

Schlussbericht vom 18.01.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 20877 N

Thema

Untersuchungen zur Optimierung der Zerkleinerung bei der Herstellung pelletierten Mischfutters

Berichtszeitraum

01.03.2020 - 31.05.2022

Forschungsvereinigung

Internationale Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik (IFF) e. V.

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsinstitut Futtermitteltechnik der IFF

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Thema	1
Berichtszeitraum	1
Forschungsvereinigung.....	1
Forschungseinrichtung(en).....	1
1. Einführung.....	4
2. Problemanalyse	8
3. Forschungsziel	12
4. Experimentelle Untersuchungen	13
4.1 Methodik und Planung der Versuche	13
4.2 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführung	14
4.2.1 Walzenmühle	14
4.2.2 Hammermühle	15
4.2.3 Labor-Flachmatrizenpresse.....	15
4.2.4 Technikums-Pressenanlage mit Ringmatrizenpresse.....	16
4.2.5 Technikums-Pressenanlage mit Flachmatrizenpresse	16
4.3 Bestimmung der Produkteigenschaften.....	17
5. Ergebnisse und Diskussion.....	28
5.1 Charakterisierung der Rohwaren	28
5.2 Zerkleinerung der Einzelfuttermittel	28
5.3 Systematische Untersuchungen zur Nachzerkleinerung von Weizen- und Gerste- Zerkleinerungsprodukten beim Pelletieren	38
5.4 Nachzerkleinerung von Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukten beim Pelletieren mit Flach- und Ringmatrizenpressen	77
5.4.3 Nachzerkleinerung beim Pelletieren mit einer Ringmatrizenpresse (technischer Maßstab)	80
5.4.4 Nachzerkleinerung beim Pelletieren mit einer Flachmatrizenpresse (technischer Maßstab)	83
5.4.5 Vergleich des Nachzerkleinerungseffekts beim Pelletieren mit unterschiedlichen Pelletpressen.....	86
5.5 Untersuchungen zur Nachzerkleinerung von Mischfuttermitteln beim Pelletieren in industriellen Anlagen	99
6. Zusammenfassung.....	105
7. Nachweis der Verwendung der Zuwendung	109
7.1 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten.....	109
7.2 Verwendung der zugewendeten Mittel	110
7.3 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	110

Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes	112
Abkürzungsverzeichnis.....	113
Literaturverzeichnis.....	113

1. Einführung

Gewerblich hergestellte Mischfutter decken in Deutschland etwa ein Drittel des Futterbedarfs der Nutztiere und stellten im Wirtschaftsjahr 2020/21 – bei leicht sinkender Tendenz – mit ca. 24 Mio. t einen wichtigen Wirtschaftsfaktor dar [BLE 2022]. Den bei weitem überwiegenden Anteil am Mischfutter machen Alleinfuttermittel aus, die dergestalt aus vorwiegend agrarischen Produkten (Getreide, Ölsaaten) sowie Mineral- und Zusatzstoffen (u. a. Aminosäuren, Vitamine, Spurenelemente, Enzyme) zusammengesetzt sind, dass sie den hochspezifischen Energie- und Nährstoffbedarf der jeweiligen Nutztiere exakt decken und somit hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Auswirkungen auf die Umwelt hochgradig optimiert sind. Daneben gibt es unterschiedliche Konzentrate, die weiterverarbeitet oder in landwirtschaftlichen Betrieben als Ergänzungsfuttermittel gemeinsam mit hofeigenen agrarischen Produkten (Getreide, Heu, Silage) verfüttert werden.

Während die stoffliche Zusammensetzung, die homogene Verteilung sämtlicher Komponenten sowie die hygienische Unbedenklichkeit schon immer als grundsätzliche Qualitätskriterien von Mischfuttermitteln galten, sind die durch die Verarbeitung der Rohwaren im Mischfutterwerk maßgeblich beeinflussten physikalischen Stoffeigenschaften – und hier vorrangig die Partikelgrößenverteilung – inzwischen zusätzlich in den Fokus gerückt.

Die Herstellung von Alleinfuttermitteln für Nutztiere umfasst typischerweise eine Prozesskette, die sich anhand des vereinfachten Anlagendiagramms eines Mischfutterwerks (s. **Abbildung 1**) verfolgen lässt. In Silozellen bereitgehaltene Rohwaren werden rezepturgerecht dosiert und anschließend zerkleinert. Dem Zerkleinerungsprodukt werden Zusatzstoffe zugefügt. Das Futter wird in einem Chargenmischprozess vergleichmäßig, bevor ihm optional Flüssigkomponenten zugefügt werden. Während etwa 20 % der Alleinfuttermittel als mehlartige Produkte gehandelt werden, wird der bei weitem überwiegende Anteil nach dem Mischen und der Flüssigkeitszugabe konventionell pelletiert [DVT 2022]. In einem aus drei Teilschritten – Konditionieren mit Dampf bzw. Wasser, Pelletieren, Kühlen – bestehenden Prozess wird das Mischfutter zu Pellets, d. h. zu stabilen Pressagglomeraten verarbeitet. Neben der Mischungsstabilität bestehen die Vorteile von Pelletfutter gegenüber Mehlfutter in seiner freien Fließfähigkeit, dem günstigeren Hygienestatus, der schnelleren Futteraufnahme und der besseren Verdaulichkeit sowie der weitgehenden Staubfreiheit, mit der eine Reduzierung der Verluste bei Transportprozessen verbunden ist.

Die Partikelgrößenverteilung, die vorrangig durch die Vermahlung der dosierten Rohwaren bestimmt wird, ist sowohl aus technologischen Gründen als auch hinsichtlich der Leistung und der Gesundheit der Nutztiere von wesentlicher Bedeutung. Lange wurde eine besonders feine Partikelgrößenverteilung als grundsätzlich vorteilhaft angesehen, weil die mit den geringen Partikelgrößen verbundenen größeren spezifischen Oberflächen den enzymkatalysierten Stoffwechsel sowie die Agglomerationsfähigkeit des Futters im Pelletierprozess, wie auch die Mischungsstabilität und die Flüssigkeitsaufnahme im Verlauf des Herstellungsprozesses begünstigen. Somit erfüllte die branchenübliche Gemischtvermahlung der dosierten Komponenten mit der Hammermühle, deren durch Prallbeanspruchung erzeugte Zerkleinerungsprodukte durch einen hohen Feingutanteil gekennzeichnet sind, die ernährungsphysiologischen und technologischen Ansprüche an die im Anschluss an die Zerkleinerung und den Mischprozess zu pelletierenden Mischfutter.

In den beiden zurückliegenden Jahrzehnten wurden in komplexen Forschungsarbeiten zur Tierernährung und zur Veterinärmedizin Erkenntnisse zu ursprünglich nicht erwarteten negativen Effekten auf die Gesundheit und Leistung von Nutztieren gewonnen, die aus der Fütterung mit besonders fein vermahlenen Futtermitteln resultieren. So wurden hohe Anteile besonders feiner Partikel im Futter als Ursache für Magenschleimhautentzündungen beim Mastschwein erkannt [Keller Nielsen 2000, Vucmirović 2017]. Beim Mastgeflügel wurden Zusammenhänge zwischen geringen Futterpartikelgrößen und einem höheren Feuchtigkeitsgehalt sowie einer Verkrustung der Einstreu ermittelt. Die durch die sehr kleinteilige Partikelgrößenverteilung des Futters und die damit verbundenen feuchteren Ausscheidungen bewirkten ungünstigen Bedingungen auf dem Stallboden und führen wiederum zu einem signifikant höheren Anteil an Tieren, die unter Fußballen- und Fersenläsionen leiden [Albiker et al. 2014, Kamphues et al. 2011]. Ein weiterer, für Mastgeflügel nachteiliger Effekt besonders feinen Futters wurde im Zusammenhang mit dem Leistungsvermögen des Muskelmagens erkannt. Die Fütterung mit feinen Futterpartikeln, für die aufgrund der größeren spezifischen Oberfläche eine prinzipiell günstige Verdaulichkeit zu erwarten ist, bewirkt beim Geflügel eine geringere Ausbildung des Muskelmagens, dessen Größe wiederum maßgeblich für die Zerkleinerung der durch das Tier aufgenommenen Futterpartikel ist [Amerah et al. 2007, Witte 2012].

Die dargelegten Erkenntnisse führten zu zahlreichen, vorwiegend aus der tierärztlichen Forschung hervorgehenden Empfehlungen hinsichtlich für die Schweine- und Geflügelmast

geeigneter Partikelgrößenverteilungen und zu intensiven Bemühungen der Futtermittelhersteller, zumindest die durch erhebliche Feinanteile gekennzeichneten, offensichtlich ungeeigneten Partikelgrößenverteilungen von Mastfuttern zu vermeiden [Kleine Klausing et al. 2011, Wolf et al. 2007]. Die entsprechenden Maßnahmen umfassten Änderungen sowohl bei der Auswahl von Maschinen- und Betriebsparametern für die branchenüblich verwendete Hammermühle als auch bei der maschinellen Ausrüstung. Bei letzterer wurde die Hammermühle zumeist mit einem Brechwalzenstuhl ergänzt. Dabei wurden die beiden mit einer flexiblen Beschickung versehenen Mühlen parallel- oder – mit einer Zwischenabsiebung – hintereinandergeschaltet, um die Zerkleinerungsprozesse mit dem Ziel einer reduzierten Feingutbildung zu kombinieren [Borgelt 2015, Lucht 2010].

Bei den mit erheblichem Aufwand verbundenen Maßnahmen zur Herstellung von Futtermitteln mit einer im Hinblick auf die jeweilige Nutztierspezies optimierten Partikelgrößenverteilung ist zu berücksichtigen, dass sich der zielgerichteten Vermahlung mit der Pressagglomeration zumeist ein Prozessschritt anschließt, bei dem die Futterpartikel in der Pelletpresse zwischen den Kollern und der Matrice einer weiteren erheblichen mechanischen Beanspruchung unterzogen werden. Die dadurch bewirkte Nachzerkleinerung der Futterpartikel wurde zwar in wissenschaftlichen Publikationen berücksichtigt, fand aber in der Futtermittelindustrie weniger Beachtung [Grosse Liesner 2009, Nir et al. 1995]. Der Grund dafür liegt absehbar darin, dass bislang nur wenige systematische Untersuchungen zur Nachzerkleinerung in der Pelletpresse vorgenommen wurden und somit auch kaum entsprechende Daten für Futtermittelhersteller bereitstehen, die ihnen eine Abschätzung des Effekts ermöglichen. Von noch größerer Bedeutung für die geringe Wahrnehmung der Nachzerkleinerung in der Futtermittelbranche ist vermutlich die Analyse der Partikelgrößenverteilung. Um die zu Pellets pressagglomerierten Primärpartikel untersuchen zu können, müssen die Pellets aufgelöst und die Partikel einer Nasssiebung unterzogen werden. Im Gegensatz zur Ermittlung des Zerkleinerungserfolgs bei der Vermahlung von Futtermitteln, die als Bestandteil der produktionsnahen Qualitätskontrolle zeitnah per Hand- oder Maschinensiebung vom Betriebspersonal – in Einzelfällen auch mittels optischer Inline-Systeme – durchgeführt werden kann, ist die Nasssiebung mit erheblichem Zeit- und Personalaufwand verbunden. Darüber hinaus sind die Resultate der Nasssiebung nicht ohne Weiteres mit denen einer Trockensiebung kompatibel, auch wenn die beiden Analysen mittels mechanischer Siebung durchgeführt worden sind.

Zusammenfassend beschrieben, stellt sich die Situation im Hinblick auf die Nachzerkleinerung von Partikeln beim Pelletieren also folgendermaßen dar:

- Auf der Grundlage von Erkenntnissen zur Gesundheit und Leistung von Nutztieren gibt es konkrete Anforderungen an die Partikelgrößenverteilung von Alleinfuttermitteln, insbesondere hinsichtlich der Begrenzung des Feinanteils.
- Die Futtermittelhersteller haben vielfach durch die Modifikation der Rohwarevermahlung auf die genannten Anforderungen reagiert.
- Dabei wurde die Nachzerkleinerung der Futterpartikel bei der Pressagglomeration, mit der der überwiegende Anteil an Alleinfuttermitteln zu Pellets verarbeitet wird, zumeist nicht berücksichtigt.
- Daher gibt es ein fundamentales Interesse der Futtermittelhersteller an systematischen Untersuchungen zur Nachzerkleinerung von Futterpartikeln in der Pelletpresse.
- Das auf der Grundlage des beschriebenen Erkenntnisbedarfs konzipierte Forschungsprojekt wurde experimentell dahingehend ausgerichtet, Zusammenhänge zwischen Partikelgrößenverteilungen nach der Rohwarevermahlung sowie der anschließenden Pelletierung systematisch zu untersuchen. Auf diese Weise soll für den aus den beiden beschriebenen Teilschritten bestehenden Gesamtzerkleinerungsprozess das Optimierungspotenzial hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung im Nutztierfutter sowie des Energiebedarfs erschlossen werden.

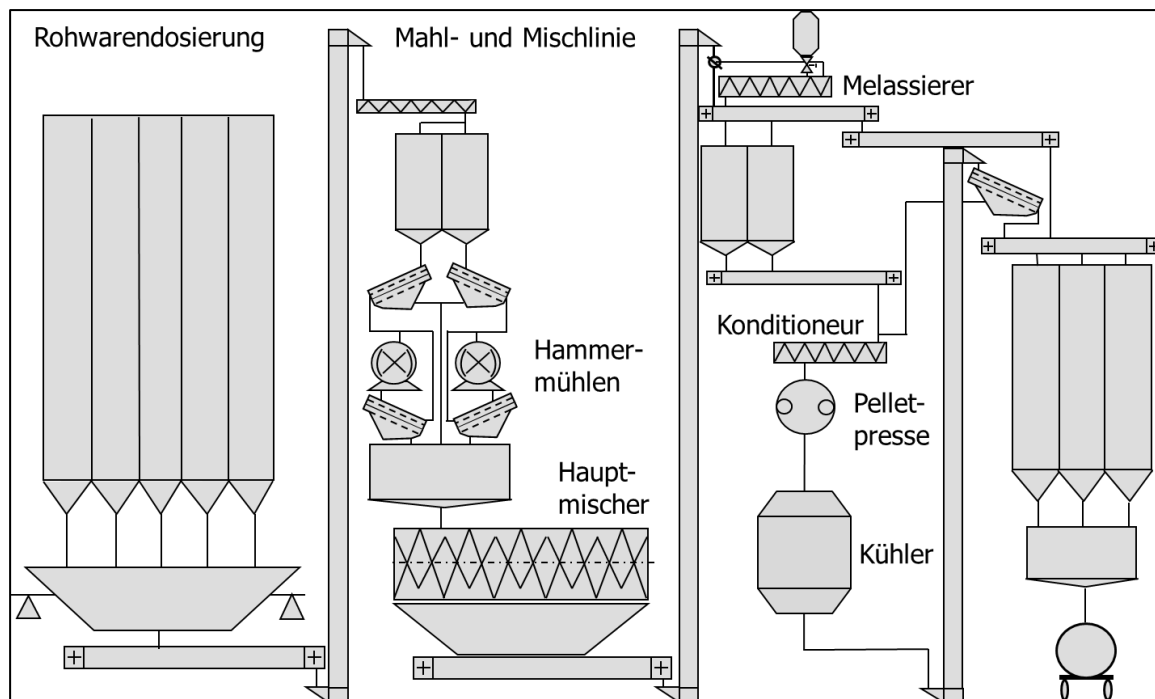


Abbildung 1: Vereinfachtes Anlagenschaubild einer Einstrang-Produktionsanlage für Mischfutter

2. Problemanalyse

Für die gewerbliche Herstellung von Alleinfuttermitteln für Nutztiere ist die Zerkleinerung der überwiegend agrarischen Rohwaren aus technologischen aber auch aus ernährungsphysiologischen Gründen zwingend erforderlich. Die Zerkleinerung der Rohkomponenten ermöglicht bei anschließender Zugabe von Zusatzstoffformulierungen, die aus Gründen einer besseren Verteilbarkeit meist aus sehr kleinen Partikeln bestehen, die Herstellung homogener und gegenüber den Beanspruchungen mechanischer Förderprozesse weitgehend entmischungsstabiler Mischfuttermittel. Der zentrale ernährungsphysiologische Grund für die Zerkleinerung von Futtermitteln ist die erheblich bessere Verdaulichkeit zerkleinerter Komponenten. Schweine sind beispielsweise aufgrund ihres Gebisses nicht in der Lage, ganze Körner so zu zerkleinern, dass sie deren Nährstoffe im Magen-Darm-Trakt vollständig aufnehmen können. Im Hinblick auf die Gesundheit und Leistung von Nutztieren werden hohe Anforderungen an die Herstellung von Zerkleinerungsprodukten mit definierter Partikelgrößenverteilung gestellt.

In der Futtermittelindustrie sind für die Rohwarenzerkleinerung über Jahrzehnte fast ausschließlich Horizontalrotor-Hammermühlen verwendet worden. In ihrer zylindrischen Mahlkammer werden die radial eindosierten Futterkomponenten von den mit Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 100 m/s rotierenden Zerkleinerungswerkzeugen – den Hämmern – durch Prallbeanspruchung zerkleinert. Die Mahlkammer ist von einem Sieb umgeben, das die Maximalpartikelgröße für das Zerkleinerungsprodukt vorgibt. Da unter den gegebenen Bedingungen ein erheblicher Anteil an bereits hinreichend zerkleinerten Partikeln im Mahlraum verbleibt und durch erneuten Kontakte mit den Hämmern weiter zerkleinert wird, müssen die Zerkleinerungsprodukte mittels Aspiration aus der Kammer entfernt und anschließend, mit Hilfe eines Filters, aus dem Aspirationsluftstrom abgeschieden werden. Für den mit der Horizontalrotor-Hammermühle durchgeführten Zerkleinerungsprozess sind eine breite Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte mit einem vergleichsweise großen Anteil sehr kleiner Partikel sowie ein hoher Energiebedarf systemimmanent. Vorteilhaft – und entscheidend für ihre vorrangige Berücksichtigung bei der Auslegung von Mahllinien in Mischfutterwerken – ist ihre universelle Verwendbarkeit, die auch eine angemessene Zerkleinerung von besonders harten oder duktilen Komponenten gewährleistet.

In vielen Mischfutterwerken ist die Hammermühle inzwischen oft um eine Walzenmühle – meist in Form des mit einem Walzenpaar ausgestatteten Brechwalzenstuhls – ergänzt worden, um Mischfuttermittel mit einer engeren Korngrößenverteilung und einem geringeren Anteil an

besonders feinen Partikeln herstellen zu können. In der Walzenmühle wird das Mahlgut beim Durchgang durch den Spalt zwischen geriffelten Walzen vermahlen, die mit unterschiedlicher Geschwindigkeit gegenläufig rotieren. Die Spaltweite und die Rotationsgeschwindigkeiten der Walzen lassen sich in gewissen Grenzen wählen, wodurch die Art und Intensität der Scher- und Druckbeanspruchung sowie die resultierende Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte zu modifizieren sind. Die im Vergleich zu den mit der Hammermühle erzeugten Zerkleinerungsprodukten gleichmäßigere Partikelgrößenverteilung sowie der deutlich geringere Energiebedarf beruhen bei der Vermahlung mit der Walzenmühle auf der Schwerkraftförderung und dem jeweils einmaligen Durchgang eines Mahlgutpartikels pro Mahlspalt sowie der erheblich geringeren Leerlaufleistung. Der wesentliche Nachteil der Walzenmühle liegt in ihrer eingeschränkten Eignung zur Zerkleinerung von Spelzen sowie weiterer rohfaserreicher Hüllmaterialien, die durch ihre Biegsamkeit der Scherbeanspruchung im Mahlspalt ausweichen können.

Bei der üblicherweise als Gemischtzerkleinerung durchgeführten Vermahlung von Rohkomponenten kann bei der Wahl der Zerkleinerungsparameter kaum Rücksicht auf die Partikelgrößen und das spezifische Zerkleinerungsverhalten der unterschiedlichen Rezepturbestandteile genommen werden. Zumindest ist die dem Zerkleinerungsprozess üblicherweise vorgeschaltete Abtrennung des Feinanteils, zu dem u. a. die bereits im Zuge der Entölung zerkleinerten Extraktionsschrote gehören und der ohne Mühlenpassage in den Mischervorbehälter gefördert wird, grundsätzlich hilfreich, um den Zeit- und Energiebedarf für die Zerkleinerung sowie den Anteil feiner und feinsten Partikel im Mahlgut zu reduzieren.

Mit einer Kombination der beiden beschriebenen Mühlensysteme können die Rohwaren unter Berücksichtigung prozesstechnischer Grenzen zu Zerkleinerungsprodukten mit einer hinsichtlich der jeweiligen Nutztierleistung und -gesundheit optimierten Partikelgrößenverteilung vermahlen werden [Borgelt et al. 2015]. Während die zielgerichtete Herstellung von Alleinfuttermitteln mit passender Partikelgrößenverteilung somit für mehlartige Futtermittel gelöst ist, ist die Situation bei den pelletierten Futtermitteln, die den überwiegenden Teil der gewerblich gefertigten Alleinfuttermittel ausmachen, anders. Bei der Pressagglomeration wird das zuvor vermahlene, gemischte und in Abhängigkeit von der Rezeptur mit flüssigen Komponenten versetzte Futter nach der Konditionierung mit Sattdampf mit Kollern durch die Lochbohrungen einer Matrize gedrückt. Neben der beim Matrizendurchgang angestrebten Verdichtung des Futters zu stabilen Presssträngen, die beim Austreten aus den Matrizenkanälen mit Hilfe

einstellbarer Messer zu Pellets geschnitten werden, unterliegt das in den Pressenraum dosierte Futter einer durch Koller und Matrize bewirkten Druck- und Scherbeanspruchung, wie sie in einer Kollermühle auftritt. Die bei der Beanspruchung zwischen den Kollern und den die Lochbohrungen der Matrize trennenden Stegen prozessimmanent auftretende Zerkleinerung von Futterpartikeln ist nicht zu steuern und in ihrem Ausmaß bislang nicht abschätzbar. So ist bislang auch nicht bekannt, ob von den beiden üblichen Pressentypen, der Ring- und der Flachmatrizenpresse, unterschiedliche Zerkleinerungswirkungen ausgehen.

Bei der Ringmatrizenpresse überträgt das in den Pressenraum dosierte Futter Bewegungsenergie des angetriebenen Matrizenringes auf die Koller, die zum Rotieren gebracht werden und dabei die Futterpartikel in die Matrizenbohrungen drücken. Bei der üblichen Maschineneinstellung liegt zwischen Matrize und Kollern nur ein Spalt minimaler Breite, bei dem die Koller keinen direkten Druck auf die Matrize ausüben. Geringfügig größere Spaltbreiten werden verwendet, um die Stabilität der Pellets zu erhöhen [Robohm et al. 1989]. Mit der Spaltbreite steigt der Anteil des Futters, der bereits vor dem Matrizendurchgang verdichtet wird. Mit der Vorverdichtung sind ein geringerer Durchsatz und ein höherer Energiebedarf für den Pelletierprozess – sowie absehbar auch eine intensivere Zerkleinerung der Futterpartikel – verbunden.

Die Flachmatrizenpresse hat eine plane Matrize, die in der Presse fixiert ist. Angetrieben werden ausschließlich die Koller, die auf einer kreisförmigen Bahn über die runde Matrize rollen und das in den Pressenraum dosierte Futter durch deren Lochbohrungen drücken. Die Einstellung der Spaltweite zwischen den Kollern und der Matrize bzw. des Anpressdrucks kann über das Austarieren entgegengesetzt wirkender Kräfte – z. B. Federkräfte und Hydraulik – vorgenommen werden.

Von einer Reihe weiterer apparativer Parameter sind unterschiedlich starke Effekte auf die Zerkleinerung der Futterpartikel bei der Pressagglomeration zu erwarten. Die größte Wirkung dürfte von den Bohrungsdurchmessern ausgehen, die für die Herstellung tierart- und altersklassenspezifischer Pellets maßgeblich sind. Bei gleicher offener Matrizenarbeitsfläche ist für Futterpartikel bei Matrizen mit größeren Bohrungsdurchmessern eine höhere Wahrscheinlichkeit gegeben, ohne Beanspruchung zwischen Koller und Matrize in eine Matrizenbohrung gedrückt zu werden. Zugleich ist davon auszugehen, dass das Ansenken der Lochbohrungen, durch das das Eindringen der Futterpartikel erleichtert wird, die

Zerkleinerungswirkung der Pressagglomeration grundsätzlich mindern dürfte. Ob unterschiedliche Matrizenstärken, die maßgebend für die Länge des Presswegs der Futterpartikel in der Matrice und somit für die Intensität der Reibung bzw. die daraus resultierende Pelletstabilität sind, auch einen Effekt auf die Zerkleinerung der Futterpartikel beim Matrizendurchgang haben, ist kaum abzuschätzen. Nicht auszuschließen ist auch eine unterschiedliche Zerkleinerungswirkung von Kollern mit geriffelter und genuteter Oberfläche.

Neben den aufgeführten Maschinenparametern sind auch Prozessparameter sowie stoffliche Eigenschaften der Futtermittel in die Überlegungen zur Nachzerkleinerung von Futterpartikeln in der Pelletpresse einzubeziehen. Vom Konditionieren, bei dem die Futterpartikel mit Sattdampf versetzt werden und das der Vorbereitung der Futtermischung auf die direkt folgende Pressagglomeration dient, ist ein spürbarer Effekt auf die Zerkleinerungswirkung beim Pelletieren zu erwarten. Die Kondensation des Dampfes auf den Partikeloberflächen, mit der die Reibung in den Matrizenkanälen reduziert und die Haftkräfte zwischen den Partikeln erhöht werden sollen, dürfte durch das Auffeuchten des Futters zugleich zu einer höheren Zähigkeit der Partikel gegenüber der Beanspruchung zwischen Koller und Matrice führen. Auch wenn entsprechende Wirkungen für die Pressagglomeration – anders als für Zerkleinerungsprozesse mit der Hammermühle [Kersten et al. 2005] – nicht untersucht sind, ist daher mit zunehmendem Feuchtigkeitszusatz von einer weniger intensiven Zerkleinerung auszugehen. Die stoffliche Zusammensetzung sollte bei der Nachzerkleinerung, wie bereits bei der Vermahlung selbst, eine maßgebliche Rolle spielen. Beim Vorliegen besonders flexibler oder besonders harter Partikel ist ein größerer Widerstand gegenüber der Nachzerkleinerung zu erwarten, der sich energetisch sowohl im höheren Verdichtungswiderstand als auch in der größeren Reibung im Matrizenkanal bemerkbar machen dürfte. Um bei der vorgesehenen systematischen Untersuchung der Nachzerkleinerung die Wirkung unterschiedlicher stofflicher Eigenschaften zu berücksichtigen, werden mit Weizen und der spelzenreichen Gerste zwei Getreide mit bekanntermaßen unterschiedlichem Zerkleinerungsverhalten einbezogen.

Neben der Veränderung der Primärpartikelgrößenverteilung des pelletierten Futters ist auch die für den zweiten Zerkleinerungsschritt aufgebrauchte Energie – insbesondere in der aktuellen Phase drastisch steigender Strompreise – ein wichtiger Aspekt der Nachzerkleinerung in der Presse. Daher wird die Optimierung der beiden Schritte der faktisch zweistufigen Zerkleinerung bei der Herstellung pelletierter Alleinfuttermittel im Hinblick auf die für die jeweiligen Nutztiere gewünschten Partikelgrößen sowohl zu einer weniger feinen Partikelgrößenverteilung als auch

zur Einsparung von Zerkleinerungsenergie führen. Bislang können die meisten gewerblichen Mischfutterhersteller dieses Potenzial nicht nutzen, da sie ausschließlich die Partikelgrößenverteilung ihrer vermahlenden Mischungen kennen. Hinsichtlich der Nachzerkleinerung arbeiten sie nach dem ‘trial-and-error’-Prinzip und gehen – absehbar zu Recht – davon aus, dass ein vor dem Matrizendurchgang relativ grobes Mischfutter auch nach dem Pelletieren eine relativ grobe Primärpartikelgrößenverteilung aufweist. So werden mit erheblichem Aufwand vergleichsweise grob strukturierte Mischfutter für Schweine und Geflügel hergestellt, ohne die zwei Stufen des Gesamtprozesses aufeinander abstimmen und Einsparpotenziale nutzen zu können. Die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit sollen eine Datengrundlage für die Abstimmung von Vermahlung und Nachzerkleinerung hinsichtlich der aus dem zweistufigen Prozess resultierenden Primärpartikelgrößenverteilung sowie der aufzuwendenden Zerkleinerungsenergie zur Verfügung stellen.

3. Forschungsziel

Die übergeordnete Zielstellung des Forschungsprojektes besteht im Gewinn von Erkenntnissen zur Nachzerkleinerung der Futterpartikel beim Pelletieren. Vorrangig soll die Nachzerkleinerung, die ein unerwünschter und bislang kaum zu quantifizierender Nebeneffekt der Pressagglomeration von Mischfuttermitteln ist, hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Primärpartikelgrößenverteilung systematisch untersucht werden, um die vorgelagerte Vermahlung des Futters im Herstellungsprozess besser auf den faktisch zweistufigen Zerkleinerungsprozess abstimmen zu können. In die Untersuchungen sind hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilungen unterschiedliche mehlartige Ausgangskomponenten einbezogen, um Abhängigkeiten der Nachzerkleinerung beim Pelletieren vom ersten Zerkleinerungsschritt, der definierten Vermahlung, zu ermitteln. Daneben sollen Erkenntnisse gewonnen werden, in welchem Maß sich Prozessparameter (Konditionierung des Futters sowie Bohrungsdurchmesser und Pressverhältnis der Matrice) auf die Intensität der Nachzerkleinerung auswirken, ob beispielsweise der Bohrungsdurchmesser der maximalen Primärpartikelgröße entspricht. Angestrebt werden auch Erkenntnisse zur spezifischen Zerkleinerungsenergie, die für die Nachzerkleinerung vor Futterpartikeln in der Pelletpresse aufgewandt wird. Des Weiteren ist die in den beiden branchenüblich verwendeten Pelletpressen, der Ring- und der Flachmatrizenpresse auftretende Nachzerkleinerung zu vergleichen. Als Referenz sollen Untersuchungen zu der bei der Mischfutterpelletierung unter produktionsüblichen Bedingungen in industriellen Anlagen auftretenden Nachzerkleinerung durchgeführt werden.

Um die aufgeführten Effekte angemessen beurteilen zu können, muss eine möglichst leistungsstarke, auf der Nassdispergierung der Primärpartikel basierende Analytik etabliert werden. Die Analysen sollen mit einem im Forschungsinstitut Futtermitteltechnik vorhandenen Laserbeugungsspektrometer durchgeführt werden, um zu prüfen, ob die bislang noch nicht für Primärpartikelgrößenbestimmungen in Pellets eingesetzte Methode das Potenzial hat, die zeitaufwändige Nasssiebung zu ersetzen. Daneben ist zu ermitteln, ob aus der Partikelgrößenmessung agrarischer Komponenten in wässriger Suspension systematische Unterschiede zur Bestimmung im trockendispergierten Zustand resultieren, da in Fachpublikationen zur Nachzerkleinerung meist ausschließlich Nasssiebungsergebnisse miteinander verglichen werden.

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1 Methodik und Planung der Versuche

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit Weizen und Gerste der Ernten 2020 und 2021 durchgeführt. Beide der Kategorie „gesund und handelsüblich“ entsprechende Einzelfuttermittel wurden vom Landhandel bezogen und im Forschungsinstitut Futtermitteltechnik eingelagert. Für Referenzbetrachtungen herangezogene mehlartige und pelletierte Mischfuttermittel wurden von Mischfutterherstellern aus der laufenden Produktion zur Verfügung gestellt.

Die Versuche zur Zerkleinerung von Weizen und Gerste mittels Hammer- und Walzenmühle sowie zur Pelletierung der Zerkleinerungsprodukte mit einer Flach- und einer Ringmatrizenpresse wurden im Forschungsinstitut Futtermitteltechnik mit Maschinen bzw. Anlagen durchgeführt, die seitens der Maschinenbauindustrie zur Verfügung gestellt wurden bzw. zur Ausrüstung des institutseigenen Technikums gehören. Referenzuntersuchungen zum Pelletieren von Zerkleinerungsprodukten mit einer Flachmatrizenpresse im betrieblichen Maßstab wurden im Technikum eines Maschinen- und Anlagenherstellers durchgeführt. Die Untersuchungen zur Charakterisierung der Pressagglomerate und des granulometrischen Zustands der Zerkleinerungsprodukte erfolgten im Labor des Forschungsinstituts Futtermitteltechnik.

Die experimentellen Untersuchungen sind folgenden Arbeitsabschnitten zuzuordnen:

- Grundlegende Untersuchungen zur Primärpartikelgrößenverteilung mittels Laserbeugungsspektroskopie und Nasssiebung

- Zerkleinerung der Einzelfuttermittel Weizen und Gerste mittels Hammer- und Walzenmühle sowie Charakterisierung der Zerkleinerungsprodukte
- Pelletieren der Zerkleinerungsprodukte mit einer Labor-Flachmatrizenpresse – Charakterisierung der Pellets sowie der Primärpartikelgrößenverteilung
- Pelletieren der Zerkleinerungsprodukte mittels Ring- und Flachmatrizenpressen im technischen Maßstab – Charakterisierung der Pellets sowie der Primärpartikelgrößenverteilung
- Referenzuntersuchungen zur Nachzerkleinerung von Mischfuttermitteln beim Pelletieren mit industriellen Anlagen

4.2 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführung

Für die experimentellen Untersuchungen zur Nachzerkleinerung im Pelletierprozess wurden die Einzelfuttermittel Weizen und Gerste mit den beiden in der gewerblichen Mischfutterherstellung am häufigsten verwendeten Zerkleinerungsmaschinen, einer Hammer- und einer Walzenmühle, jeweils zu Produkten unterschiedlicher Feinheit zerkleinert. Die anschließenden Pressagglomerationen wurden kleinmaßstäblich mit einer Labor-Flachmatrizenpresse und im technischen Maßstab mit einer Ring- und einer Flachmatrizenpresse durchgeführt. Durch die Variation der für die Nachzerkleinerung absehbar maßgeblichen Bohrungsdurchmesser wurde die Wirkung dieses Matrizenparameters auf die Nachzerkleinerung unterschiedlicher Ausgangskomponenten systematisch untersucht. Ergänzend wurde in die Untersuchungen auch der Effekt unterschiedlicher Pressweglängen auf die Nachzerkleinerung einbezogen. Die mehl- und pelletförmigen Produkte der Zerkleinerungs- und Pressagglomerationsprozesse wurden mit den in Kapitel 4.3 dokumentierten Methoden untersucht und hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung charakterisiert.

4.2.1 Walzenmühle

Für die Untersuchungen kam ein einpaariger Walzenstuhl¹ zum Einsatz, dessen relevante Maschinendaten in **Tabelle 4.2-1** zusammengefasst sind. Die Walzen haben einen Durchmesser von 300 mm und sind 100 mm lang. Ihr Oberflächenprofil besteht aus 3,2 Riffeln pro cm. Zur Beeinflussung des Mahlergebnisses können ihre Drehzahl bzw. das Drehzahlverhältnis sowie ihr Abstand (Mahlsplattweite) verändert werden. Es wird mit einem Durchsatz von ca. 0,5 bis 1,0 t/h gearbeitet. Die Materialzufuhr erfolgt aus einem Vorbehälter und wird über Schieber und

¹ Typ Vario, MIAG AG, heute Bühler GmbH, D-38114 Braunschweig

Speisewalze geregelt, denen ein Magnetabscheider vorgeschaltet ist. Das Zerkleinerungsprodukt fällt wahlweise direkt in einen Sammelbehälter oder wird pneumatisch abgefördert.

4.2.2 Hammermühle

Bei der eingesetzten Hammermühle handelt es sich um eine Horizontalrotor-Hammermühle² mit vorgeschaltetem Metallabscheider und radialer Materialzufuhr. Das zu zerkleinernde Material wird in einem Vorbehälter bereitgestellt und mittels Dosierschieber und Schwingrinne in die Mahlkammer dosiert. Dort wird es von den Schlägern (Hämmern) bei maximaler Differenzgeschwindigkeit zwischen Produkt und Zerkleinerungswerkzeug erfasst und durch Prallbeanspruchung zerkleinert. Schlagleisten oder Prallplatten, die das Zerkleinerungsgeschehen intensivieren, waren nicht installiert. Die Hammermühle hat einen Mahlkammerdurchmesser von 540 mm und erlaubt eine frequenzabhängige Steuerung der Umfangsgeschwindigkeit zwischen 35 und 120 m/s. Die Prallbeanspruchung erfolgt über 12 Schläger, die auf vier Schlägerachsen montiert sind. Im Zuge der Untersuchungen wurden zweiteilige Siebeinsätze mit Lochungsdurchmessern von 2 – 6 mm verwendet. Grundsätzlich kann die Hammermühle zur Herstellung besonders grober Strukturen auch ohne Siebeinsätze betrieben werden. Der Durchsatz der Hammermühle, der vom Zerkleinerungsgut und den Zerkleinerungsbedingungen abhängig ist, liegt zwischen 0,5 und 3,0 t/h. Der Abtransport des Zerkleinerungsproduktes erfolgt pneumatisch in einen Zwischenbehälter. Maschinendaten sind in **Tabelle 4.2-2** zusammengestellt.

4.2.3 Labor-Flachmatrizenpresse

Für die grundlegenden systematischen Untersuchungen zur Nachzerkleinerung beim Pelletieren wurde eine Labor-Flachmatrizenpresse³ verwendet. Die Presse und die für die Untersuchungen benötigten Matrizen mit Lochungsdurchmessern von 2 bis 6 mm, deren Abmessungen in **Tabelle 4.2-3** aufgelistet sind, wurden von der Amandus Kahl GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt. Die Maschinendaten der Presse sind in **Tabelle 4.2-4** zusammengefasst. Die Antriebsleistung der mit zwei geriffelten Kollern ausgestatteten Maschine, die eine Arbeit mit geringen Durchsätzen erlaubt, beträgt 3,5 kW. Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Durchsatz von ca. 50 kg/h gewählt. Die Rotationsgeschwindigkeit der Koller entsprach konstant der Standardfrequenz von 50 Hz.

² Typ VHM 15, TIETJEN Verfahrenstechnik GmbH, D-25485 Hemdingen

³ Typ 14-175, Amandus Kahl GmbH & Co. KG, D-21465 Reinbek

Da die Labor-Flachmatrizenpresse nicht über einen Konditioneur verfügt, erfolgte die dem Pelletieren vorausgehende Dampf-Konditionierung der zerkleinerten Getreide in einem Schrägblattmischer⁴ mit einem Nutzvolumen von ca. 50 dm³ und einer elektrischen Nennleistung von 4 kW. In dem mit Düsen zur Wasser- und Dampfzugabe ausgestatteten Mischer wurden jeweils Chargen von 20 kg bei laufenden Mischwerkzeugen mit 1 bzw. 3 % Sattdampf beaufschlagt. Vor der Dampfzugabe wurde die Dampfleitung gespült, um sicherzustellen, dass die folgende Konditionierung ausschließlich mit Sattdampf erfolgen konnte. Der Mischer wurde nach Abschluss einer auf die Dampfzugabe folgenden Nachlaufzeit von 30 s entleert und das konditionierte Material wurde umgehend pelletiert. Im Anschluss an die Pressagglomeration in der Labor-Flachmatrizenpresse wurden die Pellets in einem Behälterkühler (Eigenbau) bei einer Kühlzeit von 10 min mit Druckluft auf die Umgebungstemperatur abgekühlt.

4.2.4 Technikums-Pressenanlage mit Ringmatrizenpresse

Für vergleichende Untersuchungen zur Veränderung der Futtergranulometrie durch den konventionellen Pelletierprozess mit einer Ringmatrizenpresse wurden die definiert zerkleinerten Einzelfuttermittel mit einer Pressenanlage – bestehend aus einem Vorbehälter und einer Dosierschnecke, einer Ringmatrizenpresse⁵ mit Kurzzeitkonditioneur sowie einem nachgeschalteten Bandkühler⁶ – pelletiert. In dem vor der Presse befindlichen Kurzzeitkonditioneur, einem mit einer Welle ausgestatteten zylindrischen Durchlaufmischer, wird das mehlartige Mischfutter konditioniert – durch Zusatz von Sattdampf werden ihm Wärme und Feuchtigkeit zugefügt. Die Welle ist mit paddelförmigen Mischwerkzeugen besetzt, die die Futterkomponenten bei einer Verweilzeit von ca. 15 s durch den Konditioneur fördern, sie dabei verwirbeln und damit eine gleichmäßige Vermischung mit dem Dampf gewährleisten. Eine Reihe grundlegender Maschinendaten zur Technikums-Pressenanlage sind in **Tabelle 4.2-5** zusammengefasst.

4.2.5 Technikums-Pressenanlage mit Flachmatrizenpresse

Weitere vergleichende Untersuchungen zur Nachzerkleinerung wurden mit einer Flachmatrizenpresse⁷ im technischen Maßstab durchgeführt, deren ausgewählte Maschinendaten **Tabelle 4.2-6** zu entnehmen sind. Die Pelletpresse ist in eine praxisnahe Pressenanlage

⁴ Typ T-50, Draiswerke GmbH, D-68305 Mannheim

⁵ Typ CLM 200, La Meccanica S.r.l. di Reffo, I-35013 Citadella (PD)

⁶ Fa. Fördertechnik GmbH, Mülheim/Ruhr

⁷ Typ 33-390, Amandus Kahl GmbH & Co. KG, D-21465 Reinbek

eingebunden, in der ihr ein Vorlagebehälter sowie eine Dosier- und eine Mischschnecke vorgeschaltet sind. Aus dem im Vorratsbehälter vorgelegten Material wird mit der Dosierschnecke mit Hilfe von Kontrollwägungen ein definierter Massenstrom erzeugt, der in der als Konditioneur fungierenden Mischschnecke mit Sattdampf und Wasser versetzt und vermischt werden kann. Das konditionierte Material gelangt anschließend in die Presse, in der es bei einem Durchsatz von ca. 300 kg/h von zwei mit einer Geschwindigkeit von ca. 2,3 m/s umlaufenden gelochten Kollern durch die Matrizenbohrungen gepresst wird. Die sich an die Pressagglomeration anschließende Kühlung der Pellets wird an Teilchargen vorgenommen. Die aus der Presse fließenden Pellets werden in den großvolumigen Behältern von Kühlwagen aufgefangen, in denen Kühlluft durch die Pelletschüttung geleitet wird.

4.3 Bestimmung der Produkteigenschaften

Die wesentliche Aufgabe der Analytik bestand in der Ermittlung der Partikelgrößenverteilung der für die Untersuchungen zur Nachzerkleinerung beim Pelletieren hergestellten Zerkleinerungsprodukte sowie der aus ihnen erzeugten Pellets. Zur Charakterisierung der Pellets und des Pelletierprozesses wurden Untersuchungen zur Pelletstabilität (Abrieb, Härte) durchgeführt. Folgende Parameter wurden ermittelt:

- **Produktfeuchtigkeit**

Die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts erfolgte durch die Ermittlung der Massendifferenz nach vierstündigem Trocknen bei 103 °C gemäß der Trockenschränkmethod (Methode 3.1) [Naumann et al. 1976].

- **Schüttdichte**

Die Schüttdichte wurde mit einem Einlaufgerät nach Böhme gemäß DIN 1060 und DIN 51057 ermittelt.

