paddelmischer zur endgültigen Homogenisierung gefördert. Das Material fällt über einen Schacht in die Zwangsspeisung der Pelletpresse und wird zwischen Koller und Matrize zu einem Materialteppich verdichtet. Die Teppichdicke ist durch die Abstandseinstellung zwischen Koller und Matrize definiert. Bei jedem Überrollen des Teppichs durch die Koller wird das Material scheibenweise in die Presskanäle der Matrize gedrückt (vergleichbar Abb. 2.3). Dabei entsteht ein kontinuierlicher Pelletstrang, welcher nach Austritt aus dem Presskanal durch zwei Abschermesser etwa in die gewünschte Länge gebrochen wird. Der geschilderte Materialfluss durch die Pelletieranlage ist schematische in Abb. 3.7, rechts dargestellt. Bei allen Pelletierversuchen kommen ausschließlich geriffelte Koller zum Einsatz. Im Unterschied dazu wird die Matrizengeometrie in ausgewählten Voruntersuchungen variiert, wobei der Fokus auf der Veränderung der Presskanallänge liegt. Die Abmessungen der getesteten Matrizen sind in Abb. 3.8 dargestellt.

**Abb. 3.8:** Abmessungen der untersuchten Matrizen in mm

Üblicherweise werden die Pelletierversuche je nach Schüttdichte mit 10-15 kg zerkleinertem Material durchgeführt. Vorher findet das Warmfahren der Presse auf eine Presseninnenraumtemperatur ϑ_{PR} von 45 °C statt. Die Temperaturüberwachung erfolgt über einen im Presseninnenraum angebrachten Temperatursensor. Zum Warmfahren werden stets zerkleinerte Holzspäne genutzt. Ist die geforderte Temperatur erreicht, findet die Pelletierung des eigentlichen Versuchsmaterials statt. Dabei werden Temperaturen im Presseninnenraum über den integrierten Sensor sowie die der frisch hergestellten Pellets (mittels Infrarot-Thermometer IR 1600-50D von Voltcraft) dokumentiert. Weiterhin erfolgt die Messung von Leistung (über Netzanalysator Fluke 345 der Firma Fluke) und Durchsatz, um den spezifischen Energiebedarf der unterschiedlichen Versuchsreihen zu ermitteln. Zur Reinigung erfolgt das Abfahren der Presse mit einem 5 %igem Holz-Öl-Gemisch. Abzüglich des An- und Abfahrprozesses findet die eigentliche Versuchsverdichtung durchschnittlich innerhalb von 3-5 min statt.

Einzelpresskanal

Der Einzelpresskanal (EPK) dient der Nachstellung von Verdichtungsvorgängen in einem einzelnen Presskanal einer Matrize und somit der Herstellung einzelner Pellets unter variierenden Bedingungen. Die Versuchsanlage (Abb. 3.10) ist auf einer Universalprüfmaschine AG 50 kNE der Firma Shimadzu (Baujahr 1992) installiert. Mit Hilfe der Software LabMaster der Firma Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH erfolgt die Steuerung sowie die Datenvisualisierung und -speicherung. Über einen Kraftsensor in der Stempelfassung wird während jeder einzelnen Verdichtung die Kraft über den zurückgelegten Weg aufgenommen, wobei sich der Stempel mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min nach unten in Richtung Verdichtung bewegt. Dabei wird das Material stets auf eine Dicke von 0,25 mm (in Anlehnung an einen typischen Koller-Matrizen-Abstand) verdichtet. Über die aufgenommenen Kraft-Weg-Diagramme lassen sich die geleisteten Arbeiten integrieren. Anhand eines Beispiels kann der Berechnungsweg im Anhang B nachvollzogen werden. Zur Einstellung verschiedener Temperaturen ist der Presskanal mit einem Heizmantel und einem Temperatursensor ausgestattet. Über den Regler können Temperaturen von 40-120 °C (ϑ_V) eingestellt werden. Zur Herstellung von Pellets werden zwei Stempeltypen benötigt: Verdichtungs- und Durchstoßstempel, welche in Abb. 3.10 abgebildet sind. Die Abmessungen des am ITUN vorhandenen Einzelpresskanals (Abb. 3.11) variieren maßgeblich in der effektiven Presskanallänge zu den untersuchten Geometrien der Ringmatrize. Dies ist durch die aufzubringende Kraft begründet: längere Pressekanäle wurden getestet, allerdings konnte die Universalprüfmaschine die Reibungskräfte im Kanal zwischen Versuchsmaterial und der Kanalwand nicht überwinden. Als Folge wurden die Versuche regelmäßig von der Maschine abgebrochen.

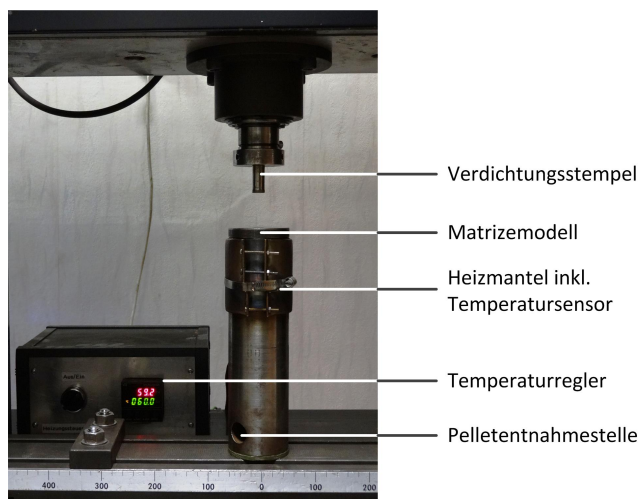


Abb. 3.9: Versuchsaufbau Einzelpresskanal am ITUN



Abb. 3.10: Verdichtungs- (links) und Durchstoßstempel (rechts)

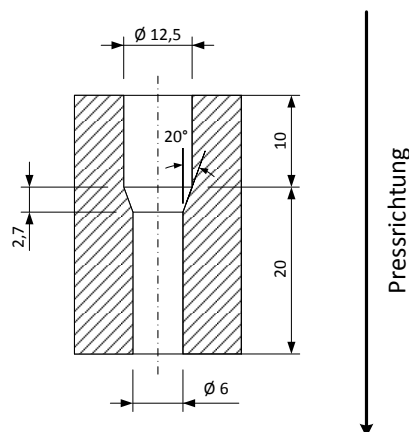


Abb. 3.11: Abmaße des am ITUN vorhandenen Einzelpresskanals in mm

Der Herstellungsvorgang eines einzelnen Pellets ist in Abb. 3.12 schematisch dargestellt. Dabei gliedert sich der Prozess in unterschiedliche Schritte:

- (1) Herstellung eines Materialpfropfens, um Gegendruck für die einzelnen Materialscheiben zu erzeugen. Hierfür wird der breite Verdichtungsstempel genutzt.
 - Einführen eines Papierstopfens und Befüllung des kompletten Vorverdichtungsraumes (a)
 - Verdichtung zur ersten Materialschicht (b)
- (2) Verdichtungsprozess
 - Erneutes Befüllen des kompletten Vorverdichtungsraumes (c)

- Verdichtung zu einer weiteren Materialschicht (d)
- Dieser Vorgang wird bis zum Erreichen einer konstanten Presskraft wiederholt.

(3) Durchstoßprozess

- Wechsel und Einbau des schmalen Durchstoßstempels (e) und Ausstoßen des erzeugten Pellets (f)

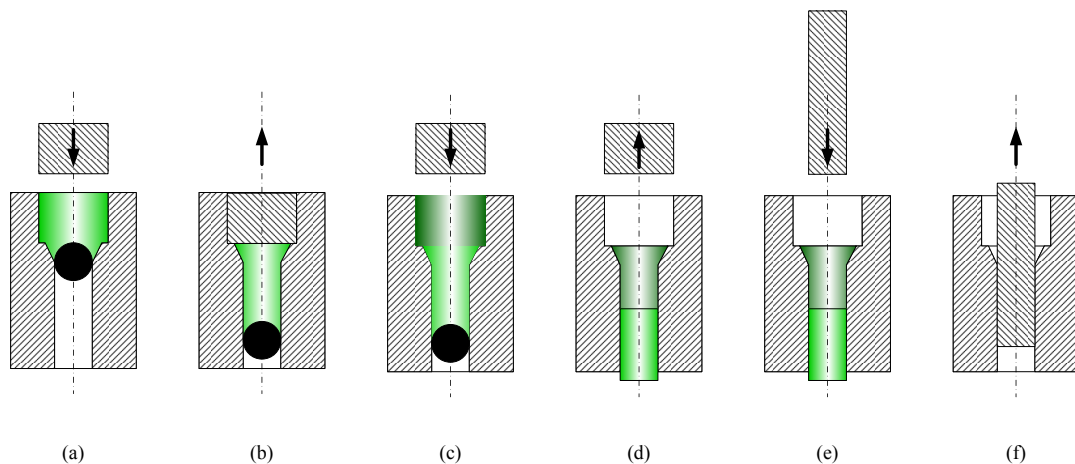


Abb. 3.12: Herstellung eines einzelnen Pellets nach LEHMANN [45]: (a) und (c) Befüllung Vorverdichtungsraum, (b) und (d) Verdichtung, (e) Stempelwechsel, (f) Durchstoß Pellet

3.3.3 Apparate zur Nachbehandlung

Kühlung und Absieben

Die Kühlung der Pellets erfolgt in einem Gegenstromkühler (Eigenkonstruktion DBFZ) für etwa 30 min. Dafür werden die produzierten Pellets auf einem Lochblechboden verteilt und mittels der von unten angesaugten Umgebungsluft gekühlt. Dadurch erlangen die Pellets ihre Endstabilität. Die Absaugung erfolgt oberhalb des Kühlers über ein Absaugebläse. Nach erfolgreicher Kühlung auf Umgebungstemperatur unter Nutzung eines Infrarotthermometers, wird der produktionsbedingte Feinanteil von der Pelletcharge durch händische Siebung abgetrennt. Nach Ermittlung der Masse wird dieser verworfen. Zur Siebung wird ein 3,15 mm Rundlochsieb (Durchmesser 400 mm) verwendet.

3.4 Methodiken und Prüfverfahren zur Beurteilung der Pelletqualität

3.4.1 Bestimmung der Korn- und Faserlängenverteilung

Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung finden zwei Verfahren Anwendung: zum einen die klassische Siebanalyse nach DIN EN 15149-2 [15] und zum anderen eine optische Faseranalyse entsprechend ISO 13322-2 [32].

Die Siebanalyse wird mit Hilfe einer Siebmaschine vom Typ Retsch AS 200 basic der Firma Retsch GmbH durchgeführt. Folgende Siebeinsätze werden dabei verwendet: 4,0; 3,15; 2,5; 2,0; 1,6; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1; 0,063 mm. Je Versuch werden etwa 200 g trocknes Material ($w \leq 15 \text{ Ma.-%}$) auf das obere Sieb des Siebturms gefüllt und für 5 min bei einer Amplitude von 0,8 mm gesiebt. Anschließend werden die einzelnen Fraktionen auf den verschiedenen Siebeinsätzen gewogen. Jeder Versuch wird zur Reproduzierbarkeit wiederholt. Aus den Mittelwerten der Doppelbestimmung werden die Verteilungssummen- und Verteilungsdichtefunktionen abgeleitet.

Eine weitere Analysemethode zur Ermittlung der Verteilungssummen- und Verteilungsdichtefunktion ist die optische Faseranalyse mit Hilfe des Camsizer[®] P4 der Firma Retsch GmbH. Das Messprinzip basiert auf einer dynamischen Bildverarbeitung nach ISO 13322-2 [32] und ermöglicht sowohl die Charakterisierung der Partikelgröße als auch -form. Das Gerät stand am IEC der TU BAF für den gesamten Untersuchungszeitraum zur Verfügung. Der Camsizer[®] P4 eignet sich für rieselfähige Stoffe im Bereich von 20 µm bis 30 mm. Zur Umsetzung werden etwa 5-6 g des Probematerials über eine vibrierende Dosierrinne dem Messschacht zugeführt. Danach werden in Echtzeit durch zwei Digital-kameras Korngröße und -form bestimmt. Während des Messvorganges können digitale Momentaufnahmen betrachten und gespeichert werden. Somit kann visuell kontrolliert werden, ob Partikel agglomerieren (aufgrund Anziehungskräfte) oder Fasern übereinanderliegen und als eins vermessen werden. Für die Untersuchungen werden die kleinste Breite x_{Cmin} und der größte Feret-Durchmesser x_{Femax} herangezogen. x_{Cmin} ist das Minimum aller maximalen Sehnen senkrecht zur Messrichtung (Abb. 3.13) und ähnelt der eingesetzten Siebmaschenweite der Siebanalyse. x_{Cmin} entspricht der Breite des Partikels bzw. der Faser. Dagegen ist x_{Femax} der maximale Abstand zweier Tangenten, die senkrecht zur Messrichtung an das Partikel angelegt werden (Abb. 3.13) und spiegelt die Länge des Partikels bzw. der Faser wieder. x_{Cmin} sowie x_{Femax} werden aus verschiedenen Messrichtungen ermittelt.

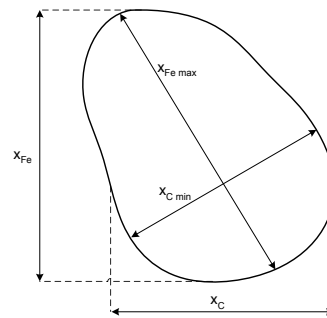


Abb. 3.13: Schematische Darstellung der Breite $x_{C\ min}$ und Länge $x_{Fe\ max}$ eines Partikels [60]

3.4.2 Ermittlung physikalisch-mechanischer Pelleteigenschaften

Abriebfestigkeit

Die Abriebfestigkeit oder auch mechanische Festigkeit der Pellets lässt vor allem Rückschlüsse auf die Stabilität und Bruchfestigkeit bei Transport- und Umschlagprozessen zu. Zur Bestimmung wird die DIN EN 15210-1 [17] herangezogen. Entsprechend der Norm werden 500 g in den Abriebtester BioenergyTUMBLER 3000 gegeben. Die rotierende Prüfkammer dreht sich mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit von 50 U/min. Dabei werden die Pellets mechanisch beansprucht, sodass ein Abrieb entsteht. Sie prallen gegeneinander sowie innerhalb der Kammer gegen Wände und eingebaute Prallbleche. Nach 10 minütiger Beanspruchung werden die Pellets mit einem 3,15 mm-Sieb manuell abgesiebt. Zur Berechnung der Abriebfestigkeit wird der Quotient der Pelletmasse nach der mechanischen Belastung und der abgesiebten Ausgangspelletmasse gebildet (Formel 3.1).

$$DU = \left(\frac{m_{P,E}}{m_{P,A}} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

Dabei gelten:

DU	Abriebfestigkeit in $Ma.\%$
$m_{P,E}$	gesiebte Pelletmasse nach der mechanischen Beanspruchung in kg
$m_{P,A}$	Pelletmasse vor der mechanischen Beanspruchung in kg

Als Vergleichswert wird in der ISO 17225-6 [20] für nicht-holzartige Biomasse eine Abriebfestigkeit von mindestens 97,5 $Ma.\%$ gefordert.

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist eine weitere physikalisch-mechanische Größe, die die Druckbelastung in einem definierten Raum sowie die Auswirkung auf die Festigkeit der Pellets innerhalb einer Schüttung beschreibt. Zur Ermittlung dieses Parameters werden gesiebte Pellets ($> 3,15 \text{ mm}$) in einen Stahlzylinder ($57 \times 57 \text{ mm}$) geschüttet. Überschüssige Pellets werden mit der Hand abgesteift. Anschließend wird die Pelletschüttung langsam mit einem Druck von 1 MPa beaufschlagt (Stempelgeschwindigkeit von 10 mm/min). Eine schematische Darstellung der Prüfapparatur zeigt Abb. 3.14. Unter Druck wird die Pelletschüttung verdichtet bis 1 MPa erreicht ist (s , bei einer Starthöhe von 57 mm). Anschließend kann die Druckfestigkeit entsprechend Formel (3.2) berechnet werden. Zur Durchführung der Analysen findet die Universalprüfmaschine AG 50 kN der Firma Shimadzu inkl. Software von Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH Anwendung.

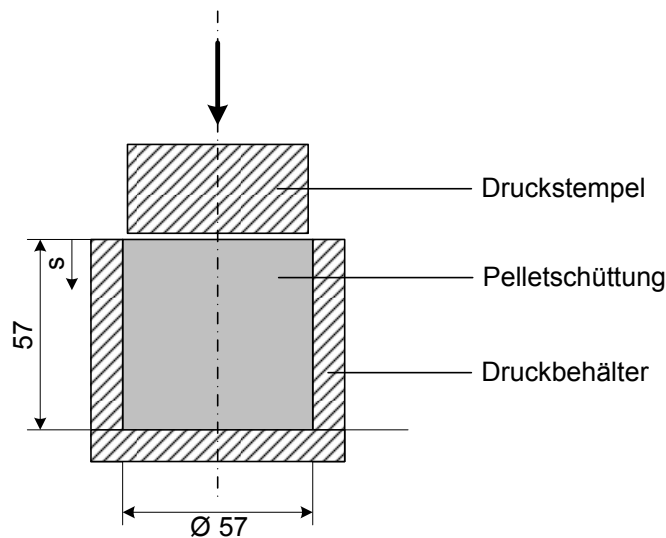


Abb. 3.14: Schematische Darstellung der Prüfapparatur zur Druckverdichtung einer Pelletschüttung [45]

$$CR = \left(1 - \frac{s}{57 \text{ mm}}\right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

Dabei sind:

CR

Druckfestigkeit in %

s

zurückgelegter Weg durch Druckbeanspruchung in mm

Schüttdichte

Die Schüttdichte von Pellets dient der Beurteilung des erforderlichen Platzbedarfes bei Lager- und Transportprozessen. Zusammen mit dem Heizwert beschreibt sie die volumetrische Energiedichte des geschütteten Biobrennstoffes und ist damit ein wesentlicher Parameter für die Bewertung der Pelletqualität. Die Bestimmung der Schüttdichte erfolgt entsprechend der Prozedur von DIN EN 15103 [14]. Dazu wird ein Messzylinder mit einem Volumen von 5 l randvoll mit Pellets gefüllt und durch zweimaliges Aufprallen des Behälters aus geringer Höhe (ca. 150 mm) auf den Boden leicht verdichtet. Danach werden überschüssige Pellets mit einem Kantholz abgestreift und der Behälter wird mit Inhalt gewogen. Durch Bildung der Differenz der Masse des gefüllten und des leeren Messzylinders im Verhältnis zu dessen Volumen kann die Schüttdichte berechnet werden (Formel 3.3).

$$BD = \frac{m_{B+P} - m_B}{V_B} \quad (3.3)$$

Mit:

BD	Schüttdichte in kg/m^3
m_B	Masse des leeren Messbehälters in kg
m_{B+P}	Masse des mit Pellets gefüllten Messbehälters in kg
V_B	Innenvolumen des leeren Messbehälters in m^3

Rohdichte

Die Rohdichte eines Pellets beeinflusst zum einen die Schüttdichte und die damit verbundenen Lager- und Transportprozesse und zum anderen das Verbrennungsverhalten. Entsprechend der DIN EN 15150 [16] ist die Roh- oder auch Partikeldichte eines Pellets einschließlich der inneren Porenräume definiert als Quotient aus Pelletmasse und -volumen (3.4). Dabei wird das Volumen durch die Ermittlung des hydrostatischen Auftriebs in einer Flüssigkeit gemessen. Gemäß der Norm soll Wasser mit Tensid als Reagenz verwendet werden. Allerdings eignet sich diese Flüssigkeitsmischung nur bedingt für halmgutartige Biomassepellets. Aufgrund des schnellen Zerfalls der Pellets in Wasser wurde das Volumen in Quecksilber bestimmt. Die notwendige Apparatur steht am ITUN zur Verfügung (Abb. 3.15). Sie besteht im Wesentlichen aus einem quecksilbergefüllten Prüfraum, dessen Volumen durch zwei Mikrometerschrauben variiert werden kann. Zu Beginn der Messung erfolgt die Tarierung des Prüfraumes ohne Prüfkörper mittels Mikrometerschraube. Anschließend wird mit einer zweiten Mikrometerschraube der Quecksilberspiegel zunächst

gesenkt, um das zu untersuchende Pellet in den Prüfraum legen zu können, und dann angehoben, bis das Pellet komplett mit Quecksilber umhüllt ist. Ist dieser Zustand erreicht, wird dies über den Kontaktsensor im Deckel des Prüfraumes angezeigt und das Pelletvolumen kann an der Mikrometerschraube abgelesen werden.

$$GD = \frac{m_P}{V_P} \quad (3.4)$$

Mit:

GD	Roh- oder Partikeldichte in g/cm^3
m_P	Masse eines Pellets in g
V_P	Volumen eines Pellets in cm^3

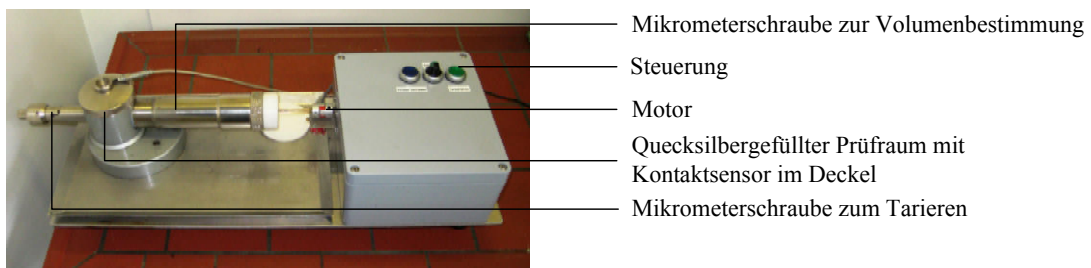


Abb. 3.15: Prüfgerät zur Volumenbestimmung von Biomassepellets mittels Quecksilberverdrängung am ITUN

Wassergehalt

Ein weiterer Faktor, der zum einen die Lagerstabilität in Verbindung mit biologischen Abbauprozessen und zum anderen das Verbrennungsverhalten beeinflusst, ist der Wassergehalt der Pellets. Zur Bestimmung des Wassergehaltes findet die DIN EN 14774-2 [13] Anwendung. Dazu werden mindestens 300 g Pellets abgewogen und anschließend im Ofen für 24 h bei $105 \pm 2^\circ C$ bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach dem Abkühlen der Pellets wird erneut die Masse ermittelt und der Wassergehalt kann gemäß Formel 3.5 berechnet werden.

$$w = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (3.5)$$

Mit:

w	Wasser in $Ma.\%$
m_1	Masse der leeren Trocknungsschale in g
m_2	Masse der Trocknungsschale mit Pellets vor dem Trocknen in g
m_3	Masse der Trocknungsschale mit Pellets nach dem Trocknen in g

3.4.3 Bildgebende Analyseverfahren

Verschiedene Bildaufnahmen von Pellets, wie Stereo- oder Rasterelektronenmikroskop-aufnahmen (SM bzw. REM), lassen mögliche Schlüsse auf Bindemechanismen, Faser- und Elementverteilungen zu. Für die Betrachtung der Pellets sowie des Ausgangsmaterials und der aufbereiteten Varianten wird das am ITUN vorhandene Stereomikroskop SteREO Discovery V12 (mit 12-fach-Zoom) der Carl Zeiss AG genutzt. Mit Hilfe der Software AxioVision und den verschiedenen Modulen können dreidimensionale Bilder dargestellt werden. Weitere abbildende Analysen werden mit dem Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop JEOL JSM-7001F der JEOL GmbH am Institut für Geologie der TU BAF durchgeführt. Für diese Untersuchungen werden ausgewählte Pelletproben in einer Sputter-Anlage unter Vakuum mit Kohlenstoff bedampft. Anschließend werden unter Hochvakuum standardisierte REM-Aufnahmen angefertigt. Des Weiteren wird eine Auswahl an Pelletproben zum einen mit der Methode der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht, um eine punktuell prozentuale Elementaranalyse der Oberfläche zu erhalten. Es ist zu beachten, dass aufgrund der Überlagerung des Kohlenstoffs aus der C-Bedampfung der Pellets in der Sputter-Anlage, dieser geräteintern herausgerechnet wird. Andere Elemente werden dadurch nicht beeinflusst. Zum anderen wird das sog. Mapping, zur flächendeckenden Verteilung der Elemente, angewendet. In beiden Fällen werden die Proben mit $3-20\text{ keV}$ bestrahlt.

3.4.4 Erfassung und Ermittlung prozessbegleitender Parameter

Temperaturen

Während der Verdichtung mittels Pelletpresse wird zum einen die Temperatur im Presseninneraum (ϑ_{PR}) über einen integrierten Sensor dokumentiert. Zum anderen erfolgt die Erfassung der Temperatur der produzierten Pellets ϑ_P mittels Infrarot-Thermometer IR 1600-50D von Voltcraft.

Durchsatz und produktionsbedingter Feinanteil

Der massebezogene Durchsatz, sowohl der Mühle als auch der Pelletpresse, ist der Quotient des erzeugten Produktes (zerkleinertes Material bzw. Pellets mit oder ohne Feinanteil) über die Versuchszeit (Formel 3.6). Bei der Pelletierung ist der Gesamtdurchsatz (inkl. Feinanteil) bzw. der Pelletdurchsatz (ohne Feinanteil) zu unterscheiden. Der produktionsbedingte Feinanteil, sprich unverdichtetes Material, ergibt sich aus der manuellen Absiebung der gekühlten Pellets mit Hilfe eines 3,15 mm-Siebes und wird prozentual angegeben.

$$\dot{m}_{Z/P/Pel} = \frac{m_{Z/P/Pel}}{t} \quad (3.6)$$

Mit:

$\dot{m}_{Z/P/Pel}$	Durchsatz der Zerkleinerung bzw. Pelletierung (mit (Pel) bzw. ohne (P) Feinanteil) in kg/h
$m_{Z/P/Pel}$	Masse des erzeugten Produktes während der Zerkleinerung bzw. Pelletierung (mit (Pel) bzw. ohne (P) Feinanteil) in kg
t	Versuchszeit in h

Energieverbrauch

Über den Netzanalysator Fluke 345 der Firma Fluke, welcher zwischen dem öffentlichen Stromnetz und der jeweiligen Anlage (Mühle, Pelletpresse) geschaltet wird, erfolgt die Messung von Strom und Spannung im 5 Sekunden-Takt. Geräteintern wird anschließend die Wirkenergie ausgegeben. Durch die zeitliche Aufsummierung der Messwerte kann der Energieverbrauch ermittelt werden. Der spezifische Energieverbrauch ist gemäß Gleichung 3.7 der Quotient der aufgenommenen elektrischen Wirkenergie der jeweiligen Maschine bezogen auf die in dem Untersuchungszeitraum produzierte Masse (zerkleinertes Material bei der Mühle oder Pellets inkl. Feinanteil aus der Presse).

$$E_{spez,Z/Pel} = \frac{E_{Z/Pel}}{m_{Z/Pel}} \quad (3.7)$$

Mit:

$E_{spez,Z/Pel}$	spezifischer Energieverbrauch der Zerkleinerung bzw. Pelletierung in Wh/kg
$E_{Z/Pel}$	elektrische Wirkenergie (Energieverbrauch) der Zerkleinerung bzw. Pelletierung in Wh
$m_{Z/Pel}$	Masse an zerkleinertem Material bzw. Pellets inkl. Feinanteil in kg

3.5 Fehlerbetrachtung

Bei der Durchführung der unterschiedlichen Versuche und Prüfmethoden treten verschiedene Fehlerquellen auf. Messgeräteungenauigkeiten, wie Abweichungen der verwendeten Wägesysteme oder des Schnellfeuchtebestimmers, haben im Vergleich zu individuellen Bedienfehlern einen sehr geringen Einfluss auf die gemessenen Analysewerte. Tabelle 3.4 zeigt die verwendeten Messgräte mit Messbereich und Reproduzierbarkeit.

Tab. 3.4: Mess- und Fehlerbereiche häufig genutzter Messgeräte

Messgerät	Messbereich	Reproduzierbarkeit
Feinwaage Typ PLS6200-2A der Firma Kern & Sohn GmbH	20 - 6200 g	10 mg
Grobwaage (Plattformwaage) Typ PCE-PM 150 der Firma PCE Deutschland GmbH	1 - 150 kg	50 g
Schnellfeuchtebestimmer Typ Kern MRS 120-3 der Firma Kern & Sohn GmbH	0 - 100 % Probengewicht 0,2 - 62 g	bei ca. 1 $g \pm 0,2 \%$ bei ca. 10 $g \pm 0,02 \%$
Netzanalysator Typ Fluke 345 der Firma Fluke	Strommessung 0 bis 2000 A DC oder 1400 AC_{eff} Spannungsmessung 0 bis 825 V DC oder AC_{eff}	bei $I > 10 A \pm 3 \%$ bei $I < 10 A \pm 0,5 A$ bei $U > 1 V \pm 3 \%$ bei $U < 1 V \pm 0,03 \%$
Infrarot-Thermometer Typ IR 1600-50D der Firma Voltcraft	-50 bis +1600 $^{\circ}C$	$\pm 1 \%$ bzw. 1 $^{\circ}C$

Das Material selbst stellt die erste Hauptfehlerquelle dar. Biogene Materialien besitzen von Natur aus z. T. signifikante chemische und physikalische Inhomogenitäten. Durch Homogenisierung im Mischer wird versucht dem entgegenzuwirken. Damit keine Entmischungerscheinungen auftreten, wird auf möglichst wenig Umschlagprozesse geachtet.

Die manuelle und diskontinuierliche Zugabe des Ausgangsmaterials während der Zerkleinerung führt bei gleichen Versuchsbedingungen zu abweichenden Ergebnissen bei Durchsatz und spezifischem Energieverbrauch. Für eine bessere Reproduzierbarkeit der Ergeb-

nisse wurden Doppelbestimmungen durchgeführt. Dabei werden die Abweichungen um den Mittelwert im Ergebnisteil als Fehlerbalken angegeben. Zur generellen Reduzierung der Schwankungsbreite könnte eine automatische Zugabe des Materials über eine drehzahlgeregelte Rüttelrinne oder Förderschnecke beitragen, die jedoch nicht zur Verfügung standen.

Bei der Probenahme für die Bestimmung des Wassergehaltes mittels Schnellfeuchtebestimmer wird vor und nach der Konditionierung drei Mal etwa 1 g von einer Chargengröße von 10-15 kg entnommen. Dies entspricht lediglich einem Anteil von 0,02-0,03 Ma.-%, wobei eine Abweichung innerhalb der drei Proben von $\pm 0,5$ Ma.-% toleriert wird. Die Ermittlung des Wassergehaltes unterliegt somit einigen Ungenauigkeiten. Durch eine größere Entnahmemenge mit anschließender Probenteilung könnte dieser Fehler (geschätzte 1 %) reduziert werden. Dies war aus zeitlichen Gründen während des Versuchsbetriebes nicht umsetzbar.

Die Solltemperatur von 45 °C im Presseninnenraum vor jedem Versuchsbeginn kann aufgrund der unterschiedlichen Warmfahrzeiten, z. B. in Abhängigkeit der Presseneinstellungen, um bis zu 3 °C abweichen. Damit kein ein Qualitätseinfluss auf die Pellets entstehen, da Bindemechanismen temperaturabhängig sind. Allerdings lässt sich dieser aufgrund der natürlichen Inhomogenität des Materials nur schwer beziffern.

Die Frequenzen der Presse und Förderschnecke werden über ein Stellrad mit einer Anzeigegenauigkeit von $\pm 0,1$ Hz definiert. Dementsprechend können Schwankungen im Förderverhalten entstehen. Allerdings wird dieser Einfluss, im Vergleich zu den schwankenden Eigenschaften des Versuchsmaterials, eher als gering bewertet.

Die Genauigkeit der Zeitmessung während der Erstellung des Pelletierprotokolls beträgt 1 min. Die Erfassung der Leistungsdaten während des Prozesses liegt im 5 Sekunden-Takt. Dadurch entstehen bei der Festlegung von Beginn und Ende des Versuches und der Datenübertragung Fehler, die sich auf die Ermittlung von Durchsatz und spezifischen Energiebedarf auswirken. Dadurch lassen sich Abweichungen von 10-15 % bei Doppelversuchen mit gleichbleibenden physikalisch-mechanischen Eigenschaften erklären. Diese Fehlerquelle spielt beim Zerkleinerungsprozess gleichermaßen eine Rolle. Durch erneute Wiederholung der Versuche (3-fache Versuchsdurchführung) in Verbindung mit einem erhöhten Versuchsaufwand könnte der Fehler minimiert und Ausreißer detektiert werden.

Die Verdichtung im Einzelpresskanal beinhaltet folgende Fehlerquellen:
Das gleichmäßige und reproduzierbare Befüllen des Vorverdichtungsraumes gestaltet sich besonders bei der Verarbeitung von Heu oder Mischungen mit Heu schwierig. Dies begründet sich vor allem mit der Faserlänge. Dadurch entstehen teils unterschiedliche Schichtdicken im Pellet. Dies hat sowohl auf die geleistete Verdichtungsarbeit als auch auf die Einzelrohddichten Einfluss. Durch die Herstellung von stets fünf vergleichbaren Einzelpel-

lets und der Bildung von Mittelwerten werden die Auswirkungen dieser Effekte minimiert. Eine weitere Fehlerreduzierung ist nur durch die Produktion von noch mehr Einzelpellets zu erzielen, was aber im laufenden Versuchsbetrieb nicht durchführbar war. Zur Verdeutlichung des Schwankungsbereiches erfolgt stets die Darstellung von Minimum und Maximum im Ergebnisteil, wobei diese durchschnittlich 2 - 20 % um den Mittelwert schwanken.

Als abschließende Fehlerquelle sind Verunreinigungen von Messgeräten vor allem durch Staub zu nennen. Hier sind Geräte wie der Camsizer[®] P4 (Messbereich 20 μm bis 30 mm) und das REM (inkl. EDX und Mapping) zu erwähnen. Zwar wurde nach jeder Analyse eine Reinigung durchgeführt, dennoch sind anhaftende Staubpartikel nicht auszuschließen. Beim Camsizer[®] P4 ist zusätzlich das Phänomen der Agglomeration von Partikeln aufgrund elektrostatischer Anziehungskräfte zu nennen. Dadurch kann es zu Fehlern im oberen Körnungsbereich kommen. Des Weiteren wurden vor allem bei den Heuchargen längere Fasern als der zulässige Messbereich detektiert. Durch zweifache Wiederholung der Analyse werden diese Einflüsse auf ein Minimum begrenzt. Der Schwankungsbereich der mittleren Korngröße x_{50} liegt bei Doppelbestimmungen dennoch bei 1 - 5 % und könnte lediglich durch weitere Wiederholungen reduziert werden. Allerdings war das im Rahmen des Versuchsplans aus zeitlichen Gründen nicht realisierbar.

4 Versuchsergebnisse und Diskussion

4.1 Versuchskomplex I: Untersuchungen zur Pelletierfähigkeit von Heu und Gärresten

4.1.1 Untersuchungen zum Zerkleinerungs- und Pelletierverhalten der Einzelrohstoffe (1. Versuchsreihe)

Im ersten Schritt wurden zur Beurteilung des Zerkleinerungserfolges als Hauptkriterium der spezifische Energiebedarf sowie die Korngrößenverteilungen festgelegt. Zur weiteren Diskussion erfolgte die Ermittlung sekundärer Parameter: Materialdurchsatz, Mahlraumtemperatur, Schüttdichte und Wassergehalt der zerkleinerten Biomasse. Bei der Zerkleinerung mittels Hammermühle im Technikumsmaßstab wurden die Lochweite des Austragssiebes als variable Größe definiert.

Im zweiten Schritt fand die Pelletierung der zerkleinerten Heu- und Gärrestchargen statt. Auch hier liegt der Fokus auf dem spezifischen Energieverbrauch. Weiterhin wurden die physikalisch-mechanischen Eigenschaften sowie der Wassergehalt der Pellets ermittelt und den Vorgaben der ISO 17225-6 [20] gegenübergestellt. Weitere Kriterien zur Beurteilung von Prozessführung und Pelletiererfolg sind: Durchsatz, Pressenraum- und Pellettemperatur.

Die umfassenden Ergebnisse zum Zerkleinerungs- und Pelletierverhalten inkl. Abweichungen vom Mittelwert sind in Anhang E dargestellt.

Zerkleinerung und Verdichtung von Heu

Nach Auflösung der Heuballen erfolgt die Grobzerkleinerung mittels Strohhäcksler (H). Bei einem Durchsatz von 144 kg/h wird für die Grobzerkleinerung von Heu durchschnittlich eine spezifische Energie von 17 Wh/kg benötigt. Abb. 4.1 zeigt das grob zerkleinerte Heu, welches das Basismaterial für alle nachfolgenden Zerkleinerungsschritte darstellt. Da Durchsatz und Energieverbrauch der händischen Ballenauflösung und der Grobzerkleinerung für alle weiteren Versuche gleich sind, werden diese im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die Feinzerkleinerung auf ein pelletierfähiges Material kann problemlos mit der Hammermühle (HM) erfolgen. Das Heu, beispielhaft zerkleinert mit einem 4 mm Siebeinsatz (SLW Sieblochweite), ist in Abb. 4.2 bzw. 4.3 dargestellt.



Abb. 4.1: Grob zerkleinertes Heu als Basismaterial, Zerkleinerungsgrad H SLW 25 mm



Abb. 4.2: Fein zerkleinertes Heu (TK-1164), Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm



Abb. 4.3: Stereomikroskopaufnahme von Heu (TK-1164), Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm

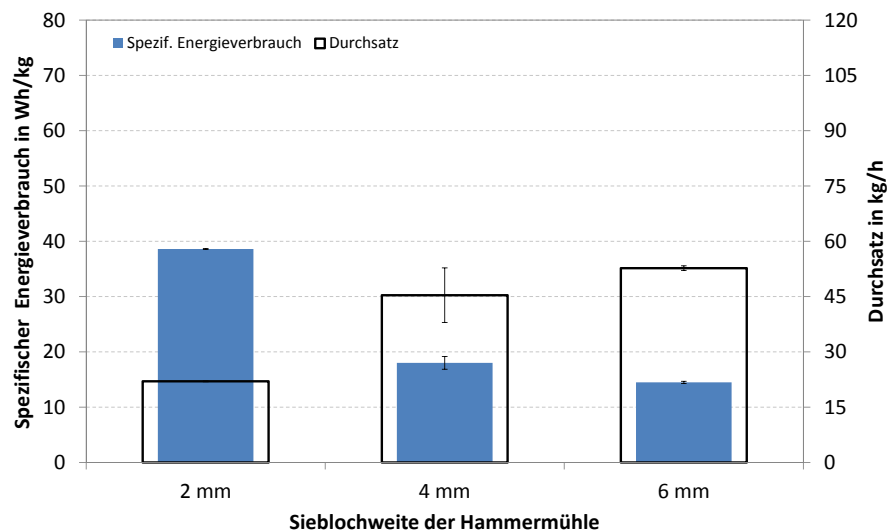


Abb. 4.4: Spezifische Zerkleinerungsenergie von Heu (TK-1164) in Abhängigkeit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstragssiebes

Durchsatz und spezifischer Energieverbrauch verhalten sich bei der Zerkleinerung von Heu gegenläufig. Aus Abb. 4.4 geht deutlich hervor, dass mit kleiner werdender Sieblochweite der Durchsatz sinkt und mehr Energie benötigt wird. Der Energieanstieg spiegelt sich auch in einer leichten Erwärmung der Mühle wieder - die Mahlraumtemperatur steigt von 27,4 °C (HM SLW 6 mm) auf 32,5 °C (HM SLW 2 mm). Im Vergleich zur Zerkleinerung von Waldrestholz unter vergleichbaren Bedingungen wird zwar weniger Energie benötigt, allerdings kann nicht vergleichbar viel Heu durchgesetzt werden (Waldrestholz 51 Wh/kg und 62 kg/h bei HM SLW 4 mm [37]). Ursache dafür ist die wesentlich gerin-

gere Schüttdichte von Heu im Vergleich zu Holz (Heu HM SLW 4 mm BD 149 kg/m³, Waldrestholz HM SLW 4 mm BD 299 kg/m³ [37]).

Aufgrund der fasrigen Struktur des Materials (Abb. 4.2 bzw. 4.3) wird zur weiteren Bewertung eine optische Fasergrößenverteilung basierend auf einer dynamischen Bildverarbeitung nach ISO 13322-2 [32] zur Beurteilung der Partikelgrößen angewendet. Die resultierenden Verteilungssummen für Faserlänge und -breite sind in Abb. 4.5 und 4.6 dargestellt.

