

Abschlussbericht zum Projekt

Wirbelschichttrocknung mit überhitztem Wasserdampf in der Lebensmittel verarbeitenden Industrie

Förderkennzeichen : DBU 26568 – 24/2

Projektlaufzeit : 11.12.2008 – 31.10.2012

erstellt durch

BMA Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG

und

**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU)
Institut für Apparate und Umwelttechnik**



BMA Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG

Projektleiter:

Dr.-Ing. Christian Klein

Dr.-Ing. Lothar Krell

Dr.-Ing. Andreas Lehnberger

Tel. : 0531 8040

E-mail : engineering@bma-de.com

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg



FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-
UND SYSTEMTECHNIK



Institut für Apparate- und Umwelttechnik

Leiter der Forschungsstelle:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Lothar Mörl

Tel. : 0391 67 18573

E-mail : lothar.moerl@ovgu.de

Am Forschungsprojekt beteiligte Mitarbeiter:

BMA Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG

Dipl.-Ing. Gerald Caspers
Dr.-Ing. Holger Fersterra
Dipl.-Ing. Jochen Gassmann
Dipl.-Ing. Thomas Fischer
Dipl.-Ing. Wilfried Janke †
Dr.-Ing. Christian Klein
Dr.-Ing. Lothar Krell
Dr.-Ing. Andreas Lehnberger
Dr.-Ing. Mirko Löhn
Dipl.-Ing. Klaus Nammert
Udo Rakemann
Dipl.-Ing. Dirk Steffens

Unterstützung erfolgte durch folgende studentische Kräfte:

Benjamin Holmer
Michael Ilchuk
Friederike Langweg
Gesa Lippky
Dirk Philipp
Slawa Popov
Karl Siebeneck
Larissa Titscher

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Lothar Mörl
Dr.-Ing. Hartmut Haida
Dipl.-Ing. Wolfgang Behns
Dipl.-Ing. (FH) Sabine Schlüsselburg
Marlies Kupfernager

Inhalt

1	Kurzdarstellung des Gesamtvorhabens	3
1.1	Ausgangssituation	3
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
2	Untersuchungen zur Formgebung und Fluidisierung	6
2.1	Verfahren zur Formgebung	6
2.1.1	Extrudieren	8
2.1.2	Pelletieren	18
2.1.3	Granulieren	23
2.1.4	Zerkleinern	31
2.2	Verhalten von Inhaltsstoffen auf die Formgebung	34
2.3	Stabilität der Formkörper	37
2.3.1	Voruntersuchungen zur Partikelfestigkeit	37
2.3.2	Mechanismen der Strukturbildung	40
2.3.3	Beurteilung der Festigkeit	42
2.4	Bewertung der Formgebungsverfahren	45
2.5	Untersuchungen zur thermischen Belastbarkeit	49
2.5.1	Reaktionsverhalten von Inhaltsstoffen	49
2.5.2	Farbliche Veränderung der Partikel	50
2.6	Fluidisierungsverhalten konditionierter Partikel	52
3	Planung, Bau und Aufstellung der Versuchsanlage	54
3.1	Hauptkomponenten	55
3.2	Gestaltung des Anströmbodens	57
3.3	Abweichungen vom Anlagenkonzept	58
3.4	Inbetriebnahme der Versuchsanlage	59
4	Betrieb der Versuchsanlage	61
4.1	Modell zur Ermittlung des Trocknungsverlaufes	61
4.2	Anpassung des Modells	62
4.3	Trocknungsversuche Maisschlempe	68
4.4	Trocknungsversuche Weizenschlempe	73

4.5	Trocknungsversuche Mischgetreideschlempe	76
4.6	Trocknungsversuche Bagasse	80
4.7	Trocknungsversuche Treber	81
4.8	Bewertung der Trocknungsversuche	84
5	Ökonomische und ökologische Bewertung	85
5.1	Massen- und Energiebilanz der Trocknungsverfahren	86
5.1.1	Datenbasis und Bilanzgrenzen einer Gesamtbilanz	86
5.1.2	Arbeitsprinzipien verschiedener Trocknerbauarten	89
5.1.3	Auslegung der gegenübergestellten Trockner	89
5.2	Ökonomische Bewertung	92
5.2.1	Energetische Vorteile des CSD	94
5.2.2	Ökonomische Vorteile des CSD	94
5.2.3	Bewertung der Investitionskosten	95
5.3	Ökologische Bewertung	96
5.3.1	Berücksichtigung von Primärenergiefaktoren	96
5.3.2	CO₂ –Bilanz	97
5.4	Ökonomischer und ökologischer Vergleich	99
6	Zusammenfassung	101
7	Ausblick	103
8	Quellen	105
9	Veröffentlichungen	106
	Anhang A: Herkunft und Zusammensetzung der untersuchten Biomassen und Materialien	107
	Anhang B: Bestimmung des Gutsfeuchteverlaufs aus Messungen bei der chargenweisen Wirbelschichttrocknung (vereinfachtes Trocknungsmodell)	110
	Anhang C: Modellvorstellung zur Trocknung von dispersen Gütern im überhitzten Wasserdampf	115
	Anhang D: Notwendige Fluidgeschwindigkeit in einer Wirbelschicht bei veränderten Stoffwerten am Beispiel für Luft und Dampf	124
	Anhang E: Tabellen zur ökonomischen und ökologischen Bewertung	136

1 Kurzdarstellung des Gesamtvorhabens

1.1 Ausgangssituation

Zur Aufarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen werden heute noch überwiegend konventionelle Trocknungsverfahren eingesetzt, die keine oder nur eine vergleichsweise sehr geringe energetische Nutzung des entstehenden Trocknungsbrüdens ermöglichen.

Mit dem Einsatz von Wirbelschichtverdampfungstrocknern, die im Druckbereich oberhalb des atmosphärischen Druckes arbeiten, wird das beim Trocknungsprozess zu entziehende Wasser in Form von überhitztem Wasserdampf auf hohem energetischen Niveau freigesetzt. Bis zu 90 % dieser Energie kann nachfolgend in Form einer hocheffizienten Mehrfachnutzung durch Brüdenkondensation wieder verfügbar gemacht werden.

Durch diese Mehrfachnutzung der eingesetzten Primärenergie werden die CO₂-Emissionen reduziert und durch Verwendung eines geschlossenen Trocknersystems werden Geruchsemissionen nahezu vollständig vermieden. Zudem wird eine produktschonende, sauerstofffreie Dampfatmosfera geschaffen, die unerwünschte Oxidationsreaktionen verhindert.

Der industrielle Einsatz von Wirbelschichtverdampfungstrocknern beschränkt sich bisher auf das Trocknen von Rübenpressschnitzeln in der Zuckerindustrie. Um die offensichtlichen Vorteile des Verfahrens, insbesondere unter umwelttechnischen Aspekten, bei der Trocknung weiterer Biomassen aus dem Bereich der nachwachsenden Rohstoffe nutzen zu können, müssen Lösungen für eine Reihe von noch offenen Problemstellungen erarbeitet werden. Dieses Forschungsprojekt soll die Grundlagen zur Lösung dieser Aufgaben schaffen.

1.2 Zielsetzung

Die meisten industriell anfallenden Biomassen weisen hohe Restfeuchten und eine sehr inhomogene Partikelgeometrie auf und können daher nicht direkt in Wirbelschichtanlagen getrocknet werden.

Als Gesamtziel des Vorhabens sollten allgemeine Lösungen erarbeitet werden, die die Vorgehensweise bei der Trocknung von verschiedenen Biomassen in einem Wirbelschichtverdampfungstrockner beschreiben, um so die Vorteile des Ver-

fahrens nicht nur auf das Anwendungsgebiet von grobkörnig strukturierten Biomassen beschränkt sein zu lassen, sondern um über das bisherige Einsatzgebiet hinaus weitere Biomassen mit diesem Verfahren trocknen zu können.

Zur Erreichung des Forschungszieles wurde eine Versuchsanlage im Technikum von BMA errichtet, um das Trocknungsverhalten verschiedener Biomassen unter praxisrelevanten Prozessbedingungen und den tatsächlichen produktspezifischen Energieverbrauch bei der Wirbelschichtverdampfungstrocknung untersuchen und beurteilen zu können. Erst damit wird die sichere Auslegung der industriell eingesetzten Trocknungsapparate möglich.

Das umweltrelevante Ziel des Vorhabens besteht in der zukünftigen Bereitstellung eines effizienten Trocknungsverfahrens für industriell anfallende Produktströme aus der Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen. Dieses neu zu etablierende Verfahren hat daher die produktspezifischen Eigenschaften, die aus den Untersuchungen der jeweiligen Produkte resultieren, und die Ergebnisse der Trocknungsversuche, die unter realen Prozessbedingungen durchgeführt wurden, zu berücksichtigen.

Durch Nutzung der im Trocknungsbrüden enthaltenen Energie kann im energetischen Verbund von Wirbelschichtverdampfungstrocknung mit anderen wärmeverbrauchenden Prozessstationen einer Fabrik der Energiebedarf gravierend reduziert werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Forschungsarbeiten wurden in engem Zusammenwirken zwischen BMA Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG, Braunschweig (BMA) und dem Institut für Apparate- und Umwelttechnik der Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg (OvGU) durchgeführt. Das Projekt startete am 11.12.2008 und wurde kostenneutral bis zum 31.10.2012 verlängert.

In einer ersten Phase des Projektes

wurden ausgewählte Biomassen auf ihre Eignung zur Wirbelschichttrocknung hin untersucht und verschiedene Verfahren getestet, um die Biomassen durch Konditionierung so zu modifizieren, dass sie ausreichend fluidisierungsfähig sind.

In einer am Institut für Apparate- und Umwelttechnik vorhandenen Wirbelschichtversuchsanlage wurden bei atmosphärischem Druck Voruntersuchungen zur

Fluidisierung und zum Trocknungsverhalten von konditionierten Biomassen sowohl mit Luft als auch mit überhitztem Wasserdampf durchgeführt.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wurde ein theoretisches Modell erarbeitet, mit dem sich der Existenzbereich der Wirbelschicht für die jeweils betrachtete Biomasse und deren Gutsfeuchte aus den Temperaturverläufen im laufenden Prozess berechnen lassen.

Auf der Basis dieser Voruntersuchungen wurde ein Apparate- und Anlagenkonzept für die Versuchsanlage im BMA-Technikum entwickelt, das die Grundlage für die verfahrenstechnische Auslegung des Gesamtverfahrens bildete.

In der zweiten Phase des Projektes

wurden auf der Grundlage des Anlagenkonzeptes und der ermittelten verfahrenstechnischen Parameter die einzelnen Komponenten der Versuchsanlage spezifiziert und ausgewählt, sowie das Steuerungskonzept der Gesamtanlage festgelegt.

Mit dem Abschluss der Konstruktionsarbeiten konnte mit der Fertigung einzelner Bauteile begonnen und parallel hierzu die Zukaufteile beschafft werden. Nach Beendigung der Montagearbeiten und der funktionstechnischen Überprüfungen aller Komponenten der Anlage wurde die errichtete Versuchsanlage im Technikum der BMA in Betrieb genommen.

Mit der Inbetriebnahme und dem Betrieb der Versuchsanlage wurde es erstmals möglich, unter praxisrelevanten Prozessbedingungen die Fluidisierungscharakteristik und die Trocknungskinetik verschiedener nachwachsender Rohstoffe in einer druckaufgeladenen Wirbelschicht, die mit überhitztem Wasserdampf arbeitet, zu untersuchen und zu beurteilen.

2 Untersuchungen zur Formgebung und Fluidisierung

2.1 Verfahren zur Formgebung

Nachwachsende Rohstoffe, insbesondere Produkte, die aus der Fermentation als Biomasse anfallen, aber auch pflanzliche Stoffe sind wegen ihrer Form, in der sie in der Regel im Produktionsprozess zur Verfügung stehen, nicht für die Trocknung in einer Wirbelschicht geeignet. Es ist deshalb erforderlich, sie in eine fluidisierungsfähige, formstabile Gestalt zu überführen.

Um Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Formgebungsverfahren zu untersuchen, wurden in Abhängigkeit der Grundbeschaffenheit der ausgewählten biologischen Materialien verschiedene Verfahrensprinzipien getestet:

- Extrudieren Pressagglomeration durch Schneckenextruder
- Pelletieren Pressagglomeration durch Kollermühle
- Granulieren Aufbauagglomeration durch Tellergranulator
- Zerkleinern Zerkleinern durch Mahlen oder Schneiden

In Tabelle 1 sind die zur Formgebung/Konditionierung getesteten Verfahren in Verbindung mit den ausgewählten Materialien zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der getesteten Konditionierungsverfahren in Kombination mit den ausgewählten Materialien

Material	Extrudieren	Pelletieren	Granulieren	Zerkleinern
Maisschlempe	x	x	x	-
Weizenschlempe	x	-	x	-
Roggen-Gerste-Mais-Schlempe	x	-	x	-
Bagasse	x	x	x	x
Treber	x	-	x	-
Klärschlamm	x	-	x	x

Zur Ermittlung einer geeigneten Formgebungstechnik sind für unterschiedliche Rohstoffe jeweils Kenntnisse der stofflichen Zusammensetzung und bestimmter granulometrischer Eigenschaften der Materialien wichtig. Stoffliche Zusammensetzung und Granulometrie bestimmen wesentlich das technologische Verhalten beim Formgeben. Die Aufgabe der Formgebung (Extrudieren, Pelletieren oder Granulieren) ist im Ergebnis das Bereitstellen von konditioniertem Material (Formkörper) ausreichender mechanischer Stabilität, geeigneter Partikelgröße und geeigneter Partikelgrößenverteilung für die Wirbelschicht-trocknung mit überhitztem Wasserdampf.

Getreideschlempe

entsteht bei der Ethanolherstellung und wird im Aufbereitungsprozess in die Komponenten Dekanterkuchen (Trockensubstanzgehalt ca. 30 %) und Sirup (Trockensubstanzgehalt ca. 35 %) getrennt. Dekanterkuchen ist der Feststoffanteil nach der Fest/Flüssig-Trennung von Dünnschlempe (Fermentations- und Destillationsrückstände), die vorzugsweise mittels Dekanter vorgenommen wird. Der daraus hervorgehende Flüssiganteil wird im Verdampfer eingedickt und liegt dann als Sirup vor. Dekanterkuchen und Sirup entstehen im technologischen Mischungsverhältnis von 1,2 bis 1,4 und sind als Mischung mit einem Trockensubstanzgehalt von etwa 32 % nicht stabil formbar. Erst das Vergrößern des Trockensubstanzgehalts auf 50 bis 60 % durch Zuführen von bereits getrockneter Schlempe (Trockensubstanzgehalt von ca. 90 %) erlaubt den Einsatz dieser Mischung in Apparaten zur Formgebung.

Mais ist als Rohstoff für die weltweite Ethanolproduktion insbesondere in Nordamerika bedeutsam, während in Nordeuropa hierfür als Rohstoffe Weizen, Roggen und Gerste eingesetzt werden.

Bagasse

ist das faserige Nebenprodukt, das beim Auspressen des Zellsaftes aus dem Zuckerrohr anfällt. Die Zusammensetzung und Beschaffenheit der Bagasse variiert je nachdem welches Verfahren zur Zerkleinerung und Extraktion des Zuckerrohres zur Anwendung kommt und ist stark vom Herkunftsort abhängig. Nach dem Abpressen besteht die Bagasse in etwa zu gleichen Teilen aus Wasser und Trockensubstanz und wird in der Regel im feuchten Zustand mit niedrigem Wirkungsgrad direkt in der Zuckerfabrik zur Energiegewinnung verbrannt.

Treber

entstehen bei der Bierherstellung und sind die unlöslichen Malzbestandteile, die beim Abtrennen der Würze im Läuterbottich oder Maischefilter verbleiben. Die für die Versuche verwendeten Malztreber wurden frisch, ohne weitere Vorbehandlung eingesetzt.

Klärschlamm

fällt in kommunalen Klärwerken als Rohschlamm an und wird zur Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes teilweise mechanisch entwässert.

2.1.1 Extrudieren

Beim Extrudieren mit Schneckenextrudern wird das Gut durch eine Transportschnecke (Einwellenextruder) oder von zwei Transportschnecken (Doppelwellenextruder) durch eine Matrize im Extruderkopf gefördert, die ein bestimmtes Öffnungsverhältnis aufweist. In Abhängigkeit dieses Öffnungsverhältnisses erfährt das Gut vor der Matrize eine mehr oder minder große Kompaktierung, wodurch druck- und temperaturabhängig verschiedenste Haftkräfte im Gut wirksam werden. Beim Austritt aus der Matrize liegen dann Formkörper bestimmter Festigkeit vor. Neben dem Fördern und Kompaktieren des Gutes erfolgt in Schneckenextrudern in Abhängigkeit der Schneckenengeometrie darüber hinaus auch ein Vermischen und Zerkleinern von Partikeln.

Ausgehend von den ersten Versuchen zur Formgebung mit einem Fleischwolf an der OvGU wurden weiterführende Untersuchungen mit verschiedenen Extrudertypen unterschiedlicher Bauarten durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden folgende Industrieextrudersysteme im Technikumsmaßstab untersucht:

- Einwellenextruder einschließlich Fleischwolf
- Gleichläufige Doppelwellenextruder
- Gegenläufige Doppelwellenextruder

Maisschlempe

Die Versuche zur Formgebung von Maisschlempe wurden mit einem Einwellenextruder OE 18 der Fa. KAHL durchgeführt. Dieser Extruder wird standardmäßig zur Pressagglomeration trockener Abfall- und Biomassen

eingesetzt. Der maximale Durchsatz im Industriemaßstab beträgt bis zu 50 t/h. Aufgrund des hohen Durchsatzes und seiner Robustheit sowie seiner Anwendungsnähe zum geplanten Einsatzfall wurde dieser Einwellenextruder zur Formgebung von Getreideschlempen ausgewählt.

Die Maisschlempe (Anhang A1) wurde für die Versuche aus den Komponenten Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe zusammengestellt. Das Verhältnis Dekanterkuchen zu Sirup wurde im Bereich 1,3 bis 2,0 variiert und als weiterer Parameter wurde der Trockensubstanzgehalt der Mischung (Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe) im Bereich von 52 bis 60 % verändert.

Bei verschiedenen Durchsätzen wurden mit einer Lochscheibe (Bohrungsdurchmesser 5 mm, Presskanallänge 30 mm, Dreiecksteilung 7 mm, Öffnungsverhältnis 43 %) Formkörper in Strangform erzeugt und bezüglich ihrer mechanischen Stabilität (auch Formstabilität) bewertet. In Abbildung 1 sind der Extruder und die verwendete Lochscheibe dargestellt.

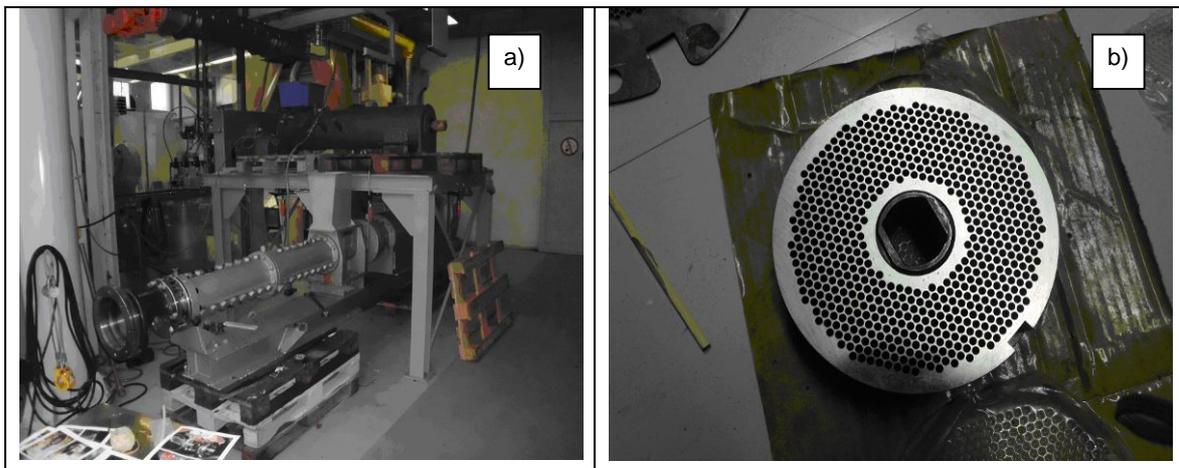


Abbildung 1: a) Einwellenextruder OE 18 der Fa. KAHL, Durchsatz ca. 4 t/h, spezifischer Energieeintrag ca. 45 kJ/kg; b) Matrize mit 5 mm Bohrung

Der Dekanterkuchen wurde mit der Trockenschlempe vermischt und über eine Schnecke dem Einzugsbereich des Extruders zugeführt. Der auf 90 °C erwärmte Sirup wurde kurz hinter dem Einzugsbereich mit einer Dosierpumpe direkt in die Schnecke des Extruders gefördert.

Mit dem Extruder OE 18 konnten formstabile Materialstränge aus Maisschlempe nur dann erzeugt werden, wenn nach dem Austritt aus der Matrize ein Abkühlen der geformten Stränge auf etwa 60 °C ermöglicht wurde. Bei höheren Temperaturen vergrößerte sich deren Neigung zum Zusammenkleben und Agglomerieren

(unerwünschte Klumpenbildung). Ein erhöhter Sirupanteil steigerte zwar die interpartikuläre Haftwirkung im Partikel, beeinflusste aber durch verschlechterte Konsistenz die Extrudierbarkeit negativ und erforderte das Erhöhen des Anteils an Trockenschlempe. Im technologischen Mischungsverhältnis von Dekanterkuchen und Sirup (1,4) konnten in einem Bereich des Trockensubstanzgehalts von 52 bis 56 % akzeptable Maisschlempepellets erzeugt werden. Der KAHL-Extruder stellt somit ein geeignetes System zur Pressagglomeration dar.

Um den Einfluss verschiedener Pressdrücke auf die Stabilität der erzeugten Formkörper beurteilen zu können, wurden weiterführende Untersuchungen mit einem Einwellenextruder der Fa. Schaaf durchgeführt, der mit 3 hintereinander angeordneten Matrizen ausgestattet war.

Dieser Extruder ist im Bereich der Lebensmittelverarbeitung (Durchsätze bis zu 5 t/h) im Einsatz und besitzt als Besonderheit zwischen den Matrizen Knet- und Mischwerkzeuge, die insbesondere beim Extrudieren stärkehaltiger Grundmischungen zur Anwendung kommen.

In den Technikumsversuchen mit der Maisschlempe konnten nur bei höherem Trockensubstanzgehalt der Mischung (ca. 60 %) Partikel mit genügender Festigkeit erzeugt werden, die dann sehr gute Oberflächeneigenschaften aufwiesen. Bei geringerem Trockensubstanzgehalt nahm die Qualität, insbesondere die Festigkeit der Formkörper, deutlich ab. Mit einem spezifischen Leistungseintrag von ca. 200 kJ/kg überstieg der Extruder den spezifischen Leistungseintrag des Systems KAHL jedoch um ein Vielfaches. Aus diesem Grund ist ein industrieller Einsatz des Extruders von Fa. Schaaf zur Formgebung von Maisschlempe nicht sinnvoll.

Weizenschlempe

Auch Weizenschlempe (Anhang A2) wurde als Mischung aus den Komponenten Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe zusammengestellt. Das Verhältnis Dekanterkuchen zu Sirup wurde im Bereich 1,3 bis 2,0 variiert und der Trockensubstanzgehalt der Mischung im Bereich von 52 bis 60 % eingestellt.

Zur Formgebung der Weizenschlempe kam der bereits oben beschriebene Extruder OE 18 der Fa. KAHL zur Anwendung.

Trotz ähnlicher physikalischer Eigenschaften wie Dichte, Schüttwinkel und Partikeldurchmesser unterscheiden sich Mais- und Weizenschlempe in ihrer Zusammensetzungen bezüglich ihres Verhältnisses von Protein zu Fettanteil (Anhang A). Während dieses Verhältnis (Basis Trockenschlempe) bei Mais 2,1 betrug, war es bei Weizen mit 4,8 deutlich größer. Dementsprechend war in den Versuchen das Extrusionsverhalten der Weizenschlempe generell besser als das der Maisschlempe. Die geformten und zerkleinerten Produktstränge neigten weniger zum Agglomerieren und konnten im Trockensubstanzbereich von 50 bis 57 % (Mischung aus Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe) mit akzeptablen Stabilitätseigenschaften erzeugt werden.

Der oben beschriebene Einwellenextruder der Fa. Schaaf wurde auch mit Weizenschlempe getestet. Das Extrudieren von Weizenschlempe verlief bei vergleichbarem Trockensubstanzgehalt der Mischung schwieriger als das Extrudieren der Maisschlempe. Gründe hierfür sind sicher in der Freisetzung der Klebewirkung des Glutens in der Weizenmatrix durch die im Vergleich zum KAHL-Extruder verstärkte Knetwirkung zu finden. Der überproportional höhere Transportwiderstand des Gutes beim Durchtritt durch die Matrizen führte zu spezifischen Leistungseinträgen von ca. 300 kJ/kg und zu Verstopfungen in den Bohrungen der Matrizen. Bei genügend hoher Schneckenantriebsleistung ließen sich mit diesem Extrudertyp Produktstränge hoher Festigkeit erzeugen. Allerdings verhindern die zu hohen spezifischen Leistungseinträge und die mangelnde Robustheit des Extrusionsvorgangs mit Weizenschlempe hier den industriellen Einsatz.

Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais

Die drei Komponenten der Schlempe (Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe) wurden nach Entnahme aus dem Herstellungsprozess einer Ethanol-fabrik im Kühlhaus bis zum jeweiligen Einsatz bei $T = -20\text{ °C}$ tiefgefroren gelagert (Anhang A3).

Die Rohstoffbasis der Ethanolerzeugung bestand in dieser Fabrik aus einer konstanten Mischung aus Weizen (52 %), Gerste (30 %) und Mais (18 %).

Die Versuche zur Formgebung der Mischschlempe wurden mit einem gegenläufig drehenden Doppelwellenextruder der Fa. HB-Feinmechanik (Abbildung 2) durchgeführt. Doppelschneckenextruder werden aufgrund ihrer besonderen Knet- und Mischwirkung für lebensmitteltechnische Formgebungsprozesse von Gütern teigiger Konsistenz eingesetzt. Ein Versuch mit einem solchen System sollte mögliche Vorteile gegenüber dem KAHL-Extruder aufzeigen.

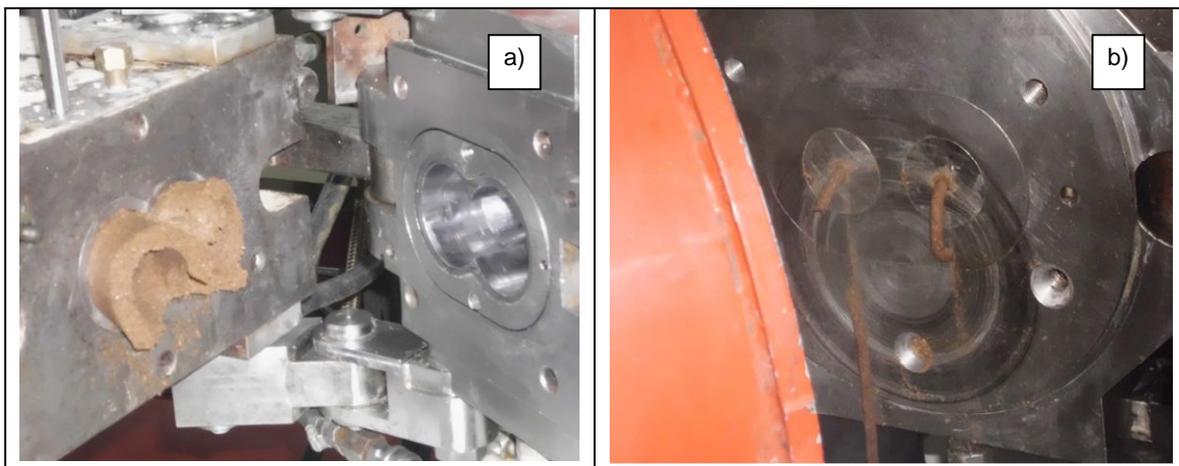


Abbildung 2: Gegenläufiger Doppelwellenextruder der Fa. HB Feinmechanik:
a) Extruderkopf, Durchsatz ca. 50 kg/h, spezifischer Energieeintrag ca. 24 kJ/kg
b) Doppellochmatrize, Bohrungsdurchmesser 5 mm

Das Verhältnis Dekanterkuchen zu Sirup wurde auf einen Wert von 1,4 eingestellt und der Trockensubstanzgehalt der Mischung wurde für die Versuche von 52 bis 60 % variiert.

Die drei Komponenten Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe wurden dem Extruder separat zugeführt; Dekanterkuchen und Trockenschlempe mittels Dosierschnecken und der vorgeheizte Sirup durch eine Dosierpumpe. Als Matrize (Abbildung 2b) kam eine Doppel Lochscheibe (Bohrungsdurchmesser 5 mm und Presskanallänge 12 mm) zum Einsatz. Zur verbesserten Komprimierbarkeit besaß

der Extruder einen Anschluss zur Gasevakuierung (Vakuum) vor der Matrize. Es wurden Versuche mit und ohne anliegendem Vakuum durchgeführt.

Bezüglich des technologischen Verhaltens, ließ sich die Getreideschlempe aus Weizen Gerste und Mais ähnlich gut extrudieren wie Mais- und Weizenschlempe mit dem Extruder der Fa. KAHL. Das Einzugs- und Mischverhalten des gegenläufigen Doppelwellenextruders wies gegenüber dem Einwellenextruder der Fa. KAHL Vorteile auf. Allerdings war die Bandbreite des Trockensubstanzgehalts der Mischung aus Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe, mit der stabile Formkörper erzeugt werden konnten, gegenüber Mais und Weizen im KAHL-Extruder eingeschränkt. Akzeptable Formkörper ließen sich nur im Bereich 55 bis 57 % Trockensubstanzgehalt herstellen. Das Anlegen von Vakuum führte zu keiner Verbesserung der Stabilitätseigenschaften der Extrudate. Die verstärkte Knetwirkung des Extruders setzt vermutlich ähnlich wie beim Schaaf-Extruder in den Weizenanteilen der Schlempemischung Haftkräfte (Klebewirkung des Glutens) frei, die aber zu keiner Steigerung der Festigkeit der Formkörper führen, jedoch die Oberfläche durch erhöhte Adhäsivität negativ beeinflussen (Agglomerationsneigung der Formkörper untereinander nach der Herstellung). Grundsätzlich ist der Extruder von Fa. HB Feinmechanik zum Pelletieren der Getreideschlempe zwar geeignet, weist jedoch gegenüber dem KAHL-Extruder insgesamt keine Vorteile auf.

Neben den oben beschriebenen Untersuchungen an Extrudern verschiedener Hersteller wurden mit Getreideschlempen auch weiterführende Untersuchungen mit dem Technikumsfleischwolf (MD 114, VEB Fleischereimaschinen Arnstadt, Abbildung 3) der OvGU durchgeführt.