- **Partikelgrößenverteilung**

Die Partikelgrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte wurden mit einer Vibrationssiebmaschine⁸ durch Prüfsiebung nach DIN 66 165 unter Verwendung von Analysensieben gemäß DIN 3310 ermittelt. Bei den Trockensiebungen erfolgte die Partikelgrößenbestimmung der feineren Fraktionen (< 125 µm) mit einer

⁸ Typ AS 200 Control, Retsch GmbH, D-42781 Haan

Luftstrahlsiebmaschine⁹. Bei der Luftstrahlsiebung wird – beginnend mit der geringsten Maschenweite – jeweils nur ein einzelnes Sieb verwendet, das auf der Siebmaschine fixiert wird. Agglomerate werden mit Hilfe eines Luftstroms, der aus einer rotierenden Düse von unten durch das Sieb gelenkt wird, aufgelöst. Zugleich wird die Feinfraktion durch das Sieb abgesaugt.

Für die Bestimmung der Primärpartikelgrößenverteilung in den Pellets waren gemäß der im Forschungsantrag beschriebenen Versuchsplanung Untersuchungen mit dem Laserbeugungsspektrometer am wässrig suspendierten Material vorgesehen [Lyu et al. 2020]. Unter Verwendung von Mischfutterpellets sowie mehlförmigen Modellmischungen wurden mit einem Laserbeugungsspektrometer¹⁰ Testmessungen durchgeführt. Aus diesen Messungen ergab sich, dass die für reguläre Messungen maximale optische Dichte in den Suspensionen bereits bei einem Feststoffanteil von etwa 2 – 4 g pro Liter erreicht wurde. Die wegen der geringen erfassten Masse unter mehrfacher Wiederholung durchgeführten Tests führten sowohl für die Wiederholungsuntersuchungen als auch für neue Untersuchungen am gleichen Material zu reproduzierbaren Resultaten. Ernsthafte Probleme ergaben sich bei der Untersuchungen der aus Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukten hergestellten Pellets, bei denen es fast ausschließlich zu Fehlmessungen kam. Die vermutlich auf den teils sehr hohen Feingutanteil bei breiter Partikelgrößenverteilung zurückzuführenden und nicht reproduzierbar auftretenden „Buckel“ in den Messsignal-Kennlinien führten zu nicht verwertbaren Ergebnissen und waren weder durch Veränderungen der Probenvorbereitung (längeres und durch mechanische Beanspruchung unterstütztes Auflösen der Pelletstrukturen) noch durch Modifikationen im analytischen Prozess zu beseitigen.

Die Primärpartikelgrößenverteilung in Pellets wurde daher konventionell mittels Nasssiebung unter Verwendung der auch bei der Trockenklassierung eingesetzten Vibrationssiebmaschine bestimmt. Ergänzend wurde der Siebturm dafür mit einem Siebspanndeckel mit einer Düse für die Wasseraufgabe, Entlüftungsringen sowie einem Auffangboden mit Auslauf ausgestattet. Die Nasssiebung wurde in Anlehnung an eine für die Untersuchung von Futtermittelpellets beschriebene Methode durchgeführt [Miladinovic 2009]. Die zu untersuchenden Pellets wurden mit Wasser versetzt und bei zweistündiger Standzeit unter mehrmaligem Umrühren aufgeschlämmt. Die Suspension wurde auf das oberste Sieb des Siebturms aufgebracht und unter

⁹ Typ A 200 (Labortyp), Alpine AG, heute Hosokawa Alpine AG, D-86199 Augsburg

¹⁰ Laserbeugungsspektrometer HELOS/KF mit dem Messmodul R7T (ca. 20 - 3.500 µm) und dem Flüssigdispergiersystem QUIXEL, Sympatec GmbH, D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Zugabe von Leitungswasser möglichst breit verteilt. Die sich anschließende Siebung bestand in zwei fünfminütigen Phasen, in denen das Material bei einer Wasseraufgabe von ca. 1 L/min durch Intervallvibration dispergiert wurde. Voruntersuchungen zur Nasssiebung, in denen auch jeweils kürzere und längere Probenvorbereitungs- und Siebungsphasen geprüft worden waren, hatten gezeigt, dass eine kürzere Standzeit zu einem unvollständigen Auflösen der Pelletstrukturen und eine kürzere Klassierzeit ebenfalls zu einer in den Bereich größerer Partikel verschobenen Partikelgrößenverteilung führt. Für die jeweils viermal mit Pelletmaterial der gleichen Charge durchgeführte fünf- und die zehnminütige Nasssiebung wurden für die längere Siebung die in **Tabelle 4.3-1** zusammengestellten deutlich höheren und gleichmäßigen Summenverteilungswerte erhalten – die Referenzwerte der kürzeren Messung sind in Tabelle 4.3-2 dokumentiert. Längere Stand- und Siebzeiten veränderten die resultierenden Partikelgrößenverteilungen nicht signifikant. Während die starke Haftwirkung der stärkereichen Getreide im pelletierten Material bei der Probenvorbereitung das Einhalten langer Lösezeiten erzwungen hatte, um die Primärpartikel vollständig zu dispergieren, musste dem Wasser beim Dispergieren fettreicher Geflügelfutterpellets (s. Kapitel 5.5) ein Tropfen eines Spülmittels zugefügt werden, um die abschirmende Wirkung des Fettes durch Detergentienzugabe zu beseitigen.

Unabhängig davon gilt für Nasssiebungen grundsätzlich, dass sie erst als abgeschlossen gelten können, wenn das aus dem Auffangboden abfließende Wasser ohne Trübung und somit frei von Feinanteilen ist. Wurden bei den Untersuchungen zur Nachzerkleinerung zum Abschluss der zweiten Siebungsphase noch Trübungen festgestellt, so wurde anschließend für weitere fünf Minuten im Intervallmodus unter Spülwasserzugabe gesiebt. Die mehlförmigen Zerkleinerungsprodukte wurden in Referenzuntersuchungen einer Nasssiebung unter gleichen Bedingungen unterzogen.

Für die in größerer Anzahl durchgeführten Untersuchungen mit der Labor-Flachmatrizenpresse wurde die kleinste zu erfassende Klassenobergrenze auf 250 µm festgelegt, da das nächst kleinere Sieb der Standardreihe (125 µm Maschenweite) bei Testsiebungen verstopfte, wodurch das Spülwasser aufgestaut wurde. Die Siebmaschenweite von 125 µm wurde in die weniger Einstellungen umfassende Versuchsreihe zum Nachzerkleinerungseffekt unterschiedlicher Pressen einbezogen. Dafür wurde das vom Auslaufboden des Siebturmes ablaufende Spülwasser mit dem nicht in den Siebturm eingegliederten Sieb aufgefangen. Verstopfungen wurden vorsichtig von Hand beseitigt und der Spülwasserstrom bei Bedarf reduziert.

- Pelletabrieb

Der Pelletabrieb entspricht dem Massenanteil des unter definierten Beanspruchungen von Futtermittelpellets gebildeten Feinguts und charakterisiert die Stabilität von Pellets bei Transport- und Umschlagprozessen. Die Abriebkennzahl wurde mit dem Abriebtestgerät LT-II¹¹ ermittelt, mit dem die Beanspruchung von Pellets beim pneumatischen Transport simuliert wird. Beim jeweils als Doppeluntersuchung durchgeführten Test werden 100 g vorabgesiebte Pellets im Verlauf einer Testphase von 60 s in einer perforierten Testkammer in einem Luftstrom herumgewirbelt und dabei Prallbeanspruchungen ausgesetzt. Anschließend werden die vom entstandenen Feingut abgetrennten Pellets ausgewogen. Der Masseverlust gegenüber der Einwaage wird als Abriebkennzahl angegeben, die somit dem prozentual normierten Anteil des Abriebs an der Gesamtmasse der Probe entspricht.

- Pellethärte

Die Pellethärte entspricht der Kraft, die notwendig ist, um ein einzelnes Pellet radial zum Bersten zu bringen. Zumeist korreliert sie negativ mit der Abriebkennzahl. Kennwerte für die Pellethärte können herangezogen werden, um eine hinreichende Bruchsicherheit für Pellets zu definieren aber auch um die Herstellung von Pellets zu vermeiden, die für die Aufnahme durch Jungtiere zu fest sind. Die Pellethärte wurde mit einem Pellet-Härteprüfer¹² ermittelt. Da mit dem Gerät einzelne Pellets untersucht werden, die sich hinsichtlich ihrer Härte erheblich unterscheiden können, wurde die Untersuchung jeweils an 10 einzelnen Pellets durchgeführt.

¹¹ Typ LT-II (Ursprungsversion des NHP 100), Borregaard AS, N-1701 Sarpsborg

¹² Typ Hercules XL, Amandus Kahl GmbH & Co. KG, D-21465 Reinbek

Tabelle 4.2-1: Technische Daten der Walzenmühle (IFF-Technikum)

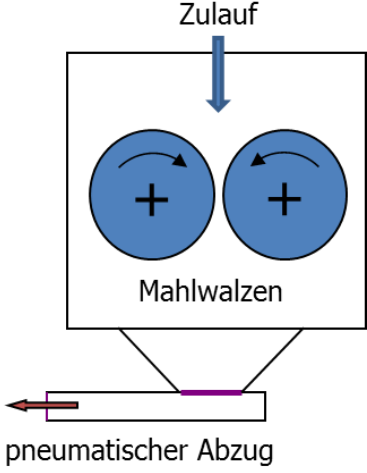
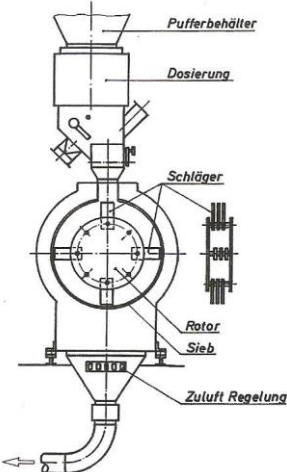
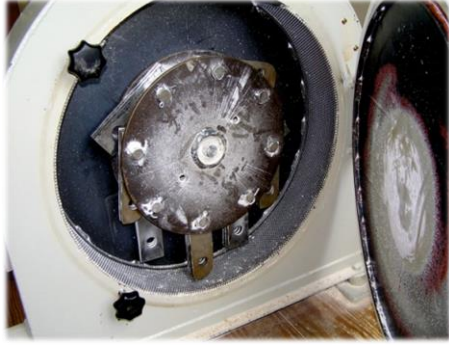
Bezeichnung	
Bauart Hersteller Materialzuführung	Walzenstuhl (Typ Vario) MIAG (heute Bühler GmbH) D-38114 Braunschweig Schieber/Speisewalze Kombination
	
Walzenpaare, Anzahl (Bauart) Walzenoberfläche Drall	1-stufig 3,2 Riffel /cm; 300/Umfang; < 35/65° 10 %
Walzenabstand Spaltmessung, Spaltverstellung Walzendurchmesser Walzenlänge Umfangsgeschwindigkeit Drehzahlen Drehzahldifferenz	variabel (0,0 – 3,5 mm) manuell 300 mm 100 mm 2,4 / 7,1 m/s bzw. 2,4 / 4,7 m/s 150:450 / 150:300 1:3 bzw. 1:2
Aspirationsluftmenge	ohne
Motor, Antriebsleistung Leistungsfaktor $\cos \varphi$ Stromaufnahme $A_{\max}$ Spannung	3 kW 0,85 (bei 100 % Motorleistung) 5,3 A bei 400 V 400 V
	0,5 – 1,6 t/h

Tabelle 4.2-2: Technische Daten der Hammermühle (IFF-Technikum)

Bezeichnung	
Bauart	Horizontalrotor-Hammermühle (Typ VHM 15)
Hersteller	TIETJEN Verfahrenstechnik GmbH D-25485 Hemdingen
Materialzuführung	radial
	
Schlagleisten	nein
Prallplatte / Siebplatte	nein
Anzahl Schlägerachsen	4
Anzahl Schläger	12
Abmessungen Schläger	150 x 60 x 6 mm
Abstand der Schläger	38 mm
Lochung beidseitig	ja
Schlägerwerkstoff	gehärtet
Mahlraumdurchmesser	540 mm
Umfangsgeschwindigkeit	40, 50, 60, 70 m/s
Rotordrehzahl	1.260 – 2.580 min ⁻¹
Drehzahl	frequenzgesteuert
Aspirationsluftmenge	20 m ³ /h
Sieblochdurchmesser	2 Segmente (4,0; 5,0; 6,0 mm Ø)
Siebmanteldurchmesser	540 mm
Siebbreite	153 mm
Sieblänge (Segment)	640 mm
Siebfläche	1.950 cm ²
Lochung	versetzte Reihen
Blechdicke	3 mm

Siebfläche	0,196 m ²
Offene Siebfläche	35 ~ 45 %
Motor, Antriebsleistung	11 kW
Leistungsfaktor cos φ	0,89 (bei 100 % Motorleistung)
Stromaufnahme $A_{\max}$	20 A bei 400 V
Spannung	400 V
Durchsatz	0,5 – 3,5 t/h
	0,8 – 3,2 t/h (Weizen)
	0,7 – 2,2 t/h (Gerste)

Tabelle 4.2-3: Matrizendaten für die Labor-Flachmatrizenpresse

Nennabmessung (Presskanal in mm)	Pressverhältnis	Matrizenabmessung (mm)
2 x 6	1 : 3	175 x 45 x 20
3 x 9	1 : 3	175 x 45 x 20
4 x 16	1 : 4	175 x 45 x 20
5 x 20	1 : 4	175 x 45 x 30
5 x 50	1 : 10	175 x 45 x 50
6 x 36	1 : 6	175 x 45 x 40

Tabelle 4.2-4: Technische Daten der Labor-Flachmatrizenpresse

Bezeichnung	
Bauart Hersteller	Labor-Flachmatrizenpresse (Typ 14-175) Amandus Kahl GmbH & Co. KG D-21465 Reinbek  
Dosierung Bauart Hersteller Presse Antriebsleistung Matrizendurchmesser Koller Hauptwelle Kollergeschwindigkeit	Dosierrinne (Typ JD 50) Jöst GmbH & Co. KG, D-48249 Dülmen 3,5 kW 175 mm 2 Stück, geriffelt Breite 2,9 mm, Durchmesser 130 mm 50 Hz (106 U/min) außen 1,0 m/s innen 0,67 m/s

Tabelle 4.2-5: Technische Daten der Ringmatrizenpresse (IFF-Technikum)

Bezeichnung	
Bauart	Ringmatrizenpresse mit Kurzzeitkonditioneur
(Typ CLM 200)	
Hersteller	La Meccanica S.r.l. di Reffo
	I-35013 Citadella (PD)
	
Dosierung	
Durchmesser	60 mm
Länge	400 mm
Lehrlaufdrehzahl	FU
Leistung	370 W
Werkzeuge	Schnecke
Konditioneur	
Durchmesser	170 mm
Länge	800 mm
Lehrlaufdrehzahl	683 U/min
Leistung	750 W
Werkzeuge	28 Paddel, 31 x 51 mm
Presse	
Max. Durchsatz	350 kg/h
Lehrlaufdrehzahl	238 U/min
Antriebsleistung	17 kW

Tabelle 4.2-6: Technische Daten der Flachmatrizenpresse (Technikum der Amandus Kahl GmbH & Co. KG)

Bezeichnung	
Bauart	Flachmatrizenpresse (Typ 33-390)
Hersteller	Amandus Kahl GmbH & Co. KG D-21465 Reinbek
Antriebsleistung	3,5 kW
Matrizendurchmesser	390 mm
Koller	2 Stück, gelocht
Drehzahl	166 U/min
Kollergeschwindigkeit	2,28 m/s

Tabelle 4.3-1: Statistische Daten für vier Nasssiebungen von Mischfutterpellets einer Charge (2 h Auflösen, 1 x 5 min Siebphase bei Spülwasserzugabe von 1 L/min, Vor- und Nachspülen mit 3 L Spülwasser)

obere Klassengrenze [µm]	Verteilungssumme - 4 Messungen				Mittelwert	Standardab- weichung	Variations- koeffizient
200	0,310	0,284	0,306	0,284	0,296	0,014	0,047
400	0,382	0,352	0,379	0,350	0,366	0,017	0,047
630	0,455	0,426	0,436	0,426	0,436	0,014	0,031
900	0,510	0,499	0,524	0,492	0,506	0,014	0,028
1250	0,575	0,564	0,597	0,558	0,574	0,017	0,030
1600	0,632	0,616	0,652	0,615	0,629	0,017	0,028
2240	0,759	0,731	0,777	0,720	0,747	0,026	0,035
2500	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0	0
						Mittelwert V:	0,031

Tabelle 4.3-2: Statistische Daten für vier Nasssiebungen von Mischfutterpellets einer Charge (2 h Auflösen, 2 x 5 min Siebphase bei Spülwasserzugabe von 1 L/min, Vor- und Nachspülen mit 3 L Spülwasser)

obere Klassengrenze [µm]	Verteilungssumme - 4 Messungen				Mittelwert	Standardabweichung	Variations- koeffizient
200	0,357	0,354	0,340	0,335	0,347	0,011	0,031
400	0,434	0,433	0,414	0,405	0,422	0,014	0,034
630	0,499	0,502	0,482	0,472	0,489	0,014	0,029
900	0,554	0,557	0,540	0,533	0,546	0,011	0,021
1250	0,619	0,619	0,596	0,598	0,608	0,013	0,021
1600	0,682	0,685	0,666	0,658	0,673	0,013	0,019
2240	0,820	0,821	0,808	0,783	0,808	0,018	0,022
2500	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0	0
						Mittelwert V: 0,022	

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1 Charakterisierung der Rohwaren

Eine jeweils größere Charge der Einzelfuttermittel Futterweizen und Futtergerste wurde eingelagert, hinsichtlich einer Reihe physikalischer Stoffeigenschaften charakterisiert und in Form von Teilchargen jeweils vor den im Verlauf eines Quartals durchzuführenden experimentellen Untersuchungen definiert zerkleinert. Für die abschließenden Untersuchungen im technischen Maßstab wurde jeweils eine neue Charge der beiden Einzelfutter verwendet. Die Resultate der stofflichen Untersuchungen sind in **Tabelle 5.1-1** zusammengestellt. Die verwendeten Materialien unterscheiden sich – abgesehen von dem für die grundlegenden Untersuchungen verwendeten Weizen, der einen gegenüber den anderen Komponenten um ca. 1 % höhere Feuchtigkeit aufweist – nicht maßgeblich.

5.2 Zerkleinerung der Einzelfuttermittel

Die Zerkleinerung der einbezogenen Einzelfuttermittel bildete die Grundlage für die systematischen Untersuchungen zur Nachzerkleinerung von Futterpartikeln bei der Pressagglomeration in der Pelletpresse. In einer Reihe von Vorversuchen wurden Weizen und Gerste mit der Horizontalrotor-Hammermühle und mit dem Walzenstuhl unter Variation der für die Zerkleinerungsintensität maßgeblichen Maschinenparameter zerkleinert. Für die beiden Mühlen wurden in Abhängigkeit vom zu zerkleinernden Getreide jeweils drei Parametersätze ausgewählt, mit denen für die folgenden systematischen Untersuchungen Partikelgrößenverteilungen hergestellt wurden, die sich mit den Kategorien ‘grob’, ‘mittel’ und ‘fein’ über das granulometrische Spektrum konventioneller Mischfuttermittel erstrecken. Für die Zerkleinerung von Weizen mit der Hammermühle wurden die Rotorumfangsgeschwindigkeiten 50 und 70 m/s mit Öffnungsweiten der internen Siebe von 3 und 5 mm kombiniert. Die Zerkleinerung der Gerste wurde unter Verwendung der gleichen Öffnungsweiten für die internen Siebe, aber bei geringfügig höheren Umfangsgeschwindigkeiten der Hammermühlenschläger 60 und 80 m/s durchgeführt.

Zur konkreten Beschreibung der Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte werden neben den genannten und – trotz ihrer Unbestimmtheit – in der Futtermittelbranche gebräuchlichen Kategorien die mittlere Partikelgröße (d_{50}), die Zusammenfassung des Klassierungsergebnisses in drei Fraktionen ($< 500 \mu\text{m}$, $500 - 1.000 \mu\text{m}$, $> 1.000 \mu\text{m}$) sowie die Steilheit der Summenverteilungsfunktion ($\kappa = d_{25}/d_{75}$) herangezogen. Da $d_{25} \leq d_{75}$ gilt, beträgt κ

maximal 1. Eine steile Summenverteilungsfunktion, die mit einer engen Partikelgrößenverteilung einhergeht, ist daher durch einen hohen Wert für κ gekennzeichnet.

Die Partikelgrößenverteilungen der mit der Hammermühle erzeugten Zerkleinerungsprodukte sind in den **Abbildungen 5.2-1** und **5.2-2** als Summenverteilungsfunktionen dargestellt. Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass die Partikelgrößenverteilung der Gerste durch die Wahl höherer Umfangsgeschwindigkeiten dem für Weizen erzielten Zerkleinerungsergebnis in vergleichsweise engen Grenzen angepasst werden konnte. Die mittleren Partikelgrößen decken jeweils den Bereich zwischen ca. 500 und 1.250 μm ab. Neben den Zerkleinerungsergebnissen ist in **Tabelle 5.2-1** auch der spezifische Energieaufwand für die Vermahlungsprozesse dokumentiert. Aus den Daten ist der für Gerste signifikant höhere Bedarf an Zerkleinerungsenergie zu entnehmen, der vorrangig auf dem höheren Anteil an faserigem Material beruht, das der Zerkleinerung einen größeren Widerstand leistet.

Im Gegensatz zur Zerkleinerung mit der Hammermühle war bei der Vermahlung der beiden Einzelfuttermittel mit der Walzenmühle keine Variation der Zerkleinerungsparameter notwendig. Weizen und Gerste wurden jeweils mit dem minimalen Mahlpalt (nominell „0 mm“) sowie bei Mahlpaltweiten von 0,25 und 0,5 mm zerkleinert. Die Walzen wurden mit 150 und 450 Umdrehungen pro Minute betrieben – das für die wirkenden Scherkräfte maßgebliche Verhältnis der Walzengeschwindigkeiten lag also bei 1:3.

Die Zerkleinerungsprodukte sind in den **Abbildungen 5.2-3** und **5.2-4** als Summenverteilungsfunktionen dargestellt und in **Tabelle 5.2-2** durch ihre Kennwerte charakterisiert. Anhand der mittleren Partikelgrößen ist zu erkennen, dass die Zerkleinerungsprodukte die für die anschließenden Untersuchungen zur Nachzerkleinerung angestrebte Ähnlichkeit – sowohl im Hinblick auf die beiden Getreide als auch hinsichtlich der beiden Vermahlungsprinzipien – aufweisen. Signifikante Unterschiede zwischen Weizen und Gerste sind in der Breite der Partikelgrößenverteilung – die Zerkleinerungsprodukte aus Gerste sind durch höhere Werte für κ gekennzeichnet – und im spezifischen Energiebedarf zu erkennen. Der Energiebedarf liegt bei etwa gleichen resultierenden mittleren Partikelgrößen sowohl für die Hammermühle im Vergleich zur Walzenmühle als auch für die Vermahlung von Gerste gegenüber der Zerkleinerung von Weizen um ca. 50 % höher.

Abgesehen vom erheblich höheren Energiebedarf sind beim Vergleich der mit den unterschiedlichen Mühlensystemen erzeugten Zerkleinerungsprodukte vorrangig zwei signifikante Effekte zu erkennen: die mit der Hammermühle zerkleinerten Komponenten weisen einen signifikant höheren Feinanteil ($< 250 \mu\text{m}$) und eine geringere Steilheit der Summenverteilungsfunktion auf, also eine größere Breite der Partikelgrößenverteilung, die nur zum Teil auf den größeren Feinanteil zurückzuführen ist.

Da die Nachzerkleinerung beim Pelletieren anhand der Primärpartikelgrößenverteilung im Pelletmaterial zu beurteilen ist, die durch Nasssiebung der aufgelösten Pellets ermittelt wird, wurden auch die mehlförmigen Zerkleinerungsprodukte mittels Nasssiebung untersucht, um Referenzwerte für die Bewertung der Nachzerkleinerung zu erhalten. Bei der Nasssiebung wurden die Zerkleinerungsprodukte gemäß der für Pellets vorgesehenen Weise vorbehandelt und untersucht. Die Partikelgrößenverteilungen sämtlicher konventionell und mittels Nasssiebung untersuchten Zerkleinerungsprodukte sind in den **Abbildungen 5.2-5 bis 5.2-8** jeweils kombiniert dargestellt. Die für die jeweils gleichen Materialien mit den beiden unterschiedlichen Methoden ermittelten Summenverteilungsfunktionen weisen systematische Unterschiede auf, die bereits in einer vorangegangenen Untersuchung aufgefallen waren, aber nicht diskutiert worden sind [Neumann et al. 2015]. Die Summenverteilungsfunktionen der mit Hilfe der Nasssiebung ermittelten Partikelgrößenverteilungen verlaufen erheblich flacher als die entsprechenden, auf Resultaten von Siebungen der trockenen Materialien basierenden Funktionen. Im Zusammenhang mit dem flacheren Verlauf und da die Partikelgrößenverteilung bei der Nasssiebung erst ab einer Mindestgröße von $250 \mu\text{m}$ erfasst wurde (bei Verwendung von Sieben mit geringerer Siebmaschenweite kam es häufig zur Verstopfung des jeweils feinsten Siebes und damit verbunden zum Rückstau des Wassers im Siebturm – bei späteren Untersuchungen wurde ein feineres Sieb in die Untersuchungen einbezogen, das aus dem Siebturm ausgegliedert und speziell von Hand bewegt und gespült wurde), kann die Steilheit für das unterschiedlich gesiebte Material mangels erfasster d_{25} -Werte nur für ein Zerkleinerungsprodukt berechnet und verglichen werden. Für das grobe, mit der Hammermühle aus Gerste erzeugte Zerkleinerungsprodukt liegt der aus den Trockensiebungsdaten hervorgehende Quotient für d_{25} und d_{75} bei 0,42, während die mittels Nasssiebung bestimmte Partikelgrößenverteilung durch einen Steigungswert von 0,24 gekennzeichnet ist. Aus den kombinierten Darstellungen der mit den unterschiedlichen Siebanalysen ermittelten Partikelgrößenverteilungen ist zu ersehen, dass der beschriebene Abflachungseffekt bei den Summenverteilungsfunktionen den gesamten

Partikelgrößenbereich betrifft, wobei für die Funktionsscharen eine gewisse Proportionalität in Verlauf und Abstand erhalten bleibt.

Ein interessantes Phänomen ist das bei sämtlichen Kurvenpaaren festzustellende Schneiden der Summenverteilungsfunktionen. Unterhalb von Partikelgrößen von etwa 1.000 µm verlaufen die auf Resultaten der Nasssiebungsanalyse beruhenden Summenverteilungsfunktionen oberhalb der durch Trockendispersion ermittelten Funktionen – im Bereich größerer Partikel verlaufen sie darunter. Es ist zu vermuten, dass bei der Nasssiebung zumindest zwei Effekte grundlegenden Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung nehmen, die Querschnittsvergrößerung von Partikeln durch Quellen sowie der Druck, den das Wasser auf die über den Siebmaschen befindlichen Partikel ausübt. Möglicherweise überwiegt im Bereich größerer Partikel der Quelleffekt, während kleinere Partikel weniger intensiv quellen und eher durch die Siebmaschen gedrückt werden. Unabhängig von den vermuteten Effekten vermindert die im Verlauf der Nasssiebung auftretende Entfernung löslicher Anteile aus den Zerkleinerungsprodukten die Wiederfindungsrate und trägt damit zum flacheren Verlauf der Summenverteilungsfunktionen bei.

Tabelle 5.1-1: Einzelfuttermittel (Ausgangsprodukte)

		Futterweizen		Futtergerste	
		F-605	F-940	F-606	F-941
Feuchtigkeit		12,1 %	10,9 %	11,2 %	11,0 %
mittlere Partikelgröße (d ₅₀)		3,44 mm	3,45 mm	3,39 mm	3,27 mm
Feinanteil (< 500 µm)		0,03 %	0,05 %	0,04 %	0,03 %
Schüttdichte		0,772 g/cm ³	0,769 g/cm ³	0,645 g/cm ³	0,598 g/cm ³

Tabelle 5.2-1: Zerkleinerungsprodukte (Hammermühle)

Sieblochung/ Umfangsgeschwindigkeit		3 mm / 70 m/s	3 mm / 50 m/s	5 mm / 50 m/s
Weizen (Trockensiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,46 mm	0,72 mm	1,18 mm
< 250 µm		32,9 %	22,0 %	12,0 %
250 – 1.000 µm		51,5 %	44,4 %	27,2 %
> 1.000 µm		15,6 %	33,6 %	60,8 %
Trennschärfe (d ₂₅ /d ₇₅)		0,20	0,26	0,39
Weizen (Nasssiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,24 mm	0,62 mm	1,40 mm
< 250 µm		51,9 %	39,3 %	27,9 %
250 – 1.000 µm		26,0 %	20,8 %	13,1 %
> 1.000 µm		22,1 %	39,3 %	59,0 %
spez. Energiebedarf		11,4 kWh/t	9,2 kWh/t	3,8 kWh/t
Sieblochung/ Umfangsgeschwindigkeit		3 mm / 80 m/s	3 mm / 60 m/s	5 mm / 60 m/s
Gerste (Trockensiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,45 mm	0,68 mm	1,25 mm
< 250 µm		28,2 %	16,4 %	7,5 %
250 – 1.000 µm		59,7 %	51,7 %	28,7 %
> 1.000 µm		12,1 %	28,9 %	63,8 %
Trennschärfe (d ₂₅ /d ₇₅)		0,28	0,31	0,42
Gerste (Nasssiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,34 mm	0,60 mm	1,41 mm
< 250 µm		44,0 %	36,0 %	21,0 %
250 – 1.000 µm		39,6 %	31,6 %	15,8 %
> 1.000 µm		16,4 %	32,4 %	63,2 %
spez. Energiebedarf		14,8 kWh/t	13,6 kWh/t	6,2 kWh/t

Tabelle 5.2-2: Zerkleinerungsprodukte (Walzenmühle¹³)

Mahlspaltweite		0 mm	0,25 mm	0,50 mm
Weizen (Trockensiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,64 mm	0,89 mm	1,15 mm
< 250 µm		21,3 %	13,4 %	9,0 %
250 – 1.000 µm		56,5 %	27,0 %	26,7 %
> 1.000 µm		22,2 %	59,6 %	64,3 %
Trennschärfe (d ₂₅ /d ₇₅)		0,32	0,44	0,52
Weizen (Nasssiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,33 mm	0,82 mm	1,13 mm
< 250 µm		46,6 %	38,2 %	33,1 %
250 – 1.000 µm		26,7 %	15,9 %	12,3 %
> 1.000 µm		26,7 %	45,9 %	54,6 %
spez. Energiebedarf		7,6 kWh/t	5,5 kWh/t	2,8 kWh/t
Mahlspaltweite		0 mm	0,25 mm	0,50 mm
Gerste (Trockensiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,73 mm	0,94 mm	1,17 mm
< 250 µm		13,8 %	9,0 %	6,9 %
250 – 1.000 µm		59,6 %	46,0 %	26,8 %
> 1.000 µm		26,6 %	45,0 %	66,3 %
Trennschärfe (d ₂₅ /d ₇₅)		0,44	0,49	0,56
Gerste (Nasssiebung)				
PGV (d ₅₀)		0,56 mm	0,86 mm	1,18 mm
< 250 µm		38,8 %	30,9 %	25,9 %
250 – 1.000 µm		33,7 %	24,6 %	15,4 %
> 1.000 µm		27,5 %	44,5 %	58,7 %
spez. Energiebedarf		11,7 kWh/t	9,4 kWh/t	4,2 kWh/t

¹³ Walzenrotation: 150:450 min⁻¹

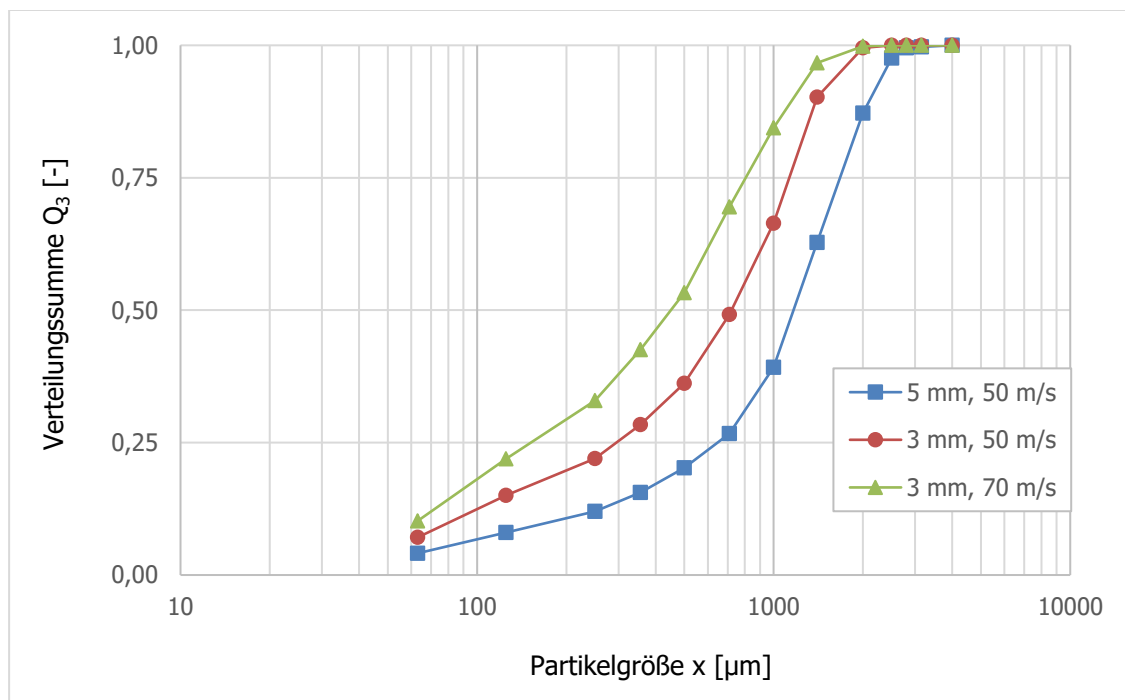


Abbildung 5.2-1: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Weizen erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trockensiebung)

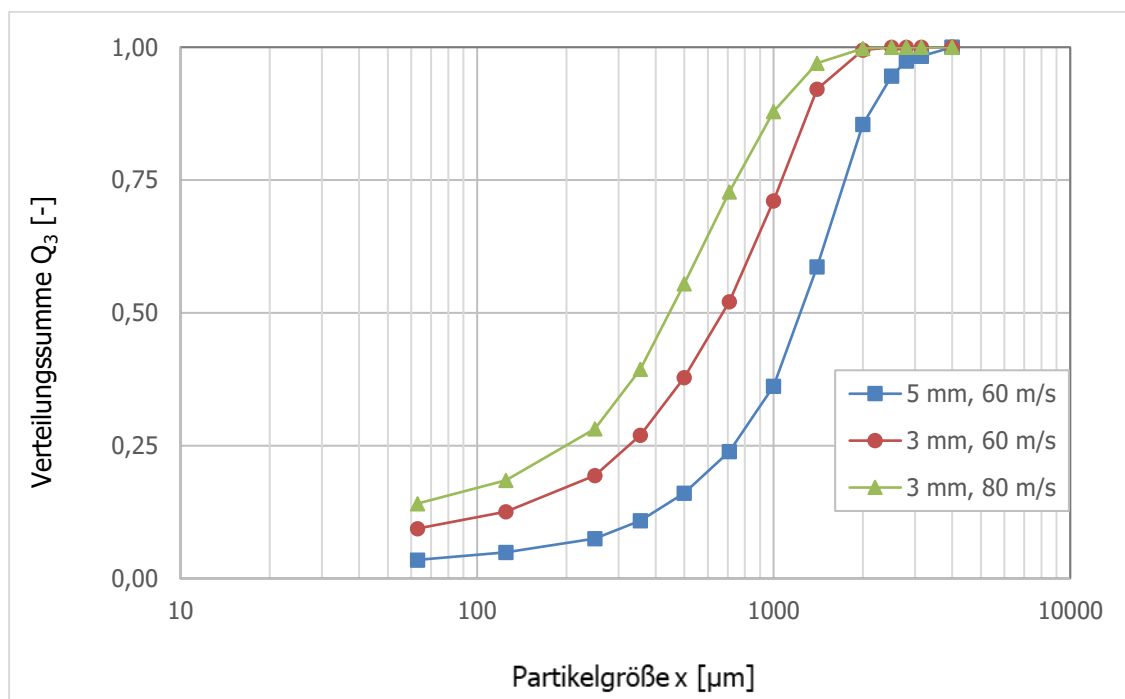


Abbildung 5.2-2: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Gerste erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trockensiebung)

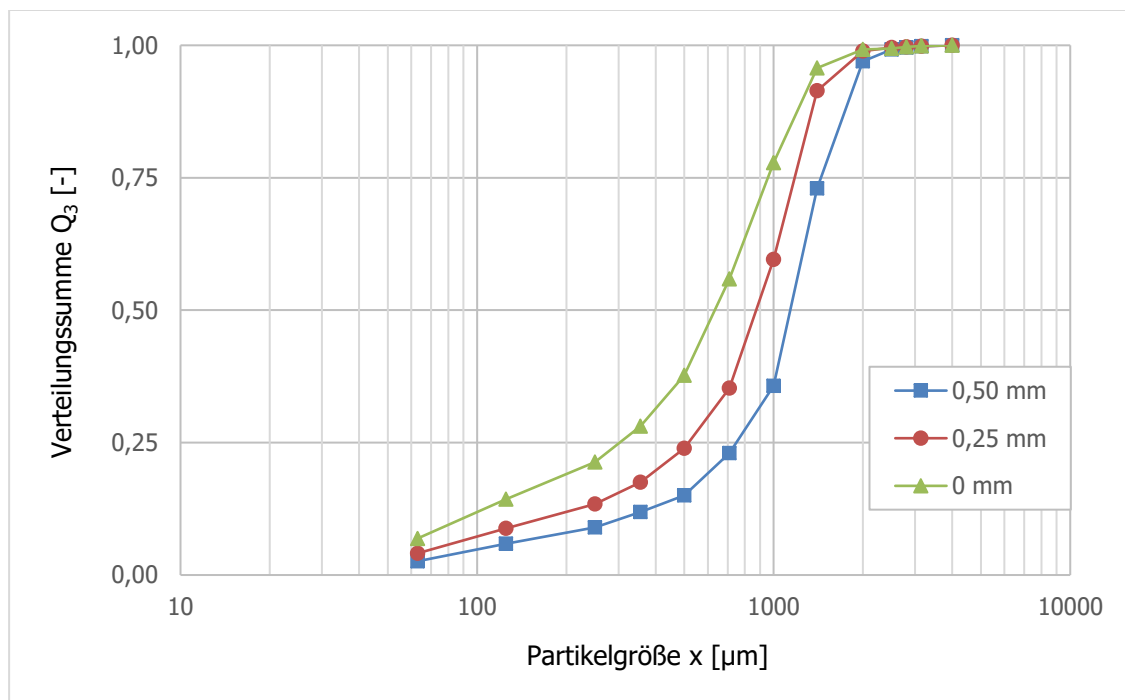


Abbildung 5.2-3: Partikelgrößenverteilung der mit der Walzenmühle aus Weizen erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trockensiebung)

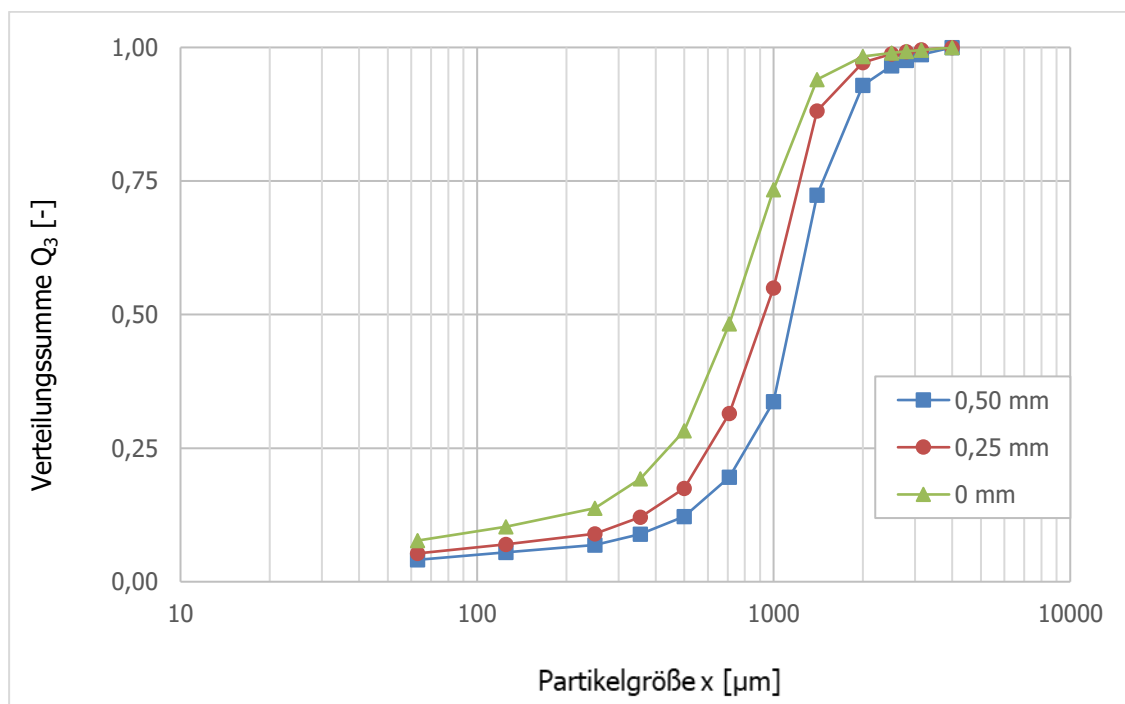


Abbildung 5.2-4: Partikelgrößenverteilung der mit der Walzenmühle aus Gerste erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trockensiebung)

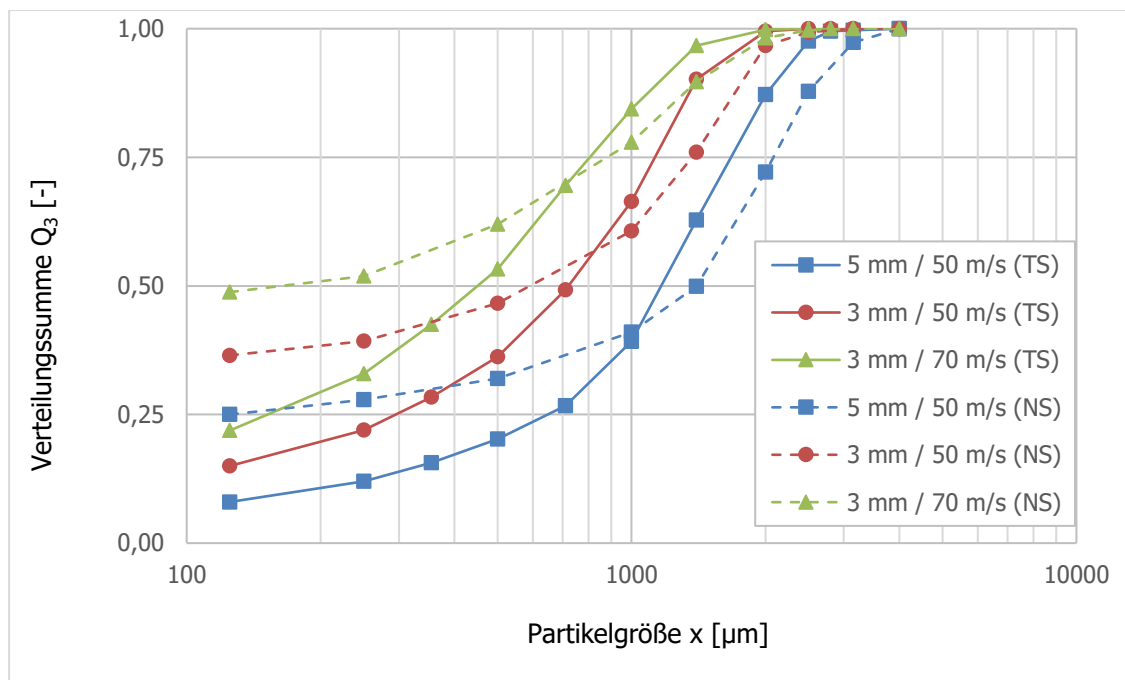


Abbildung 5.2-5: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Weizen erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trocken- und Nasssiebung)