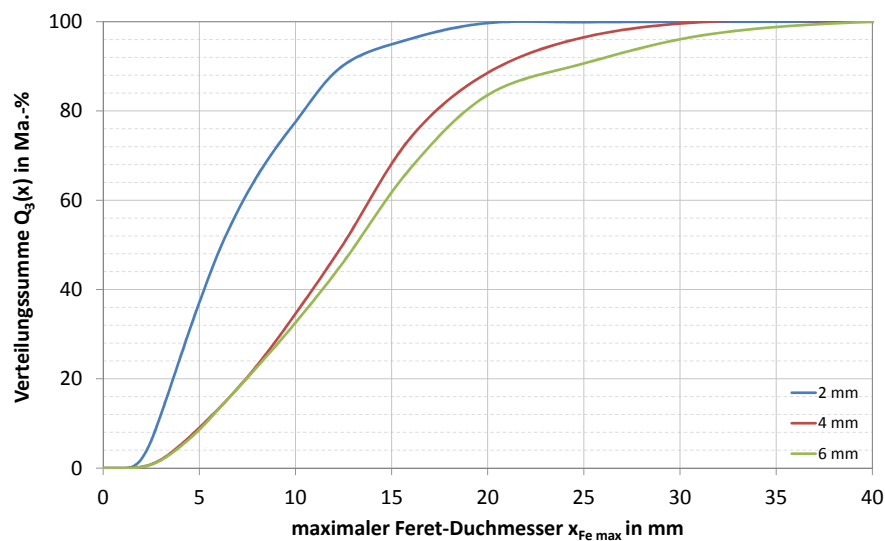


Abb. 4.5: Verteilungssummenfunktion von Heu mit dem Zerkleinerungsgrad HM SLW 2, 4, 6 mm (TK-1164) in Abhängigkeit von der Faserlänge

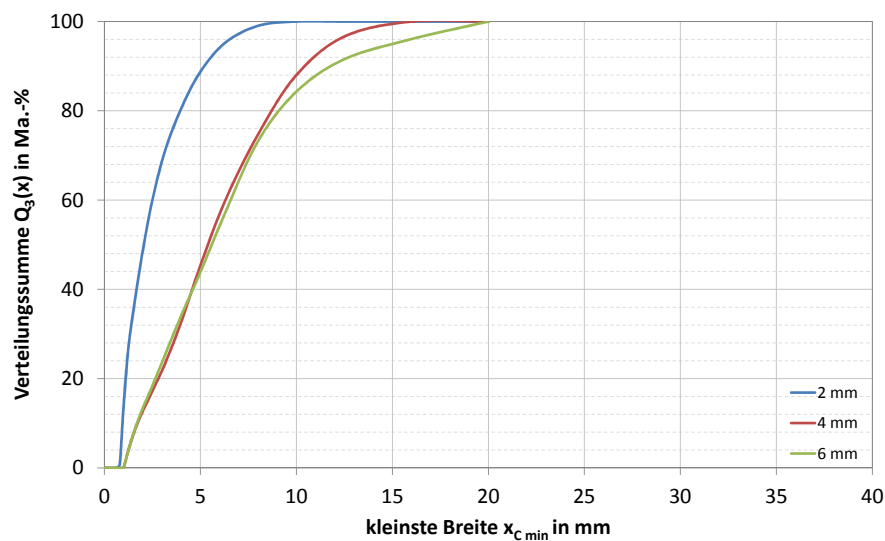


Abb. 4.6: Verteilungssummenfunktion von Heu mit dem Zerkleinerungsgrad HM SLW 2, 4, 6 mm (TK-1164) in Abhängigkeit der Faserbreite

Wie in Abb. 4.5 und 4.6 skizziert, ist für die Fasergrößenverteilung von Heu die Abhängigkeit der Mühlensieblochweite erkennbar. Sinkt die Sieblochweite, besitzt die Verteilungssummenkurve einen steileren Anstieg und somit einen engeren Korngrößenbereich. Dabei zeigt Abb. 4.5 die Verteilung der Faserlängen ($x_{Fe_{max}}$) und Abb. 4.6 der Faserbreiten ($x_{C_{min}}$). Das Basismaterial mit dem Zerkleinerungsgrad H SLW 25 mm kann aufgrund einer optischen Bewertung nicht mit dem dynamischen Bildverarbeitungssystem aussagekräftig vermessen werden, da der Camsizer[®] P4 lediglich einen Messbereich bis 30 mm besitzt. Wie Abb. 4.1 zeigt, liegt ein Großteil der Faserlängen über dem Messbereich, sodass bei Versuchen mit dem Basismaterial keine repräsentativen Längen- und Breitenverteilungen erzeugt werden konnten.

Auffällig ist, dass eine Zerkleinerung mit einer Sieblochweite von 6 bzw. 4 mm nur geringe Unterschiede in der Verteilung der Fasergrößen zeigt. Lediglich im größeren Bereich (ab 10 mm) geht der Kurvenverlauf leicht auseinander. Dieser geringe Einfluss wird durch die Bestimmung der mittleren Korngröße bestätigt - die x_{50} -Werte liegen lediglich $\leq 1,1 Ma.-%$ auseinander (Anhang Tab. E.3). Eine Erklärung für diese Auffälligkeit ist die um 8 % geringere freie Siebfläche des 6 mm Siebes im Vergleich zum 4 und 2 mm Sieb (Tab. A.1). Dadurch findet eine feinere Aufmahlung statt [71]. Einen ersichtlichen Einfluss gibt es hingegen bei der Zerkleinerung mit einer Sieblochweite von 2 mm - hier bildet sich ein deutlich engerer Korngrößenbereich aus.

Prinzipiell entstehen stets Fasern, die wesentlich größer als die verwendete Sieblochweite der Mühle sind. Aufgrund der Faserausrichtung während der Zerkleinerung entstehen Faserlängen bis zu 40 mm (bei HM SLW 6 mm) - etwa 97 Ma.-% (bei HM SLW 2 mm) bis 85 Ma.-% (bei HM SLW 6 mm) liegen über der genutzten Sieblochweite. Auch die Faserbreiten sind mit etwa 70 Ma.-% (bei HM SLW 2 mm) bis 55 Ma.-% (bei HM SLW 6 mm) deutlich über den Abmessungen der jeweiligen Sieblochweite. Hier ist die Flexibilität als Eigenschaft der Heufasern zu nennen. Durch die Rotation des Mühlenrotors sowie die Verwendung eines Absaugsystems, um Verstopfungen zu vermeiden, werden Kräfte auf die Heufasern ausgeübt und drücken teils, infolge einer elastischen Verformung, die Faser durch das Siebloch.

Nach erfolgreicher Zerkleinerung wurde das Heu unter gleichbleibenden Prozessbedingungen (Anhang Tab. D.1) pelletiert. Zur Bewertung des Pelletierprozesses und -erfolges sind in Abb. 4.7 zunächst die Schüttdichten und Abriebfestigkeiten in Abhängigkeit der Zerkleinerungsgrade dargestellt.

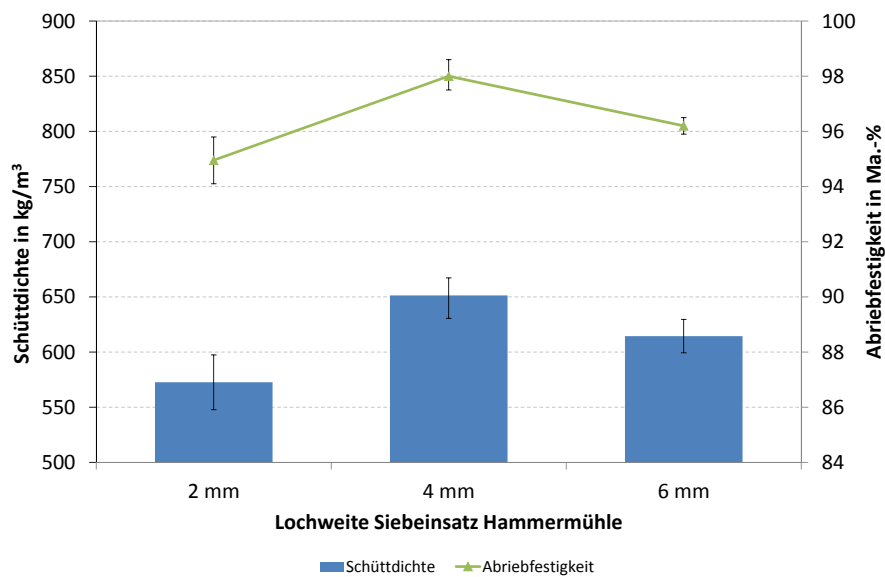


Abb. 4.7: Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Heupellets (TK-1164) in Abhängigkeit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstragssiebes bei gleichen Kompaktierungseinstellungen

Für die Zerkleinerung von Heu für eine anschließende Pelletierung scheint die genutzte Hammermühle mit einer Lochweite des Austragssiebes von 4 mm, auch im Vergleich zu anderen Mühlenarten im Technikumsmaßstab [38], sehr geeignet zu sein. Bei diesem Zerkleinerungsgrad und den gewählten Prozessparametern werden im Vergleich der drei Sieblochweiten die besten physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften erzielt (Abb. 4.7 bzw. Anhang Tab. E.4). Die Schüttdichte und die Abriebfestigkeit dieser Heupellets erfüllen bei weitem die Vorgabe der ISO 17225-6 [20] ($BD\ 665\ \text{kg/m}^3$ und $DU\ 98,0\ \text{Ma.-%}$ bei HM SLW 4 mm). Wird der Zerkleinerungsgrad vergrößert (HM SLW 2 mm) oder verkleinert (HM SLW 6 mm), sinken die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften, wobei die Verschlechterung hin zum feineren (HM SLW 2 mm) größer ist als zum gröberen (HM SLW 6 mm) Ausgangsmaterial.

Ein Vergleich der Korngrößenverteilungen der wieder aufgelösten, unterschiedlich zerkleinerten Heuchargen zeigt, dass zwischen 4 und 6 mm Zerkleinerung nur wenige Unterschiede erkennbar sind - lediglich im gröberen Bereich sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Die größeren Fasern werden durch Mahlung während der Verdichtung zwischen Koller und Matrizze zerkleinert. Dieser Zerkleinerungseffekt wird sichtbar, wenn Pellets in Wasser aufgelöst, luftgetrocknet und mittels Faseranalyse (Camsizer[®]-Analyse) erneut bewertet werden. Die Verteilungen der Faserlängen im Pellet nähern sich bei allen pelletierten Heuchargen einander an (Abb. 4.8 bzw. Anhang Tab. E.1), wobei je länger die Fasern sind, umso stärker ist die Zerkleinerung zwischen Koller und Matrizze. Zusätzlich wird dieser Zerkleinerungseffekt in höheren Energieverbräuchen der Pelletierung erkenn-

bar (Abb. 4.9).

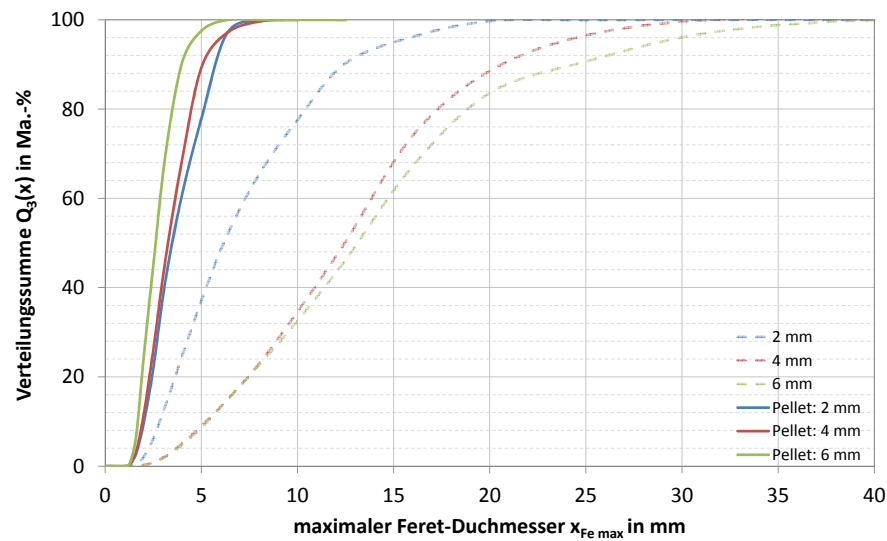


Abb. 4.8: Verteilungssummenfunktion der im Heupellet vorhandenen Faserlängen nach Verdichtung der unterschiedlichen Zerkleinerungsgrade (gestrichelt: ursprüngliche Verteilungssummenfunktion vor Pelletierung)

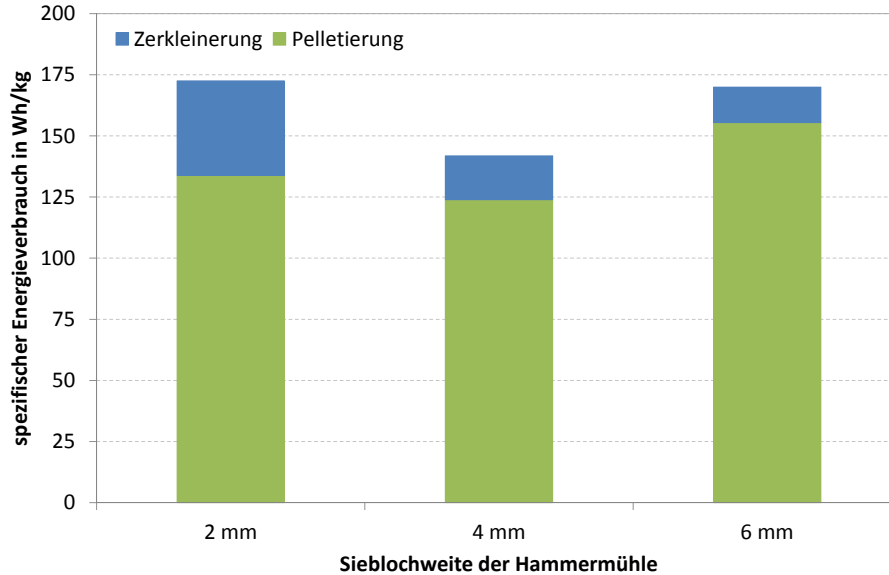


Abb. 4.9: Spezifischer Gesamtenergiebedarf (Zerkleinerung und Pelletierung im Technikumsmaßstab) für die Herstellung von Heupellets (TK-1164) mit unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden

In Abb. 4.9 sind die Mittelwerte der Energieverbräuche von Zerkleinerung mittels Hammermühle und Pelletierung unterschiedlicher Heuzerkleinerungsgrade dargestellt. Auch in Summe schneidet der Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm am besten ab - mit 142 Wh/kg

wird im Vergleich zu 172 (bei HM SLW 2 mm) bzw. 170 Wh/kg (bei HM SLW 6 mm) am wenigsten Energie zur Verarbeitung von gehäckseltem Heu benötigt.

Die Schwankungsbreiten können für den Zerkleinerungsprozess aus Anhang Tab. E.3 und für den Pelletierprozess aus Anhang Tab. E.4 entnommen werden. Dabei ist anzumerken, dass während der Verdichtung zu Pellets stets größere Energieunterschiede (durchschnittlich etwa $\pm 20 \text{ Wh/kg}$) zu verzeichnen sind. Entsprechend ist bei der Pelletierung (Betrachtung ohne Zerkleinerungsprozess) zwischen HM SLW 2 mm und HM SLW 4 mm kein signifikanter Unterschied vorhanden. Bei der Zerkleinerung von Heu sind maximale Schwankungsbreiten von $\pm 1,2 \text{ Wh/kg}$ aufgetreten.

Fazit der Heuverarbeitung

Für die Pelletierung von biogenen Materialien mit einem Pelletdurchmesser von 6 mm wird eine Soll-Korngröße von maximal 4 mm als Richtwert empfohlen, was sich an der Verarbeitung von Sägespänen orientiert [56]. Aus der Zerkleinerung von Heu mittels der untersuchten Hammermühle im Technikumsmaßstab resultieren wesentlich größere Faserlängen und -durchmesser. Beim Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm sind ca. 90 Ma.-% der Heufasern länger und etwa 65 Ma.-% breiter als die Sieblochweite der Hammermühle. Dennoch erscheint HM SLW 4 mm bzgl. Durchsatz und spezifischen Energieeintrag als der aussichtsreichste Zerkleinerungsgrad. Diese Vermutung wird durch den Pelletierungsprozess bestätigt. Unter gleichen Bedingungen erzielt der Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm die höchste Schüttdichte und Abriebfestigkeit bei geringstem Gesamtenergieeinsatz (Zerkleinerungs- und Pelletierprozess). Die breite Korngrößenverteilung ermöglicht somit optimale formschlüssige Bindungen und bestätigt damit andere Halmgutuntersuchungen [50].

Zerkleinerung und Verdichtung der Gärreste

Das Ausgangsmaterial (Abb. 4.10) wird mit Hilfe der Hammermühle und vier verschiedenen Austragssieben zerkleinert. Wie aus Abb. 4.10 und 4.11 ersichtlich, handelt es sich bei den Gärresten, im Vergleich zum Heu, um ein faserarmes Material, dessen ursprüngliche Struktur (Eingangssubstrate der BGA) nicht mehr erkennbar ist. Dieses optische Erscheinungsbild wird durch die Analysen von Zellulose, Hemizellulose und Lignin bestätigt (Anhang Tab. C.2) - die untersuchten Gärreste weisen durchschnittlich 60 %-Punkte weniger Zellulose und keine Hemizellulose mehr auf. Durch den Abbau dieser leicht zugänglichen Stoffe durch die Mikroorganismen in der BGA fand eine Ligninanreicherung statt - somit sind 70 %-Punkte mehr Lignin im Gärrest als im Heu.



Abb. 4.10: Ausgangsmaterial
Gärresten TK-1480



Abb. 4.11: Stereomikroskopaufnahme von
Gärreste (TK-1480),
Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm

In Abhängigkeit der Sieblochweite ist in Abb. 4.12 der spezifischen Energiebedarf und Durchsatz der Hammermühle bei der Zerkleinerung der Gärreste (Charge TK-1480) dargestellt. Parallel zeigt Abb. 4.13 die äquivalenten Verteilungssummen der Korngrößen nach DIN EN 15149-2 [15].

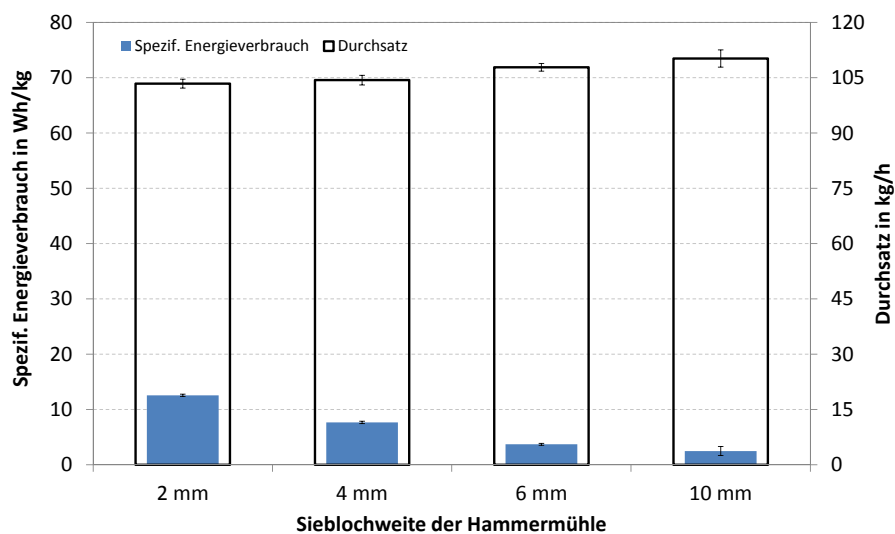


Abb. 4.12: Spezifische Zerkleinerungsenergie und Durchsatz von Gärresten (TK-1480) in
Abhängigkeit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstragssiebes

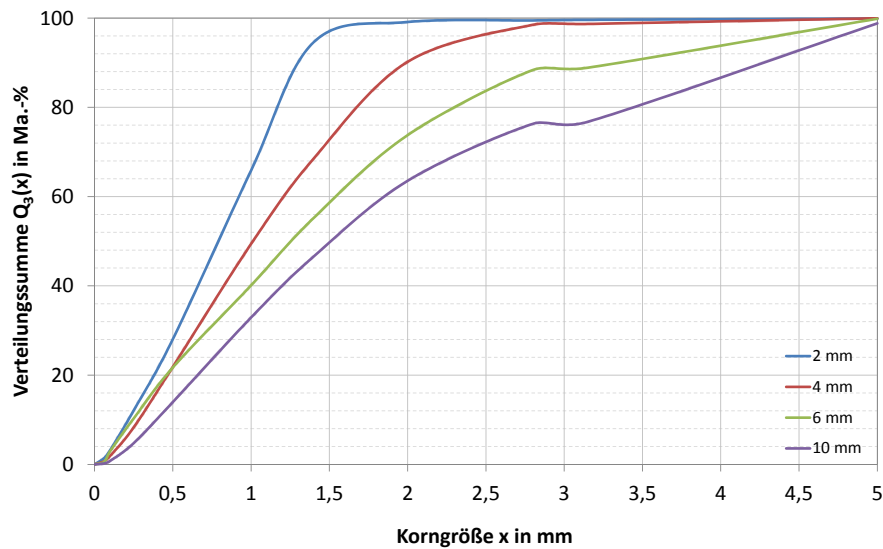


Abb. 4.13: Verteilungssummenfunktion der unterschiedlich zerkleinerten Gärreste (TK-1480) in Abhängigkeit der entstehenden Korngröße

In Abb. 4.12 ist deutlich zu erkennen, dass der spezifische Energieverbrauch der Hammermühle während der Zerkleinerung der Gärreste mit zunehmender Sieblochweite abnimmt. Bei einer Sieblochweite von 2 mm wurde der höchste Energiebedarf von $12,6\text{ Wh/kg}$ gemessen. Dieser kann um 80 % auf $2,5\text{ Wh/kg}$ bei 10 mm Lochweite deutlich reduziert werden. Der Durchsatz von 103 kg/h (HM SLW 2 mm) bis 110 kg/h (HM SLW 10 mm) ist nahezu unabhängig vom Siebeinsatz und liegt im Schwankungsbereich der Mühle, zeigt dennoch die zu erwartende Tendenzen. Für die Zerkleinerung der Gärreste wird, im Vergleich zu Holz unter vergleichbaren Bedingungen, wesentlich weniger Energie bei höheren Durchsätzen benötigt (Waldrestholz mit 51 Wh/kg und 62 kg/h [37] oder Fichten-/Kiefernholz mit 32 Wh/kg und 53 kg/h [59] je bei einer Sieblochweite von 4 mm).

Wie aus Abb. 4.11 hervorgeht, handelt es sich nicht vorrangig um Fasermaterial, sondern eher um agglomerierte, kugelhähnliche Partikel. Aus diesem Grund fand zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung die standardisierte Siebanalyse nach DIN EN 15149-2 [15] Anwendung. Abb. 4.13 verdeutlicht, dass mit sinkender Sieblochweite die Verteilungssummenkurven einen steileren Anstieg und somit einen enger werdenden Korngrößenbereich aufweisen. Infolge der Prall- und Schlagbeanspruchung entstehen, unabhängig von der Lochweite, keine Partikel größer 5 mm . Allerdings bildet sich ein verhältnismäßig hoher Feinanteil von 14 Ma.-% (SLW 10 mm) bis etwa 28 Ma.-% (SLW 2 mm) von unter $0,5\text{ mm}$. Aufgrund einer gemäß DIN EN 1127-1 [11] gesteigerten Explosionsgefahr bei der Entstehung dieses Körnungsbereiches ist eine an den Verarbeitungsprozesse angepasste Absaugung empfehlenswert. Im Vergleich zu Heu (Abb.4.6, $x_{C\min}$ ist mit der eingesetz-

ten Maschenweite des Analysesiebes vergleichbar) wird bei der Gärrestzerkleinerung ein deutlich engerer Körnungsbereich mit kleineren Partikeln erzeugt.

Unter gleichbleibenden Prozessbedingungen (Anhang D.1) erfolgt die Pelletierung der zerkleinerten Gärrestchargen. Abb. 4.14 zeigt die erzielten Schüttdichten und Abriebfestigkeiten in Abhängigkeit der Zerkleinerungsgrade. Der Gesamtengeriebedarf der Herstellung von Gärrestpellets im Technikumsmaßstab ist für die untersuchten Zerkleinerungsgrade in Abb. 4.15 dargestellt.

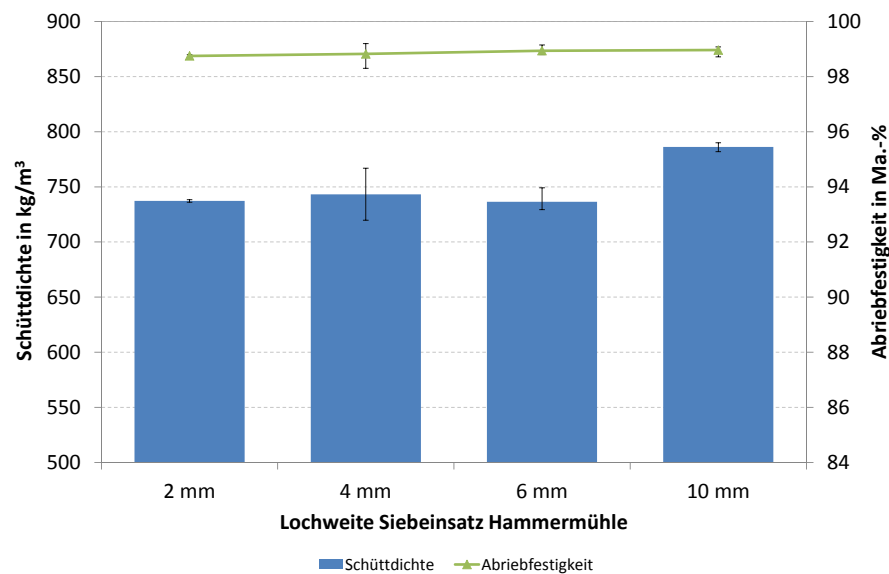


Abb. 4.14: Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Gärrestpellets (TK-1480/1410) in Abhängigkeit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstragssiebes bei gleichen Kompaktierungseinstellungen

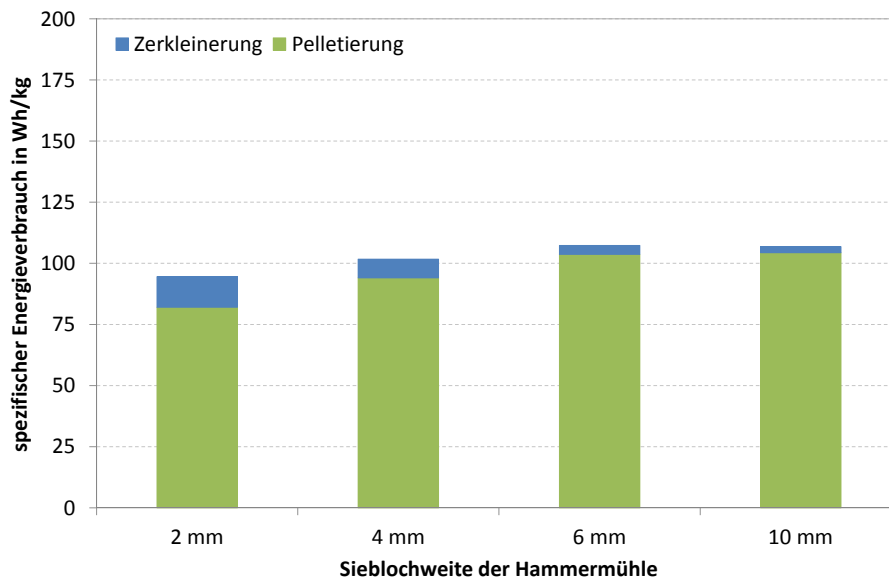


Abb. 4.15: Spezifischer Gesamtenergiebedarf (Zerkleinerung und Pelletierung im Technikumsmaßstab) für die Herstellung von Gärrestpellets (TK-1480/1410) mit unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden

Die Pelletierung von Gärresten verlief ohne besondere Herausforderungen - alle erzeugte Gärrestpellets weisen qualitativ hochwertige physikalisch-mechanische Eigenschaften auf (Abb. 4.7 bzw. Anhang Tab E.4). Die geforderten Grenzwerte der ISO 17225-6 [20] bezüglich Schüttdichte und Abriebfestigkeit werden mit Werten von $743-786 \text{ kg/m}^3$ und $98,8-99,0 \text{ Ma.-%}$ deutlich übertroffen. Allerdings ist zu erwähnen, dass lediglich eine Verdichtung von 1 zu 1,15-1,17 (Verhältnis der Schüttdichte von Pellets zum Ausgangsmaterial) realisiert wurde, da das Ausgangsmaterial bereits eine hohe Schüttdichte ($637-670 \text{ kg/m}^3$) aufweist. Schütt- und Rohdichten aller drei Zerkleinerungsgrade 2, 4 und 6 mm liegen unter Beachtung des Fehlerbereiches tendenziell auf einem Niveau. Nur bei der Pelletierung von 10 mm konnten signifikant höhere Schüttdichten erzielt werden.

Der spezifische Energiebedarf steigt mit abnehmendem Zerkleinerungsgrad (Abb. 4.15). Die bereits erwähnten Zerkleinerungseffekte zwischen Koller und Matrice während der Pelletierung spielen bei der Verdichtung von Gärresten im Vergleich zu Heu eher eine untergeordnete Rolle. Dies begründet sich auch mit der im Vergleich zu Heufasern sehr geringen, mittleren Korngröße unabhängig von der verwendeten Sieblochweite des Hammermühlenausstrages. Wird der spezifische Zerkleinerungsaufwand addiert, gibt es zwischen der Verdichtung von 2, 4, 6 oder 10 mm zerkleinerten Gärresten unter Betrachtung der Schwankungsbreiten kaum Unterschiede im Gesamtenergieverbrauch (95-108 Wh/kg, Anhang Tab. E.3 und Tab. E.4). Damit liegt der spezifische Energieverbrauch von Zerkleinerung und Pelletierung deutlich unter der Holzverdichtung unter vergleichbaren Bedingungen (Fichten-/Kiefernholz 161 Wh/kg [59]). Des Weiteren bleiben Abrieb-

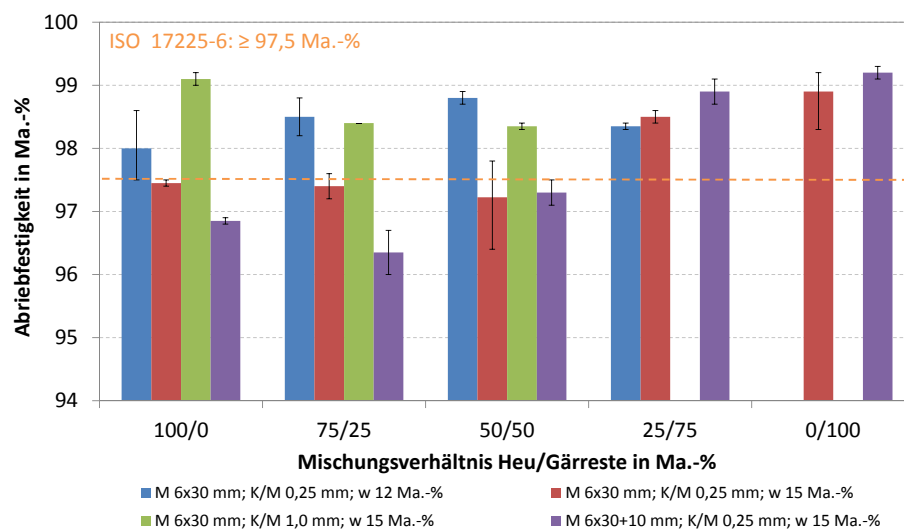
und Druckfestigkeit relativ konstant. Eine Auflösung der Pellets in Wasser, um die Partikel zu trennen, wie bei den Heupellets, war nicht möglich. Der Pellet verlor seine Stabilität, wurde schlammig und das Wasser nahm eine bräunliche Färbung an.

Fazit der Gärrestverarbeitung

Die Aufbereitung der untersuchten Gärreste zu qualitativ hochwertigen Pellets stellt keine besonderen Aufgaben an den Zerkleinerungs- und Pelletierungsprozess. Die in der Praxis empfohlene Korngröße von höchstens 4 mm [56] wird nur um ca. 13 Ma.-% bei HM SLW 10 mm bzw. um 6 Ma.-% bei HM SLW 6 mm überschritten. Zudem ist der spezifische Gesamtenergieaufwand im Vergleich zur Heu- (Abb. 4.9) bzw. Holzpelletierung ([37], [59]) unter vergleichbaren Bedingungen sehr gering. Aufgrund der teils sehr geringen Partikelgrößen ist sowohl bei der Zerkleinerung als auch bei der Pelletierung mit geeigneten Absaugsystemen zu arbeiten. Bei allen getesteten prozess- und rohstoffspezifischen Parametern können normkonforme Pellets hinsichtlich Schüttdichte und Abriebfestigkeit erzeugt werden. Dabei wird nur ein Mindestmaß an Energie benötigt. Das Material sollte ausschließlich auf Wassergehalte > 12 Ma.-% konditioniert werden, damit sich Bindemechanismen während der Verdichtung ausbilden. Die getesteten 15 Ma.-% erwiesen sich als ausreichend. Höhere Wassergehalte wären denkbar, erfordern allerdings eine Nachtrocknung der Pellets zur Sicherstellung der Lagerstabilität. Dieser Sachverhalt wurde nicht weiter betrachtet.

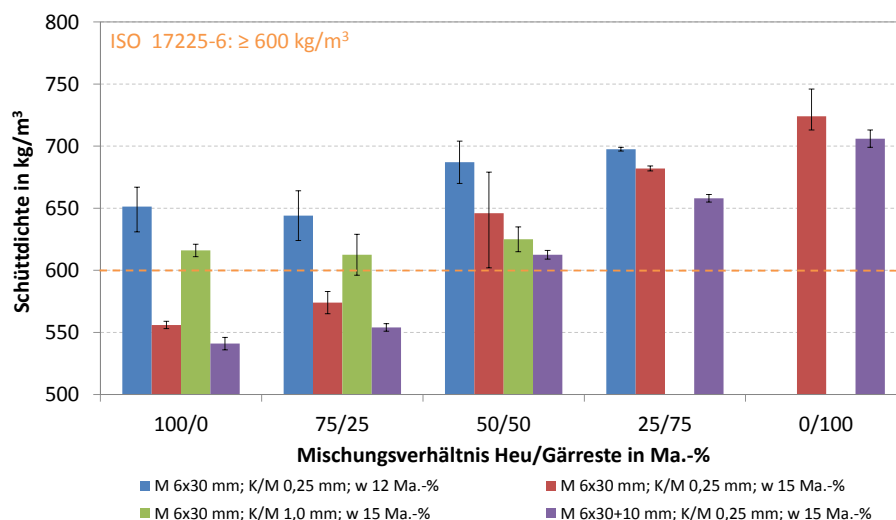
4.1.2 Untersuchungen zum Pelletieverhalten der binären Mischung aus Heu und Gärresten (2. Versuchsreihe)

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen den Einfluss des Mischungsverhältnisses der Ausgangsmaterialien auf die Qualität der Pellets bei unterschiedlicher Prozessführung. (Abb. 4.16 Abriebfestigkeiten, Abb. 4.17 Schüttdichten). Ausführliche Werte zur Bewertung der Pelletqualität sind im Anhang in Tab. E.5 zusammengefasst.



Für Versuchsvariationen ohne Angaben konnten aus technischen Gründen keine Pelletierungen durchgeführt werden.

Abb. 4.16: Abriebfestigkeiten der Heu/Gärrest-Mischpellets hergestellt bei unterschiedlichen Pelletierparametern



Für Versuchsvariationen ohne Angaben konnten aus technischen Gründen keine Pelletierungen durchgeführt werden.

Abb. 4.17: Schüttdichten der Heu/Gärrest-Mischpellets hergestellt bei unterschiedlichen Pelletierparametern

Zur Bewertung der Pelletqualität im Zuge der Prozessveränderung werden die Ergebnisse wie folgt zusammengefasst:

1. Pelletierung bei „Standard-Prozessparametern“ der RMP 250 (Angang Tab. D.1) und einem Wassergehalt des Ausgangsmaterials von $12 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$ mit dem Ziel der grundlegenden Beurteilung der Pelletierbarkeit (blaue Balken in Abb. 4.16 und Abb. 4.17).

Heu-Gärrest-Mischpellets: 100/0 bis 25/75 *Ma.*-%: Die Schüttdichten und Abriebfestigkeiten erreichen und übertreffen teils deutlich mit zunehmenden Gärrestanteil die Qualitätsklasse A der ISO 17225-6 [20]. Weitere Pelleteigenschaften wie Rohdichten und Druckfestigkeiten (Anhang Tab. E.5) bestätigen diese Zunahme. Je höher der Anteil an Gärresten ist, umso besser werden i.d.R. die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften. Die Mischung von fasrigen und runden, ligninreichen Rohstoffen stellt unter den gegebenen Bedingungen offensichtlich eine geeignete Materialkombination für die Herstellung von Qualitätspellets dar. Allerdings konnten, wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, reine Gärreste bei den gewählten Parametern nicht verdichtet werden.

2. Erste Prozessverbesserung: Erhöhung des Ausgangswassergehaltes auf $15 \pm 0,5$ *Ma.*-% mit dem Ziel der Verdichtung reiner Gärreste und der Untersuchung des Einflusses auf die Mischpelletqualität (rote Balken in Abb. 4.16 und Abb. 4.17).

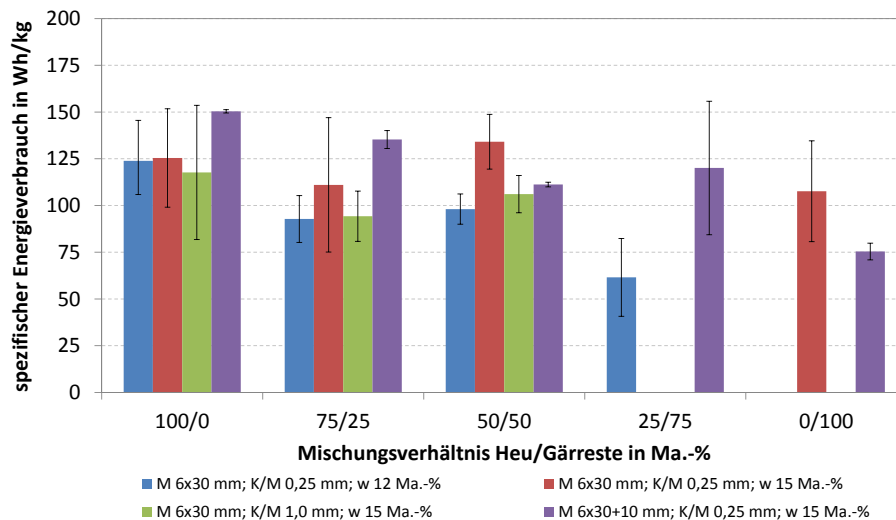
Mit erhöhtem Ausgangswassergehalt konnten qualitativ hochwertige Gärrestpellets mit sehr guten physikalisch-mechanischen Eigenschaften hergestellt werden. Allerdings verschlechtern sich diese Eigenschaften mit zunehmendem Anteil an Heu. Die schlechte Pelletqualität resultiert aus dem für Heu zu hohen Wassergehalt. Rissige und brüchige Pellets, bedingt durch Dampfentweichung, sind die Folge von zu hohen Pelletierwassergehalten bei Halmgütern - dieses Phänomen wurde bereits umfassend für reines Heu betrachtet [8]. Vor allem bei Heuanteil von mehr als 50 *Ma.*-% werden die Vorgaben der ISO 17225-6 [20] nicht mehr erreicht.

3. Zweite Prozessverbesserung: Für hohe Heuantile (≥ 50 *Ma.*-%) wird bei einem Ausgangswassergehalt von $15 \pm 0,5$ *Ma.*-% der Abstand zwischen Koller und Matrize (K/M) von 0,25 auf 1 mm erhöht. Durch den gesteigerten Druckaufbau im Materialteppich erfolgt eine höhere Materialvorverdichtung mit dem Ziel der Eigenschaftsverbesserung bei hohen Heuanteil (grüne Balken in Abb. 4.16 und Abb. 4.17). Eine Verbesserung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Pellets mit hohen Gärrestanteilen war aufgrund der bereits eingehaltenen normativen Kriterien nicht erforderlich. Somit fehlen die grünen Balken in Abb. 4.16 und Abb. 4.17 bei Gärrestanteilen ≥ 75 *Ma.*-%.

Durch die Vorverdichtung des Materials in Verbindung mit der längeren Verweilzeit im Pressenraum können die Grenzwerte der ISO 17225-6 [20] für Schüttdichte und Abriebfestigkeit eingehalten werden. Allerdings ist mit einem erhöhten Energieaufwand zu rechnen, vor allem bei der Verdichtung von reinem Heu (Abb. 4.18). Für Heuantile von 25 bzw. 50 *Ma.*-% reduzierte sich der spezifische Energieaufwand, ist aber höher als bei „Standard-Prozessparametern“.

4. Dritte Prozessverbesserung: Bei einem Ausgangswassergehalt von $15 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$ und dem K/M-Abstand von $0,25 \text{ mm}$ soll die Eignung der Matrize $6 \times 30 + 10 \text{ mm}$ untersucht werden. Auch hier zielt der Versuch auf eine Qualitätsverbesserung der Pellets ab (violette Balken in Abb. 4.16 und Abb. 4.17).

Die getestete Matrize $6 \times 30 + 10 \text{ mm}$ ist im Vergleich zur standardisierten Matrize $6 \times 30 \text{ mm}$ nicht geeignet für die Verdichtung von Mischungen aus Heu und Gärresten. Nahezu alle physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften verschlechtern sich. Vor allem bei hohen Anteilen an Heu wird infolge des längeren Presskanals mehr Energie für die Pelletierung benötigt (Abb. 4.18). Nur reine Gärrestpellets weisen leicht höhere Abrieb- und Druckfestigkeiten sowie Rohdichten bei geringerem spezifischen Energieverbrauch als mit „Standard-Prozessparametern“ auf.



Für Versuchsvariationen ohne Angaben konnten aus technischen Gründen keine Pelletierungen durchgeführt werden.