Der Fleischwolf ist ein Einwellenextruder mit spezieller Schnecken- und Statorgeometrie, die einen gleichmäßigen und effizienten Durchtritt des Gutes durch die Lochscheibe ermöglicht. Die Lochscheibe (Bohrungsdurchmesser 4,5 mm, Presskanallänge 30 mm) besitzt ein Öffnungsverhältnis von 40 %. Misch- und Knetwirkung sind beim Fleischwolf von untergeordneter Bedeutung. Es bestehen große konstruktive und technologische Ähnlichkeiten zum KAHL-Extruder.

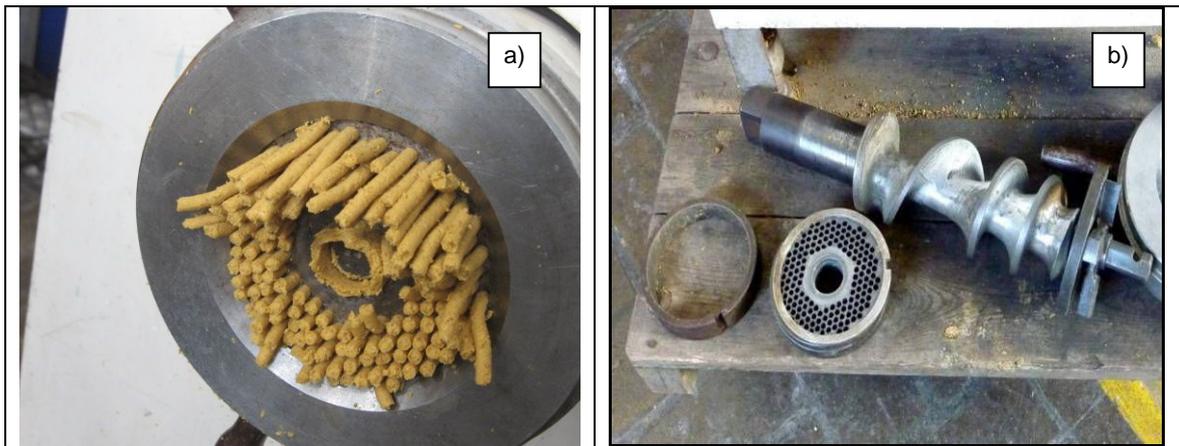


Abbildung 3: Fleischwolf OvGU Magdeburg, Durchsatz 200 kg/h, spezifische Leistungsaufnahme 40 kJ/kg a) Strangaustritt aus der Matrize (Maisschlempe), b) Lochscheibe und Schnecke mit Messer

Wie auch in den Versuchen mit dem KAHL-Extruder waren die erzeugten Pellets (90 °C) nach kurzer Abkühlphase beim Austritt aus der Matrize formstabil. Die Aufenthaltszeit der Schlempe beim Durchtritt durch die Matrize (Presskanallänge) besitzt dabei einen größeren Einfluss auf die Stabilität der Formkörper als der Pressdruck.

Der höhere Fettanteil der Maisschlempe erfordert einen etwas höheren Trockensubstanzgehalt der Mischung aus Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe als die Mischungen der Weizenschlempe und der Getreidemischung.

Durch Versuche mit dem Fleischwolf kann die generelle Eignung eines Einwellenextrudersystems mit Lochscheibe für die Formgebung und Konditionierung von nachwachsenden Rohstoffen getestet werden.

Bagasse

Die für die Extruderversuche verwendete Bagasse (Anhang A4) besaß einen Trockensubstanzgehalt von 30 %, eine mittlere Faserlänge von 80 mm und ein Schüttgewicht von 100 kg/m³.

In einer Reihe von Versuchen wurden verschiedene Möglichkeiten getestet, Bagasse durch Extrudieren einer Formgebung zu unterziehen.

Für Untersuchungen mit gleichläufigen Doppelwellenextrudern wurden Bagasseproben an verschiedene Hersteller verschickt (RPA Process Technologies, Le Mele, F; CPM/Europe BV, Amsterdam, NL.; Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, D).

In keinem Fall konnten mit der feuchten Bagasse auch nur annähernd stabile Formkörper erzeugt werden.

Die Versuche mit einem gegenläufigen Doppelwellenextruder wurden unter Beteiligung von BMA bei Fa. Lehmann durchgeführt.

Durch die Faserstruktur (im Vergleich Schlempe: granuläre Struktur) und das darin eingelagerte Wasser zeigte Bagasse ein grundsätzlich anderes Extrudierverhalten als Schlempe. Mit hohen spezifischen Energieeinträgen konnten mit dem Doppelwellenextruder von Fa. Lehmann ab einem Trockensubstanzgehalt von 75 % stabile Formkörper erzeugt werden. Der hohe spezifische Energieeintrag von 2000 kJ/kg bei einem maximalen Durchsatz von 90 kg/h führte zu einer Erwärmung der Bagasse im Extruder auf Temperaturen größer 90 °C. Beim Durchtritt durch die Matrizen erfolgt dann eine Verglasung der Ligninstruktur an der Oberfläche der Presslinge, die zu einer Stabilisierung der Struktur führt. Damit ist das Extrudieren zur Formgebung feuchter Bagasse zur Erzeugung einer grobkörnigen Struktur für die Wirbelschichtverdampfungstrocknung nicht geeignet.

Treber

Die Formgebung von Treber wurde sowohl in einem Hand-, als auch in einem Technikumsfleischwolf (MD 114, VEB Fleischereimaschinen Arnstadt, Abbildung 3) getestet. Für die Extrudierversuche wurde der tropfnasse Treber (Trockensubstanzgehalt 20 %) in einer Laborzentrifuge auf einen Trockensubstanzgehalt von 32 % entwässert.

In beiden getesteten Apparate konnten nur Formkörper mit einer sehr lockeren Struktur erzeugt werden. Die Oberflächen waren rau und aufgerissen (Abbildung 4) und die Formkörper zerfielen bereits beim Aufschütteln im Transportgefäß zu Teilstücken von weniger als 10 mm Länge.

Die Komponenten im Treber haben sehr unterschiedliche Eigenschaften. Die Schalenbestandteile sind großteils vollständig erhalten, sehr dünn und leicht. Die anderen Bestandteile wie Keimling- und Schrotreste haben einen Partikeldurchmesser von unter 1 mm, Hefezellen und Fasern sind dagegen noch kleiner und besitzen keine Bindeeigenschaften.



Abbildung 4: Formgebung von Treber mit einem Handfleischwolf

Zur Beurteilung der Qualität der Presslinge wurde ein Trocknungsversuch mit extrudierten Treberpartikeln durchgeführt. Nach 30 Sekunden wurde der Versuch abgebrochen, da sich alle Formkörper aufgelöst hatten und die Partikel aus dem Trockner ausgetragen wurden.

Um die Homogenität zu verbessern, wurde abzentifugierter Treber gezielt mehrfach durch den Industriefleischwolf gefahren, wobei alle Partikel inklusive der Schalen zerkleinert wurden, ohne jedoch die Festigkeit der Presslinge zu erhöhen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass extrudierte Presslinge aus Treber nicht formstabil hergestellt werden konnten.

Klärschlamm

Rohschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von ca. 20 % eignet sich nicht zum Verpressen mittels Schnecke durch eine Lochscheibe. Die Versuche zur Formgebung mit einem Fleischwolf oder Extruder zeigten, dass nur mit Hilfe eines rotierenden Messers vor der Matrize kontinuierlich Materialstränge erzeugt werden können. Andernfalls führen Fasern und Haare nach kurzer Zeit zum Verstopfen der Bohrungen. Weiterhin konnte bei den Versuchen beobachtet werden, dass die entstehenden Materialstränge sofort nach dem Verlassen der Matrizenöffnungen zu einer nicht mehr vereinzelbaren Masse verkleben.

Nach Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes auf 33 % durch die Zugabe von Holzmehl war dieser Effekt deutlich reduziert. Durch „Abpulvern“ mit Holzmehl konnten die Materialstränge dauerhaft vereinzelt werden, blieben jedoch in Ihrer Länge erhalten und zerbrachen nicht durch Aufschütteln. Beim Versuch, die Stränge nach der Herstellung separat mit einem Messer zu zerteilen, konnten Pellets mit einem Durchmesser von 6 mm hergestellt werden. Dabei fiel insbesondere auf, dass einzelne Inhaltsstoffe (besonders lange Haare) schwer zu zerteilen waren, was dazu führte, dass die entstehenden Schnittflächen wieder schnell zusammenklebten und die Pellets sich so nicht für einen mechanischen Transport eigneten.

2.1.2 Pelletieren

Das Pelletieren wurde mit einer Labor-Pelletpresse (Kollermühle) der Fa. Amandus Kahl, Typ 14-175 untersucht.

Diese Flachmatrizenpresse besteht aus einem sogenannten Kollerkopf der von unten über eine Welle angetrieben wird. An diesem Kopf sind seitlich zwei Walzen mit geriffelter Oberfläche (die Koller) angeordnet, die auf einer Matrize abrollen. Die Pelletpresse ist in Abbildung 5 dargestellt.

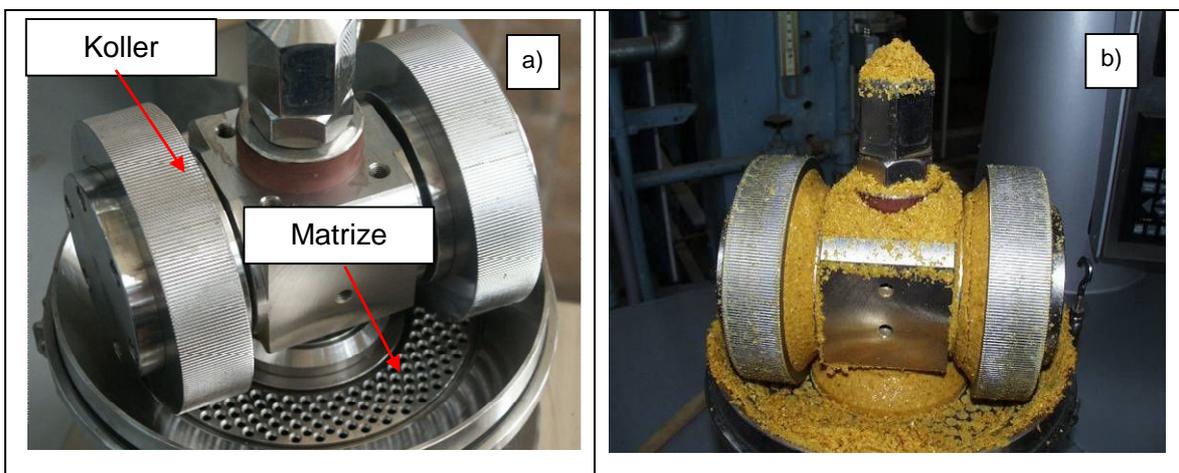


Abbildung 5: Labor-Pelletpresse der Fa. Amandus Kahl, Typ 14-175
a) vor Versuchsbeginn, b) nach Versuchsende (Material Maisschlempemischung)

Das Gut wird von oben in den Prozessraum aus Kollerkopf, Koller und Matrize dosiert und bildet auf der Matrize eine Materialschicht. Der Kollerkopf rotiert, so dass die Koller die Materialschicht überrollen, verdichten und in die Bohrungen (Presskanal) der Matrize drücken. Der aus dem Presskanal austretende Materialpfropfen wird durch einen Abstreifer unterhalb der Matrize abgetrennt.

Der Druck im Schüttgutkeil vor dem Koller hängt maßgeblich von den Fließeigenschaften und dem Verformungswiderstand des zu bearbeitenden Materials sowie vom Grad des Formschlusses zwischen Koller und Matrize ab [1]. Die Fließeigenschaften werden durch den Wassergehalt, die Partikelgröße, die Form der Oberfläche und die Dichte der Partikel beeinflusst und können durch eine Vorbehandlung des Materials verändert werden (z. B. Vermahlung). Nur wenn der Druck im Schüttgutkeil größer ist als die Haftreibung des Materials im Presskanal der Matrize, fließt das Material durch den Presskanal.

Maisschlempe

In Vorversuchen wurden die Fließeigenschaften der Maisschlempemischung aus Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe (Anhang A1) untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Maisschlempemischung in einem bestimmten Trockensubstanzbereich (50-60 %) vorliegen muss, um beide Phasen entsprechend ihres Mischungsverhältnisses im Kollergang einer Formgebung unterziehen zu können. Durch die Zugabe von Trockenschlempe wurde der Trockensubstanzgehalt der Mischung auf das erforderliche Maß angehoben, um in Verbindung mit den verwendeten Matrizen den Druckaufbau im Schüttgutkeil vor dem Koller positiv beeinflussen zu können.

Für die Versuche wurde die Presskanallänge, d. h. die Dicke der Matrize variiert. Der Bohrungsdurchmesser von 5 mm und der im Vorversuch ermittelte optimale Durchsatz blieb konstant. Durch die verschiedenen Längen des Presskanals konnte ein Verhältnis Bohrungsdurchmesser zu Presskanallänge von 1:4 bis 1:10 realisiert werden.

In Abbildung 6 sind Maispellets zu sehen, die mit der Kollermühle hergestellt wurden.



Abbildung 6: Mit der Kollermühle hergestellte Maispellets, Bohrung Matrize 5 mm

Als Ergebnis der durchgeführten Pelletierungsversuche ist im Diagramm in Abbildung 7 zu erkennen, dass unter vergleichbaren Bedingungen die Dicke der Matrize im untersuchten Bereich keinen wesentlichen Einfluss auf die erzeugte Größe der Maispellets besitzt. Durch Trocknungsversuche konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Länge des Presskanals einen Einfluss auf die Festigkeit der erzeugten Partikel hat.

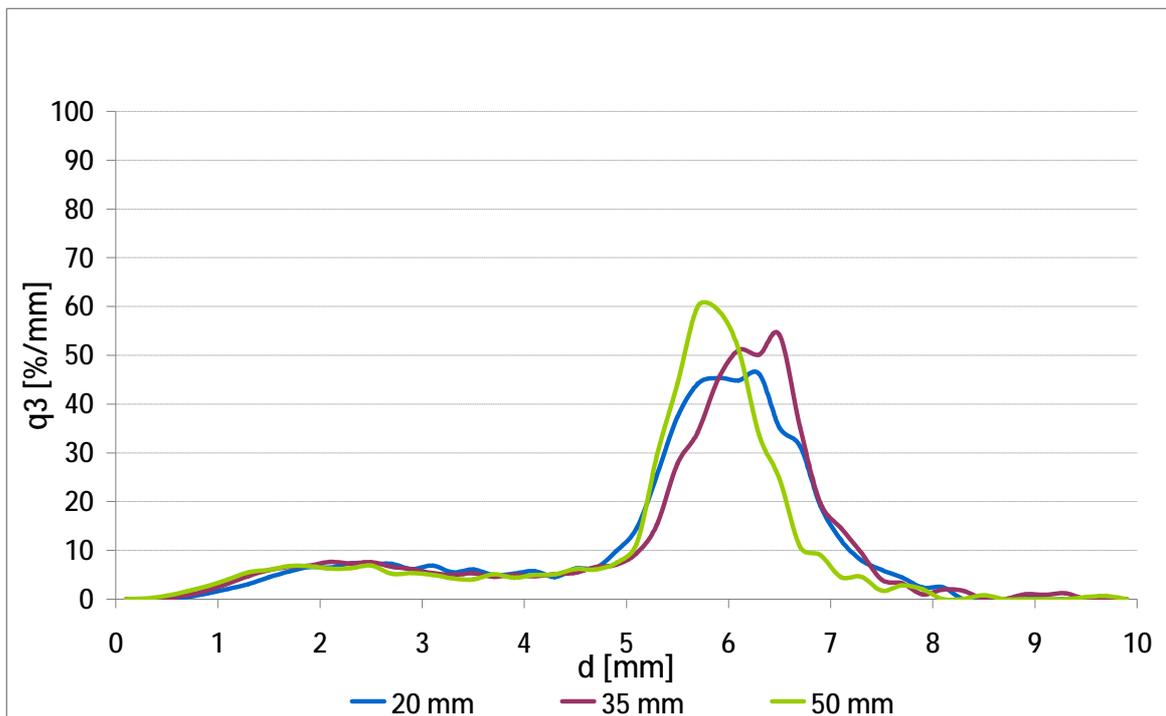


Abbildung 7: Verteilungsdichte der Pellets (q_3) bei verschiedenen Matrizen-dicken (20, 35, 50 mm), Bohrungsdurchmesser 5 mm, Trockensubstanzgehalt ca. 53 %, Masse 3460 g, Presszeit 2,5 min.

Infolge der mechanischen Beanspruchung bei der Wirbelschichttrocknung konnte eine Veränderung der Partikelgröße nachgewiesen werden. Die Partikel, die mit der dickeren Matrize (50 mm) erzeugt wurden, sind weniger in ihrer Größe verändert worden als Partikel, die mit der kleinsten Matrize (20 mm) hergestellt wurden.

Mit den Versuchen zur Pelletierung von Maisschlempe konnte gezeigt werden, dass sich die Komponenten nach entsprechender Vorbehandlung durch Pelletierung in eine Form bringen lassen, die eine Fluidisierung in der Wirbelschicht ermöglicht. Anzumerken ist, dass diese Technologie aufgrund der realisierbaren Durchsätze eher für mittlere und kleinere Produktströme zum Einsatz kommen könnte.

Bagasse

Bagasse (Anhang A5, Zusammensetzung Tabelle A4) bildet nach der Extraktion ein Haufwerk von lose aufeinanderliegenden Faserverbänden mit einer Schüttdichte von ca. 120 kg/m³, die sich aufgrund der unregelmäßigen Zerkleinerung in den Mühlen nicht nur in Dicke und Länge sondern auch in ihrer Festigkeit unterscheiden [2].

Abbildung 8 zeigt ein Bagassehaufwerk vor dem Pelletierungsversuch im Technikum.



Abbildung 8: Bagasse (Anhang A5), vorbereitet für Versuche mit der Kollermühle der Fa. KAHL

Die Verwendung der Kollermühle zum Pelletieren getrockneter Bagasse ist für viele Anlagenbauer, die diese Technologie anbieten und vertreiben, ein Standardverfahren. Die Herstellung von Pellets aus feuchter Bagasse (Trockensubstanzgehalt ca. 50 %) lag bislang nicht im Fokus der Anlagenbauer und wurde im Zuge des Forschungsvorhabens untersucht.

Bei den Untersuchungen von Holmer [2] wurden Matrizen mit Bohrungen von 2 bis 16 mm und unterschiedlicher Dicke eingesetzt, um Pressverhältnisse von 1:1 bis 1:6 (Bohrungsdurchmesser : Presskanallänge) zu testen.

Parallel zur Veränderung des Pressverhältnisses wurde versucht einen maximalen Materialdurchsatz zu erreichen, um eine Abschätzung des Energieeintrages vornehmen zu können.

Nach mehreren Versuchen mit Veränderung von Prozessparametern musste konstatiert werden, dass die Kollermühle zur Formgebung von feuchter Bagasse

nicht erfolgreich angewendet werden kann. Es konnten keine Prozessparameter gefunden werden, welche die Herstellung stabiler Pellets ermöglichten. Die Bagasseagglomerate zerfielen leicht mit einem sehr hohen Staubanteil infolge der Vermahlung der Bagasse. Die Technologie stellte sich als nicht praktikabel oder nicht wirtschaftlich heraus.

Wenn das Pressverhältnis zu klein ist (kleiner 1:6), verdampft das in der Bagasse enthaltende Wasser durch die Erhitzung in der Matrize und sprengt die Pellets beim Austritt aus der Matrize in sehr kleine Teile. Der Verschleiß der Matrize nimmt stark zu und es kommt zu Verstopfungen einzelner Bohrungen. Weiterhin führen kleine Pressverhältnisse zu einem hohen Energieverbrauch (Pressverhältnis 1:6: ca. 90 kJ/kg Energiebedarf bei 4 mm-Bohrungsdurchmesser).

Wenn das Pressverhältnis zu groß ist (größer 1:6), dann werden zu wenig formschlüssige Verbindungen im Pellet erzeugt, so dass ebenfalls keine stabilen Pellets entstehen.

Aufgrund der Faserstruktur der Bagasse und dem Kompaktieren durch die Lagerung kam es im Versuch zeitweise zu Verstopfungen der Kollermühle. In der industriellen Anwendung wird dieser Aspekt eine untergeordnete Rolle spielen, aber dennoch ist die Beschaffenheit der Bagasse speziell nach Lagerung im Haufwerk für die Zuführung zur Kollermühle ohne entsprechende Aufbereitung nicht geeignet.

Während der Versuche zur Pelletierung [2] konnte allerdings beobachtet werden, dass sich Bagasse in der Kollermühle mit dünnerer Matrize sehr gut zerkleinern lässt. Hersteller anderer Zerkleinerungsmaschinen hielten die Zerkleinerung frischer Bagasse auch nach eingehender Begutachtung für nicht machbar. Auch bei der Zerkleinerung der Bagasse steigt mit geringer werdendem Bohrungsdurchmesser der Kollermühlenmatrize der Energiebedarf über ein wirtschaftliches Maß hinaus an.

2.1.3 Granulieren

Die ersten Granuliersversuche wurden mit einem Tellergranulator der Fa. Eirich durchgeführt, um eine technologische Alternative zum Extrudieren zu testen, da beim Granulieren deutlich geringere spezifische Energieeinträge notwendig sind.

Die Granulatbildung erfolgt beim Tellergranulator durch eine rollende und mischende Bewegung der Feststoffe. Durch die Drehbewegung des Granulators wird das Gut bis zur höchsten Stelle des Tellers transportiert, um von dort in gleichmäßigem Strom in die untere Tellerhälfte zurückzurollen [3].

Vor dem Granulieren wird die Mischung auf einen definierten Trockensubstanzgehalt eingestellt. Während des Granulierens wird dann über eine Düse Flüssigkeit auf die rollende Schicht gesprüht, so dass die Partikel agglomerieren und auf diese Art und Weise wachsen können, wobei die größeren Teilchen auf der rotierenden Partikelschicht nach außen gelangen und über den Rand des Apparates ausgetragen werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Granuliersversuche (Fa. Eirich) wurden weiterführende Versuche mit einem Tellergranulator (Eigenbau BMA) durchgeführt.

Der BMA-Tellergranulator baut auf einem Betonmischer der Firma ATIKA auf (Abbildung 9) mit stufenlos verstellbarem Neigungswinkel sowie stabiler und ruhiger Lagerung der Mischtrommel.



Abbildung 9: BMA-Tellergranulator

Beim Umbau wurde die Originalmischtrommel durch einen Teller aus rostfreiem Stahl (Durchmesser 590 mm; Randhöhe 135 mm) ersetzt und mit verstellbaren Abstreifern sowie einer Düse für die Zugabe von Wasser oder Bindemittel versehen. Über einen Frequenzumrichter lässt sich die Drehzahl stufenlos zwischen 4 und 31 U/min einstellen.

Maisschlempe

Die Untersuchungen zum Granulieren von Maisschlempe wurden mit einem Tellergranulator bei der Fa. Eirich durchgeführt.

Die Maisschlempe (Anhang A1) wurde in einem Mischungsverhältnis Dekanterkuchen zu Sirup von 1,4 eingesetzt. Durch die Zugabe von Maistrockenschlempe erfolgte das Einstellen verschiedener Trockensubstanzgehalte. Vor dem Granulieren wurden die einzelnen Komponenten in einem schnelllaufenden Mischer gemischt. Das Vormischen erfolgte unter Temperieren auf 60 °C.

Ein direkter Einsatz der Komponenten auf dem Granulierteller ohne eine vorherige Vermischung war infolge Verklumpung des Dekanterkuchens bei der Sirupzugabe nicht möglich. Die besten Granulate konnten erzeugt werden, indem Dekanterkuchen, Trockenschlempe und nur ca. 1/3 der benötigten Sirupmenge im Mischer homogenisiert wurden. Die restlichen 2/3 der Sirupmenge wurden kontinuierlich beim Granulieren zugeführt.

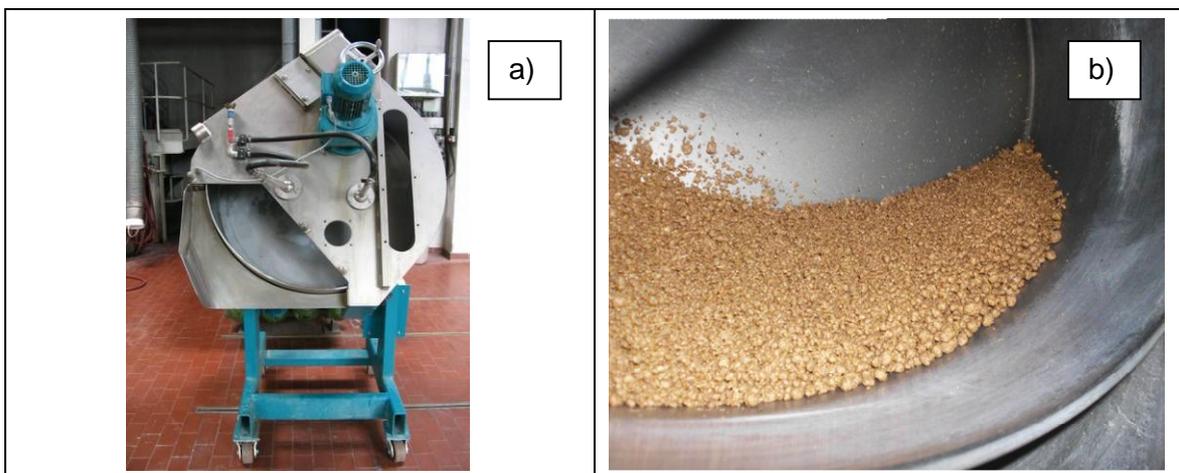


Abbildung 10: Granulierungsversuche Fa. Eirich
a) Tellergranulator TR10, b) Maisschlempegranulate

Der erforderliche Trockensubstanzgehalt der Maisschlempemischung lag in einem Bereich von 50 bis 53 % und konnte etwas geringer im Vergleich zum Extrudieren (52 bis 56 %) eingestellt werden.

Die entstandenen Granulate (Abbildung 10b) wiesen eine Partikelgrößenverteilung im Bereich von 1 mm bis 10 mm (ca. 10 Massenprozent kleiner 1 mm und ca. 5 Massenprozent größer 10 mm) auf und besaßen eine vergleichbare Festigkeit mit den Formkörpern aus dem Extrusionsprozess.

Der spezifische Energieeintrag des Mischens betrug 10 kJ/kg und der des Granulierens 5 kJ/kg (zum Vergleich: Extrudieren ca. 30 kJ/kg).

Durch zusätzliches Vermahlen der Trockenschlempe vor der Zugabe in den Mischer ließen sich die Qualität der erzeugten Granulate (Stabilität, Oberflächenadhäsivität und Fließfähigkeit) und der Vorgang des Granulierens selbst (weniger Klumpenbildung) verbessern.

Eine ausreichende Granulatbildung, schon im vorgelagerten Mischprozess selbst, konnte nicht beobachtet werden.

Vergleichende Untersuchungen zum Granulieren von Maisschlempe wurden auch mit dem BMA-Tellergranulator sowohl mit getrockneter Maisschlempe (vermahlen und rückbefeuchtet), als auch mit einer Mischung aus Dekanterkuchen, Sirup und Maistrockenschlempe (Anhang A1) durchgeführt.

Auch bei diesen Versuchen konnte beobachtet werden, dass sich die Schalenbestandteile des Mais weder am Granulierteller noch außen an den Partikeln selbst anlagern, sondern in die Matrix der Granulate eingebunden wurden.

Bei einer kontinuierlichen Materialzuführung konnten Granulate mit einem Durchmesser von ca. 6 mm erzeugt werden (Massestrom nach Einlaufphase ca. 500 g/min).

Der eingestellte Trockensubstanzgehalt der Maisschlempemischung lag in einem Bereich von 53-56 %. Durch die Zugabe von Wasser als Granulierungsmittel verringerte sich der Trockensubstanzgehalt der Granulate auf ca. 45 % und lag damit deutlich niedriger im Vergleich zu den extrudierten Formkörpern (52 % bis 56 %). Nach längerer Standzeit neigten die Granulate etwas mehr zum Verkleben. Sie ließen sich durch leichtes Auflockern allerdings wieder vereinzeln, ohne ihre Form zu verlieren.

Im Ergebnis der Untersuchungen war das Granulieren von Maisschlempe mittels Tellergranulator grundsätzlich möglich. Im direkten Vergleich zu den extrudierten

Formkörpern waren die Maisschlempegranulate auch bei niedrigerem Trockenstoffgehalt besser zu vereinzeln und ähnlich formstabil.

Es zeigte sich im Versuchsablauf jedoch auch, dass ein solcher Granulierungsprozess schlecht automatisierbar ist und gegenüber Prozessschwankungen (Sirupzugabe, Siruptemperaturen, Vormischung usw.) äußerst sensibel reagiert (Klumpenbildung, Anhaftungen). Insbesondere bei stark ausbrüdendem Material (Schlempe-mischung im industriellen Prozess bei 90 °C) sind bei der Anwendung eines Tellergranulators durch die Kondensatbildung Prozessstörungen zu erwarten.

Weizenschlempe

In einer ersten Versuchsreihe wurde getrocknete Weizenschlempe (Anhang A2) vermahlen und rückbefeuchtet granuliert.

Nach der Einfahrphase des Tellergranulators hatten die erzeugten Granulate einen Durchmesser von ca. 6 bis 8 mm (Abbildung 11) und einen Trockenstoffgehalt von ca. 45 %. Die Partikelgrößenverteilung der Granulate war sehr eng und nur ein sehr kleiner Anteil verklumpeter Ausgangsmischung verließ den Tellergranulator ungranuliert.

Mit den gewählten Einstellungen (Drehzahl und Neigung) wurde mit Hilfe des BMA-Tellergranulator eine kontinuierliche Granulation von ca. 350 g/min erreicht. Auf einem industriellen Tellergranulator mit 7 m Durchmesser entspricht das einer theoretischen Granulation von 3 t/h.



Abbildung 11: Weizenschlempegranulate (rückbefeuchtete Trockenschlempe) im engen Größenspektrum von 6 bis 8 mm

Um sich den industriellen Bedingungen anzunähern, wurde in einer weiteren Versuchsreihe auch eine Mischung von Weizendekanterkuchen, -sirup und -trockenschlempe getestet, welche sich in gleicher Weise ohne erkennbare Nachteile granulieren ließ. Die Partikel behielten auch nach längerer Standzeit ihre Form und ließen sich durch leichtes Auflockern wieder vereinzeln.

Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais (WGM-Schlempe)

Für das Granulieren einer Weizen-Gerste-Mais-Schlempemischung wurde Trockenschlempe (Anhang A3) verwendet, die vermahlen und rückbefeuchtet im Granulierprozess eingesetzt wurde.

Die Versuchsergebnisse sind vergleichbar mit der Granulation von Weizenschlempe. Die Granulate hatten ebenfalls einen Durchmesser von ca. 6 bis 8 mm (Abbildung 12) und einen Trockensubstanzgehalt von ca. 45 %. Die Partikelgrößenverteilung der Granulate war sehr eng. Auch nach längerer Standzeit behielten die Partikel ihre Form und ließen sich durch leichtes Auflockern wieder vereinzeln.