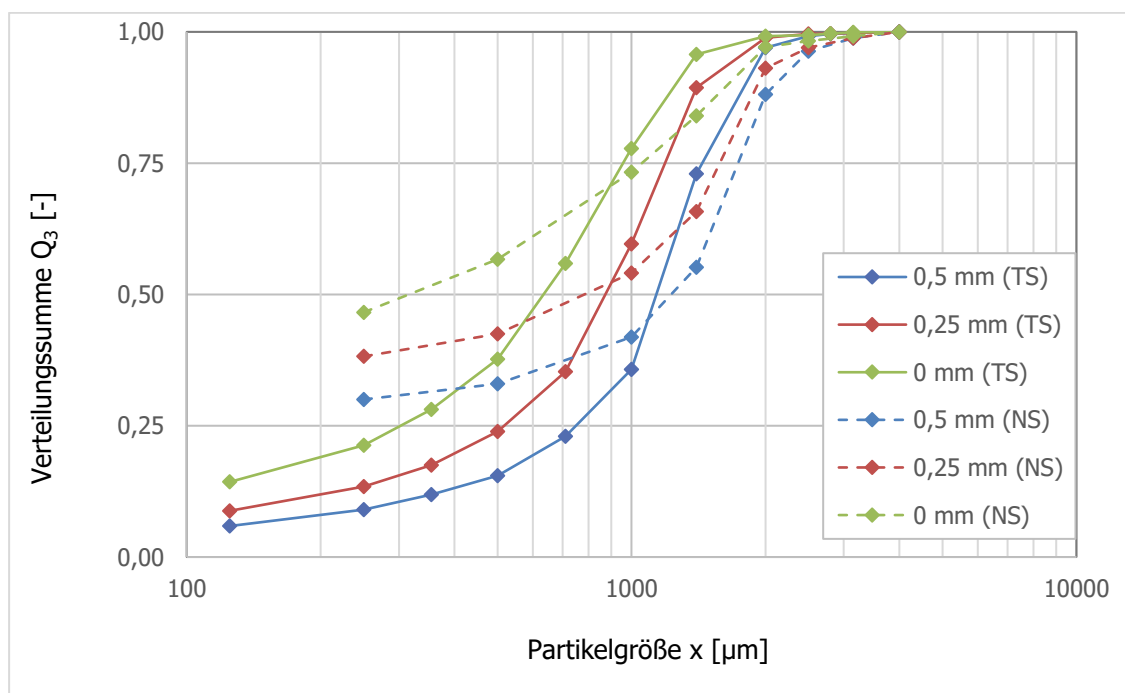


Abbildung 5.2-6: Partikelgrößenverteilung der mit der Walzenmühle aus Weizen erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trocken- und Nasssiebung)

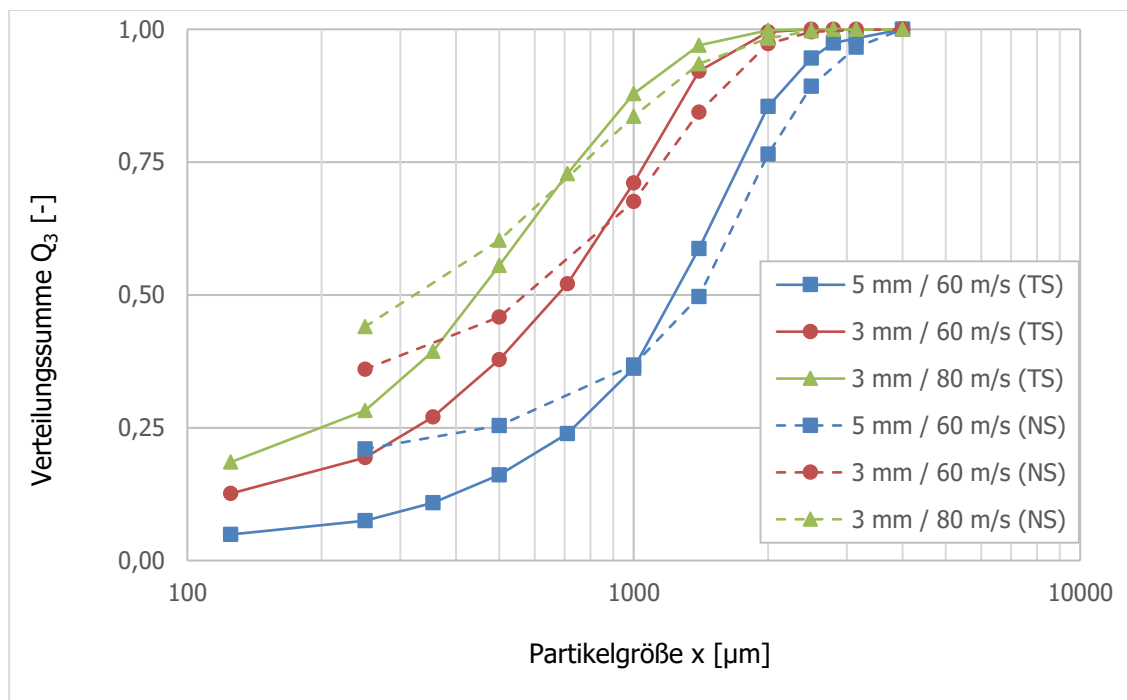


Abbildung 5.2-7: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Gerste erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trocken- und Nasssiebung)

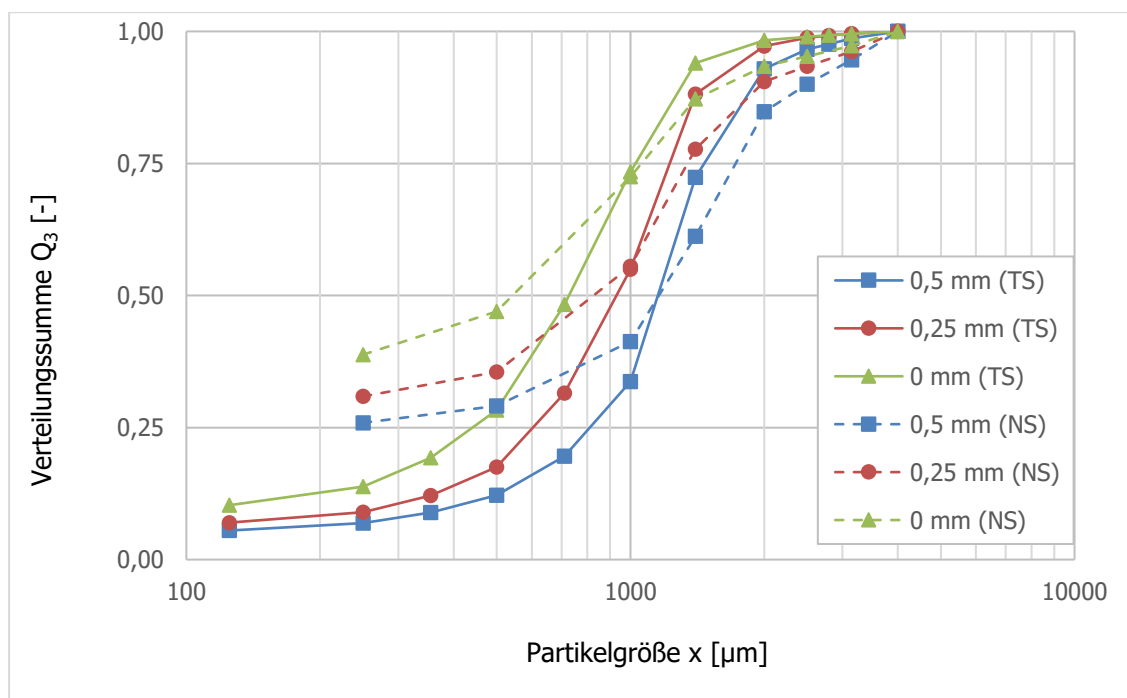


Abbildung 5.2-8: Partikelgrößenverteilung der mit der Walzenmühle aus Gerste erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trocken- und Nasssiebung)

5.3 Systematische Untersuchungen zur Nachzerkleinerung von Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukten beim Pelletieren

Die mittels Hammer- und Walzenmühle definiert zu jeweils drei unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen zerkleinerten Einzelfuttermittel bildeten die Ausgangsprodukte für die Untersuchungen der Nachzerkleinerung beim Pelletieren. Um die Einflüsse der unterschiedlichen Ausgangsmaterialien, des Matrizenbohrungsdurchmessers sowie der Konditionierung mit Sattdampf auf die Nachzerkleinerung beim Pelletieren zu ermitteln, wurden die jeweils sechs, durch unterschiedliche Partikelgrößenverteilungen gekennzeichneten Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukte mit einer Labor-Flachmatrizenpresse pelletiert. Für die Untersuchungen wurden Matrizen mit sämtlichen ganzzahligen Bohrungsdurchmessern von 2 bis 6 mm eingesetzt, die den Größenbereich üblicher Mischfutterpellets umfassen. Das Pressverhältnis (Quotient von Bohrungsdurchmesser und Bohrungskanallänge bzw. Pressweg) wurde im Hinblick auf die Herstellung hinreichend stabiler Presslinge und in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit gewählt. Bei den für die Versuchseinstellungen verwendeten Matrizen lag das Pressverhältnis zwischen 1:3 und 1:6. Daneben variierte der mit zunehmendem Bohrungsdurchmesser konstruktionsbedingt steigende freie Anteil an der von den Kollern überrollten Matrizenarbeitsfläche erheblich. Sämtliche Versuchseinstellungen wurden für jede Kombination aus einem Zerkleinerungsprodukt und einem Matrizenbohrungsdurchmesser jeweils unter drei Konditionierungsbedingungen durchgeführt. Neben einer Referenzuntersuchung, in der die Zerkleinerungsprodukte trocken, also ohne Konditionierung, in die Presse gegeben wurden, wurden sie in den beiden weiteren Versuchseinstellungen vor der Pressagglomeration jeweils schwach (Zugabe von 1 % Sattdampf) sowie intensiv (Zugabe von 3 % Sattdampf) konditioniert.

Die Partikelgrößenverteilung im pelletierten Material wurde nach dem Auflösen der Presslinge mittels Nasssiebung der Primärpartikel bestimmt und mit der Partikelgrößenverteilung des jeweiligen Ausgangs- bzw. Zerkleinerungsprodukts verglichen, um die Nachzerkleinerung zu bewerten. Ursprünglich war vorgesehen, die Nachzerkleinerung anhand der durch das Pelletieren bewirkten Veränderung der mittleren Partikelgröße (d_{50} -Wert) und der Steigung der Summenverteilungsfunktionen (entsprechend der Trennschärfe, also dem Quotienten aus d_{25} - und d_{75} -Wert) zu beurteilen. Beide Parameter konnten aufgrund der bereits in Kapitel 5.2 diskutierten systematischen Unterschiede zwischen den mit der Trocken- und mit der Nasssiebung ermittelten Partikelgrößenverteilungen nicht herangezogen werden, weil die mit der Nasssiebung ermittelten Partikelgrößenverteilungen durch einen erheblich höheren Feingutanteil

gekennzeichnet sind, so dass die d_{25} -Werte und – in den bei Weitem meisten Fällen – auch die d_{50} -Werte der Primärpartikelgrößenverteilungen unterhalb der Erfassungsgrenze der Siebreihe liegen. Zur Charakterisierung der Partikelgrößenverteilungen und zur Bewertung des Nachzerkleinerungseffekts wurden daher die Veränderungen des d_{75} -Wertes sowie des ebenfalls aus den Summenverteilungen zu entnehmenden Grobanteils ($> 1.000 \mu\text{m}$) herangezogen. Obwohl beide Parameter primär aufgrund ihrer Verfügbarkeit gewählt wurden, ist der Anteil der $1.000 \mu\text{m}$ überschreitenden Partikel im Mischfutter eine in Verbindung mit der Tiergesundheit von Mastschweinen häufig diskutierte Größe [Kamphues et al. (2007)]. Ein Steigungsparameter kam für die Beurteilung der Nachzerkleinerung aufgrund des überwiegend flachen Verlaufs der Summenverteilungsfunktionen nicht in Frage und auch auf den in der Verfahrenstechnik verbreiteten Zerkleinerungsgrad, den Quotienten aus den Größtkorndurchmessern von Aufgabe- und Zerkleinerungsprodukt, konnte nicht zurückgegriffen werden, da eine hinreichend differenzierte Erfassung der maximalen Korngrößen mit der Nasssiebung nicht möglich war.

Im Zuge der systematischen Untersuchungen zur Nachzerkleinerung wurden die zuvor hergestellten Zerkleinerungsprodukte unter Modifikation der aufgeführten Maschinen- und Prozessparameter mittels Pressagglomeration zu Pellets verarbeitet. Die durch Nasssiebung der aufgelösten Presslinge ermittelten Primärpartikelgrößenverteilungen sind in Abbildungen der jeweiligen Summenverteilung des Ausgangsmaterials gegenübergestellt. Die aus den ermittelten Partikelgrößenverteilungen resultierenden d_{75} -Werte sowie die drei Klassen ($< 250 \mu\text{m}$, $250 - 1.000 \mu\text{m}$ und $> 1.000 \mu\text{m}$) zugeordneten Primärpartikelgrößen sind in Tabellen zusammengestellt. Ergänzend sind die prozentual normierten Quotienten aus dem jeweiligen Grobanteil ($> 1.000 \mu\text{m}$) des pelletierten Materials und des eingesetzten Zerkleinerungsprodukts aufgelistet, die dem beim Pelletieren nicht stärker als bis zur Klassengrenze zerkleinerten Anteil des im aufgegebenen Zerkleinerungsprodukt enthaltenen Grobguts entspricht.

Die Primärpartikelgrößenverteilungen des mit der Hammermühle zum groben Zerkleinerungsprodukt vermahlenen und ohne Konditionierung pelletierten Weizens sind in **Abbildung 5.3-1** dargestellt. Der gestaffelte Verlauf der Summenverteilungsfunktionen zeigt eine plausible Abhängigkeit vom Bohrungsdurchmesser der verwendeten Matrizen – mit abnehmendem Bohrungsdurchmesser weisen die Nachzerkleinerungsprodukte eine jeweils feinere Partikelgrößenverteilung auf. Die Kurven verlaufen eng und weitgehend parallel, bis sie bei einer gemeinsamen maximalen Partikelgröße aufeinandertreffen. Der anhand der Veränderung der Partikelgrößenverteilungen gegenüber der als Referenz aufgeführten

Summenverteilung des zerkleinerten Ausgangsmaterials zu beurteilende Nachzerkleinerungseffekt ist erheblich. Selbst der unter Verwendung der Matrize mit 6 mm- Bohrungen pelletierte grobe Weizen weist im Vergleich zum Ausgangsmaterial etwa den doppelten Feingut- ($< 250 \mu\text{m}$) sowie den halben Grobgutanteil ($> 1.000 \mu\text{m}$) auf. Die signifikante Nachzerkleinerung beim Pelletieren betrifft den gesamten erfassten Partikelgrößenbereich. Der für die Partikelgrößenverteilung des Ausgangsmaterials besonders steil verlaufende Abschnitt der Summenverteilungsfunktion im Bereich größerer Partikel ist bei den Primärpartikelgrößenverteilungen des pelletierten Materials kaum noch zu erkennen. Die aus den Referenzuntersuchungen mit konditionierten Zerkleinerungsprodukten resultierenden Summenverteilungen sind in den **Abbildungen 5.3-2** (1 % Sattedampf) und **5.3- 3** (3 % Sattedampf) dargestellt. Aus ihnen ist ein maßgeblicher Effekt der Konditionierung auf die Nachzerkleinerung beim Pelletieren abzulesen. Die Nachzerkleinerung wird mit zunehmender Intensität des Konditionierens, also mit steigender Dampfungabe reduziert. In den Abbildungen ist das an den geringeren Abständen der Summenverteilungen zur entsprechenden Kennlinie des Ausgangsmaterials zu erkennen. Zugleich kommt es mit der Konditionierung zu einer stärkeren, bis in den Bereich der größten Partikel reichenden Auffächerung der Kurvenschar.

Die Referenzuntersuchungen, die unter Verwendung des mit der Hammermühle zum mittleren und zum feineren Zerkleinerungsprodukt vermahlenen Weizens durchgeführt wurden, führten hinsichtlich der Wirkung des Bohrungsdurchmessers sowie der Konditionierung auf die Nachzerkleinerung beim Pelletieren zu durchaus ähnlichen Resultaten. In den **Abbildungen 5.3-4 bis 5.3-9** sind die Summenverteilungen der Primärpartikelgrößenverteilungen dargestellt. Tendenziell ist mit der zunehmenden Feinheit des pelletierten Ausgangsmaterials ein engerer, paralleler Verlauf der Summenverteilungen festzustellen, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Effekt vorwiegend auf die Abnahme des erfassten Anteils der Zerkleinerungsprodukte zurückzuführen sein sollte. Maßgebliche den Summenverteilungen zu entnehmende Kennwerte der diskutierten Partikelgrößenverteilungen sind in den **Tabellen 5.3-1 bis 5.3-3** zusammengefasst. Neben den mit steigendem Matrizenbohrungsdurchmesser zunehmenden d_{75} -Werten und Anteilen der Grobfraction ($> 1.000 \mu\text{m}$) bzw. abnehmenden Feinfraktionsanteilen ($< 250 \mu\text{m}$) ist den Tabellen zu entnehmen, dass der Anteil der mittleren Partikelfraction ($250 - 1.000 \mu\text{m}$) jeweils zwischen ca. 15 und 25 % liegt und innerhalb der Untersuchungsreihen meist keine systematische Veränderung zeigt. Die vorliegenden Schwankungen des Anteils der Mittelfraction beruhen vermutlich auf der individuellen Position des jeweiligen Materials im Partikelgrößenspektrum. Für die relative Beständigkeit des Grobanteils der unterschiedlichen

eingesetzten Zerkleinerungsprodukte wurden neben ähnlichen auch erheblich streuende Werte gefunden. Prinzipiell waren etwas gleichmäßigere Resultate erwartet worden, wie sie beispielsweise für die Beständigkeit des Grobanteils gegenüber dem Pelletieren ohne Konditionierung ermittelt wurden. Hier steigt die relative Beständigkeit des Grobgutanteils mit zunehmendem Matrizenbohrungsdurchmesser und weitgehend unabhängig vom eingesetzten Zerkleinerungsprodukt schrittweise von etwa 20 % (2 mm Bohrungsdurchmesser) auf etwa 60 % (6 mm Bohrungsdurchmesser).

Die drei mit der Walzenmühle vermahlenden Zerkleinerungsprodukte aus Weizen wurden unter weitgehend identischen Bedingungen pelletiert und hinsichtlich der Primärpartikelgrößenverteilung untersucht. Ursprünglich sollte mit den Versuchseinstellungen die bei Zerkleinerungsprodukten mit vergleichbaren mittleren Partikelgrößen und signifikant geringerer Breite des Partikelgrößenspektrums auftretende Nachzerkleinerung beim Pelletieren charakterisiert werden. Diese Zielstellung war absehbar nur eingeschränkt umzusetzen, nachdem die durch die Nasssiebung der mehlförmigen Getreide bewirkten systematischen Veränderungen bei der Erfassung der Partikelgrößenverteilungen und die damit verbundenen flacheren Verläufe der Summenverteilungsfunktionen die Unterschiede zwischen den Zerkleinerungsprodukten von Hammer- und Walzenmühle reduziert hatten. Unabhängig davon wurden die experimentellen Untersuchungen als Referenzprüfungen zu den bereits dargelegten Versuchen zur Nachzerkleinerung entsprechend der ursprünglichen Versuchsplanung durchgeführt. Die Primärpartikelgrößenverteilungen im pelletierten Material sind in den **Abbildungen 3.5-10 bis 3.5-18** dokumentiert. Wie bereits bei den mit der Hammermühle hergestellten Weizen-Zerkleinerungsprodukten resultieren aus dem ohne Konditionierung durchgeführten Pelletieren des groben Zerkleinerungsprodukts Summenverteilungen, die als Kurvenschar eng und parallel verlaufen. Mit zunehmender Sattdampfzugabe beim Konditionieren fächert sich die Kurvenschar auch hier auf. Die ebenfalls eng und parallel verlaufenden Kurven der unter Verwendung der entsprechenden mittleren und feinen Zerkleinerungsprodukte ermittelten Summenverteilungen werden hingegen mit zunehmender Intensität der Konditionierung jeweils als Kurvenschar in Richtung der als Vergleichsgrößen einbezogenen Summenverteilungsfunktionen der Ausgangsmaterialien verschoben.

Die in den **Tabellen 5.3-4 bis 5.3-6** aufgeführten Daten zur Primärpartikelgrößenverteilung dienen vorrangig der Dokumentation der Versuchsergebnisse. Für direkte Vergleiche sind die Werte zur relativen Beständigkeit des Grobanteils heranzuziehen, also zum Anteil der

Grobfraktion, der den Pelletierprozess ohne erhebliche Nachzerkleinerung überdauert hat. Eine Parallele zum mit der Hammermühle zerkleinerten Weizen besteht darin, dass die für die relative Beständigkeit des Grobanteils der unter jeweils gleichen Bedingungen pelletierten unterschiedlichen Ausgangsmaterialien (grob, mittel, fein) ermittelten Werte überwiegend stark streuen. Ähnliche Beständigkeitswerte sind ausschließlich für die ohne Konditionierung verarbeiteten Materialien zu verzeichnen. Sie entsprechen den für die pelletierten Hammermühlen-Zerkleinerungsprodukte ermittelten Werten und deuten damit auf einen zumindest partiell reproduzierbaren Nachzerkleinerungseffekt beim Pelletieren hin. Als Ursache für die erhebliche Streuung bei den anderen Wertegruppen wurde ein unregelmäßiges Auftreten stabiler Agglomerate angenommen, da sie ausschließlich im Zusammenhang mit dem Konditionieren der Zerkleinerungsprodukte aufgetreten war. Daher war die Streuung der Anlass zur Überprüfung der Nasssiebungen. Im Zuge der Probenvorbereitung wurde das Auflösen von Agglomeraten in der wässrigen Suspension der Primärpartikel sowohl durch manuelle Behandlung (häufiges Rühren und vorsichtiges Zerdrücken mit einem Spatel) als auch durch Beanspruchungen im Ultraschallbad unterstützt. Das Vorgehen führte nicht zu einer signifikanten Abnahme des Grobanteils bzw. zu einer Zunahme der Feinanteile.

Die mit der Hammermühle zu Produkten unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung zerkleinerte Gerste wurde beim Pelletieren in ähnlichem Umfang nachzerkleinert wie der Weizen. Im Vergleich zu den für die Nachzerkleinerung von Weizen ermittelten Summenverteilungsfunktionen verlaufen die in den **Abbildungen 3.5-19 bis 3.5-27** dargestellten Summenverteilungen überwiegend in engerem Abstand und kennzeichnen damit gleichförmigere, in etwas geringerem Maße durch die unterschiedlichen Bohrungsdurchmesser der Matrizen beeinflusste Nachzerkleinerungsprodukte. Die mit dem Umfang des Sattdampfzusatzes beim Konditionieren einhergehende Reduzierung der Nachzerkleinerung ist auch bei den Zerkleinerungsprodukten der Gerste festzustellen. Insbesondere bei den Versuchseinstellungen mit größeren Bohrungsdurchmessern ist bei Sattdampfkonditionierung für den Bereich der gröberen Partikel ($> 1.000 \mu\text{m}$) nur eine vergleichsweise geringe Nachzerkleinerung festzustellen. Die Ursache für diesen Unterschied gegenüber dem Weizen könnte in den flexibleren faserreichen Anteilen der Gerste und somit in der abweichenden stofflichen Zusammensetzung liegen. Die der Charakterisierung der in den Versuchseinstellungen erzeugten Primärpartikelgrößenverteilungen dienenden Daten sind in den **Tabellen 5.3-7 bis 5.3-9** zusammengestellt. Während sich zumindest bei den ohne Konditionierung durchgeführten Versuchseinstellungen aus den

Primärpartikelgrößenverteilungen der pelletierten Weizen-Zerkleinerungsprodukte ein gleichartiges Zerkleinerungsverhalten erkennen ließ, streuen die für den Vergleich herangezogenen Werte zur relativen Beständigkeit des Grobanteils bei den pelletierten Gerste-Zerkleinerungsprodukten generell. Da sich auch aus den relativen Veränderungen der d_{75} -Werte keine über eine einzelne Reihe von Versuchseinstellungen hinaus reichenden Korrelationen zu den resultierenden Partikelgrößenverteilungen ergeben, bietet auch dieser Parameter keine Möglichkeit, eine generell gültige Abhängigkeit der Nachzerkleinerungsintensität von den jeweils eingesetzten Matrizen abzuleiten.

Aus den Referenzuntersuchungen, bei denen die mit der Walzenmühle erzeugten Gerste-Zerkleinerungsprodukte pelletiert wurden, ergaben sich im Hinblick auf die Primärpartikelgrößenverteilungen grundsätzlich ähnliche Tendenzen. Die resultierenden Summenverteilungsfunktionen sind in den **Abbildungen 3.5-28 bis 3.5-36** dokumentiert. Abgesehen von der bereits diskutierten engen Staffelung innerhalb der Kurvenscharen sowie der Wirkung des Konditionierens, ist auffällig, dass die größeren Partikel beim Pelletieren in größerem Umfang einer Nachzerkleinerung unterliegen, als bei den Referenzuntersuchungen, bei denen mit der Hammermühle zerkleinerte Gerste eingesetzt wurde. Im Zusammenhang mit dem Spelzenanteil der Gerste, der mit der Walzenmühle eher unvollständig zu zerkleinern ist, wäre für den Grobanteil in der Gerste hier eher eine größere Stabilität gegenüber der Nachzerkleinerung bei der Pressagglomeration zu erwarten gewesen. Die betreffenden Daten zur relativen Beständigkeit des Grobanteils sind in den **Tabellen 5.3-10 bis 5.3-12** dokumentiert.

In ergänzenden Versuchseinstellungen wurde die Wirkung unterschiedlicher Presskanallängen auf die Nachzerkleinerung untersucht. Bei den Untersuchungen wurden die jeweils groben mit der Hammermühle erzeugten Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukte eingesetzt, die im Anschluss an die Konditionierung mit 3 % Sattdampf zu 5 mm-Pellets gepresst wurden. Für die Referenzuntersuchungen wurden jeweils zwei Matrizen mit Nennabmessungen von 5x20 mm (Pressverhältnis 1:4) und 5x50 mm (Pressverhältnis 1:10) verwendet.

Den in den **Abbildungen 5.3-37 und 5.3-38** dargestellten Summenverteilungsfunktionen der Ausgangskomponenten sowie der Primärpartikelgrößenverteilung in den Pellets ist zu entnehmen, dass die Intensität der Nachzerkleinerung mit der Presskanallänge zunimmt. Bei einem Vergleich mit den für die unterschiedlichen Matrizenbohrungsdurchmesser systematisch ermittelten Nachzerkleinerungseffekten (siehe Abbildung 5.3-3 bzw. 5.3-21) entspricht die durch

den Wechsel vom kürzeren (5x20 mm) zum längeren (5x50 mm) Presskanal bewirkte intensivere Nachzerkleinerung beim Weizen der Differenz zum nächst kleineren Matrizenbohrungsdurchmesser von 4 mm. Für das Gerste-Zerkleinerungsprodukt entspricht die Verschiebung der Summenverteilungsfunktion der Differenz, die aus dem Übergang zu einem Matrizenbohrungsdurchmesser von 3 mm resultiert. Der auf einen längeren Pressweg zurückzuführende zusätzliche Nachzerkleinerungseffekt war zwar grundsätzlich erwartet worden, nicht jedoch in der ermittelten Größenordnung. Ob er neben der stärkeren Reibungsbeanspruchung beim Matrizendurchgang trotz des gewählten minimalen Kollerspalts auch auf die Beanspruchung zurückgestauten Materials über den Matrizenbohrungen zurückzuführen ist, lässt sich nicht belegen. In **Tabelle 5.3-13** sind maßgebliche Kennwerte zur Charakterisierung der Pellets und der Primärpartikelgrößenverteilung zusammengestellt. Den Daten ist die mit der Wahl längerer Presskanäle angestrebte höhere Pelletstabilität zu entnehmen, wie auch die maßgeblichen unerwünschten Veränderungen der Primärpartikelgrößenverteilung. Die mittlere Partikelgröße sowie der Grobanteil sinken signifikant.

Tabelle 5.3-1: Primärpartikelgrößenverteilung von Weizen (grob) nach Zerkleinerung mit der Hammermühle (5 mm / 50 m/s) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		488 μm	591 μm	703 μm	869 μm	1.141 μm
< 250 μm		64,3 %	61,1 %	59,1 %	55,1 %	50,6 %
250 – 1.000 μm		21,3 %	22,0 %	22,5 %	22,6 %	21,5 %
> 1.000 μm		14,4 %	16,9 %	18,4 %	22,3 %	27,9 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		606 μm	676 μm	974 μm	1.296 μm	1.622 μm
< 250 μm		58,6 %	54,9 %	52,4 %	50,8 %	44,5 %
250 – 1.000 μm		26,1 %	28,4 %	23,2 %	18,8 %	16,7 %
> 1.000 μm		15,3 %	16,7 %	24,4 %	30,4 %	38,8 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		728 μm	1.016 μm	1.384 μm	1.747 μm	1.886 μm
< 250 μm		55,7 %	51,5 %	44,7 %	37,6 %	33,4 %
250 – 1.000 μm		26,2 %	23,1 %	20,6 %	17,2 %	15,5 %
> 1.000 μm		18,1 %	25,4 %	34,7 %	45,2 %	51,1 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		24,4 %	28,6 %	31,2 %	37,8 %	47,3 %
1 % Sattdampf		25,9 %	28,3 %	41,4 %	51,5 %	65,8 %
3 % Sattdampf		30,7 %	43,1 %	58,8 %	76,6 %	86,6 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 59,0 %				

Tabelle 5.3-2: Primärpartikelgrößenverteilung von Weizen (mittel) nach Zerkleinerung mit der Hammermühle (3 mm / 50 m/s) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		335 μm	407 μm	456 μm	688 μm	928 μm
< 250 μm		71,4 %	67,8 %	63,9 %	58,8 %	55,3 %
250 – 1.000 μm		22,3 %	24,1 %	24,1 %	24,2 %	21,5 %
> 1.000 μm		6,3 %	8,1 %	12,0 %	17,0 %	23,2 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		522 μm	693 μm	753 μm	873 μm	1.070 μm
< 250 μm		62,6 %	58,6 %	56,3 %	53,7 %	49,8 %
250 – 1.000 μm		23,5 %	24,5 %	24,8 %	25,0 %	23,6 %
> 1.000 μm		13,9 %	16,9 %	18,9 %	21,3 %	26,6 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		821 μm	912 μm	1.004 μm	1.103 μm	1.216 μm
< 250 μm		59,0 %	54,2 %	49,6 %	44,1 %	41,7 %
250 – 1.000 μm		20,5 %	23,3 %	25,3 %	27,5 %	25,1 %
> 1.000 μm		20,5 %	22,5 %	25,1 %	28,4 %	33,2 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		16,0 %	20,6 %	30,5 %	43,3 %	59,0 %
1 % Sattdampf		35,4 %	43,0 %	48,1 %	54,2 %	67,7 %
3 % Sattdampf		52,2 %	57,3 %	63,9 %	72,3 %	84,5 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 39,3 %				

Tabelle 5.3-3: Primärpartikelgrößenverteilung von Weizen (fein) nach Zerkleinerung mit der Hammermühle (3 mm / 70 m/s) und dem Pelletieren

	Matrizenlochung				
	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung					
PGV (d_{75})	293 μm	340 μm	415 μm	421 μm	516 μm
< 250 μm	72,8 %	70,4 %	67,8 %	64,8 %	60,3 %
250 – 1.000 μm	23,3 %	24,5 %	23,9 %	27,0%	26,7 %
> 1.000 μm	3,9 %	5,1 %	8,3 %	8,2 %	13,0 %
1 % Sattdampf					
PGV (d_{75})	448 μm	474 μm	492 μm	616 μm	761 μm
< 250 μm	67,2 %	65,7 %	63,3 %	58,4 %	55,6 %
250 – 1.000 μm	21,5 %	22,6 %	25,8 %	26,9 %	26,8 %
> 1.000 μm	11,3 %	11,7 %	10,9 %	14,7 %	17,6 %
3 % Sattdampf					
PGV (d_{75})	602 μm	663 μm	730 μm	766 μm	822 μm
< 250 μm	63,9 %	62,8 %	60,4 %	58,3 %	55,3 %
250 – 1.000 μm	20,8 %	20,5 %	22,6 %	24,0 %	25,3 %
> 1.000 μm	15,3 %	16,7 %	17,0 %	17,7 %	19,4 %
	relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung	17,6 %	23,1 %	37,6 %	37,1 %	58,8 %
1 % Sattdampf	51,1 %	52,9 %	49,3 %	66,5 %	79,6 %
3 % Sattdampf	69,2 %	75,6 %	76,9 %	80,1 %	87,8 %
Zerkleinerungsprodukt	Anteil > 1.000 μm : 22,1 %				

Tabelle 5.3-4: Primärpartikelgrößenverteilung von Weizen (grob) nach Zerkleinerung mit der Walzenmühle (0,50 mm) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		451 μm	586 μm	714 μm	881 μm	1.103 μm
< 250 μm		66,7 %	63,4 %	59,9 %	56,5 %	51,8 %
250 – 1.000 μm		20,4 %	20,3 %	22,6 %	23,2 %	20,6 %
> 1.000 μm		12,9 %	16,3 %	17,5 %	20,3 %	27,6 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		639 μm	807 μm	1.015 μm	1.188 μm	1.482 μm
< 250 μm		61,2 %	57,0 %	54,1 %	51,9 %	45,7 %
250 – 1.000 μm		22,9 %	22,6 %	20,5 %	18,2 %	15,8 %
> 1.000 μm		15,9 %	20,4 %	25,4 %	29,9 %	38,5 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		790 μm	1.022 μm	1.051 μm	1.552 μm	1.660 μm
< 250 μm		56,9 %	52,7 %	45,8 %	38,9 %	35,7 %
250 – 1.000 μm		23,4 %	21,8 %	17,6 %	16,1 %	12,9 %
> 1.000 μm		19,7 %	25,5 %	36,6 %	45,0 %	51,4 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		22,2 %	28,1 %	30,1 %	34,9 %	47,5 %
1 % Sattdampf		27,3 %	35,1 %	43,7 %	51,5 %	66,3 %
3 % Sattdampf		33,9 %	43,9 %	63,0 %	77,5 %	88,5 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 58,1 %				

Tabelle 5.3-5: Primärpartikelgrößenverteilung von Weizen (mittel) nach Zerkleinerung mit der Walzenmühle (0,25 mm) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		402 μm	466 μm	582 μm	692 μm	972 μm
< 250 μm		68,6 %	64,3 %	61,5 %	59,4 %	54,8 %
250 – 1.000 μm		22,9 %	23,8 %	23,7 %	23,3 %	20,9 %
> 1.000 μm		8,5 %	11,9 %	14,8 %	17,3 %	24,3 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		553 μm	682 μm	813 μm	959 μm	1.129 μm
< 250 μm		60,1 %	56,7 %	54,9 %	52,0 %	48,6 %
250 – 1.000 μm		25,1 %	26,7 %	25,4 %	24,2 %	23,4 %
> 1.000 μm		14,8 %	16,6 %	19,7 %	23,8 %	28,0 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		878 μm	942 μm	1.064 μm	1.138 μm	1.262 μm
< 250 μm		58,1 %	53,3 %	48,3 %	43,5 %	41,1 %
250 – 1.000 μm		20,3 %	23,4 %	24,7 %	26,6 %	23,1 %
> 1.000 μm		21,6 %	23,3 %	27,0 %	29,9 %	35,8 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		18,5 %	25,9 %	32,2 %	37,7 %	52,9 %
1 % Sattdampf		32,2 %	36,2 %	42,9 %	51,9 %	61,0 %
3 % Sattdampf		47,1 %	50,8 %	58,8 %	65,1 %	78,0 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 45,9 %				

Tabelle 5.3-6: Primärpartikelgrößenverteilung von Weizen (fein) nach Zerkleinerung mit der Walzenmühle (0 mm) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d ₇₅)		315 µm	365 µm	428 µm	479 µm	570 µm
< 250 µm		71,6 %	69,1 %	67,8 %	65,1 %	60,1 %
250 – 1.000 µm		23,6 %	25,6 %	23,6 %	24,2 %	26,6 %
> 1.000 µm		4,8 %	5,3 %	8,6 %	10,7 %	13,3 %
1 % Sattdampf						
PGV (d ₇₅)		512 µm	562 µm	587 µm	682 µm	785 µm
< 250 µm		64,1 %	63,2 %	61,6 %	56,8 %	53,4 %
250 – 1.000 µm		23,5 %	22,4 %	22,4 %	26,6 %	27,7 %
> 1.000 µm		12,4 %	14,4 %	16,0 %	16,6 %	18,9 %
3 % Sattdampf						
PGV (d ₇₅)		566 µm	675 µm	733 µm	814 µm	904 µm
< 250 µm		63,0 %	61,4 %	58,9 %	55,1 %	51,7 %
250 – 1.000 µm		21,9 %	22,5 %	24,6 %	26,0 %	26,5 %
> 1.000 µm		15,1 %	16,1 %	16,5 %	18,9 %	21,8 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 µm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		18,0 %	18,9 %	32,2 %	40,1 %	49,8 %
1 % Sattdampf		46,4 %	53,9 %	59,9 %	62,2 %	70,8 %
3 % Sattdampf		56,6 %	60,3 %	61,8 %	70,8 %	81,6 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 µm : 26,7 %				

Tabelle 5.3-7: Primärpartikelgrößenverteilung von Gerste (grob) nach Zerkleinerung mit der Hammermühle (5 mm / 60 m/s) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		788 μm	883 μm	1.110 μm	1.360 μm	1.608 μm
< 250 μm		56,8 %	53,2 %	50,1 %	46,3 %	43,2 %
250 – 1.000 μm		23,8 %	25,2 %	22,4 %	20,6 %	18,2 %
> 1.000 μm		19,4 %	21,6 %	27,5 %	33,1 %	38,6 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		1.007 μm	1.144 μm	1.250 μm	1.440 μm	1.624 μm
< 250 μm		52,5 %	51,4 %	48,3 %	44,6 %	41,0 %
250 – 1.000 μm		22,4 %	20,8 %	21,2 %	19,2 %	18,8 %
> 1.000 μm		25,1 %	27,8 %	30,5 %	36,2 %	40,2 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		1.087 μm	1.230 μm	1.384 μm	1.677 μm	1.822 μm
< 250 μm		50,3 %	48,0 %	44,7 %	39,6 %	35,4 %
250 – 1.000 μm		22,8 %	21,7 %	20,6 %	17,2 %	15,5 %
> 1.000 μm		26,9 %	30,3 %	34,7 %	43,2 %	50,9 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		30,7 %	34,2 %	43,5 %	52,4 %	61,1 %
1 % Sattdampf		39,7 %	44,0 %	48,3 %	57,3 %	63,6 %
3 % Sattdampf		42,6 %	47,9 %	54,9 %	68,4 %	80,5 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 63,2 %				

Tabelle 5.3-8: Primärpartikelgrößenverteilung von Gerste (mittel) nach Zerkleinerung mit der Hammermühle (3 mm / 60 m/s) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		548 μm	616 μm	833 μm	910 μm	946 μm
< 250 μm		60,2 %	56,9 %	53,5 %	50,4 %	47,7 %
250 – 1.000 μm		28,8 %	30,3 %	26,5 %	27,4 %	29,2 %
> 1.000 μm		11,0 %	12,8 %	20,0 %	22,2 %	23,1 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		632 μm	693 μm	858 μm	988 μm	1.049 μm
< 250 μm		58,1 %	54,6 %	52,9 %	48,2 %	45,2 %
250 – 1.000 μm		28,0 %	28,5 %	25,4 %	27,2 %	28,2 %
> 1.000 μm		13,9 %	16,9 %	21,7 %	24,6 %	26,6 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		720 μm	915 μm	991 μm	1.045 μm	1.123 μm
< 250 μm		56,8 %	52,0 %	49,9 %	45,6 %	43,3 %
250 – 1.000 μm		26,5 %	25,4 %	25,4 %	27,9 %	27,2 %
> 1.000 μm		16,7 %	22,6 %	24,7 %	26,5 %	29,5 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		34,0 %	39,5 %	61,7 %	68,5 %	71,3 %
1 % Sattdampf		42,9 %	52,2 %	67,0 %	75,9 %	82,1 %
3 % Sattdampf		51,5 %	69,8 %	76,2 %	81,8 %	91,0 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 32,4 %				

Tabelle 5.3-9: Primärpartikelgrößenverteilung von Gerste (fein) nach Zerkleinerung mit der Hammermühle (3 mm / 80 m/s) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		409 μm	432 μm	467 μm	486 μm	533 μm
< 250 μm		65,8 %	64,4 %	63,3 %	62,8 %	58,3 %
250 – 1.000 μm		28,4 %	29,0 %	29,0 %	27,7 %	32,1 %
> 1.000 μm		5,8 %	6,6 %	7,7 %	9,5 %	9,6 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		434 μm	456 μm	494 μm	545 μm	624 μm
< 250 μm		64,1 %	62,9 %	62,4 %	59,9 %	56,8 %
250 – 1.000 μm		29,0 %	29,1 %	28,4 %	29,1 %	31,3 %
> 1.000 μm		6,9 %	8,0 %	9,2 %	11,0 %	11,9 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		503 μm	542 μm	595 μm	730 μm	733 μm
< 250 μm		62,2 %	61,8 %	59,8 %	56,1 %	54,2 %
250 – 1.000 μm		29,2 %	28,5 %	28,0 %	27,8 %	30,8 %
> 1.000 μm		8,6 %	9,7 %	12,2 %	16,1 %	15,0 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		35,4 %	40,2 %	47,0 %	57,9 %	58,5 %
1 % Sattdampf		42,1 %	59,1 %	56,1 %	67,1 %	72,6 %
3 % Sattdampf		52,4 %	59,1 %	74,4 %	98,2 %	91,5 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 16,4 %				

Tabelle 5.3-10: Primärpartikelgrößenverteilung von Gerste (grob) nach Zerkleinerung mit der Walzenmühle (0,5 mm) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		664 μm	788 μm	905 μm	935 μm	1.068 μm
< 250 μm		59,4 %	54,3 %	52,7 %	51,6 %	48,5 %
250 – 1.000 μm		24,6 %	27,3 %	25,1 %	25,3 %	24,6 %
> 1.000 μm		16,0 %	18,4 %	22,2 %	23,1 %	26,9 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		768 μm	844 μm	984 μm	1.034 μm	1.196 μm
< 250 μm		58,2 %	54,0 %	51,8 %	50,0 %	46,7 %
250 – 1.000 μm		22,5 %	25,4 %	23,6 %	24,0 %	23,0 %
> 1.000 μm		19,3 %	20,6 %	24,6 %	26,0 %	30,3 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		857 μm	1.017 μm	1.145 μm	1.225 μm	1.347 μm
< 250 μm		57,6 %	51,3 %	48,5 %	46,7 %	42,4 %
250 – 1.000 μm		21,3 %	23,3 %	21,4 %	20,1 %	20,9 %
> 1.000 μm		21,1 %	25,4 %	30,1 %	33,2 %	36,7 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		27,3 %	31,3 %	37,8 %	39,4 %	45,8 %
1 % Sattdampf		32,9 %	35,1 %	41,9 %	44,3 %	51,6 %
3 % Sattdampf		35,9 %	43,3 %	51,3 %	56,6 %	62,5 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 58,7 %				