Abb. 4.18: Spezifischer Energieverbrauch der Pelletierung von Heu/Gärrest- Mischungen im Technikumsmaßstab

Fazit der Mischpelletierung aus Heu und Gärresten

Die Pelletierung von Heu/Gärrest-Mischungen zu qualitativ hochwertigen und normkonformen Pellets ist für jedes getestete Mischungsverhältnis möglich. Durch angepasste Prozessbedingungen, wie Erhöhung des K/M-Abstandes halten alle Pelletchargen die physikalisch-mechanischen Vorgaben der ISO 17225-6 [20] ein. Durch die Zumischung von Gärresten sinkt i.d.R. der spezifische Energieverbrauch, allerdings ist mit einem erhöhten Verschleiß der Verdichtungsorgane (Matrize und Koller) zu rechnen. Bei einem Aschegehalt von $29,4 \text{ Ma.-%}$ wf (Anhang Tab. C.1) verringert sich die Standzeit einer Matrize dramatisch auf nur $400 - 1000 \text{ h}$ [74]. Reguläre Standzeiten der Holzpelletierung

mit Aschegehalten von 0,25 *Ma*.-% wf liegen erfahrungsgemäß bei 9.000 *h* für Matrizen und bei 10.000 *h* für Koller [74].

4.2 Versuchskomplex II: Prozessoptimierung mithilfe statistischer Versuchsplanung (DoE)

4.2.1 Allgemeines zu Versuchskomplex II

Für die Anwendung der statistischen Versuchsplanung (DoE) wurden Pelletierversuche entsprechend der Matrix in Tab. 3.1 durchgeführt. Die erzielten Analysewerte und prozesstechnischen Größen sind umfangreich im Anhang F.3 zusammengefasst. Nach Übertragung dieser experimentellen Daten und Anwendung der Software STAVEX ergeben sich Modellgleichungen für alle Zielgrößen in Abhängigkeit der gewählten Faktoren (Tab. 3.1). Die Modellierung erfolgte für folgende Zielgrößen: physikalisch-mechanische Pelleteigenschaften wie Abriebfestigkeit, Schütt- und Rohdichte als Qualitätsmerkmale sowie den spezifischen Energiebedarf als prozessrelevanten Parameter. Die resultierenden Modellgleichungen sind im Anhang F.4 und F.5 zu finden. Die modellierten Minimal- und Maximalwerte der Zielgrößen sind in Anhang F.6 und die dazugehörigen Bestimmtheitsmaße R^2 sowie p -Werte der jeweiligen Effekte in Anhang F.7 zusammengefasst.

4.2.2 Beurteilung der Höhenlinienplots der 1. statistischen Versuchsreihe

Entsprechend Tab. 3.1 wurde bei der 1. statistischen Versuchsreihe der Gärrestanteil m_G von 75-95 $Ma.\%$, die Frequenz der Matrizie f_M von 20-30 Hz und die Frequenz der Förderschnecke f_S von 1-3 Hz variiert. In den nachfolgenden Diagrammen ist die Variation der Matrizenfrequenz stets auf der Applikate aufgetragen. Die Abszisse zeigt hingegen immer die Variation der Schneckenfrequenz. Die modellierten Pelleteigenschaften und die spezifische Pelletierungsenergie werden in Abhängigkeit des Gärrestanteils auf der Ordinate dargestellt (stets drei Diagramme je Ordinatenparameter).

Abriebfestigkeit

Als erstes Qualitätsmerkmal zeigt Abb. 4.19 die modellierte Abriebfestigkeit der Mischpellets mit unterschiedlichen Anteilen an Gärresten (links: 75 $Ma.\%$, Mitte: 85 $Ma.\%$, rechts: 95 $Ma.\%$). Dabei stellen rot gefärbte Bereiche sehr hohe und gelb/grün gefärbte geringere Abriebfestigkeiten dar. Bei Betrachtung der Skalierung wird schnell sichtbar, dass die geforderten 97,5 $Ma.\%$ entsprechend der ISO 17225-6 [20] bei allen Parameterkombinationen deutlich übertroffen werden. Bei geringen Frequenzen (f_M 20 Hz und f_S 1 Hz) werden die geringsten Abriebfestigkeiten erzielt, wobei die niedrigste mit 98,5 $Ma.\%$ noch weit über der Norm liegt. Die erzielten Maxima und Minima sowie die korrespondierenden

Prozessparameter sind im Anhang in Tab. F.4 dargestellt.

Schüttdichte

Die Schüttdichte der Pellets wird als zweites Qualitätsmerkmal in Abb. 4.20 in Abhängigkeit der Gärrestanteile (links: 75 *Ma.*-%, Mitte: 85 *Ma.*-%, rechts: 95 *Ma.*-%) als Höhenlinienplots modelliert. Es ist ersichtlich, dass alle Mischpellets mit mehr als 700 kg/m^3 die Vorgaben der ISO 17225-6 [20] von 600 kg/m^3 deutlich übertreffen (nahezu komplette Rotfärbung in den Diagrammen). Auch gibt es kaum Unterschiede bei der Zumischung unterschiedlicher Anteile an Gärresten. Lediglich 40 kg/m^3 liegen zwischen den maximalen und minimalen Wert, wobei die größte errechnete Schüttdichte von 744 kg/m^3 bei den niedrigsten untersuchten Frequenzeinstellungen (f_M 20 *Hz* und f_S 1 *Hz*) erreicht wird (Anhang Tab. F.4).

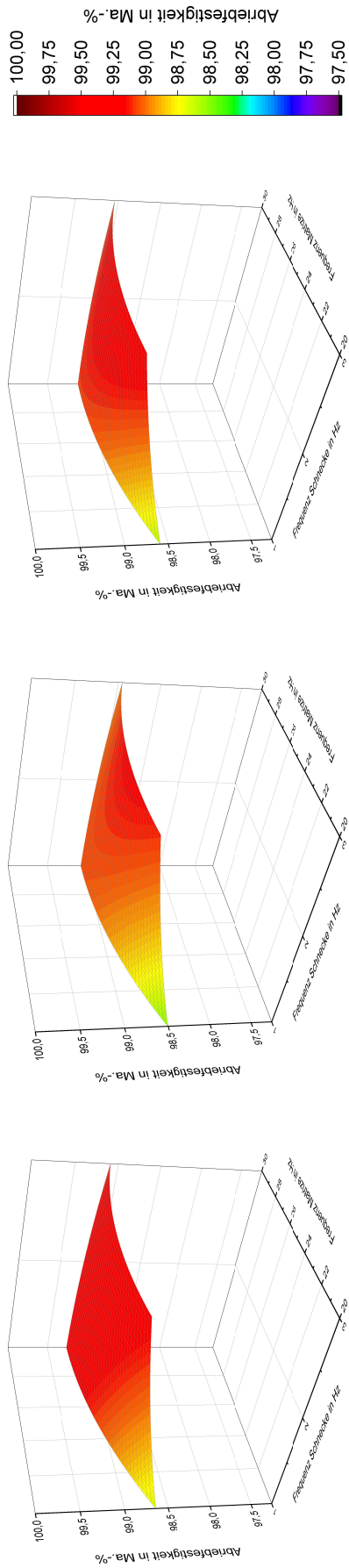


Abb. 4.19: 1. Statistische Versuchsreihe: Modellierter Abriebfestigkeit DU (Ordinate) im Faktorensraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 75 $Ma\%$, Mitte: 85 $Ma\%$, rechts: 95 $Ma\%$), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz

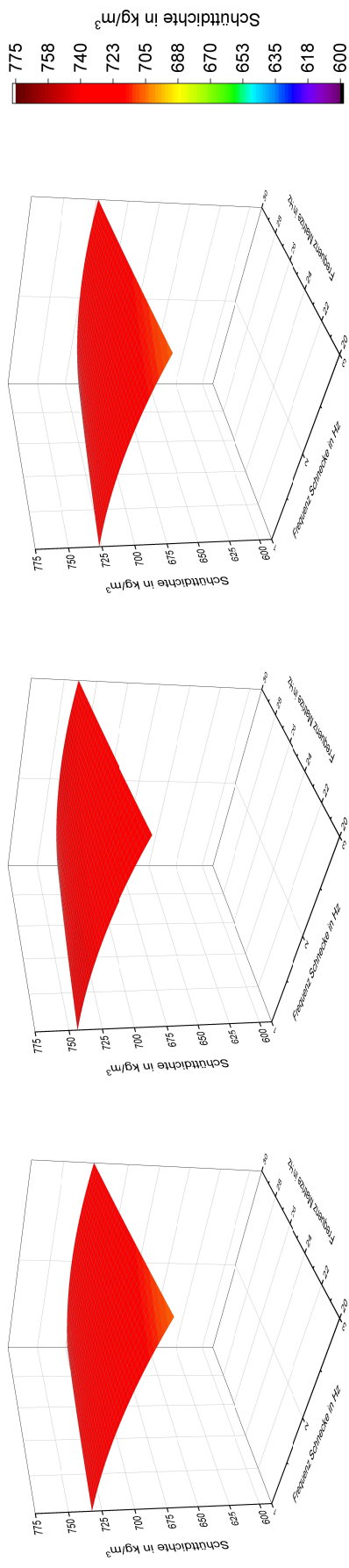


Abb. 4.20: 1. Statistische Versuchsreihe: Modellierter Schüttichte BD (Ordinate) im Faktorensraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 75 $Ma\%$, Mitte: 85 $Ma\%$, rechts: 95 $Ma\%$), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz

Rohdichte

Zur Beurteilung des Verdichtungserfolges wurde die Rohdichte als dritte Pelleteigenschaft im Untersuchungsbereich modelliert. Aus Abb. 4.21 und Anhang Tab. F.4 geht hervor, dass die Werte zwischen $1,32 - 1,47 \text{ g/cm}^3$ liegen und damit deutlich über den einst geforderten $1,12 \text{ g/cm}^3$ für Holzpellets (DIN PLUS). Sowohl die höchsten als auch die niedrigsten Werte wurden bei niedriger f_S von 1 Hz erreicht. Allerdings zeigt die Matrizenfrequenz f_M einen deutlichen Einfluss auf die erzielten Rohdichten.

Spezifischer Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch der Pelletproduktion ist als wichtigster Prozessparameter zu nennen. Abb. 4.22 stellt die modellierte Fläche im Versuchsraum dar, wobei der geringste Energieeintrag rot gekennzeichnet ist. Bei $75 \text{ Ma.}\%$ an Gärresten wird weit mehr Energie zur Erzeugung der Pellets benötigt als bei Zumischraten von $85 \text{ Ma.}\%$ (Abb. 4.22, Mitte) bzw. $95 \text{ Ma.}\%$ (Abb. 4.22, rechts) - wobei zwischen letzterem kaum Unterschiede ersichtlich sind. Dies bestätigt auch die Erkenntnisse der Voruntersuchungen - bei höherem Heuanteil wird tendenziell mehr Energie zur Verdichtung benötigt (4.18). Das Minimum liegt bei 84 Wh/kg .

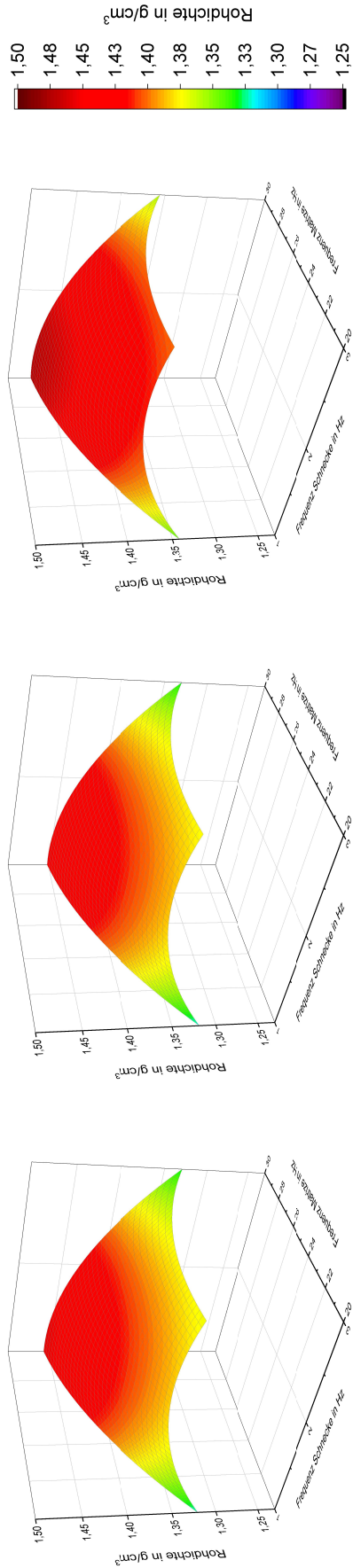


Abb. 4.21: 1. Statistische Versuchsreihe: Modellierter Rohdichte GD (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 75 $Ma.-%$, Mitte: 85 $Ma.-%$, rechts: 95 $Ma.-%$), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz

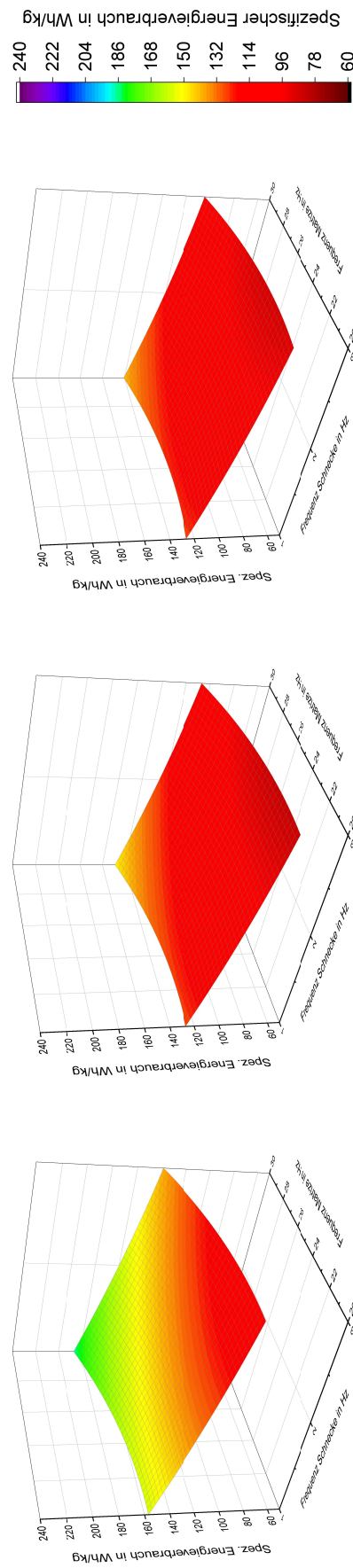


Abb. 4.22: 1. Statistische Versuchsreihe: Modellierter spezifischer Energieverbrauch E_{spez} (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 85 $Ma.-%$, Mitte: 75 $Ma.-%$, rechts: 95 $Ma.-%$), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz

Fazit in Verbindung mit p -Werten und Bestimmtheitsmaßen R^2

Im Variationsbereich der 1. statistischen Versuchsreihe erfüllen alle Mischpellets die nach ISO 17225-6 [20] geforderten Mindestanforderung bzgl. Abriebfestigkeit und Schüttdichte und übertreffen diese teils deutlich. Des Weiteren werden stets hohe Rohdichten erreicht. Offensichtlich fügen sich die Heufasern bei einem Wassergehalt von maximal 15 $Ma.-%$ optimal zwischen die Gärrestpartikel und bilden einen festen Materialverbund aus. I.d.R. können durch Erhöhung der Frequenzen f_M und f_S die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften gesteigert werden, wobei die Verbesserungen nur im geringen Maße sichtbar sind.

Als eine mögliche Ursache der guten Pelletqualität ist die Ligninerweichung zu nennen. Der hohe Ligninanteil der Gärreste (294 g/kg wf, vergleichbar mit Kiefernholz Anhang Tab. C.2) wirkt sich bei allen Versuchen als erhärtendes Bindemittel positiv auf die mechanische Festigkeit aus. In Abhängigkeit des Materials und der Reibungseffekte können im Presskanal Temperaturen von 90 [69] bis 130 °C [35] auftreten. Lignin erweicht bei Temperaturen von 85-110 °C (bei w 15 $Ma.-%$) [64], [80], wobei partielles Schmelzen bereits ab 75 °C [27] auftreten kann. Die durchschnittliche Pellettemperatur über alle Versuche liegt zwar mit 75,3 °C (Anhang Tab. F.2) am unteren Rand des Ligninschmelzens, doch vermutlich herrschen im Presskanal höhere Temperaturen. Diese lassen sich aufgrund der sich drehenden Ringmatrize bislang nicht erfassen.

Die geringen Abhängigkeiten der Pelleteigenschaften von den Frequenzen f_M und f_S im Variationsbereich bei hohen Gärrestanteilen (75-95 $Ma.-%$) spiegeln zusätzlich die p -Werte wieder. Aus Anhang Tab. F.6 geht deutlich hervor, dass alle p -Werte der Effekte für die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften (DU , BD , GD) $> 0,05$ sind und somit scheinbare Effekte darstellen. Im Gegensatz dazu weisen alle Haupteffekte (m_G , f_S , f_M) einen starken Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf der Pelletierung auf. Vor allem die Variation der Zuförderrate (Variation f_S) zeigt, je mehr dem Pressenraum zugeführt wird, umso effektiver und energieärmer ist die Verdichtung. Das zeigen auch die im Anhang Tab. F.4 dargestellten Optima (im Untersuchungsbereich) - bei f_M 20 Hz und f_S 3 Hz werden die höchsten Abriebfestigkeiten bei minimalem Energieaufwand erreicht. Entgegen der Vermutung, begründet auf den Voruntersuchungen in Kapitel 4.1.2, liegt das Optimum nicht beim maximalen Gärrestanteil, sondern im mittleren Untersuchungsbereich von m_G 85 $Ma.-%$ (mit Ausnahme der Rohdichte).

Die höchste Anpassungsgüte von $R^2 = 0,97$ zeigt der spezifische Energieverbrauch. Dem-entsprechend ist die Deckung von errechneten und experimentellen Daten sehr gut. Abriebfestigkeit und Schüttdichte liegen mit 85-89 % bei einer guten Übereinstimmung. Nur die Rohdichte mit $R^2 = 0,69$ weist eine schlechte Anpassung der experimentellen und modellierten Ergebnisse auf.

4.2.3 Beurteilung der Höhenlinienplots der 2. statistischen Versuchsreihe

Bei der 2. statistischen Versuchsreihe (Parameter Tab. 3.1) wurde der Gärrestanteil m_G von 10-70 $Ma.\%$, die Frequenz der Matrize f_M von 20-30 Hz und die Frequenz der Förderschnecke f_S von 6-10 Hz variiert. Wie auch bei der 1. statistischen Versuchsreihe stellt die Ordinate den jeweiligen Zielparameter, die Abszisse die Frequenz der Förderschnecke und die Applikate die Matrizenfrequenz dar.

Abriebfestigkeit

Abb. 4.23 zeigt die modellierte Abriebfestigkeit im Untersuchungsbereich bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten (links: 10 $Ma.\%$, Mitte: 40 $Ma.\%$, rechts: 70 $Ma.\%$). Die farbliche Skalierung der Höhenplots stellt von rot über orange hinzu gelb/grün eine Abnahme der mechanisch-physikalischen Pelleteigenschaft dar. Die Abriebfestigkeiten liegen zwischen 98,6-99,3 $Ma.\%$ und damit deutlich über den Mindestanforderungen der ISO 17225-6 (97,5 $Ma.\%$) [20]. Die höchste Abriebfestigkeit von 99,3 $Ma.\%$ konnte bei einem Gärrestanteil von 70 $Ma.\%$ und hohen Frequenzeinstellungen (f_M 30 Hz und f_S 10 Hz) erreicht werden (Anhang Tab. F.5). Tendenziell lässt sich entsprechend Abb. 4.23 eine Festigkeitssteigerung mit zunehmendem Gärrestanteil ableiten. Allerdings zeigen Zuzusammensetzungen (f_S 6 Hz) von lediglich 10 $Ma.\%$ an Gärresten höhere Abriebfestigkeiten als bei 40 oder 70 $Ma.\%$ (unabhängig f_M).

Schüttdichte

Aus Abb. 4.24 geht hervor, dass in der 2. Statistischen Versuchsreihe Schüttdichten zwischen 670-774 kg/m^3 (Anhang Tab. F.5) erreicht werden und damit über den Vorgaben der ISO 17225-6 (600 kg/m^3) [20] liegen. Die höchsten Schüttdichten werden, unabhängig der Gärrestanteile, bei den im Untersuchungsbereich geringsten Förderraten und Matrizingeschwindigkeit (f_S 6 Hz und f_M 20 Hz) erzielt. Der größte errechnete von 774 kg/m^3 ergibt sich in Verbindung geringer Frequenzen bei einem Mischungsverhältnis von Heu zu Gärresten von 30 zu 70 $Ma.\%$.

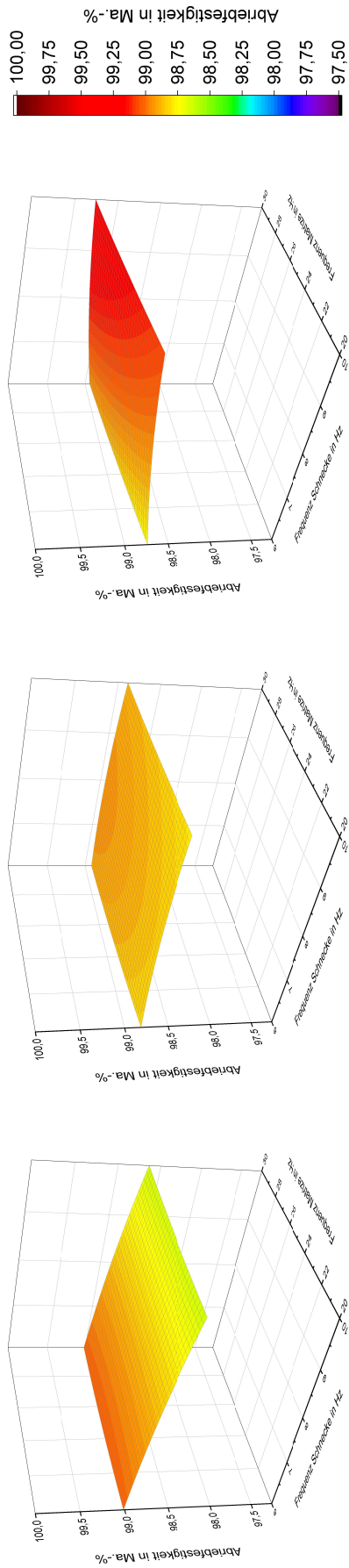


Abb. 4.23: 2. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Abriebfestigkeit DU (Ordinate) im Faktorennraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 $Ma.-%$, Mitte: 40 $Ma.-%$, rechts: 70 $Ma.-%$), Abszisse - f_S von 6-10 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz

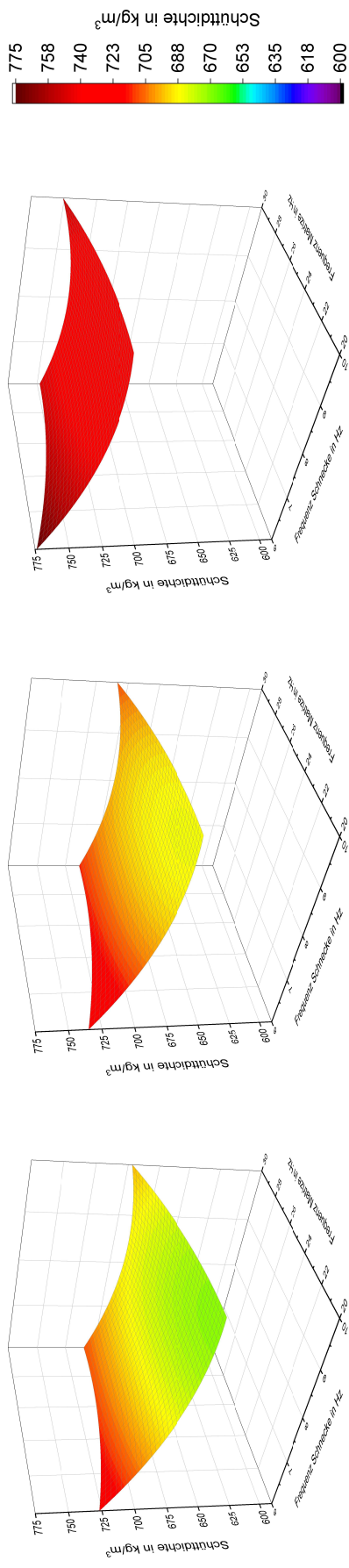


Abb. 4.24: 2. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Schüttdichte BD (Ordinate) im Faktorennraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 $Ma.-%$, Mitte: 40 $Ma.-%$, rechts: 70 $Ma.-%$), Abszisse - f_S von 6-10 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz

Rohdichte

Bei der Ermittlung und Modellierung der Rohdichten der 2. statistischen Versuchsreihe wird aus Abb. 4.25 kein eindeutiger Trend sichtbar. Bei einem Anteil der Gärreste von 10 bzw. 40 *Ma.*-% steigt die Rohdichte mit abnehmender Materialzufuhr (f_S wird kleiner). Im Unterschied dazu nimmt sie bei 70 *Ma.*-% an Gärresten mit größer werdendem f_S zu. Diese Phänomene sind unabhängig von f_M und stehen im Gegensatz zur 1. Statistischen Versuchsreihe - hier wurde eher eine Abhängigkeit von f_M detektiert. Dennoch konnten Rohdichten von 1,26 - 1,42 g/cm^3 (Anhang Tab. F.5) erzielt werden.

Spezifischer Energieverbrauch

Der modellierte, spezifische Energieverbrauch der 2. statistischen Versuchsreihe ist in Abb. 4.26 dargestellt. Dabei zeigt der rote Bereich in den Diagrammen den minimalen Energieeintrag. Die Werte liegen zwischen 62 - 225 Wh/kg (Anhang Tab. F.5). Trotz einem höheren Anteil an Heu liegt der kleinste errechnete Wert bei 62 Wh/kg , etwa 26 % unter dem der 1. Statistischen Versuchsreihe (84 Wh/kg). Bei beiden Versuchsreihen wurde der geringste Energieverbrauch bei geringen Matrizengeschwindigkeiten (f_M 20 Hz) ermittelt. Allerdings stellt sich eine Abhängigkeit der Förderschneckendrehzahl dar - 1. StVR bei f_S 3 Hz (oberer Untersuchungsbereich) und 2. StVR bei f_S 6 Hz (unterer Untersuchungsbereich). Des Weiteren geht aus Abb. 4.26, links deutlich hervor, dass bei geringen Gärrestanteilen (10 *Ma.*-%) die Prozessführung, sprich das Zusammenspiel von f_M und f_S , größeren Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch hat, als bei höheren Anteilen (Gärrest 70 *Ma.*-%, Abb. 4.26, rechts). D.h. durch eine geeignete Kombination von f_M und f_S kann der Energieverbrauch bei 10 *Ma.*-% Gärrestanteil nahezu halbiert werden (von 225 Wh/kg bei f_M 25 Hz und f_S 6 Hz auf 115 Wh/kg bei f_M 30 Hz und f_S 10 Hz).

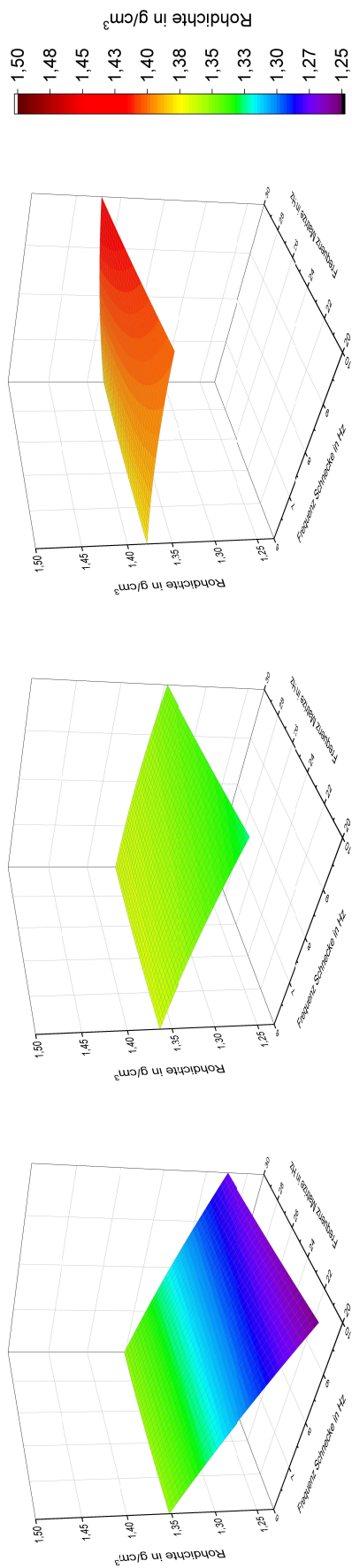


Abb. 4.25: 2. Statistische Versuchsreihe: Modellierter Rohdichte GD (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 Ma.-%, Mitte: 40 Ma.-%, rechts: 70 Ma.-%), Abszisse - f_S von 6-10 Hz, Applikate - f_M von 20-30 Hz

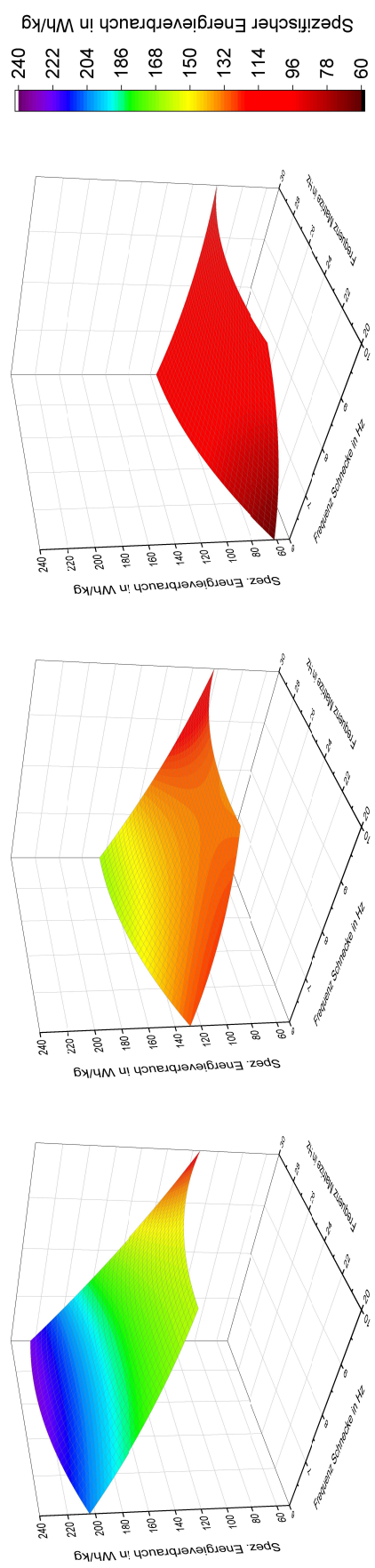


Abb. 4.26: 2. Statistische Versuchsreihe: Modellierter spezifischer Energieverbrauch E_{spez} (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 Ma.-%, Mitte: 40 Ma.-%, rechts: 70 Ma.-%), Abszisse - f_S von 6-10 Hz, Applikate - f_M von 20-30 Hz

Fazit in Verbindung mit p -Werten und Bestimmtheitsmaßen R^2

Alle Mischpellets im Untersuchungsbereich der 2. statistischen Versuchsreihe halten die Grenzwerte der ISO 17225-6 [20] bzgl. Abriebfestigkeit und Schüttdichte ein. Die erzielten Schütt- und Rohdichten sind vor allem vom Mischungsverhältnis Heu zu Gärreste abhängig - höhere Dichten können mit höheren Gärrestanteilen (im Untersuchungsbereich 70 *Ma.*-% an Gärresten) erreicht werden. Die einzelnen Heufasern lassen sich aufgrund ihrer Struktur bei der Verdichtung weniger nah zusammenfügen als Gärrestpartikel. Durch den dominierenden Formschluss der Fasern in Verbindung mit geringeren Anziehungskräften entstehen Poren und Zwischenräume im Pellet. Höhere Gärrestanteile resultieren hingegen in höheren Dichten. Geringe Partikeldistanzen, aufgrund der kugelähnlichen Struktur, bewirken intermolekulare Anziehungskräfte wie Van-der-Waals-Kräfte (wirksam bei Partikelabständen $< 0,1 \mu m$ [34]), welche stabile Festkörperbindungen mit wenig Porenvolumen ausbilden.

Bei Betrachtung der p -Werte (Anhang Tab. F.7) wird die Relevanz des Gärrestanteils deutlich - die p -Werte des Haupteffektes m_G sind kleiner als 0,05 und belegen damit die starke Einflussnahme sowohl auf alle physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften als auch auf den spezifischen Energieverbrauch der Pelletierung.

Wie auch in der 1. Statistischen Versuchsreihe sind die p -Werte der quadratischen und bilinearen Modellkoeffizienten wesentlich größer als 0,05 (Anhang Tab. F.7), sodass keinerlei Interaktionen und Wechselwirkungen der *Faktoren* festgestellt werden können.

Mit Ausnahme der Rohdichte liegt das Bestimmtheitsmaß R^2 für DU , BD und $E_{spez,P}$ $> 0,93$ (Anhang Tab. F.7). Das zeigt eine gute bis sehr gute Anpassung der experimentell ermittelten und modellierten Daten. In beiden StVR zeigt die Rohdichte eine schlechte (1. StVR R^2 0,69) bis mittelmäßige (2. StVR R^2 0,85) Anpassungsgüte. Dies begründet sich in der Analytik, welche mit hohen Fehlertoleranzen behaftet ist (Kapitel 3.5). Damit ist zu hinterfragen, inwieweit die Rohdichte als Qualitätsmerkmal einer erfolgreichen Pelletierung zukünftig weiter betrachtet werden sollte.

4.3 Versuchskomplex III: Bindemechanismen als Ursache für qualitativ hochwertige Biomassepellets

4.3.1 Allgemeines zu Versuchskomplex III

Zur näheren Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Pelletqualität werden im Einzelpresskanal (EPK) entsprechend Abb. 3.3 verschiedene Versuche durchgeführt. Dabei werden Parameter wie Verdichtungstemperatur, Wassergehalt und Partikelgröße des zu verdichtenden Materials und Inhaltsstoffe, die die Funktion des rohstoffeigenen Bindemittels übernehmen können, in den Fokus der Untersuchungen gesetzt. Die erzielten Einzelergebnisse für Verdichtungs-, Durchstoß- und Materialverformungsarbeit sowie die Rohdichten sind in Anhang G tabellarisch zusammengefasst. Die Bestimmung der Rohdichten ist das einzigste Mittel, um die Pelletqualitäten zu bewerten, da im EPK durchschnittlich nur fünf Pellets erzeugt wurden. Aufgrund der geringen Mengen entfallen *DU* und *BD*.

4.3.2 Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtungstemperatur

Ausgangspunkt der Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtungstemperatur

Die Verdichtungstemperatur ϑ_V stellt eine wesentliche Einflussgröße auf den Verdichtungsprozess und die Pelletqualität dar. Durch höhere Temperaturen können Inhaltsstoffe, wie Proteine, Stärke oder Lignine, aktiviert werden und zum einen die Funktion rohstoffeigener Bindemittel übernehmen [34], [44]. Zum anderen agieren diese Inhaltsstoffe als Gleitmittel und reduzieren die Reibung zwischen dem Material und der Presskanalwand sowie zwischen den einzelnen Fasern und Partikeln. Allerdings ist eine Trennung dieser Effekte mit der angewandten Methodik nur schwer realisierbar.

Aufgrund der kontinuierlichen Prozessführung der Pelletpresse (RMP), in Verbindung mit steigenden und schwankenden Temperaturen, fanden die Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtungstemperatur ausschließlich im EPK statt.

Ergebnisdarstellung zum Einfluss der Verdichtungstemperatur

Abb. 4.27 zeigt die geleistete Arbeit für die Verdichtung von Heu, Gärresten sowie eine 50 *Ma.*-%ige Mischung aus beiden Rohstoffen mit je einem Zerkleinerungsgrad von 4 *mm* und einem Wassergehalt von $20 \pm 0,5$ *Ma.*-% im EPK. Bei zahlreichen Vorversuchen mit geringeren Wassergehalten (12 und $15 \pm 0,5$ *Ma.*-%) wurde deutlich, dass die verwendete Technik des Einpresskanals nur bedingt geeignet war. Die Reibungskräfte im Presskanal waren vor allem bei Gärresten so groß, dass die Maschine die Versuche regelmäßig abbrach. Weiterhin wurden die Verdichtungstemperatur in vier Stufen variiert: 40, 60, 80

und 120 °C. Die Anteile der Verdichtungs- und Durchstoßarbeit finden sich im Anhang in Tab. G.1. Die erzielten Rohdichten der verschiedenen Einzelpellets sind in Abb. 4.28 dargestellt.

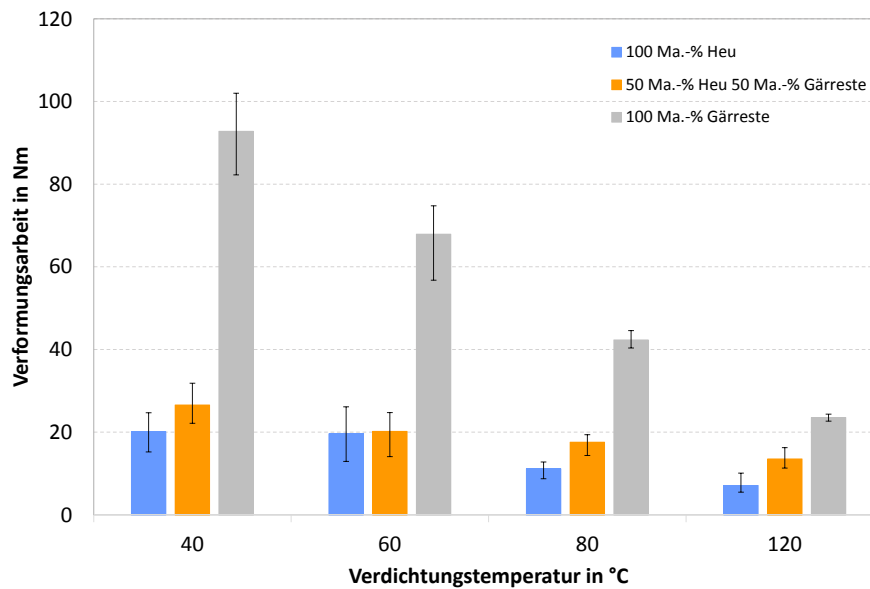


Abb. 4.27: Geleistete Verformungsarbeit bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164), Gärresten (TK-1480) sowie der Mischung aus beiden in Abhängigkeit der Verdichtungstemperatur ($w \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)

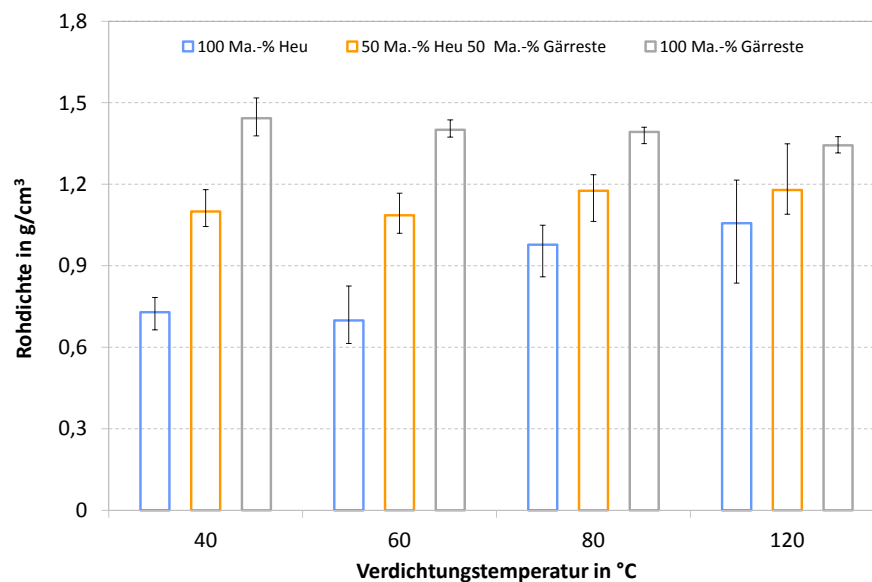


Abb. 4.28: Erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164), Gärresten (TK-1480) sowie der Mischung aus beiden in Abhängigkeit der Verdichtungstemperatur ($w \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)

Aus Abb. 4.27 und Daten im Anhang in Tab. G.1 geht hervor, dass sich mit zunehmender Verdichtungstemperatur alle aufzuwendenden Arbeiten der Materialverformung im EPK reduzieren, was zu erwarten war [72]. Für die Verformung von reinen Gärresten im EPK wird unabhängig von der untersuchten Temperatur deutlich mehr Arbeit benötigt als für Heu. Allerdings erfolgt mit zunehmender Verdichtungstemperatur eine wesentlich stärkere, nahezu lineare Reduzierung der Verformungsarbeit (W_{MV}) als auch des Fehlerbereiches (Gärrest: bei ϑ_V 40°C W_{MV} 93 Nm , bei ϑ_V 120°C W_{MV} 24 Nm , Heu: bei ϑ_V 40°C W_{MV} 20 Nm , bei ϑ_V 120°C W_{MV} 7 Nm) - bei einer Verdichtungstemperatur von 120°C ist zur Heuverdichtung nur noch ein Unterschied von 16 Nm zu verzeichnen.

