

AP 2 Erarbeitung eines Verfahrens zur schonenden Mahlung und Zerkleinerung von Luzerneheu; Untersuchung der Partikel hinsichtlich ihrer Morphologie und Weiterverarbeitbarkeit

1. Einleitung

Das Arbeitspaket 2 verfolgte das Ziel, ein Verfahren zur Zerkleinerung und Fraktionierung von Luzerneheu zu entwickeln, das auf landwirtschaftlich verfügbarer Technik basiert und für den Einsatz im Projekt angepasst werden kann. Ausgangspunkt war die Annahme, dass Luzerneheu durch geeignete Aufbereitung in verschiedene Fraktionen getrennt werden kann, die sich aufgrund ihrer stofflichen und physikalischen Eigenschaften für unterschiedliche Verwertungswege eignen.

Im Vordergrund standen zwei Aspekte: Zum einen sollte ein mechanisches Verfahren etabliert werden, mit dem Luzerneheu in reproduzierbarer Weise zerkleinert und nach Partikelgrößen fraktioniert werden kann. Zum anderen sollten die gewonnenen Fraktionen charakterisiert und hinsichtlich ihrer Eignung für die Herstellung von Formkörpern sowie für eine alternative Nutzung im Futterbereich bewertet werden.

Die methodische Vorgehensweise umfasste eine Recherche zu geeigneten Maschinen, die Durchführung von Hofproben und Vorversuchen mit vorhandener Technik sowie die Durchführung mehrerer Hauptversuche. Ergänzende Analysen zur Partikelgrößenverteilung, zum Stickstoffgehalt und zur mechanischen Eignung stellten sicher, dass die Ergebnisse auf eine fundierte Datengrundlage gestützt werden konnten.

Damit leistet Arbeitspaket 2 einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtziel des Projekts, nämlich die Entwicklung eines praxistauglichen, wirtschaftlich tragfähigen und stofflich effizienten Aufbereitungsverfahrens für Luzerneheu.

2. Recherche zu Zerkleinerung durch Mühlen

Zu Beginn des Arbeitspaketes wurde eine Recherche zu möglicher landwirtschaftlicher Technik durchgeführt, die zur Mahlung bzw. Zerkleinerung von Luzerneheu eingesetzt werden konnte. Die Anforderungen lagen auf einer möglichst preiswerten, einfach aufgebauten landwirtschaftlichen Maschine, die eine schonende und möglichst feine Zerkleinerung des Materials gewährleistete. Dabei musste berücksichtigt werden, dass insbesondere die Stängel des Luzerneheus aufgrund ihrer faserigen Eigenschaften in engem Zusammenhang mit dem erreichbaren Zerkleinerungsgrad stehen. Ziel war es daher, den geringstmöglichen, aber technisch realisierbaren Zerkleinerungsgrad zu ermitteln.

Es wurden die gängigsten Arten von Mahlmaschinen untersucht, darunter Hammermühlen, Schneidmühlen, Walzenmühlen und Schlagmühlen. In der landwirtschaftlichen Praxis kommen vor allem Schneid- und Hammermühlen zum Einsatz. Mit einem Hersteller von Hammermühlen sowie einem Hersteller von Schneidmühlen wurden vertiefende Gespräche geführt.

Die Recherchen zeigten, dass beide Maschinentypen grundsätzlich für die Zerkleinerung von Luzerneheu geeignet sind. Aufgrund der Fasereigenschaften kann es bei Hammermühlen jedoch zu Problemen kommen, die bei Schneidmühlen nicht auftreten. Zudem ist eine Schneidmühle in der Anschaffung günstiger als eine Hammermühle.

3. Eingesetzte Maschinen

Im Anschluss an die Recherche wurde eine Hofprobe mit der Stroh­mühle *Strohhexe SHE 15* durchgeführt. Dabei standen zwei Siebeinsätze zur Verfügung: ein Standardsieb mit 22 mm Lochung, das typischerweise für Stroh­einstreu genutzt wird, sowie ein weiteres Sieb mit 18 mm Lochung. Laut Hersteller war das 18 mm-Sieb die kleinste mögliche Variante, mit der Luzerneheu zerkleinert werden konnte, ohne die Funktionsfähigkeit der Mühle zu beeinträchtigen.

Die Zerkleinerung mit dem 18 mm-Sieb verlief im ersten Versuch problemlos. Die Stroh­mühle erwies sich damit als investitionsarme, praxistaugliche Maschine für den landwirtschaftlichen Einsatz. Aus diesem Grund wurde die Mühle für das Projekt angeschafft.

Die Auswahl dieser Technik erfüllte die Projektanforderung, bevorzugt einfache landwirtschaftliche Maschinen einzusetzen. Auf Basis der Recherche sowie der Angebotsvergleiche wurde die Stroh­mühle der Firma Landtechnik Hirlinger in den Betrieb integriert.

3.1 Schneidmühle mit Elektromotor (11 kW / 15 PS)

Die Stroh­mühle wird in der Landwirtschaft in der Regel zur Zerkleinerung von Stroh für die Verwendung als Einstreu eingesetzt. Durch die Zerkleinerung vergrößert sich die Oberfläche des Materials, wodurch die Flüssigkeitsaufnahme verbessert wird und Verstopfungen in Güllekanälen vermieden werden. Üblicherweise wird für Einstreuzwecke eine Häcksellänge von etwa 20 mm angestrebt.

Im Projekt wurde das Verfahren auf Luzerneheu übertragen. Die Zerkleinerung erfolgte in der Stroh­mühle (siehe Abb. 1) durch ein Mahlwerk, das aus 24 umlaufenden, beweglichen Messern und einem austauschbaren Mahlkorb besteht. Dieser Mahlkorb ist in verschiedenen Lochdurchmessern erhältlich. In Absprache mit der Firma Hirlinger wurde der Einsatz mit dem kleinstmöglichen Durchmesser von 18 mm bestellt und eingebaut.



Abbildung 1: Stroh­mühle der Firma Hirlinger

Der Lochdurchmesser bestimmt die Häcksellänge und somit die maximale Partikelgröße des zerkleinerten Luzerneheus. Das Heu verbleibt solange im Mahlkorb, bis es eine ausreichende Zerkleinerung erfahren hat und durch die Lochungen austreten kann.

Prinzip der Zerkleinerung

Im Inneren der Stroh­mühle befindet sich ein schnell rotierender Rotor, der mit scharfen Messern ausgestattet ist. Durch die Drehbewegung werden die eingefüllten Halme angesaugt, mechanisch

zerkleinert und gegen den Siebkorb gedrückt. Das Funktionsprinzip beruht somit auf einer Kombination aus Scherkräften der Messer und einer Partikelgrößenselektion durch den Siebkorb.

Das Luzerneheu wird von oben in den Einfülltrichter eingebracht. Das Messersystem unterhalb des Trichters saugt das Material an, zerkleinert es und treibt es anschließend durch den Siebeinsatz. Der jeweilige Lochdurchmesser des Siebes bestimmt die Feinheit des Mahlguts. Kleinere Partikel gelangen durch die Öffnungen in den Rohrauslauf, während größere Partikel im Inneren des Siebkorbes verbleiben und erneut zerkleinert werden. Unterhalb des Schneidwerkes angeordnete Windflügel unterstützen den Prozess, indem sie das Material durch den Rohrauslauf ausblasen.

3.2 Fraktionierung - Trommelvorreiniger (Firma ZANIN)

Als zweite Maschine kam ein Trommelvorreiniger der Firma Zanin zum Einsatz (siehe Abb. 2), der zu Projektbeginn bereits im Betrieb vorhanden war und nur geringfügig modifiziert werden musste.



Abbildung 2: Siebeinsätze im Trommelvorreiniger bei VWP, links und Beispielbild Trommelvorreiniger der Firma Zanin, rechts

Ein Trommelreiniger dient in der Landwirtschaft dazu, Erntegut von Verunreinigungen zu trennen oder Gemengeanbau-Erzeugnisse zu separieren. Das Aufgabegut wird dabei in eine rotierende Siebtrommel eingebracht, die aus vier perforierten, austauschbaren Sieben besteht. Diese Siebe können unterschiedliche Maschenweiten und Formen aufweisen und ermöglichen so die Trennung nach Partikelgrößen.

Die Produkttrennung erfolgt auf zwei Arten:

1. Trennung durch kleinere Öffnungen: Das eingefüllte Produkt verbleibt im Zylinder, während Bruchstücke und Verunreinigungen durch die Siebe fallen.
2. Trennung durch größere Öffnungen: Das Aufgabegut passiert die Siebe, während grobe Bestandteile zurückgehalten werden und am Ende der Trommel austreten.