Tabelle 5.3-11: Primärpartikelgrößenverteilung von Gerste (mittel) nach Zerkleinerung mit der Walzenmühle (0,25 mm) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d ₇₅)		529 µm	631 µm	734 µm	856 µm	974 µm
< 250 µm		62,3 %	58,4 %	56,1 %	54,2 %	51,7 %
250 – 1.000 µm		28,8 %	29,3 %	27,8 %	25,5 %	24,0 %
> 1.000 µm		8,9 %	12,3 %	16,1 %	20,3 %	24,3 %
1 % Sattdampf						
PGV (d ₇₅)		595 µm	705 µm	797 µm	952 µm	1.066 µm
< 250 µm		59,6 %	56,0 %	53,8 %	51,9 %	49,5 %
250 – 1.000 µm		29,1 %	29,2 %	27,6 %	24,6 %	23,3 %
> 1.000 µm		11,3 %	14,8 %	18,6 %	23,5 %	27,2 %
3 % Sattdampf						
PGV (d ₇₅)		673 µm	765 µm	882 µm	1.027 µm	1.175 µm
< 250 µm		57,3 %	54,2 %	50,8 %	48,9 %	46,0 %
250 – 1.000 µm		29,4 %	29,3 %	27,8 %	25,2 %	22,7 %
> 1.000 µm		13,3 %	16,5 %	21,4 %	25,9 %	31,3 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 µm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		20,0 %	27,6 %	36,2 %	45,6 %	54,6 %
1 % Sattdampf		25,4 %	33,3 %	41,8 %	52,8 %	61,1 %
3 % Sattdampf		29,9 %	37,1 %	48,1 %	58,2 %	70,3 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 µm : 44,5 %				

Tabelle 5.3-12: Primärpartikelgrößenverteilung von Gerste (fein) nach Zerkleinerung mit der Walzenmühle (0 mm) und dem Pelletieren

		Matrizenlochung				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
ohne Konditionierung						
PGV (d_{75})		343 μm	440 μm	504 μm	632 μm	726 μm
< 250 μm		71,3 %	68,3 %	64,5 %	61,8 %	58,9 %
250 – 1.000 μm		22,2 %	23,1 %	23,7 %	22,4 %	23,0 %
> 1.000 μm		6,5 %	8,6 %	11,8 %	15,8 %	18,1 %
1 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		368 μm	463 μm	587 μm	705 μm	801 μm
< 250 μm		70,1 %	67,0 %	63,2 %	58,7 %	55,0 %
250 – 1.000 μm		22,7 %	23,3 %	23,2 %	24,2 %	25,7 %
> 1.000 μm		7,2 %	9,7 %	13,6 %	17,1 %	19,3 %
3 % Sattdampf						
PGV (d_{75})		407 μm	497 μm	669 μm	759 μm	856 μm
< 250 μm		68,6 %	65,7 %	61,4 %	56,3 %	54,2 %
250 – 1.000 μm		29,4 %	29,3 %	27,8 %	25,2 %	22,7 %
> 1.000 μm		9,3 %	11,7 %	15,6 %	17,9 %	20,9 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 μm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
ohne Konditionierung		23,6 %	31,3 %	42,9 %	57,5 %	65,8 %
1 % Sattdampf		33,8 %	35,3 %	49,5 %	62,2 %	70,2 %
3 % Sattdampf		33,8 %	42,5 %	56,7 %	65,1 %	76,0 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 μm : 27,5 %				

Tabelle 5.3-13: Primärpartikelgrößenverteilung von Weizen und Gerste (jeweils grob) nach Zerkleinerung mit der Hammermühle (5 mm / 50 bzw. 60 m/s) und dem Pelletieren (Konditionierung mit 3 % Sattdampf) mit unterschiedlichen Presskanallängen

		Weizen			Gerste	
Nennabmessung (Presskanal)		5 x 20 mm	5 x 50 mm		5 x 20 mm	5 x 50 mm
Abrieb (NHP)		2,6 %	2,0 %		3,1 %	2,4 %
Härte		98 N	122 N		83 N	107 N
PGV (d ₅₀)		810 µm	418 µm		678 µm	295 µm
< 250 µm		37,6 %	43,8 %		40,1 %	48,7 %
250 – 1.000 µm		17,2 %	22,6 %		16,6 %	19,3 %
> 1.000 µm		45,2 %	33,6 %		43,3 %	32,0 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 µm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
		71,5 %	53,2 %		68,5 %	50,6 %
Zerkleinerungsprodukt		Anteil > 1.000 µm : 63,2 %				

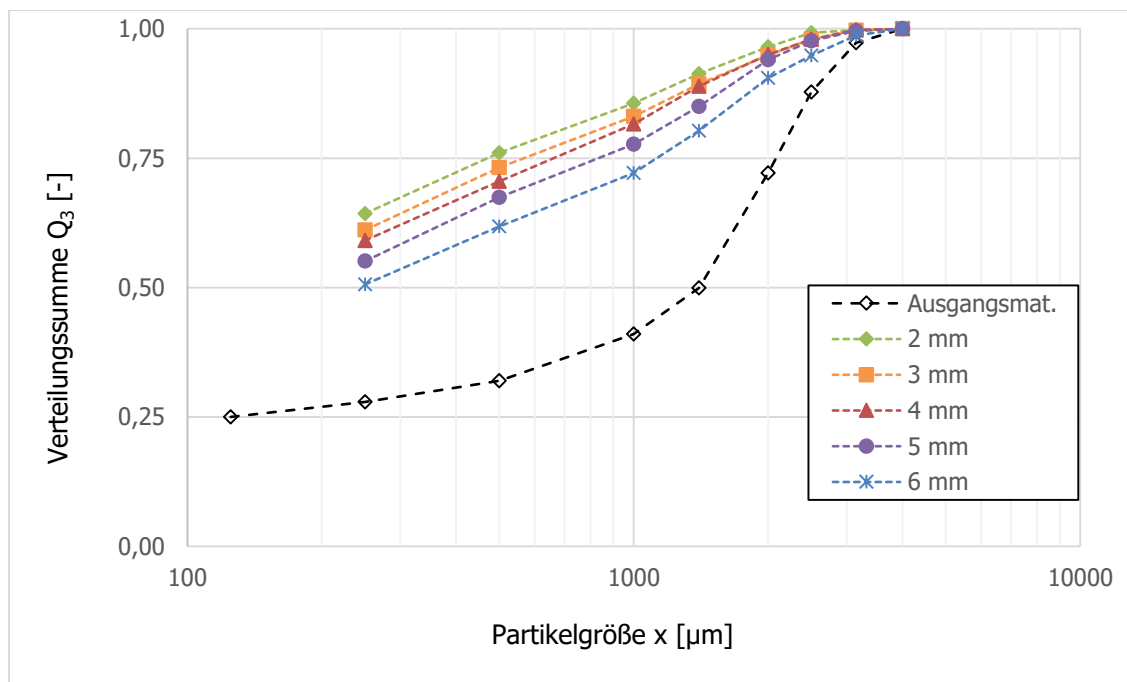


Abbildung 5.3-1: Partikelgrößenverteilung des groben Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 50 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

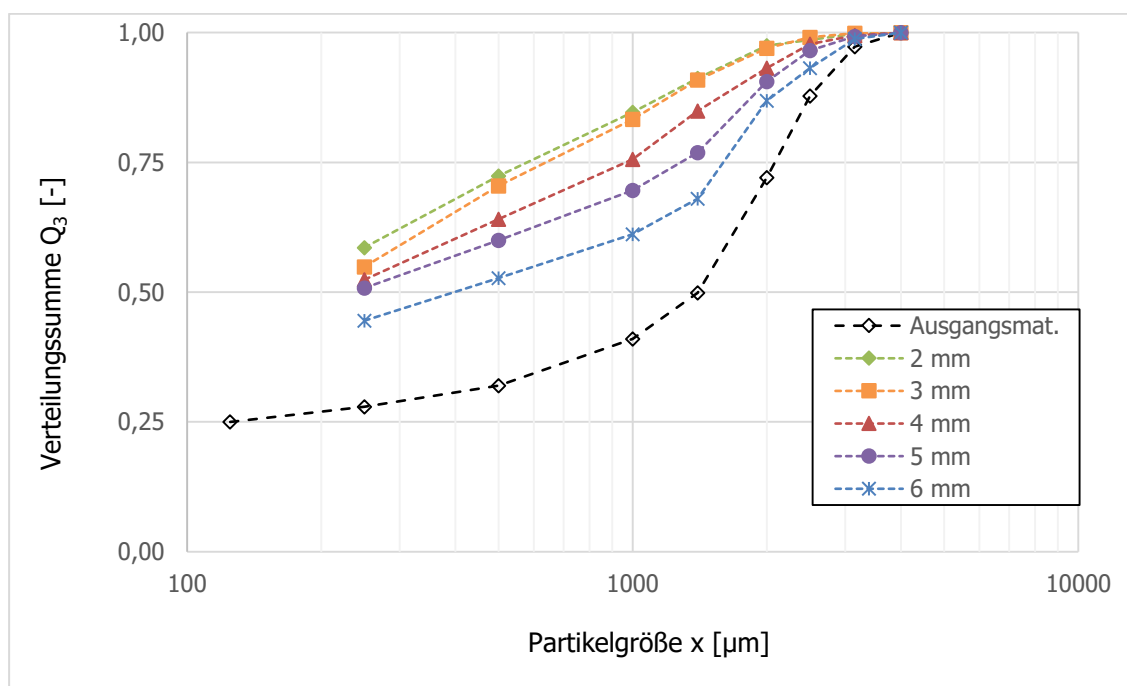


Abbildung 5.3-2: Partikelgrößenverteilung des groben Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 50 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattl.)

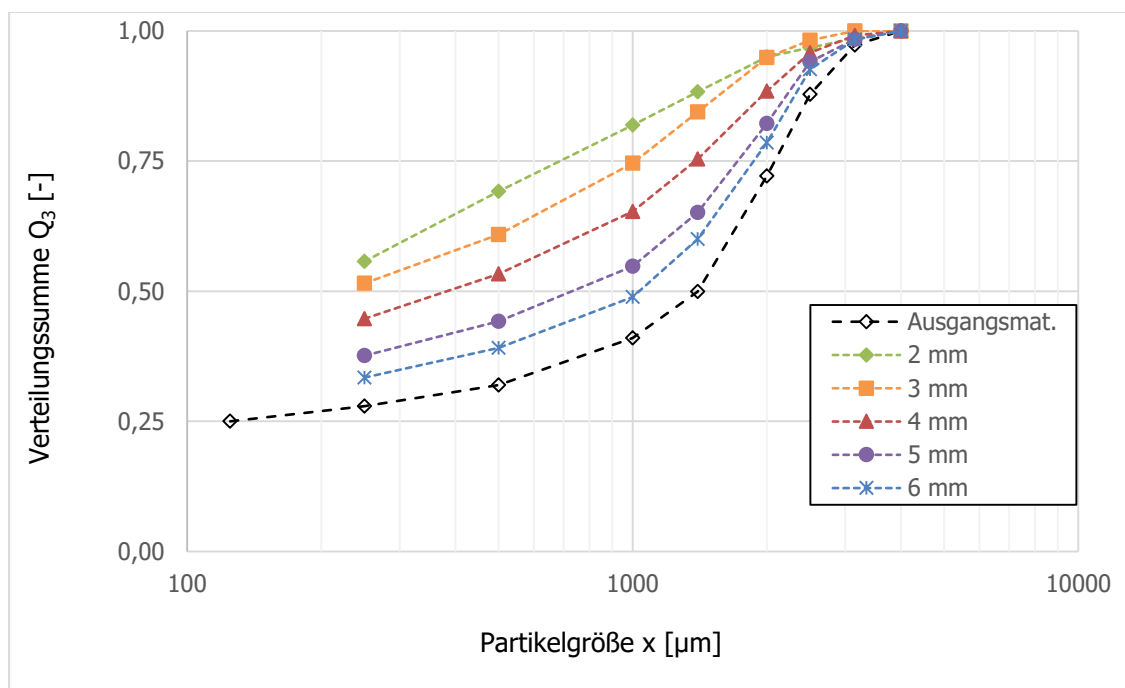


Abbildung 5.3-3: Partikelgrößenverteilung des groben Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 50 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

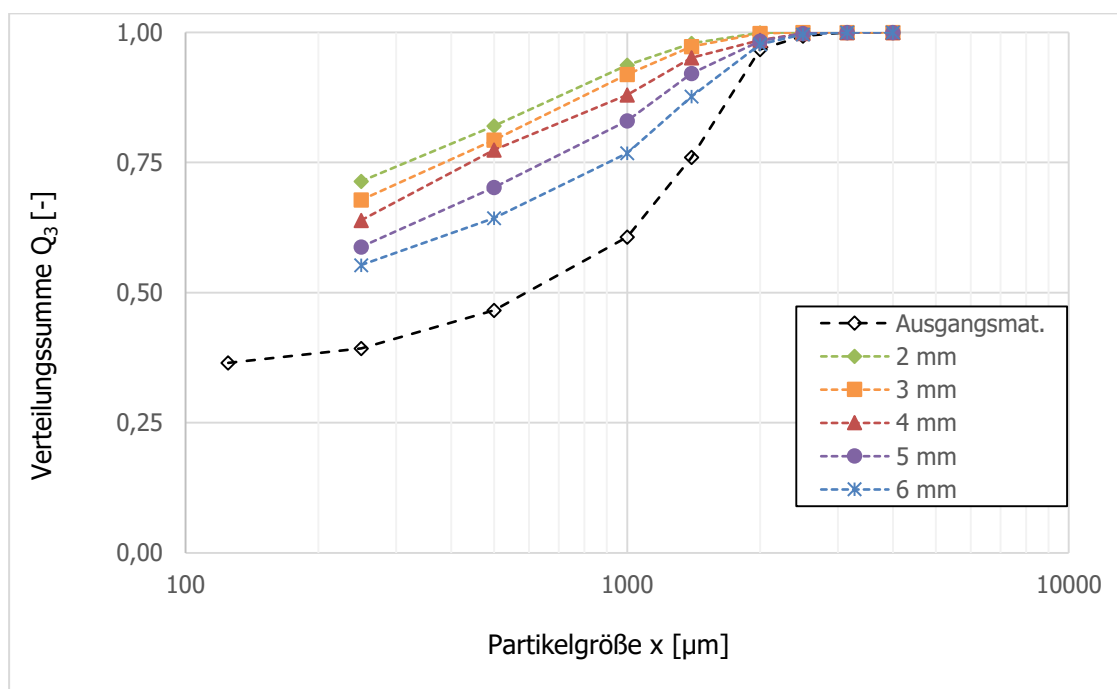


Abbildung 5.3-4: Partikelgrößenverteilung des mittleren Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 50 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

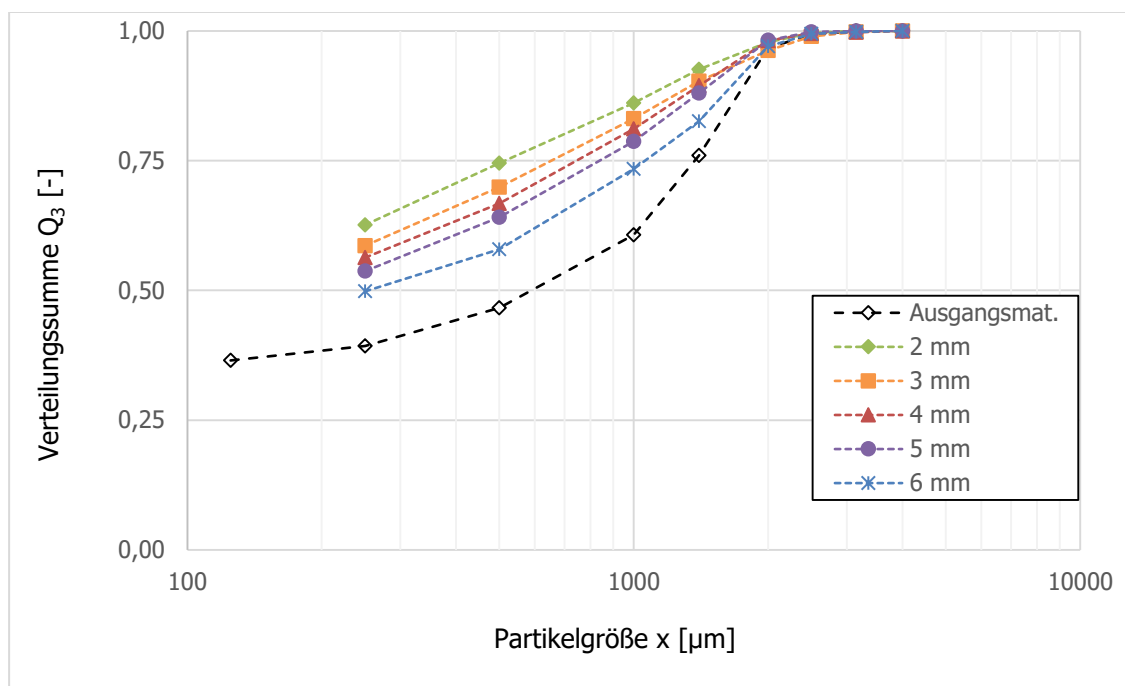


Abbildung 5.3-5: Partikelgrößenverteilung des mittleren Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 50 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattd.)

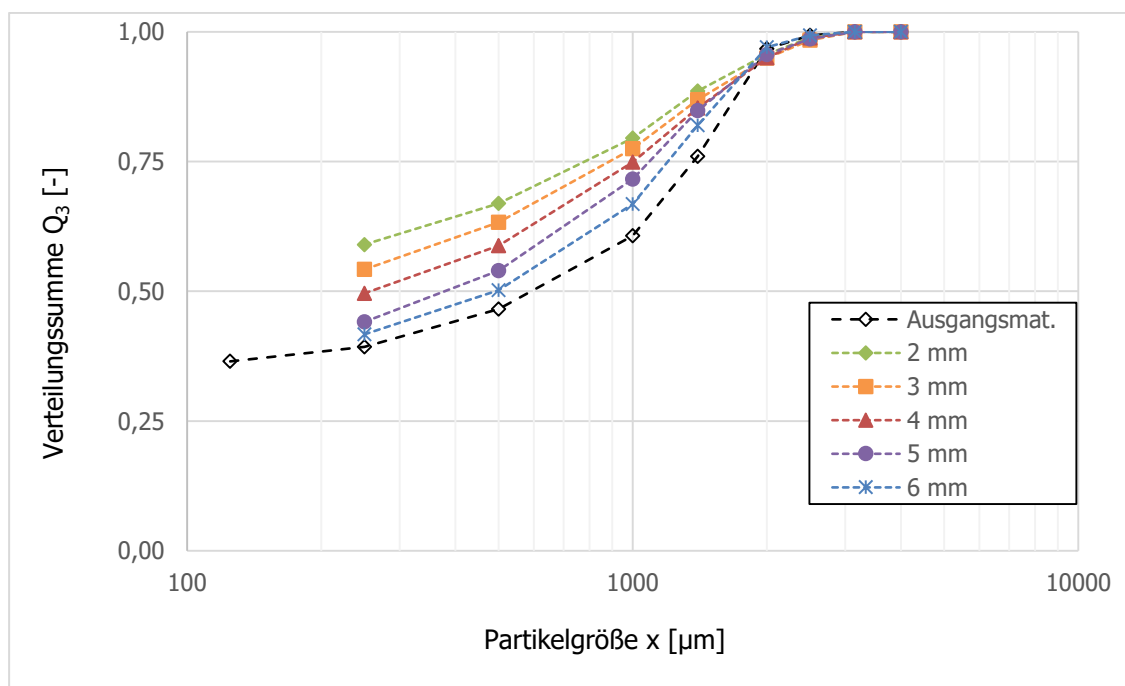


Abbildung 5.3-6: Partikelgrößenverteilung des mittleren Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 50 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

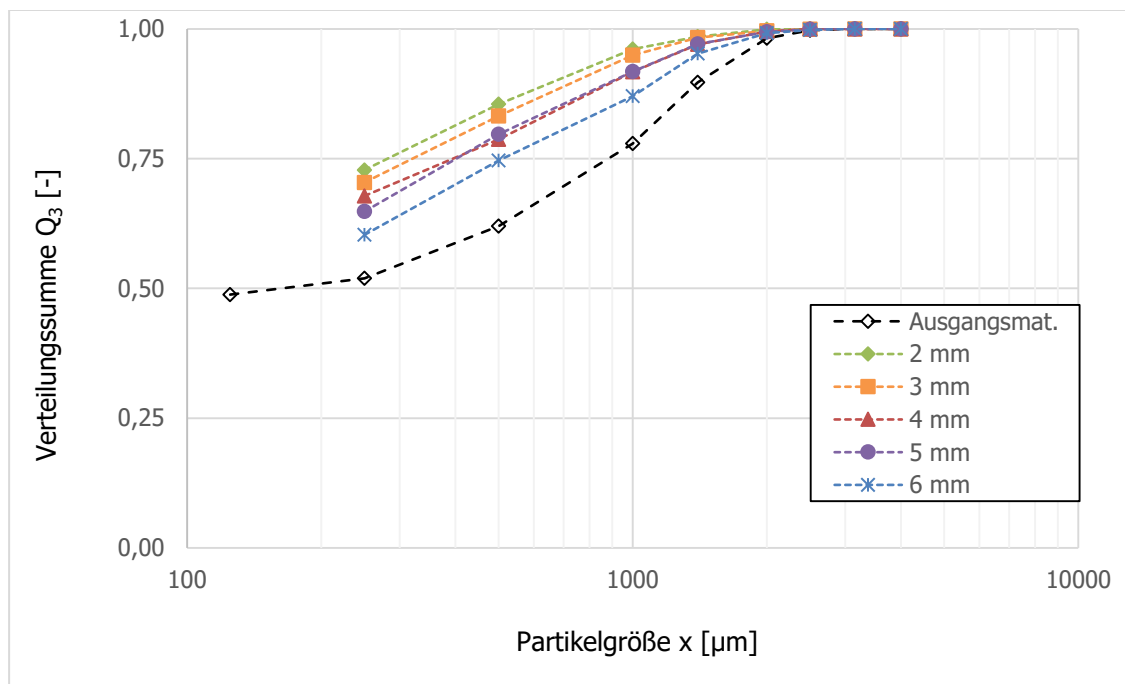


Abbildung 5.3-7: Partikelgrößenverteilung des feinen Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 70 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

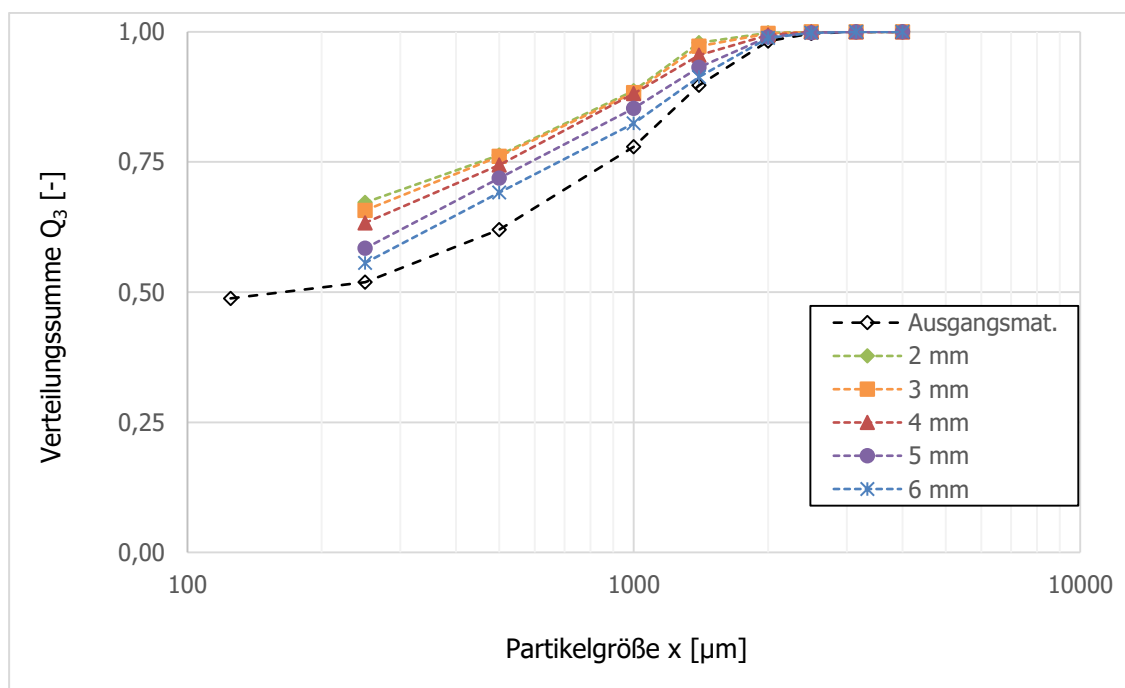


Abbildung 5.3-8: Partikelgrößenverteilung des feinen Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 70 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattd.)

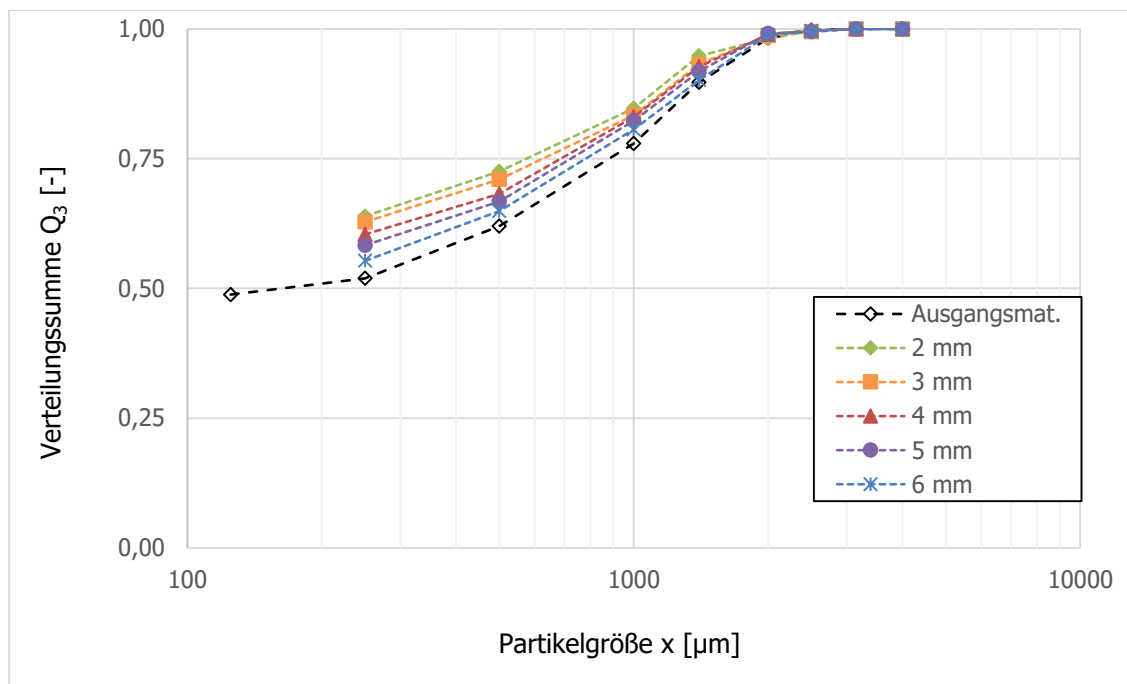


Abbildung 5.3-9: Partikelgrößenverteilung des feinen Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 70 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

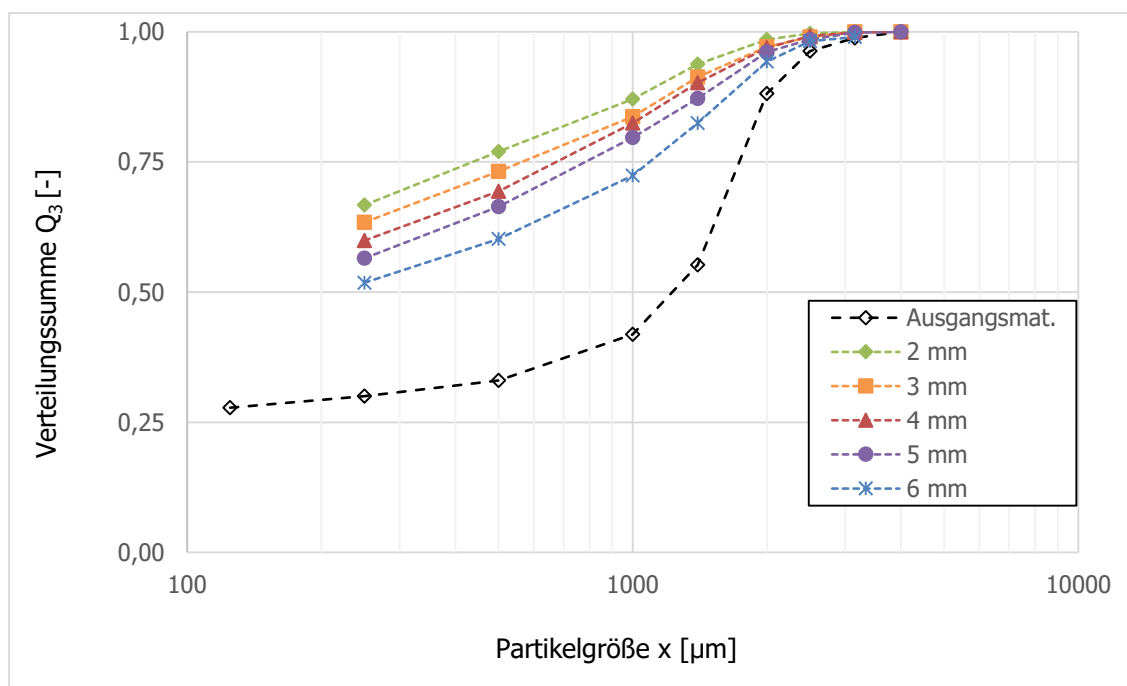


Abbildung 5.3-10: Partikelgrößenverteilung des groben Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,5 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

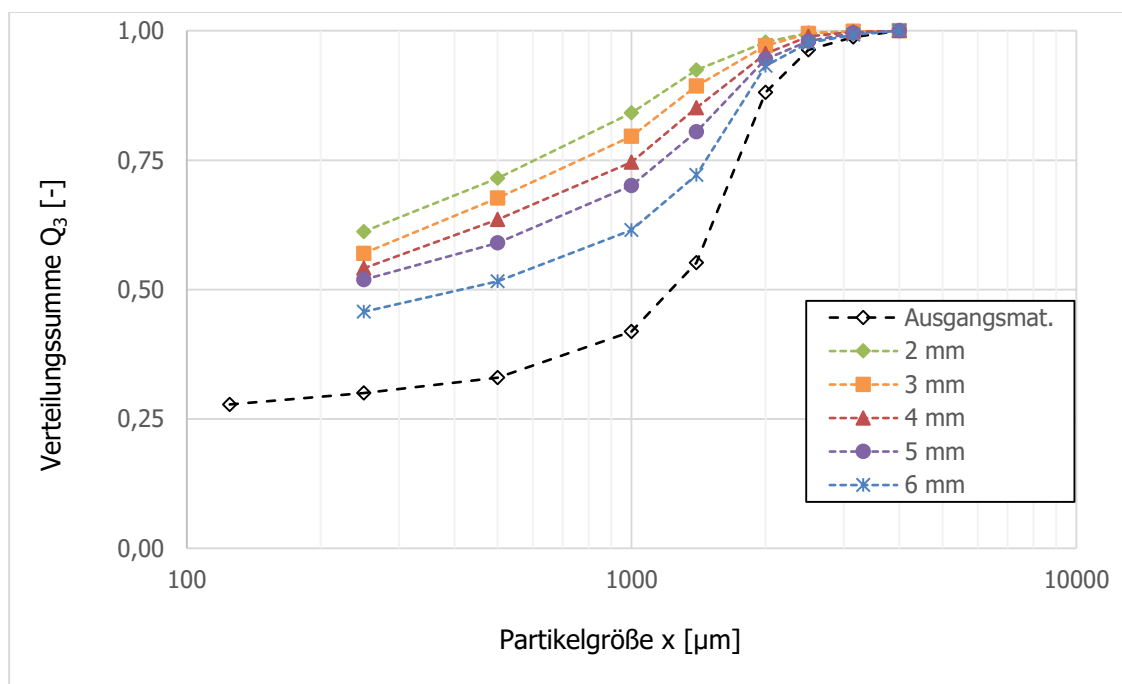


Abbildung 5.3-11: Partikelgrößenverteilung des groben Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,5 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Satttd.)

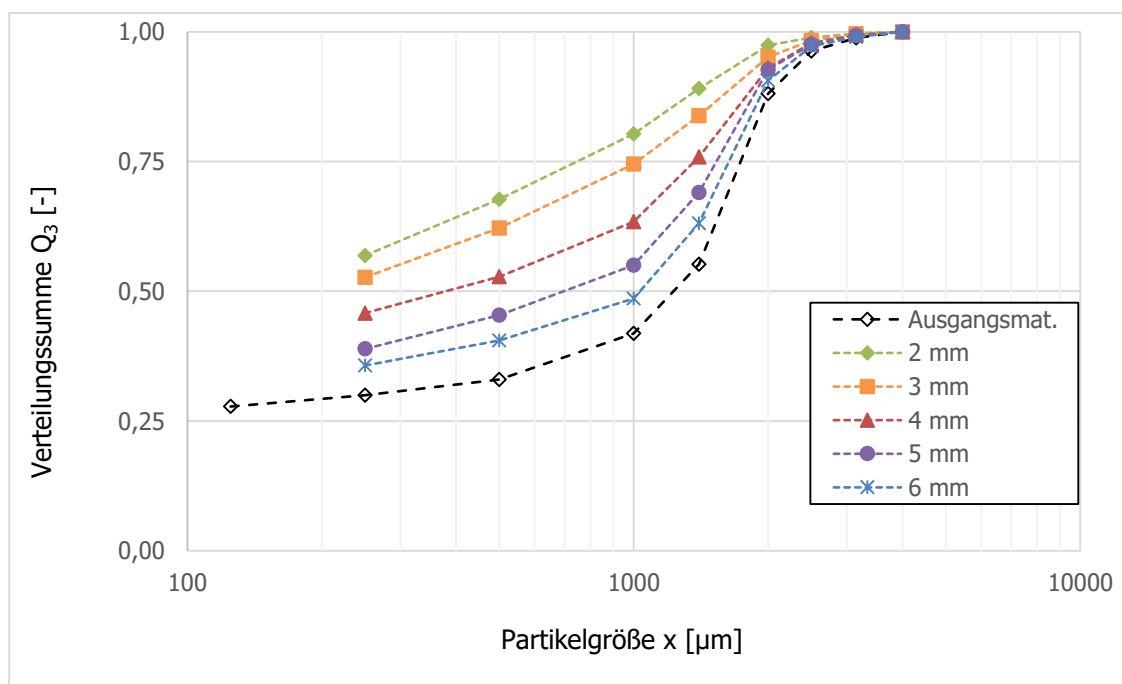


Abbildung 5.3-12: Partikelgrößenverteilung des groben Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,5 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Satttd.)

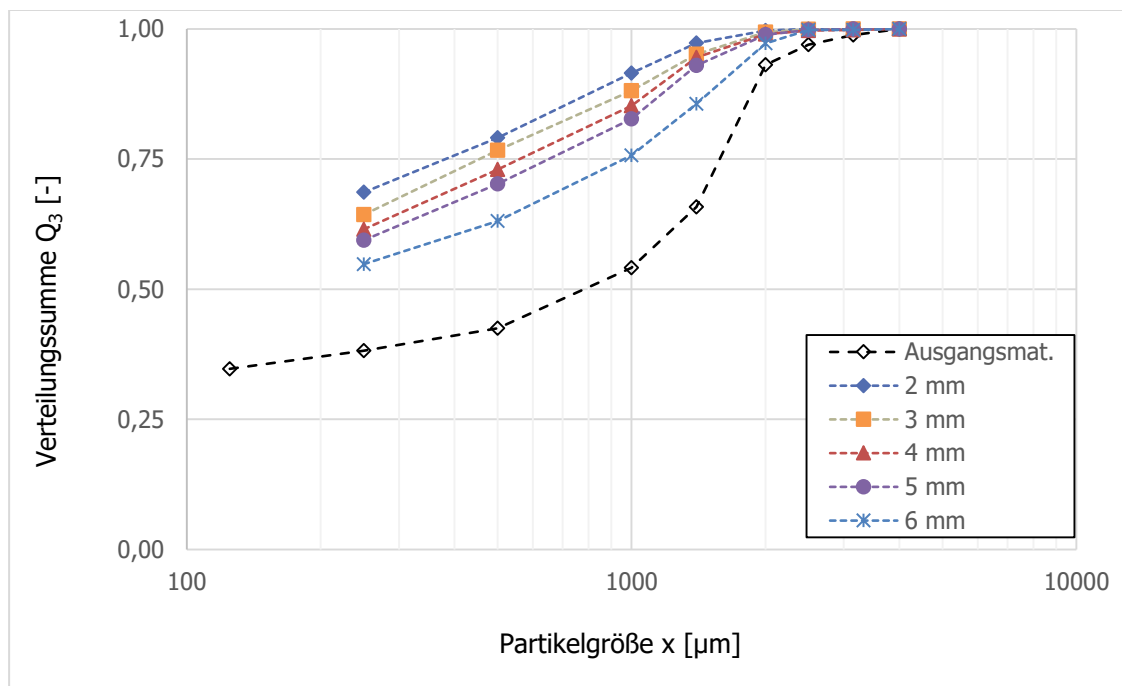


Abbildung 5.3-13: Partikelgrößenverteilung des mittleren Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,25 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

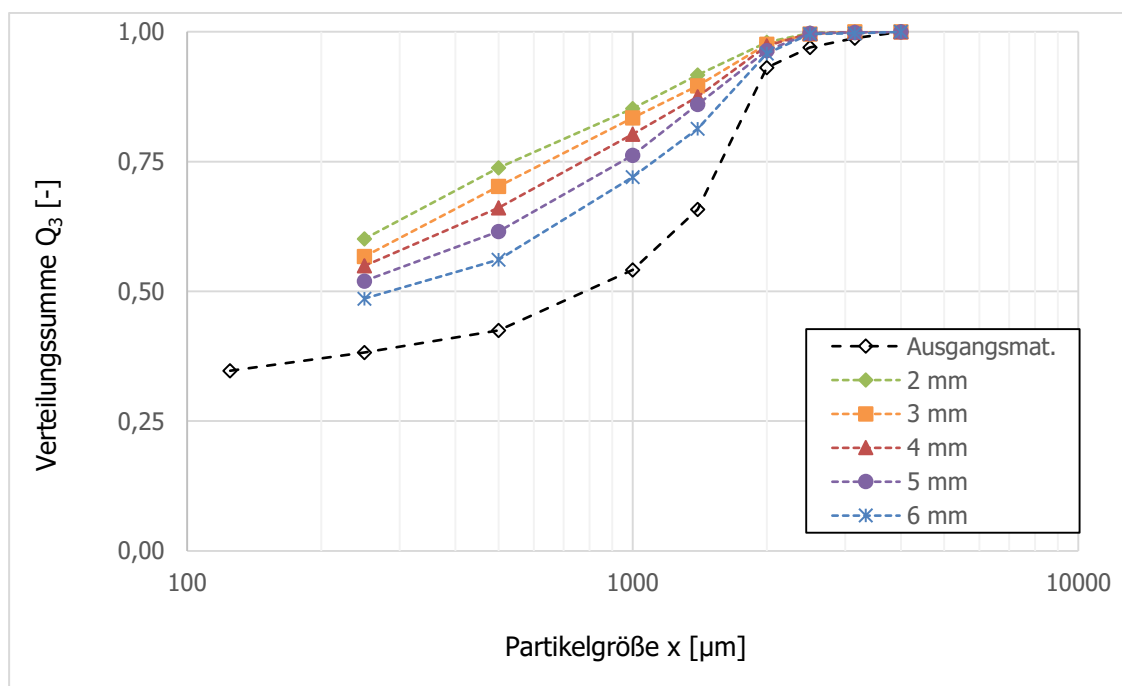


Abbildung 5.3-14: Partikelgrößenverteilung des mittleren Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,25 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattd.)

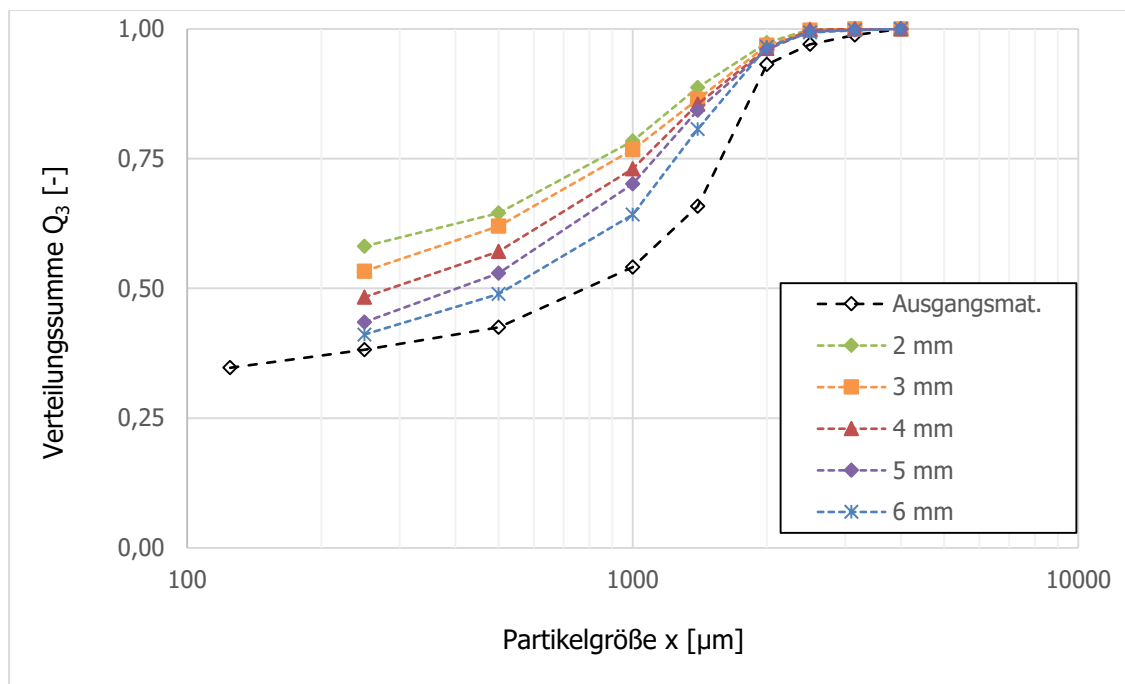


Abbildung 5.3-15: Partikelgrößenverteilung des mittleren Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,25 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Satttd.)