Zu erwähnen ist, dass aufgrund der ungleichen Ausgangsschüttdichten von Heu (BD 149 kg/m^3 bei w $12,0 \pm 0,5\text{ Ma.-%}$) und Gärresten (BD 636 kg/m^3 bei w $15,0 \pm 0,5\text{ Ma.-%}$) der Verdichtungsraum im EPK (Abb. 3.12) unterschiedlich gefüllt wird. Dementsprechend werden mehr Gärrestpartikel je Materialschicht und Verdichtungs Vorgang verarbeitet, sodass bei geringeren Temperaturen höhere Reibungskräfte zu erwarten waren. Mit steigender Temperatur verringert sich die Reibung zwischen Kanalwand und den Partikeln. Begründet durch den hohen Ligningehalt der Gärreste (Anhang Tab. C.2), werden Gleit- und Reibungseigenschaften der Partikel reduziert. Dabei ist zu erwähnen, dass die Ligninerweichung wassergehalts- und temperaturabhängig ist [80]. Bei der Verdichtung von Heu spielt dieser Effekt, aufgrund des vergleichsweise geringen Anteils an Lignin (Anhang Tab. C.2), eine untergeordnete Rolle. Bei Heu sind es vermutlich eher Inhaltsstoffe wie Proteine, die die Reduzierung der Reibungskräfte unterstützen und das Näherbringen der Heufasern zueinander erleichtern. Durch höhere Temperaturen werden die Fasern flexibler und formen effektivere, formschlüssige Bindungen ohne Rückexpansion. Dies verdeutlichen die Aufnahmen der Einzelpellets von Heu bzw. Gärresten hergestellt bei Verdichtungstemperaturen von 40 bzw. 120°C . Abb. 4.29, A zeigt schuppige Heupellets mit Inhomogenität und großen Poren. Dies wird durch eine geringe Pelletrohichte bestätigt (Abb. 4.28). Bei höheren Temperaturen entstehen glatte und glänzende Heupellets ohne sichtbare Fehlstellen (Abb. 4.29, B) in Verbindung mit deutlich höheren Rohdichten (Abb. 4.28). Dennoch ist bei allen untersuchten Verdichtungstemperaturen stets die ursprüngliche Faserstruktur des zerkleinerten Heus (Abb. 4.3) präsent. Die Thematik der Proteinrelevanz bei der Heuverdichtung wird im Kapitel 4.3.5 noch einmal vertieft.

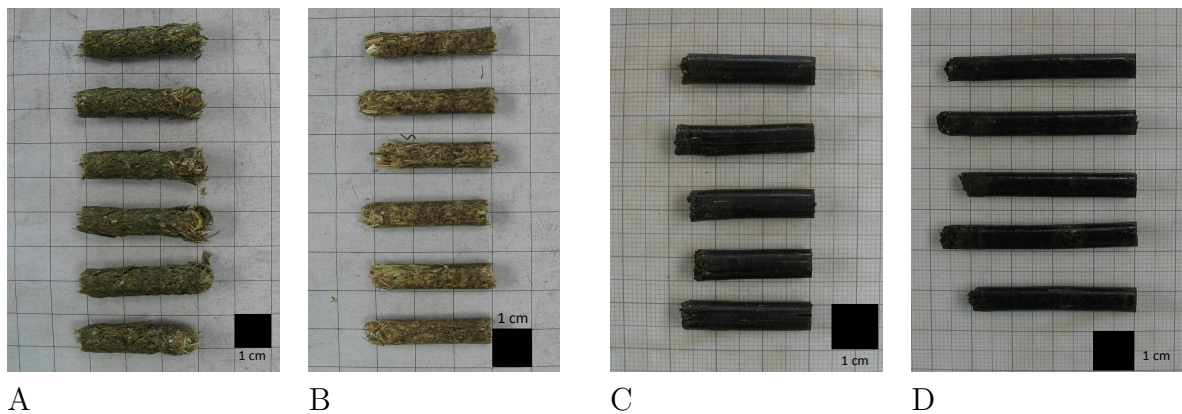


Abb. 4.29: Im EPK hergestellte Pellets aus Heu (TK-1164) (A, B) bzw. Gärreste (TK-1480) (C, D) bei ϑ_V 40 (A, C) bzw. 120 °C (B, D) (w $20 \pm 0,5$ Ma.-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm).

Bei der Gärrestverdichtung werden hohe, mit zunehmender Temperatur leicht abnehmende Rohdichten erzielt ($1,44 \text{ g/cm}^3$ bei ϑ_V 40 °C und $1,34 \text{ g/cm}^3$ bei ϑ_V 120 °C). Erzeugte Einzelpellets sind in Abb. 4.29, C und D dargestellt. Zwischen den Verdichtungs-temperaturen 40 (Abb. 4.29, C) und 120 °C (Abb. 4.29, D) sind optisch nur sehr geringe Unterschiede erkennbar. Die bei geringerer Temperatur hergestellten Pellets (Abb. 4.29, C) sind leicht aufgequollen und glänzen weniger. Vermutlich werden bei geringeren Temperaturen in Verbindung mit größeren Verformungsarbeiten die Partikel näher zusammengebracht, sodass auch bei niedriger Temperatur (40 °C) bereits Schmelzen zwischen den Partikeln entstehen und Bindungen über eine stoffliche Brücke gebildet werden. Dies wird durch Mikroskopaufnahmen der Bruchfläche der Einzelpellets aus Gärresten, verdichtet bei 40 bzw. 120 °C, bestätigt (Abb. 4.30, E und F) - die ursprünglichen Partikelstrukturen sind nicht mehr erkennbar (Abb. 4.11). Auf mögliche Schmelzprozesse wird in den folgenden Kapiteln noch näher eingegangen.



Abb. 4.30: Stereomikroskopaufnahmen der Bruchflächen von Einzelpellets aus Gärresten (TK-1480) bei ϑ_V 40 (E) bzw. 120 °C (F) und aus der 50 Ma.-%igen Mischung von Heu und Gärresten bei ϑ_V 120 °C (F) (w $20 \pm 0,5$ Ma.-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)

Bei der 50 Ma.-%igen Mischung von Heu und Gärresten wird, vergleichbar mit reinen

Gärresten, wesentlich weniger Verformungsarbeit aufgewendet. Auch hier ist, im Vergleich zu reinen Gärresten, das geringere Schüttvolumen beim Befüllen des EPK zu erwähnen. Dennoch fügen sich die Gärrestpartikel gut zwischen die Heufasern ein, was sich in höheren, nahezu temperaturunabhängigen Rohdichten (Abb. 4.28) widerspiegelt. Ein guter Faser-Partikel-Verbund wird zusätzlich in mikroskopischen Betrachtungen deutlich (exemplarisch in Abb. 4.30, G). Auch hier sind die Fasern des Halmgutes deutlich sichtbar, welche in eine Masse aus Gärresten ohne erkennbare Struktur eingebettet sind.

Fazit zum Einfluss der Verdichtungstemperatur

Die Verdichtungstemperatur stellt im Versuchsspektrum einen großen Einfluss auf die geleistete Verformungsarbeit dar. Bei entsprechend hohen Temperaturen kann infolge der Reduzierung von Gleit- und Reibungseigenschaften sowie der Aktivierung von Bindemechanismen der Energieeintrag teils deutlich reduziert werden. Bei der Verdichtung von Heu kann zusätzlich die Pelletqualität (Rohdichten) sichtbar gesteigert werden. Bei Gärresten ist dieser Effekt nur marginal.

4.3.3 Untersuchungen zum Einfluss des Wassergehaltes

Ausgangspunkt der Untersuchungen zum Einfluss des Wassergehaltes

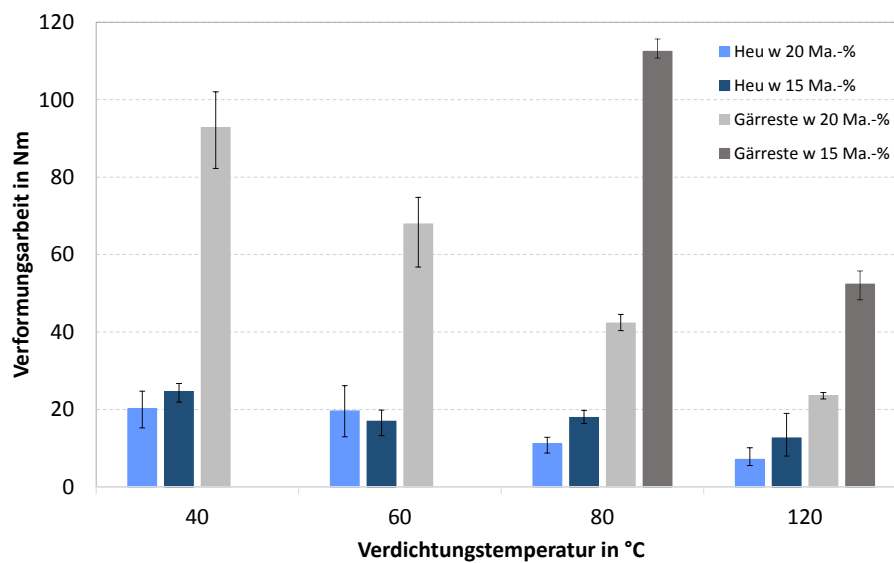
Der auf den jeweiligen Rohstoff abgestimmte Wassergehalt ist ein weiterer wichtiger Faktor in der Beeinflussung der Pelletqualität. Das Wasser fungiert zum einen als Gleitmittel und reduziert dabei Reibungskräfte zwischen dem Material und der Presskanalwandung als auch zwischen den Partikeln und Fasern [56]. Zum anderen dient das Wasser als Bindemittel und unterstützt durch Ausbildung von Van-der-Waals-Kräften und H_2 -Brückenbindemechanismen, welche die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften positiv beeinflussen. Allerdings wirken diese Effekte, in Abhängigkeit des Rohstoffes, nur bis zu einem gewissen Maß positiv. Wird ein entsprechend materialabhängiger Wassergehalt überschritten, erfolgen bei hohen Verdichtungstemperaturen zunehmend Verdampfungerscheinungen. Infolgedessen können die Pellets nach Austritt aus dem Presskanal aufplatzen und besitzen schlechtere physikalisch-mechanische Eigenschaften [39]. Zu hohe Wassergehalte verursachen zudem erhöhte Energieeinträge, begründet in der Inkompressibilität von Wasser, und können Pelletqualitäten sowie die Lagerstabilität der Pellets verringern.

Umfangreiche Untersuchung zum optimalen Wassergehalt bei der Verdichtung von Heu mit Hilfe der RMP wurden durchgeführt und veröffentlicht [8], sind aber nicht Gegenstand dieser Arbeit. Auf weitreichende Untersuchungen zum Wassergehalt bei der Pelletierung von Gärresten mittels RMP wurde aufgrund der Nichtverdichtbarkeit $\leq 12 \text{ Ma.-%}$ (Kapitel 4.1.2) und der Empfehlung der ISO 17225-6 (Wassergehalte $> 15 \text{ Ma.-%}$ [20])

verzichtet. Im EPK wurden allerdings Wassergehalte von $20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$ getestet, da die Gärreste mit Wassergehalte von $15 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$ bei geringen Temperaturen nicht kompaktierbar waren.

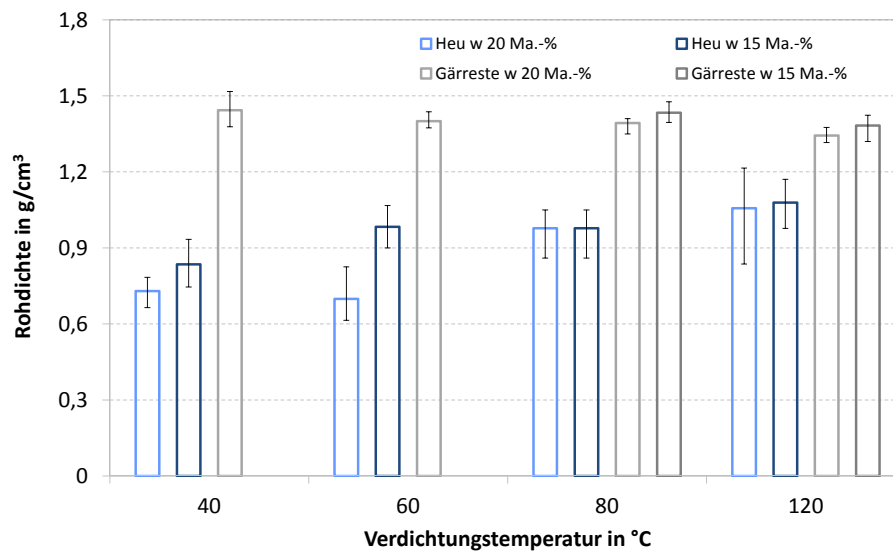
Ergebnisdarstellung zum Einfluss des Wassergehaltes

Abb. 4.31 zeigt die Verformungsarbeiten für die Verdichtung von Heu bzw. Gärresten in Abhängigkeit der Verdichtungs-temperatur getestet bei zwei verschiedenen Wassergehalten: 15 bzw. $20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$. In Abb. 4.32 sind die resultierenden Rohdichten dargestellt.



Für Versuchsvariationen ohne Angaben konnte aus technischen Gründen keine Verdichtung durchgeführt werden.

Abb. 4.31: Geleistete Verformungsarbeit bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164) bzw. Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit des Wassergehaltes sowie der Verdichtungs-temperatur (Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)



Für Versuchsvariationen ohne Angaben konnte aus technischen Gründen keine Verdichtung durchgeführt werden.

Abb. 4.32: Erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164) bzw. Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit des Wassergehaltes sowie der Verdichtungstemperatur (Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, sinkt die Verformungsarbeit mit zunehmender Verdichtungstemperatur, auch unabhängig von den getesteten Wassergehalten. Signifikant ist, dass bei der Verarbeitung von Heu der Wassergehalt eine geringere Rolle spielt als bei Gärresten.

Heuverdichtung: Eine Reduzierung des Wassergehaltes von 20 auf 15 Ma.-% verursacht bei geringen Temperaturen gegenläufige Ergebnisse: Bei 40 °C erhöht sich die Verdichtungsarbeit um etwa 18 %. Bei 60 °C verringert sich diese um 16 %. Indessen werden bei der Verdichtung mit 20 Ma.-% vergleichsweise hohe Schwankungsbereiche in Abb. 4.31 deutlich. Bei einer weiteren Temperaturerhöhung ist bei 15 Ma.-% mehr Arbeit notwendig als bei 20 Ma.-% (Erhöhung um 38 % bei ϑ_V 80 °C und um 44 % bei ϑ_V 120 °C). Wasser besitzt die Funktion Reibungseigenschaften in Presskanal zu reduzieren [56], wobei im EPK höhere Wassergehalte als bei der standardisierten Pelletierung benötigt werden. Die Ursache findet sich in der längeren Verweilzeit im Presskanal, da jede Schicht im Einzelpellet per Hand generiert wird. Dies hat zur Folge, dass mehr Wasser während des Herstellungsprozesses benötigt wird, um Gleit- und Reibungskräfte besser zu überwinden. Gleichzeitig verdampft mehr Wasser, was durch den Endwassergehalt der Einzelpellets bestätigt wird (8-10 Ma.-% unabhängig vom Ausgangswassergehalt, ermittelt im Schnellfeuchtebestimmer). Die resultierenden Einzelrohndichten weisen Unterschiede bei geringeren Temperaturen (40 bzw. 60 °C) auf - diese steigen bei geringeren und fallen bei höheren Wassergehalten. Vermutlich werden die Heufasern bei 15 Ma.-% infolge erhöhter Arbeitsleistung näher zusammengebracht. Bei höheren Temperaturen weisen die Rohndichten bei unterschiedlichen Wassergehalten keine signifikanten Unterschiede mehr auf (Abb.

4.32). Vermutlich können die Faser unabhängig der höheren Temperatur nicht näher zusammengebracht werden. Parallel sind Bindungseffekte durch Denaturierung bereits bei 60°C effektiv [67] und bedürfen keiner weiteren Temperaturerhöhung.

Gärrestverdichtung: Zunächst ist zu erwähnen, dass die untersuchten Gärreste mit einem Wassergehalt von $15\text{ Ma.}\%$ bei geringen Temperaturen (40 bzw. 60°C) mit der untersuchten EPK-Apparatur nicht verdichtbar sind (fehlende dunkelgraue Balken in Abb. 4.31 und Abb. 4.32). Die aufzubringende Kraft zur Verdichtung des Materials überstieg bei allen Versuchen die gerätespezifische Maximalkraft von 50 kN , sodass stets eine Fehlermeldung auftrat und der Versuch automatisch abgebrochen wurde. Als Ursache sind zu hohe Reibungskräfte infolge des Flüssigkeitsmangels in Verbindung mit den niedrigen Verdichtungstemperaturen zu nennen. Des Weiteren begünstigt der hohe Aschegehalt der Gärreste (Aschegehalt von $29,4\text{ Ma.}\%$ *wf*, Anhang Tab. C.1) die Reibungseffekte im Presskanal. Eine Verringerung des Wassergehaltes von 20 auf $15\text{ Ma.}\%$ verursacht bei der Verdichtung von Gärresten eine deutliche Arbeitssteigerung von 63% bei $\vartheta_V\ 80^\circ\text{C}$ bzw. 55% bei $\vartheta_V\ 120^\circ\text{C}$. In diesem hohen Temperaturbereich weisen, wie auch bei der Heuverdichtung, die Rohdichten der Gärresteinzelpellets keine charakteristische Veränderung mehr auf (Abb. 4.32). Bemerkenswert ist allerdings, dass sich die erforderliche Verformungsarbeit bei einer Temperaturerhöhung von 80 auf 120°C halbiert. Das in den Gärresten angereicherte Lignin (Ligningehalt von 284 g/kgTS , Anhang Tab. C.2) wird bei geringen Wassergehalten und hohen Temperatur (120°C) fließfähiger, ähnlich dem Holzlignin [80] und fungiert als Gleit- und Bindemittel. Bei geringen Temperaturen (80°C) wird infolge größerer Reibungskräfte mehr Arbeit zur Herstellung der Gärrestpellets mit nahezu gleichbleibenden Einzelrohddichten benötigt.

Fazit zum Einfluss des Wassergehaltes

Der Wassergehalt des Rohstoffes ist eine wichtige Kenngröße für die Herstellung von Pellets im EPK. Im betrachteten Untersuchungsraum kann durch Erhöhung des Wassergehaltes die Verformungsarbeit in Verbindung mit dem Energieeintrag reduziert werden. Allerdings ist der Wassergehalt für die Gärrestverdichtung einflussreicher als bei Heu - das im Gärrest angereicherte Lignin schmilzt temperatur- und wasserabhängig [80]. Das in den Heufasern enthaltene Protein entfaltet seine Funktion als Bindestoff bereits bei mittleren Temperaturen (60°C) und weist kaum einen Einfluss durch den Wassergehalt des Materials auf [67].

4.3.4 Untersuchungen zum Einfluss der Partikelgröße

Ausgangspunkt der Untersuchungen zum Einfluss der Partikelgröße

Die Partikelgröße kann durch mehrere Faktoren definiert werden und stellt in Abhängigkeit des Rohstoffes einen weiteren Einflussfaktor auf die Pelletqualität dar. Häufig zeigen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Größenverteilungen, dass kleine Partikelgrößen zu hohen Rohdichten führen. Durch höhere Verdichtungen kleinerer Partikel vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen den Partikeln. Somit kann die von außen zugeführte Energie in Form der Verdichtung besser adsorbiert und Bindungseigenschaften chemischer Komponente im Rohstoff aktiviert werden [3]. Allerdings geht dies oftmals mit einem erhöhten Energieeintrag einher. Infolge größerer Oberflächen der kleineren Partikel herrscht eine bessere Konditionierung, was zur besseren Aktivierung von Bindemechanismen mit stofflichen Brücken beiträgt. Große Partikel können eher zu Rissen und Fehlstellen bis hin zum Bruch der Pellets führen. Optimal erscheint eine Mischung aus verschiedenen Partikelgrößen [33]. Hierfür ist eine für den jeweiligen Rohstoff geeignete Partikelgrößen- bzw. Faserlängenverteilung erforderlich, um optimale Bindungen im Pellet zu generieren.

Zur Untersuchung des Einflusses der Partikelgröße wurde zunächst die Verdichtung von Heu mit vier unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden bzw. Fraktionen getestet.

Ergebnisdarstellung zum Einfluss der Partikelgröße

In Abb. 4.33 sind die Verformungsarbeiten sowie die erzielten Rohdichten als Qualitätsmerkmal dargestellt. Zur Vergleichbarkeit fanden alle Verdichtungen bei einer Temperatur von 60°C statt - somit sind Denaturierungseffekte der im Heu enthaltenen Proteine bei allen Versuchschargen nahe zu gleich bedeutsam.

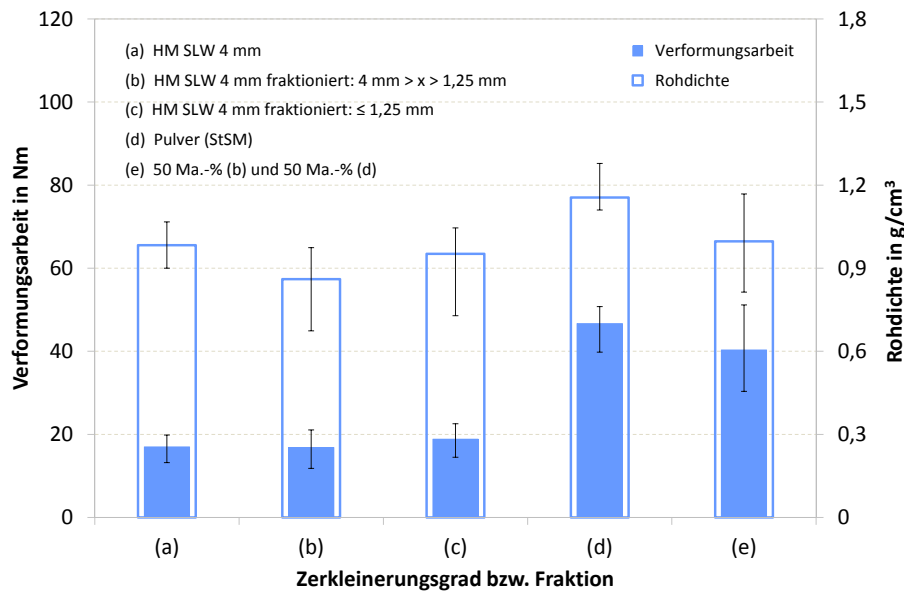


Abb. 4.33: Geleistete Verformungsarbeit und erzielte Rohdichte bei der Herstellung von Einzelpellets aus verschiedenen Heufractionen (TK-1164) bei einer Verdichtungstemperatur von $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($w\ 15 \pm 0,5\text{ Ma.-%}$)

Die in Abb. 4.33 dargestellte Variante (a) mit HM SLW 4 mm dient als Ausgangsmaterial für alle weiteren Heuverdichtungen im EPK. Durch Fraktionierung dieser Charge mittels Handsiebung (SLW $1,25\text{ mm}$) in (b) $4\text{ mm} > x > 1,25\text{ mm}$ und (c) $\leq 1,25\text{ mm}$ zeigen sich kaum Veränderungen in der benötigten Verformungsarbeit. Die erzielte Rohdichte bleibt bei Verdichtung der feineren Fraktion (c) nahezu konstant, sinkt allerdings bei Verdichtung der längeren Fasern (b) infolge größerer Hohlräume zwischen den einzelnen Fasern im Pellet.

Im nächsten Schritt erfolgte eine Mahlung des Heus HM SLW 4 mm mit Hilfe der Stabschwingmühle (StSM) zur weiteren Reduzierung der Faserlänge, mit dem Ziel der Formschlussreduzierung und Aktivierung anderer Bindemechanismen durch Näherbringen der Partikel. Die Verkürzung der Faserlängen zeigt die Verteilungssummenfunktion in Abb. 4.34 sowie die Mikroskopaufnahme in Abb. 4.35. Zum Vergleich sind in Abb. 4.34 weitere Verteilungsfunktionen zusammengetragen: des Ausgangsmaterials (Heu HM SLW 4 mm), der aufgelösten Pellets aus dem Ausgangsmaterial und der mit Hammermühle SLW 4 mm zerkleinerten Gärreste. Bemerkenswert sind die engen und vergleichbaren Verteilungen der kurzen Fasern/Partikeln des Heupulvers (StSM) und der Gärreste (HM SLW 4 mm). Damit wird bestätigt, dass der Formschluss als Hauptbindemechanismus geschwächt und durch andere Mechanismen, vergleichbar zur Gärrestverdichtung, verdrängt wird. Neben den kurzen Fasern $\leq 2,5\text{ mm}$ sind zudem Agglomerationseffekte aufgrund der Feinheit zu erkennen (kuglige Strukturen in Abb. 4.35). Bei der Nutzung der StSM erfolgte eine Temperaturüberwachung mittels Infrarot-Thermometer, sodass eine Temperaturerhöhung, in Verbindung mit der Einflussnahme auf die chemische Veränderung

temperaturempfindlicher Inhaltsstoffe wie Proteine, ausgeschlossen werden kann. Abb. 4.33 zeigt, dass bei Verdichtung des Pulvers (d) höhere Rohdichten erzielt werden, allerdings wird dafür 64 % mehr Arbeit benötigt. Bei Mischung des Pulvers mit der groben Heufraktion zu je 50 *Ma*.-% (Abb. 4.33, Versuchsvariante (e)) wird zwar eine vergleichbare Rohdichte wie beim Ausgangsmaterial (a) erreicht, allerdings wird aufgrund größerer Reibungskräfte 57 % mehr Arbeit verrichtet.

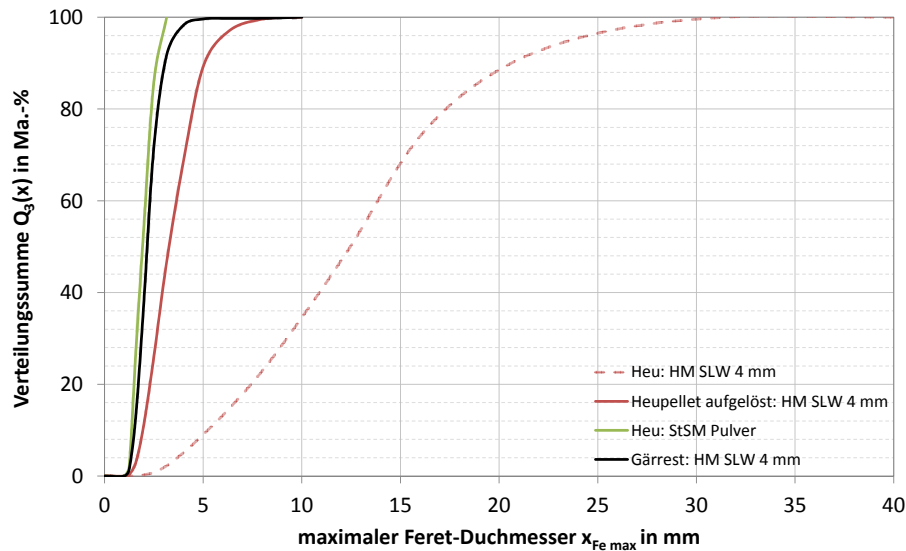


Abb. 4.34: Verteilungssummenfunktion ausgewählter Heu- (TK-1164, optische Faseranalyse nach ISO 13322-2 [32]) und Gärrestfraktionen (TK-1388, Siebanalyse nach DIN EN 15149-2 [15]) in Abhängigkeit von der Faserlänge bzw. der Korngröße



Abb. 4.35: Stereomikroskopaufnahme von Heu (TK-1164), Zerkleinerung mittels Stabschwingmühle (Pulver)

Bei der Verdichtung von Heu scheint die Faserlängenverteilung ein wichtiger Faktor für qualitativ hochwertige Pellets mit möglichst wenig Energieeintrag zu sein. Die Ausbildung von formschlüssigen Bindungen durch längere Fasern und das Füllen der Zwischenräume mit geeigneten kurzen Fasern stellt einen wichtigen Mechanismus dar. Allerdings

resultiert der Formschluss in geringen Bindekräften. So neigen Fasern bei kleinen rohstoffseitigen Variationen, z.B. leichte Wassergehaltserhöhung oder geringere Verdichtungstemperaturen, eher zur Rückexpansion in Verbindung mit schlechteren Qualitätsmerkmalen, wie geringere Roh- und Schüttdichten. Je kleiner die Partikel, wie z.B. im Heupulver, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, Flüssigkeits- und Festkörperbrücken sowie adhäsive Bindemechanismen mit stärkeren Bindekräften auszubilden. Als Resultat steigt die Pelletqualität, z.B. in Form höherer Rohdichten (Abb. 4.33 und [3]). Den Übergang der verschiedenen Bindemechanismen kann mittels REM-Aufnahmen der Pelletbruchflächen dargestellt werden (Abb. 4.36). Abb. 4.36, H zeigt die Bruchfläche eines Heu- und Abb. 4.36, I die eines Gärrestpellets, jeweils hergestellt mit einem Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm mit Hilfe der RMP. Abb. 4.36, J stellt hingegen die Bruchfläche eines Heupellets, welches im EPK mit dem Pulver erzeugt wurde, dar. In Abb. 4.36, H sind deutliche Faserstrukturen mit Falzen und Überlappungen der einzelnen Fasern zu erkennen. Der äußere Rand der Pelletbruchfläche ist durch die langen Heufasern eher gezackt, da der Formschluss an dieser Stelle gebrochen wurde. Im Vergleich dazu besitzt das Gärrest- (Abb. 4.36, I) und das Heupulverpellet (Abb. 4.36, J) eher eine glatte Bruchfläche, was darauf hindeutet, dass formschlüssige Verbindungen eher eine untergeordnete Rolle spielen. Die Bruchfläche des Gärrestpellets zeigt eine schollen-ähnliche Struktur, die vermutlich durch die Verdichtung der einzelner Schichten entsteht. Auch der Randbereich weist einen glatten Bruch und keinerlei fasrige oder kuglige Strukturen auf. Dahingehend sind im Randbereich des Heupulverpellets teils noch kurze Fasern zu erkennen, welche auf einen reduzierten Formschluss als Bindemechanismus hindeuten.

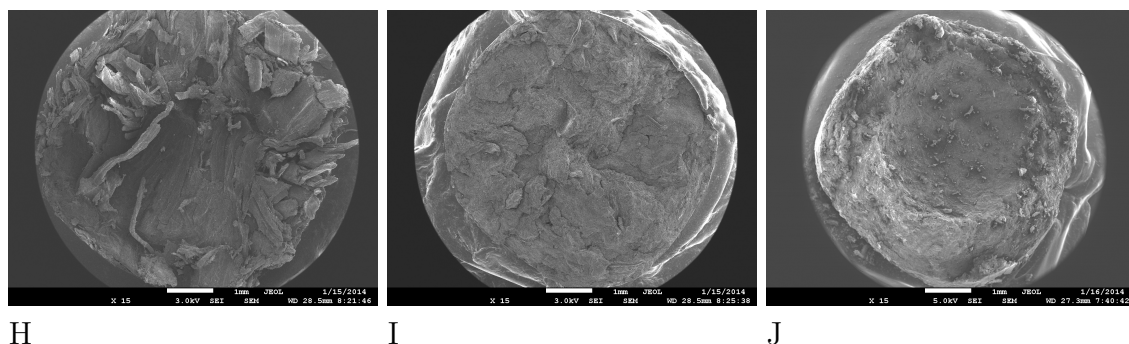


Abb. 4.36: REM-Aufnahmen von Pelletbruchflächen: H - Heupellet (RMP, TK-1164, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ Ma.-%), I - Gärrestpellet (RMP, TK-1480, HM SLW 4 mm, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%), J - Heupellets (EPK, TK-1164, StSM Pulver, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%, ϑ_V 60°C), H und I - Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1

Neben den Heufractionen wurden zwei Zerkleinerungsgrade (HM SLW 4 und 10 mm) der Gärreste im EPK bei unterschiedlichen Temperaturen verdichtet (Abb. 4.37). Die resultierenden Rohdichten sind in Abb. 4.38 dargestellt.

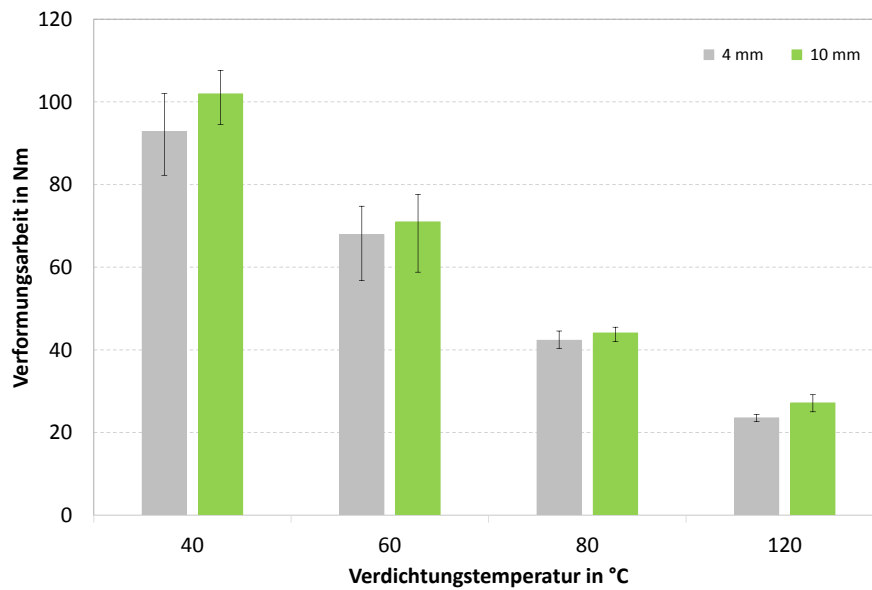


Abb. 4.37: Geleistete Verformungsarbeit bei der Herstellung von Einzelpellets aus Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsgrades und der Verdichtungstemperatur ($w \ 20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)

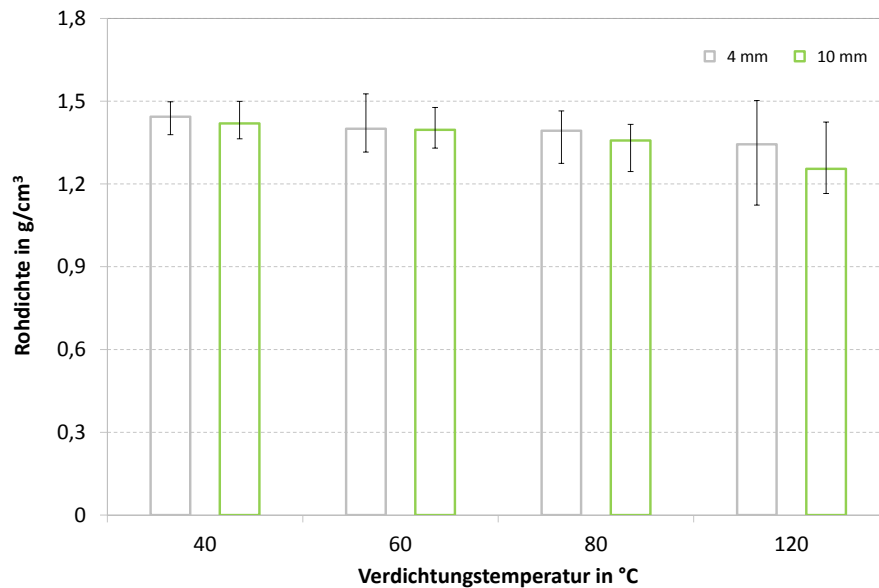


Abb. 4.38: Erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsgrades und der Verdichtungstemperatur ($w \ 20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)

Aus Abb. 4.37 geht hervor, dass sich mit zunehmender Verdichtungstemperatur die geringen Unterschiede in den Verformungsarbeiten der unterschiedlich zerkleinerten Gärreste reduzieren (HM SLW 4 mm: bei $\vartheta_V \ 40^\circ\text{C}$ $W_{MV} \ 93 \text{ Nm}$, bei $\vartheta_V \ 120^\circ\text{C}$ $W_{MV} \ 24 \text{ Nm}$, HM SLW 10 mm: bei $\vartheta_V \ 40^\circ\text{C}$ $W_{MV} \ 102 \text{ Nm}$, bei $\vartheta_V \ 120^\circ\text{C}$ $W_{MV} \ 27 \text{ Nm}$). Die Rohdichten zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Zerkleinerungsgraden bei glei-

cher Temperatur. Nur der allgemeine Trend der Gärresteinzel pellets wird deutlich - mit zunehmender Verdichtungstemperatur nimmt die Rohdichte leicht ab (HM SLW 4 mm: bei ϑ_V 40 °C ρ 1,44 g/cm³, bei ϑ_V 120 °C ρ 1,34 g/cm³, HM SLW 10 mm: bei ϑ_V 40 °C ρ 1,42 g/cm³, bei ϑ_V 120 °C ρ 1,25 g/cm³).

Die Unterschiede in den Verformungsarbeiten bei geringen Temperaturen (40 bzw. 60 °C) begründen sich durch erhöhte Reibungskräfte der größeren Partikel. Bei höheren Temperaturen spielt die Partikelgröße in Verbindung mit Formschluss als Bindemechanismus offensichtlich keine signifikante Rolle. Wie in Abb. 4.30, E und F bzw. in Abb. 4.36, I dargestellt, sind weder Partikel-/Faserstrukturen noch optische Unterschiede bei verschiedenen Temperaturen oder Partikelgrößen im Gärrestpellet erkennbar.

Abb. 4.39 bestätigt die geringe Relevanz der Partikelgröße der Gärreste auf die Verformungsarbeit im Zusammenspiel mit den Heufasern. In Abb. 4.39 sind die Verformungsarbeiten und die ermittelten Rohdichten der 50 Ma.-%igen Mischung aus Heu und Gärresten dargestellt: (f) beide Rohstoffe mit einem Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm und (g) Heu mit einem Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm und Gärreste mit einem Zerkleinerungsgrad HM SLW 10 mm.

Die Verformungsarbeiten nehmen unabhängig der Gärrestpartikelgröße mit zunehmender Verdichtungstemperatur ab. Bei geringen Temperaturen (40 bzw. 60 °C) sind, wie auch bei reinen Gärresten (Abb. 4.37), die größten Unterschiede zu verzeichnen. Mit zunehmender Temperatur reduzieren sich die Unterschiede zwischen den getesteten Mischungen. Bei Betrachtung der Rohdichten in Abb. 4.39 wird kein eindeutiger Trend sichtbar - bei geringen Verdichtungstemperaturen (40 bzw. 60 °C) werden höhere Rohdichten und bei höheren Temperaturen (80 bzw. 120 °C) geringere Rohdichten mit größeren Gärrestpartikeln erreicht.

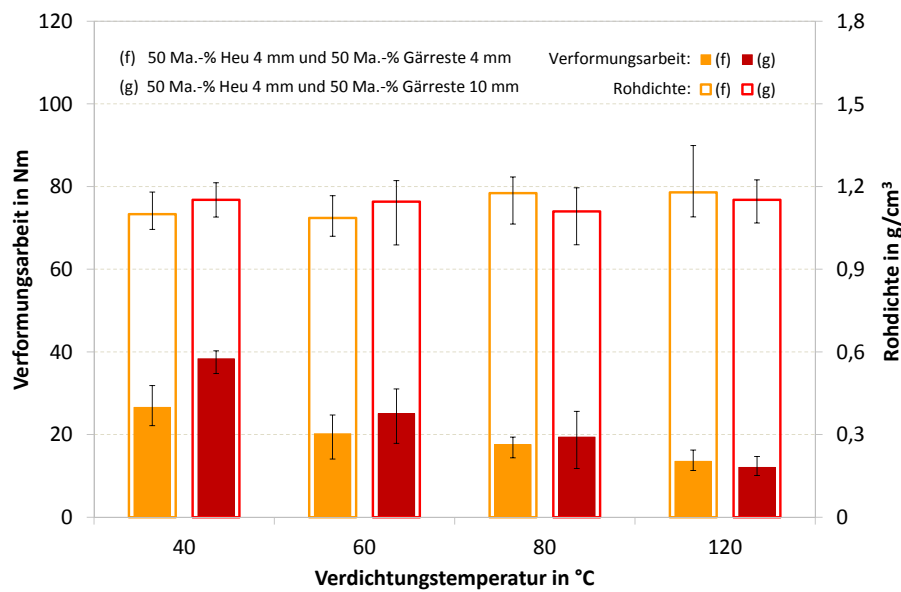


Abb. 4.39: Geleistete Verformungsarbeit und erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus der 50 Ma.-%igen Mischung von Heu (TK-1164) und Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit von der Zerkleinerung der Gärreste und der Verdichtungstemperatur ($w \ 20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)

Bei der Verdichtung von Heufasern mit Gärrestpartikeln (Abb. 4.30, G) erfolgt eine Kombination aller vorherrschenden Bindemechanismen. Über den Formschluss der Heufasern in Verbindung mit der Einbettung in eine Art Gärrestmasse wird ein stabiler Partikelverbund erzeugt. Die Verarbeitung der Mischung im EPK benötigt nur geringfügig mehr Verformungsarbeit als bei der Verdichtung von reinem Heu (Abb. 4.27), allerdings werden wesentlich höhere Rohdichten (Abb. 4.28) erzielt.

Der Einfluss der Partikelgrößen auf die Pelletierung von Heu bzw. Gärresten mittels RMP wurde bereits im Kapitel 4.1.1 beschrieben. Hier zeigt sich, dass normkonforme Heupellets (Abb. 4.7) mit einer optimalen Faserlängenverteilung bei geringstem Energieaufwand (Abb. 4.9) herzustellen sind. Bei der Erzeugung von reinen Gärrestpellets wird deutlich, dass auch bei der Nutzung der RMP kein signifikanter Einfluss der Partikelgröße auf die Pelletqualität (Abb. 4.14) und den Gesamtenergieverbrauch (Abb. 4.15) erkennbar ist.