Die Siebklassierung zählt in der mechanischen Verfahrenstechnik zu den grundlegenden Trennverfahren. Ein heterogenes Partikelgemisch wird anhand der Siebmaschenweite in Partikelklassen (Fraktionen) aufgeteilt. Die Trennung nutzt geometrische Merkmale (Partikelgröße, -

form) und kann zugleich stoffliche Unterschiede abbilden. Diese Merkmale schließen sich nicht aus, sondern wirken zusammen.

Für gehäckseltes Luzerneheu bedeutet dies: Die feineren Blattanteile weisen andere stoffliche Eigenschaften (u. a. höheren Proteingehalt) auf als die gröberen, faserreichen Stängelanteile. Durch die Klassierung nach Partikelgrößen entsteht daher gleichzeitig eine stoffliche Vortrennung von blatt- und stängelreichen Anteilen. Die so gewonnenen Fraktionen sind Grundlage für unterschiedliche Weiterverwendungen (z. B. formkörpergeeignete Fraktionen vs. futtermittelgeeignete, proteinreichere Fraktionen).

Im Projekt kommt ein Trommelsieb zum Einsatz. Es besteht aus einer um ihre Achse rotierenden, leicht geneigten Siebtrommel, deren Mantel aus vier austauschbaren Siebsegmenten besteht. Die Maschenweiten der Segmente lassen sich so wählen, dass das Material stufenweise klassiert wird. Die Aufgabeseite beginnt mit der kleinsten Maschenweite; das Material durchläuft nacheinander alle Kammern. Auf diese Weise entstehen mehrere Fraktionen, die nach Korngröße abgegrenzt sind.

Die Prozesscharakteristika eines Trommelsiebes sind für Luzerneheu vorteilhaft:

- Die Durchmischung des Siebgutes ist hoch; gleichzeitig findet eine Desagglomeration statt.
- Literaturseitig genannter Abrieb/ Zerkleinerung während des Siebprozesses gilt bei empfindlichen Schüttgütern als nachteilig; im vorliegenden Verfahren ist dieser Effekt prozessdienlich, da er eine zusätzliche, leichte Zerkleinerung bewirkt und die Trennung unterstützt.
- Relevante Einflussgrößen sind u. a. Materialfeuchte, Partikelform (faserig vs. blattartig), Aufgabestrom, Drehzahl und Neigung der Trommel. Diese Variablen beeinflussen den Trennschärfegrad und die Verweilzeit des Materials im jeweiligen Segment.

Für die Siebkonfiguration im Projekt ist das folgende Schema (Abb. 3) maßgeblich: Die Trommel ist in vier Kammern unterteilt, die mit unterschiedlichen Maschenweiten bestückt werden. Die Aufgabe beginnt mit der kleinsten Siebmasche, sodass zunächst die feinsten Partikel (blattartig) abgetrennt werden, bevor gröbere Fraktionen (stängelreicher) entstehen. Dieses Vorgehen stützt die angestrebte Blatt-/Stängel-Vortrennung und liefert prozessseitig verwertbare Fraktionen für die nachgelagerte Werkstoffprüfung bzw. Futtermittelverwertung.

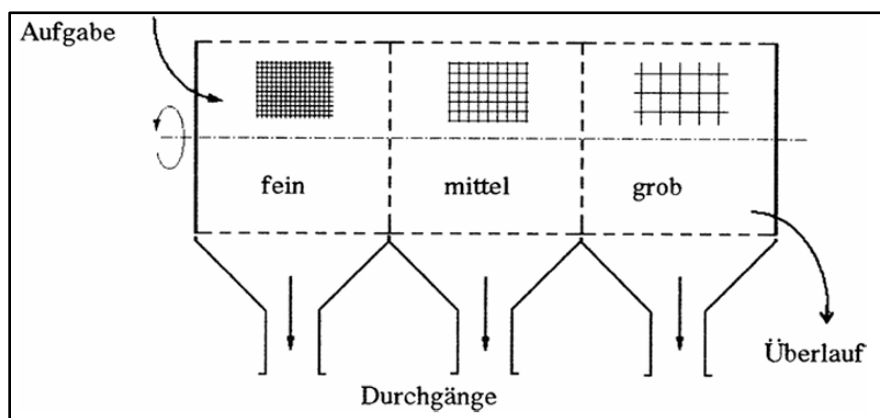


Abbildung 3: Trommelsieb, schematische Darstellung (Stieß 2009)

4. Versuchsreihe Aufbereitungsverfahren und Fraktionierungsversuche

Die Aufbereitungs- und Fraktionierungsversuche wurden methodisch so konzipiert, dass sie schrittweise aufeinander aufbauten. Für jeden Versuch wurde eine Zielstellung formuliert, die relevanten Hintergrundinformationen wurden berücksichtigt und im Anschluss die Ergebnisse sowie die gewonnenen Erkenntnisse dokumentiert. Auf diese Weise führten die Resultate einzelner Versuche jeweils zu Folgeversuchen, sodass eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Verfahrens erreicht wurde.

Ziel war die Konzeption eines optimierten Aufbereitungsverfahrens für Luzerneheu, das die Zielstellung des Arbeitspaketes 2 erfüllt. Dabei sollten Fraktionen gewonnen werden, die sich für die Herstellung von Formkörpern eignen.

Die Versuche wurden im landwirtschaftlichen Betrieb durchgeführt und an die dortigen technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen angepasst. Das Konzept ist grundsätzlich auch auf andere Betriebe übertragbar, sofern diese über vergleichbare Technik verfügen.

Im Mittelpunkt stand die Nutzung der beschriebenen Maschinen in ihrer ursprünglichen landwirtschaftlichen Funktion (Strohmühle und Trommelvorreiniger), die durch gezielte Modifikationen für die Verarbeitung von Luzerneheu angepasst wurden. Darauf aufbauend wurde ein neues Aufbereitungsverfahren entwickelt, das die Anforderungen des Projekts erfüllt.

Die folgende Abbildung (siehe Abb. 4) veranschaulicht den gesamten Ablauf der Versuchsreihe, die anschließenden Auswertungen sowie die Herstellung der Testprüfplatten.

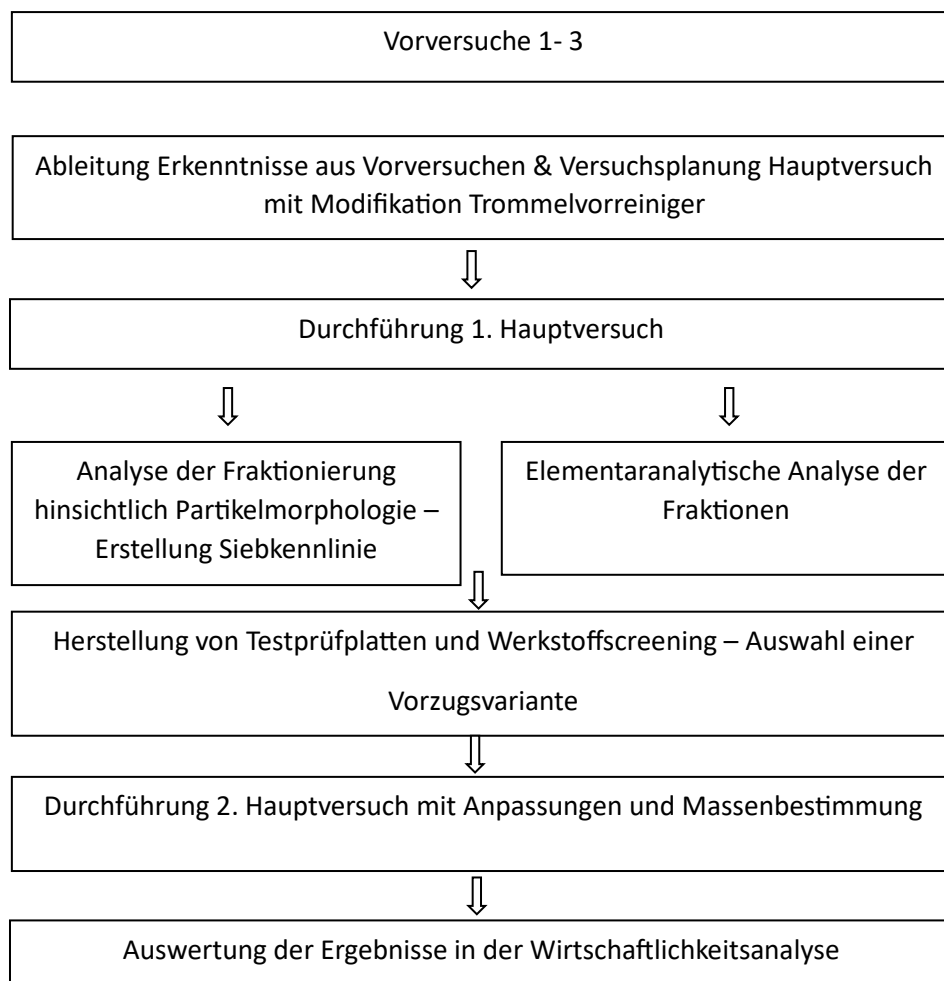


Abbildung 4: Darstellung des gesamten Versuchsablaufs, Analysen und Testprüfplattenherstellung

4.1 Ziel der Versuchsreihe

Ziel der gesamten Versuchsreihe war es, ein Aufbereitungsverfahren für Luzerneheu zu entwickeln. Das Verfahren sollte verschiedene Fraktionen liefern, die mit geeigneten Analysemethoden untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für die Formkörperherstellung bewertet werden konnten.