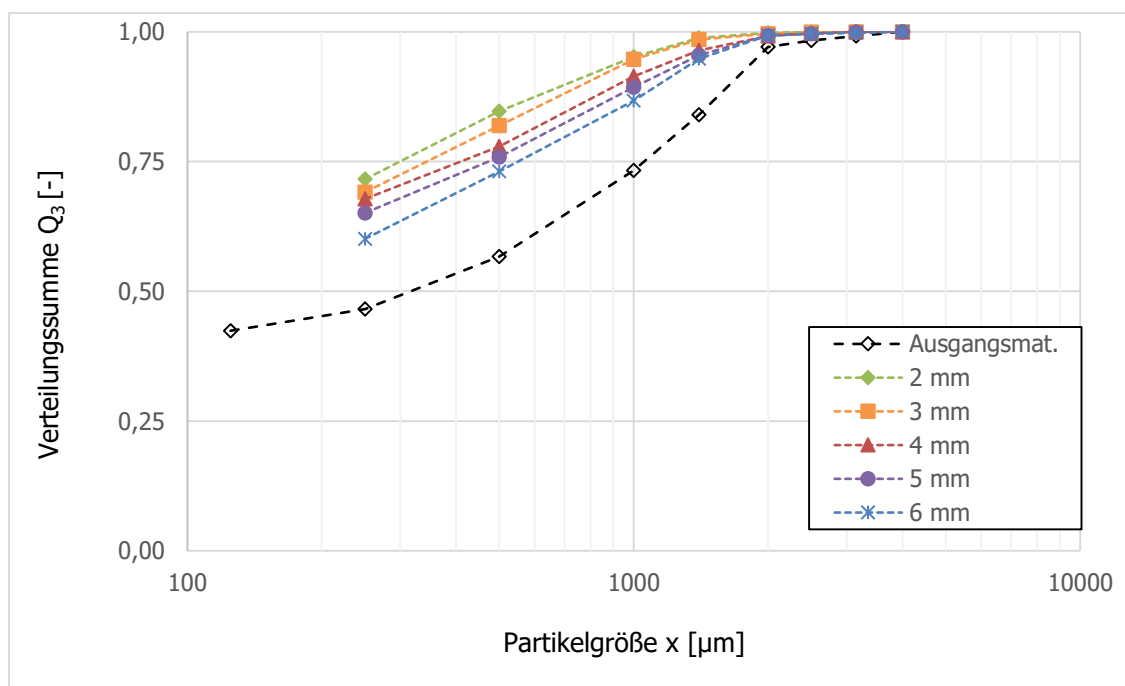


Abbildung 5.3-16: Partikelgrößenverteilung des feinen Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

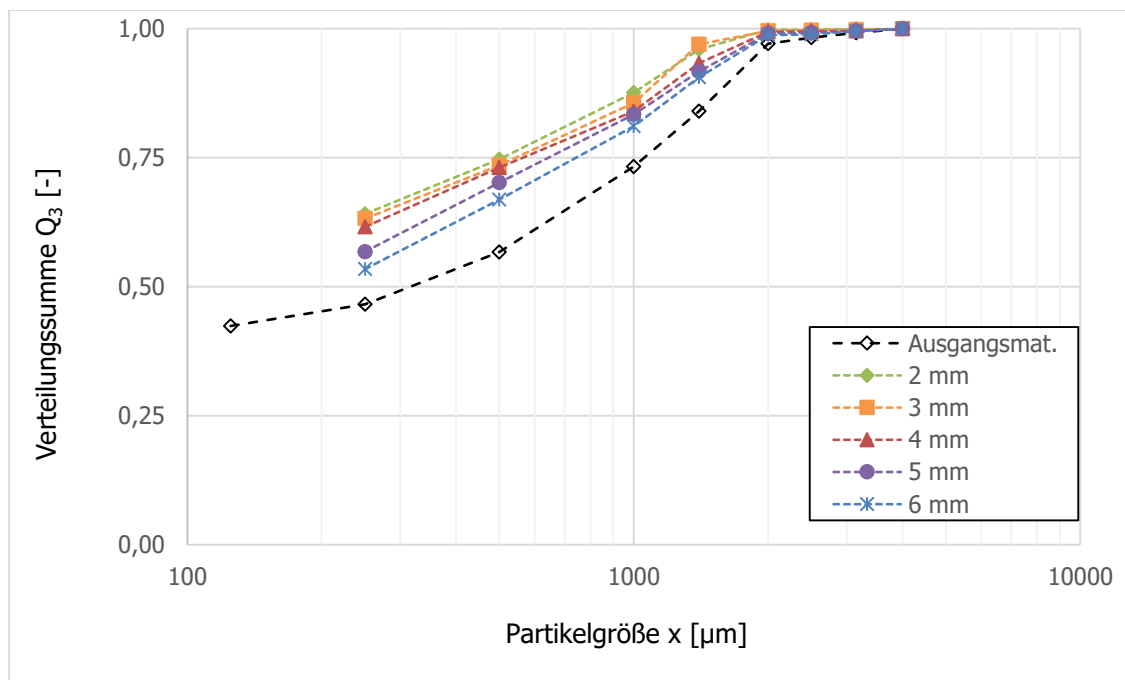


Abbildung 5.3-17: Partikelgrößenverteilung des feinen Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Satttd.)

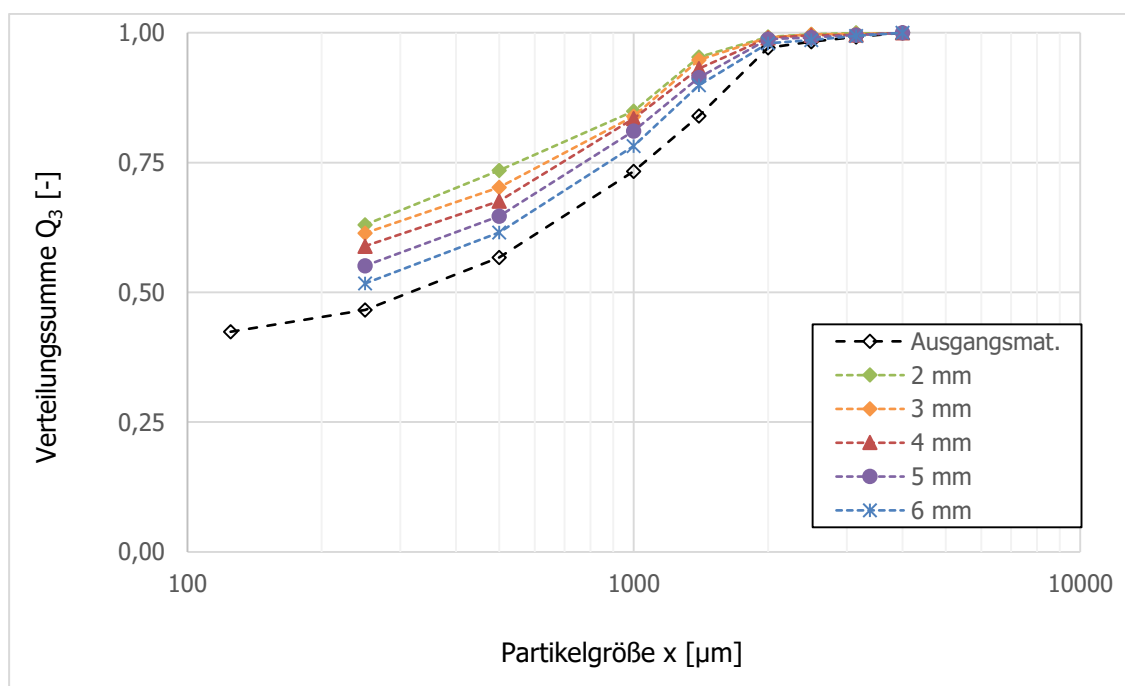


Abbildung 5.3-18: Partikelgrößenverteilung des feinen Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Satttd.)

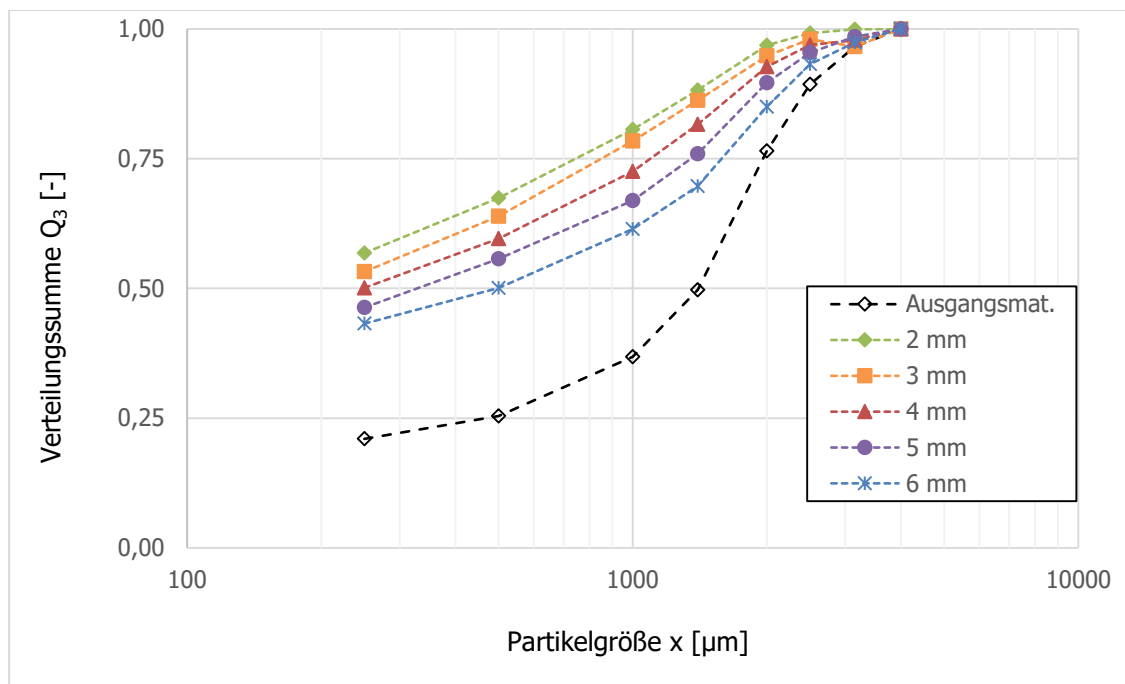


Abbildung 5.3-19: Partikelgrößenverteilung des groben Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 60 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

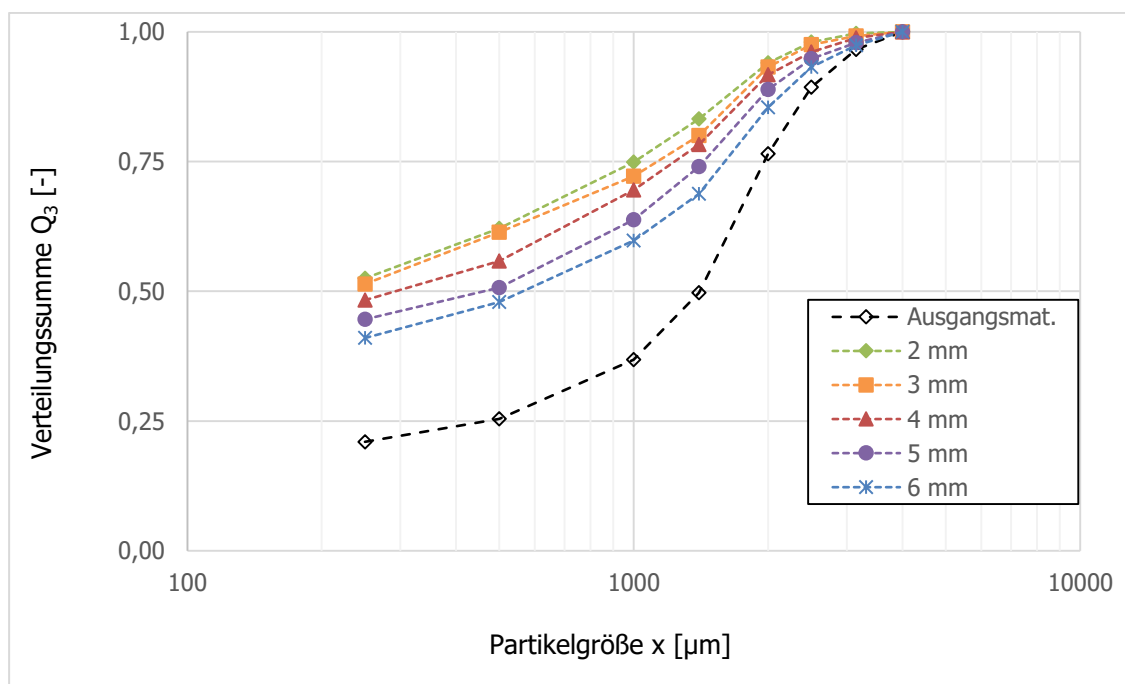


Abbildung 5.3-20: Partikelgrößenverteilung des groben Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 60 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattd.)

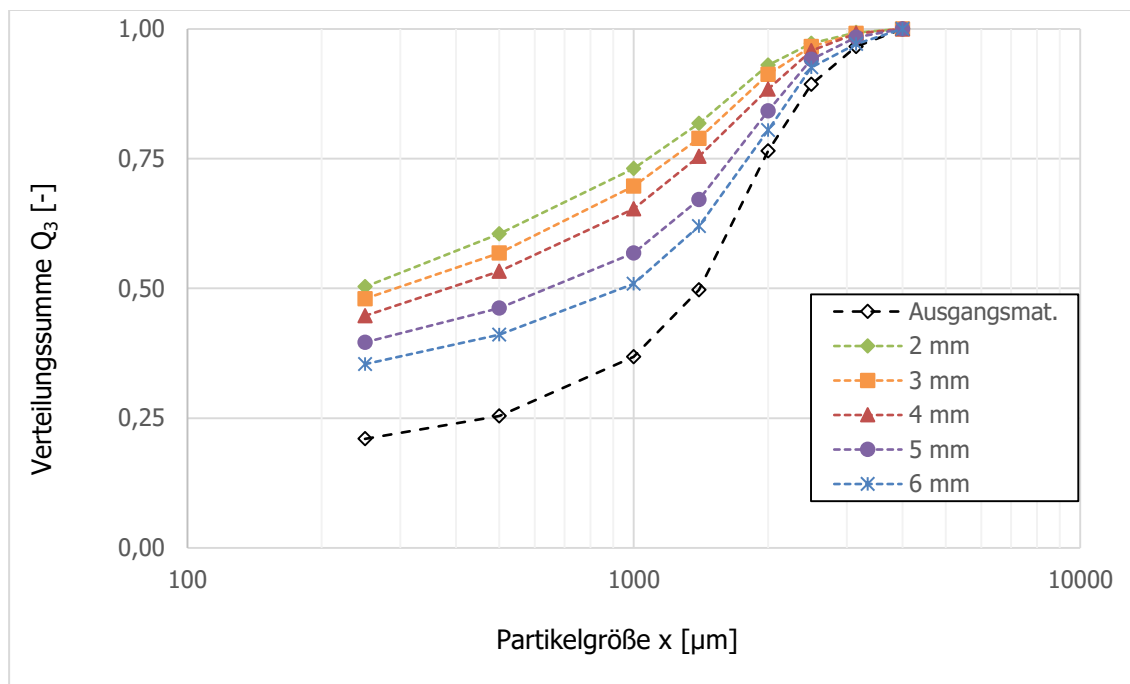


Abbildung 5.3-21: Partikelgrößenverteilung des groben Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 60 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

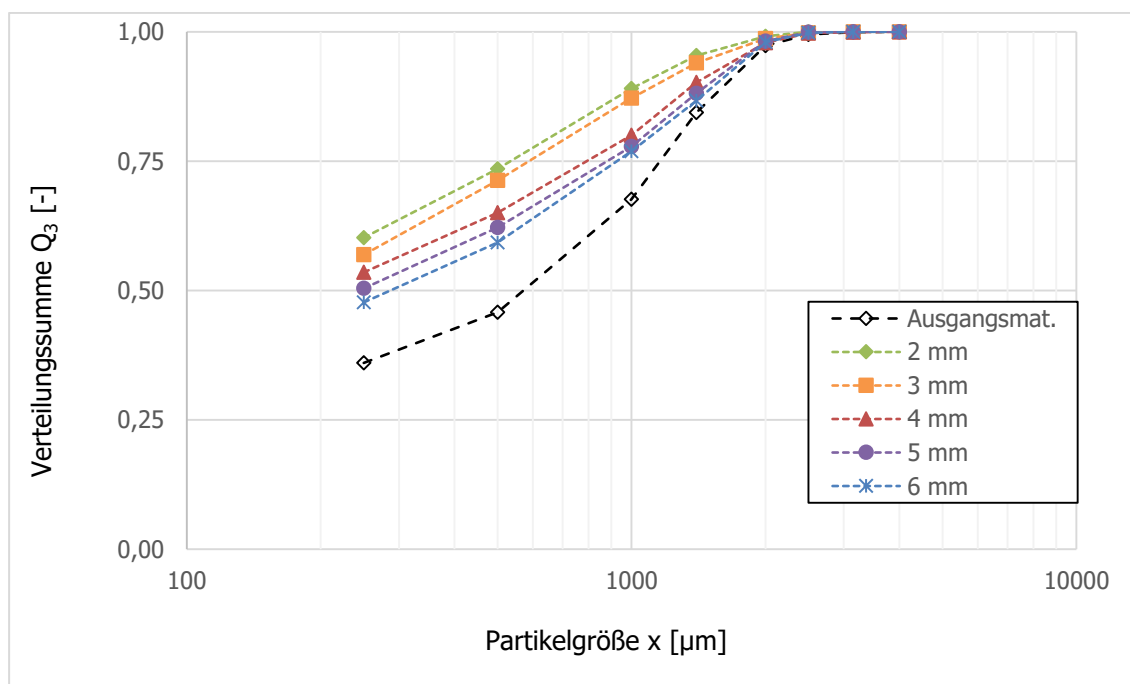


Abbildung 5.3-22: Partikelgrößenverteilung des mittleren Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 60 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

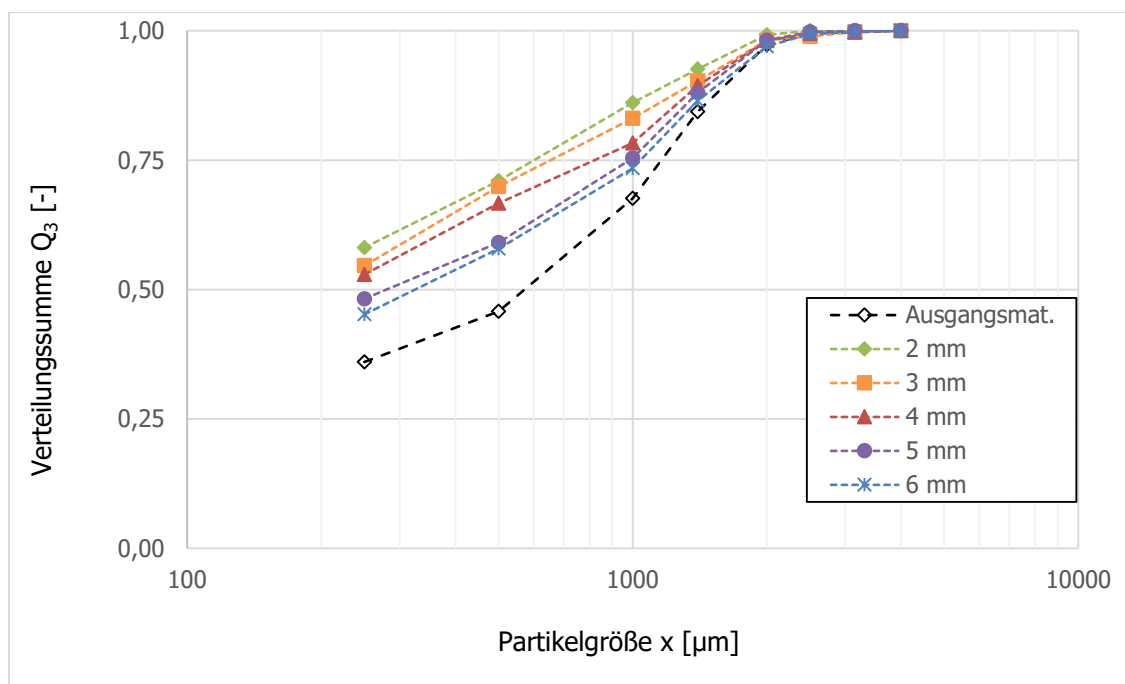


Abbildung 5.3-23: Partikelgrößenverteilung des mittleren Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 60 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattd.)

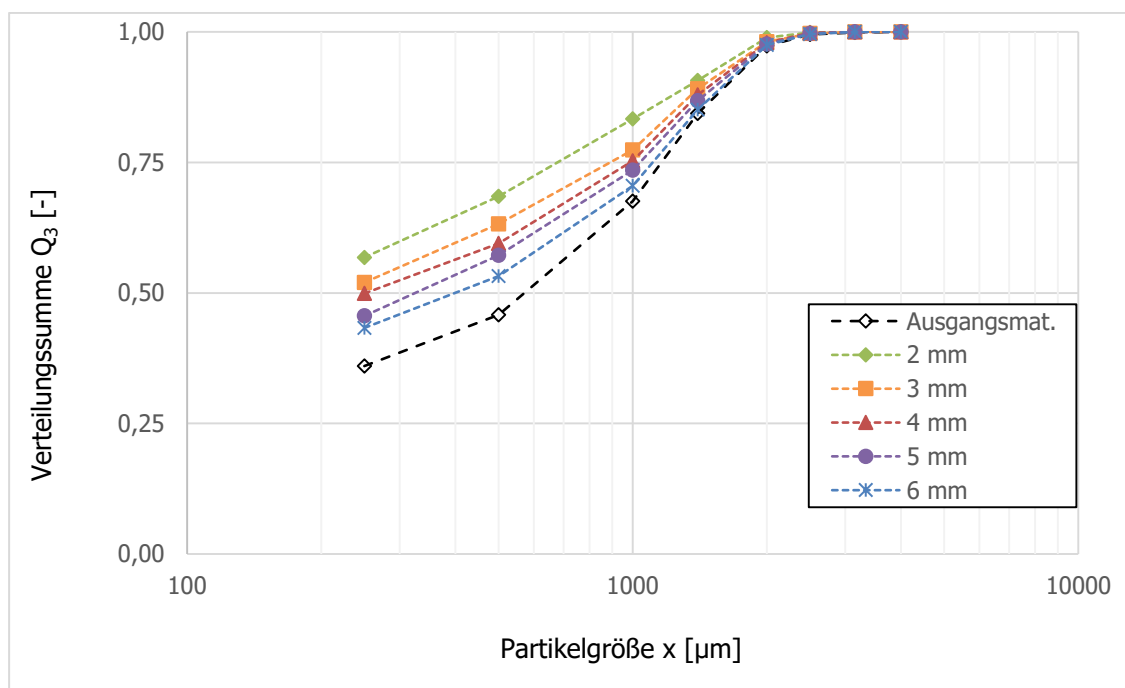


Abbildung 5.3-24: Partikelgrößenverteilung des mittleren Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 60 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

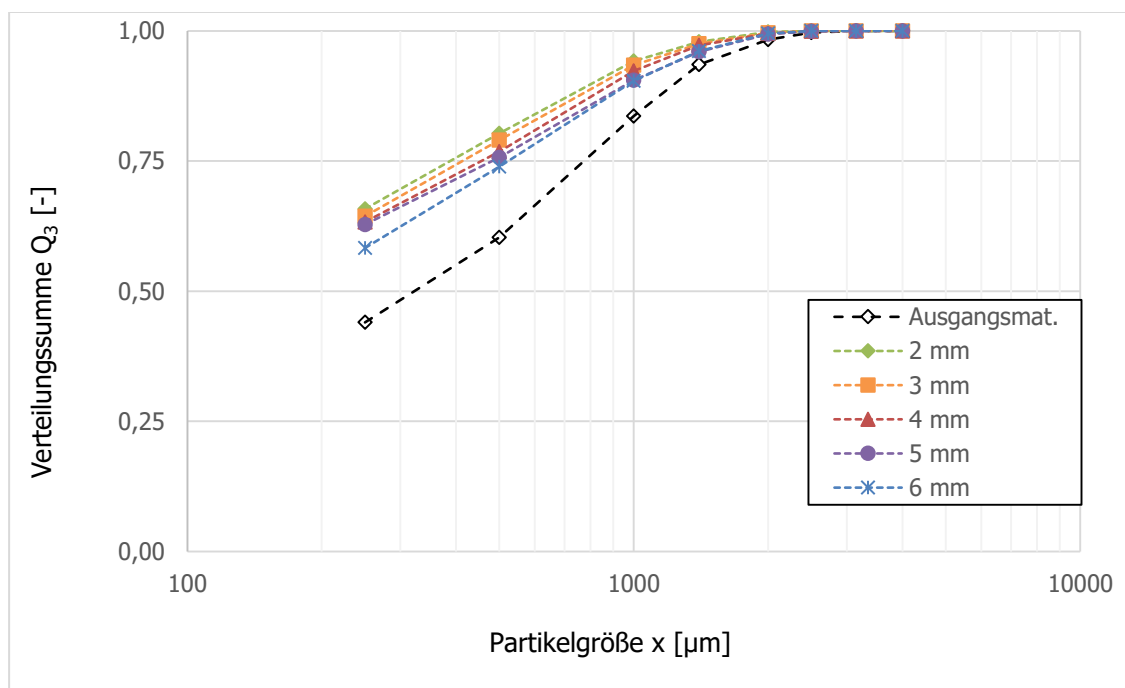


Abbildung 5.3-25: Partikelgrößenverteilung des feinen Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 80 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

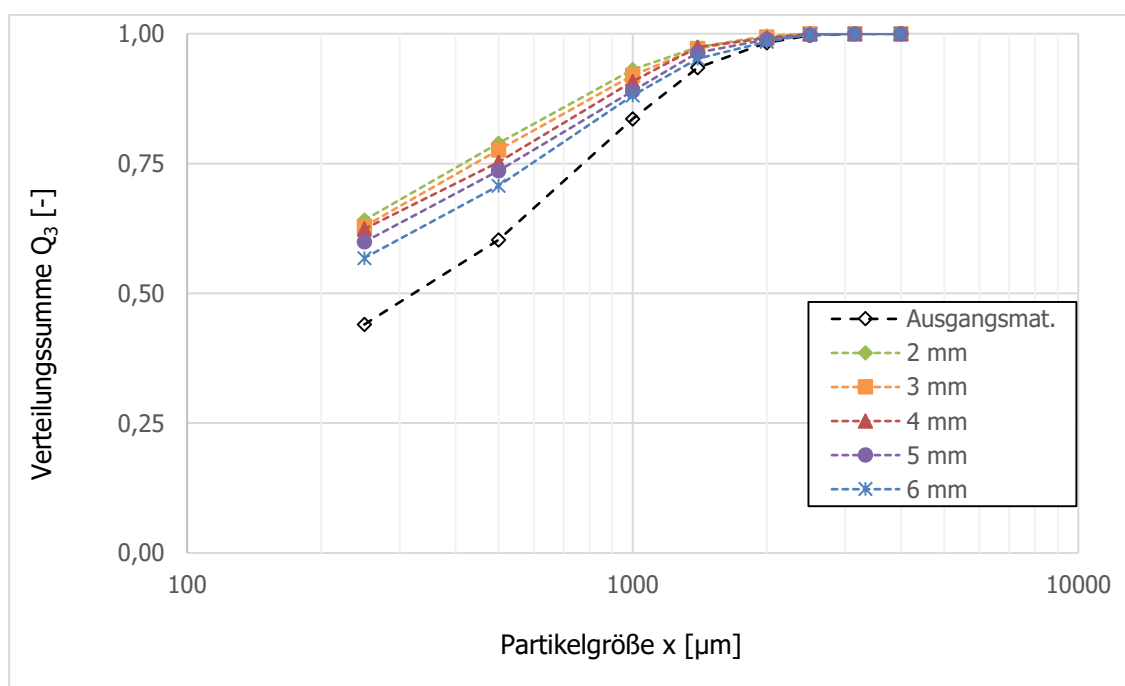


Abbildung 5.3-26: Partikelgrößenverteilung des feinen Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 80 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattd.)

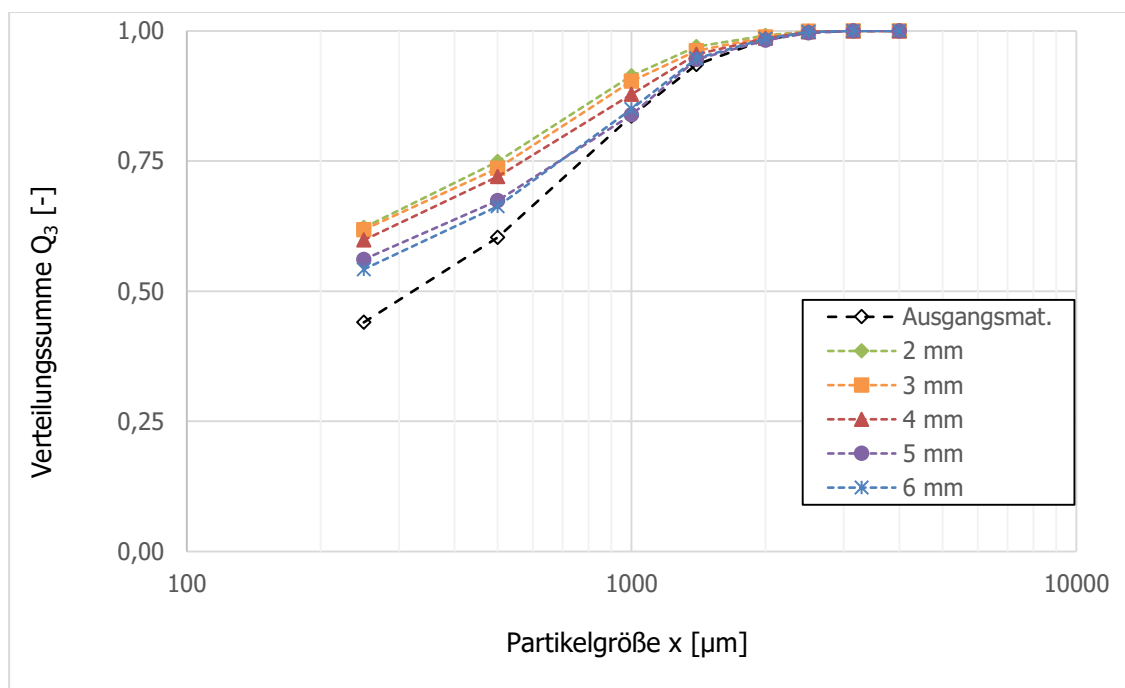


Abbildung 5.3-27: Partikelgrößenverteilung des feinen Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 3 mm / 80 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

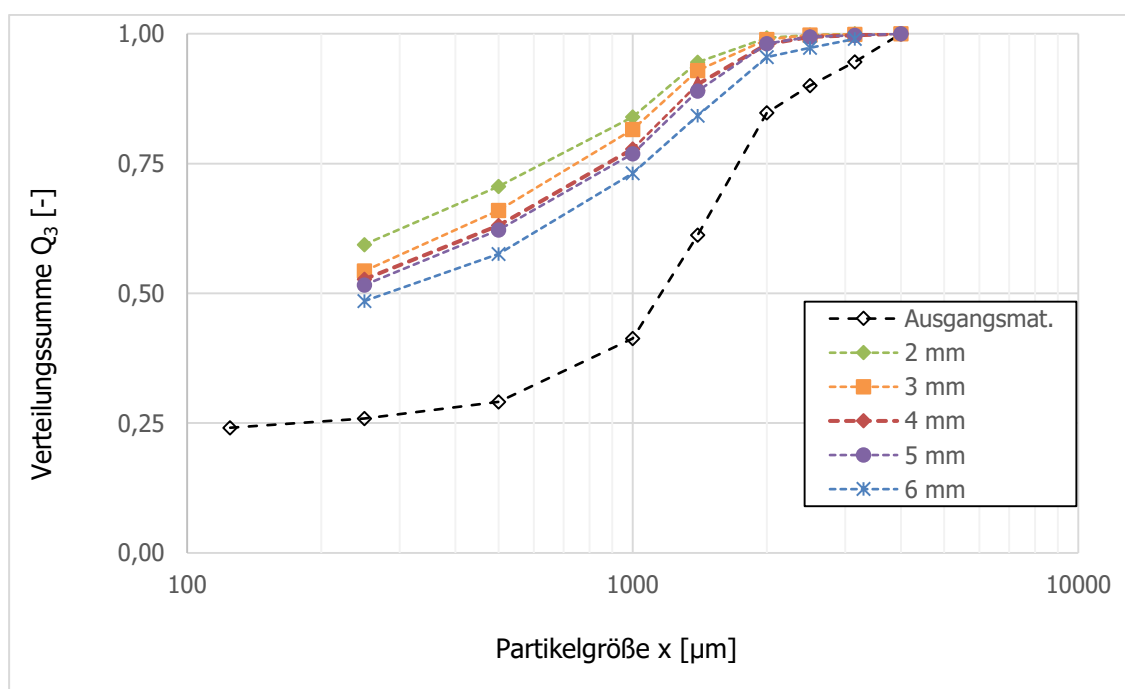


Abbildung 5.3-28: Partikelgrößenverteilung des groben Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,5 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

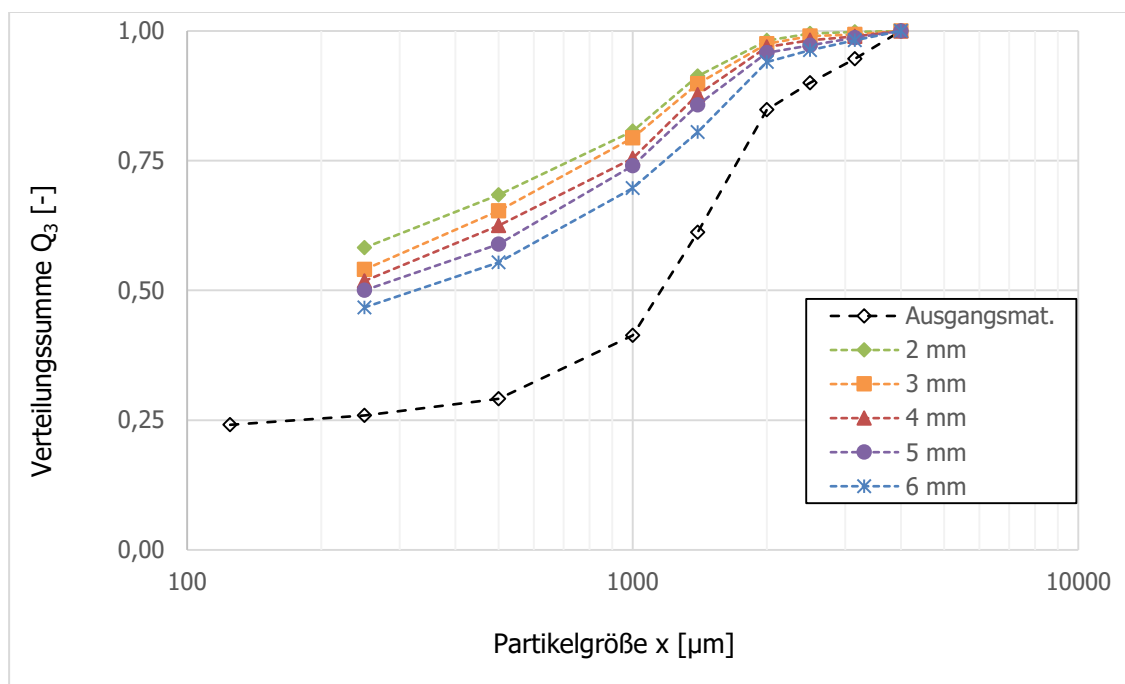


Abbildung 5.3-29: Partikelgrößenverteilung des groben Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,5 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattd.)

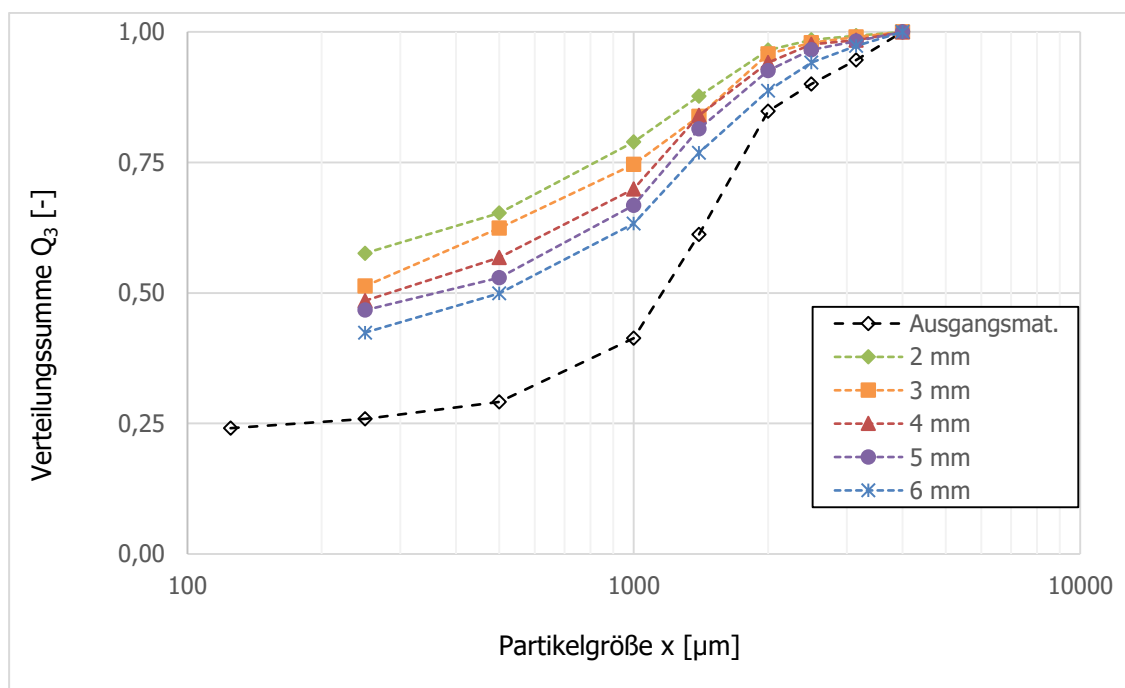


Abbildung 5.3-30: Partikelgrößenverteilung des groben Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,5 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

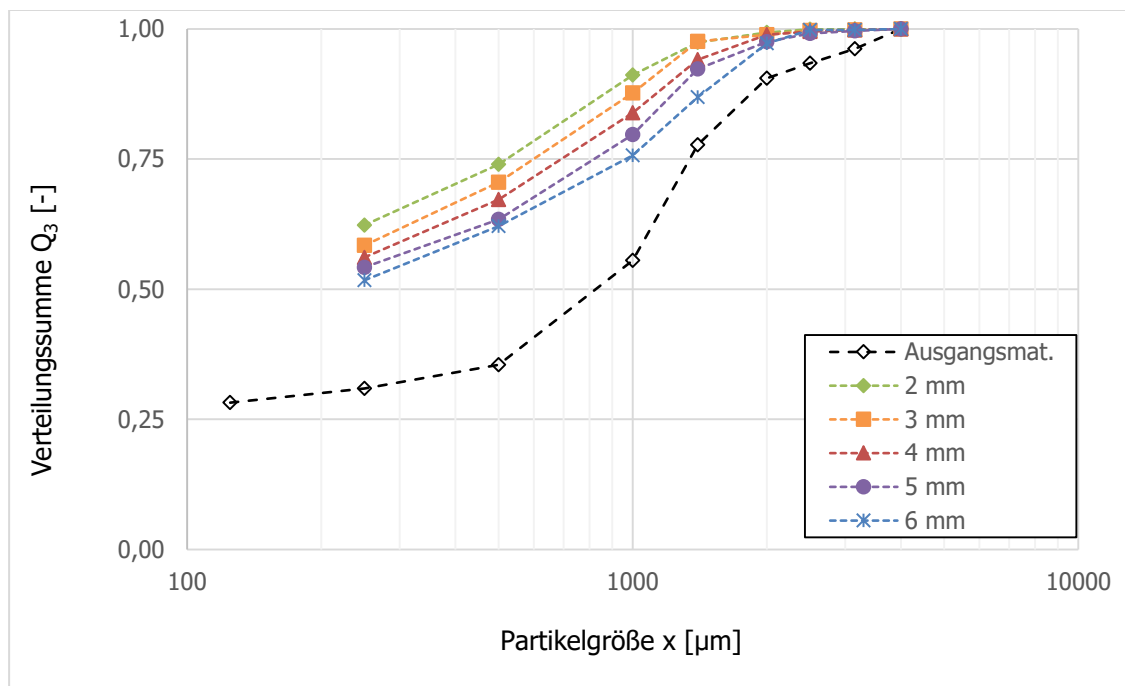


Abbildung 5.3-31: Partikelgrößenverteilung des mittleren Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,25 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

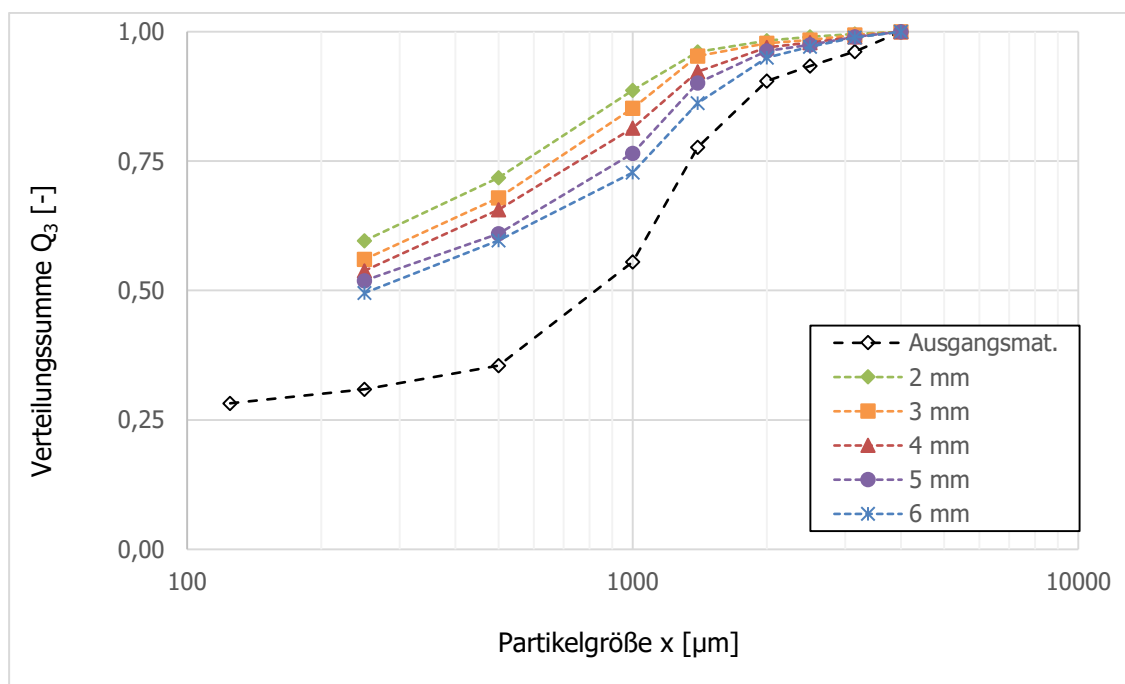


Abbildung 5.3-32: Partikelgrößenverteilung des mittleren Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,25 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 1 % Sattl.)