Fazit zum Einfluss der Partikelgröße

Bei der Verdichtung von Heu als ein Beispiel für fasrige Rohstoffe ist die Partikelgröße in Form der Faserlänge ein entscheidender Einflussfaktor auf die Pelletqualität. Bei der Verarbeitung von Gärresten, als ein Beispiel für ligninreiche und faserarme Materialien, spielt die Partikelgröße/Faserlänge keine signifikante Rolle. Dies konnte sowohl anhand der Untersuchungen im EPK als auch bei der Verarbeitung unterschiedlicher Faserlängen

und Partikelgrößen mittels RMP gezeigt werden.

4.3.5 Untersuchungen zum Einfluss von Inhaltsstoffen

Ausgangspunkt der Untersuchungen zum Einfluss von Inhaltsstoffen

Proteine sind biologische Makromoleküle mit unterschiedlichsten Funktionen, welche in jeder Zelle vorhanden sind. Durch physikalische Einflüsse, wie Temperaturerhöhung über 60°C , pH-Wert-Änderungen durch Säuren, Alkohol oder Schwermetallsalze und auch Druck (zumeist über 1000 bar) verändert sich die räumliche Struktur (Sekundär- bis Quartärstruktur) der Proteine sowie deren Aufgaben [67]. Diese Denaturierung ist i.d.R. irreversibel.

Bei der Verdichtung von biostämmigen Materialien denaturieren Proteine infolge entsprechender Verdichtungstemperaturen. Diese Plastifizierung entspricht der Funktion eines rohstoffeigenen Bindemittels [33], [34].

Für Untersuchungen zum Einfluss von Proteinen auf den Faserzusammenhalt von zerkleinertem Heu wurde das Ausgangsmaterial (Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm) bei 105°C in einem Labortrockenschrank mit einer Verweilzeit von drei Stunden thermisch behandelt. Ziel dieser thermischen Modifikation ist die Denaturierung der Proteinmoleküle, in Verbindung mit der strukturellen Veränderung und Inaktivierung als rohstoffeigenes Bindemittel. Parallel wurde das Ausgangsmaterial mittels StSM fein zerkleinert. Neben der Reduzierung der Faserlänge (Kapitel 4.3.4) soll ein mögliches Freilegen von Proteinen intermolekulare Bindungen begünstigen und Pelletqualitäten verbessern. Anschließend erfolgt die Konditionierung aller Heuchargen für die Verdichtung im EPK auf $15 \pm 0,5\text{ Ma.}\%$.

Ergebnisdarstellung zum Einfluss von Inhaltsstoffen

In Abb. 4.40 sind die Verformungsarbeiten im EPK sowie die erzielten Rohdichten unterschiedlich behandelter Heuchargen bei 40 und 60°C dargestellt.

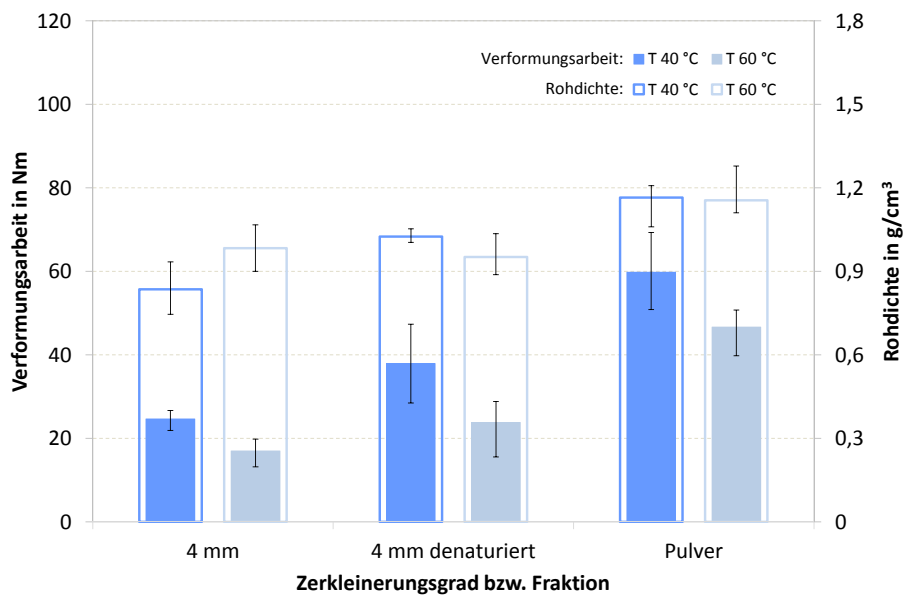


Abb. 4.40: Geleistete Verformungsarbeit und erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus unterschiedlich behandelten Heuchargen (TK-1164) in Abhängigkeit der Verdichtungstemperatur ($w 15 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)

Bei der Verarbeitung von technisch getrocknetem Heu wird bei einer Verdichtungstemperatur von 40°C mehr Arbeit verrichtet (HM SLW 4 mm: $W_{MV} 25 \text{ Nm}$, HM SLW 4 mm, denaturiert: $W_{MV} 38 \text{ Nm}$), wobei höhere Rohdichten (HM SLW 4 mm: $GD 0,84 \text{ g/cm}^3$, HM SLW 4 mm, denaturiert: $GD 1,02 \text{ g/cm}^3$) erzielt werden. Bei einer Temperaturerhöhung auf 60°C reduzieren sich die geleisteten Arbeiten aufgrund der sinkenden Reibungskräfte. Allerdings wird für die Verformung von getrocknetem und wieder befeuchtetem Heu noch 28,7% mehr Arbeit, bei sich angleichenden Rohdichten (HM SLW 4 mm: $GD 0,98 \text{ g/cm}^3$, HM SLW 4 mm, denaturiert: $GD 0,95 \text{ g/cm}^3$), benötigt.

Es wird davon ausgegangen, dass durch die technische Trocknung Proteine im Heu denaturiert wurden. Aufgrund der Irreversibilität [67] stehen diese somit für Bindungen in Form von Festkörperbrücken nicht mehr zur Verfügung. Des Weiteren entfällt die unterstützende Wirkung zur Reduzierung von Reibungskräften (Schmierung), was sich in der höheren Verformungsarbeit widerspiegelt.

Diese Deaktivierung der Proteine und der Einfluss auf den Pelletierprozess sowie die Qualitätsmerkmale der Pellets konnte mittels RMP und der Heucharge TK-1545 (Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm) im Doppelversuch bestätigt werden. Aus Tab. 4.1 geht hervor, dass unter gleichen Prozessbedingungen mit 160 Wh/kg etwas 17% mehr Energie für die Pelletierung von getrocknetem und anschließend konditioniertem Heu verbraucht wird als für nicht technisch getrocknetes Heu ($E_{spez, Pel} 133 \text{ Wh/kg}$). Dabei bleiben die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Pellets nahezu konstant und entsprechen den Qualitätsbestimmungen der ISO 17225-6 [20].

Tab. 4.1: Physikalisch-mechanische Pelleteigenschaften sowie Prozessbewertung der Pelletierung von Heu (TK-1545, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5$ Ma.-%) mittels RMP, Vergleich Lufttrocknung und technisch getrocknetes Material

Rohstoff	Heu (TK-1545)			
			Lufttrocknung	Technische Trocknung
Pelletbewertung				
Abriebfestigkeit	<i>DU</i>	<i>Ma.</i> -%	98,8	98,5
Max/Min-Abweichung		<i>Ma.</i> -%	± 0,1	± 0
Druckfestigkeit	<i>CR</i>	%	80,3	79,1
Max/Min-Abweichung		%	± 0,5	± 1,1
Schüttdichte	<i>BD</i>	<i>kg/m</i> ³	664	671
Max/Min-Abweichung		<i>kg/m</i> ³	± 1	± 5
Rohdichte	<i>GD</i>	<i>g/cm</i> ³	1,27	1,27
Max/Min-Abweichung		<i>g/cm</i> ³	+ 0,04/- 0,05	+ 0,10/- 0,05
Wassergehalt	<i>w</i>	<i>Ma.</i> -%	10,0	9,4
Max/Min-Abweichung		<i>Ma.</i> -%	± 0,4	± 0,2
Prozessbewertung				
Spezif. Energieverbrauch	<i>E_{spez,Pel}</i>	<i>Wh/kg</i>	133	160
Max/Min-Abweichung		<i>Wh/kg</i>	± 0	± 3
Pelletdurchsatz	<i>m_p</i>	<i>kg/h</i>	37,0	36,5
Max/Min-Abweichung		<i>kg/h</i>	± 0,5	± 0,9
Pellettemperatur	<i>ϑ_P</i>	°C	76,0	78,7
Max/Min-Abweichung		°C	± 0	± 0,5
Temperaturbereich Pressenraum	<i>ϑ_{PR}</i>	°C	45,3- 51,0	45,2- 53,3

Die Werte zur Pelletbewertung sind Mittelwerte aus Doppelversuchen und je zweifacher Analyse, mit Ausnahme der Rohdichte. Hier erfolgte jeweils eine 5-fache Bestimmung.

Die Werte zur Prozessbewertung sind Mittelwerte aus Doppelversuchen.

Die Pelletierung der Materialien erfolgt mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1.

Proteine tragen bei der Verdichtung von Heu zur Reduzierung der Reibung zwischen den Fasern selbst und der Presskanalwand und zur Erhöhung der Gleiteigenschaften bei, spielen aber für die Bindung und die Qualität der Pellets eher eine untergeordnete Rolle. Formschluss in Kombination mit einer geeigneten Faserlängenverteilung definiert den vorherrschenden Bindemechanismus in Heupellets. Inwieweit das Lignin im Heu Festkörperbindungen ausbildet, kann nur vermutet werden. Aufgrund des geringen Ligningehaltes von $58,7 - 90,0$ g/kg TS, welcher tendenziell unter dem Proteingehalt ($77,7 - 119,4$ g/kg TS) liegt (Anhang Tab. C.2), wird dem eher eine untergeordnete Bedeutung zugeschrieben.

In Abb. 4.40 ist weiterhin die Verdichtung von gemahlenem Heu (Zerkleinerung mittels StSM) im EPK bei 40 bzw. 60 $^{\circ}C$ abgebildet. Durch Temperaturerhöhung und Reduzierung der Reibungskräfte verringert sich die Verformungsarbeit um 22 % bei konstanter Rohdichte von $1,16$ g/cm³. Wie bereits in Abb. 4.36, J gezeigt, sind kaum Faserstrukturen im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Heu mit dem Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm, Abb. 4.36, H) sichtbar.

Zur Quantifizierung eines möglichen Bindemechanismuswechsels wurden mittels REM für ausgewählte Pellets die Methoden der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) zur punktuellen Ermittlung sowie das Mapping zur optischen Verteilung von Elementen angewendet. Abb. 4.41, und 4.42 zeigen jeweils links die REM-Aufnahme einer Heupellet-

bruchfläche mit je vier EDX-Messpunkten; rechts sind die Anteile ausgewählter Elemente den jeweiligen Messpunkten zugeordnet. Die entsprechenden Zahlenwerte sind im Anhang in Tab. H.1 dokumentiert.

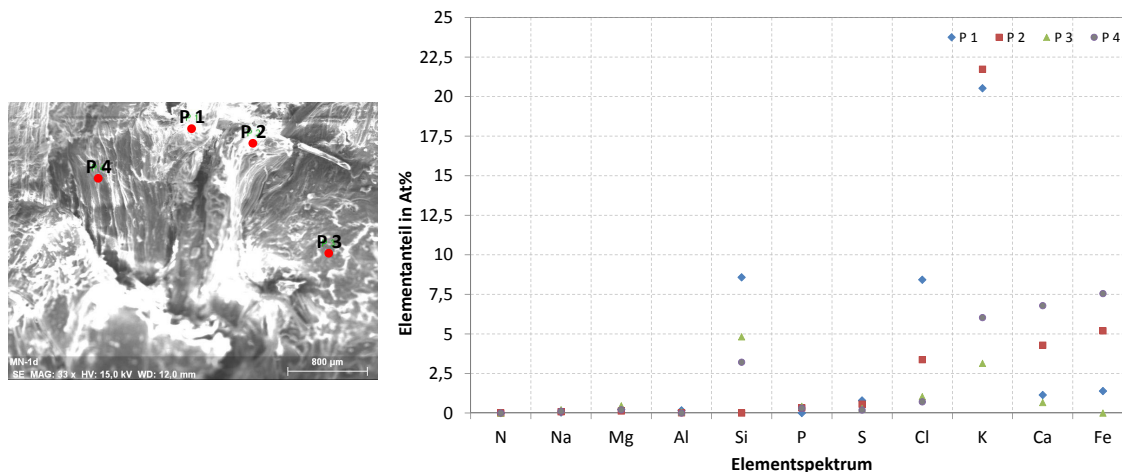


Abb. 4.41: links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Heupellets hergestellt mittels RMP (TK-1164, HM SLW 4 mm, w 12 ± 0,5 Ma.-%, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1) inkl. der EDX- Messpunkte; rechts: Quantifizierung der EDX- Messpunkten entsprechend Elementanteil

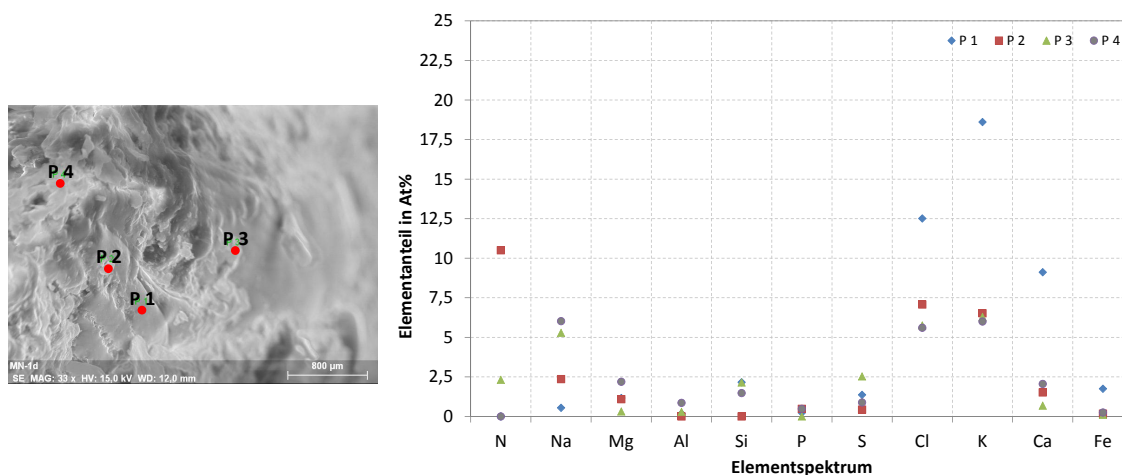


Abb. 4.42: links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Heupellets hergestellt mittels EPK (TK-1164, StSM Pulver, w 15 ± 0,5 Ma.-%, Verdichtung bei ϑ_V 60 °C) inkl. der EDX- Messpunkte; rechts: Quantifizierung der EDX- Messpunkten entsprechend Elementanteil

Im Vergleich zur Verdichtung der Heufasern (Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm) mittels RMP (Abb. 4.41) konnte durch die Mahlung des Fasermaterials mittels StSM an der Bruchfläche des Pellets (Abb. 4.42) an zwei Messpunkten (P2 und P3) ein erhöhter Gehalt an Stickstoff detektiert werden. Des Weiteren sind bei allen vier Punkten erhöhte Natrium- und Chlorwerte zu verzeichnen. Magnesium besitzt an drei Messpunkten höhere Werte. Das würde in ersten Ansätzen dafür sprechen, dass Elemente, z.B. auch N-haltige Proteine, durch die Feinvermahlung freigesetzt werden und für intermolekulare Bindungen

zur Verfügung stehen. Um diesen Verdacht in zweiter Instanz zu stützen, zeigen Abb. 4.43 und 4.44 je das N-, Na-, Mg- und Cl-Mapping der in Abb. 4.41 bzw. Abb. 4.42 jeweils links dargestellten Pelletbruchfläche. Auch hier lässt Abb. 4.44 deutlich eine flächendeckende bzw. punktuelle Anreicherung (hellere Farbdarstellung) der genannten Elemente im Vergleich zu Abb. 4.43 erkennen. In Abb. H.2 bis H.4 sind weitere Elemente wie O, Al, Si, P, K, Mg und Fe durch Mapping detektiert worden - alle zeigen eine Anreicherung bei der Verdichtung des Heupulvers vergleichend zu den Heufasern.

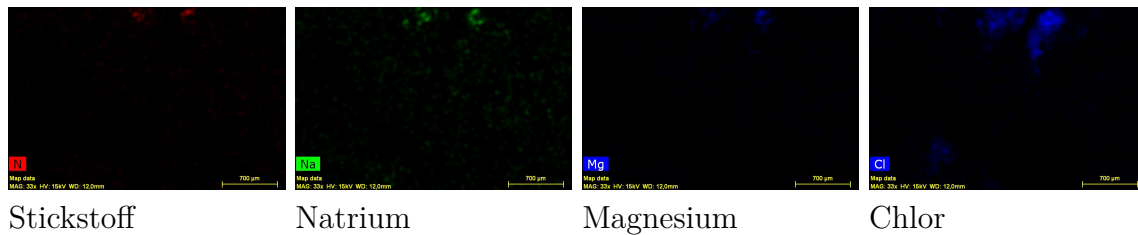


Abb. 4.43: N-, Na-, Mg- und Cl-Mappings der Pelletbruchfläche (Abb. 4.41, links): Heupellet, RMP (TK-1164, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5 \text{ Ma.}\%$, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1)

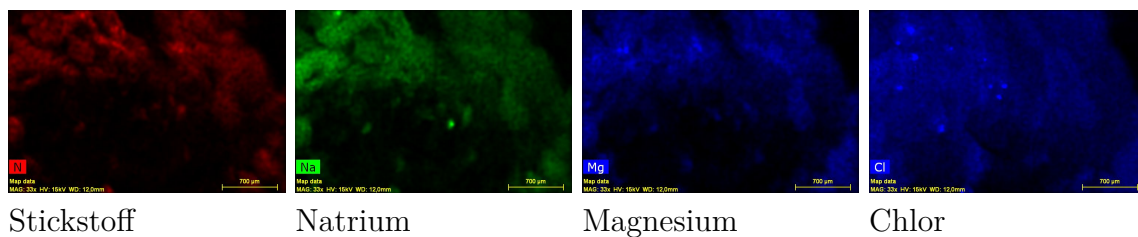


Abb. 4.44: N-, Mg-, Na- und Cl-Mapping der Pelletbruchfläche (Abb. 4.42, links): Heupellet, EPK (TK-1164, StSM Pulver, $w 15 \pm 0,5 \text{ Ma.}\%$, Verdichtung bei $\vartheta_V 60^\circ\text{C}$)

Neben den reinen Heufasern und dem Pulver aus Heu wurden die Bruchflächen eines Heu/-Gärrestpellets in 50 Ma.-%iger Mischung sowie eines reinen Gärrestpellets mit REM-EDX und Mapping untersucht. Abb. 4.45 zeigt links die REM-Aufnahme mit den vier EDX-Messpunkten eines Heu/Gärrest-Mischpellets. Die dazugehörigen Elemente sind rechts im Diagramm abgebildet. Abb. 4.46, links stellt dagegen die Bruchfläche eines reinen Gärrestpellets dar. Die äquivalenten EDX-Messpunkte sind im rechten Diagramm bzw. in Tab. H.1 quantifiziert.

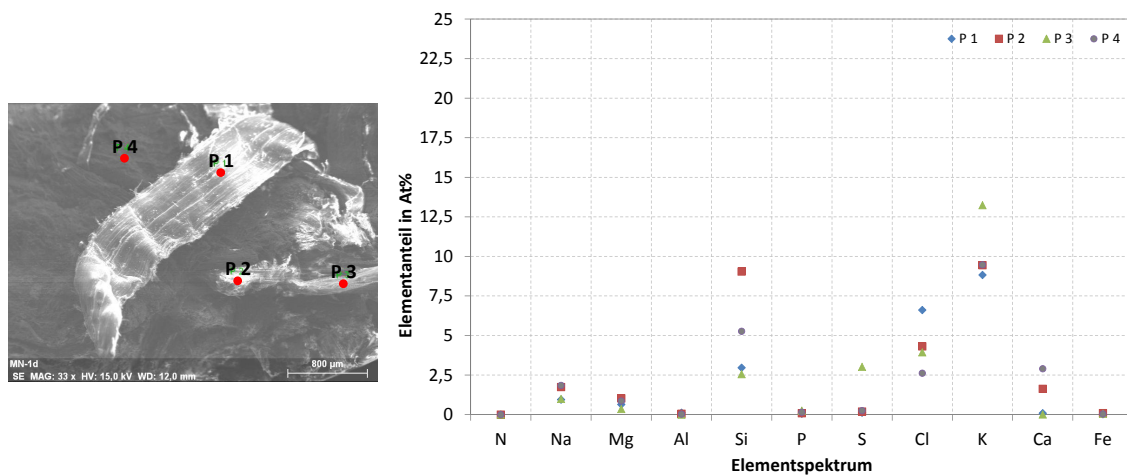


Abb. 4.45: links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Heu-/Gärrestpellets in 50 Ma.-%iger Mischung hergestellt mittels RMP (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5$ Ma.-%, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1) inkl. der EDX- Messpunkte; rechts: Quantifizierung der EDX-Messpunkten entsprechend Elementanteil

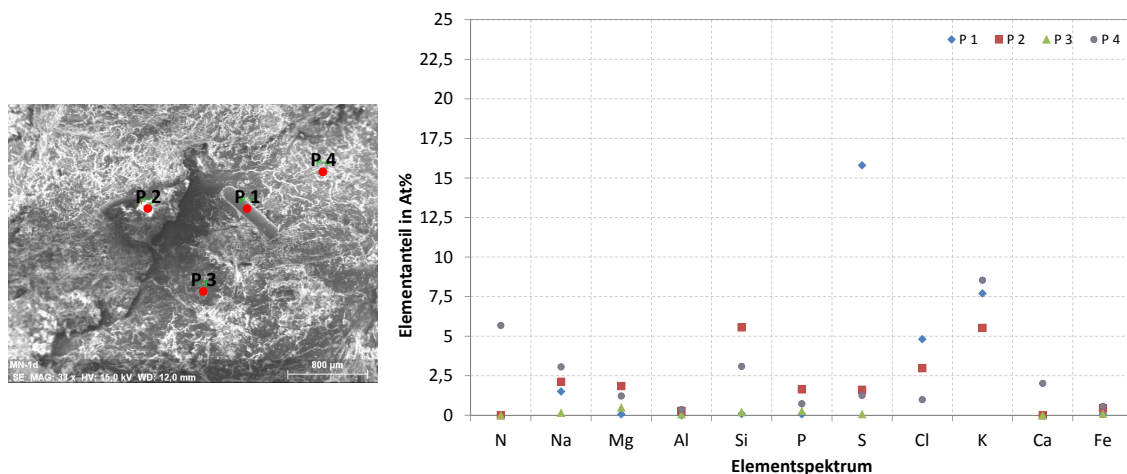


Abb. 4.46: links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Gärrestpellets hergestellt mittels RMP (TK-1480, StSM Pulver, HM SLW 4 mm, $w 15 \pm 0,5$ Ma.-%), Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1) inkl. der EDX- Messpunkte; rechts: Quantifizierung der EDX-Messpunkten entsprechend Elementanteil

In Abb. 4.45, links gezeigter REM-Aufnahme des Heu-/Gärrest-Mischpellets ist die Einbettung von Heufasern in die bereits erwähnte Gärrestmasse deutlich zu erkennen. Dieser Materialverbund wurde bereits bei vorangehenden mikroskopischen Untersuchungen detektiert (Abb. 4.30). Die vier getesteten Messpunkte zeigen allerdings keine signifikanten Unterschiede in der Verteilung der Elemente - wobei P1 die reinen Heufasern, P2 und P3 den Übergang zwischen Heufasern und Gärrest sowie P4 den reinen Gärrest abbilden sollte. Offensichtlich ist die Auswahl der Messpunkte nicht repräsentativ für ein Heu-/Gärrest-Mischpellet. Diese Vermutung begründet sich im angewandten Mapping - deutliche Unterschiede in der Verteilung und Konzentration der Elemente sind evident.

Im Vergleich dazu ist in Abb. 4.46 der reine Gärrest dargestellt. Hier lassen sich punktuell deutlich höhere Gehalte an Stickstoff und Schwefel (P1) sowie Chlor und Kalium (P3) erkennen. Gleichermäßen zeigen P1 und P3 einen reduzierten Sauerstoffanteil (Anhang Tab. H.1). Die korrespondierenden N-, S-, Cl- und K-Mappings sind sowohl für das Mischpellet in Abb. 4.47 als auch für das 100 *Ma.*-%ige Gärrestpellet in Abb. 4.48 abgebildet. Die Mappings zeigen im Bereich der Gärrestmasse erhöhte Anreicherungen der genannten und weiterer Elemente (Anhang Abb. H.6 und H.8). Es ist davon auszugehen, dass K, aber auch Ca, Na oder Mg in Verbindungen als Nitrate (NH_3^-), Phosphate (PO_4^{3-}), Sulfate (SO_4^{2-}) oder Chloride (Cl^-) vorliegen. Am Beispiel der Cl^- und K-Mappings wird sichtbar, dass diese Konzentrationen übereinanderliegen und somit KCl als kristallines Salz zu erwarten ist. Diese Salze sind bereits im Gärrest vorhanden und repräsentieren die Düngeeigenschaft. Allerdings sind viele Salze, wie z.B. KCl, NaCl und MgCl_2 gut in Wasser löslich. Mit steigender Temperatur steigt diese Löslichkeit. In Anbetracht des Pelletierprozesses und der herrschenden Temperaturen lösen sich diese Salze und bilden neue Verbindungen. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf Festkörperbindemechanismen.

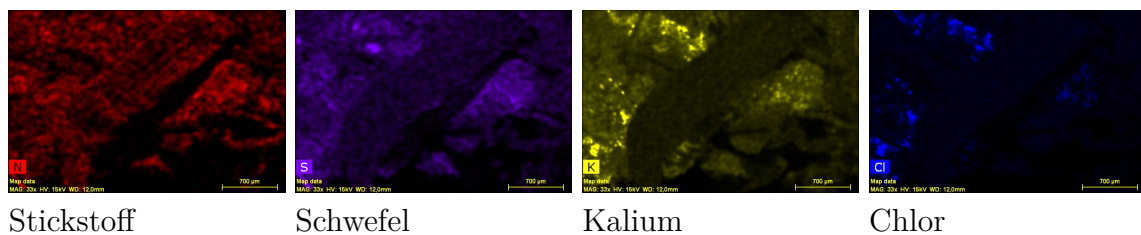


Abb. 4.47: N-, S-, K- und Cl-Mapping der Pelletoberfläche (Abb. 4.45, links): Heu/Gärrestpellet in 50 *Ma.*-%iger Mischung, RMP (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ *Ma.*-%, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1)

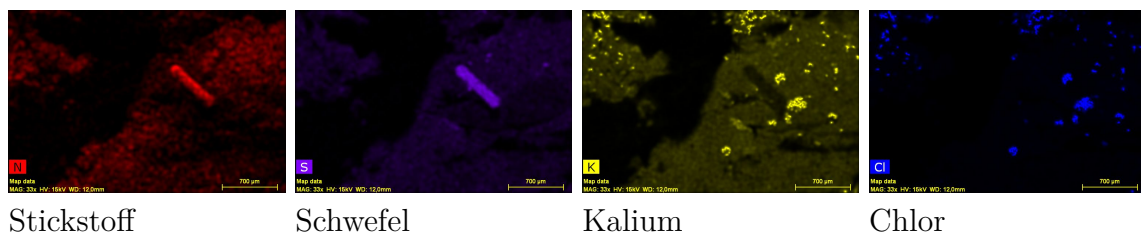


Abb. 4.48: N-, S-, K- und Cl-Mapping der Pelletoberfläche (Abb. 4.46, links): Gärrestpellet, RMP (TK-1480, HM SLW 4 mm, w $15 \pm 0,5$ *Ma.*-%), Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1

Fazit zum Einfluss der Inhaltsstoffe

Für die Verdichtung von Heufasern sind die Inhaltsstoffe nicht maßgeblich relevant für den Zusammenhalt im Pellet. Durch feines, pulverähnliches Aufmahlen der Fasern treten ein-

zelne Elemente an die Oberfläche und interpartikuläre Distanzen werden verringert. Durch die Feinstzerkleinerung wird der Rohstoff reaktiver [28] und Kräfte mit geringer Reichweite, wie Valenzbindungen, Wasserstoffbrückenbindungen und Van-der-Waals-Kräfte zeigen zunehmend eine Relevanz [78].

Gärreste hingegen besitzen bereits eine feine Partikelstruktur mit großer Oberfläche, sodass Anreicherungen von Elementen und Verschmelzungen im Pellet detektiert werden konnten. Somit ist naheliegend, dass Festkörperbrückenbindungen für den Zusammenhalt der Gärrestpartikel verantwortlich sind.

Zu erwähnen ist, dass mit der Analysemethode des Mappings keine Quantifizierung möglich ist. Durch punktuelle EDX-Aufnahmen können keine verifizierten Aussagen bezüglich der vorherrschenden Bindemechanismen getroffen werden - diese dienen lediglich als erste Anhaltspunkte und müssen durch alternative Methoden vertieft werden. Zusätzlich Untersuchungen wie ATR-FTIR und UV-Autofluoreszenz wären dabei hilfreiche Werkzeuge [34], [73].

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Die Verarbeitung von biogenen Rest- und Abfallstoffen zu qualitativ hochwertigen Pellets ist eine Möglichkeit der Bereitstellung von Festbrennstoffen mit definierten Eigenschaften. Das Einhalten von normierten physikalisch-mechanischen Größen wie Abriebfestigkeit und Schüttdichte ist unabdingbar, um eine stabile Förderung der Brennstoffpellets zu gewährleisten. Hohe Feinanteile infolge von instabilen Pellets oder erhöhtes Bruchrisiko können das Verbrennungsverhalten sowie die Emissionsbildung negativ beeinträchtigen.

Um den Verdichtungsprozess und dessen Einflussgrößen zu veranschaulichen, wurden am Beispiel von Landschaftspflegeheu und Gärresten als potentielle Rest- und Abfallstoffe verschiedene Pelletversuche, sowohl mit einer Ringmatrizenpresse als auch mit Hilfe eines Einzelpresskanals, durchgeführt. Da Inhaltsstoffe und Struktur der Rohstoffe von vielen Faktoren abhängen, variieren diese teils stark und stellen damit eine besondere Herausforderung für die Rohstoffaufbereitung dar. Somit liegt der Fokus auf den rohstoffseitigen Einflussgrößen wie dem Wassergehalt, der Partikelgrößen/-verteilungen und den für eine Verdichtung relevanten Inhaltsstoffen. Des Weiteren ist die prozesstechnische Optimierung des Produktionsprozesses maßgebend. Durch gezielte Variation von Prozessparametern der Ringmatrizenpresse, wie Förderleistung und Geschwindigkeit von Matrice, aber auch die Gestaltung der Presskanäle, können sowohl die Pelletqualität als auch der spezifische Energieverbrauch positiv beeinflusst werden.

Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Aufklärung vorherrschender Bindemechanismen. Die Theorie der Bindemechanismen und -kräfte weist eine hohe Komplexität auf und ist durch Überlagerungseffekte auch in dieser Arbeit nicht abschließend differenzierbar. Dennoch wurde durch unterschiedliche und für diese Thematik neue Untersuchungsansätze versucht, ein verbessertes Verständnis zum Partikel- und Faserzusammenhalt in Heu- und Gärrestpellets zu generieren.

Die zahlreich generierten Ergebnisse der Untersuchungen wurden in Teilen in unterschiedlichen Formaten publiziert. Eine Zusammenstellung findet sich in Anhang I.

Herstellung von Heupellets

Für die Herstellung von Holzpellets mit einem Durchmesser von 6 mm wird eine Soll-Partikelgröße $< 4\text{ mm}$ empfohlen [56]. Auch für die Pelletierung von Heu erzielt eine Zerkleinerung mittels Hammermühle mit einer Sieblochweite von 4 mm , im Vergleich zu 2 und 6 mm , die besten physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften, welche die Anforderungen der ISO 17225-6 [20] ($BD \geq 600\text{ kg/m}^3$ und $DU \geq 97,5\text{ Ma.-%}$) erfüllen. Zudem wird dafür der geringste Gesamtenergiebedarf (Zerkleinerung und Pelletierung) benötigt. Interessanterweise liegen etwa 95 Ma.-% der Faserlängen (optische Faseranalyse nach ISO 13322-2 [32]) über den empfohlenen 4 mm . Durch die Pelletierung und zusätzlichen Zerkleinerungseffekten zwischen Koller und Matrizie reduziert sich der Anteil der Überlängen ($> 4\text{ mm}$) auf ca. 30 Ma.-% .

Wie die Experimente am Einzelpresskanal zeigen, ist der Einfluss der Partikelgröße, im Vergleich zu Wassergehalt oder Verdichtungstemperatur, in Bezug auf die Rohdichte als Qualitätskriterium eher als gering zu bewerten. Dies bestätigen auch andere Forschungsarbeiten mit alternativen Rohstoffen [33], [61], [69].

Herstellung von Gärrestpellets

Bei der Pelletierung der Gärreste übertreffen alle Pelletchargen unabhängig vom Zerkleinerungsgrad ($2, 4, 6, 10\text{ mm}$) mit $BD\ 743\text{--}786\text{ kg/m}^3$ und $DU\ 98,8\text{--}99,0\text{ Ma.-%}$ deutlich die Vorgaben der ISO 17225-6 [20]. Unabhängig der eingesetzten Sieblochweite bei der Zerkleinerung mittels Hammermühle ergeben sich keine Partikel größer 5 mm (Siebanalyse nach DIN EN 15149-2 [15]). Inwieweit weitere Zerkleinerungserscheinungen während der Pelletierung auftreten, konnte nicht nachgewiesen werden - ein Auflösen in einzelne Partikel, vergleichbar dem Heu, ist nicht möglich. Auch die geringen Unterschiede im spezifischen Energiebedarf bei der Herstellung im Technikumsmaßstab sowie das Verdichtungsverhalten im Einzelpresskanal zeigen deutlich die geringe Einflussnahme der Partikelgröße. Im Unterschied zur Heupelletierung ist ein Wassergehalt von mehr als 12 Ma.-% erforderlich, um das Material in einen bindungsfähigen Zustand zu überführen.

Bei der Verarbeitung der Gärreste ist aufgrund eines hohen Feinanteils ($14\text{--}28\text{ Ma.-%}$ im zerkleinerten Zustand) von unter $0,5\text{ mm}$ mit Staubbelastungen und gesteigerter Explosionsgefahr [11] zu rechnen. Entsprechend ist ein angepasstes Absaugsystem bei der Zerkleinerung und Pelletierung empfehlenswert.

Herstellung von Mischpellets aus Heu und Gärresten

Die Mischung aus Heu und Gärresten sowie ihre Verarbeitung zu qualitativ hochwertigen Pellets stellt keine besondere Herausforderung dar. Durch prozesstechnische Anpassun-

gen halten alle produzierten Pellets die Vorgaben der ISO 17225-6 [20] ein. Mit größer werdendem Anteil an Gärresten sinkt zwar der Energieverbrauch, allerdings ist bei den hohen Aschegehalten der Gärreste (29,4 *Ma*.-% *wf*, Anhang Tab. C.1) mit zunehmenden Verschleißerscheinungen der Pelletierwerkzeuge zu rechnen. Durch Optimierung der prozesstechnischen Parameter (f_M und f_S) lassen sich sowohl bei hohen Heu- als auch bei hohen Gärrestanteilen der Energiebedarf der Pelletierung deutlich senken. Dabei erreichen die Qualitätsanforderungen der Pellets weiterhin die Zielvorgaben.

Betrachtungen der Bindemechanismen in Heu- und Gärrestpellets

Bei der Verdichtung von Heu, als Vertreter der Halmgüter, lassen sich anhand bildgebender Methoden (REM, EDX und Mapping) eindeutig formschlüssige Bindemechanismen als Hauptursache für den Zusammenhalt der Fasern erkennen. Die Fasern verhaken, umschlingen, falzen, falten und verfilzen sich. Es entsteht eine Art Geflecht, was durch Pressverdichtung hervorgerufen wird. Unterstützende Funktion, so dass Fasern besser ineinander gleiten, kann durch rohstoffeigene Bindemittel wie Proteine geleistet werden. Zum einen konnte dies durch einen erhöhte Energiebedarf der Pelletierung von technisch getrocknetem Heu (irreversible Denaturierung der Proteine) gezeigt werden. Zum anderen reicht sich erst bei einem starker Zellaufschluss (Zerkleinerung der Heufaser zu pulverähnlichem Material) Stickstoff (als Indikator für denaturierte Proteine) in Pellets an. Durch die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche wird das Material reaktiver und kann andere Bindungsformen als den Formschluss eingehen.

Bei der Verdichtung von Gärresten, als Beispiel für ligninreiche und faserarme Reststoffe, haben formschlüssige Bindungen keine Relevanz - REM-Aufnahmen von Gärrestpellets zeigen keine nennenswerten Partikelstrukturen mehr. Der Ligningehalt der Gärreste ist vergleichbar hoch wie im Holz. Durch die Verfügbarkeit von Wasser und ausreichend Temperatur lassen sich Festkörperbindungen als Hauptmechanismus detektieren. Anreicherungen verschiedener Elemente stellen Schmelzeffekte im Pellet dar und untermauern diese Aussage.

5.2 Ausblick

Sowohl Heu als auch Gärreste können pelletiert werden. Durch Optimierung der Rohstoff- und Prozessparameter ist die Herstellung normenkonformer Brennstoffpellets aus Heu und/oder Gärreste aus physikalisch-mechanischer Sicht möglich. Nun ist zum einen die Übertragung der Parameter auf andere Heu- und Gärrestchargen zu realisieren. Dabei stellen die Gärreste, aufgrund der unterschiedlichen Inputstoffe sowie die Einflüsse durch die

Fahrweise der BGA, eine besondere Herausforderung dar. Zum anderen müssen die technischen Pelletierparameter aus dem Technikumsmaßstab heraus auf Großanlagen übertragen und ggf. auf die Anlagentechnik angepasst werden.

Da es um die Produktion eines Festbrennstoffes geht, ist die Tauglichkeit in Kleinfeuerungsanlagen zu prüfen. Dabei spielen die Einordnung des Brennstoffes und die Anforderungen der 1. BImSCHV für Kessel bis 100 kW [2] die entscheidende Rolle. Heu zählt nach § 3 Absatz 1 als strohähnlicher Regelbrennstoff zu den Nummer 8 Brennstoffen. Demnach ist eine Typenprüfung nach EN 303-5, einschließlich einer Dioxin- und Furanmessung, für die Kesselzulassung erforderlich. Bei reinen Gärresten oder auch in Mischung mit Heu handelt es sich um sonstige Brennstoffe gemäß § 3 Absatz 1 Nummer 13. Hier ist ein Qualitätsstandard für Pellets und ein einjähriges Messprogramm inkl. Dioxin- und Furanmessung gefordert. Der breite Mischungsgrad aus Gärresten und Heu unter dem Aspekt der Brennstoffqualität resultiert in der Variation an verbrennungsrelevanten Eigenschaften (kritisch einzuschätzende Inhaltsstoffe wie N, S, Cl, K sowie Aschegehalt). Basierend darauf sind die verbrennungstechnischen Eigenschaften der Pellets in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen und zu optimieren. Ggf. ist mit Additiven, die das Verbrennungs- und Emissionsverhalten beeinflussen, zu arbeiten. Des Weiteren kann infolge der mechanischen Beanspruchung der Pellets beim Transport in Förderschnecken (Brüche und Reibungserscheinungen) ein erhöhter Feinanteil entstehen. Dabei sind die Auswirkungen auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten zu eruieren.