Im Rahmen der Untersuchungen standen folgende Aspekte im Mittelpunkt:

- die Zerkleinerung sowie die Blatt- und Stängeltrennung des Luzerneheus,
- die Fraktionierung des zerkleinerten Materials,
- die Bewertung eines arbeitswirtschaftlich sinnvollen Gesamtprozesses,
- die stoffliche und physikalische Analyse der gewonnenen Fraktionen.

Die Versuchsreihe gliederte sich in drei Vorversuche, die erste Erkenntnisse zur technischen Machbarkeit und zum Prozessaufbau lieferten. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden ein erster Hauptversuch durchgeführt, mehrere Analysen der Fraktionen vorgenommen und Testprüfplatten hergestellt. Aus den werkstofflichen Prüfungen wurde eine Vorzugsvariante ausgewählt. Anschließend erfolgte ein zweiter Hauptversuch, in dem diese Vorzugsvariante erneut gewonnen und der Aufbereitungsprozess optimiert wurde. Ergänzend wurden arbeitswirtschaftliche Parameter und Massenbilanzen erfasst, um eine spätere Wirtschaftlichkeitsanalyse zu ermöglichen.

4.2 Vorversuche 1-3

Das Verfahren zur Aufbereitung von Luzerneheu gab es zum Zeitpunkt des Projekts noch nicht. Es musste daher auf bereits im Betrieb vorhandene oder angeschaffte Technik zurückgegriffen werden. Durch die Vorversuche sollte zunächst geklärt werden, auf welche im Betrieb bereits etablierten Teilverfahren für Luzerneheu zurückgegriffen werden konnte und was neu überdacht und konzipiert werden musste.

4.2.1 Vorversuch 1

Zielstellung

Es sollte geprüft werden, ob die angeschaffte Strohmühle technisch in der Lage war, Luzerneheu zu zerkleinern und dabei eine erste Trennung von Blättern und Stängeln zu ermöglichen.

Hintergrund

Die Strohmühle war ursprünglich für die Verarbeitung von Getreidestroh mit einem 22 mm Mahlkorb konzipiert. Aufgrund der anderen Faserstruktur von Luzerneheu bestand Unsicherheit, ob eine gleichmäßige Zerkleinerung und eine partielle Blatt-Stängel-Trennung erreicht werden konnte.

Durchführung

Die Strohmühle wurde mit einem kleineren Siebeinsatz (18 mm) ausgerüstet. Nach einem kurzen Probelauf mit Getreidestroh wurde Luzerneheu zerkleinert. Die Beurteilung der Ergebnisse erfolgte visuell.

Ergebnisse/ Erkenntnisse

Die Zerkleinerung verlief technisch problemlos. Das Luzerneheu wurde gleichmäßig verarbeitet, und es ließ sich bereits eine sichtbare Trennung von Blättern und Stängeln feststellen. Zudem zeigte sich, dass das zerkleinerte Heu mit hohem Druck aus dem Ausblasrohr gefördert wurde.

4.2.2 Vorversuch 2

Zielstellung

Es sollte untersucht werden, ob der im Betrieb vorhandene Trommelvorreiniger für die Fraktionierung des zerkleinerten Luzerneheus geeignet war. Dabei lag ein Schwerpunkt auf der Frage, ob die Beschickung über den vorhandenen Becherelevator möglich war.

Hintergrund

Der Trommelvorreiniger wurde im Betrieb bislang zur Reinigung von eigenem Erntegut (Getreide, Ackerbohnen) sowie zur Trennung von im Gemenge angebauten Druschfrüchten eingesetzt. Am Beispiel der Getreidereinigung gestaltet sich der Ablauf wie folgt: Das Getreide wird in eine Grube geschüttet, in der eine Förderschnecke eingebaut ist. Diese transportiert das Getreide zum Elevatorfuß, wo sich der Elevatorschacht mit den Bechern befindet. Die Becher nehmen das Erntegut auf, fördern es vertikal nach oben und leiten es am Elevatorkopf über eine Umlenkrolle in einen kurzen Aufgabeschacht des Trommelvorreinigers. Das Material gelangt somit allein durch die Schwerkraft direkt in die Trommel. Parallel dazu wird oberhalb des Aufgabeschachtes eine Luftzufuhr gewährleistet, und ein Absaugrohr saugt über einen Zyklon leichte Bestandteile wie Spelzen oder Staub ab. Dieses System war auf Körnerfrüchte ausgelegt und sollte nun mit gehäckseltem Luzerneheu getestet werden.

Durchführung

Das zerkleinerte Luzerneheu wurde direkt aus der Strohmühle in die Grube eingeblasen und anschließend über Schnecke und Elevator dem Trommelvorreiniger zugeführt.

Ergebnisse/ Erkenntnisse

Die Förderung über die bestehende Infrastruktur funktionierte nur eingeschränkt. Ein Teil des Materials gelangte zwar in den Trommelvorreiniger und konnte dort fraktioniert werden. Der überwiegende Teil ließ sich jedoch nicht transportieren, da die Förderschnecke das leichte Material nicht zuverlässig aufnehmen konnte und die Elevatorbecher verstopften. Um Schäden an der Technik zu vermeiden, wurde der Versuch vorzeitig abgebrochen. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die Fraktionierung mit dem Trommelvorreiniger grundsätzlich möglich war, die Beschickung über den Elevator jedoch nicht praktikabel ist.

4.2.3 Vorversuch 3

Zielstellung

Es sollte geprüft werden, ob eine direkte Beschickung des Trommelvorreinigers ohne Elevator technisch realisierbar war.

Hintergrund

Die einzige Zugangsmöglichkeit zur Trommel stellte die Luftzuführung dar, die direkt mit dem Ansaugrohr des Zyklons verbunden war. Daher musste dieses Bauteil modifiziert werden, um das Luzerneheu unmittelbar in die Trommel einleiten zu können.

Durchführung

Die Luftzuführung am Trommelvorreiniger wurde demontiert, das Ansaugrohr des Zyklons verschlossen und dadurch ein freier Zugang zur Trommel geschaffen. Anschließend wurde ein Drainagerohr zugeschnitten, das das Ausblasrohr der Strohmühle mit dem Trommelvorreiniger verband. Die spezifische Beschaffenheit des Drainagerohres – durchlässig für einen Teil der Luft, aber

zurückhaltend für das Material – sollte bewirken, dass das Heu in einem gleichmäßigen, nicht zu schnellen Materialstrom in den Trommelvorreiniger gelangte.

Ergebnisse/ Erkenntnisse

Das Prinzip funktionierte zunächst wie geplant. Das Material gelangte in die Trommel, ohne dass es zu einem unkontrollierten Eintrag kam. Allerdings zeigte sich im Verlauf, dass durch den Höhenunterschied zwischen Strohmühle und Trommelvorreiniger sowie die Länge des Drainagerohres ein Teil des gehäckselten Heus wieder zurückfiel. Dies führte letztlich zu Verstopfungen am Rohrauslauf der Strohmühle. Aus diesem Grund musste der Versuch vorzeitig abgebrochen werden. Die Erkenntnis bleibt jedoch, dass eine direkte Beschickung des Trommelvorreinigers durch kleine Modifikationen technisch möglich ist, wenngleich die konkrete Ausführung im Test noch nicht ausreichend funktionierte.

Die Entwicklung eines Konzepts für eine verbesserte Verbindung der verschiedenen Maschinen bis hin zu den Anlagen für die Verpackungsherstellung und Pelletherstellung wird im Arbeitspaket „Technisches Anlagenkonzept“ weiterbearbeitet.

4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Vorversuchen 1-3

Die drei Vorversuche lieferten grundlegende Erkenntnisse zur technischen Machbarkeit der Zerkleinerung und Fraktionierung von Luzerneheu sowie zur Einbindung der vorhandenen Technik.