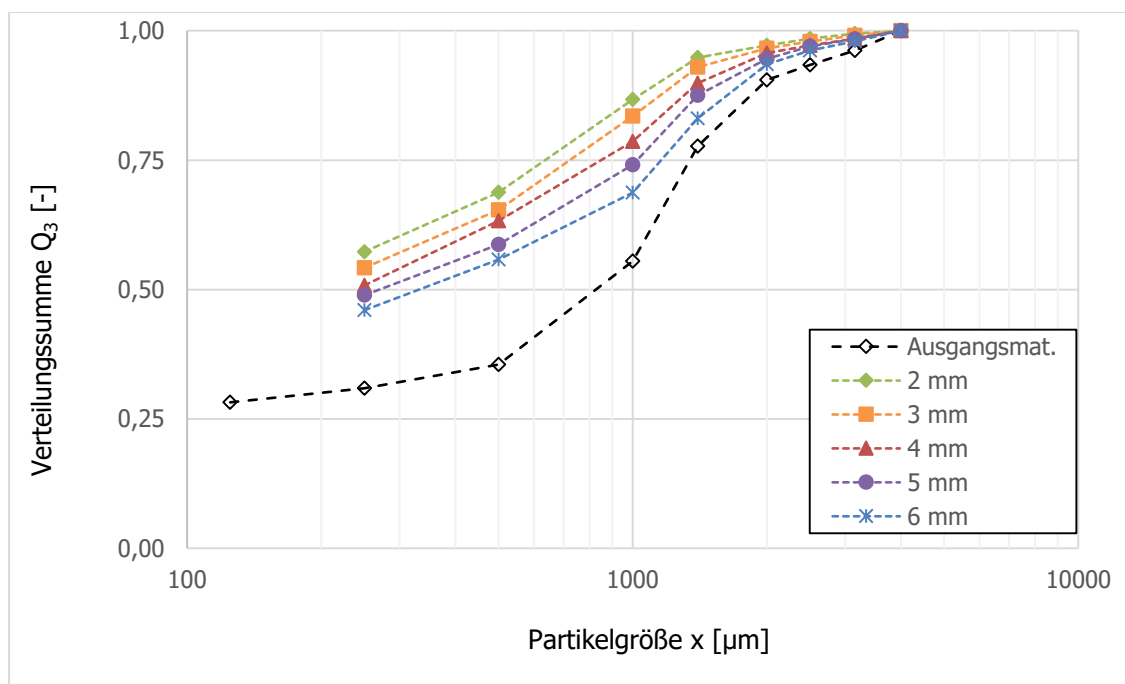


Abbildung 5.3-33: Partikelgrößenverteilung des mittleren Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0,25 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

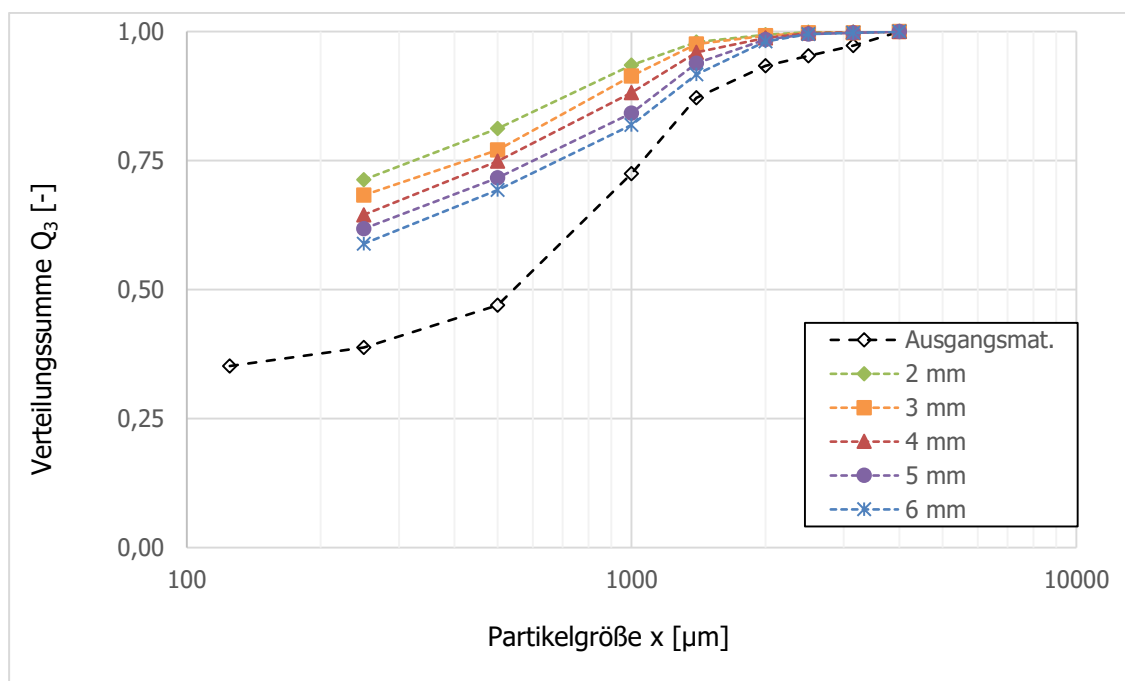


Abbildung 5.3-34: Partikelgrößenverteilung des feinen Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochungen (ohne Konditionierung)

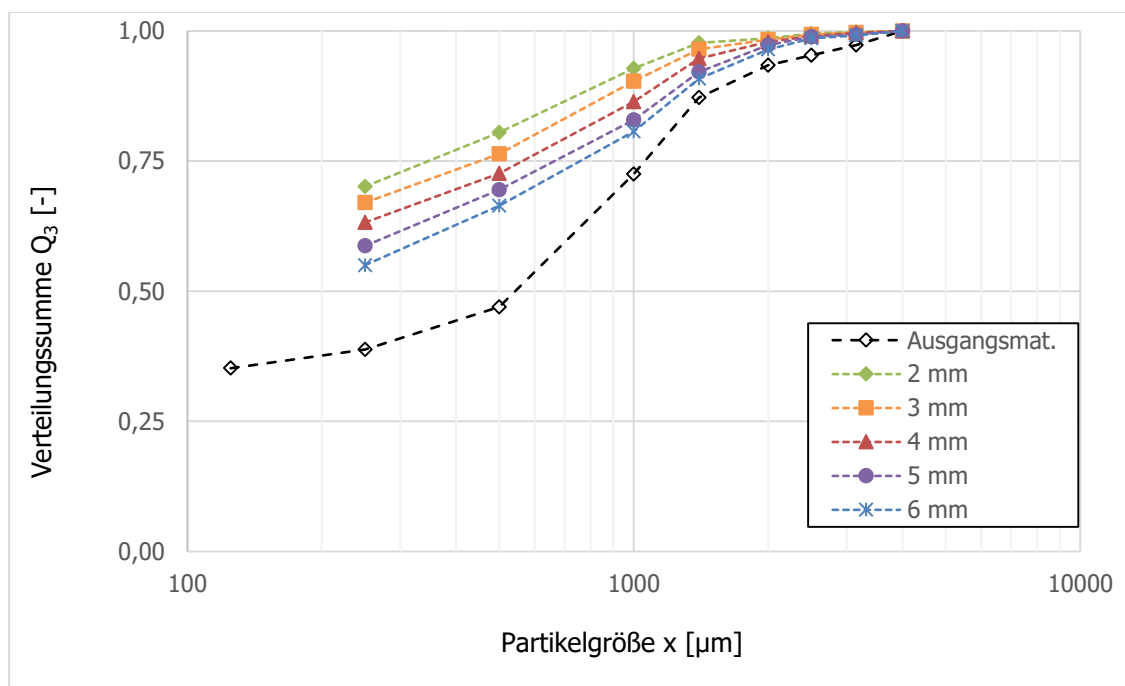


Abbildung 5.3-35: Partikelgrößenverteilung des feinen Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochanlagen (Konditionierung: 1 % Satttd.)

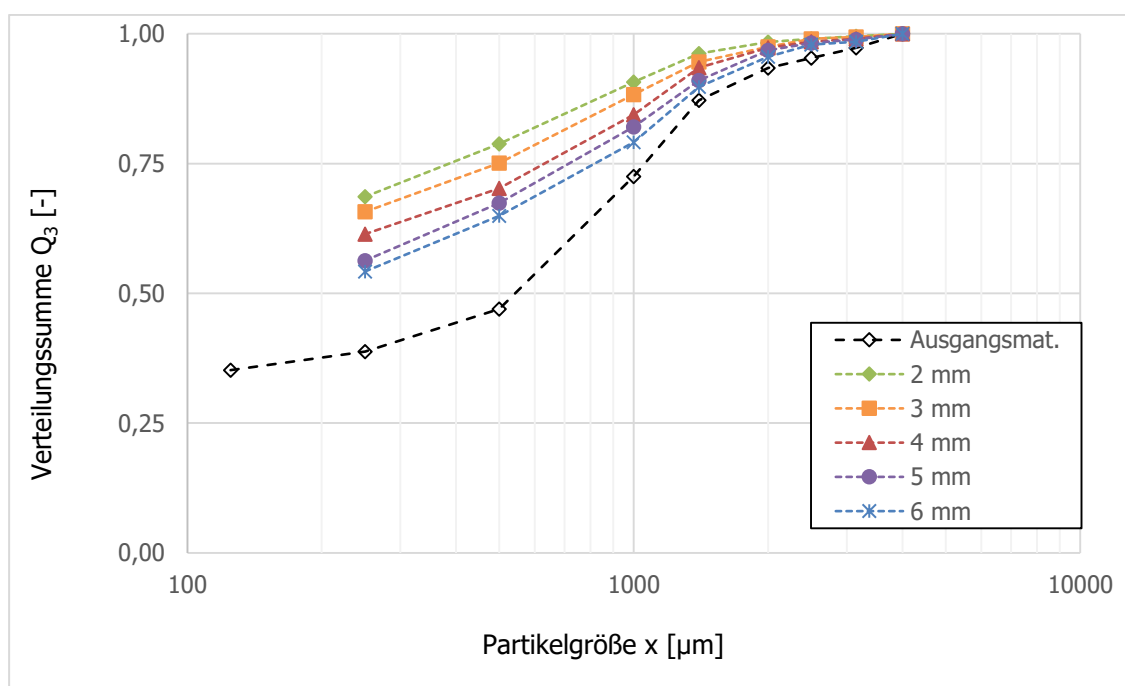


Abbildung 5.3-36: Partikelgrößenverteilung des feinen Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Walzenmühle, 0 mm) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Matrizenlochanlagen (Konditionierung: 3 % Satttd.)

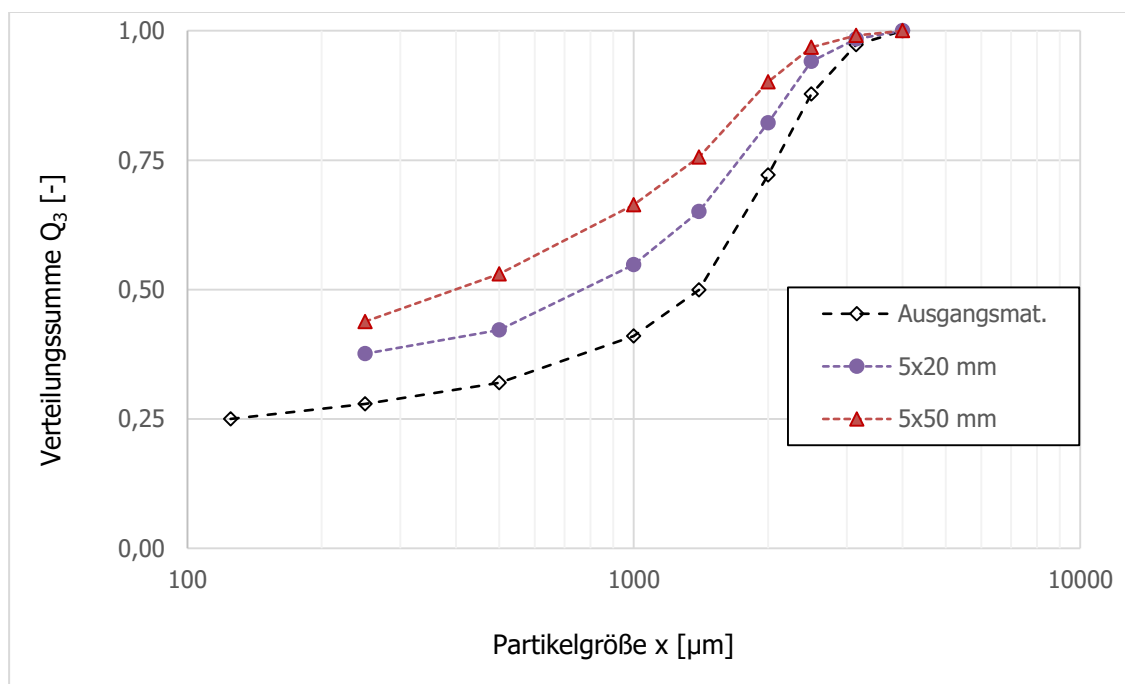


Abbildung 5.3-37: Partikelgrößenverteilung des groben Weizen-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 50 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Presskanallängen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

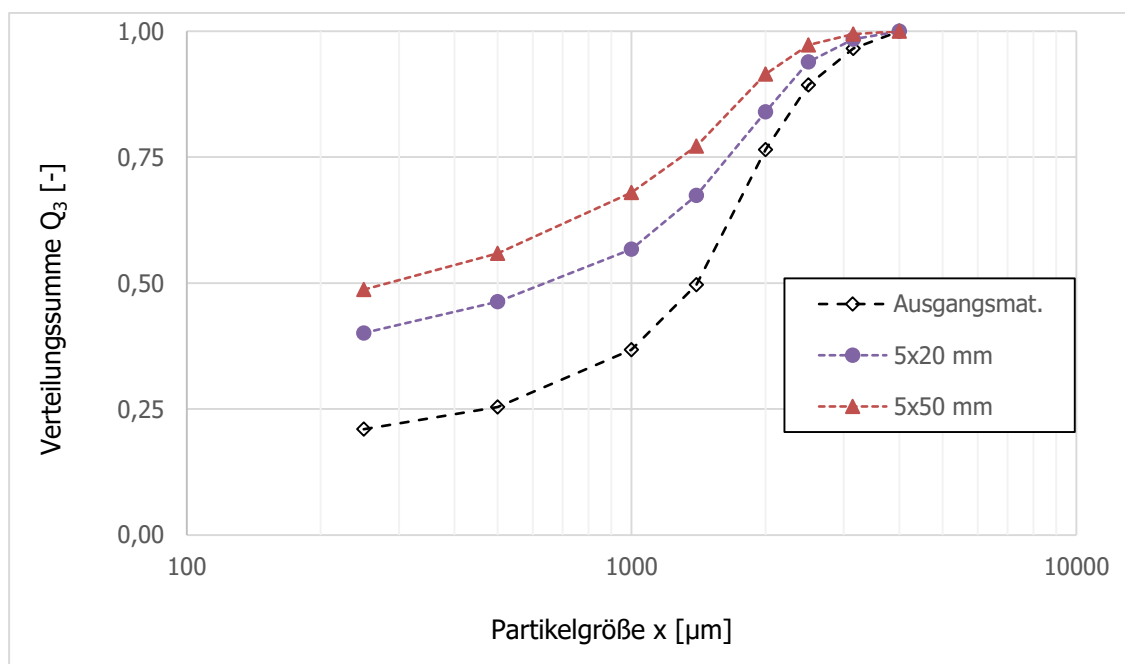


Abbildung 5.3-38: Partikelgrößenverteilung des groben Gerste-Zerkleinerungsprodukts (Hammermühle, 5 mm / 60 m/s) vor und nach dem Pelletieren mit unterschiedlichen Presskanallängen (Konditionierung: 3 % Sattd.)

5.4 Nachzerkleinerung von Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukten beim Pelletieren mit Flach- und Ringmatrizenpressen

5.4.1 Zerkleinerung der Ausgangskomponenten mit der Hammermühle

In einer Reihe von Versuchseinstellungen wurde mit der Nachzerkleinerung unterschiedlich feiner Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukte – bei möglichst gleichartigen Pelletierbedingungen – ein Aspekt der vorausgegangenen Untersuchungen detaillierter geprüft. Unter Verwendung von Weizen und Gerste, die unter definierten Bedingungen zu jeweils fünf Produkten mit möglichst weit gespreizten mittleren Partikelgrößen zerkleinert worden waren, wurden Pellets mit einem Durchmesser von 3 mm hergestellt. Der Durchmesser war als Referenzgröße gewählt worden, weil er sowohl für Geflügel- als auch für Schweinefutter relevant ist. In die systematischen Untersuchungen wurden neben der Labor-Flachmatrizenpresse eine Ring- und eine Flachmatrizenpresse im technischen Maßstab eingesetzt. Ermittelt wurden die Primärpartikelgrößenverteilung in den Pellets, die Pelletstabilität sowie die spezifische Leistung der Pelletpresse. Daneben wurden weitere Daten zur Charakterisierung der Prozessbedingungen dokumentiert.

Die Zerkleinerungsprodukte wurden ausschließlich mit der Hammermühle vermahlen, die hinsichtlich der Auswahl von Zerkleinerungsparametern zur Erzeugung einer breiteren Spreizung der mittleren Partikelgrößen der Zerkleinerungsprodukte mehr Spielraum bot. Für die Herstellung besonders grober und besonders feiner Zerkleinerungsprodukte wurden Hammermühlensiebe mit Lochungsdurchmessern von 10 mm bzw. 2 mm verwendet. Die Umfangsgeschwindigkeiten der Hämmer wurden für die Zerkleinerung von Gerste mit 60 und 110 m/s jeweils um 10 m/s höher gewählt, als für die Zerkleinerung von Weizen. Neben den unter den genannten Bedingungen hergestellten extrem groben und feinen Zerkleinerungsprodukten wurden Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukte in die Untersuchungen einbezogen, die gemäß den in den vorausgegangenen Untersuchungen verwendeten Parametern vermahlen worden waren. Aufgrund von Schwankungen bei den Prozessparametern und in der stofflichen Zusammensetzung der eingesetzten Getreide traten bei den in den **Abbildungen 5.4-1** und **5.4-2** als Summenverteilungsfunktionen dokumentierten Partikelgrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte gewisse Abweichungen zu den für die vorausgegangenen Untersuchungen zerkleinerten Komponenten auf. Anhand der in den Abbildungen zusammengestellten Graphen der jeweils mittels Trocken- und Nasssiebung ermittelten Partikelgrößenverteilungen sind die bereits diskutierten systematischen Differenzen

zwischen den Summenverteilungsfunktionen abzulesen. Für die meisten Graphenpaare liegen die Schnittpunkte auch hier im Partikelgrößenbereich um 1 mm. Bei den feinen und insbesondere bei den sehr feinen Zerkleinerungsprodukten verschieben sich die Schnittpunkte deutlich in den Bereich kleinerer Partikelgrößen.

In den **Tabellen 5.4-1** und **5.4-2** sind der Durchsatz und die spezifische Hammermühlenleistung bei der Zerkleinerung von Gerste und Weizen sowie die resultierenden mittleren Partikelgrößen der Zerkleinerungsprodukte zusammengefasst. Da das Ziel der Zerkleinerungsprozesse ausschließlich in der Herstellung von Produkten bestand, die hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung ein möglichst breites Spektrum innerhalb des für Futter üblichen Partikelgrößenbereichs abdecken, dienen sie der Beschreibung der Prozesses und der Partikelgrößenverteilung der in den anschließenden experimentellen Untersuchungen eingesetzten Zerkleinerungsprodukte.

5.4.2 Nachzerkleinerung beim Pelletieren mit einer Labor-Flachmatrizenpresse

In der ersten Serie der systematischen Untersuchungen zur Nachzerkleinerung wurden die Zerkleinerungsprodukte unter Zusatz von einem Massenprozent Sattdampf im Chargenmischer konditioniert und anschließend über eine Vibrationsrinne in die Labor-Flachmatrizenpresse dosiert. Zum Pelletieren wurde die bereits bei den grundlegenden Untersuchungen verwendete Matrize mit Bohrungsdurchmessern von 3 mm und einer Presskanallänge von 9 mm, also mit einem Pressverhältnis von 1:3, verwendet. Die der Prozess- und Produktcharakterisierung dienenden Daten, die im Zuge der experimentellen Untersuchungen ermittelt wurden, sind in **Tabelle 5.4-3** (Gerste) und **Tabelle 5.4-4** (Weizen) dokumentiert. Auf die ursprünglich angestrebte Bestimmung der Materialtemperatur vor und nach dem Matrizendurchgang wurde verzichtet, weil die für das konditionierte Material ermittelten Werte aufgrund der absätzigen Prozessgestaltung erheblich durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst wurden. Unabhängig davon konnte bei sämtlichen Versuchseinstellungen keine signifikante Erwärmung des Materials beim Matrizendurchgang festgestellt werden.

Sämtliche Gerste-Zerkleinerungsprodukte wurden bei Durchsätzen um 50 kg/h pelletiert. Für den Pressprozess ist festzustellen, dass die spezifische Pressenleistung mit der Feinheit der verarbeiteten Komponenten, also mit abnehmender mittlerer Partikelgröße der Zerkleinerungsprodukte, sukzessive von ca. 32 auf ca. 27 kWh/t sinkt. Unter Berücksichtigung der im Pelletierprozess aufzubringenden Verdichtungs- und Zerkleinerungsarbeit ist dieser

Verlauf zu erwarten. Die anhand des Abriebs und der Härte einzuschätzende Pelletqualität ist für sämtliche Presslinge, nahezu unabhängig vom eingesetzten Zerkleinerungsprodukt, gering. Zwar ist im direkten Vergleich der Stabilitätskennzahlen für die aus den Ausgangsmaterialien mit den am weitesten auseinander liegenden Partikelgrößenverteilungen erzeugten Pellets festzustellen, dass die aus dem feinsten Produkt hergestellten Pellets erheblich härter und abriebärmer sind, als die Presslinge aus dem größten Produkt, jedoch ist dieser Trend anhand der für die komplette Versuchsreihe ermittelten Kennwerte nicht eindeutig zu belegen.

Aus den in **Abbildung 5.4-3** als Summenverteilungsfunktionen dargestellten Partikelgrößenverteilungen der Gerste-Zerkleinerungsprodukte vor und nach dem Pelletieren ist für sämtliche Ausgangsprodukte die durch eine Abflachung der Graphen sowie deren Verschiebung in Richtung geringerer Partikelgrößen gekennzeichnete Nachzerkleinerung zu erkennen. Abweichend von den Erwartungen, tritt auch beim Pelletieren des zur sehr feinen Partikelgrößenverteilung zerkleinerten Produkts eine erhebliche Nachzerkleinerung auf. Ebenso auffällig ist der im Vergleich zur Nachzerkleinerung der anderen Ausgangskomponenten relativ geringe Effekt des Pelletierens auf die Primärpartikelgrößenverteilung des größten Zerkleinerungsprodukts. Die hinsichtlich der mittleren Teilchengröße der Partikelgrößenverteilung vor dem Matrizendurchgang normierte Reduktion der mittleren Primärpartikelgrößenverteilung (relative Nachzerkleinerung: $\Delta d_{50}/d_{50}$ (Mehl-NS), wobei Δd_{50} die Differenz der mittels Nasssiebung ermittelten Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungsproduktes vor dem Pelletieren und der Primärpartikelgrößenverteilung in den Pellets entspricht) liegt für das größte Zerkleinerungsprodukt unterhalb der für die feineren Produkte ermittelten Kennwerte.

Für die mit den Weizen-Zerkleinerungsprodukten durchgeführten Referenzuntersuchungen sind eine Reihe abweichender Effekte festzustellen. Das Pelletieren, bei einer mit zunehmender Feinheit der Zerkleinerungsprodukte einhergehenden, schrittweisen Rücknahme des Durchsatzes, führte bei sämtlichen Zerkleinerungsprodukten zu vergleichsweise stabilen Pellets. Der Pelletabrieb geht mit zunehmender Feinheit der Zerkleinerungsprodukte zurück, während die Härte der Presslinge zunimmt. Die spezifische Leistung der Presse entspricht in etwa den beim Pelletieren der Gerste-Zerkleinerungsprodukte ermittelten Werten, nur der für das Pelletieren des feinsten Produktes dokumentierte Wert weicht in der Reihe von Versuchseinstellungen deutlich vom Trend ab. Auffällig ist die im Vergleich zur Gerste erheblich intensivere Zerkleinerung insbesondere der gröberen Weizen-Zerkleinerungsprodukte.

Sie bewirkt eine große Ähnlichkeit der Primärpartikelgrößenverteilungen sämtlicher pelletierter Zerkleinerungsprodukte, die in **Abbildung 5.4-4** anhand der sehr eng verlaufenden Kurvenschar zu erkennen ist. Im Zusammenhang mit der intensiven Nachzerkleinerung der Ausgangskomponenten ist der überwiegende Teil sämtlicher Pelletmaterialien zu fein, um mit den eingesetzten Sieben, deren engmaschigstes Maschenöffnungen von 125 µm aufweist, erfasst werden zu können. Mittlere Partikelgrößen und die für Vergleichszwecke zu berechnenden Werte für die relative Nachzerkleinerung können daher für die Weizen-Zerkleinerungsprodukte nicht ermittelt werden. Unabhängig davon ist bemerkenswert, dass der beim feinsten Ausgangsprodukt auftretende Nachzerkleinerungseffekt zwar wesentlich geringer als beim Gerste-Referenzprodukt ausfällt, dass aber dennoch ein Abstand der beiden Summenverteilungsfunktionen deutlich zu erkennen ist.

5.4.3 Nachzerkleinerung beim Pelletieren mit einer Ringmatrizenpresse (technischer Maßstab)

Die Nachzerkleinerung beim Pelletieren mit einer Ringmatrizenpresse wurde unter Verwendung der jeweils fünf Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukte untersucht, die zuvor auch für die mit der Flachmatrizenpresse durchgeführte Untersuchungsreihe herangezogen worden waren. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Zerkleinerungsprodukte bei gleicher Prozessgestaltung nach dem Konditionieren mit 1 % Sattdampf zu Pellets mit einem Durchmesser von 3 mm gepresst. Da die Ringmatrizenpresse mit dem Konditioneur und dem Kühler in eine kontinuierlich arbeitende Anlage eingebunden ist, war – anders als bei der Labor-Flachmatrizenpresse – ein kontinuierlicher Prozessablauf für das Pelletieren gewährleistet.

Für die mit Durchsätzen von etwa 160 kg/h chargenweise durchgeführte Pelletierung der Gerste-Zerkleinerungsprodukte wurde eine Matrize mit Presskanal-Abmessungen von 3 x 20 mm, also einem Pressverhältnis von ca. 1 : 7, verwendet. Im Anschluss an die jeweils längeren Anfahrphasen waren für die Pressagglomeration der Zerkleinerungsprodukte mit der Pelletpresse eher ruhige Prozessverläufe mit geringen Schwankungen der Leistungsaufnahme zu verzeichnen. Die für die Ermittlung der Primärpartikelgrößenverteilung sowie der Pelleteigenschaften notwendigen Proben wurden jeweils nach dem Erreichen stationärer Bedingungen aus dem Materialstrom entnommen. Die für die Prozessdokumentation sowie zur Beschreibung der Ausgangskomponenten und der erzeugten Pellets ermittelten Daten sind in **Tabelle 5.4-5** aufgelistet.

Aus den hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung sehr unterschiedlichen Zerkleinerungsprodukten wurden im Pressprozess reguläre Pellets hergestellt. Beim Vergleich der Pelletstabilitäten fällt auf, dass die Abriebkennzahlen mit zunehmender Feinheit des Materials (Ausgangs- wie Endprodukt) aufgrund der größeren spezifischen Oberfläche und den daraus hervorgehenden stabileren Bindungsverhältnissen erwartungsgemäß sinken, während die Härtekennwerte keine systematischen Unterschiede aufweisen. Möglicherweise bewirken faserige Grobanteile beim Abriebtest ein Abbrechen von kleinen Agglomeratstücken, während ihre destabilisierende Wirkung mit dem Härtetest nicht erfasst wird. Die Feuchtigkeitsdifferenzen zwischen den pelletierten Produkten sind zu gering, um einen signifikanten Effekt auf die Abriebkennzahl zu haben.

Der Pelletierprozess ist anhand der spezifischen Pressenleistung sowie der Temperaturdifferenz des Zerkleinerungsproduktes vor und nach dem Matrizendurchgang zu charakterisieren. Für den spezifischen Energiebedarf ist, auch unter Berücksichtigung eines abweichenden Wertes, die zu erwartende Tendenz einer Abnahme mit zunehmender Feinheit abzulesen, die aus einem geringeren Verdichtungs- und Zerkleinerungsaufwand resultiert. Der durch die Reibung in den Matrizenkanälen bewirkte und an der Temperaturdifferenz zwischen dem konditionierten und dem durch die Matrice gepressten Material abzulesende Wärmeeintrag im Pelletierprozess ist für die Versuchseinstellungen sehr gering. Die Temperaturdifferenzen liegen bei 6 – 10 K. Demzufolge ist der Kühlprozess auch mit einer vergleichsweise geringen Feuchtigkeitsreduktion verbunden.

Aus den in **Abbildung 5.4-5** nebeneinander gestellten Summenverteilungsfunktionen der Gerste-Zerkleinerungsprodukte sowie den Primärpartikelgrößenverteilungen der aus diesen Produkten in den beschriebenen Pelletierprozessen hergestellten Presslinge, lassen sich vergleichende Rückschlüsse zur Nachzerkleinerung in der Pelletpresse ziehen. Durch das Pelletieren unter weitestgehend konstanten Maschinen- und Prozessbedingungen wurden sämtliche eingesetzten Zerkleinerungsprodukte signifikant zerkleinert. Der mit Abstand größte Nachzerkleinerungseffekt ist für die gröberen Anteile ($> 1\text{ mm}$) zu verzeichnen, die beim Pelletieren durch die Beanspruchung zwischen den Kollern und der 3 mm-Matrice erheblich vermindert werden. Durch den starken Anstieg des Anteils der Feinfraktionen wird der linke Abschnitt der Summenverteilungsfunktionen stark angehoben, so dass für die Gesamtfunktionen ein generell deutlich flacherer Verlauf resultiert. Der stärkste Nachzerkleinerungseffekt trat beim Ausgangsmaterial mit der größten Partikelgrößenverteilung auf, dessen

Nachzerkleinerungsprodukt im Feinbereich ($< 500 \mu\text{m}$) dem entsprechenden Produkt des nächst größeren Ausgangsmaterials entspricht. Das feinste Ausgangsmaterial zeigte unter den gewählten Bedingungen nur einen minderen Nachzerkleinerungseffekt – die Summenverteilungsfunktionen von Ausgangsmaterial und pelletiertem Produkt verlaufen in geringem Abstand.

Die unter weitestgehend gleichen Bedingungen mit den Weizen-Zerkleinerungsprodukten durchgeführten Untersuchungen lassen sich anhand der Daten zu den Prozessverläufen und den stofflichen Charakteristika beschreiben, die in **Tabelle 5.4-6** aufgeführt sind. Während sich die größeren Zerkleinerungsprodukte mit höheren Durchsätzen (180 – 200 kg/h) verarbeiten ließen, musste der Durchsatz beim feinen und beim sehr feinen Produkt auf 170 bzw. 150 kg/h zurückgenommen werden, um die Materialien mit einer reguläre Pressagglomeration zu stabilen Pellets zu verarbeiten. Anhand der für Pelletabrieb und -härte ermittelten Werte ist zu erkennen, dass die aus den beiden feineren Zerkleinerungsprodukten hergestellten Pellets trotz der Reduzierung des Durchsatzes durch eine geringere Stabilität gekennzeichnet sind. Während die Pelletstabilität – vom sehr groben bis zum mittleren Zerkleinerungsprodukt – erwartungsgemäß mit zunehmender Feinheit steigt (der Abriebkennwert geht zurück, die Härte nimmt zu), sinkt sie für die beiden anderen in die Untersuchung einbezogenen Produkte erheblich. Die für die Materialfeuchtigkeit und -temperatur vor und nach dem Matrizendurchgang dokumentierten Daten weisen hingegen, wie bei der Verarbeitung der Gerste-Zerkleinerungsprodukte, auf gleichmäßig geringe Einträge von Reibungswärme in sämtlichen Versuchseinstellungen hin. Die spezifische Pressenleistung geht mit abnehmender Partikelgröße zurück. Ihre Werte liegen durchschnittlich um etwa 15 % über dem für die Pelletierung der Gerste-Zerkleinerungsprodukte ermittelten Energiebedarf, was vermutlich auf Unterschiede in den Partikelgrößenverteilungen der Referenzprodukte zurückzuführen ist, die trotz der zielgerichteten Zerkleinerung aufgetreten sind. Die Veränderung der Stärkemodifikation scheidet im Hinblick auf die moderaten Pellettemperaturen von etwa 40 °C als Ursache für die höhere spezifische Pressenleistung aus, obwohl sie durchaus zu den hohen Stabilitäten der aus den größeren Ausgangsprodukten hergestellten Pellets passen würde.

In **Abbildung 5.4-6** sind die Summenverteilungsfunktionen der Weizen-Zerkleinerungsprodukte vor und nach dem Pelletieren dargestellt. Abgesehen davon, dass die Primärpartikelgrößenverteilungen im pelletierten Material noch etwas näher beieinander liegen, sind keine grundlegenden Unterschiede zur Nachzerkleinerung der entsprechenden Gerste-

Produkte festzustellen. Neben dem erheblich flacheren Verlauf der Summenverteilungsfunktionen ist auch hier beim Pelletieren des feinsten Ausgangsprodukts der bei weitem geringste Zerkleinerungseffekt zu verzeichnen. Die mittleren Partikelgrößen des feinsten Materials fallen vor und nach dem Pelletieren in den Bereich der untersten Partikelgrößenklasse (125 – 250 µm) und konnten somit, anders als beim Gerste-Referenzprodukt, erfasst werden.

5.4.4 Nachzerkleinerung beim Pelletieren mit einer Flachmatrizenpresse (technischer Maßstab)

Für weitere Referenzuntersuchungen zur Nachzerkleinerung beim Pelletieren wurden ausgewählte Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukte der Partikelgrößenkategorien „sehr grob“, „mittel“ und „sehr fein“ mit einer Flachmatrizenpresse im technischen Maßstab zu Pellets mit einem Durchmesser von 3 mm verarbeitet. Vor dem Pressagglomerieren wurden die Zerkleinerungsprodukte mit 1 % Sattdampf und 1 % Wasser konditioniert. Die ursprünglich nicht vorgesehene Zugabe von Wasser wurde vorgenommen, um die Reibung der vergleichsweise trockenen und durch hohe Stärkegehalte gekennzeichneten Zerkleinerungsprodukte beim Matrizendurchgang zu beschränken und ein Überhitzen der Matrice und der Pellets zu vermeiden.

Das Pelletieren der unterschiedlichen Gerste-Zerkleinerungsprodukte wurde mit einer Matrice mit einem Pressverhältnis von 1:7 durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit mit den Resultaten der mit den anderen Maschinen durchgeführten Untersuchungen zu ermöglichen. Die Chargen wurden bei einem Durchsatz von ca. 350 kg/h pelletiert. Bei sämtlichen Prozessverläufen wurden erhebliche Schwankungen der Leistungsaufnahme festgestellt. Die maßgeblichen Daten zur Charakterisierung der Prozesse sowie der Ausgangsstoffe und Endprodukte sind in **Tabelle 5.4-7** zusammengefasst. Aus den durch völlig unterschiedliche Partikelgrößenverteilungen gekennzeichneten Zerkleinerungsprodukten, deren mittlere Partikelgrößen (d_{50}) von ca. 350 µm bis ca. 2.150 µm gespreizt sind, wurden sehr ähnlich stabile Presslinge erzeugt. Sowohl die für die Pellethärte als auch die für den Abrieb ermittelten Werte liegen jeweils eng beieinander – nur die etwas höhere Abriebkennzahl der aus dem sehr groben Zerkleinerungsprodukt hergestellten Pellets weist ggf. auf faserreiche Grobanteile der Gerste hin, die als Sollbruchstellen im pelletierten Material verblieben sind. Die durch die Pressagglomeration bewirkte Schüttdichtezunahme intensiviert sich mit zunehmender Partikelgröße und entspricht somit, wie auch die Intensität der Nachzerkleinerung, dem zu erwartenden Effekt. Die Nachzerkleinerung,

deren Intensität sich anhand der auf die mittlere Partikelgröße des eingesetzten Zerkleinerungsproduktes bezogenen Änderung der mittleren Primärpartikelgröße im pelletierten Material beurteilen lässt, nimmt vom sehr groben zum mittleren Material signifikant ab und sinkt beim feinen Material ganz erheblich. Anders als bei den beschriebenen Parametern zeigen die Daten zur spezifischen Pressenleistung keine einheitliche Tendenz. Auffällig ist der im Vergleich zu den Referenzwerten geringe für das Pelletieren des sehr groben Zerkleinerungsprodukts ermittelte spezifische Energiebedarf, der weder mit der Verdichtungs- noch mit der Nachzerkleinerungsintensität korreliert. Die Veränderungen der Stärkemodifikation beim Matrizendurchgang, also eine stoffliche Ursache für die höhere Pressenenergie beim Pelletieren der feineren Materialien, erscheint angesichts der für sämtliche Chargen dokumentierten nahezu identischen thermischen Bedingungen – vor und nach dem Matrizendurchgang - eher unwahrscheinlich.

Aus den in **Abbildung 5.4-7** nebeneinandergestellten Summenverteilungsfunktionen der Gerste-Zerkleinerungsprodukte gehen die für den erfassten Partikelgrößenbereich sämtlicher Produkte zu verzeichnende Nachzerkleinerung und die mit ihr verbundene Verschiebung der mittleren Partikelgrößen hervor. Für die Primärpartikelgrößenverteilung der pelletierten Produkte ist eine grundsätzliche Proportionalität zu den Summenverteilungsfunktionen der mehlförmigen Ausgangsmaterialien zu erkennen. Beim feinsten Zerkleinerungsprodukt bewirkt das Pelletieren einen erheblichen Rückgang des groben Anteils (Primärpartikelgrößen um 1 mm), während die Summenverteilungsfunktionen des Ausgangsprodukts und des pelletierten Materials im Feinbereich zusammenlaufen.

Im Vergleich zu den mit zerkleinerter Gerste durchgeführten Untersuchungen mussten beim Pelletieren der Weizen-Zerkleinerungsprodukte Prozessparameter modifiziert werden, weil der höhere Stärkegehalt des Weizens bereits bei der Verarbeitung des sehr groben Materials, trotz einer Reduzierung des Durchsatzes, zu einer ständig steigenden Matrizentemperatur und somit nicht zu den angestrebten stationären Bedingungen führte. Daher wurde für die Untersuchung der Weizen-Zerkleinerungsprodukte die Reibung bei der Pressagglomeration verringert, indem eine Matrize mit kürzerem Pressweg (Pressverhältnis 1:4) gewählt wurde. Auch das sehr grobe Zerkleinerungsprodukt wurde mit dieser Matrize pelletiert. Die für die Versuchseinstellungen aufgenommenen Werte sind in **Tabelle 5.4-8** zusammengestellt – in der auch der entsprechende Datensatz der Voruntersuchung am groben Material dokumentiert ist.

Beim Pelletieren der mit einem Durchsatz von ca. 300 kg/h unter regulären Bedingungen verarbeiteten Zerkleinerungsprodukte wurde ein unruhiger Pressenlauf mit einer Schwankungsbreite der Leistungsaufnahme von ca. 1,5 kW beobachtet. Die für die Leistungsaufnahme der Presse sowie für die mit der Pressagglomeration verbundene Erwärmung des Pelletmaterials ermittelten Werte weisen für die unterschiedlichen Materialien nur geringe Unterschiede auf und sind mit ca. 8 kW (3 kW Leerlauf) bzw. 65 °C eher moderat. Die Werte korrespondieren mit der im Vergleich zu den aus Gerste erzeugten Presslingen geringeren Härte und Stabilität der Pellets sowie mit der ausschließlich für das sehr feine Material festzustellenden geringfügig erhöhten Schüttdichte. Während die für die genannten Parameter ermittelten Werte sehr nah beieinanderliegen, ist für die Nachzerkleinerungsintensität beim Weizen – wie bereits bei den mit Gerste durchgeführten Untersuchungen - eine deutliche Abhängigkeit von den zuvor mit der Hammermühle erzeugten Partikelgrößenverteilungen zu erkennen. Auch hinsichtlich der Größenordnung ist die Nachzerkleinerung für die eingesetzten Gerste- und Weizen-Materialien durchaus vergleichbar. Beim sehr feinen Weizen-Zerkleinerungsprodukt konnte für das eingesetzte sowie das pelletierte Material kein Unterschied in der mittleren Partikelgröße und somit kein nennenswerter Nachzerkleinerungseffekt ermittelt werden. Da die spezifische Pressenleistung für die Pelletierung des sehr feinen und des sehr groben Weizen-Zerkleinerungsproduktes gleich ist, lassen sich aus den Daten keine Rückschlüsse auf die Zerkleinerungsenergie ziehen.

Für die aus dem sehr grobem Weizen-Zerkleinerungsprodukt mit Matrizen unterschiedlicher Stärke (Pressverhältnis 1:7 und 1:4) hergestellten Pellets ist erwartungsgemäß festzustellen, dass der auf der größeren Reibung beruhende höhere spezifische Energieeintrag bei Verwendung der Matrice mit längerem Pressweg zu erheblich stabileren Presslingen führt. Der Vergleich der mittleren Partikelgrößen bestätigt den in der vorausgegangenen Vergleichsuntersuchung festgestellten Effekt, dass die Intensität der Nachzerkleinerung mit zunehmendem Pressweg steigt.

Für die in **Abbildung 5.4-8** dargestellten Summenverteilungsfunktionen der Weizen-Zerkleinerungsprodukte sind weitgehende Ähnlichkeiten zu den Gerste-Produkten festzustellen. Die für das feine Material ermittelten Summenverteilungsfunktionen laufen auch hier bei den größten Partikelgrößen auseinander und bei der kleinsten erfassten Partikelgrößen wieder zusammen. Auffällig ist der fast identische Verlauf der für die Primärpartikelgrößenverteilung des mittleren und des groben Materials ermittelten Summenverteilungsfunktionen im Bereich

kleiner Partikelgrößen, der bereits anhand der in den Tabellen ausgewiesenen, nah beieinander liegenden mittleren Partikelgrößen abzusehen war.

5.4.5 Vergleich des Nachzerkleinerungseffekts beim Pelletieren mit unterschiedlichen Pelletpressen

In den **Abbildungen 5.4-9** und **5.4-10** ist die relative Nachzerkleinerung, also die am Ausgangswert normierte Veränderung der mittleren Partikelgröße durch die Nachzerkleinerung, für sämtliche unter möglichst gleichen Bedingungen mit unterschiedlichen Zerkleinerungsprodukten und Pelletpressen durchgeführten Versuchseinstellungen zusammengeführt. Nicht einbezogen werden konnten die Versuchseinstellungen, bei denen der Mittelwert der Primärpartikelgrößenverteilung unterhalb der Erfassungsgrenze der für die Nasssiebung verwendeten Siebreihe lag – vorrangig betrifft das sämtliche beim Pelletieren von Weizen mit der Labor-Flachmatrizenpresse zu ermittelnden Kennwerte. Ursprünglich sollte die Auftragung der für die relative Nachzerkleinerung ermittelten Werte dazu verwendet werden, die mittlere Partikelgröße von Zerkleinerungsprodukten abzuschätzen, unterhalb der beim Pelletieren unter den gegebenen Bedingungen kein Nachzerkleinerungseffekt zu erwarten ist. Ergiebiger erscheint aber die Verwendung der Kennzahlen, um die beim Pelletieren mit den unterschiedlichen Pressen auftretende Nachzerkleinerung zu vergleichen. Für die beim Pelletieren der Weizen- und Gerste-Zerkleinerungsprodukte mit der Ring- und der Flachmatrizenpresse (jeweils im technischen Maßstab) auftretende Nachzerkleinerung lassen sich sämtliche Kennwerte, abgesehen von der relativen Nachzerkleinerung, die für das sehr feine Gerste-Zerkleinerungsprodukt ermittelt wurde, jeweils einem einheitlichen Kurvenverlauf zuordnen. Für das Pelletieren der Gerste-Zerkleinerungsprodukte mit der Labor-Flachmatrizenpresse ergaben sich für die relative Nachzerkleinerung hingegen deutlich höhere Werte. Begründet werden kann dies damit, dass insbesondere bei Flachmatrizenpressen mit sehr kleinen Matrizendurchmessern – wie im vorliegenden Fall – aufgrund der intensiven Kreisbewegung der Koller die zwischen Kollern und Matrizen auftretenden Scherkräfte besonders zum Tragen kommen. Je größer der Durchmesser der Matrizen bei Flachmatrizenpressen, umso geringer wirken sich diese Scherkräfte aus.