Während der Versuche konnte allerdings beobachtet werden, dass ein größerer Schalen- und Faseranteil die Tellerflächen bedeckte, der dauerhaft abgeschabt werden musste.

Die Fasern, die sich in den Granulaten einlagern, verringern deren Stabilität nur unwesentlich. Allerdings reiben sich die Fasern, die sich außen an den Granulaten befinden beim Transport und im Trocknungsprozess ab.



Abbildung 12: Weizen-Gerste-Mais-Schlempesgranulate (aus rückbefeuchtetem Material) mit erhöhtem Faseranteil an der Außenseite der Granulate

Der Massenstrom, der bei den kontinuierlichen Granulationsversuchen von Weizen-Gerste-Mais-Schlempe erreicht wurde, betrug ca. 400 g/min und zeigt damit bessere Granuliereigenschaften als Schlempen mit geringerem Faseranteil wie z.B. Weizenschlempe.

Bagasse

Bagasse verlässt den Prozess der Extraktion als langfaseriges Gut von geringer Dichte mit einem Trockensubstanzgehalt von ca. 50 %. In diesem Zustand kann Bagasse nicht granuliert werden.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde die Bagasse (Anhang A5) in einer Koller- und Schneidmühle vor dem Granulieren zu unterschiedlichen Faserlängen zerkleinert. Im Unterschied zu kugelförmigen Partikeln granulieren die Fasern nicht besser, je feiner sie sind. Einerseits bilden zu kleine Fasern sehr instabile Granulate, da kein Binder vorhanden ist, andererseits bilden zu lange Fasern lockere und leichte Faserballen aber keine 'echten Granulate' [2] (Abbildung 13).

Die Bagasse musste mit großen Mengen Wasser beaufschlagt werden, um Granulate zu erzeugen, die nicht wieder durch die zu granulierende Masse selbst (Granuliertiere) zerstört wurden.

Betrachtet man den hohen Energiebedarf, der für die Zerkleinerung mit der Kollermühle notwendig ist und die Tatsache, dass der Trockensubstanzgehalt von 50 % auf unter 25 % gesenkt werden muss, um eine Granulation zu ermöglichen,



Abbildung 13: Zerkleinerte Bagasse während der Granulation im Tellergranulator

kommt man zu dem Ergebnis, dass das Granulieren von Bagasse unwirtschaftlich erscheint, zumal die entstehenden Bagassegranulate sehr leicht sind und eine eher filzartige Struktur von nur geringer Festigkeit aufweisen.

Um zu untersuchen, ob eine kohlenhydratreiche Lösung eine Kittwirkung auf die Faserbestandteile auswirken kann, wurde als Alternative zum Bindemittel Wasser auch Melasse eingesetzt, die sich allerdings in ihrer Bindeeigenschaft von Wasser kaum unterschied und bei deren Verwendung keine festeren Granulate erzeugt werden konnten.

Treber

Treber (Anhang A6) lässt sich nicht wirtschaftlich granulieren.

Sowohl tropfnasser, als auch abzentrifugierter Treber bilden im Granulierteller zunächst Granulate, welche aber weder stabil noch gleichmäßig rund sind. Die Schalenbestandteile lassen sich kaum granulieren (Abbildung 14) und verringern die Festigkeit der Granulate zusätzlich.

Entstehen größere Granulate, werden diese durch mechanische Einwirkungen in der Granuliertiere sofort wieder zerstört. Die Schalenbestandteile lagerten sich auf den Flächen des Granuliertellers ab, mussten kontinuierlich abgeschabt werden und erhöhten den Feinanteil der wenigen ausgetragenen Granulate.

Auch mechanisch bearbeiteter Treber mit geringerem Grobanteil konnte nicht zuverlässig granuliert werden. Es entstanden nur lockere, instabile Granulate, welche Stöße während des Transports und bei der Wirbelschichttrocknung nicht überstehen und zerfallen.



Abbildung 14: Treber im Tellergranulator während der Granulation

Klärschlamm

Für die Granulierungsversuche wurde entwässerter Klärschlamm (Anhang A7) verwendet. Der zentrifugierte Rohschlamm besitzt einen Trockensubstanzgehalt von ca. 20 % und eine teigartige Konsistenz.

Um den Schlamm zu vereinzeln wurde durch Zumischen von Holzmehl (denkbar wäre auch bereits getrockneter Klärschlamm) der Trockensubstanzgehalt auf ca. 33 % erhöht. Ohne das Zumischen von trockenem Material verbleibt der Schlamm in der sogenannten Leimphase und lässt sich nicht vereinzeln.

Das Zumischen wurde beendet, als sich aus der Masse beim Mischen einzelne Flocken lösten. Anschließend wurde die Mischung im BMA-Tellergranulator granuliert (Abbildung 15).

Die aus größeren Flocken entstandenen Granulate hatten eine linsenartige Form und eine gummiartige Konsistenz. Aufgranulierte kleinere Flocken waren eher rund bis eiförmig. Aufgrund der unterschiedlichen Flockengröße besitzen die fertigen Granulate ein relativ breites Partikelgrößenspektrum.

Die Verarbeitbarkeit der 'Schlamm-Flocken' auf dem Granulierteller und die Stabilität der erzeugten Granulate waren sehr gut. Auch nach längerer Lagerung blieben die Granulate stabil und verklebten nicht.

Der Massenstrom, der bei der Klärschlammgranulation realisiert werden konnte, unterschied sich kaum vom Durchsatz, der bei der Granulation der Getreideschlempen erzielt werden konnte.



Abbildung 15: Klärschlammgranulate im Tellergranulator

2.1.4 Zerkleinern

Grundsätzlich sind für die Produktkonditionierung als Vorstufe für Misch- und Formgebungsschritte auch diverse Zerkleinerungsaggregate wie Mühlen, Schneidmühlen oder Stopfschnecken anwendbar. Bei Gütern mit eigener Makrostruktur (z. B. Bagasse) ist das Zerkleinern als einzige Vorbehandlungsmethode für das Trocknen in der DampfWirbelschicht zunächst denkbar. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde für Bagasse die Zerkleinerung mit einer Schneidmühle (Kollermühle) und für Klärschlamm die Zerkleinerung durch Schneiden untersucht.

Bagasse

Durch die Faserstruktur besitzt die Bagasse bereits eine feste Form aus makroskopischen Partikeln. Es ist deshalb denkbar, Bagasse direkt in einer DampfWirbelschicht zwecks Trocknung zu fluidisieren. Voraussetzungen dafür sind unter anderem ein geeigneter mittlerer Partikeldurchmesser und eine genügend dichte Partikelgrößenverteilung des Faserkollektivs.

Für die Versuche wurde Bagasse (Abbildung 16, Anhang A5) aus dem Herstellungsprozess entnommen und per Kühlcontainer nach Deutschland transportiert.

Die Versuche zum Zerkleinern von Bagasse wurden mit einer Technikumpresse (Kollermühle) der Fa. KAHL, Typ 33-390 durchgeführt. Die Kollermühle hat einen Durchsatz von ca. 1 t/h und einen spezifischen Energieeintrag von ca. 140 kJ/kg.



Abbildung 16: Bagasse (Anhang A5), unzerkleinert, Trockensubstanzgehalt 50 %

Bei den Zerkleinerungsversuchen wurden unterschiedliche Matrizen eingesetzt, die sich bezüglich Bohrungsdurchmesser und Presskanallänge unterschieden.

Mit allen Matrizen konnte ein gutes Zerkleinern der Bagasse in der Kollermühle vorgenommen werden. In Tabelle 2 sind Ergebnisse der Siebanalyse vor und nach dem Zerkleinern dargestellt.

Erwartungsgemäß vergrößerte sich der Feinanteil mit Verringerung des Bohrungsdurchmessers der Matrize. Der spezifische Energieeintrag erhöhte sich sowohl mit verringertem Bohrungsdurchmesser als auch mit vergrößerter Presskanallänge.

Zusammenfassend konnte die KAHL-Kollermühle als geeignetes technisches System zum Zerkleinern von feuchter Bagasse mit guter Prognose für die industrielle Anwendung bewertet werden.

Tabelle 2: Ergebnisse von Siebanalysen unzerkleinerter und zerkleinerter Bagasse mit einer KAHL-Kollermühle

		Versuch TV2	Versuch TV6
Bohrungsdurchmesser		8	2
Pressverhältnis		1 zu 1	1 zu 6
Partikelgröße	Rohware	TV2	TV6
> 4,00 mm	21,3	1,8	0,0
> 3,55 mm	3,5	1,3	0,0
> 3,15 mm	2,2	1,3	0,0
> 2,50 mm	4,1	2,8	0,5
> 2,00 mm	4,4	2,8	0,7
> 1,40 mm	7,6	7,6	5,9
> 1,00 mm	9,8	13,4	13,3
> 0,50 mm	27,5	41,5	45,9
< 0,50 mm	19,6	27,5	33,7

Klärschlamm

Um den Prozess einer Intensivmischung zu umgehen, wurden einfache Schneidversuche mit dem Klärschlamm (Anhang A7) durchgeführt. Ohne Zugabe von Trockenstoff ist die Zerteilung zwar möglich, die hergestellten Formkörper oder Partikel können jedoch nicht vereinzelt werden. Ein Zerschneiden des Klärschlammes mit weniger als 33 % Trockensubstanzgehalt führt unweigerlich zum Verkleben der Schneidwerkzeuge und wurde nicht weiter betrachtet.

Die Vereinzelung bzw. Zerkleinerung des zentrifugierten Rohschlammes mit einem Stabmischer führte nach Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes durch die Zugabe von Holzmehl zur Bildung unterschiedlich großer Materialflocken, die eines weiteren Formgebungsprozesses bedürfen, um transportfähig zu bleiben. Eine Weiterverarbeitung der Flocken ohne zusätzliche Formgebung ist möglich, bedarf allerdings entsprechender Anlagen, die den Klärschlamm direkt dem Trocknungsprozess zuführen. Eine Lagerung oder Transport, ohne dass die Partikel verkleben oder agglomerieren, ist nicht möglich.

2.2 Verhalten von Inhaltsstoffen auf die Formgebung

Im Rahmen des Vorhabens wurden für verschiedene Ausgangsmaterialien geeignet erscheinende Formgebungsverfahren ausgewählt und getestet. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand die Erzeugung von Einzelpartikel, die sich in der Wirbelschicht ausreichend fluidisieren lassen und eine gewisse mechanische Stabilität besitzen.

Die Nebenprodukte aus der Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen unterscheiden sich naturgemäß in ihrer inhaltlichen Zusammensetzung.

Selbst wenn gleiches Ausgangsmaterial verwendet wird, können bei der industriellen Verarbeitung durch den Einsatz unterschiedlicher Verfahren Stoffströme entstehen, die sich in ihrer Zusammensetzung unterscheiden und deren Inhaltsstoffe veränderte physikalisch-chemische Eigenschaften aufweisen.

Bereits bei den ersten Untersuchungen zur Formgebung wurde festgestellt, dass die verschiedenen Inhaltsstoffe in Abhängigkeit von Konzentration, Verteilung und Beschaffenheit einen entscheidenden Einfluss auf das Prozessziel der Formgebung haben.

In weiterführenden Untersuchungen wurde Biomasse aus der Gruppe der Getreideschlempen einer stofflichen und granulometrischen Charakterisierung unterzogen, um bei Vorhandensein ähnlicher Inhaltsstoffe Rückschlüsse auf das Verhalten bei der Formgebung ziehen zu können. Diese Untersuchungen wurden mit Maisschlempe, Weizenschlempe und einer Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais durchgeführt (Anhang A).

Bedingt durch die Varianz der Inhaltsstoffe und das physikalisch-chemische Verhalten dieser Komponenten unter variierten verfahrenstechnischen Parametern beim Formgebungsprozess lassen sich im Ergebnis nach Abschluss der Untersuchungen zu einzelnen Inhaltsstoffen nur phänomenologische Aussagen zu ihrem Verhalten bei der Formgebung treffen. Eine summarische Aussage zu dem komplexen Geschehen ist derzeit auch nach Abschluss dieser weiterführenden Untersuchungen nicht möglich.

Durch die Untersuchungen konnten jedoch Einflüsse der stofflichen Hauptkomponenten auf die Prozesse der Vorbehandlung der Getreideschlempen (Dosierung, Mischung, Formgebung, Transport) ermittelt werden.

So trägt das Vorhandensein von Proteinen bei der Formgebung deutlich zum Steigern der Oberflächenstabilität bei. Gleiches gilt für den Sirup, sofern er durch

entsprechende Temperatur eine genügend geringe Viskosität aufweist, die eine ausreichende Benetzbarkeit der Schlempeprimärpartikel erlaubt.

Höhere Fettkonzentrationen in der Schlempe wirken beim Pressagglomerieren als Dämpfungsglieder einer Formung entgegen und behindern dadurch den Presseffekt (besonders bei Maisschlempe).

Restzucker und Stärke wirken beim Agglomerieren bindend. Zucker erhöht jedoch die Anbackungsneigung der Schlempekomponenten und behindert dadurch das Dosieren und den Transport ausgeformter Presslinge.

Mineralische Bestandteile (Asche) fördern und erhöhen die Abrasion.

Faseranteile, die in makroskopischen Partikelgrößen auftreten, werden in die homogene Schlempe matrix eingegliedert und tragen je nach Partikelgrößenverteilung zur Strukturstabilisierung von Agglomeraten bei (homogene Partikelgrößenverteilung mit wenig Überkorn) oder bilden Sollbruchstellen bei mechanischer Beanspruchung (inhomogene Partikelgrößenverteilung mit viel Überkorn). Wasser wirkt sich in höheren Konzentrationen immer negativ auf die Erzeugung stabiler Formlinge aus.

Es besteht daher weiterhin die Notwendigkeit, das Formgebungsverhalten von nachwachsenden Rohstoffen auf empirischem Wege zu untersuchen, um diese Produkte hinsichtlich ihrer Trocknungskinetik und ihres Fluidisierungsverhaltens in der druckaufgeladenen Dampf wirbelschicht charakterisieren zu können.

Eine pauschale Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen mit ähnlichen Biomassen ist nicht zielführend. Die zuvor beschriebene Komplexität erfordert in jedem Fall eine Einzelbetrachtung des jeweils zu untersuchenden Rohstoffes.

Tabelle 3: Wirkungsweise verschiedener Inhaltsstoffe auf den Prozess der Formgebung

Rohstoff	Wirkung der Inhaltsstoffe auf die Formgebung					
	Pektin	Fasern	holzartige Komponenten	Protein	Fett	Wasser
Brennereischlempen						
Mais	o	+	o	+	- / o	-
Weizen	o	+	o	+	o	-
Getreidemischungen	o	+	o	+	o	-
Bagasse	o	+	+	o	o	+
Treber	+	++	o	+	- / o	-
Klärschlamm	o	o	o	-	-	--

Wirkung: o = neutral; ++ = sehr positiv; + = positiv; -- = sehr negativ; - = negativ

Einen allgemeinen Überblick über die Wirkungsweise verschiedener Inhaltsstoffe bei der Formgebung ist in Tabelle 3 wiedergegeben.

Die im Forschungsvorhaben untersuchten Ausgangsmaterialien ließen sich bei definiertem Wassergehalt unter Einsatz der beschriebenen Verfahren ohne den Einsatz von Hilfsstoffen in eine handhabbare Form überführen, so dass der Einsatz von Hilfsstoffen nicht notwendig war und dementsprechend nicht weiter untersucht wurde.

2.3 Stabilität der Formkörper

2.3.1 Voruntersuchungen zur Partikelfestigkeit

Pelletierte Produkte (Kollermühle)

Eine direkte Messung der Festigkeit der einzelnen Maispellets, die mit der Kollermühle erzeugt wurden, war auf Grund ihrer Form und Konsistenz nicht möglich. Um eine Aussage über die Formstabilität und die Festigkeit der erzeugten Formkörper zu erhalten, wurden mit den hergestellten Maispellets Trocknungsversuche in einer luftbetriebenen Wirbelschichtanlage der OvGU Magdeburg durchgeführt.

Tabelle 4 zeigt einen Auszug aus der Massenbilanz der Wirbelschichtversuche, die erkennen lässt, dass sich die im Zyklon abgeschiedene Staubmenge mit der Erhöhung der Presskanallänge (Matrizendicke) verringert. Bei größerer Matrizendicke scheint daher die Stabilität der Pellets höher zu sein.

Um das Ergebnis der Massenbilanzierung besser beurteilen zu können, wurde die Partikelgröße der Maispellets vor und nach der Trocknung analysiert und die Verteilungsspektren ausgewertet (Messsystem CAMSIZER, Fa. Retsch).

In Abbildung 17 ist die Partikelgrößenverteilung der Maispellets vor und nach der Wirbelschichttrocknung für verschiedene Matrizendicken dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass es zu einer deutlichen Veränderung der Partikelgröße infolge der Beanspruchung in der Wirbelschichtanlage kommt. Die Partikel werden kleiner. Die Aussage, dass mit Erhöhung der Presskanallänge die Stabilität der Maispellets größer wird, konnte aber bestätigt werden.

Tabelle 4: Auszug aus der Massenbilanz von Wirbelschichtversuchen zur Charakterisierung von Partikelfestigkeit und -stabilität in Abhängigkeit der Presskanallänge (Matrizendicke), Material Maisschlempe, Trocknungsfluid Luft

Matrizendicke [mm]	Trockneraustrag gesamt [g]	Austrag Zyklon [g]	Austrag Zyklon [%]
20	1413,5	43,5	3,0
35	1397,8	40,8	2,9
50	1310,9	18,9	1,4

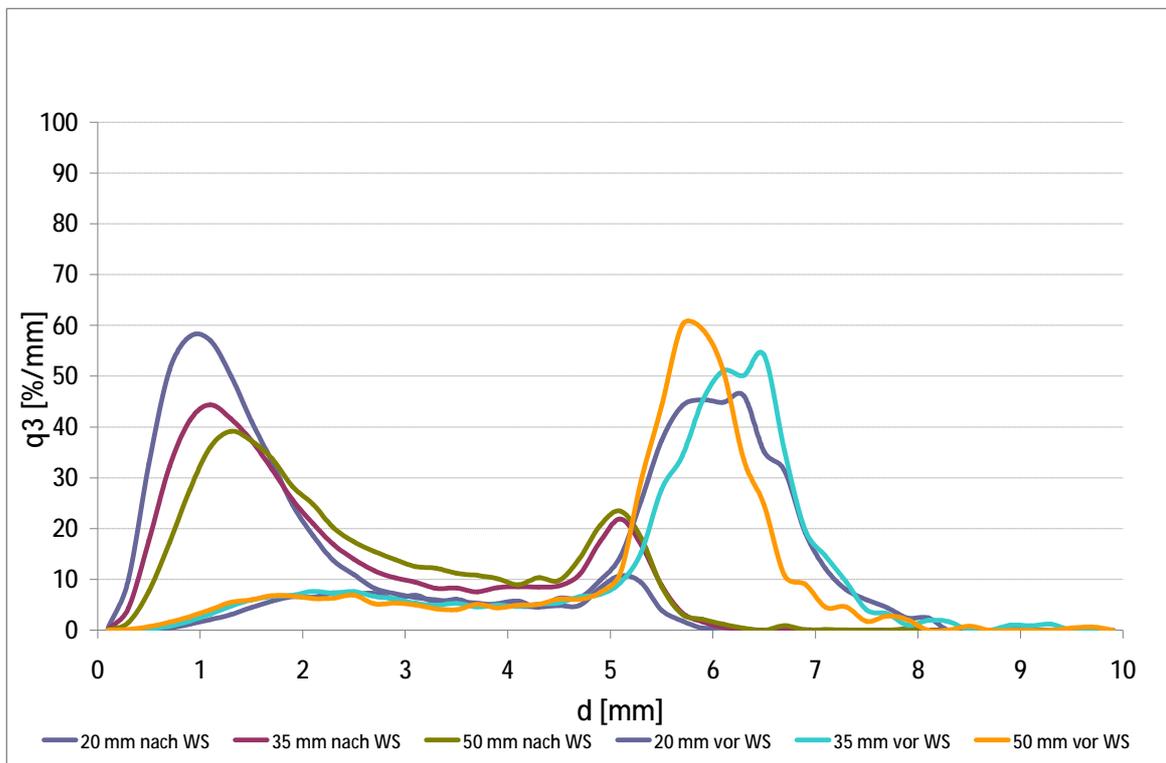


Abbildung 17: Verteilungsdichte (q_3) der Maispellets (Anhang A1) vor und nach der Wirbelschichttrocknung (WS), Matrizendicke 20, 35 und 50 mm

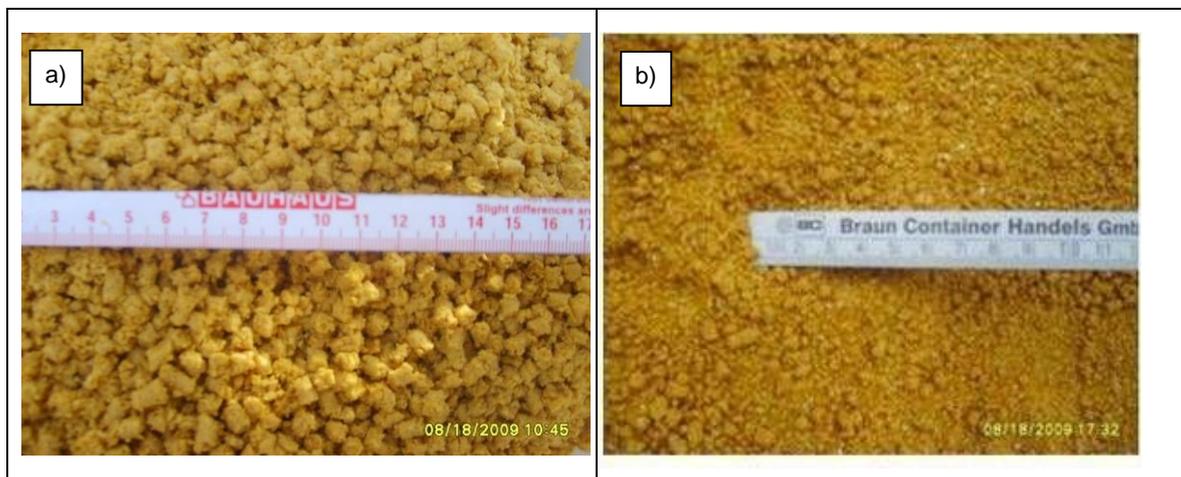


Abbildung 18: Maispellets (Anhang A1) erzeugt mit einer Labor-Pelletpresse a) vor der Wirbelschichttrocknung und b) nach der Wirbelschichttrocknung (Trocknungsmedium Luft, Matrizendicke 20 mm)

Ein Vergleich der Bilder 18a und 18b lässt auch visuell den Feinanteil erkennen, der unter bestimmten Bedingungen durch Abrieb oder Zerstörung während der Wirbelschichttrocknungsversuche entstanden ist.

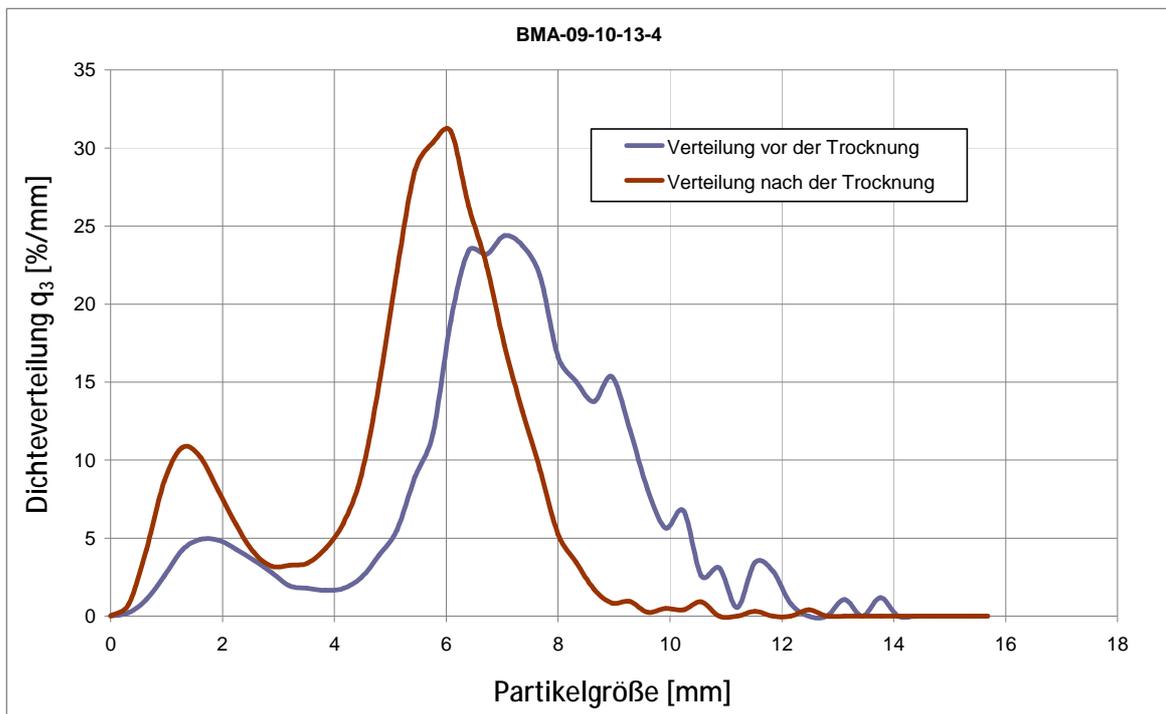


Abbildung 19: Verteilungsdichte (q_3) der Maispellets vor und nach der Wirbelschichttrocknung, Herstellungsverfahren Extruder (Fleischwolf), Bohrungsdurchmesser der Matrize 5 mm

Extrudierte Produkte

Vergleichende Trocknungsversuche mit Maisschlempe (Anhang A1), die mit Hilfe von Schnecken durch Lochscheiben gepresst und dadurch verdichtet und zu einzelnen Strängen geformt wurde, zeigten eine höhere Festigkeit gegenüber den Formkörpern, die mittels Kollermühle konditioniert wurden.

In Abbildung 19 ist die Partikelgrößenverteilung der Maispellets, die von einem Extruder erzeugt wurden vor und nach der Wirbelschichttrocknung dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass es bei diesen Formkörpern zu einer deutlich geringeren Veränderung der Partikelgröße infolge der Beanspruchung in der Wirbelschichtanlage kommt (Vergleich mit Abbildung 17). Die Partikel sind stabiler und überstehen den Prozess der Wirbelschichttrocknung mit geringerer Veränderung.

Die gefundenen Unterschiede in den erzielten Partikelfestigkeiten in Abhängigkeit der Herstellungsverfahren führten zu weiterführenden Untersuchungen, die das Ziel verfolgten, die Mechanismen der Strukturausbildung im Formkörper in Verbindung mit der mechanischen Stabilität der Partikel zu untersuchen, um so gezielt auf die Festigkeit der Pellets Einfluss nehmen zu können.

2.3.2 Mechanismen der Strukturbildung

Unter Berücksichtigung der realen Prozessbedingungen wurden im Labormaßstab aus Maisschlempe (Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe) Presslinge in Platten- und Strangform erzeugt und anschließend getrocknet. Zur Charakterisierung der Struktur der Presslinge wurde die Rasterelektronenmikroskopie (REM) und die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie (CLSM) eingesetzt. Während die REM-Aufnahmen geeignet sind, die Oberflächenstrukturen sehr detailliert abzubilden, ermöglicht die CLSM die Bestimmung der lokalen Verteilung einzelner Substanzen in der Probe.

Mit Hilfe der REM-Aufnahmen (Abbildung 20) konnte der heterogene Aufbau der Presslinge (Oberfläche und Querschnitt) deutlich sichtbar gemacht werden.

Zwischen den größeren Schalenbestandteilen konnte eine Substanz lokalisiert werden, die sich aus einem fließfähigen Zustand zu tropfenähnlichen Gebilden verfestigt hatte und vermutlich für den Zusammenhalt der einzelnen Partikel verantwortlich ist.

Zur weiteren Untersuchung der Materialstruktur wurde ein getrockneter Pressling mit dem Farbstoff Rhodamin R angefärbt und im Mikroskop mit einem Argon-Laser angeregt. Mit Hilfe der konfokalen Laser-Scanning-Mikroskopie (CLSM) konnten die in der Matrix verteilten tropfenförmigen Strukturen als Proteine identifiziert werden, da die Materialstrukturen auf den Mikroskopiebildern in roter Farbe erschienen. Es ist davon auszugehen, dass der Zusammenhalt der Kruste, insbesondere zwischen den groben Bestandteilen durch das Protein hervorgerufen wurde.