- Die Zerkleinerung von Luzerneheu mit der Strohmühle war technisch möglich. Dabei erfolgte neben der Zerkleinerung auch eine sichtbare Trennung von Blättern und Stängeln.
- Die Fraktionierung über Siebeinsätze im Trommelvorreiniger funktionierte grundsätzlich. Eine Zuführung über den bestehenden Elevator erwies sich jedoch als nicht praktikabel.
- Ein (teil-)automatisierter Transport des Materials über die betriebseigene Fördertechnik oder einfache provisorische Lösungen war zum Zeitpunkt der Erprobung nicht zuverlässig realisierbar.
- Durch geringfügige Modifikationen am Trommelvorreiniger konnte die direkte Beschickung zwar ermöglicht werden, die konkrete Umsetzung mit Drainagerohr war jedoch aufgrund von Höhenunterschieden und Rückstauungen technisch noch unzureichend.

Ableitungen für die Hauptversuchsplanung

- Zerkleinerung und Fraktionierung sind als zwei getrennte Prozessschritte zu behandeln.
- Die Beschickung des Trommelvorreinigers erfolgt zunächst manuell mit Zwischenschritten, da geeignete Fördermöglichkeiten fehlen.
- Am Trommelvorreiniger ist eine Modifikation erforderlich: Nutzung des Luft- bzw. Ansaugkanals, Demontage von Anbauteilen und Blockierung des Ansaugstromes.
- Die Anordnung der Siebeinsätze im Trommelvorreiniger folgt dem Prinzip der Getreidereinigung, wobei die im Betrieb vorhandenen Siebeinsätze eingesetzt werden.

5. Hauptversuch 1

Zielstellung

Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorversuche sollte im ersten Hauptversuch ein vollständiges Aufbereitungsverfahren für Luzerneheu umgesetzt werden. Dabei sollten geeignete Siebeinsätze im Trommelvorreiniger getestet werden, um möglichst unterschiedliche Fraktionen zu gewinnen. Ergänzend wurde eine zweite Zerkleinerungsstufe eingeplant, um die technischen Grenzen der Strohmühle auszuloten. Es wurde die Hypothese geprüft, dass Blätter aufgrund ihrer Struktur

überwiegend in den feineren Fraktionen auftreten, während die Stängel in den gröberen Fraktionen verbleiben.

Durchführung

Die Durchführung erfolgte wie im Vorversuch 3 beschrieben, mit der modifizierten Beschickung des Trommelvorreinigers. Um geeignete Fraktionierungen zu erhalten, musste die Anordnung der Siebeinsätze im Trommelvorreiniger festgelegt werden. Für den ersten Hauptversuch wurde die Siebanordnung so gewählt, dass in der ersten Kammer ein Sieb mit $1,75 \times 20$ mm, in der zweiten Kammer ein Sieb mit $2,0 \times 20$ mm eingesetzt war. Die dritte Kammer blieb ohne Siebeinsatz, während in der vierten Kammer lediglich ein Sieb eingesetzt wurde, um die Trommel einwandig arbeiten zu lassen, ohne dass es für die Fraktionierung eine Rolle spielte (vgl. Abb. 5).

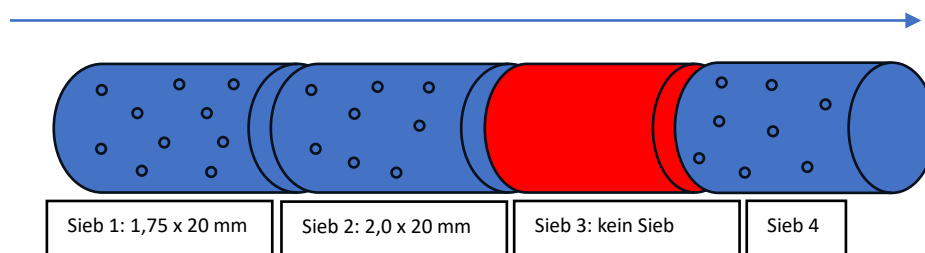


Abbildung 5: Anordnung der Siebeinsätze im Trommelvorreiniger für Hauptversuch 1

Die Beschickung der Siebtrommel erfolgte manuell. Das Luzerneheu wurde am linken Ende des Trommelvorreinigers aufgegeben und durchlief die Siebe in Pfeilrichtung von links nach rechts. Dabei wurde das Material stufenweise klassiert, sodass die feineren Fraktionen bereits in den ersten Kammern abgeschieden wurden, während gröbere Partikel weiter in die nachfolgenden Kammern transportiert wurden.

Der Versuch wurde von zwei Personen durchgeführt. Die Durchführung ist in der Abbildung 6 als Bildfolge dargestellt.



Abbildung 6: Bildfolge der Durchführung der Hauptversuche

Das Luzerneheu wurde mit einem Heukran aus der Heuhalle entnommen und entladen. Anschließend erfolgte die Zerkleinerung mit der Stroh­mühle, wobei das Heu mit einer Mistgabel über den Trichter der Stroh­mühle eingefüllt wurde. Das zerkleinerte Heu wurde über ein Ausblasrohr mit hohem Druck (durch die Rotation der Windflügel unter dem Schneidwerk) direkt in einen Big Bag ausgeblasen. Der Big Bag wurde dann mit einem Gabelstapler zum Trommelvorreiniger gefahren, von wo aus die Beschickung per Hand erfolgte. Die Zerkleinerung und Fraktionierung konnten von zwei Personen parallel durchgeführt werden. Die bei der Fraktionierung entstehenden Fraktionen (siehe Abb. 7) wurden getrennt voneinander in Big Bags bzw. kleinen Containern gesammelt. Im ersten Durchgang entstanden drei Fraktionen:

- eine Feinfraktion (1,75 mm),
- eine Mittelfeinfraktion (2 mm)
- eine Grobfraktion (> 2 mm).

Die Grobfraktion wurde ein weiteres Mal in der Stroh­mühle zerkleinert und erneut fraktioniert. Dabei kam es zu einer starken Staubentwicklung, die durch einen provisorischen Kartondeckel am Ausblasrohr reduziert wurde.



Abbildung 7: Luzerneheu v. l. Rohmaterial, Fraktion aus 2mm Siebeinsatz und Beispiel einer Grobfraktion

Ergebnisse/ Erkenntnisse

Insgesamt konnten fünf Fraktionen gewonnen werden:

- Feinfraktion 1,75mm - 1. Zerkleinerungsdurchgang
- Mittelfraktion 2mm - 1. Zerkleinerungsdurchgang
- Feinfraktion 1,75mm - 2. Zerkleinerungsdurchgang
- Mittelfraktion 2mm - 2. Zerkleinerungsdurchgang
- Grobfraktion >2mm - 2. Zerkleinerungsdurchgang

Diese Fraktionen bildeten die Grundlage für weitere Analysen und für die Weiterverarbeitung zur Herstellung von Prüfplatten und Formkörpern. Zur besseren Übersicht, auch für die weiteren Versuche, wurden folgende Bezeichnungen gewählt, siehe Tabelle 1:

Tabelle 1: Gewonnene Fraktionen aus Hauptversuch 1

Name	Beschreibung	Siebeinsatz [mm]	Zerkleinerungsaggregat	Zerkleinerungsstufe
A	Feinfraktion 1	1,75	Strohmühle	1
B	Mittelfraktion 1	2		1
C	Feinfraktion 2	1,75		2
D	Mittelfraktion 2	2		2
D1	Grobfraktion > 2 mm	-		2

Die Fraktionen unterschieden sich optisch: Fraktion A wies eine deutlich dunklere Grünfärbung mit hohem Blattanteil auf, während Fraktion D1 einen höheren Stängelanteil zeigte. Damit konnte die Hypothese der partiellen Blatt-Stängel-Trennung visuell bestätigt werden.

Darüber hinaus wurden erste Erkenntnisse über den Gesamtprozess gewonnen. Der Umbau des Trommelvorreinigers sowie der Wechsel der Siebeinsätze erwiesen sich als zeitaufwendig und erfordern künftig eine Berücksichtigung bei der Erfassung von Rüstzeiten. Die manuelle Beschickung führte erwartungsgemäß zu einem hohen Arbeitszeitbedarf. Technisch war der Prozess jedoch ohne Spezialwerkzeuge durchführbar.

6. Analytische Auswertung

Die analytische Auswertung wurde nach dem Hauptversuch I für alle gewonnenen Fraktionen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen werden im Folgenden für die wichtigsten Fraktionen zusammengefasst und dargestellt.

6.1 Siebkennlinie

Die Siebversuche wurden im Technikum der TU Dresden in Pirna durchgeführt.