Bei der Verwendung der relative Nachzerkleinerung für Vergleiche ist zu berücksichtigen, dass die Kennwerte auf Partikelgrößenverteilungen beruhen, deren Summenverteilungsfunktionen an der Position der willkürlich gewählten mittleren Partikelgröße unterschiedliche, sowohl durch die vorausgegangenen mechanischen Beanspruchungen der Materialien, als auch durch den

analytischen Prozess der Nasssiebung beeinflusste Steigungen aufweisen, die Einfluss auf die Kennzahl haben.

Tabelle 5.4-1: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Gerste erzeugten Zerkleinerungsprodukte

Gerste/HM		60 m/s, 10 mm	60 m/s, 5 mm	60 m/s, 3 mm	80 m/s, 3 mm	110 m/s, 2 mm
Durchsatz		1.500 kg/h	1.000 kg/h	550 kg/h	680 kg/h	600 kg/h
Leistungsaufnahme		7,2 kW	10,6 kW	10,6 kW	11,5 kW	13,3 kW
spez. Leistung		3,7 kWh/t	8,9 kWh/t	11,8 kWh/t	13,5 kWh/t	14,2 kWh/t
d ₅₀ (Mehl-TS)		2,236 mm	1,606 mm	0,902 mm	0,705 mm	0,281 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,441 mm	1,750 mm	0,963 mm	0,600 mm	0,141 mm

Tabelle 5.4-2: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Weizen erzeugten Zerkleinerungsprodukte

Weizen/HM		50 m/s, 10 mm	50 m/s, 5 mm	50 m/s, 3 mm	70 m/s, 3 mm	100 m/s, 2 mm
Durchsatz		750 kg/h	750 kg/h	800 kg/h	630 kg/h	1.250 kg/h
Leistungsaufnahme		3,4 kW	5,4 kW	10,0 kW	9,4 kW	12,5 kW
spez. Leistung		2,4 kWh/t	4,7 kWh/t	6,5 kWh/t	6,7 kWh/t	8,1 kWh/t
d ₅₀ (Mehl-TS)		1,705 mm	1,225 mm	0,723 mm	0,534 mm	0,255 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,029 mm	1,251 mm	0,550 mm	0,316 mm	< 0,1 mm ¹⁴

¹⁴ nicht erfasst

Tabelle 5.4-3: Pelletieren von Gerste-Zerkleinerungsprodukten mit einer Labor-Flachmatrizenpresse

Zerkleinerung (HM)		60 m/s, 10 mm	60 m/s, 5 mm	60 m/s, 3 mm	80 m/s, 3 mm	110 m/s, 2 mm
PGV (Kategorie)		sehr grob	grob	mittel	fein	sehr fein
Feuchtigkeit vor Pr.		12,5 %	12,6 %	12,8 %	12,6 %	12,5 %
Feuchtigkeit nach Pr.		12,5 %	12,7 %	12,6 %	12,8 %	12,3 %
Pressverhältnis		1:3	1:3	1:3	1:3	1:3
Durchsatz		51 kg/h	45 kg/h	48 kg/h	53 kg/h	53 kg/h
Leistungsaufnahme		1,98 kW	1,72 kW	1,79 kW	1,80 kW	1,77 kW
spez. Leistung		32,4 kWh/t	30,9 kWh/t	30,4 kWh/t	27,7 kWh/t	27,2 kWh/t
Pelletabrieb (NHP)		68,2 %	50,8 %	65,1 %	58,3 %	43,8 %
Pellethärte		26 N	29 N	24 N	25 N	32 N
Pelletlänge		9,5 mm	9,2 mm	9,4 mm	9,4 mm	9,3 mm
d ₅₀ (Mehl-TS)		2,236 mm	1,606 mm	0,902 mm	0,705 mm	0,281 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,441 mm	1,750 mm	0,963 mm	0,600 mm	0,141 mm
d ₅₀ (Pellets-NS)		0,913 mm	0,392 mm	0,250 mm	0,180 mm	< 0,1mm ¹⁵
relative Nachz. $\Delta d_{50} / d_{50(\text{Mehl-NS})}$		0,63	0,78	0,74	0,70	-

¹⁵ nicht erfasst

Tabelle 5.4-4: Pelletieren von Weizen-Zerkleinerungsprodukten mit einer Labor-Flachmatrizenpresse

Zerkleinerung (HM)		50 m/s, 10 mm	50 m/s, 5 mm	50 m/s, 3 mm	70 m/s, 3 mm	100 m/s, 2 mm
PGV (Kategorie)		sehr grob	grob	mittel	fein	sehr fein
Feuchtigkeit vor Pr.		12,7 %	12,6 %	12,4 %	12,4 %	12,8 %
Feuchtigkeit nach Pr.		12,5 %	12,7 %	12,2 %	12,6 %	12,6 %
Pressverhältnis		1:3	1:3	1:3	1:3	1:3
Durchsatz		50 kg/h	48 kg/h	36 kg/h	31 kg/h	27 kg/h
Leistungsaufnahme		2,00 kW	1,80 kW	1,33 kW	1,14 kW	1,13 kW
spez. Leistung		33,4 kWh/t	30,6 kWh/t	27,8 kWh/t	26,1 kWh/t	29,6 kWh/t
Pelletabrieb (NHP)		13,1 %	10,7 %	6,1 %	6,4 %	5,8 %
Pellethärte		71 N	64 N	74 N	85 N	90 N
Pelletlänge		8,1 mm	8,1 mm	8,2 mm	8,0 mm	8,2 mm
d ₅₀ (Mehl-TS)		1,705 mm	1,225 mm	0,723 mm	0,534 mm	0,255 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,029 mm	1,251 mm	0,550 mm	0,316 mm	< 0,1mm ¹⁶
d ₅₀ (Pellets-NS) ¹⁷		< 0,1mm	< 0,1mm	< 0,1mm	< 0,1mm	< 0,1mm

¹⁶ nicht erfasst¹⁷ nicht erfasst

Tabelle 5.4-5: Pelletieren von Gerste-Zerkleinerungsprodukten im technischen Maßstab mit einer Ringmatrizenpresse

Zerkleinerung (HM)		60 m/s, 10 mm	60 m/s, 5 mm	60 m/s, 3 mm	80 m/s, 3 mm	110 m/s, 2 mm
PGV (Kategorie)		sehr grob	grob	mittel	fein	sehr fein
Feuchtigkeit vor Pr.		12,2	12,2	12,1	12,0	11,8
Feuchtigkeit nach Kühler		11,5	11,6	11,3	11,4	11,2
Temperatur vor Pr.		33 °C	32 °C	33 °C	31 °C	30 °C
Temperatur nach Pr.		39 °C	38 °C	40 °C	38 °C	40 °C
Schüttdichte vor Pr.		0,42 kg/dm ³	0,46 kg/dm ³	0,48 kg/dm ³	0,49 kg/dm ³	0,52 kg/dm ³
Schüttdichte nach Pr.		0,58 kg/dm ³	0,60 kg/dm ³	0,63 kg/dm ³	0,65 kg/dm ³	0,65 kg/dm ³
Pressverhältnis		1:7	1:7	1:7	1:7	1:7
Durchsatz		152 kg/h	160 kg/h	158 kg/h	159 kg/h	170 kg/h
Leistungsaufnahme		10,7 kW	10,6 kW	10,6 kW	10,5 kW	10,5 kW
spez. Leistung		30,8 kWh/t	28,8 kWh/t	29,1 kWh/t	28,3 kWh/t	26,3 kWh/t
Pelletabrieb (NHP)		9,8 %	6,9 %	5,5 %	5,1 %	3,6 %
Pellethärte		67 N	64 N	70 N	66 N	67 N
Pelletlänge		9,9 mm	9,8 mm	9,3 mm	9,3 mm	9,1 mm
d ₅₀ (Mehl-TS)		2,236 mm	1,606 mm	0,902 mm	0,705 mm	0,281 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,441 mm	1,750 mm	0,963 mm	0,600 mm	0,141 mm
d ₅₀ (Pellets-NS)		0,891 mm	0,742 mm	0,419 mm	0,327 mm	0,123 mm
relative Nachz. $\Delta d_{50} / d_{50(\text{Mehl-NS})}$		0,63	0,57	0,56	0,46	0,13

Tabelle 5.4-6: Pelletieren von Weizen-Zerkleinerungsprodukten im technischen Maßstab mit einer Ringmatrizenpresse

Zerkleinerung (HM)		50 m/s, 10 mm	50 m/s, 5 mm	50 m/s, 3 mm	70 m/s, 3 mm	100 m/s, 2 mm
PGV (Kategorie)		sehr grob	grob	mittel	fein	sehr fein
Feuchtigkeit vor Pr.		12,5 %	12,3 %	12,3 %	12,6 %	12,4 %
Feuchtigkeit nach Kühler		11,8 %	11,7 %	11,8 %	11,9 %	12,0 %
Temperatur vor Pr.		31 °C	33 °C	33 °C	35 °C	34 °C
Temperatur nach Pr.		39 °C	38 °C	40 °C	38 °C	40 °C
Schüttdichte vor Pr.		0,56 kg/dm ³	0,59 kg/dm ³	0,60 kg/dm ³	0,58 kg/dm ³	0,59 kg/dm ³
Schüttdichte nach Pr.		0,58 kg/dm ³	0,58 kg/dm ³	0,61 kg/dm ³	0,60 kg/dm ³	0,61 kg/dm ³
Pressverhältnis		1:7	1:7	1:7	1:7	1:7
Durchsatz		182 kg/h	195 kg/h	199 kg/h	170 kg/h	150 kg/h
Leistungsaufnahme		12,6 kW	12,5 kW	12,9 kW	11,4 kW	10,8 kW
spez. Pressenleistung		36,2 kWh/t	33,3 kWh/t	34,5 kWh/t	31,8 kWh/t	31,7 kWh/t
Pelletabrieb (NHP)		3,2 %	2,8 %	2,1 %	6,9 %	9,8 %
Pellethärte		76 N	80 N	93 N	65 N	56 N
Pelletlänge		9,4 mm	9,7 mm	10,1 mm	9,5 mm	9,6 mm
d ₅₀ (Mehl-TS)		1,705 mm	1,225 mm	0,723 mm	0,534 mm	0,255 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,029 mm	1,251 mm	0,550 mm	0,316 mm	< 0,1mm ¹⁸
d ₅₀ (Pellets-NS)		0,305 mm	0,332 mm	0,169 mm	0,171 mm	< 0,1mm ¹⁸
relative Nachz. $\Delta d_{50} / d_{50(\text{Mehl-NS})}$		0,85	0,73	0,69	0,46	-

¹⁸ nicht erfasst

Tabelle 5.4-7: Pelletieren von Gerste-Zerkleinerungsprodukten im technischen Maßstab mit einer Flachmatrizenpresse

Zerkleinerungsparameter (HM)		60 m/s, 10 mm	60 m/s, 3 mm	110 m/s, 2 mm
PGV (Kategorie)		sehr grob	mittel	sehr fein
Feuchtigkeit vor Presse		10,3 %	12,3 %	12,1 %
Feuchtigkeit nach Presse		9,6 %	9,6 %	9,8 %
Temperatur vor Presse		37 °C	39 °C	41 °C
Temperatur nach Presse		75 °C	79 °C	80 °C
Schüttdichte vor Presse		0,39 kg/dm ³	0,46 kg/dm ³	0,50 kg/dm ³
Schüttdichte nach Presse		0,59 kg/dm ³	0,65 kg/dm ³	0,67 kg/dm ³
Pressverhältnis		1:7	1:7	1:7
Durchsatz		346 kg/h	340 kg/h	361 kg/h
Leistungsaufnahme Presse		13 kW	15 kW	15 kW
spez. Pressenleistung		28,9 kWh/t	35,3 kWh/t	33,2 kWh/t
Pelletabrieb (Pfost)		3,5	2,3	2,0
Pellethärte		68 N	70 N	70 N
Pelletlänge		9,9 mm	9,5 mm	9,6 mm
d ₅₀ (Mehl-TS)		2,154 mm	1,038 mm	0,352 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,972 mm	1,257 mm	0,316 mm
d ₅₀ (Pellets-NS)		0,930 mm	0,539 mm	0,288 mm
relative Nachz. $\Delta d_{50} / d_{50(\text{Mehl-NS})}$		0,69	0,57	0,09

Tabelle 5.4-8: Pelletieren von Weizen-Zerkleinerungsprodukten im technischen Maßstab mit einer Flachmatrizenpresse

Zerkleinerung (HM)		50 m/s, 10 mm		50 m/s, 3 mm	100 m/s, 2 mm
PGV (Kategorie)		sehr grob		mittel	sehr fein
Feuchtigkeit vor Pr.		10,9 %	13,0 %	13,7 %	13,3 %
Feuchtigkeit nach Pr.		10,6 %	12,9 %	12,7 %	12,3 %
Temperatur vor Pr.		40 °C	40 °C	35 °C	39 °C
Temperatur nach Pr.		87 °C	64 °C	59 °C	66 °C
Schüttdichte vor Pr.		0,61 kg/dm ³	0,61 kg/dm ³	0,61 kg/dm ³	0,60 kg/dm ³
Schüttdichte nach Pr.		0,64 kg/dm ³	0,56 kg/dm ³	0,57 kg/dm ³	0,63 kg/dm ³
Pressverhältnis		1:7	1:4	1:4	1:4
Durchsatz		250 kg/h	300 kg/h	300 kg/h	300 kg/h
Leistungsaufnahme		13 kW ¹⁹	8 kW	7 kW	8 kW
Spez. Pressenleist.		40,0 kWh/t	16,7 kWh/t	13,3 kWh/t	16,7 kWh/t
Pelletabrieb (Pfost)		2,4	11,0	12,5	8,2
Pellethärte		106 N	42 N	33 N	39 N
Pelletlänge		9,5 mm	9,9 mm	10,0 mm	10,0 mm
d ₅₀ (Mehl-TS)		2,054 mm	2,054 mm	1,258 mm	0,308 mm
d ₅₀ (Mehl-NS)		2,250 mm	2,250 mm	1,418 mm	0,120 mm
d ₅₀ (Pellets-NS)		0,380 mm	0,440 mm	0,335 mm	0,120 mm
relative Nachz.		0,83	0,80	0,76	0
$\Delta d_{50} / d_{50(\text{Mehl-NS})}$					

¹⁹ Mittlerer Wert aus einem nicht stationären Prozess

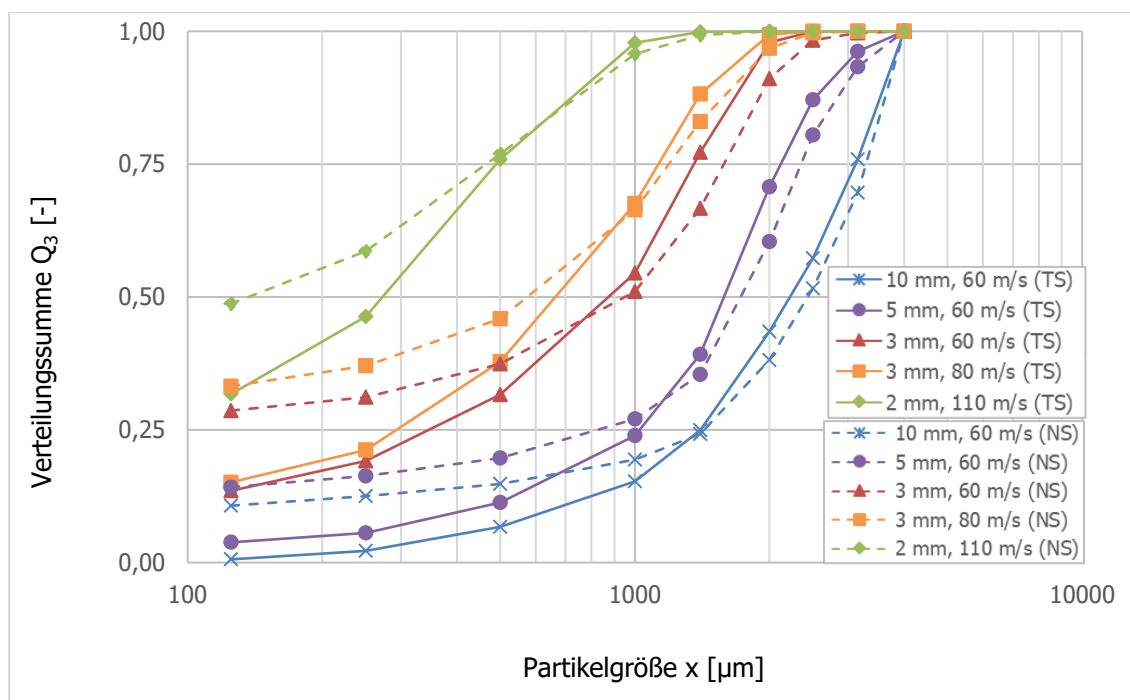


Abbildung 5.4-1: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Gerste erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trocken- und Nasssiebung)

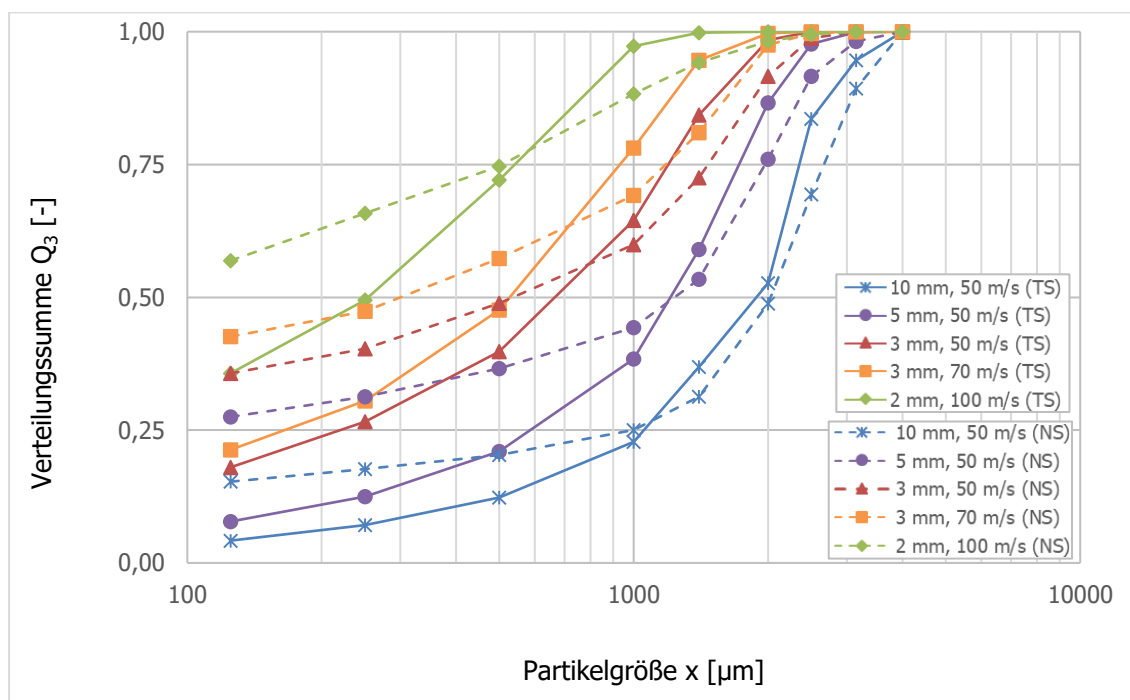


Abbildung 5.4-2: Partikelgrößenverteilung der mit der Hammermühle aus Weizen erzeugten Zerkleinerungsprodukte (Trocken- und Nasssiebung)

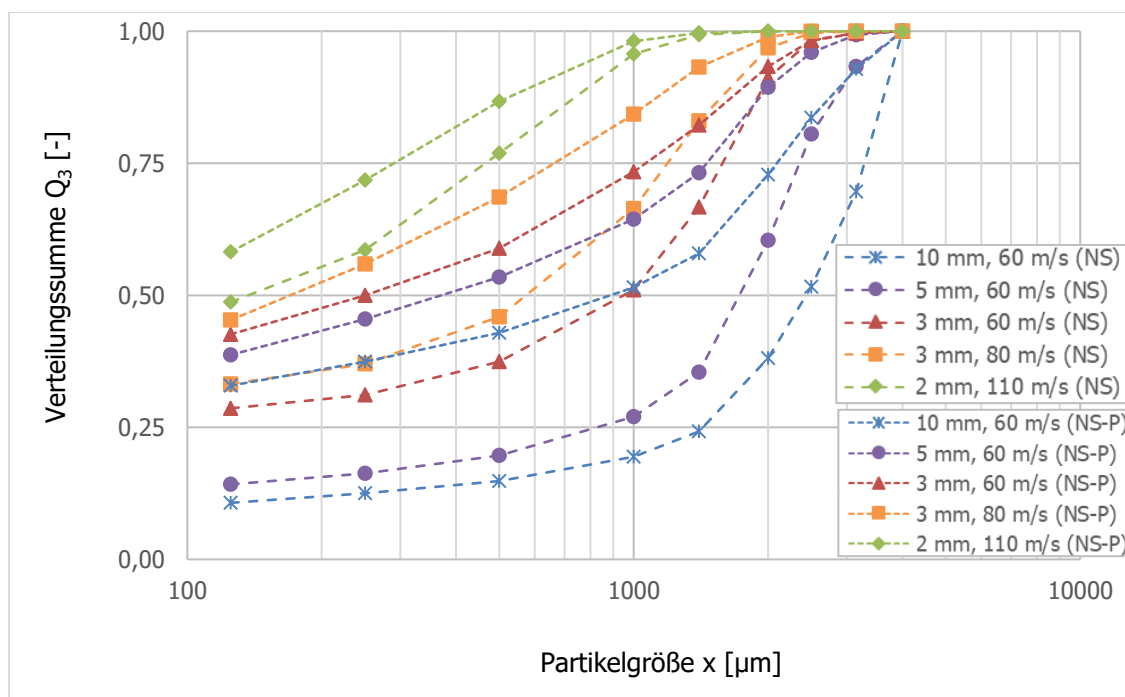


Abbildung 5.4-3: Partikelgrößenverteilung der Gerste-Zerkleinerungsprodukte (sehr grob, grob, mittel, fein, sehr fein) vor und nach dem Pelletieren mit einer Labor-Flachmatrizenpresse

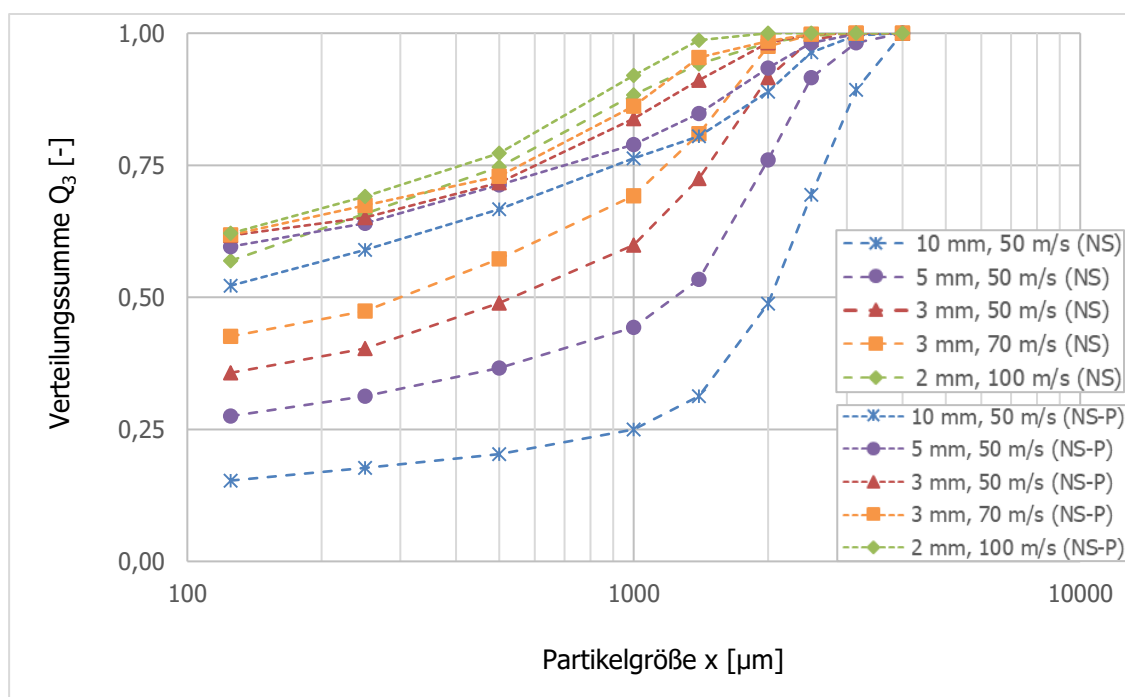


Abbildung 5.4-4: Partikelgrößenverteilung der Weizen-Zerkleinerungsprodukte (sehr grob, grob, mittel, fein, sehr fein) vor und nach dem Pelletieren mit einer Labor-Flachmatrizenpresse

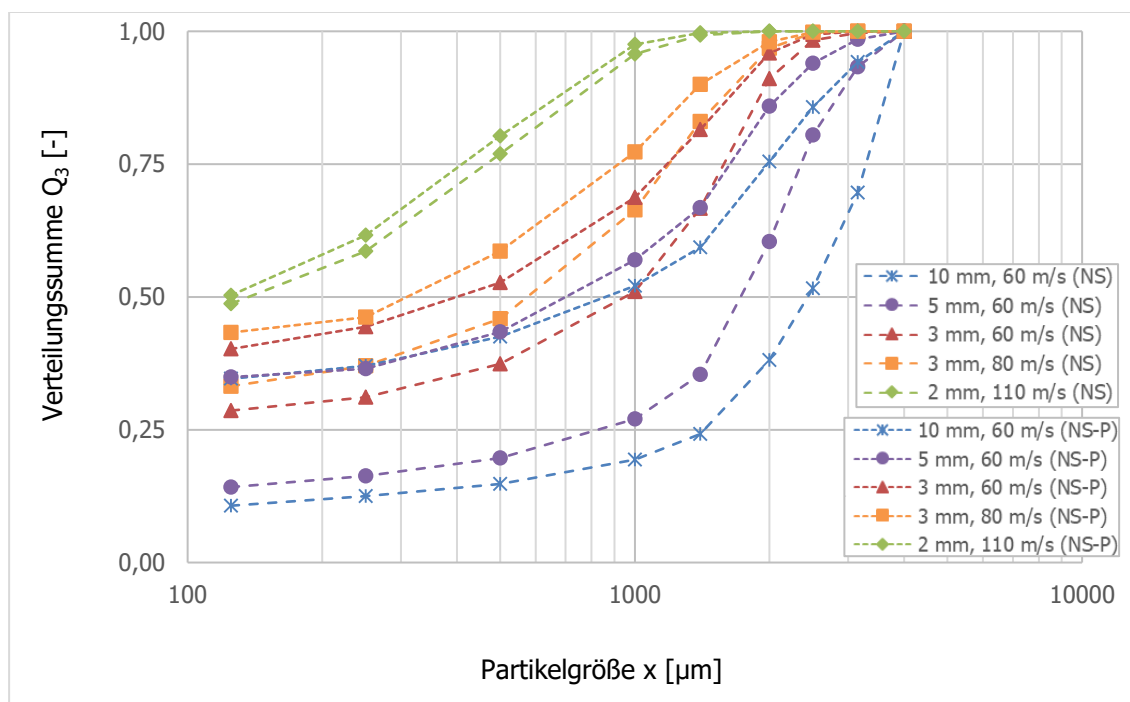


Abbildung 5.4-5: Partikelgrößenverteilung der Gerste-Zerkleinerungsprodukte (sehr grob, grob, mittel, fein, sehr fein) vor und nach dem Pelletieren im technischen Maßstab mit einer Ringmatrizenpresse

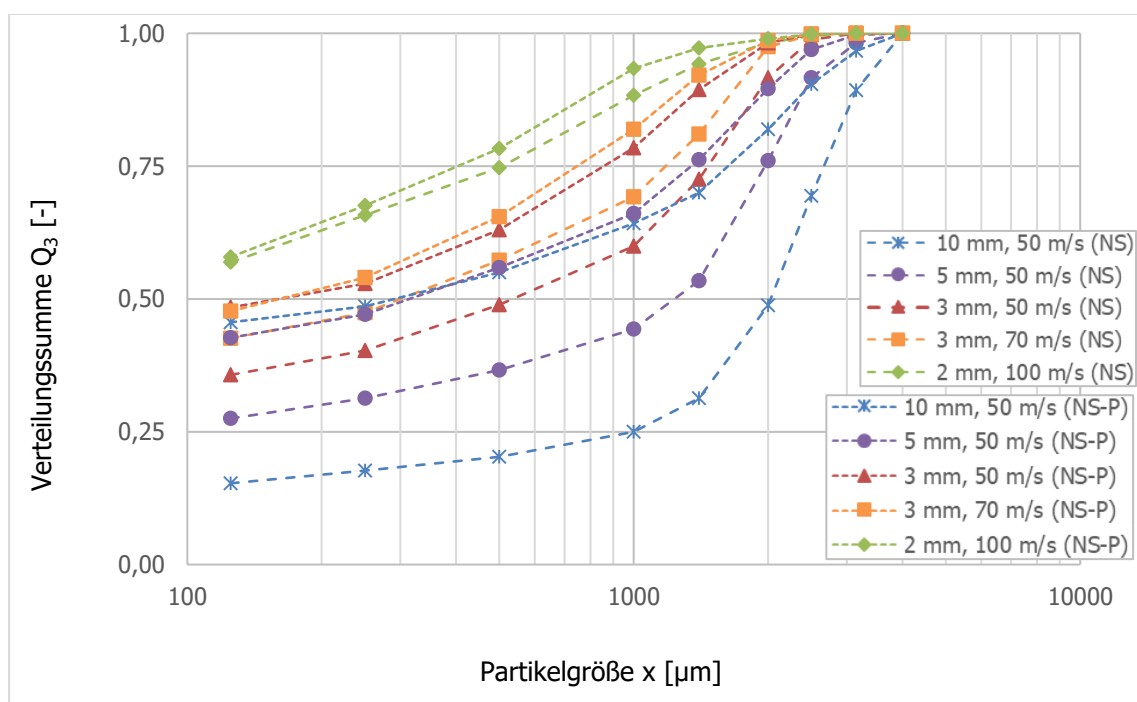


Abbildung 5.4-6: Partikelgrößenverteilung der Weizen-Zerkleinerungsprodukte (sehr grob, grob, mittel, fein, sehr fein) vor und nach dem Pelletieren im technischen Maßstab mit einer Ringmatrizenpresse

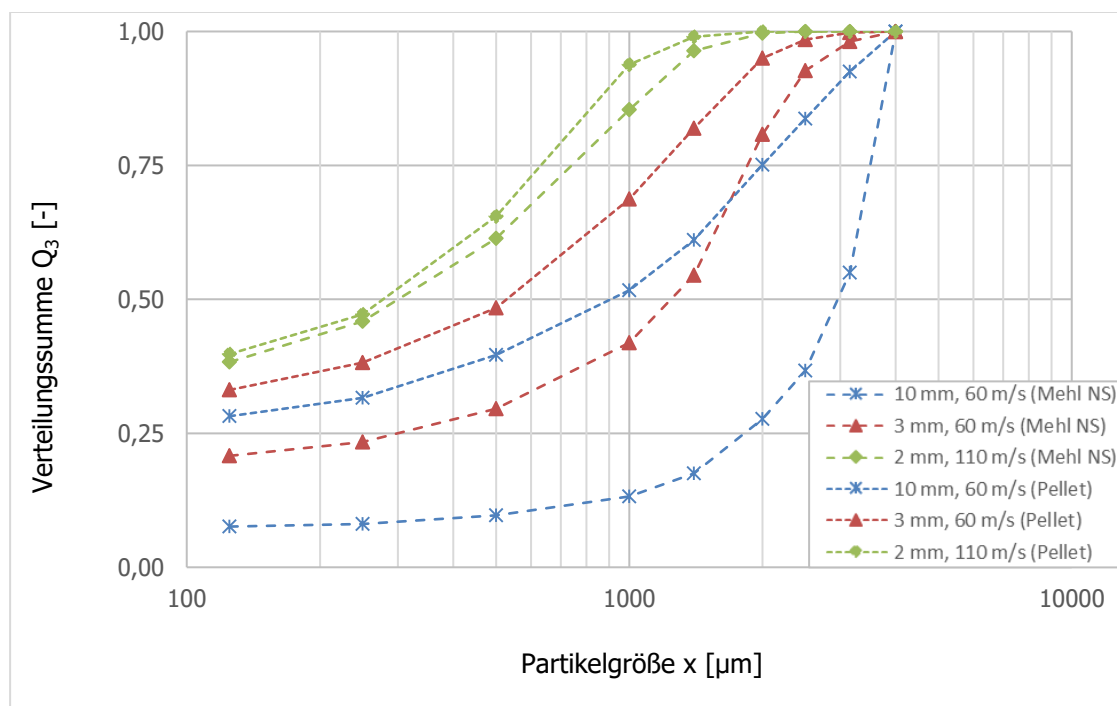


Abbildung 5.4-7: Partikelgrößenverteilung der Gerste-Zerkleinerungsprodukte (sehr grob, mittel, sehr fein) vor und nach dem Pelletieren im technischen Maßstab mit einer Flachmatrizenpresse

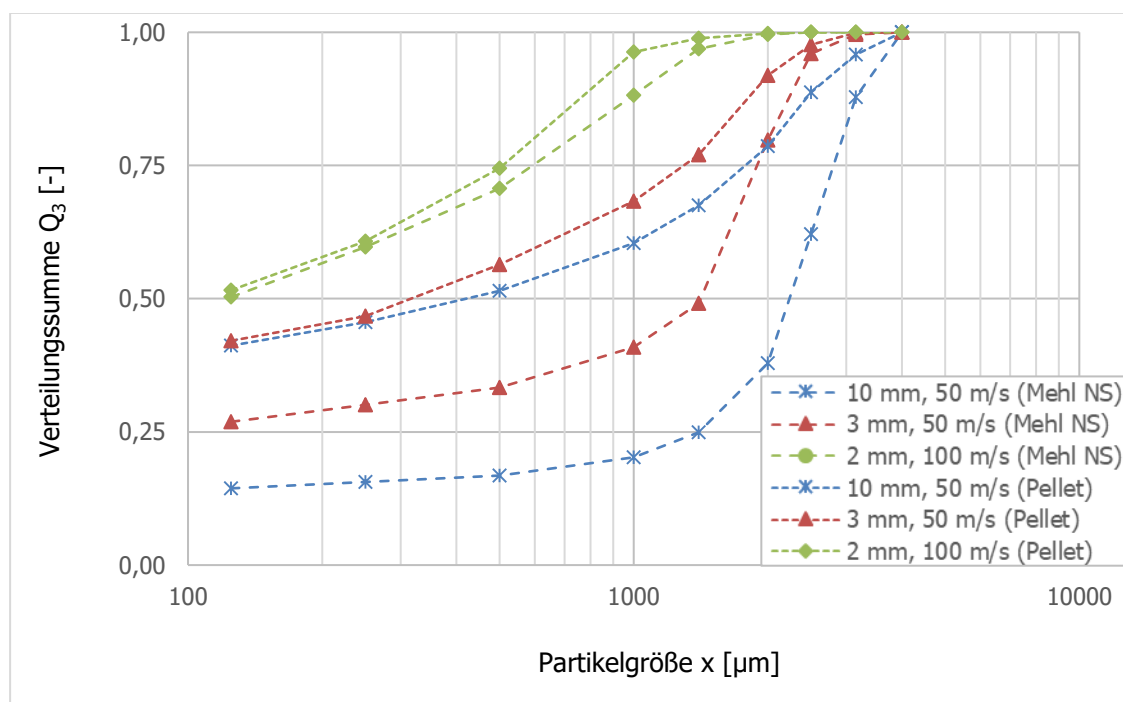


Abbildung 5.4-8: Partikelgrößenverteilung der Weizen-Zerkleinerungsprodukte (sehr grob, mittel, sehr fein) vor und nach dem Pelletieren im technischen Maßstab mit einer Flachmatrizenpresse

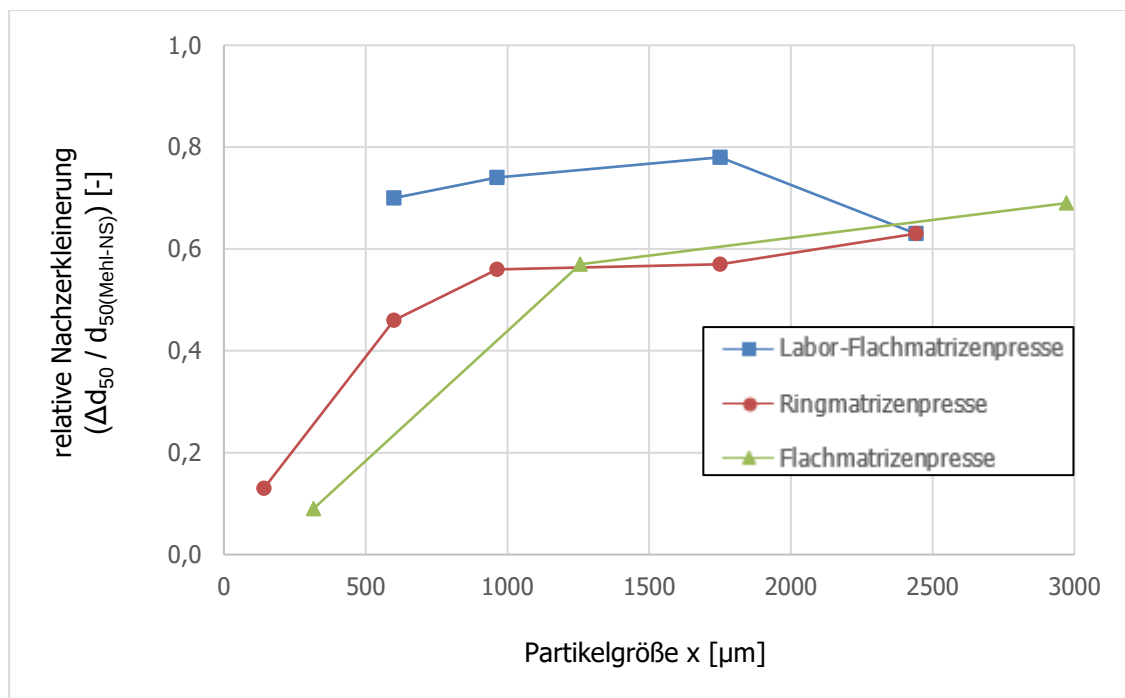


Abbildung 5.4-9: Relative Nachzerkleinerung der Gerste-Zerkleinerungsprodukte beim Pelletieren mit unterschiedlichen Pelletpressen

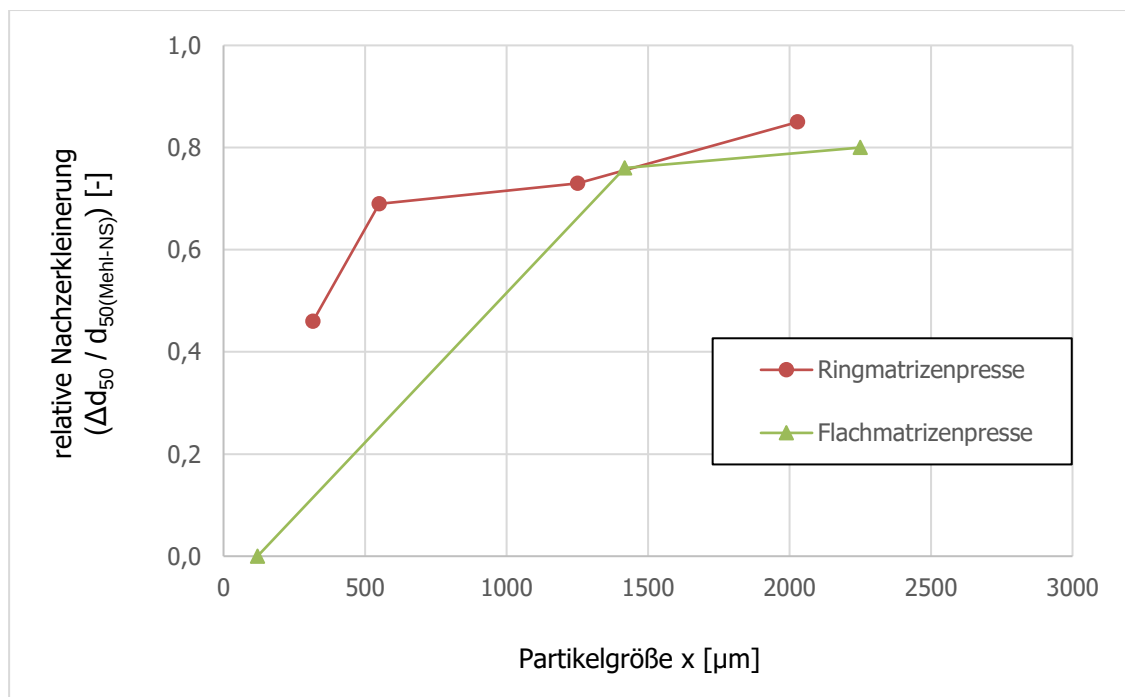


Abbildung 5.4-10: Relative Nachzerkleinerung der Weizen-Zerkleinerungsprodukte beim Pelletieren mit unterschiedlichen Pelletpressen

5.5 Untersuchungen zur Nachzerkleinerung von Mischfuttermitteln beim Pelletieren in industriellen Anlagen

An betriebsüblich hergestellten Pelletfuttern aus zwei auf die Herstellung von Geflügelfutter spezialisierten Mischfutterwerken wurde die Nachzerkleinerung untersucht, die in industriellen Anlagen beim Pelletieren regulärer Mischfutterrezepturen auftritt. Für die Auswahl der zu untersuchenden Futter war maßgeblich gewesen, dass die dem Pelletieren vorausgehende Vermahlung der Rohwaren, die ausschließlich oder zumindest überwiegend mit Walzen- oder Keilscheibenmühlen durchgeführt wurde, auf die Herstellung vergleichsweise grober Partikelgrößenverteilungen abzielte. In die Untersuchungen wurden vier unterschiedliche Rezepturen einbezogen, ein Geflügelaufzucht- sowie drei Geflügelmastfutter. Sämtliche Rezepturen bestanden, bei unterschiedlicher Zusammensetzung, ganz überwiegend aus den Einzelfuttermitteln Weizen und Mais, die im Geflügelfutter gemeinsam mit zugefügtem Fett als Energiequelle dienen, sowie aus dem Proteinträger Sojaextraktionsschrot. Abgesehen vom Aufzuchtfutter waren sämtliche Mischungen nach der Vermahlung durch mittlere Partikelgrößen (d_{50} -Wert, Trockensiebung) von über 1.000 μm gekennzeichnet. Beim Aufzuchtfutter, das auch schonend zerkleinert wurde, hat nicht zuletzt der besonders hohe Anteil am bereits für den Extraktionsprozess zerkleinerten Sojaextraktionsschrot einen wesentlichen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung und ihren vergleichsweise niedrigen Mittelwert. Das Aufzuchtfutter wurde zu Pellets mit einem Durchmesser von 2,2 mm verarbeitet, während die anderen Mischungen zu 3,0 mm starken Presslingen pelletiert wurden. Vor dem Pelletieren wurden sämtliche Futter mit 3 – 3,5 % Sattdampf intensiv konditioniert. Um im Geflügelfutter eine möglichst intensive hygienisierende Wirkung zu erzielen, waren die Anlagen mit Langzeitkonditioneuren oder mit Kurzzeitkonditioneuren, denen ein Verweilbehälter nachgeordnet war, ausgestattet. Neben der Hygienisierung dürfte das längere und damit auch intensivere Einwirken von Wärme und Feuchtigkeit zu einer Flexibilisierung der Partikel und zu einer größeren Stabilität gegenüber der Nachzerkleinerung beim anschließenden Matrizendurchgang geführt haben.