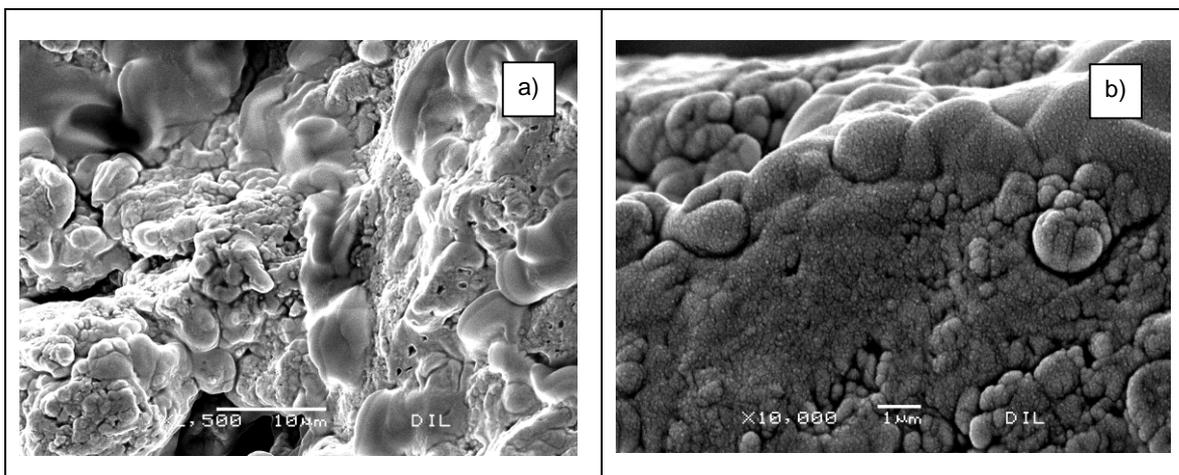


Abbildung 20: REM-Aufnahmen der Oberfläche a) und der Bruchfläche b) eines Presslings aus Maisschlempe (Anhang A1), Balkenlänge a) 10 µm und b) 1 µm)

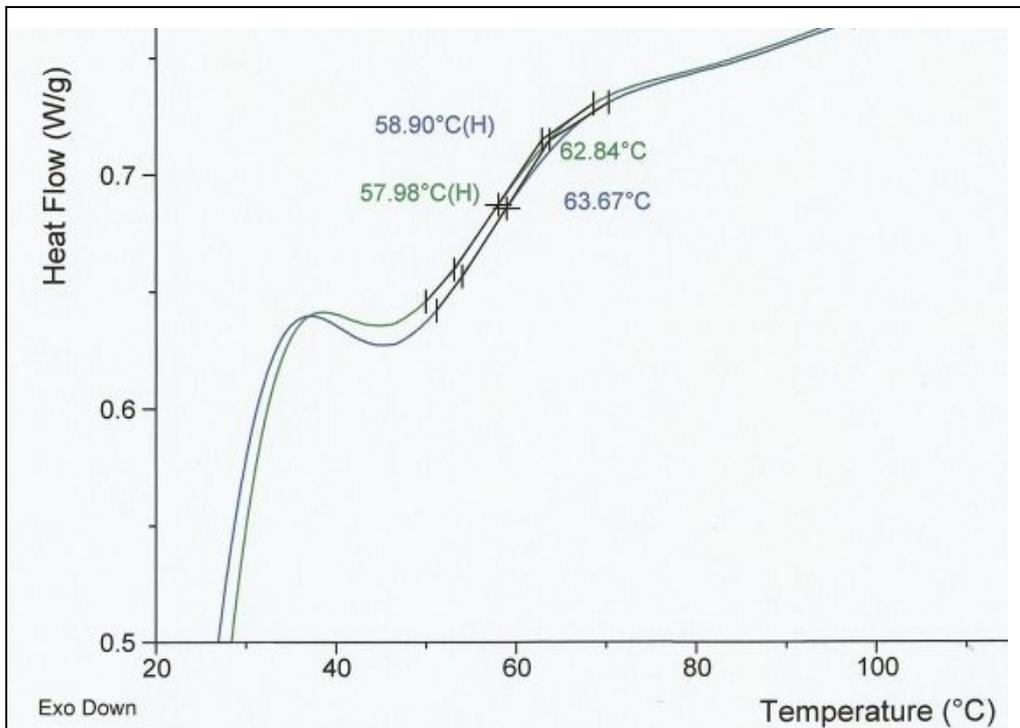


Abbildung 21: DSC-Kurve zur Messung der Glasübergangstemperatur an getrockneten Maisschlempepresslingen (Anhang A1)

Um den Erstarrungsprozess der Proteinstruktur besser beschreiben zu können, wurde von der Kruste der erzeugten Presslinge zusätzlich zu den bildgebenden Verfahren auch die Glasübergangstemperatur mittels DSC (Differential Scanning Calorimetry) bestimmt. Die Glasübergangstemperatur gibt Auskunft darüber, bei welcher Temperatur der Erstarrungsprozess einsetzt bzw. wann die amorph-erstarnten Strukturen von ihrem festen Glaszustand in einen gummiartigen-plastischen Zustand übergehen. Hierzu wurde eine kleine Menge der Probe im DSC-Messgerät mit einer konstanten Temperaturrampe erwärmt und der dafür benötigte Energieverbrauch gemessen. Der Glasübergang ist in der Kurve als Wendepunkt zu erkennen. In Abbildung 21 ist eine DSC-Messung eines Maisschlempepresslings abgebildet.

Als charakteristischer Parameter konnte für den Übergangsbereich der Maisschlempepresslinge eine Temperatur von ca. 60 °C bestimmt werden. Das bedeutet, dass das Vorhandensein einer glasartig erstarrten Substanz durch das Ergebnis der DSC-Messung bestätigt werden konnte.

2.3.3 Beurteilung der Festigkeit

Zur Beurteilung der mechanischen Festigkeit wurden die im Labormaßstab hergestellten Presslinge ($d = 5 \text{ mm}$) aus Maisschlempe einer Texturanalyse unterzogen (Texture Analyzer TA-XT2, Fa. Stable Micro Systems, UK). Hierzu wurden jeweils ein einzelnes Materialstücke von einem Prüfkörper mit keilförmiger Unterseite durchtrennt (3-Punkt-Biegevorrichtung). Während der Prüfkörper den Strang durchtrennt, wird der Kraftverlauf gemessen. Zur Veranschaulichung ist das Messverfahren in Abbildung 22 dargestellt.

Zur Bewertung der mechanischen Festigkeit eines Formkörpers wurde das Maximum im Kraftverlauf auf die Querschnittsfläche der Materialprobe bezogen und die Bruchspannung berechnet. Durch diese Vorgehensweise konnte der Einfluss der Prozessbedingungen bei der Formgebung und nach der Formgebung auf die Stabilität der Formkörper beurteilt werden.

Es wurde gefunden, dass die erreichte Festigkeit der Presslinge nach der Formgebung maßgeblich vom Trockensubstanzgehalt der Mischung, von der Zusammensetzung der Mischung und von der Temperatur bei der Formgebung abhängig ist. Erst ein Temperaturbereich von ca. $90 \text{ °C} < T < 125 \text{ °C}$ erzeugt Formkörper, die nach der Formgebung in der Lage sind, ihre mechanische Festigkeit zu erhöhen. Zu einem Anstieg der Festigkeit kommt es aber nur, wenn die Temperatur der Presslinge nach der Formgebung unter die Glasübergangstemperatur (60 °C) absinken kann und wenn es zu einem Antrocknen der Oberfläche kommt.

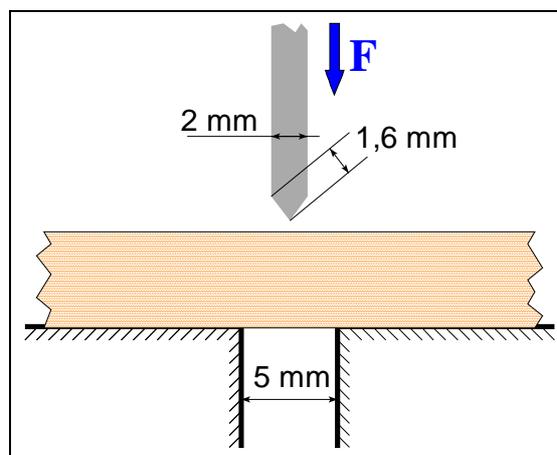


Abbildung 22: Vorrichtung zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften der Formkörper nach dem Ausformen

Die Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Maisschlempepresslinge (Anhang A1) in Abhängigkeit von der Zeit nach der Ausformung ist in Abbildung 23 dargestellt. Für alle Ausformtemperaturen ist ein Anstieg der Bruchspannung mit zunehmender Zeit nach der Ausformung zu erkennen, der auf eine Verfestigung der Stränge durch Krustenbildung hinweist.

Um den Einfluss der Dampfatosphäre auf die Festigkeit der Formkörper zu untersuchen, wurden Maisschlempepresslinge nach der Herstellung für eine definierte Zeit von 3 Minuten bei Raumtemperatur gelagert und anschließend in eine Dampfatosphäre verbracht. Die Auswirkung der Lagerung der Presslinge in der Dampfatosphäre auf deren Festigkeit wird in Abbildung 24 gezeigt.

Mit zunehmender Dauer des Aufenthalts der Formkörper in der Dampfatosphäre nimmt die Festigkeit ab. Das heißt, die Presslinge werden weicher. Dabei ist eine deutliche Reduzierung der Festigkeit innerhalb der ersten Minute zu verzeichnen und ein annäherndes Gleichgewicht schon nach 3 bis 5 min.

Die im Labormaßstab erhaltenen Ergebnisse zur Beeinflussung der mechanischen Stabilität von pressagglomerierten Formkörpern wurden in Technikumsversuchen an Mais- und Weizenschlempen überprüft.

Das Probenmaterial wurde direkt nach der Formgebung und nach Durchlaufen verschiedener Verfahrensschritte einer Texturanalyse zur Bestimmung der Bruchspannung unterzogen.

Die im Labormaßstab gefundenen Ergebnisse konnten bei diesen Versuchen bestätigt werden. Für das Ausbilden strukturbestimmender Komponenten ist eine Prozesstemperatur bei der Formgebung von größer 90 °C notwendig. Mit Verlängerung der Auskühlzeit (Ausbrüden) erhöht sich die mechanischen Stabilität der Presslinge und mit Eintritt in eine Dampfatosphäre nimmt die Festigkeit der Presslinge wieder ab. Unter realen Bedingungen in der druckaufgeladenen DampfWirbelschicht tritt eine vergleichbare Dampfeinwirkung auf Formkörper nur während der Kondensationsphase auf, die unter einer Minute liegt.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Texturanalyse als Methode zur Charakterisierung der Pelletfestigkeit geeignet ist und für weitere vergleichende Untersuchungen zur Anwendung kommen kann.

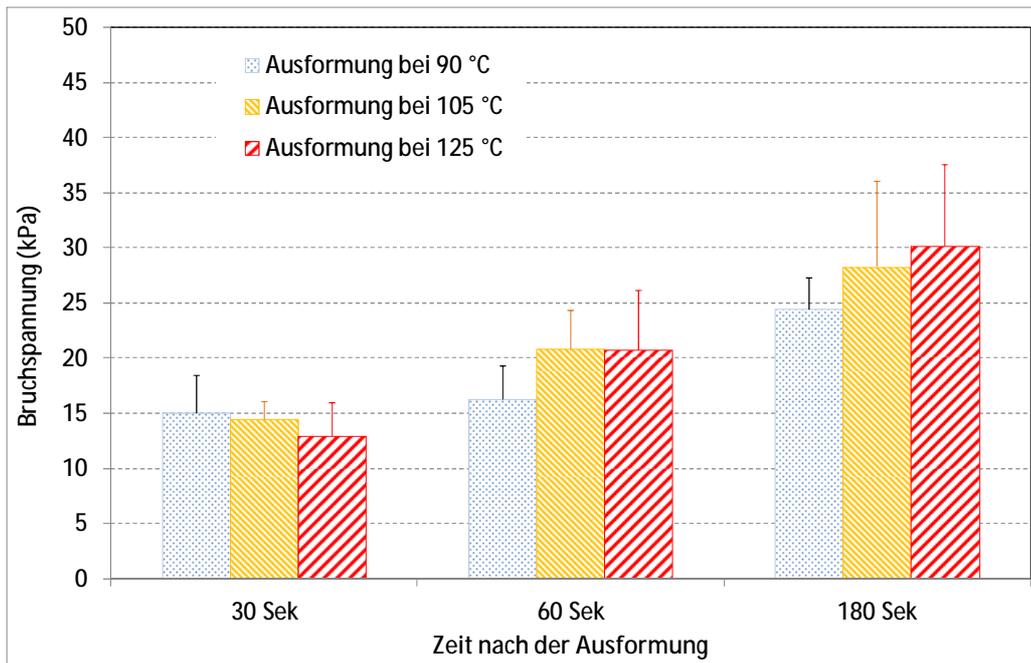


Abbildung 23: Maximale Bruchspannung von Maisschlempesträngen ($d = 5 \text{ mm}$) mit einem Ausgangstrockensubstanzgehalt von 53 %, die bei verschiedenen Manteltemperaturen des Formzylinders ausgeformt wurden, in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Ausformen

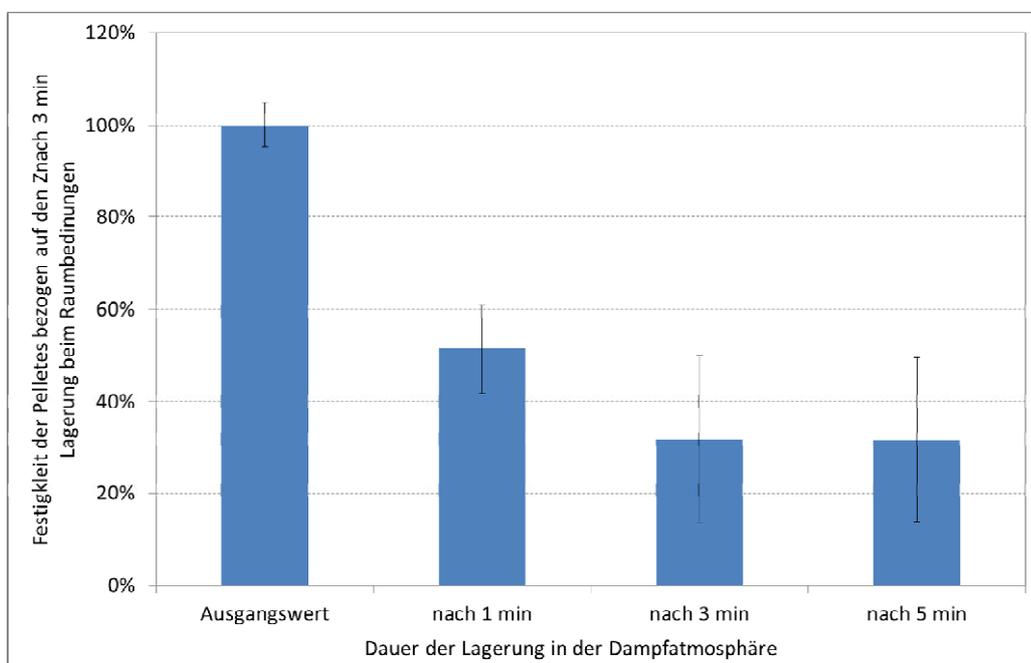


Abbildung 24: Mittlere relative Festigkeit der Maisschlempepresslinge (Anhang A1) nach Eintritt in die Dampfatosphäre, bezogen auf die Festigkeit vor dem Eintritt in die Dampfphase (Ausgangswert)

2.4 Bewertung der Formgebungsverfahren

Für die Trocknung nachwachsender Rohstoffe in einer Wirbelschicht, die mit überhitztem Wasserdampf und unter Überdruck betrieben wird, macht es sich erforderlich, die biologischen Produkte vor der Trocknung zu konditionieren, d. h. bei definiertem Wassergehalt in eine gewünschte Form zu überführen. Für diese Aufgabe stehen aus technischer Sicht eine Reihe von Apparaten zur Verfügung, von denen im Forschungsvorhaben verschiedene Möglichkeiten untersucht wurden.

Ausgehend von einer einfachen Zerkleinerung durch Mühlen oder Schneidwerkzeuge wurden in umfangreichen experimentellen Untersuchungen das Pelletieren, das Granulieren und das Extrudieren zur Herstellung formstabiler Partikel getestet.

Der Einsatz der Pelletpresse (Kollermühle Fa. KAHL) lieferte von den untersuchten Materialien nur für Produkte aus der Gruppe der Getreideschlempen Formkörper, die sich in der dampfbetriebenen Wirbelschicht fluidisieren lassen. Voraussetzung für das Pelletieren mit der Kollermühle ist die Einstellung eines bestimmten produktspezifischen Trockensubstanzgehaltes. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die Formkörper, die mit der Kollermühle erzeugt wurden, im Vergleich mit den Formkörpern der getesteten Extrudierverfahren nicht so formstabil waren.

Für Bagasse, die eine Faserstruktur besitzt, eignet sich die Kollermühle nicht zur Formgebung. Eine Zerkleinerung der Bagasse konnte jedoch erfolgreich nachgewiesen werden.

Hervorzuheben ist, dass Pelletierungsverfahren in verschiedenen Industriebereichen eingesetzt werden und dass bei vielen dieser Verfahren eine nachträgliche Trocknung der Pellets erforderlich ist. Hier bieten sich noch eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten für das in der vorliegenden Arbeit untersuchte Verfahren der Wirbelschichtbehandlung mit überhitztem Wasserdampf an. Einige Beispiele dafür sind in der Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Industriezweige mit Pelletierung

Industrie	Verwendungsmöglichkeiten
Brauereien	Pelletierung von getrocknetem Biertreber, Einsatz als Futtermittel
Bergwerke	Pelletierung von Feinkohle zur Verbrennung oder Vergasung
Chemische Werke	Pelletierung von Farbgrundstoffen, Katalysatoren, Grundstoffe für die Kunststoffindustrie, Mineralstoffen, Filterstäuben, Silicatmehlen in der Glasgewinnung, synthetischem Gips, Waschmitteln, Zellstoffabfällen
Metallhütten	Pelletierung von Eisenpulver, Anodenschlamm bei der Kupfergewinnung
Futtermittelindustrie	Pelletierung von Mischfutter und Rohkomponenten
Kohlekraftwerk	Pelletierung von Rauchgasgips und Flugstaub
Kunststoffindustrie	Pelletierung von Kunststoffabfällen für eine Regranulation, dabei Vermischung mit Trägerstoffen, z. B. Papier, möglich
Landwirtschaft	Pelletierung von getrockneter Luzerne, Gras, Stroh, Olivenpülpe, Obsttrester; Pelletieren von Humus aus Rinderdung
Nahrungsmittelwerke	Pelletierung von Kaffeemehl, Teemehl, Hefe, Instantprodukten
Müllbeseitigungsanlage	Pelletierung von Müll als Brennstoff und zur Kompostierung; Pelletierung von Abfallpapier als Brennstoff, dabei Vermischung mit Kohlenstaub und anderen brennbaren Abfallprodukten möglich
Pharmazeutische Industrie	Pelletierung von Tablettenmasse zur Verdichtung; Pelletierung von organischen Heilmitteln, z. B. Tee
Holzindustrie	Pelletierung von Sägemehl, Hobelspänen, Holzabfällen als Brennstoff
Zuckerindustrie	Pelletierung von Rückständen der Zuckerherstellung = Trockenschnitzel, Bagasse, Kalkschlamm (CaCO_3)
Abfälle aus verschiedenen Industrien	Pelletierung von Teppichresten, Nichtmetallteilchen aus Autoverschrottung, Gummiresten, beschichteten Kunststoffresten

Das Granulieren mit dem Tellergranulator eignet sich in erster Linie für solche Produkte, bei denen relativ klebrige feine Teilchen in Verbindung mit einer aufzusprühenden Flüssigkeit zu größeren runden Agglomeraten geformt werden können. Die Anwendung des Granulierverfahrens führte außer bei Treber und Bagasse zu verwertbaren Formkörpern. Auch bei diesem Verfahren zeigte sich, dass ähnliche Produkte aufgrund ihrer produktspezifischen Zusammensetzung und Beschaffenheit unterschiedliche Formkörper mit unterschiedlichen Eigenschaften hervorbringen können.

Ob das Granulieren großtechnisch als Formgebungsprozess zur Anwendung kommen kann, muss durch weitere Untersuchungen über den Technikumsmaßstab hinaus geklärt werden.

Das Extrudieren wurde mit Einwellenextrudern, gleichläufigen Doppelwellenextrudern und gegenläufigen Doppelwellenextrudern bei verschiedenen Extruderherstellern getestet. Im Vergleich mit dem Extruder der Fa. KAHL wiesen alle getesteten Maschinen keinen entscheidenden Vorteil auf. Während gegenläufige Doppelschneckenextruder durch ihre zusätzliche Misch- und Knetwirkung die Konsistenz der Schlempemischung vor dem Durchtritt durch die Matrize verbessern, trat bei gleichläufigen Doppelwellenextrudern ein teilweise günstigeres Einzugsverhalten der Mischung auf. Die Qualität der Formkörper, d. h. deren Stabilität und Agglomerationsneigung nach dem Ausformen, wurde ebenso wie in den Versuchen mit dem KAHL-Extruder von der Gestaltung der Matrize bestimmt. Größere Presskanallängen und geringere Öffnungsverhältnisse führten hier generell zu vergleichsweise stabileren Presslingen. Damit verbunden waren allerdings eine überproportionale Erhöhungen des spezifischen Energieeintrags, dessen Wert die für den KAHL-Extruder deutlich überschritten. Hinzu kommt, dass im Vergleich zum KAHL-Extruder alle weiteren untersuchten Extruder für deutlich niedrigere Durchsatzleistung vorgesehen sind als für den Einsatz bei der Aufbereitung von Produkten aus der Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen gewöhnlich gefordert wird.

Neben dem Fördern und Kompaktieren des Gutes erfolgt in Schneckenextrudern in Abhängigkeit der Schneckengeometrie darüber hinaus auch ein Vermischen und Zerkleinern von Partikeln. Insofern bieten sie gegenüber Kollermühlen, die durch Walzenbewegung verdichten und zerkleinern, größere Möglichkeiten den Pressagglomerationsprozess an die Erfordernisse des jeweiligen Gutes anzupassen.

Allen Formgebungstechniken gemeinsam ist das sehr enge Fenster der stofflichen und granulometrischen Anforderungen an die zu verarbeitenden Materialien. Eine Mischung aus Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe darf bezüglich ihrer wesentlichen Eigenschaften (Konsistenz als Summenparameter und Trockensubstanzgehalt als Beispiel für einen Einzelparameter) nur wenig vom jeweiligen Optimum abweichen, um Agglomerate der geforderten Qualität zu erzeugen.

In Tabelle 6 sind Vor- und Nachteile der untersuchten Apparate für die Konditionierung nachwachsender Rohstoffe zusammengestellt. Die Angaben in der Tabelle orientieren sich an den Ergebnissen der durchgeführten Versuche und erlauben nur eine vergleichende Einschätzung der getesteten Apparate, da die Wirkungsweise im starken Maße von den spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Gutes abhängig ist.

Tabelle 6: Übersicht über verschiedene Formgebungsapparate für die Konditionierung nachwachsender Rohstoffe

Formgebungsapparat	Formkörper	Energieverbrauch relativ	Sphärizität der Formkörper	Stabilität der Formkörper
Extruder (Fleischwolf)	längliche Extrudate	hoch	niedrig	hoch
Pelletpresse (Kollergang nach KAHL)	Pellets	hoch bis sehr hoch	niedrig	mittel
Tellergranulator	Kugeln	niedrig	hoch	mittel bis gering
Diverse Mühlen	feinkörnige Pulver	hoch	mittel bis niedrig	mittel

2.5 Untersuchungen zur thermischen Belastbarkeit

Das Trocknungsgut erfährt durch die Behandlung in heißer Dampfatosphäre eine thermische Belastung, die sich einerseits direkt durch Verfärbung beobachten lässt andererseits durch thermische Zersetzungsreaktionen (z.B. Pyrolyse) zu Masseverlust führt.

2.5.1 Reaktionsverhalten von Inhaltsstoffen

Naumann [4] untersuchte die Pyrolyseerscheinung von verschiedenen Biomassen in Inertgas- und Dampfatosphäre in Abhängigkeit von der Temperatur. Dabei stellte sich heraus, dass die thermische Zersetzung von Inhaltsstoffen der untersuchten Biomassen in verschiedenen Temperaturbereichen erfolgt:

- bis 140 °C beginnt der Protein- und Fettabbau (und setzt sich bis über 500 °C fort),
- von 140 °C bis 230 °C dominiert die Zersetzung von Kohlenhydraten,
- von 230 °C bis 300 °C kommt die Zersetzung von Hemicellulose hinzu,
- von 300 °C bis 330 °C wird Cellulose weiter zersetzt,
- oberhalb von 400 °C beginnt die Pyrolyse von Lignin.

Als ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Dampfatosphäre gegenüber einer Inertgasatosphäre keinen merklichen Einfluss auf die Zersetzungsreaktion der Biomassen hat.

Entsprechend der unterschiedlichen Zusammensetzung der verschiedenen Biomassen, die untersucht wurden ergeben sich deutliche Unterschiede im Pyrolyseverhalten der Materialien:

- Maisschlempe zeigt großen Masseverlust durch Pyrolyse schon bei Temperaturen unter 140 °C (großer Protein- und Fettanteil)
- Weizenschlempe ist aufgrund des geringeren Fettgehaltes im unteren Temperaturbereich deutlich thermisch stabiler als Maisschlempe. Erst bei Temperaturen oberhalb von 230 °C kommt es zu größerem Massenverlust durch den thermischen Abbau von Hemicellulose
- Bagasse ist in der thermischen Belastbarkeit gleichzusetzen mit Holz (Buche, Kiefer), wobei das Pyrolysemaximum durch den hohen Anteil an Cellulose und Lignin erst oberhalb von 300 °C zu finden ist.

In der Trocknungsanlage mit überhitztem Wasserdampf herrschen Dampftemperaturen teilweise über 200 °C, die Partikeltemperaturen werden jedoch durch die Verdampfungstemperatur bestimmt, die ihrerseits dicht bei der Wasserdampf-Sattdampftemperatur unter dem herrschenden Systemdruck liegt (z.B. 144 °C bei 4 bar Systemdruck). Somit liegt in der Bewertung der Massenverluste durch Pyrolyse die Zersetzung von Fetten im Fokus der hier untersuchten industriellen Anwendung.

Unter den von Naumann [4] durchgeführten Versuchsbedingungen konnte ein Massenverlust bei 150 °C Einwirkungstemperatur und 100 Minuten Einwirkungszeit bei Maisschlempe in Höhe von ca. 4 %, bei Weizenschlempe in Höhe von ca. 2 % und bei Bagasse in Höhe von ca. 0,5 % gemessen werden.

2.5.2 Farbliche Veränderung der Partikel

Schon bei deutlich kürzerer Einwirkungszeit und niedrigerer Einwirkungstemperatur als in der vorstehenden Untersuchung angewendet konnten erhebliche Farbveränderungen am Trocknungsgut beobachtet werden. Die Farbe des Endproduktes ist ein Qualitätskriterium, das bei der Verwendung für Futtermittel herangezogen wird: eine helle Farbe wird als geringe thermische Belastung und damit eine gute Futtermittelqualität interpretiert.

Weizenschlempen zeigen schon bei Temperaturen unter 100 °C eine Farbveränderung von gelb über braun nach dunkelbraun. Diese deutliche Farbvertiefung konnte von Titscher [5] der Maillard-Reaktion zugeordnet werden, da es eine deutliche Korrelation der Farbvertiefung zum Anfangswassergehalt gibt. Auch in Inertgasatmosphäre erfolgte derselbe Grad an Farbvertiefung, so dass die chemische Umsetzungsreaktion unter Bildung von Bräunungsprodukten aus Invertzucker und Aminosäuren als dominierend bezeichnet werden konnte.

Aus der visuellen Beurteilung der in der nachstehend beschriebenen Versuchsanlage getrockneten Partikel (Maisschlempe, Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais, Weizenschlempe) (siehe Kapitel zu Trocknungsversuchen: Abbildungen 37, 40, 43) lässt sich ableiten, dass eine deutliche Verfärbung bei einem Systemdruck von 3 bar abs. und höher auftritt oder entsprechend bei einer Dampftemperatur von 180 °C und höher. Die Verfärbung tritt auch schon bei einer Trocknungszeit von 2 Minuten auf.

Weiterhin geht aus den Untersuchungen klar hervor, dass die Rückbefeuchtung von getrocknetem Material und eine erneute Trocknung eine zusätzliche Farbvertiefung ergibt. Eine Rückbefeuchtung, die in der industriellen Anwendung bei einer Rückführung von getrocknetem Material ("Add-back") zur Mischung mit frischem Material und anschließender Formgebung erfolgt, verschlechtert somit die Qualität des Endproduktes.

2.6 Fluidisierungsverhalten konditionierter Partikel

Um die erforderlichen Fluidisierungsparameter für die erzeugten Formkörper zu bestimmen, musste zunächst der theoretische Existenzbereich einer Wirbelschicht unter den gewählten Prozessbedingungen ermittelt werden.

Es bestand dabei die Schwierigkeit, für die zu bauende Versuchsanlage diesen Existenzbereich für die dort angestrebten Prozessbedingungen vor auszuberechnen und möglichst durch experimentelle Untersuchungen zu bestätigen.

Während an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg vorhandenen Versuchsanlage sowohl das Fluidisierungsmedium (Luft oder Wasserdampf) als auch der in Frage kommende Temperaturbereich experimentell realisiert werden konnten, war an dieser Anlage eine Fahrweise unter Überdruck nicht möglich. Da sich aber mit den Prozessparametern Temperatur und Druck auch die Stoffwerte des Fluidisierungsmediums ändern, war es notwendig, den Einfluss dieser Parameter theoretisch darzustellen.

Zunächst wurde der Existenzbereich der Wirbelschicht in Abhängigkeit der verschiedenen Fluidisierungsmedien (Luft, Wasserdampf) und der verschiedenen Prozessbedingungen (Normaldruck, Überdruck) berechnet.

Eine Wirbelschicht aus Partikeln mit einer Partikeldichte von 1.200 kg/m^3 und einem Partikeldurchmesser zwischen 1 und 10 mm benötigt gemäß der Berechnung zur Fluidisierung mit Wasserdampf bei 5 bar abs. und $200 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Fluidgeschwindigkeit von mindestens $1,33 \text{ m/s}$ und höchstens $3,39 \text{ m/s}$.

Um die Fahrweisen der Versuchsanlage mit Luft und Dampf bei Normaldruck und mit Dampf bei Überdruck miteinander vergleichen zu können, wurde ein Fluidisierungszustand definiert bei dem das relative Lückenvolumen der Wirbelschicht jeweils 0,65 beträgt.

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung sind in Abbildung 25 dargestellt. Aus dem Diagramm ist abzulesen, dass bei unterschiedlichen Fluidisierungsmedien und Prozessdrücken der spezifische Fluidmassenstrom unter gleichen Fluidisierungsbedingungen (konstantes relatives Lückenvolumen) mit den durchgeführten theoretischen Überlegungen abschätzbar wird.

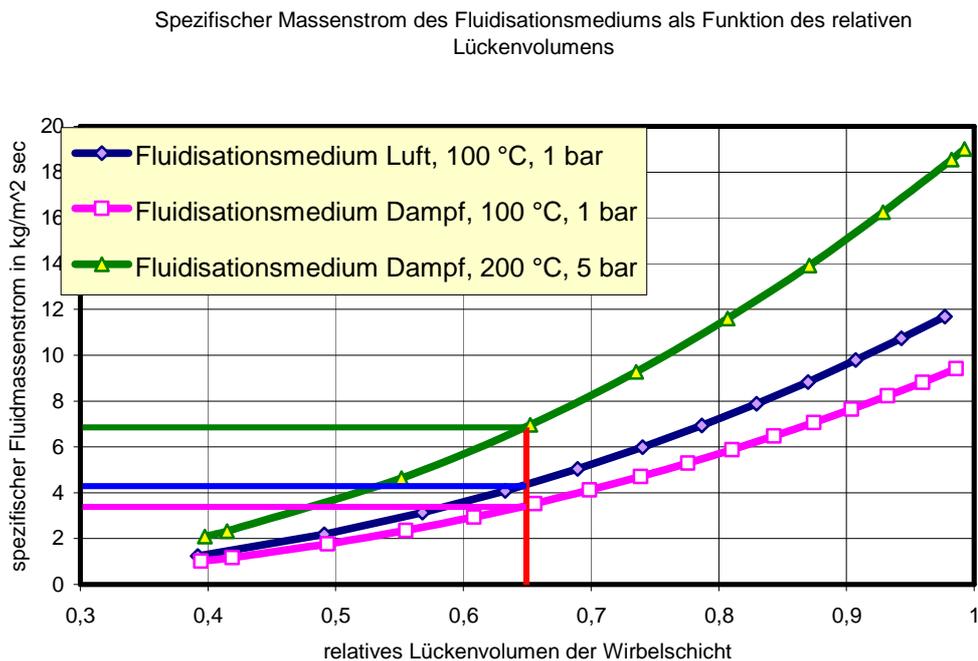


Abbildung 25: Spezifischer Massenstrom des Fluidisationsmediums als Funktion des relativen Lückenvolumens

Mit Hilfe des theoretischen Modells ist man in der Lage, den Existenzbereich der Wirbelschicht in Abhängigkeit von Partikeleigenschaften, Fluidisierungsmedium und der Temperatur zu berechnen, sowie die Aussagen auf andere Druckbereiche zu übertragen.