Methodik

Grundlage war die Norm DIN 66165, nach der Partikelgrößen durch eine Siebanalyse bestimmt werden. Hierzu wurden die Fraktionen auf einen Siebturm mit gestaffelten Maschenweiten (1,0 mm bis 0,08 mm) aufgegeben und durch Schwingungen in einzelne Korngrößenklassen getrennt. Die Gewichtsunterschiede in den Sieben dienten zur Berechnung der Summenhäufigkeiten, aus denen eine Siebkennlinie erstellt wurde.

Zur Bestimmung des Feinanteils im Material wird ein Luftstrahlsiebverfahren eingesetzt. Dabei wird das Material auf ein Sieb mit einer Maschenweite von 90 µm aufgegeben. Durch einen Luftstrahl wird das Material in Bewegung versetzt, wodurch alle Partikel, die kleiner als 90 µm sind, abgesaugt werden. Die Quantifizierung des Feinanteils erfolgt durch Bestimmung der Gewichtsunterschiede zwischen dem verbleibenden Material und dem ursprünglichen Gesamtgewicht. Das Ergebnis ist der prozentuale Feinanteil der Fraktionen.

Ergebnisse

Die ermittelten Siebkennlinien und die daraus ersichtlichen Anteile der Partikelgrößen im Luzerneheu gaben einen ersten Eindruck über die Verarbeitbarkeit (siehe Abb. 8). Die Siebkennlinie gibt Aufschluss über die Partikelgrößenverteilung. Fraktion A (Feinfraktion, 1. Zerkleinerungsstufe) zeigte mit rund 65 % den höchsten Anteil an Partikeln kleiner als 1,0 mm. Zusätzlich enthielt sie etwa 30 % Partikel mit einer Größe unter 0,5 mm. Diese hohe Feinanteilsdichte führte zu einem sehr heterogenen Schüttgut, bestehend aus feinen Blattpartikeln und kleineren Stängelbruchstücken. Solch eine Zusammensetzung erhöht zwar die Oberfläche, was grundsätzlich günstig für die Bindung der Partikel wäre, gleichzeitig führt die Heterogenität zu einer Entmischung beim Schütten und zu ungleichmäßigen Haftungen im Pressprozess.

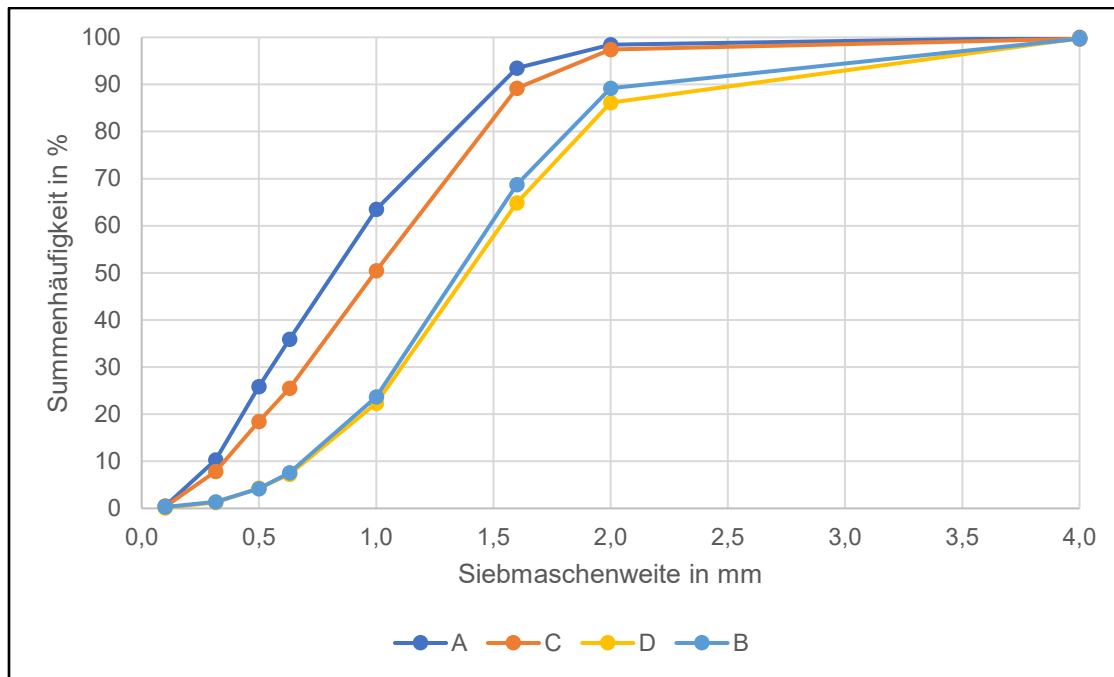


Abbildung 8: Siebkennlinie der Fraktionen A, B, C, D

Im Gegensatz dazu zeigten die Fraktionen B und D nahezu identische Siebkurven, die im Vergleich zu Fraktion A deutlich nach rechts verschoben waren. Beide Fraktionen wiesen nur etwa 25 % Partikel kleiner als 1,0 mm auf und setzten sich damit wesentlich gröber zusammen. Besonders in der Fraktion B lagen rund 70 % der Partikel in der Korngrößenklasse zwischen 1,0 und 2,0 mm. Diese homogene Zusammensetzung wirkte sich positiv auf die Verarbeitbarkeit aus, da die Partikel besser aneinander hafteten und weniger zur Entmischung neigten. Fraktion D zeigte einen ähnlichen Verlauf, enthielt jedoch aufgrund der zweiten Zerkleinerungsstufe tendenziell mehr Stängelbruchstücke, was die Homogenität im Vergleich zu Fraktion B leicht verringerte.

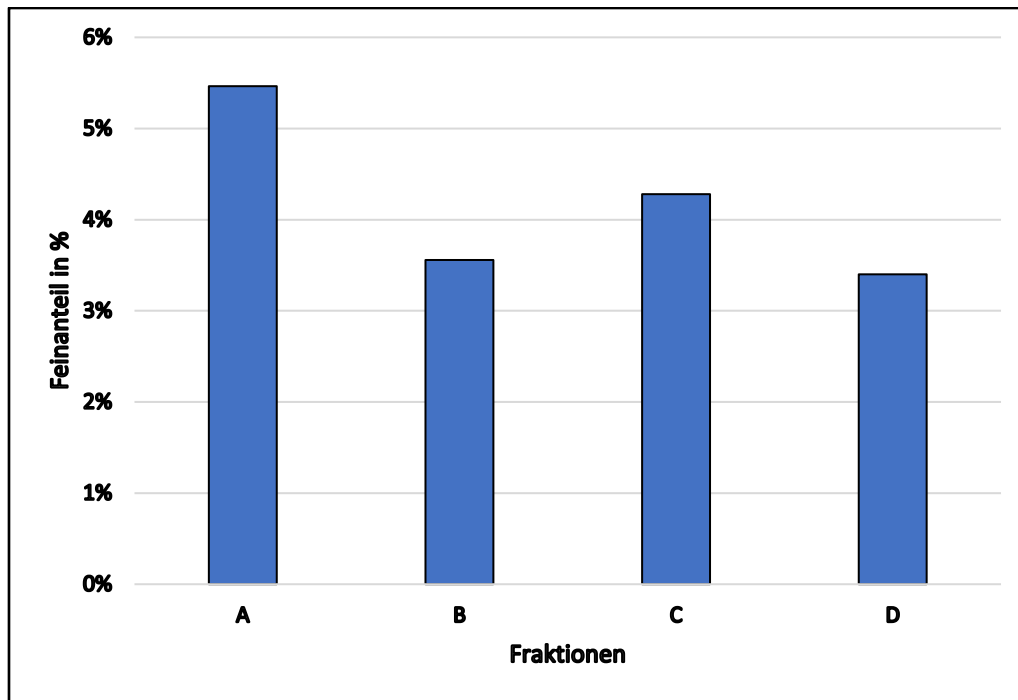


Abbildung 9: Feinanteile (< 90 µm) der Fraktionen A, B, C, und D in %

Auch der Feinanteil (< 90 µm) der dargestellten Fraktionen unterscheidet sich untereinander (siehe Abb. 9). Hierfür sind zwei entscheidende Faktoren zu nennen. Der Siebdurchmesser und die Zerkleinerungsstufe. Aus der ersten Zerkleinerungsstufe weist A (5,5 %) einen höheren Feinanteil und insgesamt auch den höchsten Anteil auf als B (3,6 %), dies lässt sich durch den höheren Blattanteil in Fraktion A erklären, diese sind sehr spröde und brechen schneller als Stängel. In der zweiten Zerkleinerungsstufe hat C (4,3 %) den höheren Feinanteil als D (3,4 %), was wiederum durch die Siebmaschenweite und den entsprechenden Blattanteil zu erklären ist.