Im Bezug auf das verbesserte Verständnis zu den Bindemechanismen in Heu- und Gärrestpellets ist der erste Schritt getan. Dennoch bleibt die Frage der Ligninrelevanz offen. Alternative Methoden wie ATR-FTIR Spektroskopie und UV-Autofluoreszenz wurden bereits für andere Rohstoffe angewendet [34], [73], wobei Lignin detektiert werden konnte. Damit könnte die vermutlich untergeordnete Rolle des geringen Ligninanteils im Heu (aufgrund des geringen Verholzungsgrades) sichtbar gemacht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] BERGSTRÖM, D. ; ISRAELSSON, S. ; ÖHMAN, M. ; DAHLQVIST, S.-A. ; GREF, R. ; BOMAN, C. ; WÄSTERLUND, I.: Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. In: *Fuel Processing Technology* 89 (2008), Nr. 12, 1324-1329. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.001>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.001>. – ISSN 0378–3820
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU): *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV)*. 26.01.2010
- [3] CARONE, M. T. ; PANTALEO, A. ; PELLERANO, A.: Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. In: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), Nr. 1, 402-410. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>. – ISSN 0961–9534
- [4] CASTELLANO, J.M. ; GÓMEZ, M. ; FERNÁNDEZ, M. ; ESTEBAN, L.S. ; CARRASCO, J.E.: Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. In: *Fuel* 139 (2015), 629-636. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.033>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.033>. – ISSN 0016–2361
- [5] DBFZ ; ERA-NET BIOENERGY, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 9th Call-Verbundvorhaben (Hrsg.): *Ressourceneffiziente Brennstoffadditive zur Verringerung der verbrennungstechnischen Probleme bei der Rest- und Gebraucht-holzverbrennung (REFAWOOD); Teilvorhaben 1: Theoretische und experimentelle Untersuchungen*. <https://heizen.fnr.de/index.php?id=11409&fkz=22404215>. Version: 01.04.2016 - 31.03.2019
- [6] DBFZ ; ENERGETISCHE BIOMASSENUTZUNG (Hrsg.): *stROhgas - Entwicklung eines Verfahrens zur Vergasung von asche- und chlorhaltiger Biomasse am Beispiel*

- Stroh*. <https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/projekte-partner/details/project/show/Project/strohgaz-438/>. Version: 01.08.2013 - 31.12.2018
- [7] DBFZ: *Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen und deren aktuelle Nutzung - Status Quo in Deutschland*. Version: 2020. <https://www.dbfz.de/pressemediathek/mediathek/infografiken/>
- [8] DBFZ ; BOSCH UND PARTNER ; ATB: *DBFZ Report Nr. 17 - Grünlandenergie Havelland, Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland*. Leipzig, 2013
- [9] DEUTSCHER ENERGIEHOLZ- UND PELLET-VERBAND E.V. (DEPV): *Pelletfeuerungen in Deutschland*. Version: 2020. <https://depv.de/pelletfeuerungen>
- [10] DEUTSCHER ENERGIEHOLZ- UND PELLET-VERBAND E.V. (DEPV): *Pelletproduktion und -verbrauch in Deutschland*. Version: 2020. <https://depv.de/pelletproduktion>
- [11] Norm DIN EN 1127-1 2011-10. *Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik*
- [12] Norm DIN EN 14774-1 2009. *Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser - Referenzverfahren*
- [13] Norm DIN EN 14774-2 2009. *Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser - Vereinfachtes Verfahren*
- [14] Norm DIN EN 15103 2010-04. *Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte*
- [15] Norm DIN EN 15149-2 2010. *Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung - Teil 2: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 3,15 mm und darunter*
- [16] Norm DIN EN 15150 2012-01. *Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Partikeldichte*
- [17] Norm DIN EN 15210-1 2010-04. *Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts - Teil 1: Pellets*
- [18] Norm DIN EN 16127 2012. *Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets*

- [19] Norm DIN EN ISO 17225-2 2014-09. *Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets*
- [20] Norm DIN EN ISO 17225-6 2014-09. *Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 6: Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets*
- [21] DÖRING, S.: *Pellets als Energieträger - Technologie und Anwendung*. Bd. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978–3–642–01623–3
- [22] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR): *Leitfaden Feste Biobrennstoffe*. Bd. 4., vollständig überarbeitete Auflage. 2014. – ISBN 9783000153891
- [23] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR): *Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen, Fachtagung 3.-4. Juli 2018*. Bd. Gülzower Fachgespräche Band 57. 2018. – ISBN 978–3–942147–38–5
- [24] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR): *Reduktion von Treibhausgas-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien 2019*. Version: 2020. <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/thg-vermeidung-durch-die-nutzung-erneuerbarer-energien.html>
- [25] FILBAKK, T. ; JIRJIS, R. ; NURMI, J. ; HØIBØ, O.: The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. In: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), Nr. 8, 3342-3349. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.09.011>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.09.011>. – ISSN 0961–9534
- [26] GARCIA-MARAVAR, A. ; RODRIGUEZ, M.L. ; SERRANO-BERNARDO, F. ; DIAZ, L.F. ; ZAMORANO, M.: Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. In: *Fuel Processing Technology* 129 (2015), 1-7. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.018>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.018>. – ISSN 0378–3820
- [27] GILBERT, P. ; RYU, C. ; SHARIFI, V. ; SWITHENBANK, J.: Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. In: *Fuel* 88 (2009), Nr. 8, 1491-1497. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>. – ISSN 0016–2361
- [28] HEEGN, H.: Mechanische Aktivierung von Festkörpern. In: *Chemie Ingenieur Technik* 62 (1990), Nr. 6, S. 458–464. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/cite.330620606>. – DOI <https://doi.org/10.1002/cite.330620606>. – ISSN 0961–9534

- [29] HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG ; BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND: *Fleischatlas - Daten und Fakten über Tiere als Nahrungsmittel*. Bd. 2. Auflage. 2018
- [30] HEINZE, G.: *Handbuch der Agglomerationstechnik*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000. – ISBN 3-527-29788-X
- [31] HUSEMANN, K.: Zur Modellierung von Zerkleinerungsprozessen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 77 (2005), Nr. 3, S. 205–212. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/cite.200407086>. – DOI <https://doi.org/10.1002/cite.200407086>. – ISSN 0961-9534
- [32] Norm ISO 13322-2 2006-11. *Partikelgrößenanalyse - Bildanalyseverfahren - Teil 2: Dynamische Bildanalyseverfahren*
- [33] KALIYAN, N. ; MOREY, R. V.: Factors affecting strength and durability of densified biomass products. In: *Biomass and Bioenergy* 33 (2009), Nr. 3, 337-359. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>. – ISSN 0961-9534
- [34] KALIYAN, N. ; MOREY, R. V.: Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. In: *Bioresource Technology* 101 (2010), Nr. 3, 1082-1090. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>. – ISSN 0960-8524
- [35] KALTSCHMITT, M. ; HARTMANN, H. ; HOFBAUER, H. (: *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin, Heidelberg : Springer-Vieweg, 3., aktualisierte Aufl. 2016. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47438-9>. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47438-9>. – ISBN 978-3-662-47438-9
- [36] KERSTEN, J. ; ROHDE, H.-R. ; NEF, E.: *Mischfutterherstellung - Rohware, Prozesse, Technologie*. Bd. 2. Auflage. edition limosa Verlag, 2004. – ISBN 978-3860372333
- [37] KIRSTEN, C. ; LENZ, V. ; SCHRÖDER, H.-W. ; REPKE, J.-U.: *Pellets aus Gärresten - Herstellung und Herausforderungen*. Magdeburg, 10.-12.03.2014
- [38] KIRSTEN, C. ; LENZ, V. ; SCHRÖDER, H.-W. ; REPKE, J.-U.: Hay pellets - The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. In: *Fuel Processing Technology* 148 (2016), 163 - 174.

- <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.013>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.013>. – ISSN 0378–3820
- [39] KIRSTEN, C. ; WELLER, N.: Miscanthuspellets - Chancen, Erfahrungen und Probleme in Deutschland. In: *Europäische Pelletskonferenz, Wels Österreich* (033/2010)
- [40] KLEPPMANN, W.: *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. München Wien : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. – ISBN 978–3–446–44716–5
- [41] LARSSON, S. H. ; RUDOLFSSON, M.: Temperature control in energy grass pellet production - Effects on process stability and pellet quality. In: *Applied Energy* 97 (2012), 24-29. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.086>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.086>. – ISSN 0306–2619
- [42] LARSSON, S. H. ; RUDOLFSSON, M. ; THYREL, M. ; ÖRBERG, H. ; KALÉN, G. ; WALIN, M. ; LESTANDER, T. A.: Temperature controlled feed layer formation in biofuel pellet production. In: *Fuel* 94 (2012), 81-85. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.012>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.012>. – ISSN 0016–2361
- [43] LARSSON, S. H. ; THYREL, M. ; GELADI, P. ; LESTANDER, T. A.: High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. In: *Bioresource Technology* 99 (2008), Nr. 15, 7176-7182. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.065>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.065>. – ISSN 0960–8524
- [44] LEE, S. m. ; AHN, B. J. ; CHOI, D. H. ; HAN, G.-S. ; JEONG, H.-S. ; AHN, S. H. ; YANG, I.: Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. In: *Biomass and Bioenergy* 48 (2013), 1-9. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.015>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.015>. – ISSN 0961–9534
- [45] LEHMANN, B.: *Verfahrensoptimierung der Pelletierung von Braunkohlefaserholz mit Biomasse unter besonderer Berücksichtigung der Bindemechanismen*. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Diss., 2012
- [46] LEHMANN, B. ; SCHRÖDER, H.-W. ; WOLLENBERG, R. ; REPKE, J.-U.: Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. In: *Biomass and Bioenergy* 44 (2012), 150-159. <http://>

- [dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.009](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.009). – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.009>. – ISSN 0961–9534
- [47] LEHTIKANGAS, P.: Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. In: *Biomass and Bioenergy* 20 (2001), Nr. 5, 351–360. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1). – DOI [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1). – ISSN 0961–9534
- [48] LESTANDER, T. A. ; FINELL, M. ; SAMUELSSON, R. ; ARSHADI, M. ; THYREL, M.: Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems-the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. In: *Fuel Processing Technology* 95 (2012), S. 73–77. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.11.024](https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.11.024). – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.11.024>. – ISSN 0378–3820
- [49] LIEBETRAU, J. ; PFEIFFER, D. ; THRÄN, D. (Hrsg.): *Messmethodensammlung Biogas - Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich*. Bd. 7. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms “Energetische Biomassenutzung”, 2015. ISSN 2192–1806
- [50] MANI, S. ; TABIL, L. G. ; SOKHANSANJ, S.: Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. In: *Biomass and Bioenergy* 27 (2004), Nr. 4, 339–352. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007](https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007). – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>. – ISSN 0961–9534
- [51] MIAO, Z. ; GRIFT, T. E. ; HANSEN, A. C. ; TING, K. C.: Energy Requirement for Lignocellulosic Feedstock Densifications in Relation to Particle Physical Properties, Preheating, and Binding Agents. In: *Energy Fuels* 27 (2013), Nr. 1, S. 588–595. [http://dx.doi.org/https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef301562k](https://dx.doi.org/https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef301562k). – DOI <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef301562k>. – ISSN 0887–0624
- [52] MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG: *Optimale Aufbereitung von Gärresten aus der Bioabfallbehandlung - Ein Leitfaden*. Bd. 2. Auflage. 2016
- [53] MÜNCH EDELSTAHL GMBH: *Bedienungsanleitung Pellet-Anlagen RMP*. 2010
- [54] NIELSEN, N. P. K. ; GARDNER, D. J. ; FELBY, C.: Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. In: *Fuel* 89 (2010), Nr. 1, 94–98.

- <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.025>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.025>. – ISSN 0016–2361
- [55] NIELSEN, N. P. K. ; GARDNER, D. J. ; POULSEN, T. ; FELBY, C.: Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of Wood Residues Into Fuel Pellets. In: *Wood and Fiber Science* 41 (2009), Nr. 4, 414-425. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/469>. – ISSN 0735–6161
- [56] OBERNBERGER, I. ; THEK, G.: *Herstellung und energetische Nutzung von Pellets - Produktionsprozess, Eigenschaften, Feuerungstechnik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit*. Bd. 5, Schriftreihe Thermische Biomassenutzung. Graz : Medienfabrik Graz GmbH, 2009. – ISBN 978–3–9501980–5–8
- [57] PIETSCH, W. (Hrsg.): *Agglomeration Processes - Phenomena, Technologies, Equipment*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003. – ISBN 3–527–30396–3
- [58] PILZ, A. ; KIRSTEN, C. ; WELLER, N.: Aufbereitung von Mischbrennstoffen zur Konversion in Kleinfeuerungsanlagen. In: *Gießener Biomassekolloquium, Gießen* (27.-28.06.2012)
- [59] PILZ, A. ; KIRSTEN, C. ; WELLER, N. ; POLLEX, A.: Pelletization of Miscanthus - the optimisation of process parameters for the production of a standardised fuel. In: *20th European Biomass Conference and Exhibition, Mailand* (18.-22.06.2012), S. 1502–1507. – ISSN 978–88–89407–54–7
- [60] RETSCH TECHNOLOGY GMBH (Hrsg.): *Characteristics: CAMSIZER[®] Messgrößen*. 2005
- [61] RELOVA, I. ; VIGNOTE, S. ; LEÓN, M.A. ; AMBROSIO, Y.: Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure. In: *Biomass and Bioenergy* 33 (2009), Nr. 10, 1351-1357. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.005>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.005>. – ISSN 0961–9534
- [62] RMIG GMBH: *Berechnung der offenen Fläche*. <http://rmig.de/technische+informationen/formeln/berechnung+der+offenen+fl%C3%A4che>. Version: 2017-04-13
- [63] RUMPF, H.: Grundlagen und Methoden des Granulierens. In: *Chemie Ingenieur Technik* 30 (1958), Nr. 3, S. 144–158. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/cite.330300307>. – DOI <https://doi.org/10.1002/cite.330300307>. – ISSN 0961–9534

- [64] SAKATA, I. ; SENJU, R.: 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>
- [65] SAMUELSSON, R. ; THYREL, M. ; SJÖSTRÖM, M. ; LESTANDER, T. A.: Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. In: *Fuel Processing Technology* 90 (2009), Nr. 9, 1129-1134. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.007>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.007>. – ISSN 0378–3820
- [66] SCHUBERT, H. (Hrsg.): *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Bd. 1. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003. – ISBN 3–527–30577–7
- [67] SCHUCHMANN, H. P. ; SCHUCHMANN, H.: *Lebensmittelverfahrenstechnik - Rohstoffe, Prozesse, Produkte*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. – ISBN 978–3–527–66054–4
- [68] SCHWISTER, K. (Hrsg.): *Mischfutterherstellung - Rohware, Prozesse, Technologie*. Bd. 5. Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017. – ISBN 978–3446447783
- [69] SERRANO, C. ; MONEDERO, E. ; LAPUERTA, M. ; PORTERO, H.: Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. In: *Fuel Processing Technology* 92 (2011), Nr. 3, 699-706. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031>. – ISSN 0378–3820
- [70] SIEBERTZ, K. ; BEBBER, D. van ; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Springer Verlag GmbH, 2010. – ISBN 978–3–642–05493–8
- [71] SIEGLE, V.: *Biogene Brennstoffe in Aufbereitung und Verbrennung*. Aachen : Shaker Verlag GmbH, 2000. – ISBN 978–3–8265–7711–6
- [72] STELTE, W. ; HOLM, J. K. ; SANADI, A. R. ; BARSBERG, S. ; AHRENFELDT, J. ; HENRIKSEN, U. B.: Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. In: *Fuel* 90 (2011), Nr. 11, 3285-3290. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>. – ISSN 0016–2361
- [73] STELTE, W. ; HOLM, J. K. ; SANADI, A. R. ; BARSBERG, S. ; AHRENFELDT, J. ; HENRIKSEN, U. B.: A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets

- from different biomass resources. In: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), Nr. 2, 910-918. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>. – ISSN 0961-9534
- [74] STERNOWSKY, S.: *Persönlicher Kontakt*. 01/2015. – AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG
- [75] STÅHL, M. ; BERGHEL, J.: Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. In: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), Nr. 12, 4849-4854. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.003>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.003>. – ISSN 0961-9534
- [76] THRÄN, D. (Hrsg.): *Smart Bioenergy - Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems*. Springer International Publishing Switzerland, 2015. – ISBN 978-3-319-16192-1
- [77] TONN, B. ; THUMM, U. ; CLAUPEIN, W.: Semi-natural grassland biomass for combustion: influence of botanical composition, harvest date and site conditions on fuel composition. In: *Grass and Forage Science* 65 (2010), Nr. 4, 383-397. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00758.x>. – DOI 10.1111/j.1365-2494.2010.00758.x. – ISSN 0961-9534
- [78] TUMULURU, J. S. ; WRIGHT, C. T. ; HESS, J. R. ; KENNEY, K. L.: A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. In: *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 5 (2011), Nr. 6, 683-707. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/bbb.324>. – DOI <https://doi.org/10.1002/bbb.324>. – ISSN 1932-1031
- [79] UMWELTBUNDESAMT (UBA): *Erneuerbare Energien in Deutschland - Daten zur Entwicklung im Jahr 2017, Hintergrund März 2018*. 2018. ISSN 2363-829X
- [80] WELTE, M.: *Untersuchungen über den Einfluss der Holzbeschaffenheit auf die Eigenschaften von thermomechanischen Holzstoffen (TMP)*. Hamburg, Universität Hamburg, Diss., 1980
- [81] ZENG, T. ; WELLER, N. ; POLLEX, A. ; LENZ, V.: Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices. In: *Fuel* 184 (2016), 689-700. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.047>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.047>. – ISSN 0016-2361

Tabellenverzeichnis

2.1	Relevante Qualitätsanforderungen entsprechend der ISO 17225-2 für holzartige und der ISO 17225-6 für nicht-holzartige Biomassepellets	26
2.2	Chemische Zusammensetzung ausgewählter Biomassen	28
2.3	Untersuchungen zu Wassergehaltsvariationen unterschiedlicher Biomassen für die Pelletherstellung	33
2.4	Untersuchungen zu Variationen der Partikelgröße unterschiedlicher Biomassen für die Pelletherstellung	35
3.1	Pelletierparameter der statistischen Versuchsreihen	45
3.2	Versuchskomplex III - Rohstoffparamter für die Versuchsdurchführung am Einzelpresskanal (EPK)	46
3.3	Technische Daten der Ringmatrizenpresse RMP 250	51
3.4	Mess- und Fehlerbereiche häufig genutzter Messgeräte	62
4.1	Physikalisch-mechanische Pelleteigenschaften sowie Prozessbewertung der Pelletierung von Heu (TK-1545, HM SLW 4 mm, w 12 ± 0,5 Ma.-%) mittels RMP, Vergleich Lufttrocknung und technisch getrocknetes Material	109
A.1	Sieblochweiten und freie Sieblochfläche der genutzten Hammermühle (Typ CHP230/200-N3, Netzsch-Condux Mahltechnik GmbH)	138
A.2	Ausgewählte Ergebnisse der Zerkleinerung von Heu bei Nutzung unterschiedlicher Zerkleinerungstechniken	139
C.1	Brennstoffdaten der Versuchschargen von Heu und Gärresten im Vergleich zur ISO 17225-6	145
C.2	Rohstoffeigene Bindemittel - Futtermittelanalyse	146
D.1	Prozessparameter der RMP 250, sogenannte „Standard-Prozessparameter“	148
D.2	Frequenzen und äquivalente Drehzahlen der RMP 250	148
E.1	Korngrößenverteilung der zerkleinerten Heuchargen als Ausgangsmaterial bzw. von in Wasser aufgelösten Pellets, Analysemethode: optische Faseranalyse nach ISO 13322-2 [32]	151

E.2	Korngrößenverteilung der zerkleinerten Gärrestchargen, Analysemethode: Siebanalyse nach DIN EN 15149-2 [15]	152
E.3	Kennwerte der Zerkleinerung mittels Hammermühle im Technikumsmaßstab	152
E.4	Kennwerte der Pelletierung der Einzelrohstoffe im Technikumsmaßstab . .	153
E.5	Kennwerte der Pelletierung binärer Mischungen aus Heu und Gärresten im Technikumsmaßstab	154
F.1	Codierter Box-Behnken-Versuchsplan mit variablen <i>Faktoren</i>	157
F.2	Kennwerte der 1. statistischen Versuchsreihe (DoE)	160
F.3	Kennwerte der 2. statistischen Versuchsreihe (DoE)	161
F.4	1. statistische Versuchsreihe: Modellierte kleinste und größte Werte der Ziel- größen	164
F.5	2. statistische Versuchsreihe: Modellierte kleinste und größte Werte der Ziel- größen	164
F.6	1. statistische Versuchsreihe: Bestimmtheitsmaß R^2 und die p -Werte als Ergebnisse der Varianzanalyse	165
F.7	2. statistische Versuchsreihe: Bestimmtheitsmaß R^2 und die p -Werte als Ergebnisse der Varianzanalyse	165
G.1	Kennwerte der Verdichtung im Einzelpresskanal von Heu und/oder Gärres- ten (Wassergehalt: 20 <i>Ma.</i> -%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 <i>mm</i>)	167
G.2	Kennwerte der Verdichtung im Einzelpresskanal von Heu oder Gärresten (Wassergehalt: 15 <i>Ma.</i> -%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 <i>mm</i>)	167
G.3	Kennwerte der Verdichtung im Einzelpresskanal von Heu oder Gärresten mit unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden bzw. Fraktionen	168
H.1	EDX-Messpunkte	170

Abbildungsverzeichnis

1.1	Fließbild zur Aufgabenstellung	16
2.1	Auftretende Bindemechanismen und -kräfte bei der Agglomeration	17
2.2	Einteilung der Agglomerationsprozesse	19
2.3	Schematische Darstellung des Pressvorgangs in Matrizenpressen	21
2.4	Fließbild zur Herstellung von Biomassepellets	22
2.5	Spezifische Pelletproduktionskosten unterteilt nach den einzelnen Prozessschritten bei Verwertung von nassen Sägespänen als Rohmaterial	23
2.6	Zusammenstellung wesentlicher Einflussgrößen auf die Pelletqualität	27
2.7	Temperatur- und Wassergehaltsabhängigkeit der Erweichung von Lignin	29
2.8	Standzeiten von Koller und Matrize in Abhängigkeit des Ascheanteils in der zu verarbeitenden Biomasse	31
2.9	Verschleißerscheinungen an einem geriffelten Koller - Ausbrüche (Riffelbreite der Koller 44 mm)	31
2.10	Verschleißerscheinungen an einer Ringmatrize - eingeschliffene Kollerlauffläche (Durchmesser Matrizenbohrungen 6 mm, Breite der gelochten Lauffläche 38 mm)	31
2.11	Gestaltungsmöglichkeiten des Presskanals einer Matrize	40
3.1	Versuchskomplex I - Versuchsplan zur Machbarkeit der Herstellung von Heu- und Gärrest- bzw. Heu/Gärrest-Mischpellets	43
3.2	Box-Behnken Versuchsplan für drei <i>Faktoren</i> (Frequenz Matrize, Frequenz Dosierschnecke und Anteil Gärreste) nach KLEPPMANN	45
3.3	Versuchskomplex III - Versuchsplan zum Parametereinfluss bei der Verdichtung von Heu und/oder Gärresten im Einzelpresskanal (EPK)	47
3.4	Zerkleinerungsorgane der Hammermühle am DBFZ	48
3.5	Rotor der Hammermühle mit schmalen Schlägern (3 mm)	48
3.6	Zerkleinerungsorgane der Stabschwingmühle am ITUN	49
3.7	Pelletieranlage am DBFZ (links) sowie der Materialfluss in schematischer Darstellung (rechts)	50
3.8	Abmessungen der untersuchten Matrizen in mm	51

3.9	Versuchsaufbau Einzelpresskanal am ITUN	53
3.10	Verdichtungs- (links) und Durchstoßstempel (rechts)	53
3.11	Abmaße des am ITUN vorhandenen Einzelpresskanals in mm	53
3.12	Herstellung eines einzelnen Pellets nach LEHMANN: (a) und (c) Befüllung Vorverdichtungsraum, (b) und (d) Verdichtung, (e) Stempelwechsel, (f) Durchstoß Pellet	54
3.13	Schematische Darstellung der Breite x_{Cmin} und Länge $x_{Fe max}$ eines Partikels	56
3.14	Schematische Darstellung der Prüfapparatur zur Druckverdichtung einer Pelletschüttung	57
3.15	Prüfgerät zur Volumenbestimmung von Biomassepellets mittels Quecksil- berverdrängung am ITUN	59
4.1	Grob zerkleinertes Heu als Basismaterial, Zerkleinerungsgrad H SLW 25 mm	66
4.2	Fein zerkleinertes Heu (TK-1164), Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm . . .	66
4.3	Stereomikroskopaufnahme von Heu (TK-1164), Zerkleinerungsgrad HM SLW 4 mm	66
4.4	Spezifische Zerkleinerungsenergie von Heu (TK-1164) in Abhängigkeit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstragssiebes	66
4.5	Verteilungssummenfunktion von Heu mit dem Zerkleinerungsgrad HM SLW 2, 4, 6 mm (TK-1164) in Abhängigkeit von der Faserlänge	67
4.6	Verteilungssummenfunktion von Heu mit dem Zerkleinerungsgrad HM SLW 2, 4, 6 mm (TK-1164) in Abhängigkeit der Faserbreite	67
4.7	Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Heupellets (TK-1164) in Abhängig- keit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstragssiebes bei glei- chen Kompaktierungseinstellungen	69
4.8	Verteilungssummenfunktion der im Heupellet vorhandenen Faserlängen nach Verdichtung der unterschiedlichen Zerkleinerungsgrade (gestrichelt: ursprüng- liche Verteilungssummenfunktion vor Pelletierung)	70
4.9	Spezifischer Gesamtenergiebedarf (Zerkleinerung und Pelletierung im Tech- nikumsmaßstab) für die Herstellung von Heupellets (TK-1164) mit unter- schiedlichen Zerkleinerungsgraden	70
4.10	Ausgangsmaterial Gärresten TK-1480	72
4.11	Stereomikroskopaufnahme von Gärreste (TK-1480), Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm	72
4.12	Spezifische Zerkleinerungsenergie und Durchsatz von Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstrags- siebes	72

4.13	Verteilungssummenfunktion der unterschiedlich zerkleinerten Gärreste (TK-1480) in Abhängigkeit der entstehenden Korngröße	73
4.14	Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Gärrestpellets (TK-1480/1410) in Abhängigkeit der eingesetzten Lochweite des Hammermühlenausstragssiebes bei gleichen Kompaktierungseinstellungen	74
4.15	Spezifischer Gesamtenergiebedarf (Zerkleinerung und Pelletierung im Technikumsmaßstab) für die Herstellung von Gärrestpellets (TK-1480/1410) mit unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden	75
4.16	Abriebfestigkeiten der Heu/Gärrest-Mischpellets hergestellt bei unterschiedlichen Pelletierparametern	77
4.17	Schüttdichten der Heu/Gärrest-Mischpellets hergestellt bei unterschiedlichen Pelletierparametern	77
4.18	Spezifischer Energieverbrauch der Pelletierung von Heu/Gärrest-Mischungen im Technikumsmaßstab	79
4.19	1. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Abriebfestigkeit DU (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 75 Ma .-%, Mitte: 85 Ma .-%, rechts: 95 Ma .-%), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz	83
4.20	1. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Schüttdichte BD (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 75 Ma .-%, Mitte: 85 Ma .-%, rechts: 95 Ma .-%), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz	83
4.21	1. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Rohdichte GD (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 75 Ma .-%, Mitte: 85 Ma .-%, rechts: 95 Ma .-%), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz	85
4.22	1. Statistische Versuchsreihe: Modellierter spezifischer Energieverbrauch E_{spez} (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 75 Ma .-%, Mitte: 85 Ma .-%, rechts: 95 Ma .-%), Abszisse - f_S von 1-3 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz	85
4.23	2. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Abriebfestigkeit DU (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 Ma .-%, Mitte: 40 Ma .-%, rechts: 70 Ma .-%), Abszisse - f_S von 6-10 Hz , Applikate - f_M von 20-30 Hz	88

4.24	2. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Schüttdichte BD (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 Ma .-%, Mitte: 40 Ma .-%, rechts: 70 Ma .-%), Abszisse - f_S von 6 - 10 Hz , Applikate - f_M von 20 - 30 Hz	88
4.25	2. Statistische Versuchsreihe: Modellierte Rohdichte GD (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 Ma .-%, Mitte: 40 Ma .-%, rechts: 70 Ma .-%), Abszisse - f_S von 6 - 10 Hz , Applikate - f_M von 20 - 30 Hz	90
4.26	2. Statistische Versuchsreihe: Modellierter spezifischer Energieverbrauch E_{spez} (Ordinate) im Faktorenraum bei unterschiedlichen Anteilen an Gärresten m_G (links: 10 Ma .-%, Mitte: 40 Ma .-%, rechts: 70 Ma .-%), Abszisse - f_S von 6 - 10 Hz , Applikate - f_M von 20 - 30 Hz	90
4.27	Geleistete Verformungsarbeit bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164), Gärresten (TK-1480) sowie der Mischung aus beiden in Abhängigkeit der Verdichtungstemperatur (w $20 \pm 0,5$ Ma .-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)	93
4.28	Erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164), Gärresten (TK-1480) sowie der Mischung aus beiden in Abhängigkeit der Verdichtungstemperatur (w $20 \pm 0,5$ Ma .-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)	93
4.29	Im EPK hergestellte Pellets aus Heu (TK-1164) (A, B) bzw. Gärreste (TK-1480) (C, D) bei ϑ_V 40 (A, C) bzw. 120 °C (B, D) (w $20 \pm 0,5$ Ma .-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm).	95
4.30	Stereomikroskopaufnahmen der Bruchflächen von Einzelpellets aus Gärresten (TK-1480) bei ϑ_V 40 (E) bzw. 120 °C (F) und aus der 50 Ma .-%igen Mischung von Heu und Gärresten bei ϑ_V 120 °C (F) (w $20 \pm 0,5$ Ma .-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)	95
4.31	Geleistete Verformungsarbeit bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164) bzw. Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit des Wassergehaltes sowie der Verdichtungstemperatur (Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)	97
4.32	Erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus Heu (TK-1164) bzw. Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit des Wassergehaltes sowie der Verdichtungstemperatur (Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)	98
4.33	Geleistete Verformungsarbeit und erzielte Rohdichte bei der Herstellung von Einzelpellets aus verschiedenen Heufractionen (TK-1164) bei einer Verdichtungstemperatur von 60 °C (w $15 \pm 0,5$ Ma .-%)	101

4.34	Verteilungssummenfunktion ausgewählter Heu- (TK-1164, optische Faseranalyse nach ISO 13322-2 [32]) und Gärrestfraktionen (TK-1388, Siebana-lyse nach DIN EN 15149-2 [15]) in Abhängigkeit von der Faserlänge bzw. der Korngröße	102
4.35	Stereomikroskopaufnahme von Heu (TK-1164), Zerkleinerung mittels Stab-schwingmühle (Pulver)	102
4.36	REM-Aufnahmen von Pelletbruchflächen: H - Heupellet (RMP, TK-1164, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$), I - Gärrestpellet (RMP, TK-1480, HM SLW 4 mm, $w 15 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$), J - Heupellets (EPK, TK-1164, StSM Pul-ver, $w 15 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$, $\vartheta_V 60^\circ \text{C}$), H und I - Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1	103
4.37	Geleistete Verformungsarbeit bei der Herstellung von Einzelpellets aus Gär-resten (TK-1480) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsgrades und der Ver-dichtungstemperatur ($w 20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)	104
4.38	Erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsgrades und der Verdichtung-temperatur ($w 20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)	104
4.39	Geleistete Verformungsarbeit und erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus der 50 Ma.-%igen Mischung von Heu (TK-1164) und Gärresten (TK-1480) in Abhängigkeit von der Zerkleinerung der Gärreste und der Verdichtungstemperatur ($w 20 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)	106
4.40	Geleistete Verformungsarbeit und erzielte Rohdichten bei der Herstellung von Einzelpellets aus unterschiedlich behandelten Heuchargen (TK-1164) in Abhängigkeit der Verdichtungstemperatur ($w 15 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$)	108
4.41	links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Heupellets hergestellt mittels RMP (TK-1164, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1) inkl. der EDX- Mess-punkte; rechts: Quantifizierung der EDX- Messpunkten entsprechend Ele-mentanteil	110
4.42	links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Heupellets hergestellt mittels EPK (TK-1164, StSM Pulver, $w 15 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$, Verdichtung bei $\vartheta_V 60^\circ \text{C}$) inkl. der EDX- Messpunkte; rechts: Quantifizierung der EDX- Messpunkten entsprechend Elementanteil	110
4.43	N-, Na-, Mg- und Cl-Mappings der Pelletbruchfläche (Abb. 4.41, links): Heupellet, RMP (TK-1164, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5 \text{ Ma.-%}$, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1)	111

4.44	N-, Mg-, Na- und Cl-Mapping der Pelletbruchfläche (Abb. 4.42, links): Heupellet, EPK (TK-1164, StSM Pulver, $w 15 \pm 0,5 Ma.-%$, Verdichtung bei $\vartheta_V 60^\circ C$)	111
4.45	links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Heu-/Gärrestpellets in 50 $Ma.-%$ iger Mischung hergestellt mittels RMP (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5 Ma.-%$, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1) inkl. der EDX- Messpunkte; rechts: Quantifizierung der EDX-Messpunkten entsprechend Elementanteil	112
4.46	links: REM-Aufnahme einer Bruchfläche eines Gärrestpellets hergestellt mittels RMP (TK-1480, StSM Pulver, HM SLW 4 mm, $w 15 \pm 0,5 Ma.-%$), Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1) inkl. der EDX- Messpunkte; rechts: Quantifizierung der EDX-Messpunkten entsprechend Elementanteil	112
4.47	N-, S-, K- und Cl-Mapping der Pelletoberfläche (Abb. 4.45, links): Heu-/Gärrestpellet in 50 $Ma.-%$ iger Mischung, RMP (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5 Ma.-%$, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1)	113
4.48	N-, S-, K- und Cl-Mapping der Pelletoberfläche (Abb. 4.46, links): Gärrestpellet, RMP (TK-1480, HM SLW 4 mm, $w 15 \pm 0,5 Ma.-%$), Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Anhang Tab. D.1	113
A.1	Rundloch, Teilung $60^\circ C$ versetzt	138
A.2	Korngrößenverteilung von Heu am Beispiel des Zerkleinerungsgrades 4 mm (SLW 4 mm) bei Nutzung unterschiedlicher Zerkleinerungstechniken	139
B.1	Verlauf der Verdichtungskräfte abhängig der Stempelposition (Weg) für die einzelnen Verdichtungsschritte am Beispiel von Heu (HM SLW 4 mm, $w 15 Ma.-%$, Verdichtung bei $\vartheta_V 80^\circ C$)	143
B.2	Verlauf der Durchstoßkraft in Abhängigkeit der Stempelposition (Weg) am Beispiel von Heu (HM SLW 4 mm, $w 15 Ma.-%$, Verdichtung bei $\vartheta_V 80^\circ C$)	143
D.1	Durchsatz von Heu und Gärreste in Abhängigkeit der Förderschnecken-drehzahl der RMP 250	149
H.1	Pelletbruchfläche eines Heupellets (TK-1164, HM SLW 4 mm, $w 12 \pm 0,5 Ma.-%$, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen . .	171

H.2	Einzelelemente-Mapping der Pelletbruchfläche eines Heupellets (TK-1164, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1)	171
H.3	Pelletbruchfläche eines Heupellets (TK-1164, StSM, Pulver, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%, Verdichtung bei ϑ_V 60 °C EPK), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen	172
H.4	Einzelelement-Mapping der Pelletbruchfläche eines Heupellets (TK-1164, StSM, Pulver, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%, Verdichtung bei ϑ_V 60 °C, EPK)	172
H.5	Pelletbruchfläche eines Heu/Gärrest-Mischpellets in 50 Ma.-%iger Mischung (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen	173
H.6	Einzelelement-Mapping der Pelletbruchfläche eines Heu/Gärrest-Mischpellets in 50 Ma.-%iger Mischung (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1)	173
H.7	Pelletbruchfläche eines Gärrestpellets (TK-1480, HM SLW 4 mm, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen	174
H.8	Einzelelement-Mapping der Pelletbruchfläche eines Gärrestpellets (TK-1480, HM SLW 4 mm, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1)	174

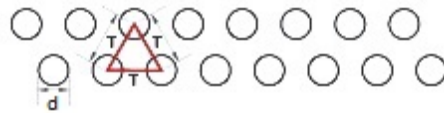
Verzeichnis der Anhänge

A	Siebeinsätze und Zerkleinerung	138
B	Berechnungsbeispiel Verdichtungs- und Durchstoßarbeit im EPK	141
C	Analysen verbrennungsrelevanter Eigenschaften	144
D	Standard Prozessparameter der RMP 250	147
E	Zerkleinerung und Pelletierung	150
F	Statistische Versuchsplanung	155
F.1	Grundlagen	156
F.2	Softwarespezifika - Auswertung mithilfe der Software STAVEX	158
F.3	Ermittelte Zielgrößen für die Anwendung von DoE	159
F.4	Modellgleichungen der 1. Statistische Versuchsreihe	162
F.5	Modellgleichungen der 2. Statistische Versuchsreihe	163
F.6	Modellierte kleinste und größte Werte der Zielgrößen	164
F.7	Bestimmtheitsmaß R^2 und p -Werte	165
G	Verdichtung im Einzelpresskanal	166
H	Mapping Daten	169
H.1	Daten	170
H.2	Mapping Heupellet	171
H.3	Mapping Heupellet (Pulver)	172
H.4	Mapping Heu/Gärrest-Mischpellet	173
H.5	Mapping Gärrestpellet	174
I	Eigene Publikationen	175

A Siebeinsätze und Zerkleinerung

Siebeinsätze

Die Berechnung der freien Sieblochflächen A_o erfolgt nach der Gebrauchsformel (A.1) und ist in Abb. A.1 veranschaulicht.



$$A_o = \frac{d^2 \cdot 90,69}{T^2} \quad (\text{A.1})$$

Abb. A.1: Rundloch, Teilung $60^\circ C$ versetzt [62]

Dabei gilt:

A_o	Freie Sieblochfläche in %
d	Bohrungsdurchmesser in mm
T	Teilung in mm

Die ermittelten Werte für die unterschiedlichen Sieblochweiten (SLW) sind in Tab. A.1 zusammengefasst.

Tab. A.1: Sieblochweiten und freie Sieblochfläche der genutzten Hammermühle (Typ CHP230/200-N3, Netzsch-Condux Mahltechnik GmbH)

Sieblochweite in mm	Lochart	Freie Siebfläche A_o in %
2	} Rundloch	40,3
4		40,3
6		31,6
10		40,3

Ausgewählte Zerkleinerungsergebnisse entsprechend Kirsten et al. [38]

Tab. A.2: Ausgewählte Ergebnisse der Zerkleinerung von Heu bei Nutzung unterschiedlicher Zerkleinerungstechniken [38]

Zerkleinerungstechnik	Aspiration	Zerkleinerungsgrad ¹	Gesamtdurchsatz, $\dot{m}_Z$	Spezif. Energieverbrauch, $E_{\text{spez, Z}}$	Schüttdichte, BD_Z
		mm	kg/h	Wh/kg	kg/m ³
Prallmühle	-	6	40,0	18,1	71
		4	24,3	40,7	93
		2	8,4	161,7	146
Schneidmühle	-	6	1,1	335,6	67
		4	1,1	308,4	77
		2	1,2	317,0	110
Schneidmühle	x	6	13,0	31,9	90
		4	5,3	78,0	117
		2	15,9	35,4	168
Hammermühle	-	6	45,8	15,7	88
		4	28,3	25,2	110
		2	13,0	58,7	139
Hammermühle	x	6	52,7	14,5	90
		4	47,0	18,0	99
		2	22,0	38,6	143

¹ Lochweite Siebeinsatz der jeweiligen Mühle

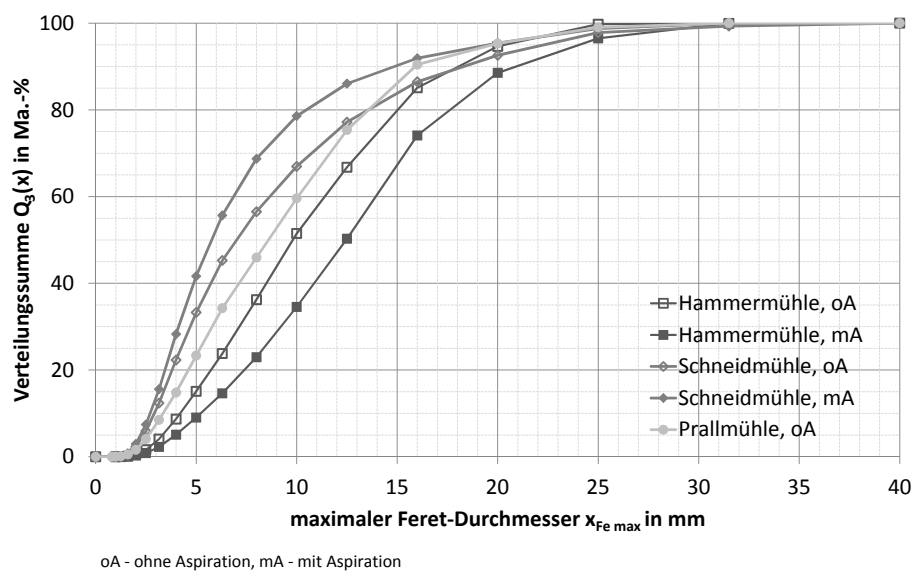


Abb. A.2: Korngrößenverteilung von Heu am Beispiel des Zerkleinerungsgrades 4 mm (SLW 4 mm) bei Nutzung unterschiedlicher Zerkleinerungstechniken [38], Analyse-methode: optische Faseranalyse nach Iso 13322-2 [32]

Die Schneidmühle (Typ Universalschneidmühle Pulverisette 19 der Firma Fritsch GmbH, Baujahr 2009) besitzt eine Anschlussleistung von 1,5 kW, wobei der Rotor mit einer Drehzahl von 2.800 min^{-1} läuft. Bei einem Arbeitsdurchmesser von 98 mm ergibt sich eine Umfangsgeschwindigkeit von $14,4 \text{ m/s}$. Das Material wird zwischen fünf V-förmige Rotormesser und drei Statormessern im Mahlraum so lange zerkleinert, bis es durch das Sieb mit einer definierten Sieblochweite passt. Laut Herstellerangaben kann mit dieser Labormühle ein materialabhängiger Durchsatz von bis zu 60 l/h erreicht werden.

Die Prallmühle, auch als Schlagnasenmühle bezeichnet, (Typ Universalprallmühle Rekord A der VEB Nossen Maschinenbau, heute Gebr. Jehmlich GmbH, Mühlenbau und Maschinenfabrik, Baujahr 1985) erreicht mit einer Antriebsleistung von $2,2\text{ kW}$, einer Drehzahl von 4.000 min^{-1} und einem Rotorscheibendurchmesser von 208 mm eine Umfangsgeschwindigkeit von $43,5\text{ m/s}$.

Die Hammermühle sowie die genutzte Absaugung sind ausführlich in Kapitel 3.3.1 zusammengefasst.