Die Ergebnisse aus der Modellierung konnten für Luft und Wasserdampf unter atmosphärischen Druckverhältnissen mit der Versuchsanlage der OvGU in Magdeburg überprüft und bestätigt werden. Sie bildeten die Grundlage für die Definition der technologischen Parameter der bei BMA in Braunschweig errichteten Versuchsanlage.

3 Planung, Bau und Aufstellung der Versuchsanlage

Auf der Grundlage des entwickelten Anlagenkonzeptes und der ermittelten verfahrenstechnischen Parameter aus der ersten Projektphase wurden die einzelnen Komponenten der Versuchsanlage in der zweiten Phase des Projektes beschafft bzw. konstruiert und gefertigt und im BMA Technikum in Braunschweig aufgebaut. Nach der funktionstechnischen Überprüfung aller Komponenten wurde die errichtete Versuchsanlage in Betrieb genommen. Die Gesamtanlage erhielt am 06.02.2012 mit der Prüfbescheinigung des TÜV Nord die Betriebserlaubnis.



Abbildung 26: Versuchsanlage im BMA Technikum zur Wirbelschichttrocknung mit überhitztem Wasserdampf

Die Umsetzung der besonderen Prozessanforderungen (Betriebsüberdruck bis 4,5 bar, Temperatur bis 210 °C und Fluidgeschwindigkeit bis 8 m/s) in eine funktionsfähige Anlage erforderte einen hohen Planungs- und Errichtungsaufwand.

Mit der Inbetriebnahme der Versuchsanlage wurde es erstmals möglich unter praxisrelevanten Prozessbedingungen die Fluidisierungscharakteristik und die Trocknungskinetik verschiedener nachwachsender Rohstoffe in einer druckaufgeladenen Wirbelschicht, die mit überhitztem Wasserdampf arbeitet, zu untersuchen.

3.1 Hauptkomponenten

Die Versuchsanlage mit einer Wirbelschicht von 200 mm Durchmesser arbeitet chargenweise und besteht aus mehreren Bauteilen, die in einer Stahlträgerkonstruktion aufgehängt sind. Mit angepassten Bühnen werden eine gute Zugänglichkeit und ein hohes Maß an Betriebs- und Bedienungssicherheit an der ca. 5 m hohen Anlage erreicht (Abbildung 26).

Abbildung 27 zeigt das Verfahrensprinzip mit den schematisch dargestellten Hauptkomponenten. Die Pfeile in der Abbildung verdeutlichen den Weg des im Kreislauf geführten überhitzten Wasserdampfes, der zur Fluidisierung des zu trocknenden Gutes und gleichzeitig zur Trocknung eingesetzt wird.

Die Zuführung des Trocknungsgutes in den druckbeaufschlagten Trocknungsraum erfolgt von oben durch eine Produkteintragsschleuse **j**, die aus zwei übereinander angeordneten, wechselweise öffnenden Schiebern besteht.

Durch einen Druckluftstoß fällt das Trocknungsgut aus der Eintragsschleuse in den Prozessraum, der durch den Siebboden **m** nach unten begrenzt ist. Dabei erfolgt die Fluidisierung des Trocknungsgutes im nach oben strömenden Dampf.

Die in der Wirbelschicht **l** entstehenden und mit dem Dampfstrom abgeführten Staubpartikel werden in einem Zyklon **o** abgeschieden. Der gereinigte Dampf verbleibt im Dampfkreislauf und wird vom Dampfventilator **q** durch den elektrischen Überhitzer **r** zum Siebboden **m** zurückgeführt. Die im Zyklon **o** abgeschiedenen Staubpartikel werden über die Staubaustragsschleuse **p** entnommen.

Die Abführung des Trocknungsgutes aus dem Trocknungsraum erfolgt nach unten durch die Produktaustragsschleuse **n**, wobei zuvor der in einen 2-Loch-Flachschieber eingelassene Siebboden **m** zur Seite gezogen wird.

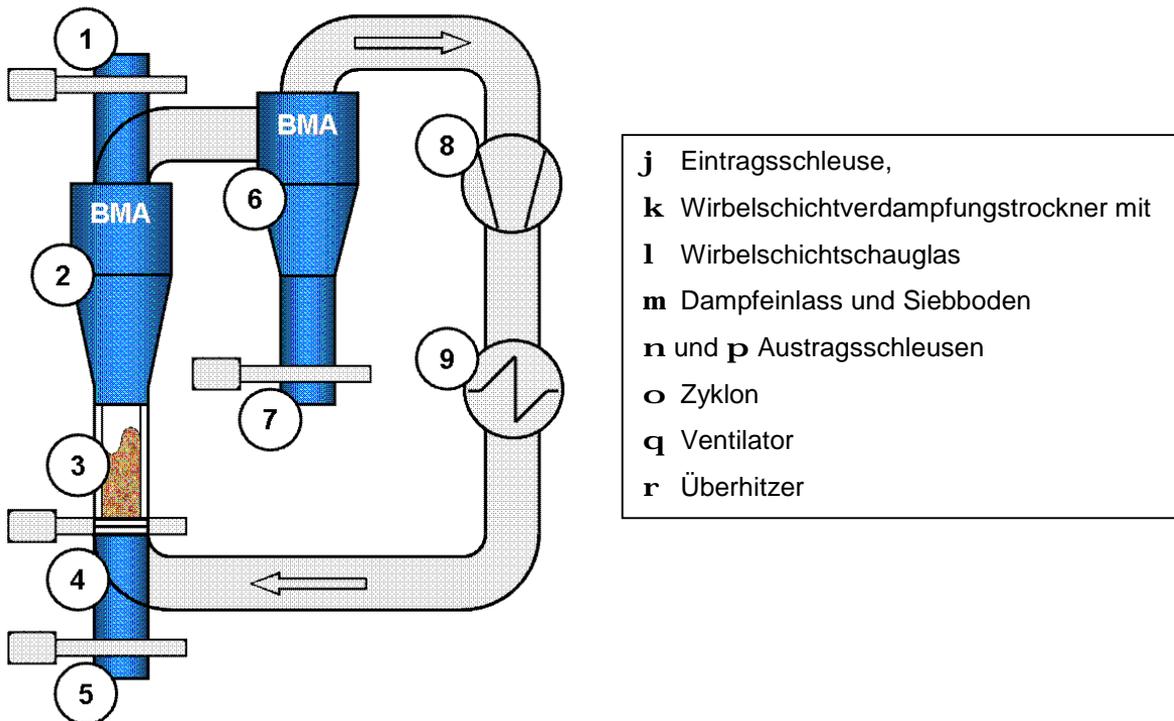


Abbildung 27: Hauptkomponenten der BMA-Wirbelschichtversuchsanlage zur Verdeutlichung des Trocknungsverfahrens mit überhitztem Wasserdampf im Überdruckbereich

Alle produktberührten Anlagenteile sind in rostfreiem Stahl ausgeführt. Zur Vermeidung von Kondensation in der Anlage mit der daraus resultierenden Anbackung von Produkt sind die dampfbeaufschlagten Anlagenteile mit elektrischer Begleitheizung versehen und die Produktein- und -austragsschleuse sowie der Bereich der Wirbelschicht mit Doppelmantel-Schaugläser bestückt, deren Zwischenraum mit Heißluft temperiert wird.

Ein Prozessleitsystem ermöglicht den halbautomatischen Betrieb der Anlage sowie die Aufnahme und Visualisierung der relevanten Messgrößen. Die Prozessgrößen Systemdruck, Temperatur und Fluidgeschwindigkeit werden durch das Prozessleitsystem geregelt. Zusätzlich ist die Anlage mit einer Vielzahl von Messgeräten, Armaturen sowie Sicherheitseinrichtungen ausgerüstet.

Das Anfahren der Versuchsanlage erfolgt mit heißer Luft bis zum Erreichen der vorgesehenen Sattdampf Temperatur. Anschließend wird der Anlage Wasserdampf zugeführt und die Luft verdrängt. Das Abfahren der Anlage erfolgt durch Abblasen des Dampfes und Spülen der Anlage mit Umgebungsluft solange bis 90°C unterschritten sind.

3.2 Gestaltung des Anströmbodens

Für die Auswahl eines geeigneten Anströmbodens wurden von Langweg [6] verschiedene Typen mit gerichteter Strömung untersucht (Abbildung 28).

Für kugelförmige Partikel hat ein Siebboden mit gerichteter Strömung erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Wirbelschicht, da sich großräumige Sekundärströmungen bilden. Diese führen dazu, dass sich Partikel in Rand- oder Zentrumsbereichen anreichern und ungleichmäßige Druck- und Strömungsbedingungen in der Wirbelschicht erzeugen. Ausgeglichene Verhältnisse wurden mit Siebboden Nr. 4 beobachtet. Für stückige Partikel, wie sie aus der Formgebung in diesem Projekt zum Einsatz kamen, sind die Einflüsse auf die Wirbelschicht deutlich geringer, wobei auch Lochblech Nr. 0 eine gute Fluidisierung zeigte. Für grob faseriges Material erzwingen die Anströmböden mit gerichteter Strömung immer eine Ungleichverteilung. Eine stabile Fluidisierung war nur mit dem Lochblech Nr. 0 möglich.

Die Versuchsanlage wurde daraufhin mit verschiedenen Anströmböden ausgerüstet (Nr. 0 und Nr. 4 in Abbildung 28).

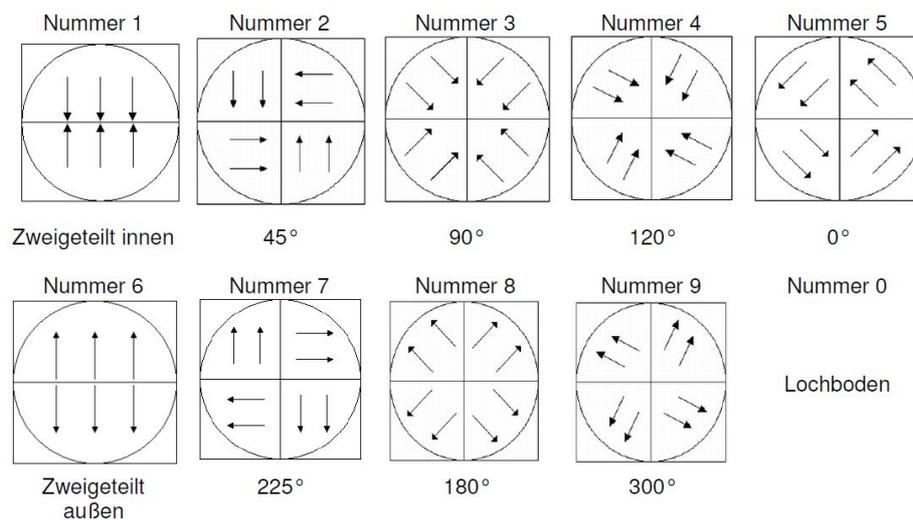


Abbildung 28: Untersuchtete Siebböden mit gerichteter Strömung (Pfeile geben die horizontale Richtung der durchtretenden Luftströmung an) [6]

3.3 Abweichungen vom Anlagenkonzept

In der ersten Phase des Projekts wurde die Versuchsanlage im Konzept geplant und zu Einzelheiten bereits Lösungsvorschläge erarbeitet. Bei der weiterführenden Grundplanung in der zweiten Phase des Projektes mussten gegenüber dem Konzept in folgenden Details Anpassungen durchgeführt werden, um das Projektziel erreichen zu können:

- Die Schleusen für das Ein- und Ausschleusen von Trocknungsgut sowie Staub werden mit Flachschiebern anstelle mit Kugelhähnen ausgerüstet, da Kugelhähne mit 100 mm freiem Durchgang für den gewünschten Druck- und Temperaturbereich nicht zu beschaffen waren. Trotz des Einsatzes der Schieber musste, bedingt durch das Dichtungsmaterial, die maximal zulässige Betriebstemperatur auf 210 °C begrenzt werden.
- Die Beheizung des Ringspalts in den Doppelwand-Schaugläsern wurde mit Heißluft anstelle Dampf realisiert, da die verwendeten Standard-Glasbauteile (Durchfluss-Schaugläser) nur für Innenüberdruck zugelassen sind.
- Der Anströmboden für die Wirbelschicht wurde mit einem 2-Loch-Flachschieber der Größe DN 200 realisiert, wobei das Siebblech in eines der beiden Schieberblattlöcher mit 200 mm Durchmesser eingelassen ist. Durch Betätigung des Schiebers werden das Durchgangsloch und der Anströmboden für die Wirbelschicht ausgetauscht. Das Zurückhalten von Trocknungsgut in der Wirbelschicht einerseits und das vollständige Entleeren andererseits werden damit erreicht.

Während der Ausführungsplanung ergaben sich weitere Anpassungen in der Anlagenkonfiguration, die ohne Betriebseinschränkungen zu einer zügigeren Anlagenrealisierung bei reduzierten Mehrkosten führten:

- Das geplante Filter, der im Dampfkreislauf dem Zyklon nachgeschaltet werden sollte, wurde aus Kostengründen nicht installiert. Für den Fall, dass dieses zur Abscheidung von Feinststäuben betriebsnotwendig wird, ist die Installation in Bezug auf Aufstellung, Rohrleitungsführung und Druckerhöhung des Dampfventilators vorgesehen.
- Die Ausführungsplanung der Probenahmevorrichtung für Trockengut direkt aus der Wirbelschicht zeigte erhebliche Risiken in der betriebssicheren und prozesssicheren Umsetzung. Aus diesem Grunde wurde auf den Bau der Probenahmevorrichtung verzichtet und ersatzweise ein vorzeitiges Aus-

schleusen des gesamten Trocknungsgutes in die Versuchsplanung mit aufgenommen. Alternativ lässt sich eine Probenahmevorrichtung durch Austausch des Apparateschusses im Bereich der Wirbelschicht nachträglich anbringen.

- Eine kontinuierliche Sauerstoffmessung im Kreislaufdampf wurde aus Kostengründen nicht realisiert. Der Nachweis einer luftfreien Dampfatosphäre nach Anfahren der Anlage und vor der Versuchsdurchführung wurde exemplarisch durch Bestimmung des Anteils an nichtkondensierbaren Gasen durch eine Hand-Sauerstoffmessgerät der Fa. Hach-Lange erbracht. Nach Spülung der Anlage mit etwa dem 70-fachen Anlagenvolumen war die Luft durch den Dampf ersetzt, das entspricht weniger als 1 % Restanteil des Anfangssauerstoffgehalts.

3.4 Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Trotz sorgfältiger Planung, Auswahl von Lieferanten und technischer Prüfung der erhaltenen Ausrüstungsangebote traten unerwartete Schwierigkeiten an bestimmten Ausrüstungen auf, die zu einer erheblichen Verzögerung der Inbetriebnahme der Anlage und zu Betriebseinschränkungen auch noch zum Zeitpunkt der Berichterstellung führten.

- Flachschieber für das Ein- und Ausschleusen des Trockenguts und des Staubes sowie Flachschieber mit Siebboden:

Das zuerst eingesetzte Dichtungsmaterial in den Gehäuseschalen war unbeständig gegenüber überhitzter Wasserdampfatosphäre bei Temperaturen über 140 °C und musste nach wenigen Verfahrzyklen ausgewechselt werden. Der Einsatz von extrem aufwändig zu beschaffendem, speziell auf die Betriebsparameter abgestimmten Dichtungsmaterial verspricht nach mehreren Zwischenschritten in der Problembehebung einen Einsatz der Flachschieber gemäß den vorgesehenen Betriebsbedingungen.

- Dampfventilator:

die Stopfbuchsabdichtung von Antriebswelle zum Ventilatorgehäuse führt bei höheren Temperaturen zu unzulässigen Schwingungen am Ventilator. Durch Aufweitung der Stopfbuchspackung kommt es in Folge zu Undichtigkeit. Eine Neukonstruktion der Abdichtung ist vorgesehen, um den Ventilator gemäß den vorgesehenen Betriebsbedingungen betreiben zu können.

Die vorgesehenen Versuche konnten trotz der oben genannten Schwierigkeiten durchgeführt werden, da mit häufigem Auswechseln der fehlerhaften Bauteile kurzzeitig der Betrieb bei den vorgesehenen Betriebsbedingungen eingestellt werden konnte. Für einen dauerhaften Versuchsbetrieb ist die Versuchsanlage aus den beiden genannten Mängeln an den Ausrüstungslieferungen noch nicht bereit.

4 Betrieb der Versuchsanlage

4.1 Modell zur Ermittlung des Trocknungsverlaufes

Die Trocknungsversuche mit überhitztem Wasserdampf, die mit der errichteten Versuchsanlage durchgeführt werden können, liefern Informationen zum Verhalten der verschiedenen Trocknungsgüter unter realen Prozessbedingungen. Bei der Wirbelschichttrocknung in überhitztem Wasserdampf ist es nicht möglich, den Trocknungsverlauf des Gutes in Abhängigkeit der Trocknungszeit messtechnisch direkt zu erfassen. Es wird auf eine bewährte Methode zurückgegriffen, die den Gutsfeuchteverlauf indirekt über die Integration der zeitlichen Gutsfeuchteänderung aus der Massen- und Enthalpiebilanz der Wirbelschicht mit vereinfachenden Annahmen berechnet (Abbildung 29).

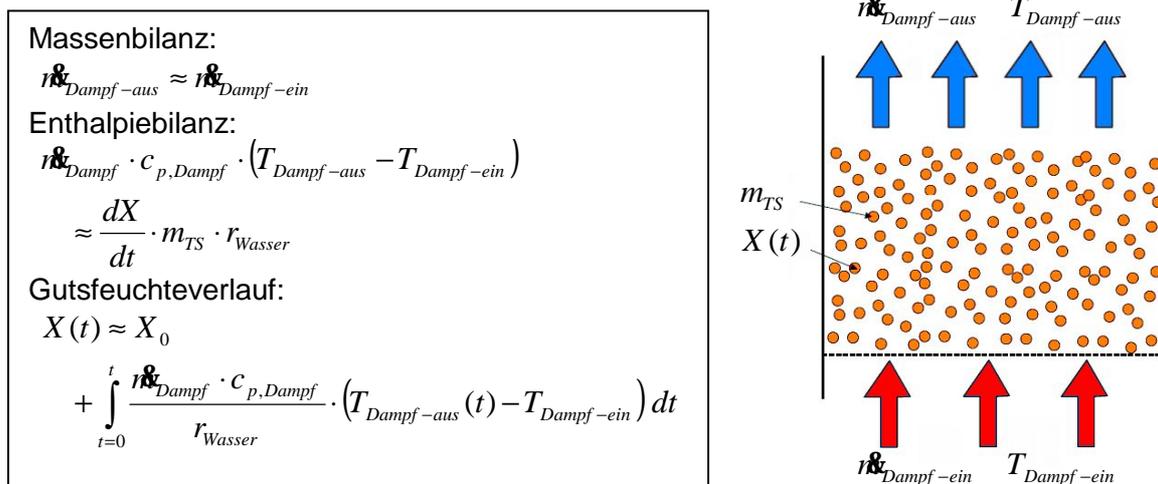


Abbildung 29: Vereinfachte Massen- und Enthalpiebilanz der Wirbelschicht zur Bestimmung des Gutsfeuchteverlaufes $X(t)$ (Erläuterung der Formelzeichen in Anhang B)

Die aus dem Produkt verdampfte Wassermenge wird dabei über die erfolgte Abkühlung des Fluids (überhitzter Wasserdampf) beim Durchströmen der Wirbelschicht bestimmt. Mit Kenntnis der Anfangsproduktmasse und des Anfangstrockensubstanzgehalts bzw. der Anfangsbeladung des Produkts wird mit dem zeitlichen Verlauf von Dampfmassenstrom, Dampfeintritts- und Dampfaustritts-temperatur die Wasserbeladung des Partikels zu jedem Zeitpunkt berechenbar. Weiterhin muss noch der Wärmefluss von und zu der Apparatewand berücksichtigt werden. Der Rechengang ist in Anhang B näher erläutert.

In einem chargenweisen Versuch zur Trocknung von Partikeln in der Wirbelschicht mit überhitztem Dampf durchläuft der Trocknungsprozess gemäß Machnow [7] 3 Phasen:

- 1. Phase - Anwärmen der Partikel und Kondensation von Wasserdampf auf den Partikel
- 2. Phase - 1. Trocknungsabschnitt mit konstanter Trocknungsgeschwindigkeit
- 3. Phase - 2. Trocknungsabschnitt mit sinkender Trocknungsgeschwindigkeit

Die funktionalen Zusammenhänge in den einzelnen Phasen sind in Anhang C zusammengefasst. Die Validierung der theoretischen Zusammenhänge mit korrekter Umsetzung in das Trocknungsmodell erfolgte von Machnow anhand von Versuchen mit Modellpartikeln [7]. Zur praxisrelevanten Nutzung des Trocknungsmodells bedarf es der Anpassung von Parametern an die jeweilige Trocknungsanlage und Gutseigenschaften, die die Abweichung der im industriellen Prozess eingesetzten Güter von den Modellpartikeln berücksichtigen.

4.2 Anpassung des Modells

Mit der Inbetriebnahme der Versuchsanlage und der Durchführung von Trocknungsversuchen mit überhitztem Wasserdampf in der druckaufgeladenen Wirbelschicht zeigte sich, dass für das oben beschriebene vereinfachte Trocknungsmodell nach Machnow (Anhang C) Anpassungen durchzuführen sind.

Mit der Berücksichtigung der angepassten Prozessbedingungen wird erreicht, dass die erhaltenen Daten für Anfangs- und Endzustand eines Trocknungsverlaufs durch das Trocknungsmodell beschrieben werden können:

- polydisperses Partikelkollektiv (Modell: monodisperses Partikelkollektiv)
- Anströmgeschwindigkeit deutlich oberhalb der Lockerungsgeschwindigkeit um die Fluidisierung während der Kondensationsphase zu gewährleisten (Modell: Anströmgeschwindigkeit entspricht der Lockerungsgeschwindigkeit)
- Betriebsdruck liegt oberhalb Umgebungsdruck (Modell: Umgebungsdruck)

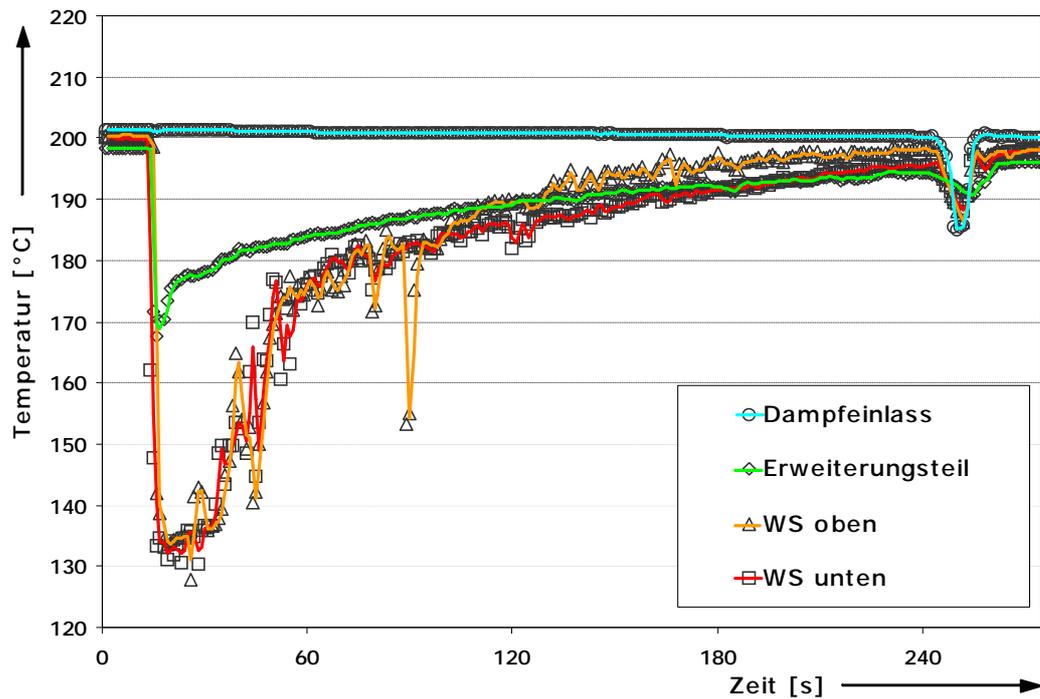


Abbildung 30: Temperaturverlauf während der Trocknung in der Wirbelschicht vom Einschleusen bis zum Ausschleusen des Produktes bei 3 bar abs Dampfdruck, 200 °C Dampftemperatur, und 6 m/s Dampfgeschwindigkeit (Beispiel: Trocknungsversuch Nr. 70 mit Maisschlempe)

Interpretation des Temperaturverlaufes (Abbildung 30)

In Abbildung 30 ist der typische Verlauf der aufgezeichneten Temperaturen eines Trocknungsversuchs dargestellt. Das Einschleusen von Produkt erfolgte bei der Zeitmarke ca. 10 s (plötzliches Absinken der Temperaturen "WS unten" und "WS oben"). Der Versuch war bei der Zeitmarke ca. 250 s durch Ausschleusen des Produktes beendet (kurzes Absinken aller Temperaturen).

Die Temperatur am Dampfeinlass ist während der Trocknung nahezu konstant (die leichte Absenkung ist regelungstechnisch begründet).

Gut zu erkennen ist die Absenkung der Dampftemperatur in der Wirbelschicht durch das Einschleusen des kalten Gutes, sowohl an der 5 cm über dem Boden liegenden Messstelle ("WS unten") als auch an der Messstelle, die 20 cm über dem Boden positioniert ist ("WS oben"). An der unteren Messstelle erfolgt die Absenkung der Dampftemperatur bis unterhalb der Sattdampftemperatur (134,6 °C bei 3 bar abs).

Die gemessene Temperatur im Bereich von 1 m über der Wirbelschicht im Erweiterungsteil des Trockners fällt mit dem Einschleusen des Gutes nur bis auf

168 °C ab und bleibt anfangs oberhalb der Dampftemperatur in der Wirbelschicht, später kehren sich die Verhältnisse um. Damit wird einerseits der Einfluss der Behälterwand erkennbar, die zuerst Wärme an den strömenden Dampf abgibt und später von diesem aufnimmt, andererseits zeigt der große Abstand dieser Temperatur zur Kondensationstemperatur, dass eine deutliche Dampfmenge an den Partikeln ohne Wärmeabgabe vorbeiströmt (Bypassströmung).

Die gemessenen Wirbelschichttemperaturen "WS unten" und "WS oben" weisen bei der sekundlichen Messwerterfassung teilweise erhebliche Schwankungen auf, die sich wahrscheinlich durch kurzzeitigen Kontakt von Partikeln mit den Temperatursensoren (Thermoelementen) ergeben, die dann deutlich niedrigere Temperaturen anzeigen.

Berücksichtigung der Kondensationsphase

Im Trocknungsversuch, der in Abbildung 30 dargestellt ist, ist die Kondensationsphase nach ca. 14 s beendet. Anschließend findet die eigentliche Trocknung des Gutes statt.

In der Beispielrechnung von Machnow (Anhang C) ist bei der Wirbelschichtverdampfungstrocknung die Dauer der Kondensationsphase verhältnismäßig kurz (2,35 s). Als wesentliche Einflussgrößen sind die Temperatur des Gutes beim Eintritt in die Dampfatosphäre sowie Druck und Temperatur des Dampfes zu benennen. Zudem ist die Fluidisierungsgeschwindigkeit gemäß Anhang D angepasst worden.

Abbildung 31 zeigt für ausgewählte Trocknungsversuche die Abhängigkeit der Kondensationsphase von der Dampfdichte. Da es sich bei der Ermittlung der Kondensationszeit um eine messtechnisch schwer feststellbare Größe handelt, können die angegebenen Werte in Abbildung 31 nur den Trend aufzeigen, dass bei höheren Dampfdrücken die Kondensationsphase leicht verkürzt ist.

Zudem wird die Kondensationsphase durch die Korngröße und die Korngrößenverteilung beeinflusst. Bei größeren Partikeln wird sich diese gegenüber kleineren verlängern, darüber hinaus gilt dies ebenso für polydisperse Partikelkollektive gegenüber monodispersen.