6.2 Elementaranalyse

Bei der Elementaranalyse wurden insgesamt acht Proben untersucht: sechs Fraktionen aus dem Hauptversuch 1 sowie zwei Referenzproben (Blätter und Stängel). Ziel war es, den Stickstoffgehalt (N-Gehalt) als Maß für den Proteingehalt zu bestimmen und Rückschlüsse auf die stoffliche Zusammensetzung der Fraktionen zu ziehen.

Methodik

Alle Proben wurden zunächst in einem Trockenschrank bei 55 °C bis zur Gewichtskonstanz (ca. 98 % TS) getrocknet. Anschließend erfolgte eine Zerkleinerung auf < 0,2 mm, um eine homogene Probenaufbereitung zu gewährleisten. Die vorbereiteten Proben wurden in Zinnkapseln eingewogen (2,8–3,2 mg je Probe) und im Elementaranalysator verbrannt. Der Nachweis von Kohlenstoff und Stickstoff erfolgte chromatographisch. Pro Probe wurden sechs Kapseln analysiert, um Mittelwerte bilden und die Streuung minimieren zu können.

Die Elementaranalyse dient der elementaren Beschreibung einer organischen Probe. Dabei werden C und N analysiert. Die Probe wird zunächst bei ca. 990 °C unter Sauerstoffüberschuss verbrannt, anschließend erfolgt die Abscheidung des Sauerstoffs im Kupferreaktor. Dann wird die Gasphase (Trägergas: Helium) über einen Wasserfilter getrocknet. Schließlich werden C und N im Gasgemisch zeitlich versetzt mit einem Gaschromatograph nachgewiesen.

Ergebnisse

Die Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Elementaranalyse für den prozentualen N-Gehalt der Luzerneproben. Durch den N-Gehalt können Rückschlüsse auf den Proteingehalt gemacht werden. Für jede Probe sind drei Ergebnisse mit jeweils den Mittelwerten aus zwei Zinnkapseln angegeben. In Spalte 3 sind die drei Mittelwerte wieder zu einem Mittelwert zusammengefasst.

Tabelle 2: Ergebnisse der Elementaranalyse für N in %

Probe	Mittelwerte N % aus Analyse	Mittelwert N %
Rohmaterial 1. ZK (RG)	3,016	3,006
	2,998	
	3,004	
Feinfraktion 1 (A)	3,356	3,314
	3,273	
	3,314	
Mittelfraktion 1 (B)	2,628	2,601
	2,594	
	2,582	
Feinfraktion 2 ©	2,269	2,250
	2,271	
	2,211	
Mittelfraktion 2 (D)	1,758	1,795
	1,808	
	1,819	
Grobfraktion > 2mm 2. ZK (D1)	1,891	1,953
	2,013	
	1,955	
Referenzprobe Stängel (RS)	2,048	2,093
	2,045	
	2,186	
Referenzprobe Blätter (RB)	5,172	5,239
	5,302	
	5,242	

Mit den Ergebnissen der acht Proben wurde eine Varianzanalyse (siehe Abb. 10) durchgeführt, um die Unterschiede zwischen den Proben zu untersuchen. Es wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ gewählt.

ZUSAMMENFASSUNG

<i>Gruppen</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Summe</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Varianz</i>
RG	3	9,017	3,006	0,00008
A	3	9,943	3,314	0,00174
B	3	7,803	2,601	0,00058
C	3	6,750	2,250	0,00117
D	3	5,385	1,795	0,00105
D1	3	5,859	1,953	0,00369
RS	3	6,279	2,093	0,00651
RB	3	15,716	5,239	0,00423

ANOVA

<i>Streuungsursache</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>P-Wert</i>	<i>kritischer F-Wert</i>
Unterschiede zwischen den Gruppen	26,46	7	3,78	1585,80	1,6E-21	2,66

Abbildung 10: Ergebnisse der Varianzanalyse, ANOVA mit $\alpha = 0,05$

Die Analyse zeigte deutliche Unterschiede zwischen den Fraktionen und den Referenzproben:

- Die Referenzprobe Blätter (RB) wies mit über 5,2 % den höchsten N-Gehalt auf und bestätigte damit den erwarteten hohen Proteingehalt.
- Die Referenzprobe Stängel (RS) lag mit knapp 2,1 % deutlich darunter.
- Fraktion A (1,75 mm, 1. Zerkleinerungsstufe) erreichte mit 3,31 % den höchsten N-Gehalt aller Fraktionen und lag damit nahe am Mittelwert zwischen Blatt- und Stängelpollen.
- Fraktion B (2,0 mm, 1. Zerkleinerungsstufe) zeigte mit 2,60 % einen rund 0,7 Prozentpunkte niedrigeren Wert und war damit deutlich stickstoffärmer.
- Mit zunehmender Fraktionierung sank der N-Gehalt weiter ab: Fraktion C lag bei 2,25 %, Fraktion D bei 1,80 % und Fraktion D1 (Grobfraktion) bei 1,95 %.

Die statistische Auswertung (ANOVA, $\alpha = 0,05$) ergab signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Der p-Wert lag deutlich unterhalb des Signifikanzniveaus, wodurch die Unterschiede als

belastbar bewertet werden konnten. Gleichzeitig war die Varianz innerhalb der Proben gering, sodass die Messergebnisse eine hohe Genauigkeit aufwiesen.

Zudem fällt jedoch auf, dass der N-Gehalt der Probe RS höher ist als der der Proben D und D1. Die Entnahme der Referenzproben erfolgte einige Tage später direkt aus der Heuhalle. Es wurde zwar versucht die Proben aus der gleichen Heucharge zu entnehmen, aber hier muss ein Fehler unterlaufen sein oder es besteht eine große Heterogenität der N-Gehalte auch innerhalb einer Charge.

Die Ergebnisse bestätigten die Hypothese, dass die Fraktionen stofflich unterschiedlich zusammengesetzt sind. Die feineren Fraktionen (A und C) waren blattreicher und damit proteinreicher, während die gröberen Fraktionen (B, D, D1) stärker stängelbetont waren und einen niedrigeren N-Gehalt aufwiesen. Für die weitere Verwertung ergaben sich folgende Konsequenzen:

- Fraktion A ist durch den hohen N-Gehalt und den hohen Blattanteil als proteinreiche Futtermittelkomponente geeignet.
- Fraktion B weist einen mittleren N-Gehalt auf und eignet sich aufgrund ihrer Homogenität und guten Haftungseigenschaften besonders für die Formkörperherstellung.
- Die stickstoffärmeren Fraktionen (D und D1) sind aus ökonomischer Sicht für die Formkörperherstellung von Vorteil, da ihr Nährstoffentzug aus dem Betrieb geringer ist.

Damit wurde durch die Elementaranalyse die stoffliche Trennung von Blättern und Stängeln klar belegt und die Eignung der Fraktionen für unterschiedliche Verwertungswege abgesichert.

7. Testprüfplatten und Werkstoffscreening

Im Anschluss an die analytischen Untersuchungen wurde durch den Forschungspartner ein Materialscreening durchgeführt. Ziel war es, die gewonnenen Fraktionen hinsichtlich ihrer Eignung für die Herstellung von Formkörpern zu prüfen. Dazu wurden aus den Fraktionen A, B und D Testprüfplatten im Trockenpressverfahren hergestellt (siehe Abb. 11) und anschließend mechanisch und optisch bewertet.

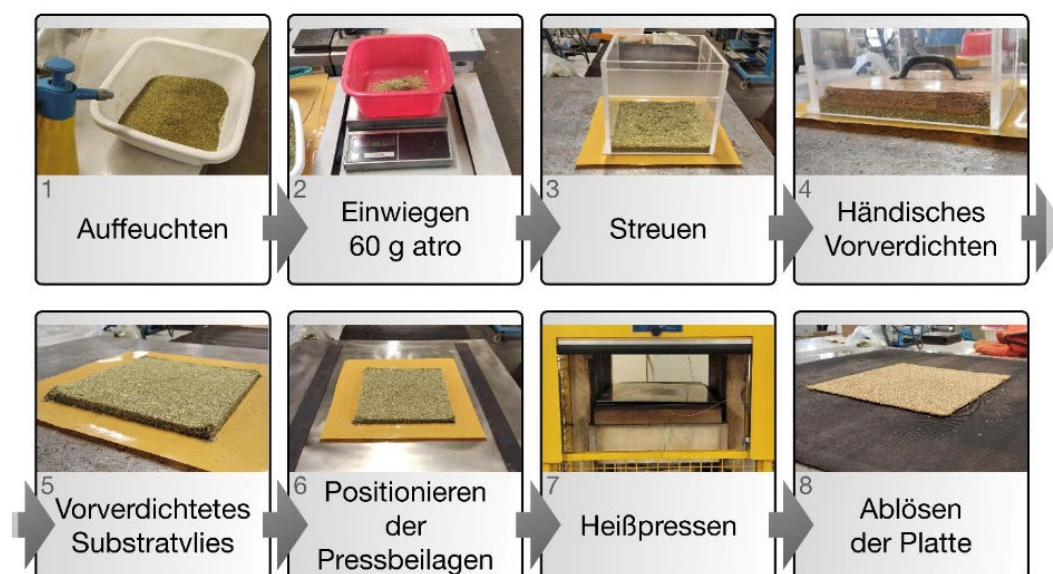


Abbildung 11: Prozess der Testprüfplattenherstellung (HFT – TU Dresden)