Die Kenngrößen zur Charakterisierung der Pellets sowie zur Beurteilung der Nachzerkleinerung beim Pelletieren sind in **Tabelle 5.5-1** zusammengestellt. Die im Vergleich zu den für die Referenzuntersuchungen hergestellten Getreidepellets geringe Stabilität der Geflügelfutterpellets resultiert absehbar überwiegend aus dem hohen Fettgehalt, der sowohl die Reibung im Matrizenkanal als auch die sich beim Pelletieren ausbildenden Bindungen zwischen den Partikeln mindern. Plausibel ist der für das Geflügelaufzuchtfutter festgestellte intensive

Nachzerkleinerungseffekt, der sowohl den in der Tabelle aufgeführten Daten als auch den Summenverteilungen in **Abbildung 5.5-1** zu entnehmen ist. Unabhängig von der bereits durch einen relativ geringen Grobanteil gekennzeichneten Partikelgrößenverteilung unterliegt das mit der Matrice mit den geringsten Bohrungsdurchmessern pelletierte Futter der relativ größten Zerkleinerung, die an der mit 55,8 % geringsten relativen Beständigkeit des Grobanteils sowie dem erheblichen Anwachsen des Feinanteils zu erkennen ist.

Die Geflügelmastfutter 1 und 2, deren Partikelgrößenverteilungen in den **Abbildungen 5.5-2** und **5.5-3** als Summenverteilungsfunktionen dargestellt sind, boten eine für die Untersuchung des Nachzerkleinerungseffekt interessante Versuchsanordnung, da sie auf den gleichen Rohwaren basierten, die mit unterschiedlichen Mühlentypen zerkleinert und anschließend unter identischen Bedingungen mit derselben Presse pelletiert wurden. Grundsätzlich war zu erwarten, dass sich für die unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen eine Proportionalität hinsichtlich der Nachzerkleinerungsintensität und damit auch die gleiche relative Beständigkeit des Grobanteils nachweisen lassen würde. Bei der Trocken- und Nasssiebung wurden für die unterschiedlich hergestellten Zerkleinerungsprodukte unerwartet ähnliche, über den gesamten erfassten Partikelgrößenbereich weitgehend parallel verlaufende Summenverteilungen gefunden. Unerwartet deutliche Unterschiede sind aus den Verläufen der für die Primärpartikelgrößenverteilungen der pelletierten Zerkleinerungsprodukte erhaltenen Summenverteilungsfunktionen zu erkennen. Während die Summenverteilungen im Bereich der kleineren Partikelgrößen ($< 1.000 \mu\text{m}$) ohne größere Abstände verlaufen, kennzeichnen sie im Bereich der gröberen Partikel erhebliche Unterschiede in der Zusammensetzung der Geflügelmastfutter 1 und 2. Aus der Summenverteilungsfunktion von Futter 1, die oberhalb von $1.000 \mu\text{m}$ einen eher geringen Abstand zu der für das Ausgangsmaterial ermittelten Kurve aufweist, lässt sie für die große Partikel ein vergleichsweise moderater Nachzerkleinerungseffekt ableiten, während die Grobanteile von Futter 2 beim Pelletieren erheblich stärker reduziert wurden (s. **Abbildungen 5.5-2** und **5.5-3**). Aus den in **Tabelle 5.5-1** zusammengestellten Kennwerten sind die Unterschiede in der Primärpartikelgrößenverteilung der pelletierten Futter nicht zu entnehmen, da sie mit der mittleren Partikelgröße sowie dem Grobanteil ($> 1.000 \mu\text{m}$) ausschließlich Bereiche erfassen, in denen keine relevanten Unterschiede der Partikelgrößenverteilung der beiden in gleicher Weise verarbeiteten Futter vorliegen. Die für die Beschreibung der Nachzerkleinerung beim Pelletieren pragmatisch gewählten Kenngrößen, die für die beiden verglichenen Futter eine etwa gleiche relative Beständigkeit des Grobanteils ausweisen, geben grundsätzlich Auskunft über die physiologische Wirkung der

Partikelgrößenverteilung des Futters. Details zu Übereinstimmungen oder Unterschieden von Partikelgrößen sind ihnen nicht zu entnehmen. Die begrenzte Aussagekraft der Kenngrößen wurde bereits im Zusammenhang mit der Beschreibung der Nachzerkleinerung besonders feiner Zerkleinerungsprodukte diskutiert, bei denen deutlich nachzuweisende Nachzerkleinerungseffekte ausschließlich im Bereich der besonders großen Partikel auftraten (s. Kap. 5.4).

Die Geflügelmastfutter 3 und 4 sind durch große Anteile an sehr groben Partikeln ($> 2.000\ \mu\text{m}$) gekennzeichnet, die den in den **Abbildungen 5.5-4** und **5.5-5** als Summenverteilungsfunktionen dargestellten Partikelgrößenverteilungen zu entnehmen sind. Bei den Summenverteilungsfunktionen beider Futter fällt der geringe Unterschied zwischen den Trocken- und Nasssiebungsergebnissen auf, der im Bereich besonders großer Partikelgrößen kaum zu erkennen ist. Ebenso auffällig ist die eher moderate Zerkleinerung der besonders großen Partikel beim Pelletieren. Selbst die Partikel, deren Querschnitt den Matrizenbohrungsdurchmesser von 3,0 mm geringfügig überschreitet, waren im pelletierten Produkt in durchaus nennenswerter Größenordnung nachweisbar. Die eher geringe Nachzerkleinerung, die auch aus den für die relative Beständigkeit des Grobanteils ermittelten Werten (ca. 80 bzw. 90 %) hervorgeht, dürfte auf den bereits diskutierten Wirkungen einer intensiven Langzeitkonditionierung und eines relativ hohen Fettgehaltes beruhen. Insbesondere die Kombination der beiden Faktoren hat verfahrenstechnische Grenzen, da mit der reibungsmindernden Wirkung sowohl eine Verringerung der Kraftübertragung zwischen der Matrice und den Kollern als auch der Verdichtung des Futters in der Matrice verbunden sind. Die zur Charakterisierung der Pellets ermittelten Daten weisen aber darauf hin, dass die in die Untersuchungen einbezogenen Pellets eine für Endmastfutter handelsübliche Stabilität aufwiesen und die vergleichsweise geringen Nachzerkleinerungseffekte aus grundsätzlich regulären Verarbeitungsprozessen hervorgegangen sind.

Tabelle 5.5-1: Nachzerkleinerung von Geflügelfuttern beim Pelletieren in industriellen Anlagen

Futtersorte		Geflügel- aufzucht	Geflügelmast			
			1	2	3	4
Pelletdurchmesser		2,2 mm	3,0 mm	3,0 mm	3,0 mm	3,0 mm
Abrieb (NHP)		-	16,0 %	12,7 %	14,6 %	10,4 %
Härte		45 N	47 N	50 N	53 N	52 N
Zerkleinerungspr. (TS)						
PGV (d ₅₀)		877 µm	1.702 µm	1.565 µm	1.493 µm	1.057 µm
< 250 µm		17,9 %	12,7 %	15,2 %	10,2 %	12,8 %
250 – 1.000 µm		38,0 %	17,7 %	19,4 %	26,2 %	35,1 %
> 1.000 µm		44,1 %	69,6 %	65,4 %	63,6 %	52,1 %
Zerkleinerungspr. (NS)						
PGV (d ₅₀)		738 µm	1.654 µm	1.425 µm	1.523 µm	660 µm
< 250 µm		36,7 %	28,6 %	30,9 %	25,6 %	38,5 %
250 – 1.000 µm		20,8 %	12,2 %	13,9 %	15,8 %	20,0 %
> 1.000 µm		42,5 %	59,2 %	55,2 %	58,6 %	41,5 %
Pellets (NS)						
PGV (d ₅₀)		< 250 µm ²⁰	591 µm	515 µm	847 µm	474 µm
< 250 µm		53,7 %	40,6 %	41,4 %	37,2 %	44,0 %
250 – 1.000 µm		22,6 %	18,4 %	21,1 %	15,8 %	18,7 %
> 1.000 µm		23,7 %	41,0 %	37,5 %	47,0 %	37,3 %
		relative Beständigkeit des Grobanteils > 1.000 µm (Grobanteil Pellets * 100 / Grobanteil Zerkleinerungsprodukt)				
		55,8 %	69,3 %	67,9 %	80,2 %	89,9 %

²⁰ nicht erfasst

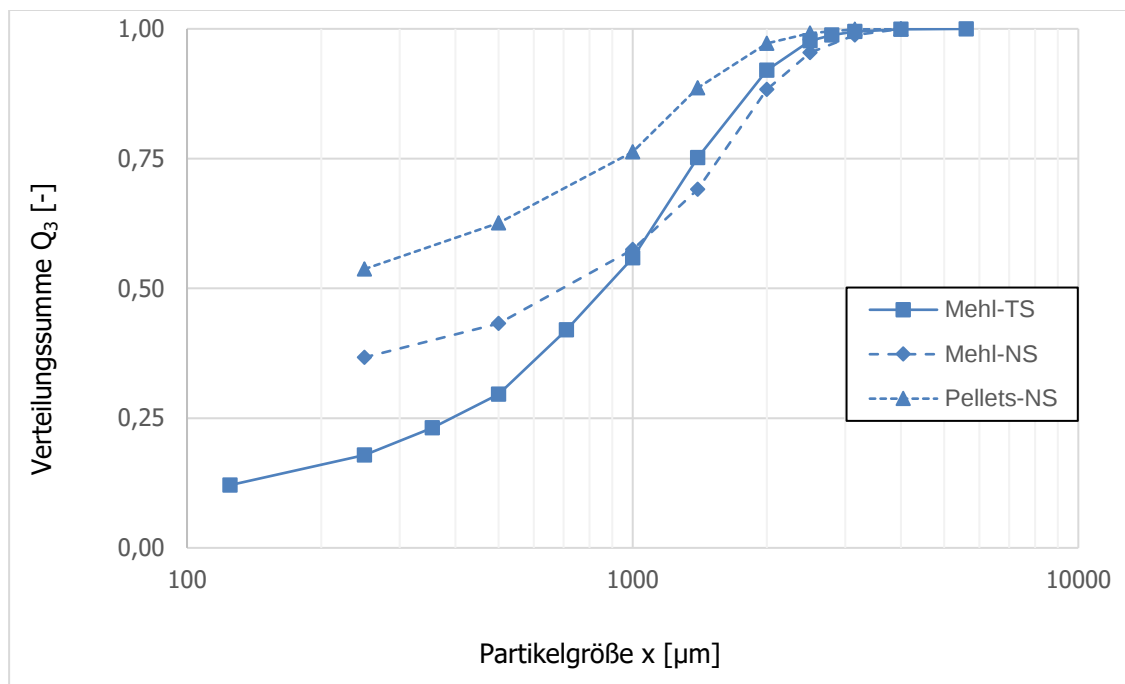


Abbildung 5.5-1: Partikelgrößenverteilung des Geflügelanfangsfutters vor und nach dem Pelletieren

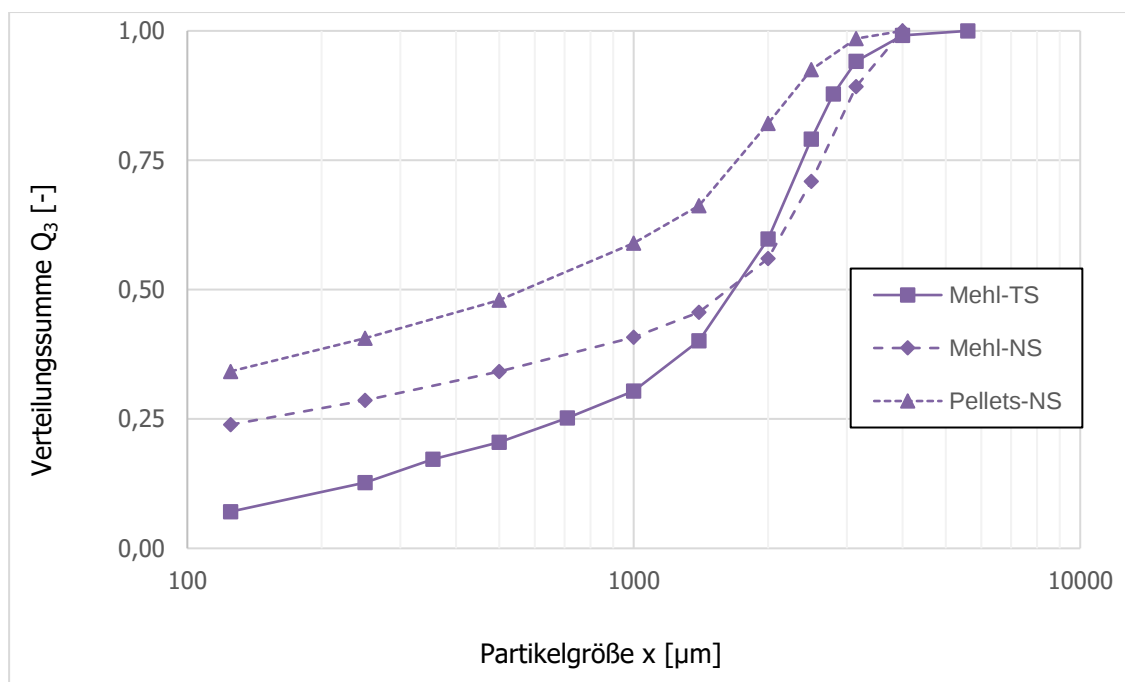


Abbildung 5.5-2: Partikelgrößenverteilung des Geflügelmastfutters 1 vor und nach dem Pelletieren

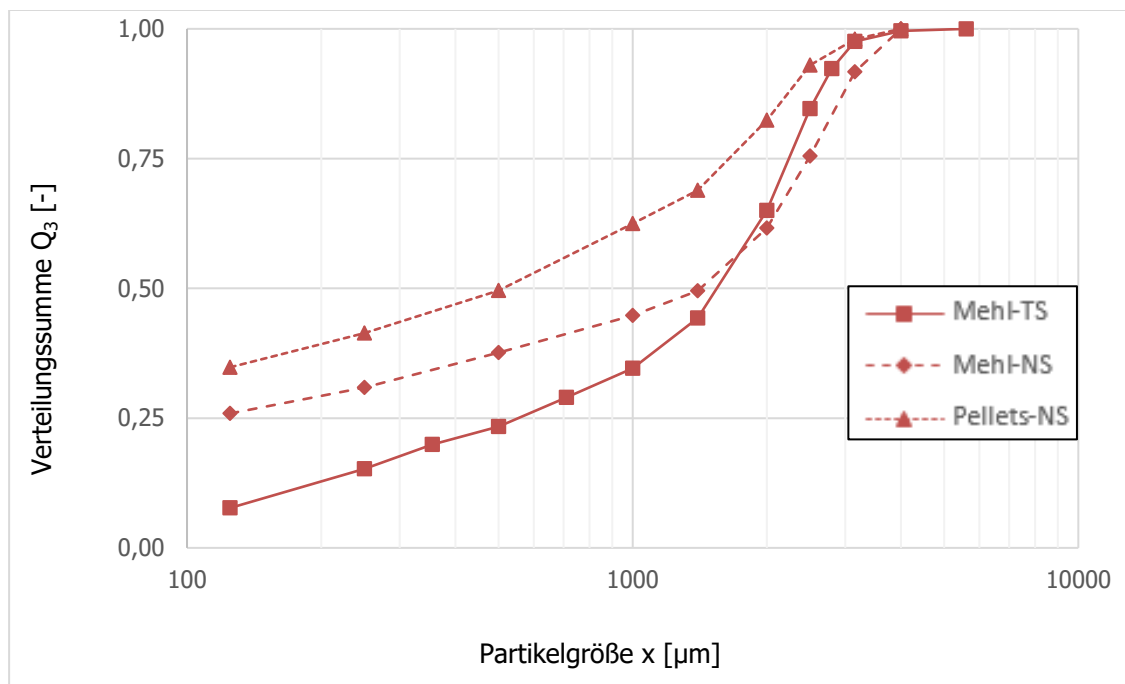


Abbildung 5.5-3: Partikelgrößenverteilung des Geflügelmastfutters 2 vor und nach dem Pelletieren

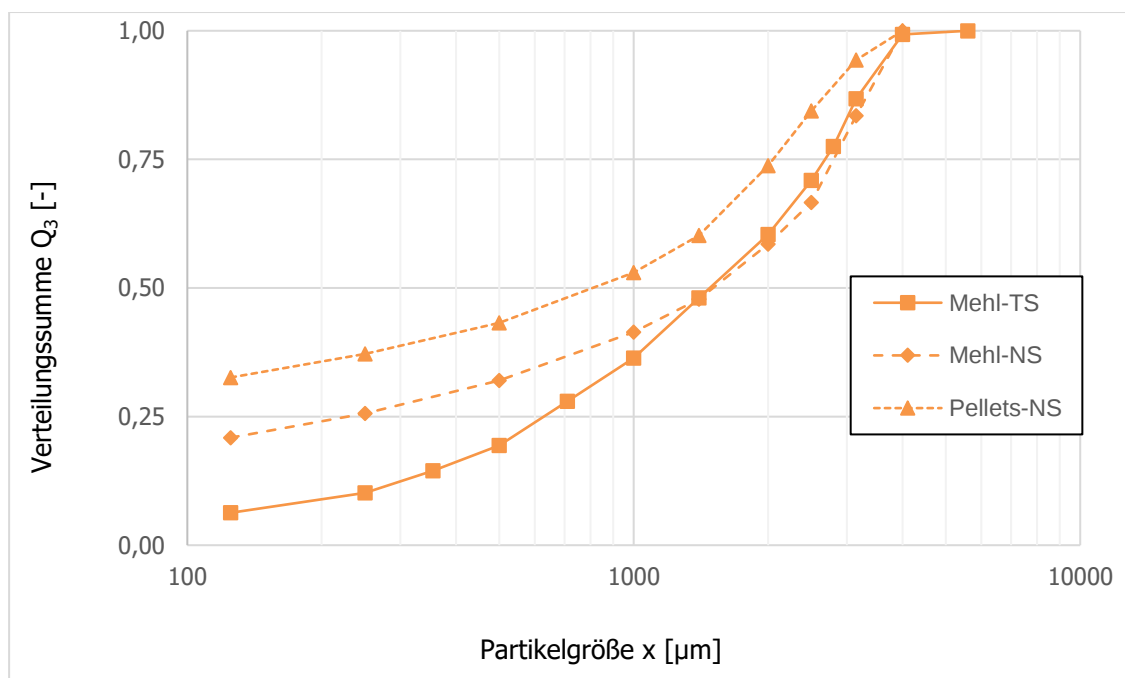


Abbildung 5.5-4: Partikelgrößenverteilung des Geflügelmastfutters 3 vor und nach dem Pelletieren

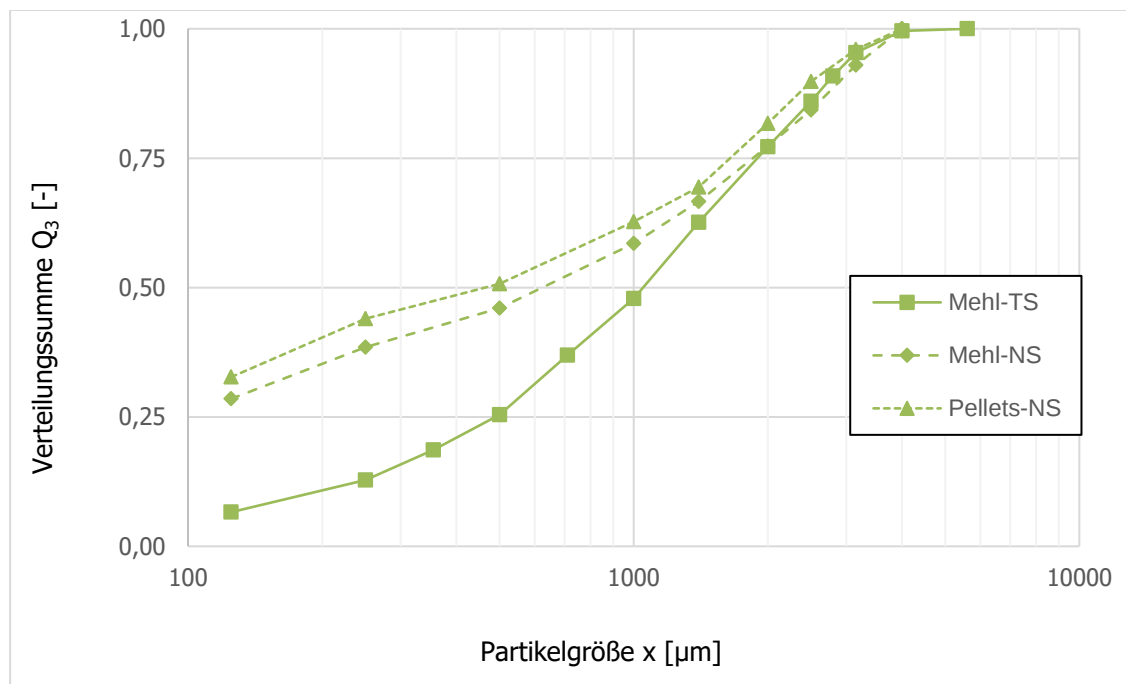


Abbildung 5.5-5: Partikelgrößenverteilung des Geflügelmastfutters 4 vor und nach dem Pelletieren

6. Zusammenfassung

Die Partikelgrößenverteilung von Mischfuttermitteln hat maßgeblichen Einfluss auf die Gesundheit von Nutztieren und deren Futterausnutzung. Daher wird insbesondere bei der Vermahlung von Geflügel- und Schweinefutter erheblicher Aufwand getrieben, um den Anteil besonders feiner Partikel zu begrenzen und einen Mindestanteil vergleichsweise grober Partikel ($> 1.000 \mu\text{m}$) nicht zu unterschreiten. Um die Entmischung sowie eine selektive Aufnahme von Komponenten zu verhindern, wird der überwiegende Teil des gewerblich hergestellten Mischfutters pelletiert. Bei der Pressagglomeration unterliegt das Futter zwischen der Matrize und den Kollern der Pelletpresse mechanischen Beanspruchungen, die im Gegensatz zur vorangegangenen zielgerichteten Vermahlung eine undefinierte Nachzerkleinerung bewirken. Die Pellets bestehen somit aus Primärpartikeln, die sich – in Abhängigkeit von der Intensität der Nachzerkleinerung – hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung mehr oder weniger signifikant von der Spezifikation der ursprünglich hergestellten Zerkleinerungsprodukte unterscheiden. Im Zuge des Forschungsprojektes wurden systematische experimentelle Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, Abhängigkeiten der beiden Zerkleinerungsprozesse zu erkennen, die eine Optimierung des resultierenden Gesamtzerkleinerungsprozesses hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung und des Energiebedarfs ermöglichen.

In vorab durchgeführten Tests wurde die Eignung der Laserbeugungsspektrometrie mit Nassdispergierung (die Primärpartikel lagen nach dem Auflösen der Pellets in wässriger Suspension vor) als Option für eine schnelle Bestimmung der Primärpartikelgrößenverteilung geprüft. Unabhängig davon, dass das Analysenverfahren trotz der für Einzelmessungen sehr geringen Probenmasse als grundsätzlich geeignet erscheint, traten bei den Messungen unter Verwendung des für einen sehr großen Partikelgrößenbereich ausgelegten Messmoduls überwiegend irreguläre Resultate auf, so dass für die im Zuge des Forschungsprojektes durchzuführenden Partikelgrößenuntersuchungen auf die konventionelle Nasssiebung zurückgegriffen werden musste. Diese erbrachte bereits für die Referenzuntersuchungen der mehlförmigen Futtermittel interessante Resultate, weil zwischen den Trocken- und Nasssiebungsergebnissen systematische Unterschiede festzustellen waren. Gegenüber den durch Trockensiebung ermittelten Partikelgrößenverteilungen weisen die Ergebnisse der Nasssiebung sowohl im besonders feinen als auch im besonders groben Partikelgrößenbereich deutlich höhere Anteile auf – die Summenverteilungsfunktionen der mit den unterschiedlichen Methoden ermittelten Partikelgrößenverteilungen schneiden sich bei sämtlichen untersuchten Einzel- und Mischfuttermitteln im mittleren Partikelgrößenbereich. Als Ursache für den mit der Nasssiebung ermittelten erheblich höheren Feinanteil ist neben einem vollständigeren Dispergieren der kleineren Partikel und der unterstützenden Wirkung des Wassers bei deren Siebmaschenpassage auch der Verlust der löslichen Komponenten zu berücksichtigen, die kalkulatorisch der jeweils feinsten Partikelfraktion zugeschlagen werden, weil sie mit dem Spülwasser aus dem Siebturm abfließen. Die Ursache für den bei der Nasssiebung ebenfalls auftretenden größeren Grobpartikelanteil wird in einer aus dem Quellen der Partikel resultierenden Querschnittsvergrößerung vermutet.

Der zentrale Gegenstand des Forschungsprojekts bestand in systematischen Untersuchungen zur Nachzerkleinerung beim Pelletieren. Für die experimentellen Untersuchungen wurden jeweils drei mit den branchenüblichen Mühlen (Hammer- und Walzenmühle) aus den Einzelfuttermitteln Weizen und Gerste definiert hergestellte Zerkleinerungsprodukte (fein, mittel und grob – die unterschiedlichen Kategorien orientierten sich am Partikelgrößenspektrum handelsüblicher Mastfutter für Schweine und Geflügel) verwendet. Die Zerkleinerungsprodukte wurden mit einer Labor-Flachmatrizenpresse unter Variation der Matrizenbohrungsdurchmesser (2 mm – 6 mm) und der Konditionierbedingungen (Pressagglomeration ohne Konditionierung sowie nach Zusatz von 1 % bzw. 3 % Sattedampf) zu Pellets verarbeitet. Aufgrund der systematischen Differenzen der mittels Trocken- und Nasssiebung ermittelten Partikelgrößenverteilung, die für die meisten

Primärpartikelgrößenverteilungen eine Erfassung der d_{25} - und oft auch der d_{50} -Werte verhinderte, konnten die Parameter Trennschärfe (d_{25}/d_{75}) und mittlere Partikelgröße (d_{50}) nicht für die Beurteilung der Nachzerkleinerung herangezogen werden. Um die Nachzerkleinerungseffekte sinnvoll vergleichen zu können, wurde daher auf die d_{75} -Werte und die relative Beständigkeit des Grobanteils zurückgegriffen, also auf den Anteil an Partikeln mit einem Durchmesser von mehr als 1.000 μm , der im Anschluss an den Pelletierprozess weiterhin zur betreffenden Partikelgrößenklasse gehört. Grundsätzlich wurde die mit steigender Größe des Matrizenbohrungsdurchmessers zu erwartende Reduzierung der Nachzerkleinerungsintensität festgestellt. Signifikante Effekte der Partikelgrößenverteilung des bei der Pressagglomeration eingesetzten Zerkleinerungsgutes, die auf das jeweilige Einzelfuttermittel bzw. die Art der Vermahlung zurückzuführen waren, ließen sich in den Nachzerkleinerungsergebnissen nicht finden. Obwohl die ermittelten Werte weit streuen, ist festzustellen, dass von der Konditionierung mit Sattdampf eine erheblich dämpfende Wirkung auf die Nachzerkleinerungsintensität ausgeht. Daneben wurde auch eine Korrelation zwischen Pressweglänge und Nachzerkleinerungsintensität ermittelt.

Für einen Vergleich der beim Pelletieren mit den hinsichtlich der Größe bzw. der Bauart unterschiedlichen Pressen festgestellten Zerkleinerungsintensität wurde die am Ausgangswert normierte Veränderung der mittleren Partikelgröße, die relative Nachzerkleinerung, herangezogen. Beim Pelletieren unter weitgehend gleichen Prozessbedingungen (Sattdampfkonditionierung, Pressverhältnis) wurden für die größeren, für Durchsätze unterhalb des großtechnischen Maßstabs ausgelegten Pelletpressen (Ring- und Flachmatrizenpresse) bei etwa gleichem Energieaufwand und Durchsatz jeweils sehr ähnliche Nachzerkleinerungseffekte festgestellt, während die mit einer Labor-Flachmatrizenpresse durchgeführten Referenzuntersuchungen trotz der Verwendung einer Matrize mit deutlich geringerem Pressweg zu einer jeweils wesentlich intensiveren Nachzerkleinerung führten.

Referenzuntersuchungen an gewerblich, ausschließlich mit Ringmatrizen hergestellten Geflügelmastfuttern zeigen eine grundsätzliche Vergleichbarkeit mit den unter Verwendung von Weizen und Gerste durchgeführten Tests. Die handelsüblichen Futter sind durch Partikelgrößenverteilungen mit vergleichsweise hohem Grobanteil gekennzeichnet – ihre mittlere Partikelgröße (d_{50}) überschreitet zumeist 1.000 μm . In den pelletierten Futtern bleibt der Anteil der Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 1.000 μm zu ca. 70 – 90 % und somit in deutlich größerem Maße erhalten, als bei den Referenzuntersuchungen mit zerkleinertem

Getreide. Es ist anzunehmen, dass der Grund für den vergleichsweise geringen Nachzerkleinerungseffekt vorrangig in der besonders intensiven Langzeit-Konditionierung sowie im Fettgehalt der Geflügelfutter liegt.

Die im Zuge des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen eine wesentlich genauere Bewertung der Primärpartikelgrößenverteilung von Mischfutterpellets. Aus dem Vergleich der Nass- und Trockensiebungsresultate geht hervor, dass aus der Nasssiebung der agrarischen Komponenten sowohl höhere Fein- als auch höhere Grobanteile resultieren.
- Aus den experimentellen Untersuchungen ist der maßgebliche Einfluss von drei Parametern auf die Intensität der Nachzerkleinerung beim Pelletieren abzulesen. Die Nachzerkleinerungsintensität steigt mit abnehmendem Matrizenbohrungsdurchmesser aber auch mit zunehmender Matrizenstärke (entspricht dem Pressweg). Andererseits lässt sie sich mit zunehmendem Sattdampfzusatz beim Konditionieren reduzieren, womit der Futtermittelhersteller einen wesentlichen Einfluss auf die unerwünschte Nachzerkleinerung nehmen kann.
- Obwohl die Intensität der Nachzerkleinerung mit zunehmender Partikelgröße im Mehlfutter steigt und systematische Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung (z. B. Zerkleinerungsprodukte von Hammer- und Walzenmühle mit breiter und enger Partikelgrößenverteilung) erheblich reduziert werden, bleiben unterschiedliche Tendenzen in der Primärpartikelgrößenverteilung beim Pelletieren erhalten.
- Grundsätzlich sind Tendenzen zu erkennen, dass ein Mehraufwand an Zerkleinerungsenergie bei der Vermahlung von Futtermitteln mit einem geringeren Energiebedarf beim Pelletieren einhergeht. Die angestrebte Ermittlung des Anteils an Zerkleinerungsenergie beim Pelletieren war aufgrund von sich überschneidenden Effekten (Verdichtungswiderstand, stoffliche Zusammensetzung) nicht möglich.
- Für die durch eine Ring- und eine Flachmatrizenpresse (jeweils Technikumsmaßstab) bewirkte Nachzerkleinerung wurden in vergleichenden Untersuchungen bei gleichartigem Durchsatz und Energiebedarf keine maßgeblichen Unterschiede ermittelt. Eine wesentlich intensivere Nachzerkleinerung trat bei Referenzuntersuchungen mit einer Labor-Flachmatrizenpresse auf. Diese dürfte auf den wesentlich kleineren Radius der Kollerbahn und die damit verbundenen erheblich größeren Scherkräfte zurückzuführen sein.

- In gewerblich hergestellten pelletierten Geflügelfuttern wurde eine vergleichsweise geringe Nachzerkleinerung der Primärpartikel festgestellt, die durch die intensive Konditionierung und den, die mechanische Beanspruchung in der Presse mindernden Fettgehalt der Futtermittel begründet sein sollte.

7. Nachweis der Verwendung der Zuwendung

7.1 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die überwiegend kleinen und mittleren Betriebe der gewerblichen Futtermittelherstellung haben im Zuge branchenweiter Bemühungen um die Gesundheit von Mastschweinen und –geflügel erhebliche Investitionen zur Herstellung von Futtermitteln vorgenommen, die durch einen erheblichen Anteil gröberer Partikel gekennzeichnet sind. Diesen Bemühungen steht die bislang in ihrem Umfang kaum einzuschätzende Nachzerkleinerung beim Pelletieren des Futters entgegen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden mit den Matrizeneigenschaften und der Konditionierung die für die Nachzerkleinerung von Futtermittelpartikeln beim Pelletieren maßgeblichen maschinen- und prozesstechnischen Parameter systematisch untersucht. Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich insbesondere im Zusammenhang mit der Sattdampfkonditionierung Maßnahmen ableiten, mit denen Futtermittelhersteller gezielt Einfluss auf die Intensität der Nachzerkleinerung bei der Pressagglomeration von Mischfutter nehmen können. Relevant sind im gleichen Zusammenhang auch die aus dem Vergleich von Trocken- und Nasssiebungsergebnissen resultierenden Erkenntnissen zu systematischen Unterschieden, die den Futtermittelherstellern eine genauere Bewertung der Primärpartikelgrößenverteilungen ermöglichen.

Ebenfalls neu und für die Unternehmen des branchenbezogenen Maschinenbaus relevant sind die Resultate der vergleichenden Untersuchungen zur Nachzerkleinerung beim Pelletieren mit Ring- und Flachmatrizenpressen. Bei vergleichbarem Durchsatz und Energiebedarf bewirkte das Pelletieren mit den unterschiedlichen Maschinentypen eine sehr ähnliche Nachzerkleinerung der Futterpartikel. Ebenfalls von Interesse für Maschinenbauunternehmen sind die im Zuge der systematischen Untersuchungen zur möglichst gleichartigen Zerkleinerung von Gerste und Weizen mittels Hammer- und Walzenmühle eher als Nebenresultat ermittelten Daten zur Partikelgrößenverteilung und zum Energiebedarf.

7.2 Verwendung der zugewendeten Mittel

Personaleinsatz

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans):
HPA A 14,40 Personenmonate
Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und unter Corona Bedingungen angemessen.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): Nassdispergiersystem (einschließlich Durchflussküvette) des Herstellers Sympatec: 18.265,31 €
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): keine

7.3 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen (von Projektbeginn bis heute)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum
1. Sitzung des Wissenschaftlichen Beirats der IFF	Vorstellung der geplanten experimentellen Arbeiten, Diskussion erster Resultate zur Primärpartikelgrößenverteilung	Videokonferenz	16.06.2020
2. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der geplanten experimentellen Arbeiten sowie der Bildanalyse	Videokonferenz	21.04.2020
3. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität Einfluss der Nachzerkleinerung auf die Primärpartikelgrößenverteilung von Geflügel- und Schweinefutter	IFF-Online-Fachtagung zum Thema: <i>„Zerkleinerung – Einfluss auf Tiergesundheit und Tierwohl“</i>	25.11.2020
4. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über IFF-Veranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität Vorstellung der ersten neuen Erkenntnisse zur Nachzerkleinerung von Futtermitteln beim Pelletieren	IFF-Online-Lehrgänge zum Themenfeld: <i>„Basisstufen der industriellen Mischfutterherstellung“</i>	Juli 2020, September 2020
5. Sitzung des Wissenschaftlichen Beirats der IFF	Vorstellung und Diskussion der Resultate zur Nachzerkleinerung von Getreide	Videokonferenz	26.11.2020

6. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der Resultate zur Nachzerkleinerung von Getreide, Diskussion des weiteren Vorgehens	Videokonferenz	30.11.2020
7. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität Vorstellung neuer Erkenntnisse zur Nachzerkleinerung von Futtermitteln beim Pelletieren	IFF-Online-Lehrgänge zum Themenfeld: <i>„Basisstufen der industriellen Mischfutterherstellung“</i>	Januar 2021, Dezember 2021
8. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität Vorstellung neuer Erkenntnisse zur Nachzerkleinerung von Futtermitteln beim Pelletieren	IFF-Online-Lehrgänge zum Themenfeld: <i>„Basic Processes in Compound Feed Production“</i>	Februar 2021, Oktober 2021
9. Sitzung des Wissenschaftlichen Beirats der IFF	Vorstellung der aktuellen und der geplanten experimentellen Arbeiten, Diskussion aktueller Resultate und resultierender Zielstellungen	Videokonferenz	15.06.2021
10. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität Vorstellung des Forschungsprojekts und neuer Erkenntnisse zur Nachzerkleinerung von Futtermitteln beim Pelletieren	IFF-Online-Seminar zum Thema: <i>„Zerkleinerung – Einfluss auf Tiergesundheit und Tierwohl“</i>	17.06.2021
11. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Diskussion der Forschungsergebnisse und weiteres Vorgehen	Videokonferenz	21.06.2021
12. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität	IFF-Zertifikatskurs <i>„Grundlagen der Mischfutterherstellung“</i>	März 2022, September 2022

Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
13. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer	IFF-Praktikerlehrgang zum Themenfeld:	Januar 2023

Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität	„Pelletieren von Mischfutter“	
14. IFF-Website	Bereitstellung der Kurzfassung des Abschlussberichtes	Online auf der IFF-Homepage	1. Quartal 2023
15. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität	IFF-Zertifikats- und Kompaktkurs „Grundlagen der Mischfutterherstellung“	März 2023, November 2023
16. IFF-Newsletter	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	online	1. und 2. Quartal 2023
17. Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über eine IFF-Veranstaltung	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität	IFF-Praktikerlehrgang zum Themenfeld: „Essentials of Feed Compounding Technologies“	September 2023

Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes

Die Maßnahmen zum Ergebnistransfer wurden im Wesentlichen wie geplant umgesetzt. Auch die nach Abschluss des Forschungsprojektes geplanten Maßnahmen werden als gut realisierbar eingeschätzt.

Abkürzungsverzeichnis

d ₂₅ , d ₅₀ , d ₇₅	Kenngrößen der Partikelgrößenverteilung, für die 25 %, 50 % bzw. 75 % der Probenmasse eine geringere Partikelgröße aufweisen
HM	Hammermühle
Mehl-NS	Werte resultieren aus der Nasssiebung mehlförmigen Materials
Mehl-TS	Werte resultieren aus der Trockensiebung mehlförmigen Materials
NHP	New Holmen Pelletttester
NS	Nasssiebung
Pellets-NS	Werte resultieren aus der mittels Nasssiebung aufgelöster Pellets bestimmten Primärpartikelgrößenverteilung
Pr.	Pelletpresse
TS	Trockensiebung
WM	Walzenmühle

Literaturverzeichnis

Albiker, D. und Zweifel, R.: Mastpouletfutter: die Partikelgröße beeinflusst die Gewichtszunahme, Agrarforschung Schweiz 5 (1), S. 28-31 (2014)

Amerah, A. M.; Ravindran, V.; Lentle, R. G. und Thomas, D. G.: Feed Particle Size: Implications on the digestion and performance of poultry, World's Poultry Science Journal 63, S. 439-455 (2007)

Borgelt, L.: Einflüsse einer zweistufigen Vermahlung in der Mischfutterproduktion auf die Leistung und Gesundheit von Absetzferkeln, Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover (2015)

Borgelt, L.; Ratert, C.; Kölln, M.; Neumann, K.-D. und Kamphues, J.: Effects of 2-stage grinding in production of compound feeds on digestibility, performance and gastric health in weaned piglets, Proceedings of the Society of Nutrition Physiology 24, S. 53 (2015)

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL, Hrsg.): Die Struktur der Mischfutterhersteller 2021, Berlin (2022)

Deutscher Verband Tiernahrung e.V. (DVT): Wie wird Futter hergestellt? <https://www.dvtiernahrung.de/branche/futtermittel/futterherstellung> (Datum des Zugriffs: 3.11.2022)

Grosse Liesner, V.; Traube, V.; Leonhard-Marek, S.; Beineke, A. und Kamphues, J.: Integrity of gastric mucosa in reared piglets – effects of physical form of diets (meal/pellets), preprocessing grinding (coarse/fine) and addition of lignocelluloses (0/2.5%), Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 93, S. 373-380 (2009)

Kamphues, J., Youssef, I.; Abd El-Wahab, A.; Üffing, B.; Witte, M. und Tost, M.: Einflüsse der Fütterung und Haltung auf die Fußballengesundheit bei Hühnern und Puten, Übersichten zur Tierernährung 39, S. 147-195 (2011)

Kamphues, J.; Warzecha, A.; Brüning, I.; Offenberg, S.; Neu, M.; Hassan, Y.; Taube, V. und Visscher, C.: Untersuchungen zu Effekten eines unterschiedlichen Vermahlungsgrades von Komponenten im Mischfutter für Schweine, 7. Forum angewandte Forschung in der Rinder- und Schweinefütterung, Fulda, 28.-29. März 2007, Tagungsband, S. 125

Keller Nielsen, E. und Ingvartse, K. L.: Effects of cereal disintegration method, feeding method and straw as bedding on stomach characteristics including ulcers and performance in growing pigs, *Acta Agriculturae Scandinavica*, A, 50 (1), S. 30-38 (2000)

Kersten, J.; Rohde, H.-R. und Nef, E.: Principles of Mixed Feed Production, Agrimedia GmbH, S. 233 (2005)

Kleine Klausing, H. und Hellwig, E.-G: Tiergesundheit unter dem Aspekt der „Futterstruktur“, *Nutztierpraxis aktuell* 2, S. 104-107 (2011)

Lucht, T.: Stufenvermahlung mit Hammermühle und Brechwalzenstuhl, *Mühle + Mischfüttertechnik* 147 (23), S. 745-750 (2010)

Lyu, F.; Thomas, M.; Hendrix, H.W. und van der Poel, A.F.B.: Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review, *Animal Feed Science and Technology*, 261, S. 114347 (2020),
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114347>

Miladinovic, D.: Standard Wet Sieving Analysis, Fôrtek – Norwegian University of Life Science (UMB), (2009)
<https://studylib.net/doc/18383812/standard-wet-sieving-analysis-fôrtek>

Naumann, C. und Bassler, R. (1976): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Methodenbuch Band III. Mit laufenden Ergänzungen, Verlag VDLUFA, Darmstadt

Nir, I.; Hillel, R.; Ptichi, I. und Shefet, G.: Effect of particle size on performance. 3. Grinding pelleting interactions, *Poultry Science* 74 (5), S. 771-783 (1995)

Robohm, K.-F. und Apelt, J.: Die automatische Spaltweitenverstellung, *Mühle + Mischfüttertechnik* 126 (20), S. 271-275 (1989)

Vucmirović, Đ.; Čolović, R.; Rakita, S.; Brlek, T.; Đuragić, O. und Solá-Oriol, D.: Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition – A review, *Animal Feed Science and Technology* 233, S. 133-144 (2017)

Witte, M.: Zur Bedeutung einer unterschiedlichen Mischfutterstruktur (Vermahlungsart/-intensität, Konfektionierung) für die Leistung, Verdaulichkeit des Futters und Morphologie des Gastrointestinaltraktes bei Masthähnchen, Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover (2012)

Wolf, P. und Kamphues, J.: Magenulcera beim Schwein – Ursachen und Maßnahmen zur Vermeidung, Übersichten zur Tierernährung 35, S. 161-190 (2007)