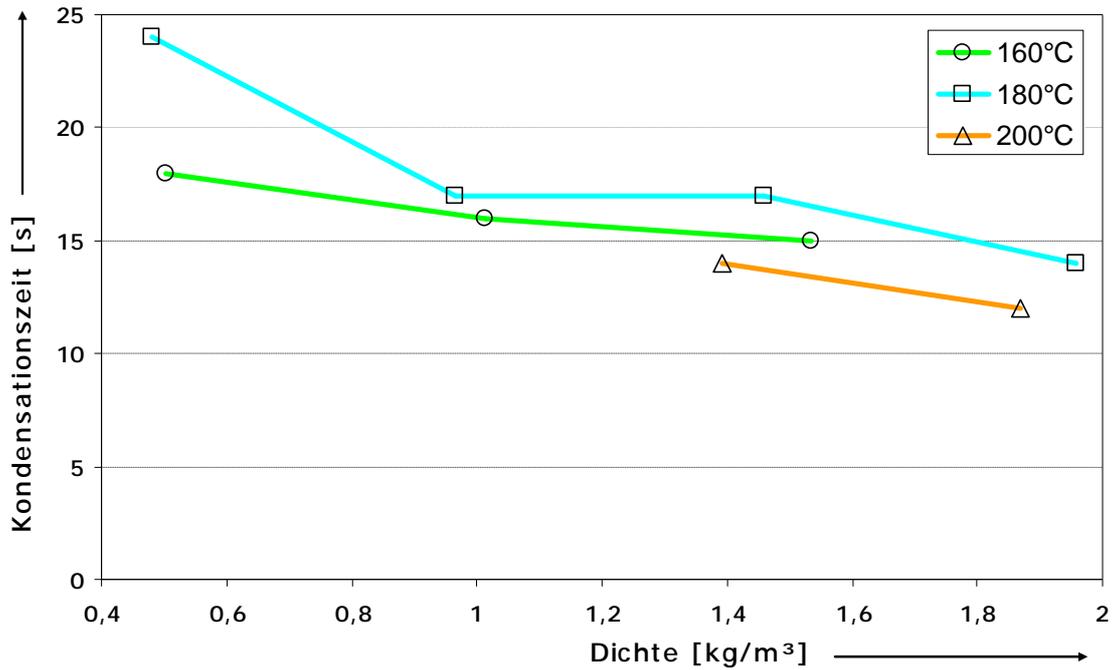


Abbildung 31: Kondensationszeit in Abhängigkeit von der Dampfdichte mit der Dampftemperatur als Parameter (bei 180 °C: 0,45 kg/m³ entspricht 1 bar abs, 1,95 kg/m³ entspricht 4 bar abs Dampfdruck)

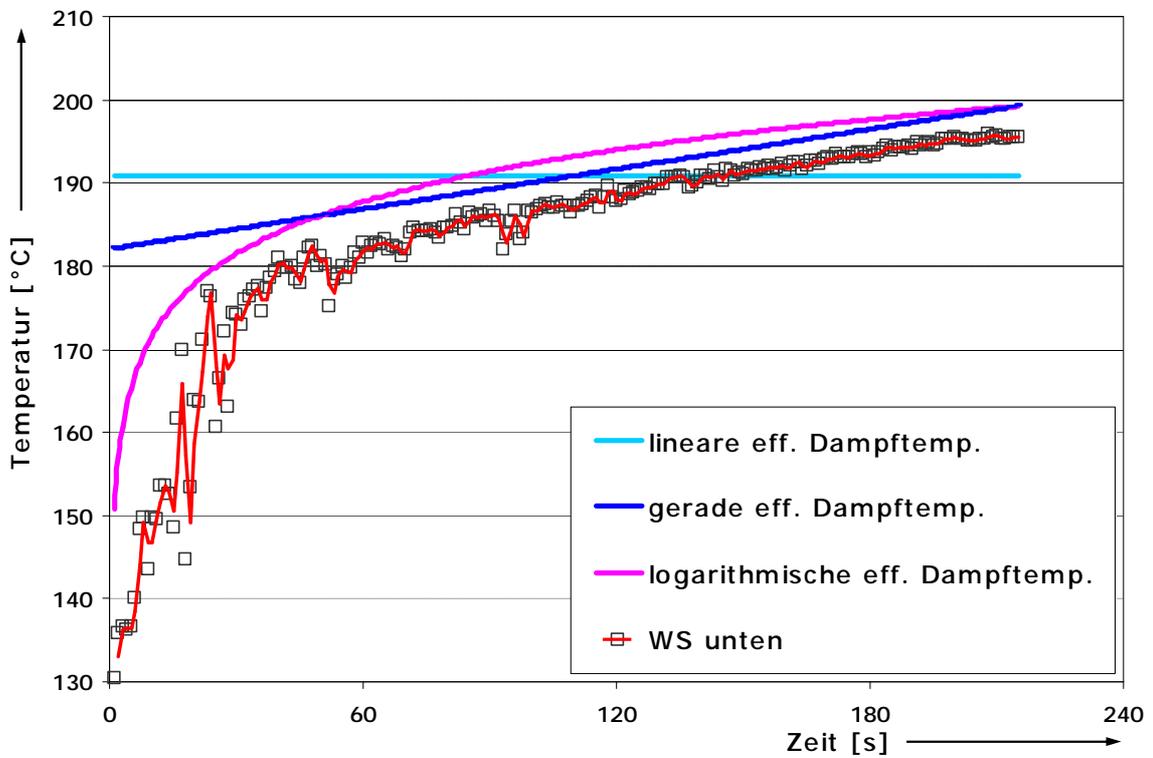


Abbildung 32: Temperaturverlauf aus Abbildung 30 mit verschiedenen Ansätzen für die effektive Dampfeintrittstemperatur

Anwendung der effektiven Dampfeintrittstemperatur

In der Auswertung der Trocknungsversuche wird die tatsächlich verdampfte Wassermenge (aus Trockensubstanzanalysen vor und nach der Trocknung und der eingesetzten Feuchtgutmasse) mit dem über die Temperaturdifferenz ermitteltem Gutsfeuchteverlauf (durch Integration über der Versuchszeit) verglichen. Unterschiedliche Ergebnisse zwischen Analyse und einem bestimmten Gutsfeuchteverlauf sind u. a. auf Abweichungen wegen der nicht idealen Fluidisierung in der Wirbelschicht und den abweichenden Eigenschaften von Partikel aus Biomasse und Modellpartikeln (Partikelgrößenverteilung, Änderungen während der Trocknung) zurückzuführen.

Die pauschale Berücksichtigung der Nebeneffekte kann durch die Definition einer effektiven Dampfeintrittstemperatur erreicht werden, die so gewählt wird, dass das Ergebnis aus dem Gutsfeuchteverlauf mit der Analyse übereinstimmt.

Sind die Partikel stabil und weist das Partikelkollektiv einen monodispersen Charakter auf, dann lässt sich die Bilanz mit einer mittleren effektiven Dampfeintrittstemperatur erstellen ("lineare effektive Dampftemperatur" in Abbildung 32).

Bei Trocknungsgütern mit breiter Partikelgrößenverteilung und großer Abweichung von der Kugelgestalt (z. B. Treber) führt der in Abbildung 32 als "gerade effektive Dampfeintrittstemperatur" gekennzeichnete Verlauf zu guter Übereinstimmung.

Bei den untersuchten zylindrischen Formkörpern aus Biomasse treten während der Trocknung Bruch und Agglomeration auf. Für die Berechnung der Trocknungsverläufe dieser Partikel hat sich die Anpassung der effektiven Dampfeintrittstemperatur durch eine logarithmische Funktion als praktikabel erwiesen ("logarithmische effektive Dampftemperatur" in Abbildung 32).

Verlauf der Wasserbeladung und der Trocknungsgeschwindigkeit

Aus den Temperaturmesswerten werden unter Annahme der zum Partikelkollektiv passenden effektiven Dampfeintrittstemperatur der Verlauf der Wasserbeladung und der Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit ermittelt (Abbildung 33).

Für die untersuchten Formkörper aus Biomasse mit großer Verteilungsbreite startet der Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit mit einem starken Abfall, welcher anschließend in eine Phase mit annähernd konstanter Trocknungsgeschwindigkeit übergeht.

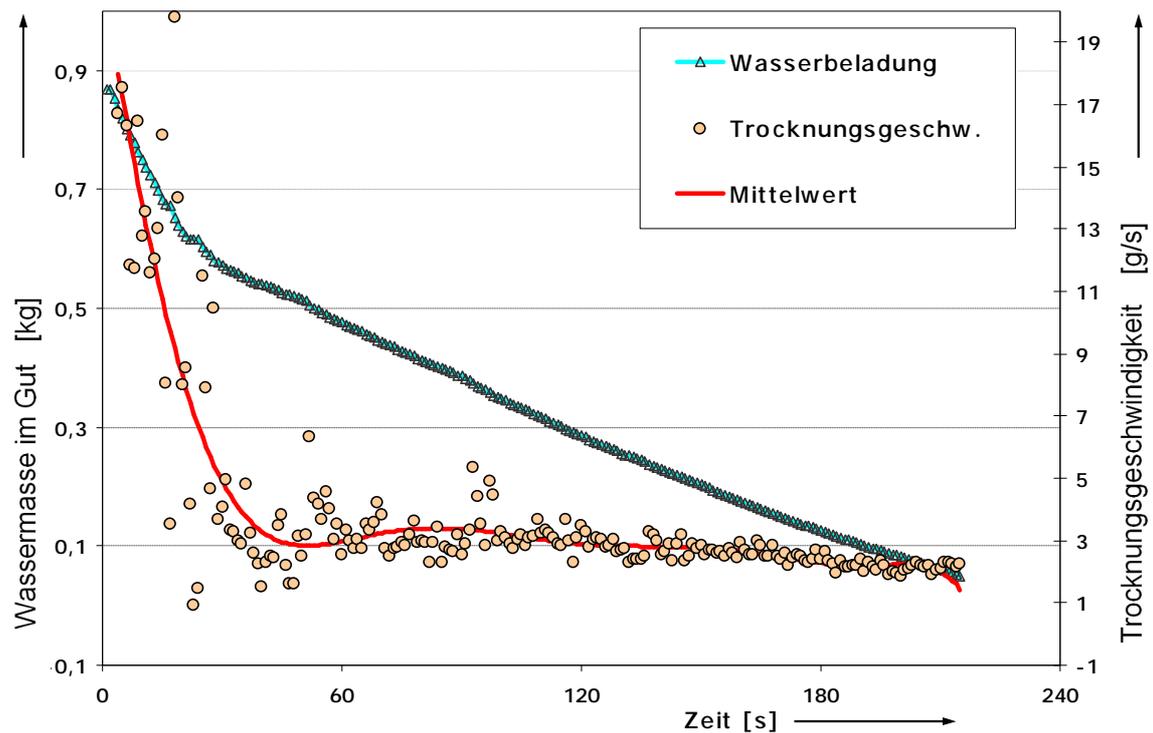


Abbildung 33: Verlauf der Wasserbeladung und der Trocknungsgeschwindigkeit während der Trocknung bei 200 °C, 3 bar abs und 6 m/s Dampfgeschwindigkeit

Der in der klassischen Lehre als erste Phase in der Trocknung zu erwartende erste Trocknungsabschnitt mit konstanter Trocknungsgeschwindigkeit lässt sich bei diesen Formkörpern aus Biomasse nicht zuordnen. Möglicherweise erfolgt bei der breiten Partikelgrößenverteilung der untersuchten Materialien und den gewählten Prozessparametern eine Überlagerung von Trocknungsphasen, die dann nicht mehr separat nachgewiesen werden können

Es zeigt sich weiterhin, dass für Versuche bei niedrigen Dampfdrücken die ermittelte Trocknungsgeschwindigkeit ruhiger verläuft als in Versuchen mit höherem Druck und zudem nach der Kondensationsphase ein sehr kurzer Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit zu erkennen ist.

4.3 Trocknungsversuche Maisschlempe

Versuchsmaterial:	rückbefeuchtete Maistrockenschlempe (Anhang A1)
Trockensubstanzgehalt:	53 - 54 %
Formgebung:	Industriefleischwolf, Bohrungsdurchmesser Matrize 4,5 mm
Versuchsparameter:	Tabelle 7

Die mit dem Fleischwolf erzeugten Formkörper neigten nach Austritt aus der Matrize teilweise zum Verkleben. Durch manuelles Aufschütteln im Auffanggefäß ließen sich die Produktstränge auf eine Länge von 10 bis 20 mm vereinzeln. Einzelne Verklumpungen mit einem Durchmesser von 2 bis 3 cm wurden von Hand aussortiert.

Tabelle 7: Prozessparameter der Versuche mit Maisschlempe

Versuch Nr.	62	63	64	65	66	68	69	70	71	72
Druck [bar abs]	1,1	2,0	3,0	1,1	2,0	3,0	4,0	3,0	4,0	4,0
Temperatur [°C]	160	160	160	180	180	180	180	200	200	200
Trocknungszeit [min]	6	6	6	5	5	5	5	4	3	2
TS-Gehalt * [%]	95,8	88,2	84,0	95,0	94,9	93,9	86,7	95,8	86,9	79,9

* TS-Gehalt = Trockensubstanzgehalt des getrockneten Gutes

Temperaturverlauf

In Abbildung 34 sind zur Verdeutlichung des spezifischen Trocknungsverhaltens die Temperaturkurven von Versuch 70 dargestellt.

Nach dem Einschleusen des Produktes in den Trockner sinken die Temperaturen in der Wirbelschicht von 200 °C (ohne Produkt) sprunghaft bis auf die Sattdampf-temperatur ab (133 °C bei 3 bar), was die schlagartig einsetzende Kondensation des Dampfes am eingeschleusten Produkt erkennen lässt.

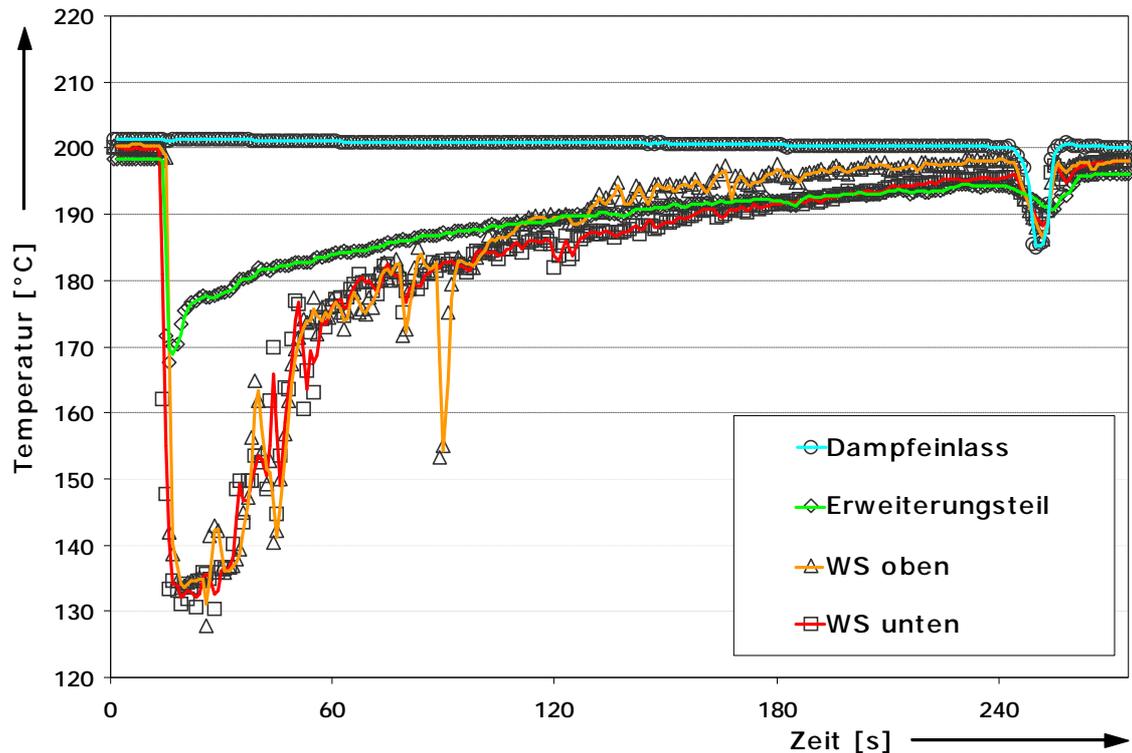


Abbildung 34: Gemessener Verlauf der Dampfein- und Dampfaustrittstemperatur in Abhängigkeit der Trocknungszeit, Material konditionierte Maisschlempe, Versuch Nr. 70, 3 bar abs, 200 °C

Die Temperatur oberhalb der Wirbelschicht im Erweiterungsteil des Trockners sinkt nur bis auf etwa 170 °C ab. Das charakterisiert die spezifischen Bedingungen in der Wirbelschicht zu Beginn der Trocknung. Ein Teil des Dampfes strömt an den Partikeln vorbei, ohne dass es zu einer optimalen Nutzung der Wärme des Dampfes kommt (Bypassströmung).

Kondensationszeit

Bei einem Prozessdruck von 4 bar liegen die aus den Temperaturverläufen ermittelten Kondensationszeiten in einem Bereich zwischen 10 s (200 °C) und 15 s (180 °C). Das zeigt, dass die Trocknung der konditionierten Maisschlempe auch bei hohen Prozesstemperaturen erst nach einer relativ langen Kondensationsphase nach dem Einschleusen beginnt.

Bei konstanter Prozesstemperatur wird die Kondensationsphase mit steigendem Druck kürzer. Bei einer Temperatur von 180 °C reduziert sich die Zeit im Versuch von ca. 25 s (1 bar) auf 15 s (4 bar).

Bei konstantem Prozessdruck nimmt mit Erhöhung der Temperatur von 180 °C auf 200 °C die Kondensationszeit geringfügig ab.

Massenausrag

Als Ergebnis der Versuche konnte festgestellt werden, dass die Produktmenge, die mit dem Zirkulationsdampf aus der Wirbelschicht ausgetragen wird, bei konstanter Fluidgeschwindigkeit mit steigendem Prozessdruck bei allen untersuchten Dampftemperaturen zunimmt.

Der ermittelte Massenausrag lag bei 180 °C in einem Bereich zwischen 7 % (1 bar) und 11 % (3 bar) von der eingesetzten Produktmasse. In einem Druckbereich von 2 bis 3 bar (unabhängig von der Prozesstemperatur) nahm der Produkt-ausrag stärker zu und lag schließlich bei 4 bar bei allen Versuchen in einem Bereich von etwa 18 %.

Trocknungsgeschwindigkeit

Ein hoher Prozessdruck und eine hohe Dampftemperatur führen bei der Trocknung von Maisschlempe zu einer hohen Trocknungsgeschwindigkeit. Die Steigerung des Druckes um 1,0 bar hat eine Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit um ca. 15 % zur Folge. Je niedriger die Dampftemperatur ist, desto größer ist der Einfluss des Druckes auf die Trocknungsgeschwindigkeit (Abbildung 35).

Aus hohen Trocknungsgeschwindigkeiten resultieren kürzere Trocknungszeiten. Bei einer Dampftemperatur von 200 °C und 3 bar Prozessdruck wurde ein Trockensubstanzgehalt von 87 % ca. 30 Sekunden früher erreicht als bei 180 °C und 3 bar. Das entspricht bei einer Gesamttrocknungszeit von 200 s einer Reduzierung um etwa 15 %.

Partikelgrößenverteilung

Die Beurteilung des getrockneten Produktes zeigte, dass die Partikelgröße sich beim Trocknungsprozess verändert (Abbildung 36). Der zur Auswertung herangezogene Partikeldurchmesser $d_{50,3}$ wird mit zunehmender Dampfdichte bei konstanter Temperatur (140 °C oder 160 °C) größer. Das kann bedeuten, dass es unter diesen Prozessbedingungen zu einer erhöhten Agglomeration von Maisschlempeformkörpern mit Bruchstückchen und Feinanteil kommt.

Bei Versuchen mit einer Dampftemperatur von 180 °C konnte keine Veränderung der Partikelgröße in Abhängigkeit des Prozessdruckes ermittelt werden.

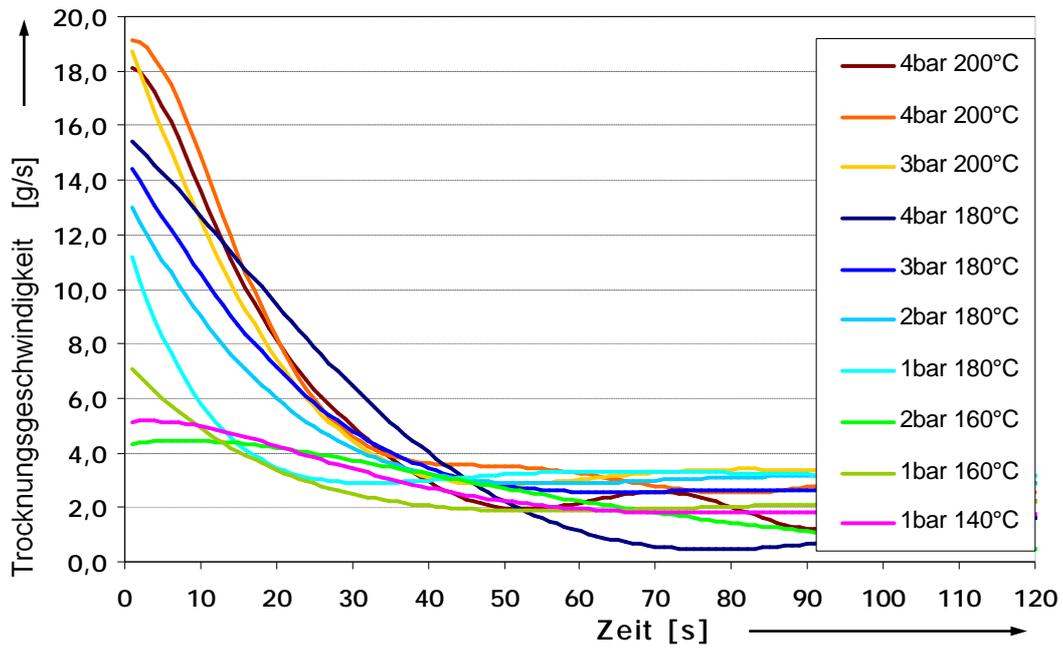


Abbildung 35: Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Trocknungszeit, mit Dampfdruck und Dampf Temperatur als Parameter, Trocknungsgut Maisschlempe

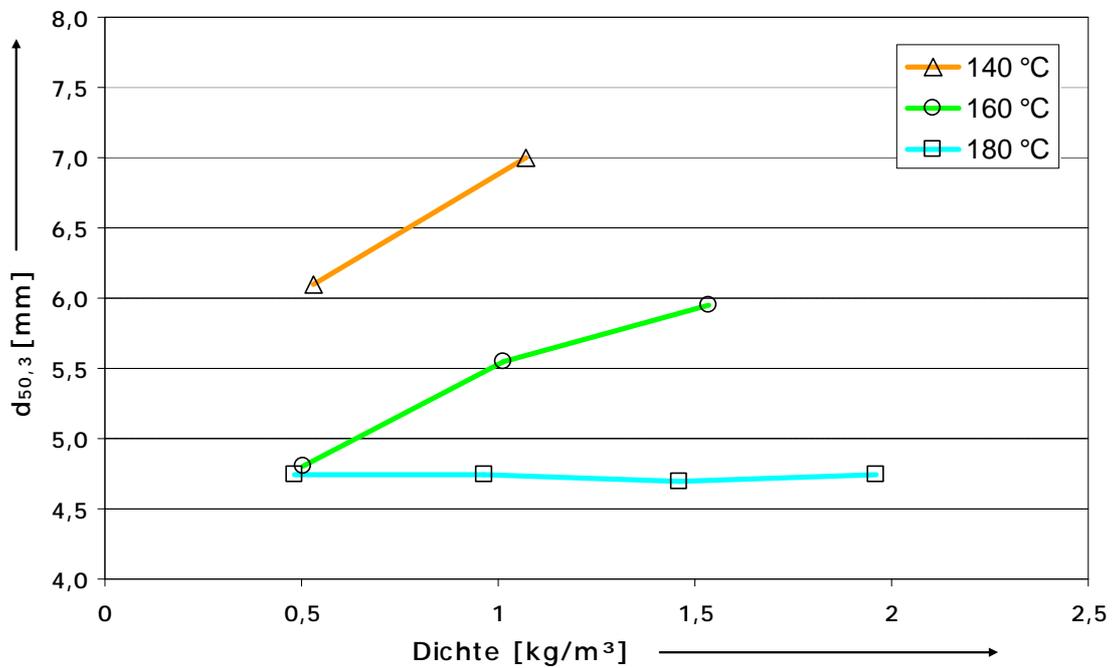


Abbildung 36: Veränderung des $d_{50,3}$ -Wertes bei getrockneten Maisschlempenpartikel in Abhängigkeit der Dampfdichte, mit der Temperatur als Parameter

Visueller Vergleich der getrockneten Maisschlempe

Die Beurteilung der Partikelbeschaffenheit zeigte, dass sich bei allen Versuchen mit 1 bar Dampfdruck (Umgebungsdruck) große Agglomerate bildeten. Die Formkörper konnten nicht fluidisiert werden und bewegten sich nur auf dem Siebboden (160 °C, 1 bar oder 180 C, 1 bar, Abbildung 37).

Wird der Prozessdruck bei konstanter Trocknungstemperatur (160 °C) auf 2 oder 3 bar erhöht, treten die Agglomerationseffekte nur noch in etwas abgeschwächerter Form auf.

Auch bei den Versuchen mit 4 bar und einer Dampftemperatur von 180 °C agglomeriert noch ein Teil der konditionierten Maisschlempe trotz hoher Dampfdichte und 6 m/s Dampfgeschwindigkeit.

Die besten Ergebnisse wurde bei einer Prozesstemperatur von 200 °C im Druckbereich von 3 bis 4 bar erreicht. Es gab nur einen sehr geringen Anteil agglomerierter Partikel und keine Anhaftungen am Siebboden.



Abbildung 37: Vergleich getrockneter Maisschlempe, die bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen getrocknet wurde

4.4 Trocknungsversuche Weizenschlempe

Versuchsmaterial: rückbefeuchtete Weizentrockenschlempe (Anhang A2)

Trockensubstanzgehalt: 53 - 55 %

Formgebung: Industriefleischwolf, Bohrungsdurchmesser Matrize 4,5 mm

Versuchsparameter: Tabelle 8

Tabelle 8: Prozessparameter der Versuche mit Weizenschlempe

Versuch Nr.	22	40	26	42	43	8	44	11	14	48
Druck [bar abs]	1,1	2,0	1,1	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0	4,0	4,0
Temperatur [°C]	140	140	160	160	160	180	180	180	180	200
Trocknungszeit [min]	6	5	4	4	4	4	4	4	6	4
TS-Gehalt* [%]	88,5	86,6	92,8	86,4	82,6	97,6	96,0	99,7	95,1	97,7

* TS-Gehalt = Trockensubstanzgehalt des getrockneten Gutes

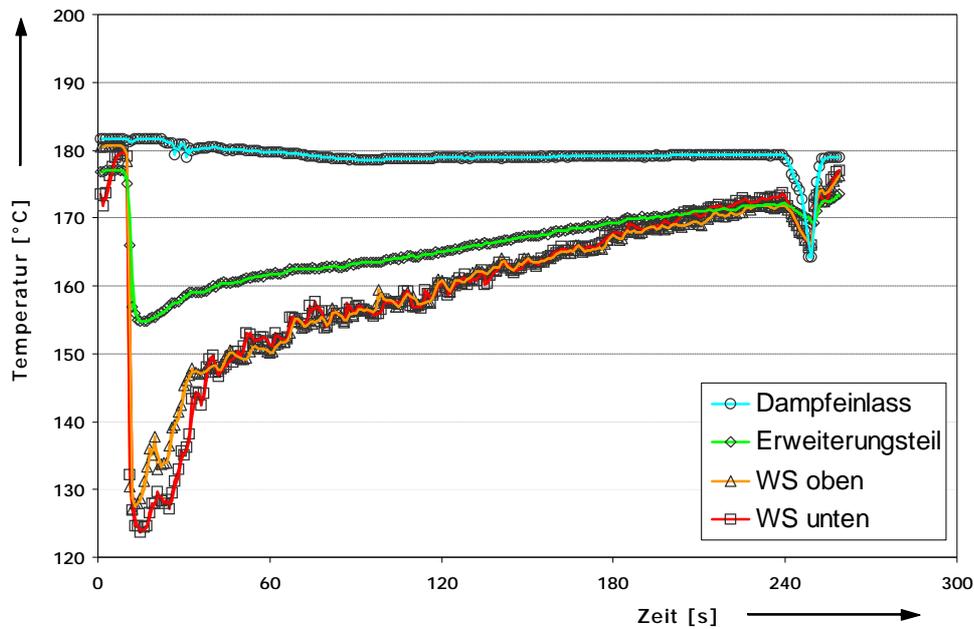


Abbildung 38: Temperaturverlauf während der Trocknung vom Ein- bis zum Ausschleusen bei 180 °C, 2 bar abs und 5,4 m/s Dampfgeschwindigkeit Produkt: Weizenschlempe, Versuch 44

Temperaturverlauf

Abbildung 38 zeigt die Temperaturmesswerte eines Trocknungsversuches vom Einschleusen der konditionierten Weizenschlempe in den Trockner bis zum Ausschleusen des getrockneten Produktes. Die Temperatur der Wirbelschicht sinkt nach dem Einschleusen des Produktes sprunghaft bis auf Sattdampf Temperatur ab (120 °C bei 2 bar) und zeigt im Allgemeinen aber keine Besonderheiten im Vergleich mit dem Temperaturverlauf von Maisschlempe.

Kondensationszeit

Die ermittelten Kondensationszeiten sind bei der Weizenschlempetrocknung im gesamten Druckbereich bei einer Prozesstemperatur von 180 °C im Vergleich mit Maisschlempe kürzer. Bei 4 bar und 180 °C konnte keine Kondensationsphase mehr identifiziert werden (Mais 180 °C, 4 bar: ca. 15 s).

Massenausrag

Der ermittelte Massenausrag aus der Wirbelschicht bewegte sich bei den durchgeführten Versuchen (Druckbereich 1 bar bis 4 bar und Temperatur 140 °C, 160 °C und 180 °C) in einem Bereich von 2 % bis 7% von der eingesetzten Produktmasse und zeigte keine signifikante Anhängigkeit vom Prozessdruck (Mais: 18 % bei 4 bar und 180 °C sowie 200 °C).

Der geringe Massenausrag kann aus der erhöhten Festigkeit der Formkörper aus Weizenschlempe und aus der reduzierten Neigung zur Agglomeration der Partikel in der Wirbelschicht resultieren. Durch diese spezifischen Eigenschaften der Formkörper konnte mit einer um 0,6 m/s geringeren Dampfgeschwindigkeit gearbeitet werden.

Trocknungsgeschwindigkeit

Für mittlere Prozessdrücke von 2 bis 3 bar bei einer Temperatur von 180 °C sind die Trocknungsgeschwindigkeiten von Weizenschlempe zu Beginn der Trocknung in etwa 30 % kleiner im Vergleich mit den Trocknungsgeschwindigkeiten von Maisschlempe. Bei einem Prozessdruck von 4 bar und Temperaturen von 200 °C oder 180 °C konnte dieser Unterschied nicht beobachtet werden.

Nach etwa 25 s verläuft die Trocknung bei allen Versuchen (Weizenschlempe) mit konstanter Geschwindigkeit (Maisschlempe ca. 45 s) und liegt in diesem Abschnitt der Trocknung höher als bei den Versuchen mit Maisschlempe (Abbildung 39).

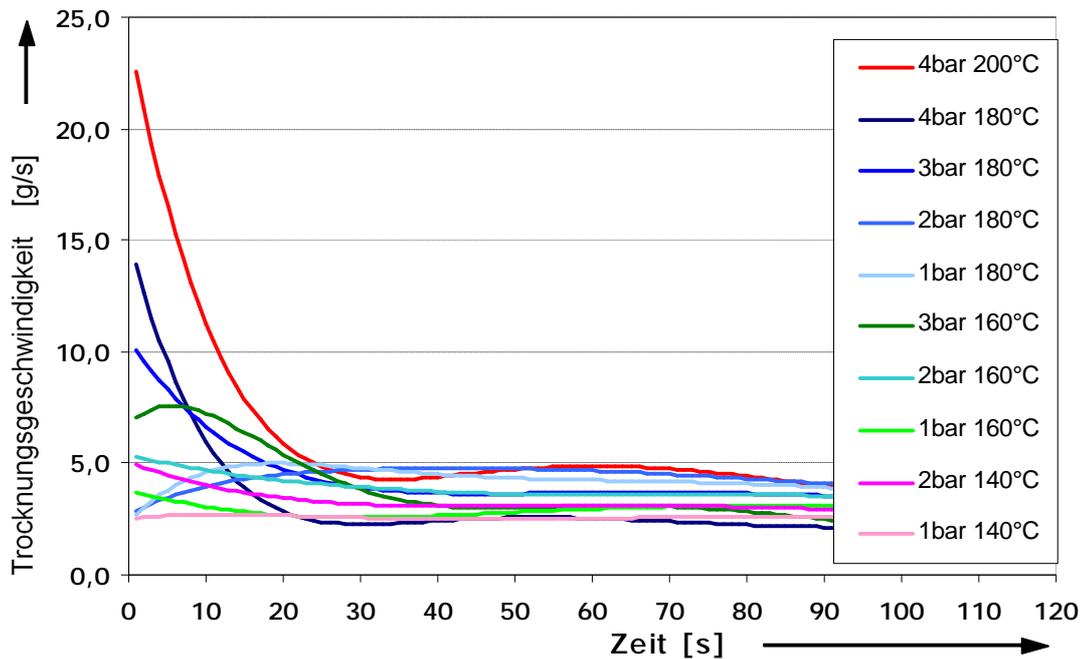


Abbildung 39: Vergleich der mittleren Trocknungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Trocknungszeit mit Dampfdruck und Dampftemperatur als Parameter, Trocknungsgut: Weizenschlempe

Visueller Vergleich der getrockneten Weizenschlempe

Weizenschlempe zeigte im Vergleich mit den anderen Schlempeprodukten im Trocknungsversuch die geringste Neigung zum Agglomerieren. Es entstand wenig Bruch und es wurde wenig Feinanteil abgeschieden.