Methodik und Kennwertauswahl

Als zentraler Kennwert wurde die breitenbezogene Biegesteifigkeit herangezogen. Dieser Parameter gilt im Rahmen der Untersuchungen an Luzerneheu-Formkörpern als praxisnächster und methodisch verlässlichster Kennwert zur Beurteilung der Eignung der Proben. Die Ergebnisse wurden in Form von Box-Plot-Diagrammen dargestellt und mit einer Vergleichsvariante aus Faserguss verglichen (siehe Abb. 12). Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Feuchtegehalte untersucht.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Prüfkörper aus Luzerneheu eine Biegesteifigkeit von 225,9 bis 291,8 Nmm erreichten. Damit lagen alle Fraktionen oberhalb des Referenzmittelwerts der Fasergussproben (60 Nmm). Im Vergleich zu Faserguss erwiesen sich die Testplatten jedoch als deutlich steifer, was auf die fehlende Elastizität des Trockenpressverfahrens zurückzuführen ist.

- Fraktion A und B: Bei beiden Fraktionen war der Einfluss der Feuchte auf die Biegesteifigkeit relativ gering. Die Werte lagen eng beieinander, was auf eine stabile Materialeigenschaft hinwies.
- Fraktion D: Hier zeigte sich ein deutlich größerer Einfluss der Feuchte. Zwischen 30 % und 35 % Feuchtegehalt traten spürbare Unterschiede in der Biegesteifigkeit auf, was auf eine höhere Variabilität dieser Fraktion hindeutet.

Insgesamt wurde festgestellt, dass Fraktionen mit höherer Biegesteifigkeit der elastischen Verformung mehr Widerstand entgegensetzten und damit als steifer einzustufen waren.

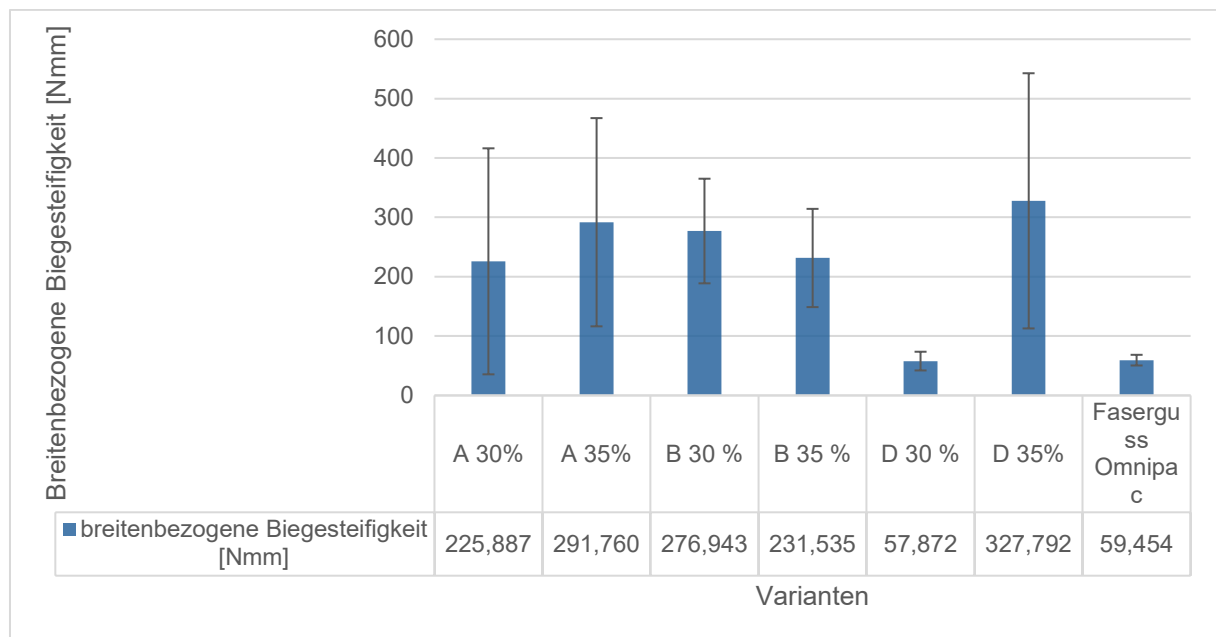


Abbildung 12: Breitenbezogene Biegesteifigkeit ausgewählter Fraktionen aus Werkstoffscreening

Die Analyse zeigte, dass alle getesteten Fraktionen prinzipiell für die Herstellung von Formkörpern geeignet waren. Allerdings unterschieden sie sich in der Homogenität:

- Fraktion A wies eine hohe Standardabweichung auf, was auf eine stärkere Streuung der Messergebnisse hindeutete. Dies erschwert eine verlässliche Prozessführung, da die optimalen Parameter schwerer reproduzierbar sind.

- Fraktion B schnitt mit den homogensten Werten ab und zeigte die besten mechanischen Eigenschaften. Damit erwies sich diese Fraktion als besonders geeignet für die Formkörperproduktion.
- Fraktion D erreichte ebenfalls verwertbare Ergebnisse, zeigte aber die größte Abhängigkeit von der Materialfeuchte und damit eine erhöhte Variabilität.

Neben den mechanischen Kennwerten wurde eine optische Prüfung der Testplatten (siehe Abb. 13) vorgenommen. Dabei spielte die Gleichmäßigkeit der Oberfläche, die Farbgebung und das visuelle Erscheinungsbild eine Rolle. In dieser Bewertung wurde Fraktion B als optisch ansprechendste Variante eingestuft.



Abbildung 13: Testprüfplatte Vorzugsvariante aus Fraktion B

Auf Basis der mechanischen und optischen Ergebnisse wurde Fraktion B als Vorzugsvariante ausgewählt. Diese Fraktion vereinte eine hohe Homogenität, stabile mechanische Eigenschaften und ein optisch ansprechendes Erscheinungsbild.

7.1 Erkenntnisse für den nachfolgenden Hauptversuch 2

Die Herstellung von Testprüfplatten validierte das entwickelte Aufbereitungsverfahren. Es konnte gezeigt werden, dass alle gewonnenen Fraktionen prinzipiell für die Weiterverarbeitung geeignet sind. Da jedoch Fraktion B sowohl mechanisch als auch optisch die besten Ergebnisse lieferte, wurde sie als Standardfraktion für die Herstellung von Formkörpern festgelegt. Zudem konnte durch die Wahl von Fraktion B auf eine zweite Zerkleinerungsstufe verzichtet werden, was den Gesamtprozess vereinfachte und die Arbeitszeit reduzierte.

8. Hauptversuch 2

Zielstellung/Problemstellung

Der zweite Hauptversuch diente dazu, die Ergebnisse aus Hauptversuch 1 und den anschließenden Prüfungen zu validieren und den Aufbereitungsprozess zu optimieren. Da Fraktion B als Vorzugsvariante ausgewählt worden war, sollte im zweiten Versuch auf eine zweite Zerkleinerungsstufe verzichtet werden. Ziel war es, direkt zwei verwertbare Fraktionen zu erzeugen:

- Fraktion A als proteinreiche Fraktion zur Futtermittelverwertung (Pelletierung),
- Fraktion B als stängelreichere Fraktion zur Herstellung von Formkörpern.

Zusätzlich sollten in diesem Versuch die Reproduzierbarkeit des Prozesses, die Massenbilanzen (Input–Output) sowie die Arbeitszeiten erfasst werden. Diese Daten waren notwendig, um eine fundierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vornehmen zu können.

Durchführung

Die Siebkonfiguration im Trommelvorreiniger wurde im Vergleich zu Hauptversuch 1 angepasst.