B Berechnungsbeispiel Verdichtungs- und Durchstoßarbeit im EPK

Für eine detaillierte Betrachtung zum Agglomerationsverhalten der Materialien wurden im Einzelpresskanal eine Vielzahl von Rohstoff- und Prozessparametern untersucht. Dabei entstanden mehr als 600 Einzelpellets, welche nach der gleichen Versuchsmethodik ausgewertet wurden. Für den Herstellungsprozess eines jeden Einzelpellets (Abb. 3.12) wurden die aufgebrachten Kräfte (Verdichtungs- und Durchstoßkräfte) in Abhängigkeit der Stempelposition aufgezeichnet (Kraft-Weg-Diagramme). Durch Integration können wie folgt die geleisteten Arbeiten berechnet werden.

Berechnung der Verdichtungsarbeit

Für die Herstellung eines Einzelpellets werden nacheinander Materialschichten verdichten. Dieser Prozess wird bis zu einem stationären Presszustand wiederholt, d.h. bis die Presskraft nahezu konstant bleibt. Für jedes Versuchsmaterial bzw. -mischung wird dieser Zustand im Vorfeld ermittelt. Aufgrund unterschiedlicher Schüttdichten und der Reibung des Materials in Presskanal ergibt sich eine variierende Anzahl an Verdichtungsvorgängen für die Materialvariationen. Exemplarisch ist in Abb. B.1 der Verlauf der notwendigen Verdichtungsvorgänge für eine ausgewählte Heucharge dargestellt.

Anschließend wird die maximal benötigte Kraft detektiert und über den maximalen Weg integriert, um gemäß Gleichung (B.1) die notwendige Verdichtungsarbeit zu erhalten.

$$W_V = \int_0^{s_{max}} F_V ds \quad (\text{B.1})$$

Dabei gilt:

W_V	Verdichtungsarbeit in Nm
F_V	Verdichtungskraft in N
s	Weg in m

Berechnung der Durchstoßarbeit

Nach Erlangen des stationären Verdichtungszustandes und dem Austreten des Pellets aus dem Presskanal, erfolgt das Aus- bzw. Durchstoßen aus diesem. Den Kraftverlauf des Durchstoßens zeigt exemplarisch für die ausgewählte Heuchargen Abb. B.2.

Analog zur Verdichtungsarbeit erfolgt die Integration der Kraftkurve bis hin zum Weg-Maximum entsprechend Gleichung (B.2).

$$W_D = \int_0^{s_{max}} F_D ds \quad (\text{B.2})$$

Dabei gilt:

W_D	Durchstoßarbeit in Nm
F_D	Durchstoßkraft in N
s	Weg in m

Zur Bestimmung des für den gesamten Herstellungsprozess eines Einzelpellets benötigten Arbeitsaufwands wird die Differenz aus Verdichtungs- und Durchstoßarbeit betrachtet. Diese kennzeichnet die Verformung des Materials, Gleichung (B.3).

$$W_{MV} = W_V - W_D \quad (\text{B.3})$$

Dabei gilt:

W_{MV}	Materialverformungsarbeit in Nm
W_D	Durchstoßarbeit in Nm
W_V	Verdichtungsarbeit in Nm

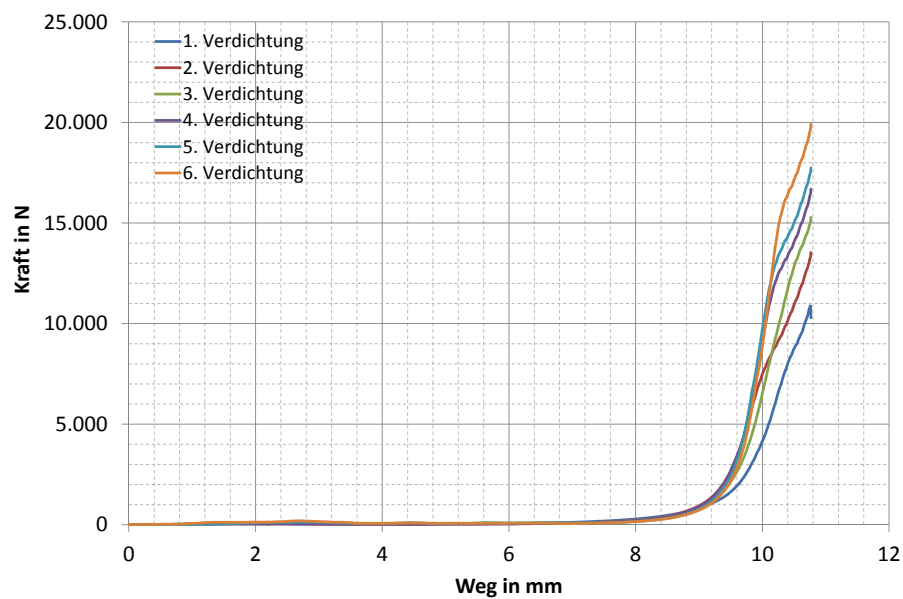


Abb. B.1: Verlauf der Verdichtungskräfte abhängig der Stempelposition (Weg) für die einzelnen Verdichtungsschritte am Beispiel von Heu (HM SLW 4 mm, w 15 Ma.-%, Verdichtung bei ϑ_V 80 °C)

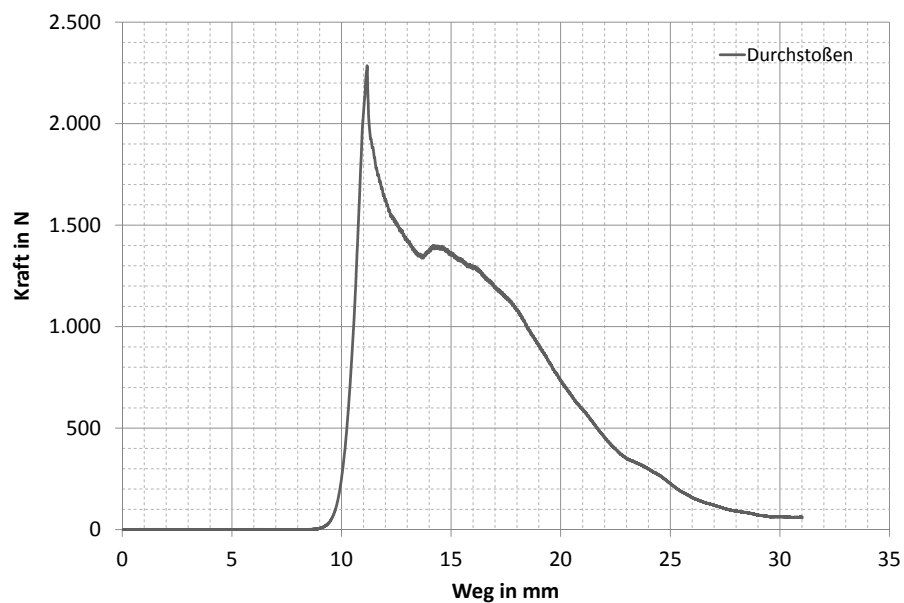


Abb. B.2: Verlauf der Durchstoßkraft in Abhängigkeit der Stempelposition (Weg) am Beispiel von Heu (HM SLW 4 mm, w 15 Ma.-%, Verdichtung bei ϑ_V 80 °C)

C Analysen verbrennungsrelevanter Eigenschaften

Das Versuchsmaterial wurde entsprechend der Vorgaben der ISO 17225-6 [20] für nicht-holzartige Biomassepellets und den angewendeten Bestimmungsnormen im Analytiklabor des DBFZ analysiert. Die Ergebnisse sind in Tab. C.1 der ISO 17225-6 [20] gegenübergestellt. Es geht deutlich hervor, dass die Brennstoffeigenschaften, vor allem der Gärreste, kritisch zu bewerten sind. Hohe Werte an Stickstoff, Chlor und Kalium stehen in Verbindung mit korrosiven und emissionsrelevanten Eigenschaften. Bei Betrachtung der Gärreste sind die Konzentrationen um ein Vielfaches höher als für Holz oder Stroh (Faktor 100 im Vergleich zu Holz). Zur Orientierung sind in Tab. C.1 Literaturwerte für Holz und Stroh dargestellt.

Die Gärreste stammen aus einer Biogasanlage (BGA). Nach Aussagen des BGA-Betreibers wurden stets die gleichen Eingangssubstrate verwendet. Aufgrund von begrenzter Lagerkapazitäten wurden die Gärreste zu drei verschiedenen Zeiten bezogen. Das Heu stammt von zwei verschiedenen Standorten: Heu 1 - Standort 1 und Heu 2 - Standort 2 mit drei unterschiedlichen Erntejahren.

Die Analyse der rohstoffeigenen Bindemittel, in Form einer sog. Futtermittelanalyse [49], wurden am DBFZ im Bereich Biochemische Konversion durchgeführt. Neben den Heu- und Gärrestchargen erfolgte eine Vergleichsanalyse von Kiefernholz.

Tab. C.2: Rohstoffeigene Bindemittel - Futtermittelanalyse

Material	Chargennr.	Rohprotein	Rohfett	Zellulose <i>g/kgTS</i>	Rohfaser Hemizellulose <i>g/kgTS</i>	Lignin <i>g/kgTS</i>	NfC
		<i>g/kgTS</i>	<i>g/kgTS</i>				<i>g/kgTS</i>
Heu 1	TK-1164	100,87	13,55	334,26	363,67	61,78	94,18
Heu 2 2011	TK-1393	85,27	14,13	356,47	276,76	89,95	106,00
Heu 2 2012	TK-1394	119,35	21,15	296,75	209,32	58,66	102,47
Heu 2 2013	TK-1545	77,70	16,40	329,30	290,10	66,00	142,80
Gärrest	TK-1381	19,79	28,69	117,21	0,00	272,11	214,77
Gärrest	TK-1388	22,21	29,80	146,30	0,00	325,48	222,27
Gärrest	TK-1480	252,80	33,00	137,40	0,00	284,00	22,50
Holz (Kiefer)		9,42	13,41	497,37	132,67	292,24	0,00

NfC sind Nichtfaserkohlenhydrate, wie Stärke und Zucker.

D Standard Prozessparameter der RMP 250

Für die Pelletierversuche stand am DBFZ eine 15 kW-Ringmatrizenpresse vom Typ RMP 250 der Firma Münch Edelstahl GmbH mit einem rohstoffabhängigen Durchsatz von etwa 50-100 kg/h (Herstellerangabe) zur Verfügung. Bewerte Prozessparameter der Pelletieranlage im Technikumsmaßstab, welche in einer Vielzahl von Pelletierprojekten am DBFZ generiert wurden, sind in Tab. D.1 dargestellt. Dabei zeigt Tab. D.2 die an der Presse einstellbaren Frequenzen und die entsprechenden Drehzahlen der Dosierschnecke und Matrize.

Tab. D.1: Prozessparameter der RMP 250, sogenannte „Standard-Prozessparameter“

Prozessparameter der RMP 250	
Matrizengeometrie (Durchmesser x Länge)	6 x 30 mm
Drehzahl Matrize (0-370 U/min)	148 U/min
Drehzahl Förderschnecke (0-32 U/min)	6 U/min (Heu bzw. Heu/Gärreste), 1,8 U/min (Gärreste)
Abstand Koller/Matrize (0-2 mm)	0,25 mm
Einstellung Abschermesser	30 mm

Tab. D.2: Frequenzen und äquivalente Drehzahlen der RMP 250

Schalterstufe	Einstellung Frequenz Hz	Drehzahl Dosierschnecke U/min	Drehzahl Matrize U/min
1	5	3	37
2	10	6	74
3	15	10	111
4	20	13	148
5	25	16	185
6	30	19	222
7	35	23	259
8	40	26	296
9	45	29	333
10	50	32	370

Die unterschiedlichen Förderraten kommen infolge unterschiedlicher Beschaffenheiten in Verbindung mit variierenden Fließ- und Fördereigenschaften der Einzelrohstoffe - Heu mit fasrigem und Gärreste mit kugelähnlichem Aussehen - zustande. Entsprechend erfolgte eine spezifische, für die Pelletpresse realisierbare Durchsatzbestimmung. Die Ermittlung der rohstoffspezifischen Durchsätze in Abhängigkeit der einzustellenden Förderschnecken-drehzahlen der RMP 250 sind in Abb. D.1 dargestellt.

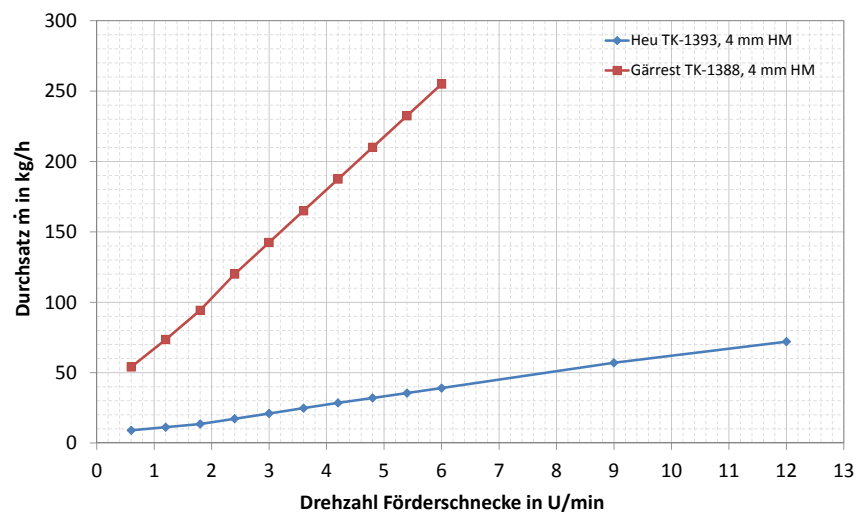


Abb. D.1: Durchsatz von Heu und Gärreste in Abhängigkeit der Förderschneckendrehzahl der RMP 250

E Zerkleinerung und Pelletierung

Tab. E.1: Korngrößenverteilung der zerkleinerten Heuchargen als Ausgangsmaterial bzw. von in Wasser aufgelösten Pellets, Analysemethode: optische Faseranalyse nach ISO 13322-2 [32]

Rohstoff		Heu (TK-1164)						Gärrest (TK-1388-V1)	
Zerkleinerungsgrad ¹	mm	2	4	6	Pellet: 2	Pellet: 4	Pellet: 6	Pulver ²	4
Korngröße x_{Fmax}	mm	Verteilungssumme $Q_3(x_{Fmax})$ in Ma.-%							
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,80	0,00	0,00	0,00	0,20	0,29	0,32	2,13	1,43
	1,00	0,00	0,00	0,00	2,78	3,15	6,36	28,07	13,78
	1,25	0,04	0,00	0,00	9,56	11,41	24,21	54,79	38,35
	1,60	0,47	0,06	0,06	21,81	25,96	44,81	85,85	71,62
	2,00	2,08	0,27	0,24	42,00	46,71	70,27	100,00	91,76
	2,50	6,15	0,84	0,77	60,83	68,62	90,38	100,00	98,26
	3,15	13,79	2,26	2,11	77,78	89,23	97,50	100,00	99,62
	4,00	24,64	5,10	4,76	96,70	96,97	99,96		99,75
	5,00	37,05	9,04	8,59	99,94	99,59	100,00		99,76
	6,30	51,34	14,63	14,61	100,00	100,00			100,00
	8,00	65,34	22,97	22,62					
	10,00	77,54	34,56	32,56					
	12,50	90,25	50,28	46,17					
	16,00	96,18	74,09	67,25					
	20,00	99,70	88,55	83,58					
	25,00	99,90	96,50	90,65					
	31,50	100,00	100,00	97,16					
	40,00			100,00					
Korngröße x_{Cmin}	mm	Verteilungssumme $Q_3(x_{Cmin})$ in Ma.-%							
	0,00	0,00	0,00	0,00					
	0,63	0,00	0,00	0,00					
	0,80	0,82	0,00	0,00					
	1,00	13,91	0,19	0,16					
	1,25	26,92	4,02	3,96					
	1,60	37,83	8,64	8,84					
	2,00	48,70	12,73	13,41					
	2,50	60,01	17,20	18,40					
	3,15	70,93	23,30	25,21					
	4,00	80,51	32,68	34,12					
	5,00	88,75	45,36	43,83					
	6,30	95,28	59,96	57,23					
	8,00	99,04	74,69	73,18					
	10,00	100,00	88,01	84,29					
	12,50		96,65	91,57					
	16,00		100,00	96,08					
	20,00			100,00					

¹ Lochweite Siebeinsatz Hammermühle² StSM

Tab. E.2: Korngrößenverteilung der zerkleinerten Gärrestchargen, Analysemethode: Siebanalyse nach DIN EN 15149-2 [15]

Rohstoff Zerkleinerungsgrad ¹ Korngrößenklasse <i>mm</i>	<i>mm</i> Korngröße <i>x</i> <i>mm</i>	Gärreste (TK-1480)			
		2	4	6	10
		Verteilungssumme $Q_3(x)$ in <i>Ma.</i> -%			
$0 < x < 0,063$	0	0	0	0	0
$0,063 < x < 0,1$	0,063	1,47	0,72	0,60	0,22
$0,1 < x < 0,25$	0,10	3,22	1,92	2,97	0,79
$0,25 < x < 0,5$	0,25	12,09	8,29	10,29	4,76
$0,5 < x < 1,0$	0,50	28,05	21,85	21,71	13,96
$1,0 < x < 1,4$	1,00	65,85	49,40	40,11	32,91
$1,4 < x < 2,0$	1,40	94,60	68,53	55,23	46,59
$2,0 < x < 2,8$	2,00	99,11	90,20	73,77	63,54
$2,8 < x < 3,15$	2,80	99,47	98,48	88,36	76,30
$3,15 < x < 5,0$	3,15	99,60	98,68	88,88	76,75
$5,0 < x$	5,00	99,89	99,95	99,84	98,81

¹ Lochweite Siebeinsatz Hammermühle**Tab. E.3:** Kennwerte der Zerkleinerung mittels Hammermühle im Technikumsmaßstab

Rohstoff Zerkleinerungsgrad ¹		<i>mm</i>	Heu (TK-1164)			Gärreste (TK-1480)			
			2	4	6	2	4	6	10
Mittlere Korngröße	$x_{50, F_{max}}$	<i>mm</i>	6,14	12,43	13,54				
	$x_{50, C_{min}}$	<i>mm</i>	2,05	5,51	5,70				
	x_{50}	<i>mm</i>				0,76	1,01	1,25	1,52
Spezif. Energieverbrauch	$E_{spez, Z}$	<i>Wh/kg</i>	39	18	14	13	8	4	2
Max/Min-Abweichung		<i>Wh/kg</i>	± 0	± 1	± 0	± 0	± 0	± 0	± 1
Durchsatz	$\dot{m}_Z$	<i>kg/h</i>	22,0	45,4	52,7	103,4	104,4	107,8	110,2
Max/Min-Abweichung		<i>kg/h</i>	± 0,1	± 9,1	± 0,6	± 1,2	± 1,3	± 1,0	± 2,3
Mahlraumtemperatur	ϑ	<i>°C</i>	32,5	28,7	27,4	26,5	26,3	25,9	26,1
Wassergehalt	w_A	<i>Ma.</i> -%	7,9	7,9	8,1	11,8	11,8	11,9	12,1
Schüttdichte	BD_A	<i>kg/m³</i>	179	131	119	631	639	658	666

¹ Lochweite Siebeinsatz Hammermühle

Die Werte für spezif. Energieverbrauch und Durchsatz sind Mittelwerte aus Doppelversuchen.

Alle Werte beziehen sich auf den Analysezustand (feucht).

Tab. E.4: Kennwerte der Pelletierung der Einzelrohstoffe im Technikumsmaßstab

Rohstoff	Heu (TK-1164)				Gärreste (TK-1480)				ISO 17225-6	
	mm	2	4	6	2	4	6	10	Klasse A	Klasse B
Zerkleinerungsgrad ¹										
Wassergehalt	w _A		12 ± 0,5							
Schüttdichte	BD _A	190	149	135	670	663	640	637		
Pelletbewertung										
Abriebfestigkeit	Du	95,0	98,0	96,2	98,8	98,9	98,9	99,0	≥ 97,5	≥ 96,0
Max/Min-Abweichung		± 0,85	+ 0,6 / - 0,5	± 0,3	± 0,1	+ 0,4 / - 0,5	+ 0,2 / - 0,1	+ 0,1 / - 0,2		
Druckfestigkeit	CR	74,0	82,7	79,9	84,2	86,6	85,8	84,6		
Max/Min-Abweichung		± 0,8	+ 0,8 / - 1,0	0,5	± 1,5	+ 1,8 / - 3,3	± 0,8	± 0,4		
Schüttdichte	BD	573	651	614	786	760	743	737	≥ 600	≥ 600
Max/Min-Abweichung		± 25	+ 16 / - 20	± 15	± 1	+ 24 / - 23	+ 12 / - 7	± 4		
Rohdichte	GD	1,21	1,24	1,22	1,48	1,43	1,41	1,39		
Max/Min-Abweichung		± 0,03	+ 0,03 / - 0,02	± 0	± 0,04	± 0,02	± 0,01	± 0,01		
Wassergehalt	w	9,9	8,3	9,2	14,1	14,2	14,6	14,4	≤ 12	≤ 15
Max/Min-Abweichung		± 0,2	+ 1,0 / - 1,4	± 0,2	± 0	± 0,7	+ 0,4 / - 0,6	+ 0,2 / - 0,4		
Verdichtungsverhältnis ²	1 zu	3,02	4,38	4,54	1,17	1,15	1,16	1,16		
Prozessbewertung										
spezif. Energieverbrauch	E _{spez, pel}	Wh/kg	124	155	82	94	104	104		
Max/Min-Abweichung		± 19	+ 22 / - 18	± 21	± 14	+ 19 / - 13	+ 16 / - 11	+ 15 / - 8		
Gesamtdurchsatz	m _{pel}	kg/h	61,6	39,6	51,8	54,0	57,8	59,7	56,8	
Max/Min-Abweichung		± 7,6	+ 6,1 / - 6,2	± 0,6	± 13,0	+ 10,9 / - 10,4	+ 16,0 / - 10,1	+ 16,1 / - 12,5		
Pelletdurchsatz	m _p	kg/h	53,2	36,6	48,7	41,6	50,6	51,0	51,0	
Max/Min-Abweichung		± 6,2	+ 4,6 / - 4,7	± 0,4	± 10,1	+ 10,7 / - 5,6	+ 15,1 / - 7,2	+ 14,9 / - 11,2		
produktionsbedingter Feinanteil	m _f	kg/h	13,6	7,3	5,9	23,1	18,7	14,6	10,3	
Max/Min-Abweichung		± 0,7	+ 0,6 / - 0,5	± 0,4	± 0	+ 6,6 / - 7	+ 2,8 / - 3	+ 0,6 / - 1		
Pellettemperatur	θ _p	°C	77,6	81,0	80,3	76,5	81,0	75,0	70,8	
Max/Min-Abweichung		± 0,2	+ 2,7 / - 2,3	± 1,0	± 1,6	+ 3,1 / - 1,4	+ 2,5 / - 4,4	± 0,1		
Temperaturbereich Pressenraum	θ _{pk}	°C	44,4 - 50,3	45,2 - 57,1	48,6 - 55,3	47,2 - 51,1	49,1 - 52,4	45,6 - 51,0	45,1 - 52,4	

¹ Lochweite Siebeinsatz Hammermühle

² Das Verdichtungsverhältnis ist das Verhältnis der Schüttdichten von Pellets zum Ausgangsmaterial bei entsprechenden Wassergehalten. Die Werte zur Pelletbewertung sind Mittelwerte aus Doppelversuche und je zweifacher Analyse, mit Ausnahme der Rohdichte. Hier erfolgte jeweils eine 5-fache Bestimmung. Die Werte zur Prozessbewertung sind Mittelwerte aus Doppelversuchen. Die Werte für den Gesamtdurchsatz beinhalten Pellets und den produktionsbedingten Feinanteil. Die Pelletierung der Einzelmaterialien erfolgt mittels "Standard-Prozessparametern", Tab. D.1.

Tab. E.5: Kennwerte der Pelletierung binärer Mischungen aus Heu und Gärresten im Technikumsmaßstab

Rohstoff ¹	Mischungsverhältnis	Heu (TK-1393) / Gärrest (TK-1388 bzw. TK-1410)									
		Ma.-%	100/0	75/25	50/50	25/75	100/0	75/25	50/50	100/0	75/25
Variation Prozessparameter Abstand Koller/Matrize Matrizegeometrie	K/M	mm									
	mm	0,25 6 x 30						1 6 x 30			
									0,25 6 x 30+10		
Variation Rohstoffparameter Wassergehalt Schüttdichte	w _A	Ma.-%									
	BD _A	kg/m ³	149	161	212	327	122	163	217	122	163
Pelletbewertung Abriebfestigkeit Max/Min-Abweichung Druckfestigkeit Max/Min-Abweichung Schüttdichte Max/Min-Abweichung Rohdichte Max/Min-Abweichung Wassergehalt Max/Min-Abweichung Verdichtungsverhältnis ²	Du	Ma.-%	98,5	98,8	98,4	98,4	97,5	97,4	97,2	99,1	98,4
		Ma.-%	±0,3	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,2	+0,6/-0,8	±0,1	±0,1
	CR	%	81,7	84,5	85,4	85,4	75,0	75,7	81,7	86,6	81,4
		%	±1,8	±0,3	±0,5	±0,5	±0,1	±0,5	+1,5/-0,8	±0,6	±0,2
	BD	kg/m ³	644	687	698	698	556	574	646	682	616
		kg/m ³	±20	±17	±2	±2	±3	±9	+33/-44	±5	±17
	GD	g/cm ³	1,24	1,23	1,34	1,34	1,13	1,21	1,33	1,37	1,26
		g/cm ³	±0,04	±0,02	±0,02	±0,02	±0,03	±0,02	+0,08/-0,01	±0,01	±0,02
	w	Ma.-%	9,5	10,6	11,4	11,7	8,9	11,7	12,8	11,2	12,3
		Ma.-%	±0,4	±0,2	±0,4	±0,4	±0,85	±0,1	+0,5/-0,8	±0,7	±0,1
	1 zu		4,37	4,00	3,24	2,13	4,56	3,52	2,98	5,05	3,76
Prozessbewertung spezif. Energieverbrauch Max/Min-Abweichung Gesamtdurchsatz Max/Min-Abweichung Pelletdurchsatz Max/Min-Abweichung produktionsbedingter Feinanteil Max/Min-Abweichung Pellettemperatur Max/Min-Abweichung Temperaturbereich Pressenraum	E _{spez, Pel}	Wh/kg	124	93	62	62	125	111	134	118	94
		Wh/kg	±22/-18	±13	±8	±21	±26	±36	±15	±36	±13
	m _{pel}	kg/h	39,6	50,6	73,2	118,8	37,9	46,7	65,7	57,8	38,4
		kg/h	+6,1/-6,2	+8,3	+5,1	+18,0	±2,1	±1,7	+10,0/-13,4	±5,3	±3,0
	m _p	kg/h	36,6	47,8	67,4	108,0	36,4	44,3	58,7	110,5	50,6
		kg/h	+4,6/-4,7	±7,5	±5,9	±15,0	±2,1	±1,4	+11,2/-21,0	±3,3	±11,0
	m _f	Ma.-%	7,3	5,5	8,1	8,9	3,8	5,3	4,9	7,8	4,6
		Ma.-%	±0,6	±0,5	±1,7	±1,2	±0,3	±0,5	+2,8/-4,4	±1,2	±0,5
	Θ _p	°C	81,0	84,1	82,4	84,3	76,3	78,3	75,3	81,0	73,8
		°C	+2,7/-2,3	±1,5	±0,5	±1,6	±2,5	±1,2	+4,8/-10,3	±0,4	±0,3
	Θ _{pn}	°C	45,2 - 57,1	44,1 - 51,2	48,6 - 51,2	46,1 - 48,8	45,3 - 54,3	45,0 - 51,8	49,2 - 52,6	49,1 - 52,4	44,8 - 52,2

¹ Beide Rohstoffe wurden mittels Hammelmühle und einem Austragsieb mit der Lochweite von 4 mm zerkleinert.

² Das Verdichtungsverhältnis ist das Verhältnis der Schüttdichten von Pellets zum Ausgangsmaterial bei entsprechenden Wassergehalten.

Die Werte zur Pelletbewertung sind i.d.R. Mittelwerte aus Doppelversuchen und je zweifacher Analyse, mit Ausnahme der Rohdichte. Hier erfolgte jeweils eine 5-fache Bestimmung.

Die Werte zur Prozessbewertung sind i.d.R. Mittelwerte aus Doppelversuchen.

Die Werte für den Gesamtdurchsatz beinhalten Pellets und den produktionsbedingten Feinanteil

Bei den Versuchen mit 100 Ma.-% Gärresten musste die Fördermenge in den Pressenraum deutlich reduziert werden (Tab. D.2 bzw. Abb. D.1).

Die Differenz zwischen Gesamt- und Pelletdurchsatz spiegelt den Materialverlust im Prozessablauf wieder (durch z.B. Todräume oder An- und Abfahrprozesse).

Alle Werte beziehen sich auf den Analysezustand (feucht).

n.b. nicht bestimmbar aufgrund technischer Probleme

F Statistische Versuchsplanung

F.1 Grundlagen

Mit der statistischen Versuchsplanung (DOE) wird der Zusammenhang zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen mit wenigen Einzelversuchen möglichst genau ermittelt. Relevante Begrifflichkeiten werden folgend kurz erläutert [40], [70].

- Der *Versuchsplan* beinhaltet die Liste aller Einzelversuche. Mit den Stufenkombinationen bilden diese den Faktorraum ab.
- *Faktoren* sind alle unabhängigen und variierbaren, qualitativen oder quantitativen Einstellgrößen, welche einen direkten Einfluss auf das Versuchsergebnis haben. Die *Faktorstufen* sind die jeweilig gewählten Einstellungen der Faktoren während der Versuche.
- *Zielgrößen* dokumentieren als abhängige Variable durch qualitative oder quantitative Aussagen das Versuchsergebnis. Es handelt sich um Größen, die zumeist durch eine statistische Versuchsplanung optimiert werden sollen.
- Die sogenannten *Effekte* geben Aufschluss über den Einfluss der Faktoren auf die Zielgröße. Sie werden in Haupt- und Wechselwirkungseffekte unterschieden. *Haupteffekte* kennzeichnen den direkten Einfluss der Veränderung eines Faktors auf die Zielgröße. *Wechselwirkungseffekte* betrachten die Veränderung einer Zielgröße bei gleichzeitiger Variation der Faktoren.

Eine statistische Versuchsplanung lässt sich mit Hilfe einer voll- oder teilfaktoriellen Versuchsdurchführung realisieren. Die Unterschiede sind wie folgt: Vollfaktorielle Versuchspläne stellen einen linearen Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgröße dar. Da sich je Versuch nur eine Variable ändern lässt, steigt der Versuchsaufwand in Abhängigkeit der Anzahl an Einflussgrößen hoch der Anzahl an Variationsstufen - ein entsprechend hoher Versuchsaufwand entsteht. Zur Darstellung von nichtlinearen Zusammenhängen in Verbindung mit der gleichzeitigen Änderung der Einflussfaktoren eignen sich teilfaktorielle Versuchspläne. Beim Box-Behnken Plan lassen sich drei Einflussgrößen mit jeweils drei Abstufungen bei geringem Versuchsaufwand untersuchen. Die ausgewählten Parameter finden sich in Tab. 3.1. Der entsprechend codierte Box-Behnken Versuchsplan ist in der nachfolgenden Tab. F.1 dargestellt.

Tab. F.1: Codierter Box-Behnken-Versuchsplan mit variablen *Faktoren*

Versuchsnummer	Anteil Gärreste	<i>Faktoren</i>	
		Frequenz Matriz	Frequenz Förderschnecke
1	-	-	0
2	-	+	0
3	-	0	-
4	-	0	+
5	+	-	0
6	+	+	0
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	+
10	0	+	+
11	0	-	-
12	0	+	-
13	0	0	0

F.2 Softwarespezifika - Auswertung mithilfe der Software STAVEX

Zur Auswertung der statistischen Versuchsplanung wurde die Software STAVEX genutzt. An dieser Stelle werden abschließend die Formeln dargestellt, welche der Berechnung des Programms zugrunde liegen [40], [70].

Modellgleichung

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \cdot \sum_{j=n-1}^n \cdot b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (\text{F.1})$$

Koeffizient b_0

$$b_0 = \frac{1}{\sum_1^N X_0} \cdot \sum_1^N X_0 \cdot y \quad (\text{F.2})$$

Koeffizient b_i

$$b_i = \frac{1}{\sum_1^N X_i} \cdot \sum_1^N X_i \cdot y \quad (\text{F.3})$$

Haupteffekte $H E_i$

$$H E_i = \frac{2}{\sum_1^N X_i} \cdot \sum_1^N X_i \cdot y \quad (\text{F.4})$$

Wechselwirkungseffekte WW_{ij}

$$WW_{ij} = \frac{2}{\sum_1^N X_i} \cdot \sum_1^N X_i \cdot X_j \cdot y \quad (\text{F.5})$$

F.3 Ermittelte Zielgrößen für die Anwendung von DoE

Tab. F.2: Kennwerte der 1. statistischen Versuchsreihe (DoE)

Rohstoff		Heu (TK-1394)/Gärrest (TK-1480)															
Variation Rohstoffparameter																	
Mischungsverhältnis (Faktor 1)																	
Schüttdichte	BD _A	Ma.-%															
		kg/m ³															
Max/Min-Abweichung		kg/m ³															
Variation Prozessparameter																	
Frequenz Matzire (Faktor 2)																	
Frequenz Förderschnecke (Faktor 3)																	
	f _M	Hz	20	25	25/75	25/75	25/75	25/75	15/85	15/85	15/85	15/85	15/85	5/95	5/95	5/95	5/95
	f _S	Hz	2	1	3	2	1	3	20	20	20	25	2	2	25	25	30
Pelletbewertung																	
Abriebfestigkeit	Du	Ma.-%	99,1	99,1	99,2	99,2	99,2	98,4	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,0	99,1	99,3	99,0
		Ma.-%	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,1	± 0,0	± 0,0	± 0,1	± 0,3	± 0,1	± 0,1	± 0,0
Druckfestigkeit	CR	%	85,3	89,9	85,5	85,5	86,5	86,5	88,4	88,4	86,9	85,5	85,6	85,6	86,9	86,1	85,2
		%	± 1,3	± 3,7	± 0,8	± 0,7	± 0,8	± 0,5	± 0,3	± 0,3	± 0,2	± 3,0	± 0,8	± 0,3	± 0,7	± 1,4	± 0,7
Schüttdichte	BD	kg/m ³	730	726	712	736	743	743	722	741	732	740	740	720	726	719	721
		kg/m ³	± 8	± 2	± 12	± 1	± 9	± 2	± 2	± 1	± 1	± 3	± 3	± 7	± 1	± 6	± 1
Rohdichte	GD	g/cm ³	1,40	1,39	1,40	1,40	1,32	1,32	1,33	1,43	1,50	1,34	1,44	1,41	1,41	1,42	1,43
		g/cm ³	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,09	± 0,09	± 0,08	± 0,08	± 0,01	± 0,05	± 0,06	± 0,01	± 0,01	± 0,00	± 0,01
Wassergehalt	w	Ma.-%	14,5	13,7	14,5	13,8	13,1	14,4	14,5	14,5	13,1	14,0	14,9	15,0	14,9	14,5	14,5
		Ma.-%	± 0,0	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,6	± 0,3	± 0,3	± 0,1	± 0,4	± 0,1	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,0
Verdichtungsverhältnis ¹			1,94	1,93	1,89	1,95	1,64	1,64	1,60	1,64	1,62	1,64	1,29	1,30	1,29	1,29	1,29
Prozessbewertung																	
spezif. Energieverbrauch	E _{spez, Pel}	Wh/kg	123	162	120	161	133	86	105	105	146	100	103	120	88	126	126
		Wh/kg	n.b.	± 10	n.b.	n.b.	± 8	± 2	± 6	± 6	± 11	± 14	± 2	± 1	± 4	± 2	± 2
Gesamtdurchsatz	ṁ _{Pel}	kg/h	34,1	28,5	42,3	34,8	31,9	46,4	40,8	40,8	33,5	56,9	60,8	55,4	65,3	51,1	51,1
		kg/h	± 1,6	± 1,6	± 1,4	± 3,7	± 2,7	± 5,8	± 2,8	± 2,8	± 0,2	± 3,3	± 12,9	± 17,8	± 3,7	± 3,2	± 3,2
Pelletdurchsatz	ṁ _P	kg/h	30,7	24,6	37,4	30,5	25,7	38,7	35,9	35,9	28,0	47,8	40,2	34,0	56,8	43,1	43,1
		kg/h	± 1,3	± 1,8	± 0,5	± 2,9	± 2,3	± 1,8	± 2,2	± 2,2	± 0,6	± 2,8	± 1,2	± 2,3	± 3,3	± 3,1	± 3,1
produktionsbedingter Feinanteil	ṁ _F	Ma.-%	10,1	13,6	11,7	12,1	19,3	16,7	11,9	16,3	16,3	16,0	17,4	19,0	13,1	15,7	15,7
		Ma.-%	± 0,3	± 1,6	± 1,7	± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 2,4	± 0,1	± 1,2	± 3,3	± 0,1	± 0,8	± 0,8
Pellettemperatur	θ _P	°C	69,4	71,0	74,7	72,7	76,6	80,1	75,3	75,3	77,3	79,3	73,3	73,1	80,2	76,4	76,4
		°C	± 0,3	± 1,5	± 2,5	± 1,4	± 4	± 0,6	± 1,0	± 1,0	± 1,4	± 0,3	± 0,5	± 0,1	± 0,7	± 0,4	± 0,4
Temperaturbereich Pressenraum		°C	48,9 - 54,2	49,1 - 56,0	47,5 - 56,2	49,8 - 56,2	50,3 - 52,5	49,7 - 54,2	47,9 - 55,8	50,3 - 57,0	50,5 - 56,1	49,6 - 52,3	47,3 - 53,1	49,5 - 54,3	50,5 - 55,9	50,5 - 55,9	50,5 - 55,9

¹ Das Verdichtungsverhältnis ist das Verhältnis der Schüttdichten von Pellets zum Ausgangsmaterial bei entsprechenden Wassergehalten.

Konstante Rohstoffparameter wie Wassergehalt und Aufbereitungsgrad können Tab. 3.1 entnommen werden.

Die Werte zur Pellet- und Prozessbewertung sind Mittelwerte aus Doppelversuchen und je zweifacher Analyse, mit Ausnahme der Rohdichte. Hier erfolgte jeweils eine 5-fache Bestimmung. Die Werte für den Gesamtdurchsatz beinhalten Pellets und den produktionsbedingten Feinanteil > 3,15 mm.