Auch bei niedrigen Prozesstemperaturen (140 °C) bildeten sich keine größeren Agglomerate in der Wirbelschicht (Abbildung 40) und es gab keine Anhaftungen auf dem Siebboden.

Weizenschlempe konnte ohne problematische Partikelagglomeration im gesamten getesteten Druck- und Temperaturbereich getrocknet werden.

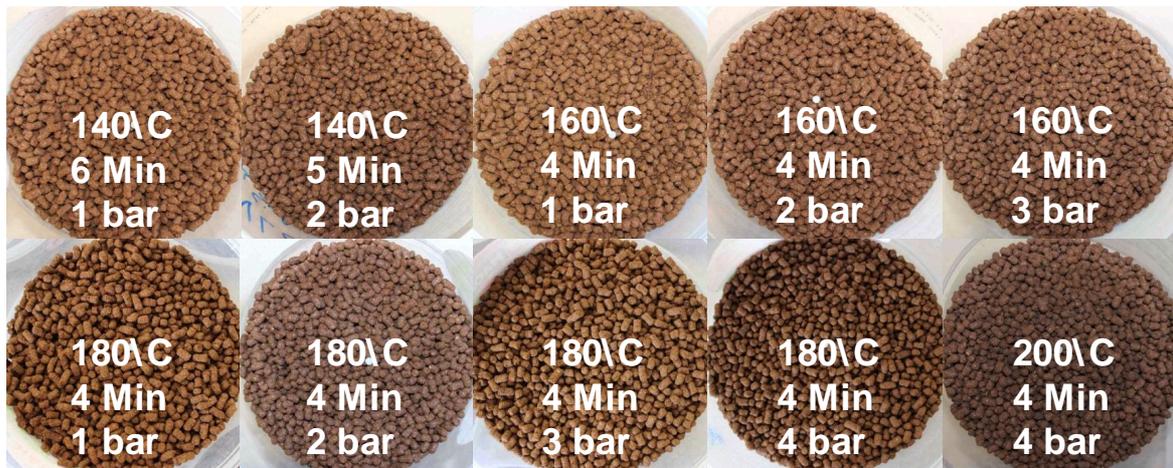


Abbildung 40: Vergleich getrockneter Weizenschlempe, bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen

4.5 Trocknungsversuche Mischgetreideschlempe

Versuchsmaterial: rückbefeuchtete Trockenschlempe aus Weizen, Gerste und Mais (Anhang A3)

Trockensubstanzgehalt: 53 - 54 %

Formgebung: Industriefleischwolf

Versuchsparameter: Tabelle 9

Tabelle 9: Prozessparameter der Versuche mit Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais

Versuch Nr.	86	82	80	81	83	84	85	87	88	89
Druck [bar abs]	1,1	1,1	2,0	3,0	2,0	3,0	4,0	2,0	3,0	4,0
Temperatur [°C]	145	160	160	160	180	180	180	200	200	200
Trocknungszeit [min]	6	6	5	5	5	4	4	3	3	3
TS-Gehalt * [%]	91,7	87,6	89,4	(78,7) ¹	97,3	93,3	91,7	95,7	95,2	95,6

* TS-Gehalt = Trockensubstanzgehalt des getrockneten Gutes

¹ Der niedrige Trockensubstanzgehalt bei Versuch 81 ist auf Kondensateintrag beim Ausschleusen des getrockneten Produktes zurückzuführen.

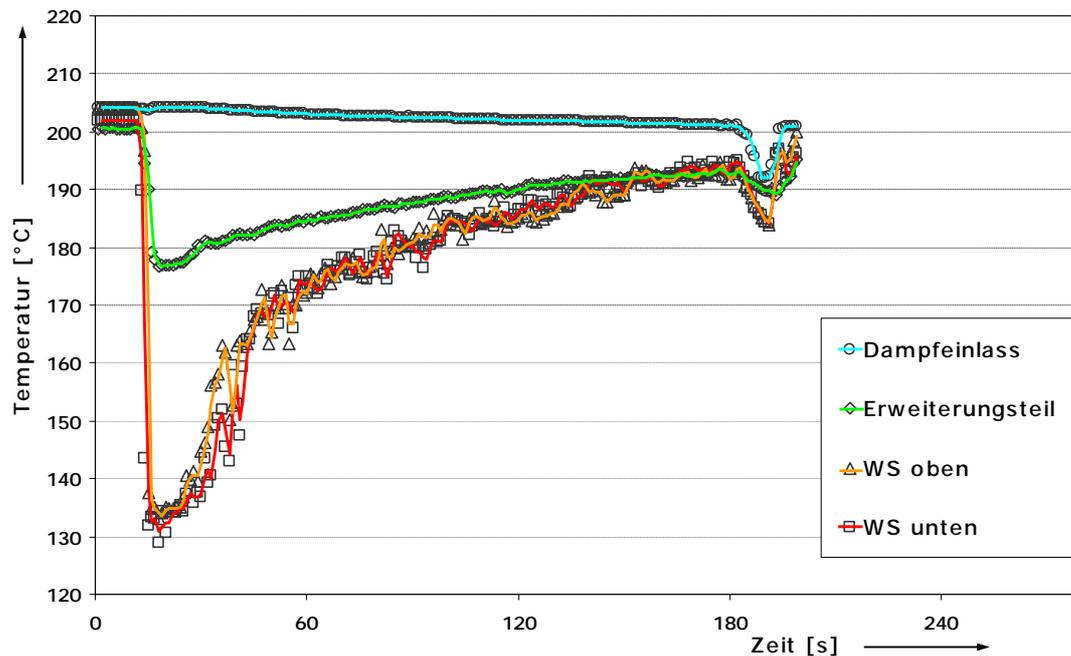


Abbildung 41: Temperaturverlauf während der Trocknung von Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais vom Ein- bis zum Ausschleusen bei 200 °C, 3 bar abs und 6 m/s Dampfgeschwindigkeit, Versuch 88

Temperaturverlauf

Der Temperaturverlauf bei der Trocknung von Schlempe aus Weizen, Gerste und Mais (Abbildung 41) zeigt einen analogen Verlauf zu den Temperaturwerten der Mais- und Weizenschlempetrocknung.

Kondensationszeit

Die Zusammensetzung des Schlempegemisches bestimmt die Länge der Kondensationszeiten. Die ermittelten Werte liegen im Bereich zwischen den Kondensationszeiten von Maisschlempe und Weizenschlempe.

Im mittleren Druckbereich (2 bar) und einer Temperatur von 180 °C liegt die Kondensationszeit für das Schlempegemisch bei ca. 16 s und liegt damit im Bereich der Kondensationszeiten von Mais (17 s) und Weizen (17 s).

Bei einem Druck von 4 bar und 180 °C konnte ein Wert von etwa 12 s ermittelt werden (Mais 14 s, Weizen keine Kondensationszeit ermittelt).

Erhöht man die Temperatur auf 200 °C beim Prozessdruck von 4 bar verkürzt sich die Kondensationszeit auf 6 s (Mais 12 s)

Trocknungsgeschwindigkeit und Wasserbeladung

Die Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais trocknet im Vergleich schneller als Maisschlempe. Bei einem Prozessdruck von 4 bar und 200 °C konnte eine vergleichbare Wasserbeladung von $0,28 \text{ kg}_{\text{Trockensubstanz}}/\text{kg}_{\text{Wasser}}$ bereits nach etwa 90 s erreicht werden (Mais 120 s, Weizen 100 s).

Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgröße verändert sich bei der Trocknung in Abhängigkeit der Trocknungsbedingungen (Druck und Temperatur). Bei einer Temperatur von 160 °C stieg der $d_{50,3}$ -Wert von 5 mm (1 bar) auf 6,5 mm (3 bar). Bei einer Temperatur von 180 °C veränderte sich der $d_{50,3}$ -Wert gering von etwa 5 mm (2 bar) auf 5,5 mm (4 bar). Wenn die Prozesstemperatur auf 200 °C erhöht wurde, konnte ein umgekehrtes Verhalten beobachtet werden. Der $d_{50,3}$ -Wert verändert sich von 5,5 mm bei 2 bar auf 4,5 mm, bei 4 bar Prozessdruck (Abbildung 42).

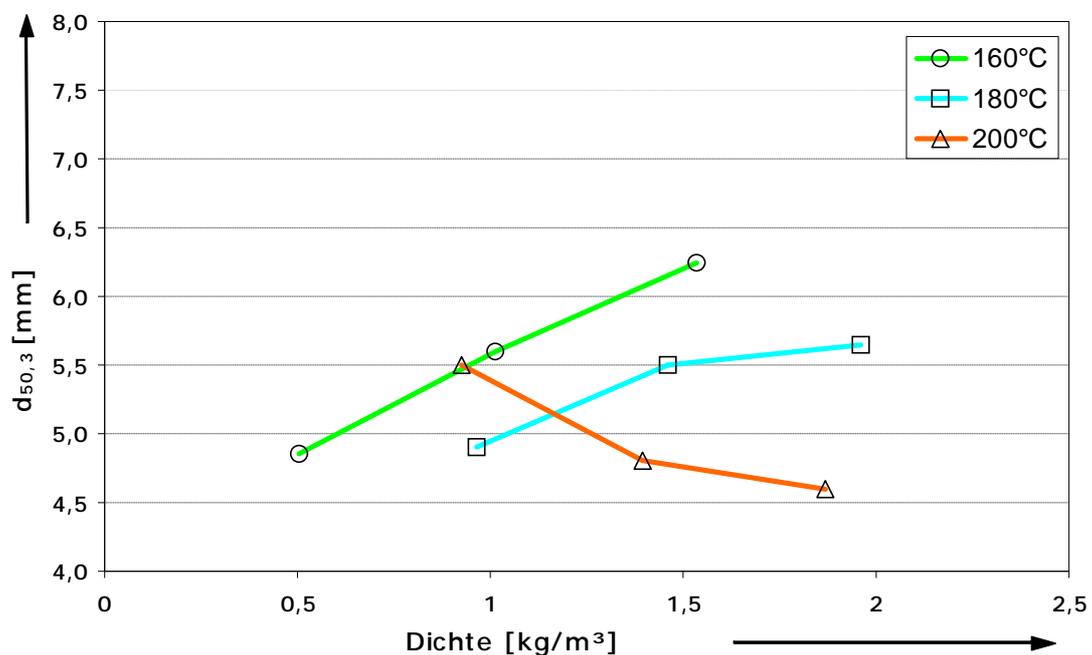


Abbildung 42: Veränderung des d_{50} -Wertes (getrocknetes Produkt) in Abhängigkeit der Dampfdichte mit der Temperatur als Parameter, Getreideschlempe aus Weizen, Gerste, Mais

Visueller Vergleich der getrockneten Mischgetreideschlempe (Weizen, Gerste und Mais)

Abbildung 43 zeigt eine Zusammenstellung der getrockneten Partikel. Bei den Trocknungsversuchen mit 1 bar Prozessdruck wurde nur ein geringer Anteil an agglomerierten Partikel von mehr als 20 mm gefunden.

Bei mittleren und höheren Prozessdrücken (2, 3 und 4 bar) konnte die Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais im gesamten getesteten Temperaturbereich ohne die Bildung größerer Agglomeraten getrocknet werden.

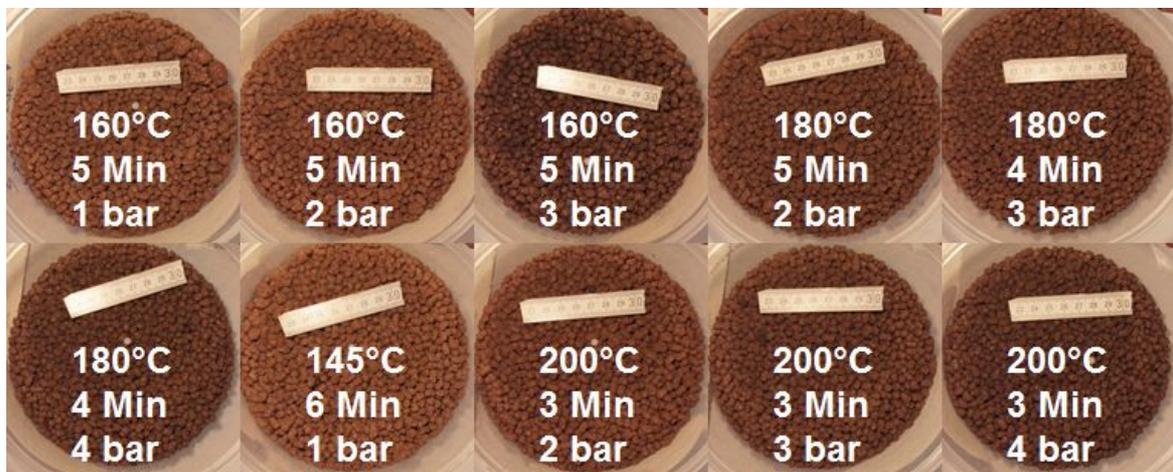


Abbildung 43: Vergleich getrockneter Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais, bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen

4.6 Trocknungsversuche Bagasse

Wirbelschichttrocknungsversuche konnten mit originär anfallender Bagasse nicht in geeigneter Weise durchgeführt werden.

Bagasse lässt sich ohne Vorbehandlung nicht homogen fluidisieren. Die fasrigen Partikel neigen untereinander zum Verhaken. Das führte bei Fluidisierungsversuchen mit Luft zur Bildung von größeren Haufwerken, die auf dem Siebboden akkumulierten und sich auch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten nicht wieder vereinzeln ließen.

Versuche zur Veränderung der fasrigen Struktur durch Formgebungsverfahren führten nicht zu kompaktierten und grobkörnigen Einzelpartikeln.

Weitere Untersuchungen, die feuchte Bagasse durch Zerkleinern in eine fluidisierbare Form zu überführen, zeigten, dass die Partikelgröße deutlich zu kleineren Durchmessern verschoben werden konnte. Bei Fluidisierungsversuchen kam es dann aber zu einem überdurchschnittlich hohen Austrag von Feinteilen. Unter solchen Bedingungen verlassen zu viele Partikel die Wirbelschicht. Somit wird dieses Trocknungsprinzip für das Produkt Bagasse unwirtschaftlich.

4.7 Trocknungsversuche Treber

Versuchsmaterial: Treber (Anhang A6)

Trockensubstanzgehalt: 30 %

Formgebung: keine

Versuchsparameter: Tabelle 10

Der Treber wurde für die Trocknungsversuche mechanisch, durch Zentrifugieren auf einen Trockensubstanzgehalt von ca. 30 % entwässert

Tabelle 10: Prozessparameter der Versuche mit Treber

Versuch Nr.	90	91	92	93	94	95	104	102	103
Druck [bar abs]	1,1	1,1	2,0	2,0	2,0	3,0	2,0	3,0	4,0
Temperatur [°C]	140	160	160	160	180	180	200	200	200
Trocknungszeit [min]	8	5	5	5	5	5	4	3	3
TS-Gehalt * [%]	97,0	93,3	93,4	94,8	98,5	97,8	99,5	98,5	98,0

* TS-Gehalt = Trockensubstanzgehalt des getrockneten Gutes

Temperaturverlauf

Abbildung 44 zeigt die Temperaturmesswerte eines Trocknungsversuches mit Treber.

Die Temperaturdifferenz, die sich zwischen der Wirbelschichttemperatur und der Temperatur oberhalb der Wirbelschicht im Erweiterungsteil des Trockners nach dem Einschleusen des Produktes einstellt, ist mit ca. 15 K deutlich geringer als das bei den der Formgebung unterzogenen Schlempeprodukten zu beobachten war (Maisschlempe ca. 40 K).

Der Temperaturverlauf ist produktspezifisch und resultiert aus einer großen Produktoberfläche bei einer guten Fluidisierung und dementsprechend aus einem guten Wärmeübergang. Ähnliche Trocknungsverläufe stellen sich normalerweise bei der Trocknung monodisperser Schüttungen ein.

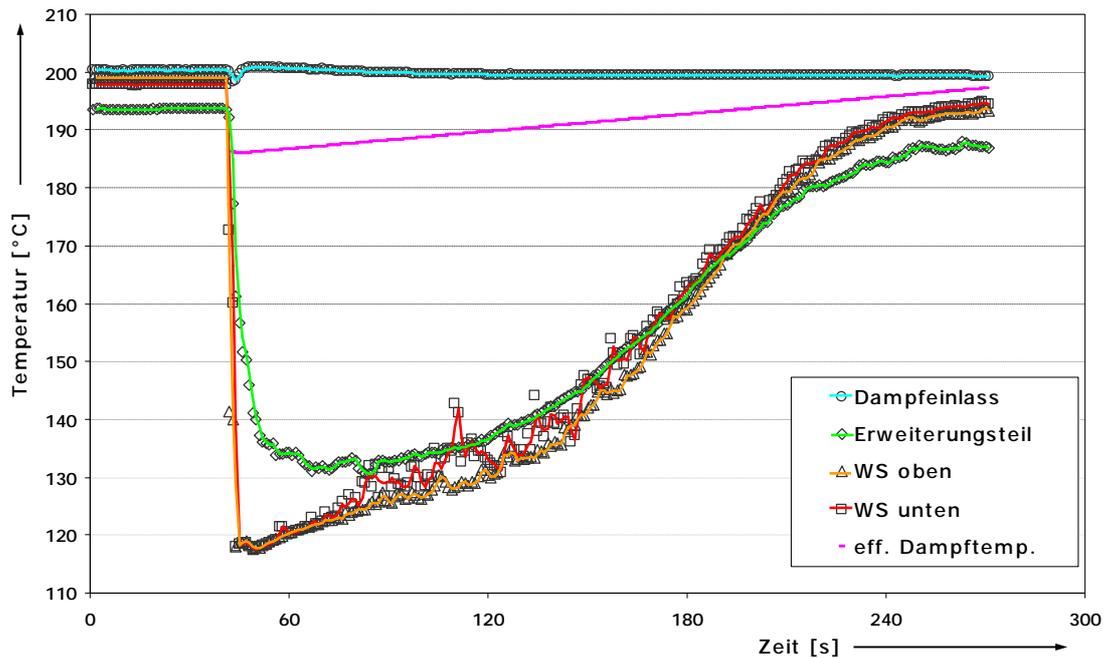


Abbildung 44: Verlauf der Temperaturen während der Trocknung von Treber bei 200 °C und 2 bar abs Dampfdruck, mit eingezeichneter effektiver Dampftemperatur

Treber konnte aufgrund seiner Partikeleigenschaften bei geringen Fluidgeschwindigkeiten von 2,6 m/s getrocknet werden (konditionierte Maisschlempe: 6 m/s).

Eine logarithmische Anpassung der effektiven Dampftemperatur ist für die Berechnung des Trocknungsverlaufes bei diesem Trocknungsverhalten nicht notwendig.

Kondensationszeit

Bei der Trocknung von Treber konnte keine ausgeprägte Kondensationsphase im Temperaturverlauf beobachtet werden. Vermutlich ist die Phase der Wasserdampfkondensation an den Treberpartikeln aufgrund deren Größe und Struktur sehr kurz und liegt im Bereich von nur wenigen Sekunden, so dass sich in Abbildung 44 nur die Trocknungsphase ohne sichtbare Abgrenzung erkennen lässt.

Massenaustrag

Aufgrund der geringen Dichte und der spezifischen Struktur der einzelnen Treberpartikel (überwiegend Schalenbestandteile) wurde trotz einer geringen Dampfgeschwindigkeit von nur 2,6 m/s (konditionierte Maisschlempe: 6 m/s) bis zu 8,0 % der Gesamtmasse mit dem strömenden Dampf aus der Wirbelschicht ausgetragen und im Zyklon abgeschieden.

Trocknungsgeschwindigkeit und Wasserbeladung

Die berechneten Trocknungsgeschwindigkeiten von Treber (Abbildung 45) liegen im Vergleich zu den Versuchen mit den Getreideschlempen um ca. 20 % höher.

Im Verlauf der Trocknung (bis 150 s) konnte im untersuchten Druck- und Temperaturbereich kein Bereich mit einer annähernd konstanten Trocknungsgeschwindigkeit festgestellt werden.

Obwohl der Treber vor der Trocknung einen deutlich höheren Wassergehalt hatte (Treber: 70 %, Mais: 47 %) resultieren aufgrund der hohen Trocknungsgeschwindigkeiten ähnliche Trocknungszeiten zur Erreichung eines definierten Endfeuchtegehaltes wie im Vergleich mit den Getreideschlempen. Treber hat mit einem 4-fach größeren Schüttvolumen im Vergleich mit den konditionierten Schlempen eine sehr große Oberfläche und besitzt damit günstigere Bedingungen für die Wärme- und Stoffübertragung.

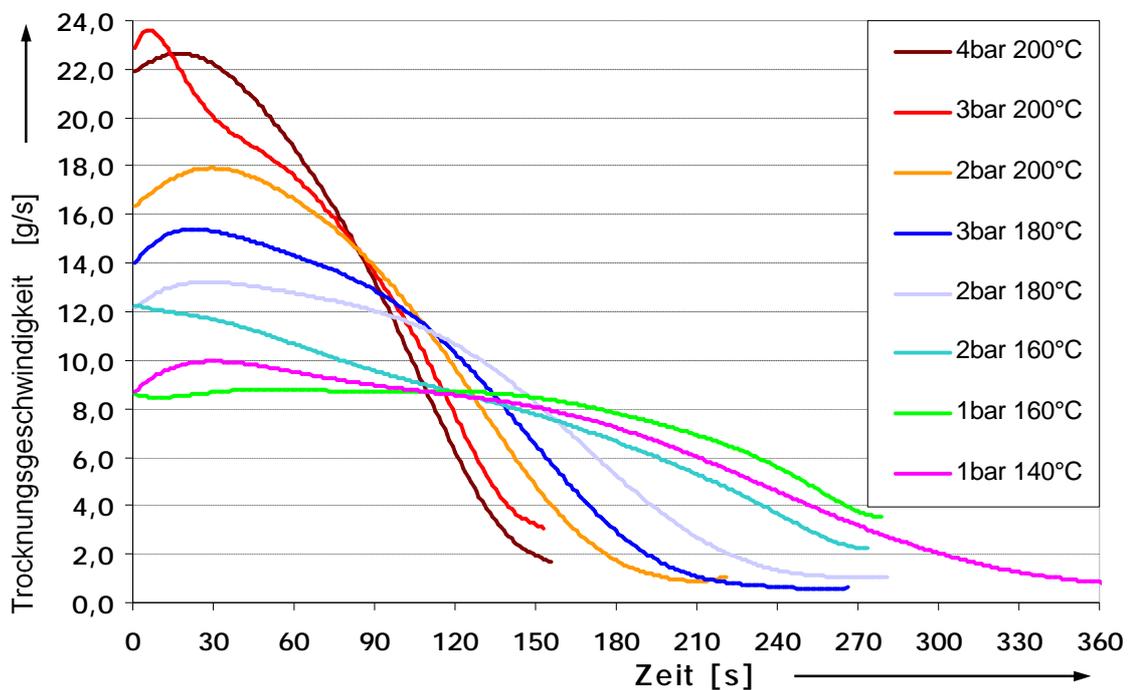


Abbildung 45: Vergleich der mittleren Trocknungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Trocknungszeit mit Dampfdruck und Dampftemperatur als Parameter, Trocknungsgut: Treber.

4.8 Bewertung der Trocknungsversuche

Die Ergebnisse der Trocknungsversuche mit verschiedenen biologischen Materialien zeigen deutlich, dass die produktspezifischen Besonderheiten den Trocknungsverlauf in der druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht maßgeblich bestimmen.

Die untersuchten Formkörper aus Maisschlempe, Weizenschlempe und Mischgetreideschlempe (Weizen, Gerste und Mais) verhalten sich von der Trocknungscharakteristik her ähnlich. Die leicht unterschiedlichen Werte für die Trocknungsgeschwindigkeit liefern die zur Auslegung des Trocknungsprozesses und die Wahl der Apparategröße notwendige Basis. Die wesentlichen Unterschiede sind in der Neigung zur Bildung von unerwünschten Agglomeraten zu finden, die speziell bei Mais bei niedrigen Prozessdrücken und Prozesstemperaturen auftreten und den Betriebsbereich stark einschränken. Bei Weizenschlempen und Mischgetreideschlempen erscheinen die Effekte über einen deutlich größeren Betriebsparameterbereich beherrschbar.

Bagasse konnte aufgrund der Partikelstrukturen nicht fluidisiert werden, eine Vorzerkleinerung führte beim Trocknen zu unwirtschaftlichem Verlust von Trockenprodukt aus der Wirbelschicht

Ein mechanisch vorentwässerter Treber konnte ohne Probleme getrocknet werden. Das Trocknungsverhalten unterscheidet sich aufgrund der Partikelform und spezifischen Oberfläche erheblich von der Trocknungscharakteristik der Schlempeprodukte.

Mit Hilfe von Trocknungsversuchen muss daher das Produktverhalten individuell und systematisch in Abhängigkeit variierteter Prozessparameter ermittelt werden. Die hieraus erhaltenen technisch und technologischen Ergebnisse bilden in Verbindung mit dem Trocknungsmodell die Grundlage zur Auslegung industrieller Trocknungsanlagen.

5 Ökonomische und ökologische Bewertung

Für die potenziell in einem Wirbelschichtverdampfungstrockner zu trocknenden Rohstoffe wurden bereits in der ersten Projektphase Berechnungen durchgeführt, um Energiekosten im ökonomischen Vergleich angeben zu können.

Insbesondere bei solchen Biomassen, die keine für die Fluidisierung geeignete eigene Partikelstruktur besitzen (z. B. Getreideschlempen), ist die erfolgreiche Formgebung ein entscheidender Aspekt für die Anwendbarkeit der Wirbelschichtverdampfungstrocknung und die damit verbundene erzielbare Energieeinsparung. Deshalb wurde im Projekt der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen auf solche der Formgebung zu unterziehende Feuchtgüter am Beispiel von Rückständen aus der Bioethanolherstellung gelegt. Wie sich in den Versuchen im Rahmen des Projektes herausstellte, konnten von den untersuchten Biomassen die Getreideschlempen (nach Formgebung) und der Treber erfolgreich in der DampfWirbelschicht getrocknet werden.

Diese Feuchtgüter bilden die stoffliche Basis für die ökonomischen und ökologischen Betrachtungen. Die realen energetischen Effekte bei der Wirbelschichtverdampfungstrocknung dieser Güter konnten mit Inbetriebnahme der Versuchsanlage mit druckaufgeladenem überhitztem Wasserdampf in den dann erfolgten Tests bewertet werden.

5.1 Massen- und Energiebilanz der Trocknungsverfahren

5.1.1 Datenbasis und Bilanzgrenzen einer Gesamtbilanz

Die Grundlage der in den folgenden Tabellen angeführten Bilanzdaten sind die Bilanzierungen des BMA-Trommeltrockners (herkömmlicher Trommeltrockner ohne Energierückgewinnung), eines Trommeltrockners mit geschlossenem Brüdenkreislauf und integrierter Nachverbrennung der Fa. Swiss Combi und des Wirbelschichtverdampfungstrockners Typ CSD von BMA. Die Angaben der für den CSD peripheren Prozessschritte Vormischen und Extrudieren wurden durch die oben beschriebenen umfangreichen Versuche zur Formgebung erarbeitet.

Den Bilanzraum der Schlempetrocknung mit dem CSD bilden die Vorbehandlung mit Mischen, Extrudieren und Rückführsystem für getrocknete Schlempe (Add-backsystem) sowie die Brüdenreinigung mit Kondensatnutzung (Energierückgewinnung) und die Trocknung selbst. Bei den beiden Trommeltrocknern wurde um die Trommeln herum bilanziert, da vorbereitende Verfahrensschritte hier nicht vorkommen und eine externe Brüdenutzung nicht möglich ist.

Massen- und Energiebilanzen basieren auf folgenden Grundlagen:

- Massenbilanz: Die Summe aller in den Bilanzraum eintretenden und aus dem Bilanzraum austretenden Massenströme ist gleich Null.

$\sum \dot{m}_E - \sum \dot{m}_A = 0$	(1)
---------------------------------------	-----

- Energiebilanz: Die Summe aller in den Bilanzraum eintretenden und aus dem Bilanzraum austretenden Energieströme (Enthalpieströme und elektrische Antriebsleistungen) ist gleich Null.

$\sum \dot{E}_E - \sum \dot{E}_A = 0$	(2)
---------------------------------------	-----

Beim Trocknen eines feuchten Gutes bleibt seine Trockenmasse konstant und die Gutsfeuchte verringert sich. In der Wirbelschichtverdampfungstrocknung mit dem CSD fällt das verdampfte Wasser als Brüden an. Die Massenbilanz ist dementsprechend:

$\dot{m}_{G,f} + \dot{m}_{D,Ej} = \dot{m}_{Br} + \dot{m}_{G,tr}$	(3)
--	-----

mit

\dot{m} Massenstrom [kg/h]

G,f Gut feucht (vor Trocknung)

D,Ej Ejektordampf – dabei handelt es sich um Treibdampf für die Dampfstrahlpumpe der Staubabscheidung im CSD, 600 kg/h, baugrößenunabhängig

Br Brüden

G,tr Gut trocken (nach Trocknung)

Der Brüden wird, wie in der Praxis nachgewiesen als feststofffrei betrachtet.

Beim Trocknen wird dem feuchten Gut durch das Zuführen von Wärmeenergie Wasser entzogen, wobei sein Trockensubstanzgehalt zunimmt. Die Menge des verdampften Wassers (Brüden) ergibt sich dabei zu:

$\dot{m}_{Br} = \dot{m}_{G,f} \cdot \left(\frac{TS_{G,tr} - TS_{G,f}}{TS_{G,tr}} \right) + \dot{m}_{D,Ej}$	(4)
---	-----

Der Trockensubstanzgehalt, mit dem die zur Trocknung eingesetzten Getreideschlempen in den Wirbelschichtverdampfungstrockner eintreten, beträgt aufgrund der notwendigen Konditionierung (Formgebung) etwa 53 %. Er wird durch das Vormischen der Komponenten Dekanterkuchen, Sirup und Trockenschlempe aus dem Trocknungsprozess eingestellt.

Für das Trocknen der Getreideschlempen in den Trommeltrocknern muss eine größere Rückführtrate des getrockneten Gutes eingestellt werden, da die Güter zwar ohne Formgebung eingesetzt werden können, aber einen Trockensubstanzgehalt von ca. 65 % aufweisen müssen.

Treber brauchte keiner Formgebung unterzogen werden und kann als mechanisch entwässertes Feuchtgut direkt in der DampfWirbelschicht eingesetzt werden.

Der Trockensubstanzgehalt des getrockneten Gutes wurde für die Bilanzierung entsprechend dem industriellen Standard zu 90 % festgelegt.