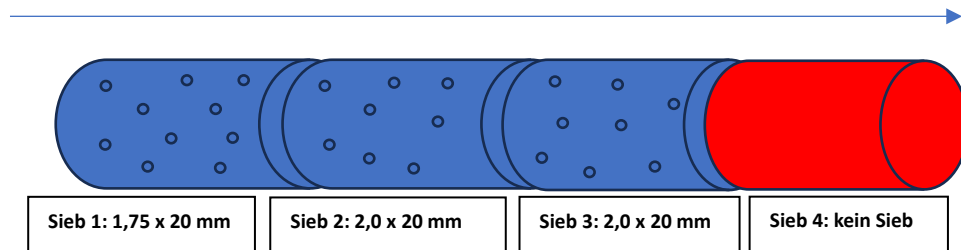


Abbildung 14: Anordnung der Siebeinsätze im Trommelvorreiniger für Hauptversuch 2

In der ersten Kammer wurde ein Sieb mit $1,75 \times 20$ mm eingebaut, in der zweiten und dritten Kammer jeweils Siebe mit $2,0 \times 20$ mm. Die vierte Kammer blieb ohne Siebeinsatz (siehe Abb. 14). Diese Anordnung ermöglichte eine klare Trennung in zwei Hauptfraktionen: A und B.

Der Ablauf der Aufbereitung entsprach im Wesentlichen dem von Hauptversuch 1, jedoch ohne die zweite Zerkleinerungsstufe. Das Luzerneheu wurde erneut mit der Strohühle zerkleinert, über Big Bags transportiert und manuell in den Trommelvorreiniger beschickt.

Während des Prozesses erfolgte eine Massenbestimmung: Die Rohfraktion wurde vor der Fraktionierung mit einer Hängewaage gewogen, anschließend wurden die Fraktionen A und B separat erfasst. Zusätzlich wurde die benötigte Arbeitszeit für die Zerkleinerung und Fraktionierung dokumentiert.

Ergebnisse/ Erkenntnisse

Im zweiten Hauptversuch konnten zwei klar getrennte Fraktionen erzeugt werden:

- Fraktion A (proteinreich, hoher Blattanteil, Sieb 1, 1,75 mm),
- Fraktion B (stängelreicher, homogener, Siebe 2 und 3, 2,0 mm).

Die Massenbilanz (siehe Tab. 3) ergab ein Gesamtinput von 147 kg Rohmaterial. Davon entfielen 90 kg (61 %) auf Fraktion A und 50,5 kg (34 %) auf Fraktion B. Weitere 6,5 kg (5 %) wurden als Verluste bzw. Grobfraction am Ende des Trommelvorreinigers erfasst. Damit konnte der größte Anteil des Materials (fast zwei Drittel) als proteinreiche Fraktion A gewonnen werden, während ein gutes Drittel in Form der stängelreicheren Fraktion B zur Verfügung stand. Die Verluste waren vergleichsweise gering, was auf die gute Anpassung des Trommelvorreinigers zurückzuführen ist.

Die Bearbeitung der 147 kg Luzerneheu dauerte insgesamt 167 Minuten. Dies entspricht einem Durchsatz von etwa 53 kg pro Stunde oder, umgerechnet, 100 kg in knapp zwei Stunden. Rüstzeiten wurden in dieser Erfassung noch nicht berücksichtigt. Damit ergab sich ein klarer Referenzwert für die spätere Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Im Vergleich zu Hauptversuch 1 wurde der Arbeitszeitbedarf reduziert, da die zweite Zerkleinerungsstufe entfiel. Der Prozess erwies sich dadurch als effizienter und gleichzeitig leichter reproduzierbar.

Tabelle 3: Ergebnis der Massenbestimmung der gewonnenen Fraktionen A und B aus Hauptversuch 2

Fraktion	Masse in kg	Prozentualer Anteil
Rohfraktion	147	100 %
A	90	61 %
B	50,5	34 %
Verluste	6,5	5 %

- Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem angepassten Verfahren eine stabile und planbare Fraktionierung erreicht werden konnte.
- Die hohe Ausbeute an Fraktion A (über 60 %) ermöglicht deren Nutzung als proteinreiches Futtermittel in Form von Pellets.
- Fraktion B, die für die Formkörperherstellung vorgesehen ist, machte etwa ein Drittel des Materials aus – ein Anteil, der für die spätere Produktion relevant und wirtschaftlich interessant ist.
- Die Verluste von lediglich 5 % verdeutlichen, dass das Verfahren effizient arbeitet und nur wenig Material außerhalb der beiden Hauptfraktionen anfällt.
- Der dokumentierte Durchsatz schafft eine belastbare Basis für die Hochrechnung auf größere Produktionsmengen und für die Einbindung des Prozesses in ein technisches Gesamtkonzept.

Damit konnte mit Hauptversuch 2 nicht nur die technische Machbarkeit, sondern auch die Prozesseffizienz und die Verwertbarkeit der Fraktionen bestätigt werden.

9. Gesamtauswertung Arbeitspaket 2 – Mahlung und Fraktionierung

Im Arbeitspaket 2 wurde ein praxisnahes Aufbereitungsverfahren für Luzerneheu entwickelt, das die Grundlage für die weitere Verarbeitung zu Formkörpern und Futtermitteln bildet. Der Arbeitsplan umfasste eine anfängliche Recherche, Vorversuche mit vorhandener und angepasster Technik sowie zwei Hauptversuche mit anschließenden Analysen und Werkstoffprüfungen.

1. Recherche und Maschinenauswahl

Die Analyse gängiger Mahltechniken führte zur Auswahl einer Strohühle als investitionsarme und landwirtschaftlich etablierte Technik. Die Maschine erwies sich in der Hofprobe als geeignet, Luzerneheu gleichmäßig zu zerkleinern und gleichzeitig eine erste Blatt-Stängel-Trennung zu ermöglichen.

2. Vorversuche

Die Vorversuche zeigten, dass die Zerkleinerung mit der Strohühle technisch möglich war und der Trommelvorreiniger grundsätzlich zur Fraktionierung eingesetzt werden konnte. Gleichzeitig wurde deutlich, dass eine automatische Beschickung über Förderschnecke und Elevator nicht praktikabel war. Provisorische Lösungen, wie die Beschickung über ein Drainagerohr, bestätigten zwar die grundsätzliche Umsetzbarkeit, waren aber nicht dauerhaft betriebssicher. Damit ergab sich die Notwendigkeit, Zerkleinerung und Fraktionierung als zwei getrennte Prozessschritte zu betrachten und die Beschickung manuell vorzunehmen.

3. Hauptversuch 1

Durch die Kombination von Stroh­mühle und modifiziertem Trommelvorreiniger konnten fünf Fraktionen erzeugt werden. Analysen zeigten deutliche Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung und im Stickstoffgehalt, wodurch die Hypothese einer partiellen Trennung von Blättern und Stängeln bestätigt wurde. Die Herstellung von Testprüfplatten belegte, dass alle Fraktionen prinzipiell für die Formkörperherstellung geeignet waren. Fraktion B erwies sich aufgrund ihrer Homogenität und mechanischen Eigenschaften jedoch als am besten geeignet und wurde als Vorzugsvariante ausgewählt.

4. Hauptversuch 2

Im zweiten Hauptversuch wurde der Prozess vereinfacht, indem auf die zweite Zerkleinerungsstufe verzichtet wurde. Es entstanden zwei verwertbare Hauptfraktionen: Fraktion A als proteinreiche Komponente für Pellets und Fraktion B als stängelreiche Variante für die Formkörperherstellung. Die Massenbilanz zeigte eine Aufteilung von rund 60 % Fraktion A und 34 % Fraktion B bei geringen Verlusten (5 %). Zudem wurden erstmals Arbeitszeiten und Durchsatz erfasst, sodass eine belastbare Grundlage für die spätere Wirtschaftlichkeitsanalyse geschaffen wurde.

5. Erkenntnisse und Bedeutung

- Die Stroh­mühle erwies sich als geeignete, kostengünstige Lösung für die Zerkleinerung von Luzerneheu.
- Die Fraktionierung mit dem Trommelvorreiniger ist technisch möglich, erfordert jedoch eine manuelle Beschickung oder weiterentwickelte Fördertechnik.
- Die Analysen bestätigten eine stoffliche Differenzierung der Fraktionen: blattreiche, proteinreiche Fraktionen und stängelreiche, mechanisch geeignete Fraktionen.
- Die Herstellung von Testprüfplatten belegte die prinzipielle Eignung aller Fraktionen, mit Fraktion B als klarer Vorzugsvariante.
- Mit Hauptversuch 2 wurde ein praxistauglicher Prozess etabliert, der eine vollständige Doppelnutzung des Luzerneheus ermöglicht (Pellets und Formkörper).

Fazit

Arbeitspaket 2 hat gezeigt, dass sich mit einfachen landwirtschaftlichen Maschinen ein tragfähiges Verfahren zur Zerkleinerung und Fraktionierung von Luzerneheu entwickeln lässt. Die erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für die anschließende Prozessoptimierung, die wirtschaftliche Bewertung sowie die Einbindung in ein Gesamtkonzept zur Herstellung von Luzerneheu-basierten Verpackungsschalen.