Die Differenz zwischen Gesamt- und Pelletdurchsatz spiegelt den Materialverlust im Prozessablauf wieder (durch z.B. Todräume oder An- und Abfahrprozesse).

n.b. nicht bestimmt aufgrund technischer Probleme

Tab. F.3: Kennwerte der 2. statistischen Versuchsreihe (DoE)

Rohstoff		Heu (TK-1545)/Gärrest (TK-1480)														
Variation Rohstoffparameter																
BD _A	Mischungsverhältnis (Faktor 1)															
	Schüttdichte															
	Max/Min-Abweichung															
Variation Prozessparameter																
f _M	Frequenz Presse (Faktor 2)															
f _s	Frequenz Förderschnecke (Faktor 3)															
Pelletbewertung																
Du	Abriebfestigkeit	Ma.-%	98,9	99,0	98,6	98,9	98,8	60/40	60/40	60/40	202	60/40	60/40	60/40	30/70	30/70
	Max/Min-Abweichung	Ma.-%	± 0,1	± 0,0	± 0,1	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0	± 0,0
CR	Druckfestigkeit	%	80,8	81,1	82,2	80,0	81,8	81,2	80,5	82,2	80,5	82,2	82,9	84,4	87,8	88,0
	Max/Min-Abweichung	%	± 0,8	± 0,1	± 0,1	± 0,9	± 1,1	± 1,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 1,4	± 0,8	± 1,1	± 0,0	± 0,1
BD	Schüttdichte	kg/m ³	675	717	681	687	738	690	690	709	706	740	750	730	743	743
	Max/Min-Abweichung	kg/m ³	± 2	± 0	± 10	± 5	± 11	± 2	± 5	± 7	± 6	± 9	± 2	± 2	± 1	± 1
GD	Rohdichte	g/cm ³	1,31	1,38	1,25	1,01	1,37	1,34	1,36	1,35	1,38	1,40	1,40	1,39	1,39	1,39
	Max/Min-Abweichung	g/cm ³	± 0,01	± 0,00	± 0,00	± 0,00	± 0,03	± 0,00	± 0,01	± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,00	± 0,00	± 0,00
w	Wassergehalt	Ma.-%	10,2	9,1	9,0	9,2	11,3	10,8	11,2	10,2	9,9	10,9	11,4	11,7	11,5	11,5
	Max/Min-Abweichung	Ma.-%	± 0,2	± 0,0	± 0,2	± 0,4	± 0,3	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,5	± 0,7	± 0,2	± 0,0	± 0,0	± 0,1
1 zu	Verdichtungsverhältnis ¹		5,00	5,31	5,04	5,09	3,65	3,42	3,42	3,51	3,50	2,44	2,48	2,41	2,45	2,45
Prozessbewertung																
E _{spez, Pel}	spezif. Energieverbrauch	Wh/kg	172	242	154	148	117	134	138	164	114	99	94	103	108	108
	Max/Min-Abweichung	Wh/kg	± 7	± 5	± 4	± 10	± 11	± 4	± 3	± 3	± 9	± 6	± 12	± 4	± 2	± 2
ṁ _{Pel}	Gesamtdurchsatz	kg/h	28,7	24,9	42,6	31,5	37,0	48,2	43,2	38,0	55,4	76,5	60,3	68,1	73,9	73,9
	Max/Min-Abweichung	kg/h	± 2,3	± 0,6	± 0,8	± 0,1	± 0,8	± 0,8	± 1,4	± 1,1	± 1,3	± 3,3	± 1,4	± 6,0	± 6,0	± 3,2
ṁ _p	Pelletdurchsatz	kg/h	26,2	22,7	40,0	29,1	33,9	44,8	40,7	35,7	52,2	69,0	54,8	63,9	68,7	68,7
	Max/Min-Abweichung	kg/h	± 1,7	± 0,5	± 0,3	± 0,3	± 0,7	± 0,8	± 1,3	± 1,1	± 1,2	± 3,0	± 1,0	± 5,8	± 3,6	± 3,6
m _F	produktionsbedingter Feinanteil	Ma.-%	8,6	9,0	6,0	7,6	8,3	7,1	5,8	6,1	5,8	9,8	9,1	6,1	7,0	7,0
	Max/Min-Abweichung	Ma.-%	± 1,3	± 0,2	± 1,1	± 0,4	± 0,2	± 0,1	± 0,0	± 0,4	± 0,1	± 0,0	± 0,4	± 0,2	± 0,8	± 0,8
ϑ _p	Pellettemperatur	°C	72,8	73,3	78,7	78,2	76,9	80,7	81,3	81,6	87,0	82,6	80,7	84,3	84,1	84,1
	Max/Min-Abweichung	°C	± 0,4	± 0,7	± 1,6	± 3,2	± 0,2	± 0,6	± 0,7	± 0,2	± 1,2	± 1,5	± 0,1	± 0,5	± 0,5	± 2,2
ϑ _{PR}	Temperaturbereich Pressenraum	°C	46,5 - 52,8	44,9 - 60,9	45,6 - 57,9	46,2 - 61,2	45,3 - 51,8	45,0 - 52,2	47,1 - 54,9	45,3 - 58,7	45,5 - 59,8	46,2 - 51,4	45,5 - 52,6	44,1 - 50,2	45,2 - 54,1	45,2 - 54,1

F.4 Modellgleichungen der 1. Statistische Versuchsreihe

Für unterschiedliche Anteile an Gärreste: $m_G = 75, 85$ bzw. $95 \text{ Ma.}\%$

Abriebfestigkeit

$$\begin{aligned} Du = & 100.7 - (0.1863 m_G) + (0.9375 f_S) + (0.4075 f_M) \\ & + (0.001125 m_G^2) - (0.03750 f_S^2) - (0.0055 f_M^2) \\ & + (0.0025 m_G f_S) - (0.0005 m_G f_M) - (0.035 f_S f_M) \end{aligned}$$

Schüttdichte

$$\begin{aligned} BD = & -226.5 + (23.61 m_G) - (29.18 f_S) + (0.165 f_M) \\ & - (0.1389 m_G^2) - (6.512 f_S^2) - (0.0195 f_M^2) \\ & + (0.16 m_G f_S) - (0.0215 m_G f_M) + (1.5 f_S f_M) \end{aligned}$$

Rohdichte

$$\begin{aligned} GD = & 1.029 - (0.01994 m_G) + (0.3206 f_S) + (0.06662 f_M) \\ & + (0.000125 m_G^2) - (0.035 f_S^2) - (0.00085 f_M^2) \\ & + (0.00025 m_G f_S) - (0.00002.5 m_G f_M) - (0.00875 f_S f_M) \end{aligned}$$

Spezifischer Energieverbrauch

$$\begin{aligned} E_{spez, Pel} = & 1411 - (25.38 m_G) - (55.36 f_S) - (8.707 f_M) \\ & + (0.1474 m_G^2) + (2.737 f_S^2) + (0.3415 f_M^2) \\ & + (0.2675 m_G f_S) - (0.0735 m_G f_M) + (0.035 f_S f_M) \end{aligned}$$

F.5 Modellgleichungen der 2. Statistische Versuchsreihe

Für unterschiedliche Anteile an Gärreste: $m_G = 10, 40$ bzw. $70 \text{ Ma.}\%$

Abriebfestigkeit

$$\begin{aligned} Du = & 99.05 - (0.03431 m_G) + (0.02708 f_S) + (0.02167 f_M) \\ & + (0.00006944 m_G^2) - (0.009375 f_S^2) - (0.0005 f_M^2) \\ & + (0.002917 m_G f_S) + (0.0003333 m_G f_M) + (0 f_S f_M) \end{aligned}$$

Schüttdichte

$$\begin{aligned} BD = & 1355 - (0.6987 m_G) - (95.47 f_S) - (20.78 f_M) \\ & + (0.01704 m_G^2) + (3.641 f_S^2) + (0.2475 f_M^2) \\ & + (0.06333 m_G f_S) - (0.01317 m_G f_M) + (1.12 f_S f_M) \end{aligned}$$

Rohdichte

$$\begin{aligned} GD = & 1.511 - (0.002786 m_G) - (0.02544 f_S) - (0.001058 f_M) \\ & + (0.000001806 m_G^2) - (0.0009062 f_S^2) - (0.000045 f_M^2) \\ & + (0.0005 m_G f_S) + (0.000003333 m_G f_M) + (0.000525 f_S f_M) \end{aligned}$$

Spezifischer Energieverbrauch

$$\begin{aligned} E_{spez, Pel} = & -99.46(-6.286 m_G) - (2.367 f_S) + (33.88 f_M) \\ & + (0.005236 m_G^2) + (1.309 f_S^2) - (0.4495 f_M^2) \\ & + (0.3992 m_G f_S) + (0.05517 m_G f_M) - (1.665 f_S f_M) \end{aligned}$$

F.6 Modellierte kleinste und größte Werte der Zielgrößen

Tab. F.4: 1. statistische Versuchsreihe: Modellierte kleinste und größte Werte der Zielgrößen

Variationsbereich der 1. statistische Versuchsreihe										
Mischungsverhältnis (Faktor 1) ¹	H/G	Ma.-%	25/75 - 5/95							
Frequenz Matrice (Faktor 2)	f _M	Hz	20 - 30							
Frequenz Förderschnecke (Faktor 3)	f _s	Hz	1 - 3							

			Abriebfestigkeit		Schüttdichte		Rohdichte		spez. Energieverbrauch	
			Du _{max}	Du _{min}	BD _{max}	BD _{min}	GD _{max}	GD _{min}	E _{spez, Pel max}	E _{spez, Pel min}
Faktoren:										
Frquenz Matrice	f _M	Hz	20	20	20	20	30	20	30	20
Frequenz Schnecke	f _s	Hz	3	1	1	3	1	1	1	3
Anteil Gärreste	m _G	Ma.-%	85	85	85	75	95	85	75	85

Zielgrößen:										
Abriebfestigkeit	Du	Ma.-%	99,1	98,5	98,5	99,2	99,1	98,5	99,3	99,1
Schüttdichte	BD	kg/m ³	721	744	744	706	714	744	723	721
Druckfestigkeit	CR	%	87,0	86,9	86,9	85,8	85,0	86,9	87,9	87,0
Rohdichte	GD	g/cm ³	1,37	1,32	1,32	1,37	1,47	1,32	1,46	1,37
produktionsbedingter Feinanteil	m _F	Ma.-%	15,6	19,4	19,4	13,1	19,3	19,4	14,7	15,6
Pelletdurchsatz	m _p	kg/h	40,1	26,4	26,4	33,7	32,9	26,4	23,6	40,1
spezif. Energieverbrauch	E _{spez, Pel}	Wh/kg	84	126	126	109	140	126	185	84

¹ Heu (TK-1394)/Gärrest (TK-1480)

Tab. F.5: 2. statistische Versuchsreihe: Modellierte kleinste und größte Werte der Zielgrößen

Variationsbereich der 2. statistische Versuchsreihe										
Mischungsverhältnis (Faktor 1) ¹	H/G	Ma.-%	90/10 - 30/70							
Frequenz Matrice (Faktor 2)	f _M	Hz	20 - 30							
Frequenz Förderschnecke (Faktor 3)	f _S	Hz	6 - 10							
			Abriebfestigkeit		Schüttdichte		Rohdichte		spez. Energieverbrauch	
			Du _{max}	Du _{min}	BD _{max}	BD _{min}	GD _{max}	GD _{min}	E _{spez, Pel max}	E _{spez, Pel min}
Faktoren:										
Frquenz Matrice	f _M	Hz	30	20	20	20	30	20	25	20
Frequenz Schnecke	f _S	Hz	10	10	6	10	10	10	6	6
Anteil Gärreste	m _G	Ma.-%	70	10	70	10	70	10	10	70
Zielgrößen:										
Abriebfestigkeit	Du	Ma.-%	99,3	98,6	98,7	98,6	99,3	98,6	99,0	98,7
Schüttdichte	BD	kg/m ³	751	670	774	670	751	670	712	774
Druckfestigkeit	CR	%	89,9	82,4	84,1	82,4	89,9	82,4	81,2	84,1
Rohdichte	GD	g/cm ³	1,42	1,26	1,38	1,26	1,42	1,26	1,35	1,38
produktionsbedingter Feinanteil	m _F	Ma.-%	6,4	7,6	11,0	7,6	6,4	7,6	8,4	11,0
Pelletdurchsatz	m _p	kg/h	68,0	31,7	77,5	31,7	68,0	31,7	15,9	77,5
spezif. Energieverbrauch	E _{spez, Pel}	Wh/kg	101	161	62	161	101	161	225	62

¹ Heu (TK-1394)/Gärrest (TK-1480)

F.7 Bestimmtheitsmaß R^2 und p -Werte

Tab. F.6: 1. statistische Versuchsreihe: Bestimmtheitsmaß R^2 und die p -Werte als Ergebnisse der Varianzanalyse

Zielgröße	Bestimmtheitsmaß R^2	Haupteffekte			p-Werte der Faktoren quadratische Effekte			Interaktionseffekte		
		m_G	f_s	f_M	m_G^2	f_s^2	f_M^2	$m_G \cdot f_s$	$m_G \cdot f_M$	$f_s \cdot f_M$
Du	0,8457	0,7027	0,1265	0,1915	0,3867	0,7584	0,3047	0,7858	0,7858	0,1291
BD	0,8864	0,4141	0,1690	0,4859	0,0476	0,2253	0,9165	0,6547	0,7615	0,1032
GD	0,6885	0,5902	0,4558	0,3375	0,7575	0,4136	0,6056	0,9343	0,9671	0,2154
$E_{\text{spez, Pel}}$	0,9679	0,0140	0,0071	0,0402	0,0877	0,6740	0,2433	0,5906	0,4700	0,9711

Tab. F.7: 2. statistische Versuchsreihe: Bestimmtheitsmaß R^2 und die p -Werte als Ergebnisse der Varianzanalyse

Zielgröße	Bestimmtheitsmaß R^2	Haupteffekte			p-Werte der Faktoren quadratische Effekte			Interaktionseffekte		
		m_G	f_s	f_M	m_G^2	f_s^2	f_M^2	$m_G \cdot f_s$	$m_G \cdot f_M$	$f_s \cdot f_M$
Du	0,9498	0,0313	0,6220	0,1162	0,2394	0,4444	0,7888	0,0123	0,2191	1
BD	0,9634	0,0056	0,0321	0,9661	0,1026	0,1144	0,4174	0,5015	0,7185	0,1103
GD	0,8488	0,0391	0,3492	0,7052	0,9482	0,8850	0,9641	0,1834	0,9789	0,7827
$E_{\text{spez, Pel}}$	0,9272	0,0149	0,1628	0,8636	0,7646	0,7398	0,4915	0,1148	0,5018	0,2231

G Verdichtung im Einzelpresskanal

Tab. G.1: Kennwerte der Verdichtung im Einzelpresskanal von Heu und/oder Gärresten (Wassergehalt: 20 Ma.-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)

Rohstoff ¹		Heu (TK-1164)/Gärrest (TK-1480)																	
Mischungsverhältnis		100/0				50/50				0/100									
Verdichtungstemperatur		Ma.-%																	
		°C																	
Verdichtungsarbeit	W _v	Nm	Nm	22,29	22,54	12,24	7,69	28,89	21,56	18,85	13,80	100,61	71,77	42,93	23,66				
	Max/Min-Abweichung	Nm	Nm	+ 5,06 / - 5,29	+ 6,36 / - 4,33	+ 1,56 / - 2,35	+ 3,02 / - 1,55	+ 5,52 / - 4,54	+ 4,93 / - 6,17	+ 1,99 / - 3,53	+ 2,65 / - 2,31	+ 8,89 / - 10,14	+ 6,96 / - 10,49	+ 2,71 / - 1,92	+ 0,78 / - 0,89				
Durchstoßarbeit	W ₀	Nm	Nm	2,14	2,91	1,11	0,58	2,32	1,36	1,26	0,29	7,82	3,85	0,63	0,10				
	Max/Min-Abweichung	Nm	Nm	+ 0,60 / - 0,39	+ 2,36 / - 0,94	+ 0,11 / - 0,13	+ 0,11 / - 0,20	+ 0,24 / - 0,43	+ 0,40 / - 0,38	+ 0,21 / - 0,30	+ 0,20 / - 0,10	+ 1,28 / - 0,71	+ 0,66 / - 0,87	+ 0,47 / - 0,23	+ 0,04 / - 0,01				
Materialverformungsarbeit	W _{MV}	Nm	Nm	20,14	19,62	11,13	7,12	26,57	20,20	17,59	13,51	92,79	67,92	42,30	23,56				
	Max/Min-Abweichung	Nm	Nm	+ 4,56 / - 4,93	+ 6,50 / - 6,69	+ 1,66 / - 2,39	+ 2,99 / - 1,61	+ 5,59 / - 4,42	+ 4,53 / - 6,12	+ 1,78 / - 3,23	+ 2,73 / - 2,21	+ 9,23 / - 10,54	+ 6,86 / - 11,15	+ 2,25 / - 1,95	+ 0,80 / - 0,88				
Anzahl Pellets		5	5	5	5	5	6	5	5	4	5	5	5	5	5				
Rohdichte	ρ	g/cm ³	g/cm ³	0,73	0,70	0,98	1,06	1,10	1,09	1,18	1,18	1,44	1,40	1,39	1,34				
	Max/Min-Abweichung	g/cm ³	g/cm ³	+ 0,05 / - 0,07	+ 0,13 / - 0,08	+ 0,07 / - 0,12	+ 0,16 / - 0,22	+ 0,08 / - 0,06	+ 0,08 / - 0,07	+ 0,06 / - 0,11	+ 0,17 / - 0,09	± 0,07	+ 0,04 / - 0,03	+ 0,02 / - 0,04	± 0,03				

¹ Beide Rohstoffe wurden mittels Hammermühle und einem Austragssieb mit der Lochweite von 4 mm zerkleinert und auf einen Wassergehalt von 20 ± 0,5 Ma.-% konditioniert.

Tab. G.2: Kennwerte der Verdichtung im Einzelpresskanal von Heu oder Gärresten (Wassergehalt: 15 Ma.-%, Zerkleinerungsgrad: HM SLW 4 mm)

Rohstoff ²		Heu (TK-1164)						Gärrest (TK-1480)			
		°C		60		80		120		80	
Verdichtungsarbeit	W _v	Nm	Nm	27,39	18,16	19,46	13,52	116,10	52,81		
	Max/Min-Abweichung	Nm	Nm	+ 2,18 / - 2,79	+ 2,85 / - 3,83	+ 2,08 / - 1,64	+ 5,35 / - 5,17	+ 3,10 / - 1,53	+ 3,33 / - 4,11		
Durchstoßarbeit	W ₀	Nm	Nm	2,76	1,18	1,53	0,89	3,61	0,44		
	Max/Min-Abweichung	Nm	Nm	+ 0,10 / - 0,07	+ 0,26 / - 0,24	+ 0,28 / - 0,19	+ 0,76 / - 1,00	+ 1,58 / - 1,33	+ 0,15 / - 0,17		
Materialverformungsarbeit	W _{MV}	Nm	Nm	24,63	16,98	17,93	12,63	112,50	52,37		
	Max/Min-Abweichung	Nm	Nm	+ 2,07 / - 2,73	+ 2,86 / - 3,78	+ 1,81 / - 1,56	+ 6,35 / - 4,69	+ 3,18 / - 1,74	+ 3,40 / - 4,07		
Anzahl Pellets				5	4	6	5	5	5		
Rohdichte	ρ	g/cm ³	g/cm ³	0,84	0,98	0,98	1,08	1,43	1,38		
	Max/Min-Abweichung	g/cm ³	g/cm ³	+ 0,10 / - 0,09	± 0,08	+ 0,07 / - 0,12	+ 0,09 / - 0,10	± 0,04	+ 0,04 / - 0,06		

² Beide Rohstoffe wurden mittels Hammermühle und einem Austragssieb mit der Lochweite von 4 mm zerkleinert und auf einen Wassergehalt von 15 ± 0,5 Ma.-% konditioniert.

Tab. G.3: Kennwerte der Verdichtung im Einzelpresskanal von Heu oder Gärresten mit unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden bzw. Fraktionen

Rohstoff	Heu (TK-1164) ^{1,2}										Gärrest (TK-1480) ³										Heu (TK-1164) ³ /Gärrest (TK-1480) ³													
	4 mm > x > 1,25 mm					≤ 1,25 mm					Pulver					4 mm > x > 1,25 mm 50 Ma.-% Pulver					4 mm getrocknet					10 mm					4 mm / 10 mm			
Zerkleinerung/Fraktion		60		60		60		60		60		60		60		40		60		40		80		120		40		60		80		120		
Verdichtungstemperatur		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		°C		
Verdichtungsarbeit		W _v		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		
Max/Min-Abweichung		+4,61/- 5,41		+3,55/- 4,06		+9,14/- 8,78		+3,82/- 6,86		+10,70/- 9,52		+5,93		+4,27/- 7,71		+5,77/- 7,25		+6,81/- 12,26		+1,41/- 2,14		+2,53/- 4,05		+6,30/- 7,29		+5,96/- 7,05		+2,69/- 1,89		+5,96/- 7,05		+2,69/- 1,89		
Durchstoßarbeit		W ₀		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		
Max/Min-Abweichung		± 0,38		+0,27/- 0,18		+0,58/- 0,38		+0,56/- 0,38		+0,42/- 0,33		± 0,09		+0,54/- 0,79		+0,16/- 0,46		+0,10/- 0,11		± 0,05		+0,88/- 0,99		+0,35/- 0,17		+0,55/- 0,33		+0,09/- 0,17		+0,09/- 0,17		+0,09/- 0,17		
Materialverformungsarbeit		W _{WV}		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		Nm		
Max/Min-Abweichung		+4,24/- 5,04		+3,72/- 4,33		+9,51/- 8,93		+4,08/- 6,87		+10,85/- 9,94		± 9,44		+5,06/- 8,25		+5,67/- 7,36		+6,63/- 12,16		+1,40/- 2,04		+2,01/- 2,14		+1,93/- 3,56		+5,95/- 7,22		+6,20/- 7,60		+2,64/- 1,98		+2,64/- 1,98		
Anzahl Pellets		5		5		4		5		6		2		5		5		5		5		5		5		4		4		5		5		
Rohdichte		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		g/cm ³		
Max/Min-Abweichung		+0,11/- 0,19		+0,09/- 0,22		+0,04/- 0,10		+0,12/- 0,04		+0,17/- 0,18		+0,03/- 0,02		+0,08/- 0,06		+0,07/- 0,06		± 0,10		+0,06/- 0,07		+0,14/- 0,19		± 0,06		+0,08/- 0,16		+0,09/- 0,12		+0,07/- 0,08				

¹ Das Heu wurde mittels Hammerröhle und einem Austragssieb mit der Lochweite von 4 mm zerkleinert. Es stellt das Ausgangsmaterial für weitere Zerkleinerungen bzw. Fraktionierungen dar

² Wassergehalt 15 ± 0,5 Ma.-%

³ Wassergehalt 20 ± 0,5 Ma.-%

H Mapping Daten

H.1 Daten

Tab. H.1: EDX-Messpunkte

Rohstoff Zerkleinerung Wassergehalt Verdichtungsart	Heu				StSM Pulver 15 ± 0,5 Ma.-% EPK				Heu/Gärrest ¹ HM SLW 4 mm 12 ± 0,5 Ma.-% RMP				Gärrest HM SLW 4 mm 15 ± 0,5 Ma.-% RMP			
	Messpunkt in At %															
	P 1	P 2	P 3	P 4	P 1	P 2	P 3	P 4	P 1	P 2	P 3	P 4	P 1	P 2	P 3	P 4
Element- spektrum																
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,95	0,00	0,00	5,68
O	58,74	64,31	88,91	74,92	52,38	69,86	74,33	74,20	79,62	72,39	75,61	76,59	39,96	78,04	20,12	72,52
Na	0,03	0,08	0,20	0,11	0,55	2,36	5,28	6,02	0,94	1,74	0,99	1,85	1,50	2,12	0,15	3,06
Mg	0,22	0,13	0,45	0,20	1,16	1,09	0,31	2,19	0,64	1,02	0,35	0,85	0,06	1,84	0,49	1,22
Al	0,17	0,01	0,07	0,00	0,17	0,00	0,29	0,86	0,12	0,05	0,00	0,03	0,00	0,27	0,05	0,36
Si	8,57	0,00	4,82	3,21	2,16	0,00	2,14	1,47	2,96	9,04	2,56	5,27	0,09	5,55	0,19	3,09
P	0,00	0,33	0,42	0,30	0,23	0,48	0,00	0,48	0,06	0,09	0,24	0,15	0,07	1,63	0,26	0,73
S	0,79	0,56	0,28	0,19	1,36	0,43	2,53	0,88	0,12	0,19	3,02	0,24	15,80	1,61	0,06	1,25
Cl	8,42	3,37	1,03	0,70	12,51	7,07	5,75	5,60	6,60	4,31	3,93	2,62	4,81	2,98	42,46	0,98
K	20,53	21,73	3,14	6,03	18,61	6,52	6,29	6,00	8,82	9,44	13,23	9,46	7,70	5,52	36,14	8,53
Ca	1,14	4,28	0,67	6,79	9,12	1,52	0,68	2,05	0,09	1,63	0,01	2,90	0,00	0,00	0,00	2,01
Fe	1,38	5,20	0,00	7,55	1,75	0,17	0,09	0,24	0,02	0,09	0,05	0,03	0,07	0,43	0,08	0,56

¹ Mischungsverhältnis je 50 Ma.-%
Für die Gärrestpellets wurde die Chargen TK-1480 benutzt. Für Heupulver stand die Charge TK-1545 zur Verfügung.
Ansonsten fand die Heucharge TK-1164 Anwendung.

H.2 Mapping Heupellet

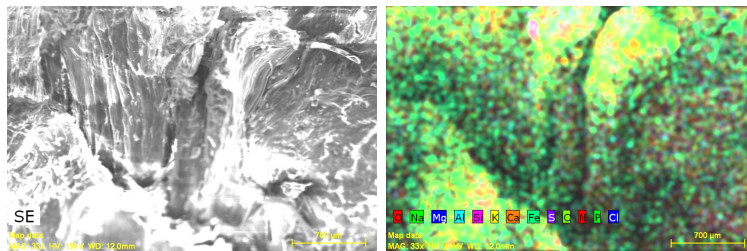


Abb. H.1: Pelletbruchfläche eines Heupelletts (TK-1164, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen

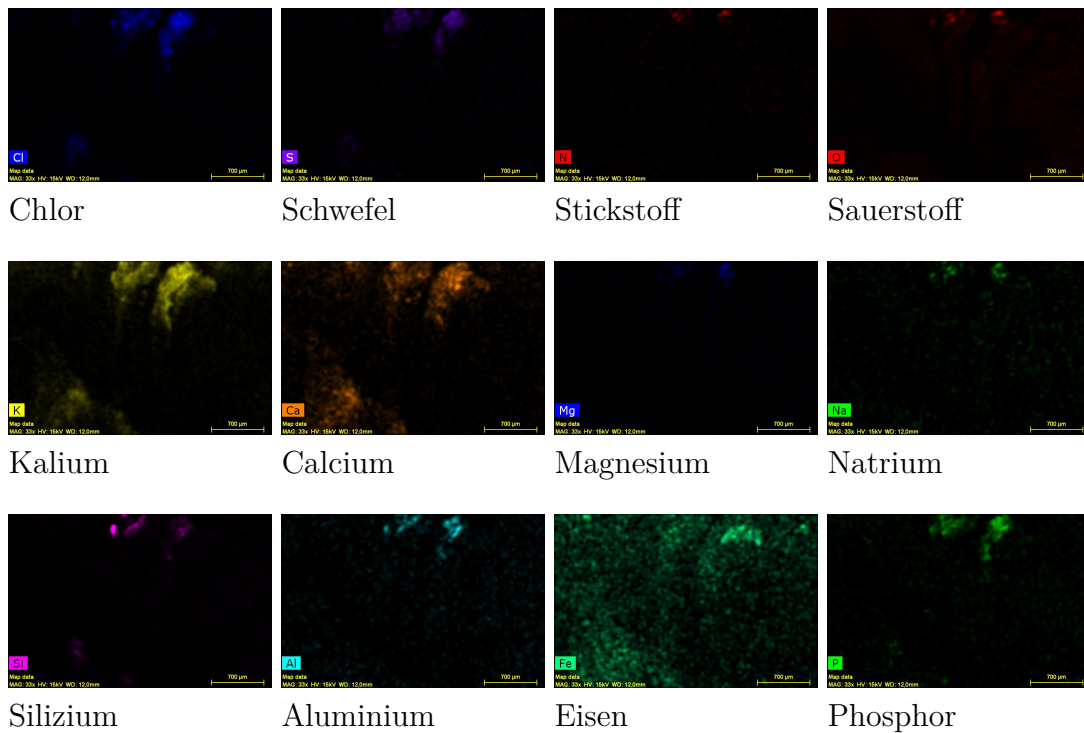


Abb. H.2: Einzelemente-Mapping der Pelletbruchfläche eines Heupelletts (TK-1164, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1)

H.3 Mapping Heupellet (Pulver)

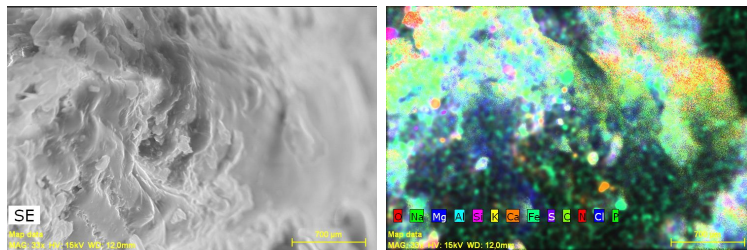


Abb. H.3: Pelletbruchfläche eines Heupelletts (TK-1164, StSM, Pulver, $w 15 \pm 0,5 Ma.-%$, Verdichtung bei $\vartheta_V 60^\circ C$ EPK), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen

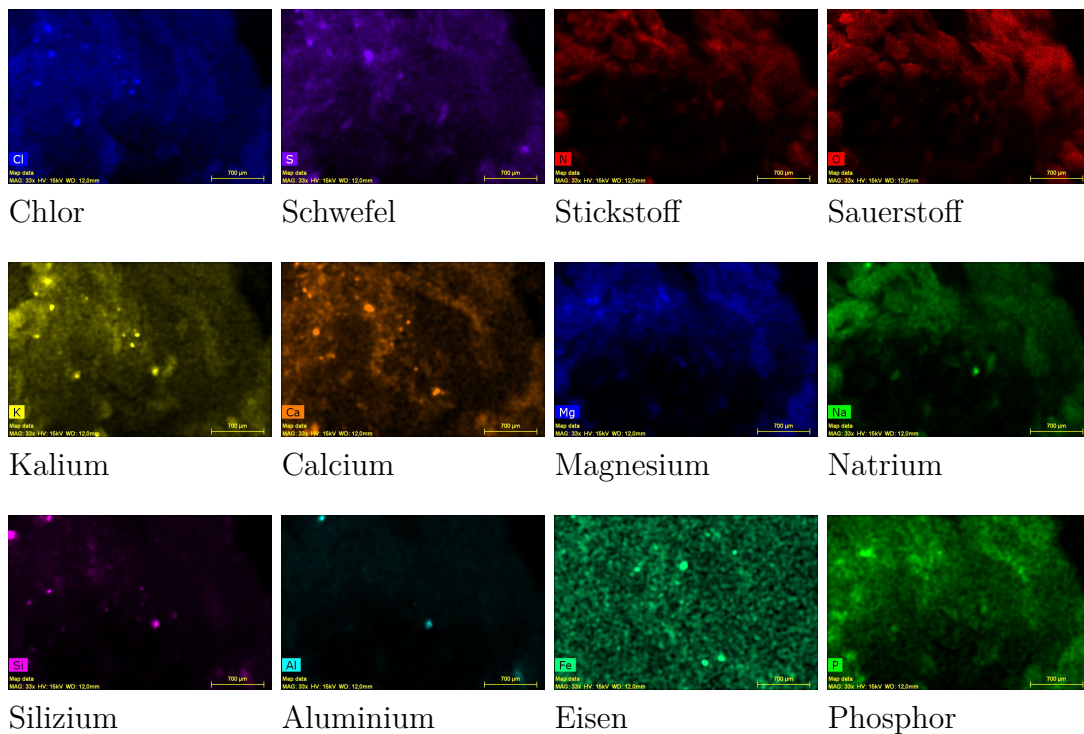


Abb. H.4: Einzelement-Mapping der Pelletbruchfläche eines Heupelletts (TK-1164, StSM, Pulver, $w 15 \pm 0,5 Ma.-%$, Verdichtung bei $\vartheta_V 60^\circ C$, EPK)

H.4 Mapping Heu/Gärrest-Mischpellet

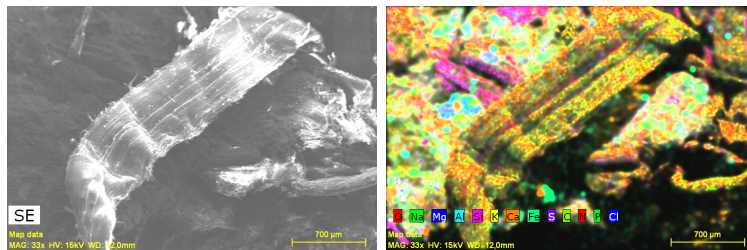


Abb. H.5: Pelletbruchfläche eines Heu/Gärrest-Misch-pellets in 50 *Ma.*-%iger Mischung (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ *Ma.*-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen

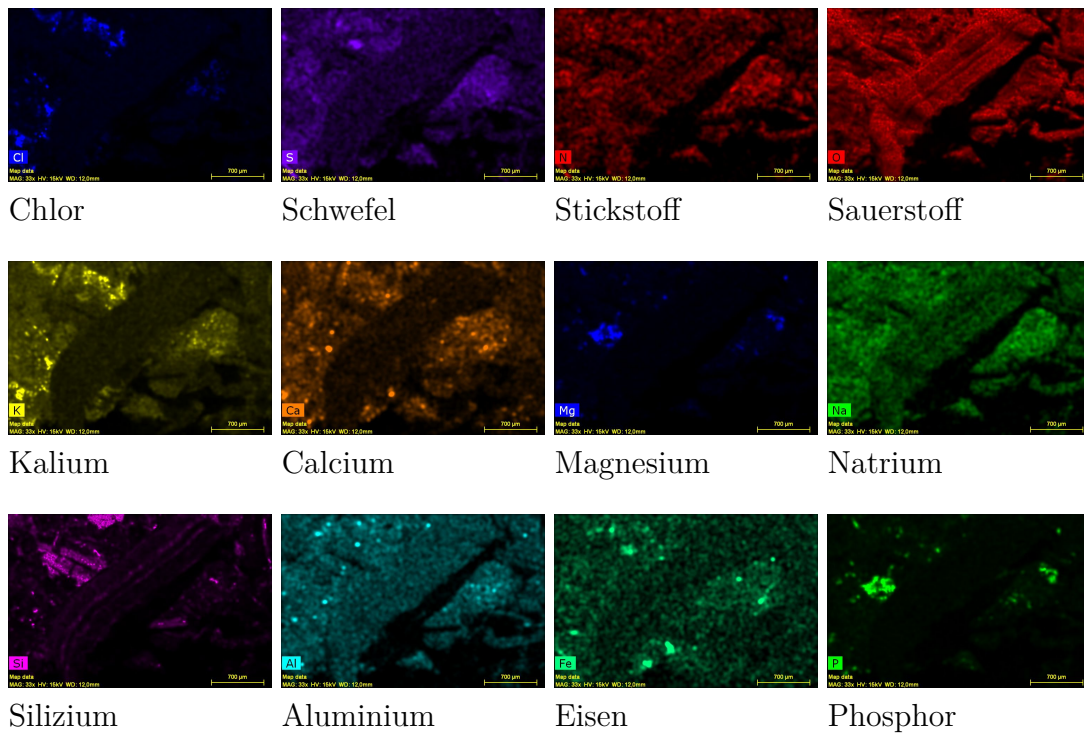


Abb. H.6: Einzelement-Mapping der Pelletbruchfläche eines Heu/Gärrest-Mischpellets in 50 *Ma.*-%iger Mischung (TK-1164/TK-1480, HM SLW 4 mm, w $12 \pm 0,5$ *Ma.*-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1)

H.5 Mapping Gärrestpellet

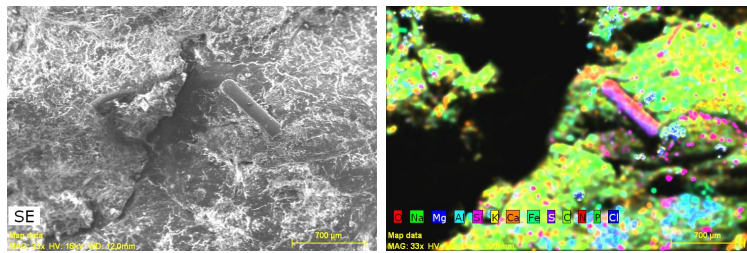


Abb. H.7: Pelletbruchfläche eines Gärrestpellets (TK-1480, HM SLW 4 mm, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1), links: REM-Aufnahme, rechts: Mapping mit allen wichtigen Elementen

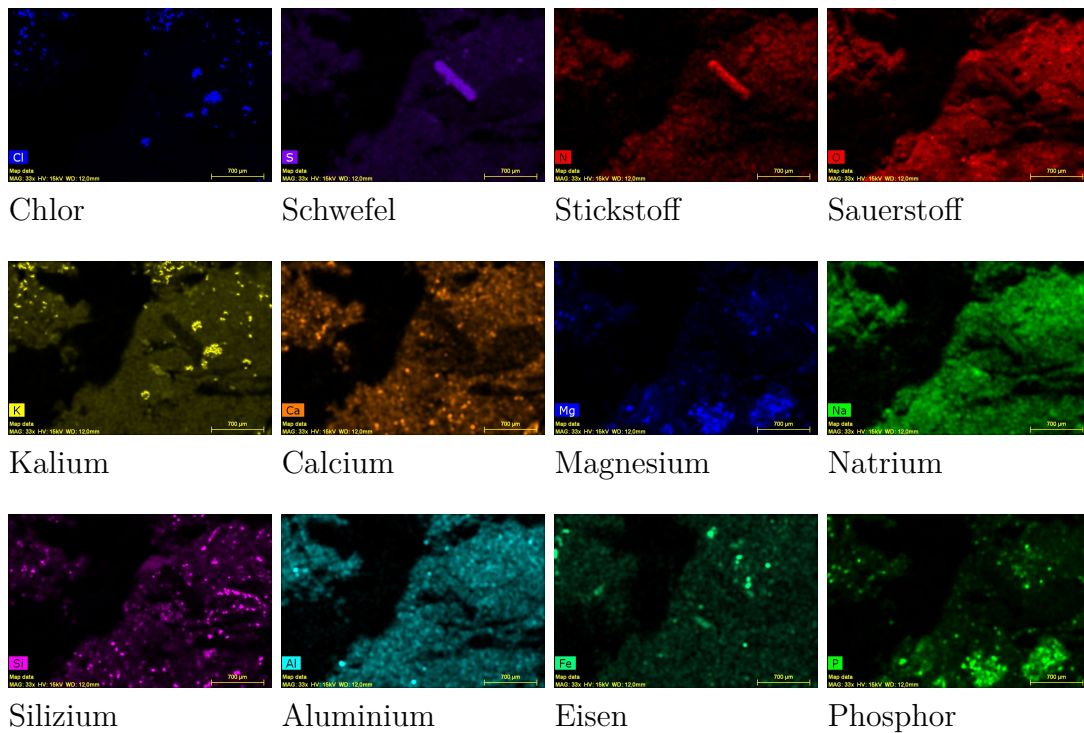


Abb. H.8: Einzelement-Mapping der Pelletbruchfläche eines Gärrestpellets (TK-1480, HM SLW 4 mm, w $15 \pm 0,5$ Ma.-%, RMP, Pelletierung mittels „Standard-Prozessparametern“, Tab. D.1)

I Eigene Publikationen

Zeitschriftenartikel (reviewed)

1. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Hay pellets: The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*. Vol. 148. pp. 163 - 174. ISSN: 0378-3820. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.02.013. 2016.

Zeitschriftenartikel

1. Pilz, A., Döhling, F., Kirsten, C., Weller, N., Zeng, T.: Pelletizing and energy related use of hay from landscape preservation. *Landtechnik* (68) 5. pp. 349 - 352. DOI: 10.15150/lt.2013.250. 2013.
2. Sauter, P., Thrän, D., Billig, E., Döhling, F., Pilz, A., Brosowski, A., Kirsten, C., Bosch, J., Büchner, D., Majer, S., Weller, N., Witt, J., Seidenberger, T., Schicketanz, S., Peters, W., Lochmann, Y., Prochnow, A.: Grünlandenergie Havelland - Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland (DBFZ Report Nr. 17). ISSN 2190-7943. Leipzig 2013.

Beitrag in Tagungsbänden

1. Kirsten, C., Pilz, A.: Erzeugung qualitativ hochwertiger Heupellets für eine energetische Nutzung. In: Nelles, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Rostocker Bioenergieforum am 14./15.06.2013 an der Universität Rostock. S. 113 - 120. ISBN 978-3-940364-27-2. Rostock 2012.
2. Kirsten, C., Dempwolf, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Alternative solid biofuels - Production of high quality mixed pellets from hay and digestate. In: Conference Proceedings of the 21th European Biomass Conference and Exhibition. 03. -

07.06.2013. pp. 1350-1354. ISBN 978-88-89407-53-0. DOI: 10.5071/21stEUBCE2013-3DO.2. Copenhagen/Denmark 2013.

3. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Verarbeitung überschüssiger Gärreste zu kompakten Brennstoffpellets. In: Nelles, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 7. Rostocker Bioenergieforum am 20./21.06.2013 an der Universität Rostock. S. 363 - 370. ISBN: 978-3-86009-207-1. Rostock 2013.
4. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Additional Analyses for Development and Quality Management of Alternative Fuel Pellets. In: Conference Proceedings of the 22nd European Biomass Conference and Exhibition. 23. - 26.06.2014. pp. 477 - 482. ISBN 978-88-89407-52-3. DOI: 10.5071/22ndEUBCE2014-2CO.1.4. Hamburg. 2014.
5. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Verarbeitung überschüssiger Gärreste zu kompakten Energielieferanten. In: Bockreis, A., Faulstich, M., Flamme, S., Kranert, M., Mocker, M., Nelles, M., Quicker, P., Rettenberger, G., Rotter, S. (Hrsg.) Tagungsband zum 7. Wissenschafts-kongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft am 16./17.03.2017 an der RWTH Aachen. S. 79 - 82. ISBN 978-3-903122-78-9. Innsbruck 2017.

Vorträge

1. Kirsten, C., Pilz, A.: Erzeugung qualitativ hochwertiger Heupellets für eine energetische Nutzung. Vortrag zum 6. Rostocker Bioenergieforum am 14./15.06.2012 an der Universität Rostock. 2012.
2. Sauter, P., Kirsten, C.: Grünlandenergie Havelland - Konzepte zur energetischen Nutzung von Gras. Vortrag zur Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung am 05./06.11.2012. Berlin. 2012.
3. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Verarbeitung überschüssiger Gärreste zu kompakten Brennstoffpellets. Vortrag zum 7. Rostocker Bioenergieforum am 20./21.06.2013 an der Universität Rostock. 2013.
4. Kirsten, C., Dempwolf, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Alternative solid biofuels - Production of high quality mixed pellets from hay and digestate, Presentation at the 21th European Biomass Conference and Exhibition. 03. - 07.06.2013. Copenhagen/Denmark. 2013.

5. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Pellets aus Gärresten - Herstellung und Herausforderungen. Vortrag zur Jahrestagung ProcessNet-Fachgruppe Agglomerations- und Schüttguttechnik am 10. - 12.03.2014. Magdeburg. 2014.
6. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Additional Analyses for Development and Quality Management of Alternative Fuel Pellets. Presentation at the 22nd European Biomass Conference and Exhibition. 23. - 26.06.2014. Hamburg. 2014.
7. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Bindemechanismen im Pellet - was hält ein Pellet zusammen. Vortrag zum Leipziger Fachgespräch Feste Biomasse: Biomasse-Kompaktierung zur energetischen Nutzung am 05.11.2014. Leipzig. 2014.
8. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Verarbeitung überschüssiger Gärreste zu kompakten Energielieferanten. Vortrag zum 7. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft am 16./17.03.2017 an der RWTH Aachen. 2017.

Poster

1. Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U.: Bindemechanismen - Was hält ein Pellet zusammen? In: Tagungsreader des 1. Deutschen Doktorandenkolloquium Bioenergie am 20/21.09.2018. S. 268 - 269. ISBN: 978-3-946629-35-1. Leipzig. 2018.