Wärmeenergie ist erforderlich, um im Trockner die Wasserverdampfung aus dem Trocknungsgut zu ermöglichen. Die Energiebilanz ergibt sich zu:

$\dot{I}_{G,f} + \dot{I}_{D,H} + \dot{I}_{D,Ej} + P_V + P_{FG} = \dot{I}_{G,tr} + \dot{I}_K + \dot{I}_{Br} + \dot{I}_{Ver}$	(5)
---	-----

mit

$$\dot{I} = \dot{m} \cdot h \quad \text{und} \quad h = c_p \cdot T$$

\dot{I} Enthalpiestrom [kW]

\dot{m} Massenstrom [kg/s]

h Spezifische Enthalpie [kJ/kg]

c_p Spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K]

T Temperatur [°C]

G,f Gut feucht (vor Trocknung)

D,H Heizdampf

D,Ej Ejektordampf – dabei handelt es sich um Treibdampf für die Dampfstrahlpumpe der Staubabscheidung im CSD

P_V Kupplungsleistung Ventilator

P_{FG} Kupplungsleistungen Formgebung (Mischen, Extrudieren)

G,tr Gut trocken (nach Trocknung)

K Kondensat

Br Brüden

Ver Verluste

Übliches Heizmedium für Trommeltrockner (BMA-Trommeltrockner, Swiss Combi) ist Rauchgas aus Erdgas oder Heizöl. Der CSD wird mit überhitztem Wasserdampf betrieben.

In der Energiebilanz für den CSD wird der zusätzliche Elektroenergiebedarf berücksichtigt, der für den Prozess der Formgebung bei den Getreideschlempen und für die Fluidisierung mittels Ventilator im Trockner benötigt wird.

Durch Wärmeverluste der Trockner wird ein vergleichsweise geringer Anteil an Energie abgeführt.

5.1.2 Arbeitsprinzipien verschiedener Trocknerbauarten

Trommeltrocknung BMA-Trommeltrockner:

Das zu trocknende Gut tritt in die Trocknungstrommel ein und bewegt sich durch den Trommelkörper zum Austritt. Der Trommelkörper rotiert (Außenantrieb, Kettenantrieb) und wirft dadurch das zu trocknende Gut um.

Das zu trocknende Gut wird in der Trommel im Gleichstrom mit Trocknungsgas durch- und überströmt. Das Trocknungsgas besteht aus Rauchgas der Direktbeheizung, das möglicherweise durch Rauchgas aus einem Dampfkraftwerk ergänzt wird. Trocknungsgas und Wasserdampf aus dem feuchten Gut treten am Trommelende als Trocknungsbrüden ohne weitere Nachnutzung in die Umgebung aus.

Trommeltrocknung System Swiss Combi

Beim System Swiss Combi ist der Transport des Trocknungsgutes analog zur klassischen Trommeltrocknung, jedoch wird der Trocknungsbrüden teilweise im geschlossenen Kreis geführt. Dieser Brüdenkreislauf wird durch Rauchgase erhitzt, wobei ein geringer Teil durch das Verbrennen von organischen Bestandteilen aus dem Trocknungsbrüden gewonnen wird. Beim System Swiss Combi erfolgt eine interne Energierückgewinnung, die in der Trocknung selbst genutzt wird.

Trocknung in Wirbelschichtverdampfungstrockner Typ CSD:

Dekanterkuchen, Sirup und Addback werden in einem Extruder zu Formkörpern agglomeriert und dem Trockner zugeführt. Der Wirbelschichtverdampfungstrockner weist einen internen Brüdenkreislauf auf, der durch hochgespannten Heißdampf (ca. 25 bar) in einem Wärmeübertrager überhitzt wird. Der abgeführte Brüden des Trockners wird als Heißdampf im Wärmeübertrager eines externen Verbrauchers (Verdampfer, Destillationskolonne) eingesetzt.

5.1.3 Auslegung der gegenübergestellten Trockner

Durch das Ermitteln der Trocknungskinetik in der Versuchsanlage wird die notwendige Aufenthaltszeit im industriellen Trockner (CSD) festgelegt. Daraus ergibt sich die notwendige Baugröße der Trocknungsanlage.

In Tabelle 11 sind die wesentlichen Bedingungen der Versuchstrocknung und der Trocknung im CSD Baugröße D beispielhaft gegenübergestellt.

Tabelle 11: Vergleich ausgewählter Parameter der Wirbelschichtverdampfungstrocknung von Versuchs- und Industrieanlage

Anlage	VAnl	VAnl	VAnl	VAnl	CSD_D
Feuchtgut Rohstoffbasis	Mais	Weizen	Mischung	Treber	-
Prozessführung	dk	dk	dk	dk	k
Modelltyp	ö.st.	ö.st.	ö.st.	ö.st.	z.st.
Zirkulationsdampfdruck p [bar]	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9
Zirkulationsdampf Temperatur T [°C]	200,0	200,0	200,0	200,0	203,0
Zirkulationsgeschwindigkeit w [m/s]	6,0	5,4	6,0	2,6	5,6
Zirkulationsdampfmassestrom MF [kg/h]	1.268	1.141	1.268	549	623.385
Durchsatz Feuchtgut [kg/h]	-	-	-	-	75.100
Schichtmasse im Trockner m [kg]	1,0	1,0	1,0	1,0	5.247
Schichtdruckverlust Maispellets $\Delta p_{v,s}$ [mbar]	3	3	3	3	22
Schichthöhe h [m]	1	1	1	1	1
Trockensubstanzgehalt Feuchtgut [%]	53	55	53	30	53
Verhältnis Zirkulationsdampf zu Gutmasse [kg/kg]	84	96	82	42	42
Trockensubstanzgehalt Trockengut [%]	86,9	97,7	95,6	98,0	87,0
Trocknungsdauer Δt [min]	3,3	4,3	3,0	2,8	6,2
Trocknungsdauer Δt [min] bis 87 % Trockensubstanzgehalt	3,3	3,5	2,4	2,2	6,2

Erläuterungen zu Tabelle 11:

VAnl	...	Versuchsanlage
dk	...	diskontinuierlich
k	...	kontinuierlich
ö.st.	...	örtlich stationär
z.st.	...	zeitlich stationär

Unter vergleichbaren Trocknungsbedingungen kann die Trocknungsdauer der Feuchtgüter in der Versuchsanlage direkt in die Aufenthaltszeit im kontinuierlichen industriellen Trocknungsprozess umgerechnet werden. Die mittlere Aufenthaltszeit des Gutes im kontinuierlich betriebenen Wirbelschichtverdampfungstrockner ist:

$t = \frac{m_G}{\dot{m}_{G,f}}$	(6)
---------------------------------	-----

mit

m_G Masse des Gutes im Trockner [kg]

$\dot{m}_{G,f}$ Massenstrom des feuchten Gutes (Durchsatz) [kg/s]

und der Schichtdruckverlust:

$\Delta p_{v,s} = \frac{m_G \cdot g}{A}$	(7)
--	-----

mit

m_G Masse des Gutes im Trockner [kg]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

A Anströmbodenfläche [m²]

Der Schichtdruckverlust ist eine direkt messbare Prozessgröße und kann im industriellen Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung der mittleren Aufenthaltszeit herangezogen werden.

Das entscheidende Maßstabsübertragungskriterium "Trocknungszeit" ist das Verhältnis von Zirkulationsdampf zu Gutmasse (Tabelle 11). Verdoppelt sich dieses, so halbiert sich die Trocknungszeit. Im Vergleich folgen etwa gleiche Trocknungszeiten für Mais- und Weizenschlempe. Die Schlempe aus der Getreidemischung trocknet mit etwas größerer Geschwindigkeit als Mais- und Weizenschlempe. Treber weist eine deutlich höhere Trocknungsgeschwindigkeit auf als die Getreideschlempen. Folglich kann hier ein kleinerer Apparat für dieselbe Wasserverdampfungsleistung als bei Mais und Weizen ausgewählt werden.

Mit den Ergebnissen der Trocknungsversuche in der Technikumsanlage werden auf die oben angegebene Weise folgende Apparategrößen der Trockner im Industriemaßstab festgelegt und diese Trockner ausgelegt:

- BMA CSD für Maisschlempe à Baugröße D
- BMA CSD für Weizenschlempe à Baugröße D
- BMA CSD für Getreideschlempe aus Weizen, Gerste, Mais à Baugröße C
- BMA CSD für Treber à Baugröße B
- BMA–Trommeltrockner für Maisschlempe à Baugröße F

Bei der Baugrößenwahl und der Auslegung wurden Schlempedurchsätze und Wasserverdampfungsleistungen gewählt, die in ihrer Größenordnung miteinander vergleichbar sind.

Für das System Swiss Combi wurden keine eigenen Auslegungsberechnungen vorgenommen. Die Angaben sind Prozessdaten eines Betreibers.

5.2 Ökonomische Bewertung

In der Tabelle 12 ist ein Auszug der Gegenüberstellung der Kosten (Fixkosten und laufende Kosten) für die Schlempetrocknung von Ethanolfabriken mit Trommeltrockner (ohne Energierückgewinnung BMA Baugröße F und mit integrierter Energierückgewinnung von Fa. Swiss Combi) und Wirbelschichtverdampfungstrockner CSD angeführt. Auch die Trocknung von Treber mittels CSD ist in der Vergleichsdarstellung enthalten.

Die spezifischen Trocknungskosten beziehen sich auf den Massenstrom Dekanterkuchen und Sirup. Die prozentualen spezifischen Trocknungskosten wurden auf der Vergleichsbasis BMA-Trommeltrockner (100 %) ermittelt.

Den Amortisationszeiten liegt auch der Vergleich einer Investition in die BMA-Trocknungstrommel zugrunde. Eine ausführliche Zusammenstellung ist im Anhang E (Tabelle E1) zu finden. Die Trocknungsanlagen Trommel Swiss Combi, Trommel BMA und CSD besitzen jeweils unterschiedliche Verarbeitungskapazitäten. Bei der Schlempetrocknung wird die Naßschlempemischung, bestehend aus Dekanterkuchen, Sirup und rückgeführter Trockenschlempe für die jeweiligen Trocknungsverfahren mit unterschiedlichem Trockensubstanzgehalt eingesetzt. Für die Trommeltrocknung beträgt der Trockensubstanzgehalt der Mischung ca. 65 % und für die CSD-Trocknung ca. 53 %.

Tabelle 12: Kostenvergleich Trommeltrocknung und CSD-Trocknung von Biomassen

		Trommel Fa. Swiss Combi	BMA-Trommeltrocknung Baugröße F	CSD-Trocknung Baugröße D	CSD-Trocknung Baugröße C	CSD-Trocknung Baugröße B
Rohstoffbasis	-	Weizen	Mais	Mais, Weizen	Mischung: Gerste, Weizen, Mais	Treber
Durchsatz Naßschlempe-Mischung	[t/h]	19,0	79,3	75,1	75,2	71,6
Durchsatz Dekanterkuchen und Sirup	[t/h]	7,8	30,5	42,7	42,8	40,8
Wasser-Verdampfungsleistung	[t/h]	5,4	22,0	30,0	30,7	30,1
Spez. Trocknungskosten	[EUR/t]	32,08	32,98	11,79	11,07	11,15
Proz. Spez. Trocknungskosten	[%]	97	100	36	34	34
Amortisationszeit	[a]	-	-	1,3	0,8	0,6

Die Mischung wird durch Rückführen trockenen Materials (Add-back) hergestellt. Entsprechend der Verarbeitungsleistung von Dekanterkuchen und Sirup, die im technologischen Verhältnis von ca. 1,4 anfallen, liegen diesen Daten folgende Ethanolproduktionsraten zugrunde:

- Trommeltrocknung Swiss Combi ca. 2,5 t/h (250.000 m³/a)
- Trommeltrocknung BMA ca. 10,9 t/h (ca. 108.900 m³/a)
- CSD-Trocknung ca. 15,2 t/h (ca. 151.850 m³/a)

Die Kosten für die Elektroenergie wurden mit 0,06 EUR/kWh abgeschätzt und die Kosten für den Heizdampf über den kesselwirkungsgradabhängigen Heizölverbrauch.

5.2.1 Energetische Vorteile des CSD

Bei der Trommeltrocknung und bei der CSD-Trocknung werden die Energieformen Elektroenergie (elektrische Antriebe) und Wärmeenergie (Heizdampf) eingesetzt. Der Anteil der Elektroenergie am Gesamtenergieaufwand ist verhältnismäßig gering. Er beträgt bei der BMA-Trommeltrocknung etwa 2 %, beim System Swiss Combi ca. 6 % und bei der CSD-Trocknung etwa 35 % bezogen auf die effektive Gesamtenergie.

Bei der CSD-Trocknung können ca. 87 % der eingesetzten thermischen Trocknungsenergie (Heizdampf) durch Brüdenkondensation zurückgewonnen werden. Somit ist die effektive Trocknungsenergie beim CSD deutlich geringer als bei der BMA-Trocknungstrommel, da hier keine Wärmerückgewinnung möglich ist. Das System Swiss Combi arbeitet bereits mit einer internen Wärmerückgewinnung und stellt somit einen energetischen Vorteil gegenüber herkömmlichen Trommeltrocknern dar. Verglichen mit dem CSD, ist der rückgewinnbare Energieanteil jedoch recht gering.

5.2.2 Ökonomische Vorteile des CSD

Für die Betrachtung wurde von 333 Betriebstagen pro Jahr ausgegangen. Für die restlichen 32 Tage wurden Instandhaltungs- und Wartungsunterbrechungen sowie unvorhergesehene Anlagenstopps angenommen. Die Investitionsbeträge sollen in 10 Jahre abgeschrieben werden. Die Reparatur- und Instandhaltungskosten wurden für alle Trockner zu 2 % der Abschreibungen angenommen und die Finanzierungskosten zu jeweils 4 %. Die Arbeitskraftstunde wurde mit 50,00 EUR kalkuliert. Der Personalaufwand für den Betrieb von Trommel- und CSD-Trocknung kann zu 3/4 einer Arbeitskraft (1/2 bei Swiss Combi Trockner) bei 333 Produktionstagen im Jahr und kontinuierlicher Produktion angenommen werden.

Werden die Gesamtkosten auf die jeweils zu verarbeitenden Mengen von Dekanterkuchen und Sirup bezogen, stellen sie als spezifische, hier durchsatzunabhängige Größen, normierte Werte dar, die miteinander verglichen werden können.

Die spezifischen Gesamtkosten der Schlempletrocknung von Weizen und Mais mit dem CSD betragen ca. 36 % der Kosten der Trommeltrocknung von Mais-schlempe. Durch den Betrieb des CSD (Rohstoffbasis Mais und Weizen) können

im Jahr bei einer Verarbeitung von 244.000 t Dekanterkuchen und Sirup (30,5 t/h) ca. 5,2 Mio. EUR im Vergleich zum Trommelbetrieb eingespart werden. Die Differenz der Investitionskosten CSD zum BMA-Trommeltrockner beträgt etwa 6,5 Mio. EUR. Somit amortisiert sich der Einsatz des CSD nach ca. 1,3 Jahren. Folglich ist die Amortisationszeit deutlich geringer als 5,0 Jahre und deshalb ist die Schlempetrocknung mit dem CSD in Ethanolabriken aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten hochinteressant. Bei noch günstigeren Trocknungskinetiken, wie sie insbesondere für Treber vorliegen, gilt diese Aussage in verstärktem Maße (Vergleichsbasis BMA-Trommeltrocknung Maisschlempe). Der Vergleich zeigt den ökonomischen Vorteil verringerter Apparategrößen beim CSD.

5.2.3 Bewertung der Investitionskosten

Der CSD ist als Druckbehälter zu konstruieren, zu fertigen, zu testen und abnehmen zu lassen. Der Aufwand, insbesondere der Materialverbrauch, ist ungleich höher als der des Trommeltrockners, der kein Druckbehälter ist. Darüber hinaus entfallen bei der Trommel sämtliche Ausrüstungen zur Vorbehandlung der Schlempe und zur Brüdenbehandlung. Auch die MSR-Technik gestaltet sich in der Wirbelschichtverdampfungstrocknung deutlich aufwendiger als beim Trommeltrockner.

Die Anwendung des CSD kann in einigen Fällen auf technische und ökonomische Hemmnisse stoßen. Der CSD muss als Apparat wärmetechnisch in bestehende Anlagen integriert werden. Falls die Voraussetzungen dafür nicht erfüllt sind (z.B. kein Platz vorhanden, Umbauten für Brüdenutzung zu aufwendig) ist der Einsatz des CSD zur Zeit eher unwahrscheinlich.

Bei dieser Betrachtung sind die sich derzeit verändernden Bedingungen des zukünftigen CO₂-Zertifikatehandels noch nicht berücksichtigt. Bei zu erwartender Verteuerung von CO₂-Zertifikaten ist für die Betreiber energieintensiver Industrien (Ethanolherstellung, Zuckererzeugung, Holzverarbeitung und anderer Massengüter) ein zusätzlicher Anreiz für den Einsatz des CSD absehbar.

Das Betreiben einer CSD-Trocknungsanlage erfordert, wie auch bei anderen neuen Trocknungsverfahren, qualifiziertes Personal und die Bereitschaft, Betreibererfahrungen zu sammeln und diese für eine optimale Fahrweise des Prozesses auch zu nutzen.

5.3 Ökologische Bewertung

5.3.1 Berücksichtigung von Primärenergiefaktoren

Aufgrund der Tatsache, dass der Anteil der Elektroenergie bei der CSD-Trocknung größer ist als bei der Trommeltrocknung, verringert sich das Energieeinsparpotential des CSD etwas gegenüber der BMA-Trommel beim Umrechnen des Energieaufwandes auf die Primärenergien. Dieser Sachverhalt ist in der Tabelle 13 dargestellt. Die spezifischen Energieaufwendungen (Trocknungsenergie und Primärenergie) beziehen sich auf den Massenstrom Dekanterkuchen und Sirup. Die prozentualen spezifischen Energieaufwendungen wurden auf der Vergleichsbasis BMA-Trommeltrockner (100 %) ermittelt. Eine ausführliche Zusammenstellung ist im Anhang E (Tabelle E2) zu finden.

Tabelle 13: Vergleich Primärenergieeinsatz bei Trommeltrocknung und CSD-Trocknung von Biomassen

		Trommel Fa. Swiss Combi	BMA- Trommel- trocknung Baugröße F	CSD- Trocknung Baugröße D	CSD- Trocknung Baugröße C	CSD- Trocknung Baugröße B
Rohstoffbasis	-	Weizen	Mais	Mais, Weizen	Mischung: Gerste, Mais, Weizen	Treber
Durchsatz Naßschlempe- Mischung	[t/h]	19,0	79,3	75,1	75,2	71,6
Durchsatz Dekanterkuchen und Sirup	[t/h]	7,8	30,5	42,7	42,8	40,8
Wasser- Verdampfungs- leistung	[t/h]	5,4	22,0	30,0	30,7	30,1
Summe spez. Energien gesamt	[kJ/kg]	1.888	2.182	499	494	514
Summe spez. Einsatz Primärenergie	[kJ/kg]	2.243	2.456	801	795	817
Proz. Spez. Energien gesamt	[%]	86	100	23	23	24
Proz. Spez. Einsatz Primärenergie	[%]	91	100	33	32	33

Das Verhältnis von spezifischem Energieeinsatz CSD zu spezifischem Energieeinsatz BMA-Trommel ist etwa 0,2. Mit den entsprechenden Primärenergiefaktoren berechnet, beträgt dieses Verhältnis für den Einsatz von Primärenergien 0,3. Somit wird durch den Einsatz des CSD im Vergleich zur BMA-Trommel infolge Nutzung der Brüdenenergie um 70 % Primärenergie eingespart. Im Verhältnis zum System Swiss Combi verringert sich dieser Vorteil des CSD auf 64 % ist aber immer noch sehr deutlich.

Unabhängig davon, ob Produktionsprozesse zum Erzeugen von Ethanol auf der Basis von Getreide oder Zuckerrüben als nachhaltig betrachtet werden, liefert der Einsatz des CSD zur Schlempetrocknung einen großen Beitrag zur Primärenergieeinsparung. Diese Aussage gilt auch im Zusammenhang mit den jeweiligen CO₂-Emissionen.

5.3.2 CO₂-Bilanz

In der Tabelle 14 ist der entsprechende Vergleich zwischen Trommeltrocknern und CSD angeführt. Die spezifischen Massenströme beziehen sich auf den Massenstrom Dekanterkuchen und Sirup. Die prozentuale spezifische CO₂-Emission wurde auf der Vergleichsbasis BMA-Trommeltrockner (100 %) ermittelt. Der jährliche CO₂-Massenstrom basiert auf dem Durchsatz an Dekanterkuchen und Sirup von 30,5 t/h. Eine ausführliche Zusammenstellung ist im Anhang E, Tabelle E3, zu finden.

Unter der Voraussetzung, dass bei der Verbrennung von 1 kg Heizöl EL 3,16 kg CO₂ entstehen, beträgt die spezifische CO₂-Emission bei der CSD-Trocknung 0,04 kg/kg und bei der BMA-Trommeltrocknung 0,17 kg/kg. Bezugsgröße ist auch hier wieder die Trocknung von Dekanterkuchen und Sirup. Mit dem System Swiss Combi als Vergleichsbasis verringert er sich auf 82 %. Durch den Einsatz des CSD zur Schlempetrocknung verringert sich die CO₂-Emission im Vergleich zur BMA-Trommeltrocknung auf ca. 24 %.

Tabelle 14: Vergleich CO₂-Emission bei Trommeltrocknung und CSD-Trocknung von Biomassen

		Trommel Fa. Swiss Combi	BMA- Trommel- trocknung Baugröße F	CSD- Trocknung Baugröße D	CSD- Trocknung Baugröße C	CSD- Trocknung Baugröße B
Rohstoffbasis	-	Weizen	Mais	Mais, Weizen	Mischung: Gerste, Mais, Weizen	Treber
Durchsatz Naßschlempe- Mischung	[t/h]	19,0	79,3	75,1	75,2	71,6
Durchsatz Dekanterkuchen und Sirup	[t/h]	7,8	30,5	42,7	42,8	40,8
Wasser- Verdampfungs- leistung	[t/h]	5,4	22,0	30,0	30,7	30,1
Summe spez. Massenstrom Heizöl	[kg/kg]	0,0455	0,0527	0,0124	0,0122	0,0127
Spez. Massenstrom CO ₂	[kg/kg]	0,14	0,17	0,04	0,04	0,04
Proz. Spez. Massenstrom CO ₂	[%]	86	100	23	23	24
Massenstrom CO ₂ jährlich bei 30,5t/h Durchsatz	[t/a]	35.076	40.618	9.513	9.408	9.800

5.4 Ökonomischer und ökologischer Vergleich

In Abbildung 46 werden die drei Bewertungskriterien, Wirtschaftlichkeit, Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen gegenübergestellt. Für jedes dieser Bewertungskriterien ergibt sich ein Vorteil beim Einsatz des CSD zur Schlempe- und Trebertrocknung anstelle herkömmlicher Trommeltrockner oder Trommeltrockner mit integrierter Energierückgewinnung (Swiss Combi). Die Bezugsbasis der dargestellten spezifischen Größen ist der Massenstrom von Dekanterkuchen und Sirup.

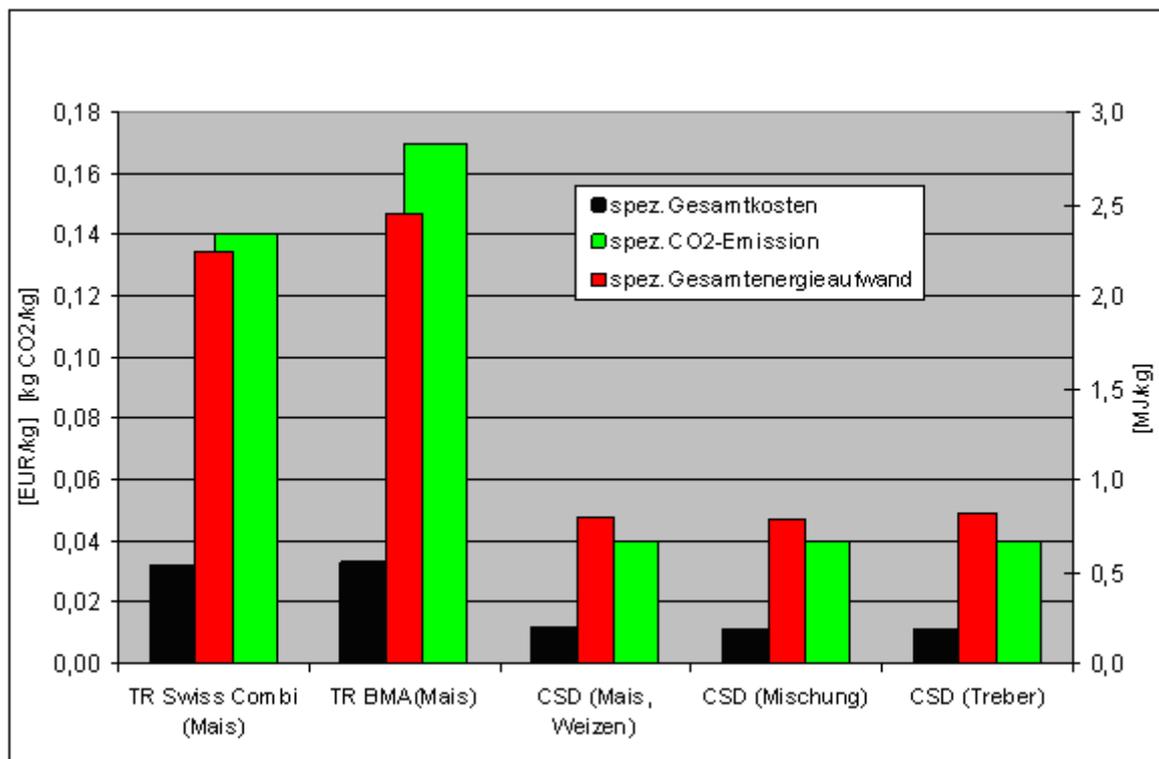


Abbildung 46: Vergleich spezifische Gesamtkosten, spezifische CO₂-Emission und spezifischer Gesamtenergieeintrag bei Trommeltrocknung und CSD-Trocknung von Biomassen

Die spezifischen Gesamtkosten der Schlempetrocknung von Weizen und Mais mit dem CSD betragen ca. 36 % der Kosten der Trommeltrocknung von Maischlempe. Im Vergleich zur Investition eines Trommeltrockners amortisiert sich die Mehrinvestition in einen CSD nach ca. 1,3 Jahren.

Infolge der Nutzung der Brüdenenergie wird bei einem CSD 70 % der Primärenergie eingespart. Im Verhältnis zum System Swiss Combi verringert sich die Einsparung auf 64 %.

Noch deutlicher wird der Vorteil beim Kriterium CO₂-Emissionen: Durch den Einsatz des CSD zur Schlempetrocknung reduziert sich die CO₂-Emission im Vergleich zur BMA-Trommeltrocknung auf ca. 1/4. Damit ist der Nachweis der Umweltentlastung erbracht.

Falls der Handel mit CO₂-Emissionszertifikaten Anwendung auf die untersuchten Verfahren findet, ergeben sich zusätzliche positive wirtschaftliche Aspekte bei der Anwendung des CSD gegenüber der Trommeltrocknung.

6 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt "Wirbelschichttrocknung mit überhitztem Wasserdampf in der Lebensmittel verarbeitenden Industrie" wurden in Forschungs Kooperation von BMA Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG, Braunschweig und der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik die notwendigen Voraussetzungen für eine Trocknung von Biomasse in einem Wirbelschichtverdampfungstrockner untersucht, um so das Verfahren mit den Vorteilen in Bezug auf Energieeinsparung und Minderung der CO₂-Emission über derzeitige Einsatzgebiete hinaus anwenden zu können. Im Fokus standen dabei die Trocknung von Schlemphen aus der Ethanolproduktion, Bagasse aus der Rohrzuckerproduktion, Treber aus der Bierherstellung und Klärschlamm.

Die körnige, breiige und teilweise teigige Biomasse konnte in den überwiegenden Fällen erfolgreich so konditioniert werden, dass die Fluidisierung in der Wirbelschicht gewährleistet ist. Mit den untersuchten Verfahren Extrudieren, Pelletieren, Granulieren und Zerkleinern wurden Möglichkeiten und Grenzen gezeigt, die von der Materialzusammensetzung und notwendigen Partikeleigenschaften bestimmt werden. Für die aus dem Ethanolherstellungsprozess anfallenden Getreideschlemphen eigneten sich besonders das Extrudieren und das Granulieren zur Herstellung von Formkörpern, wobei durch rückgeführte Trockenschlempe die Partikelfeuchtigkeit eingestellt werden musste. Bagasse konnte nicht in eine fluidisierbare Form überführt werden. Treber konnte mit keinem der vier untersuchten Verfahren erfolgreich konditioniert werden, Klärschlamm ausschließlich mit dem Tellergranulator.

Für die realitätsnahe und praxisrelevante Untersuchung der Wirbelschichttrocknung im überhitzten Wasserdampf wurde eine Versuchsanlage aufgebaut. Das vorgesehene Anlagenkonzept für die Trocknung in der Dampf Atmosphäre bis zu 4,5 bar Überdruck und bis zu 210 °C Trocknungstemperatur wurde erfolgreich umgesetzt.

Die Modellvorstellung zur Trocknung von Gütern in der Wirbelschicht wurde mit den untersuchten Produkten validiert und auf den Betriebsfall der druckaufgeladenen Dampf Wirbelschicht angepasst.

Die Untersuchungen zeigten die Notwendigkeit, die Biomassekonditionierung und die Biomassetrocknung in der druckaufgeladenen Dampf Wirbelschicht aufeinander abzustimmen. Während Schlemphen immer einer Konditionierung mit Formgebung

unterworfen werden müssen, ist für Treber eine mechanische Vorentwässerung ausreichend zur Trocknung in der Wirbelschicht. Bagasse war nach dem Konditionieren nicht für die Prozessbedingungen der Wirbelschicht geeignet. Für konditionierten Klärschlamm wurde das Trocknungsverhalten im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht untersucht.

Die untersuchten Produkte sind teils nur in einem engen technologischen Fenster handelbar. Klebrigkeit und Festigkeit der konditionierten Partikel bestimmen die Förder- und Transportfähigkeit. Eine ausreichende Stabilität des Trocknungsgutes ist eine Vorbedingung zur Vermeidung von Staub in der Trocknungsanlage. Chemische Reaktionen, vor allem Pyrolyse oder Maillard-Reaktion, führen in der Regel zu Qualitätseinbußen. Mit den nun vorliegenden Erkenntnissen können diese bei der Anlagenauslegung berücksichtigt werden.

Eine ökonomische und ökologische Bewertung der BMA-Wirbelschichttrocknung im Vergleich zu Trommeltrocknungsverfahren zeigt den deutlichen Vorteil in Bezug auf Gesamtkosten, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen. Die Mehrkosten bei einer Neuinvestition in einen Trockner Bauart Cylindrical Steam Dryer (CSD) amortisieren sich innerhalb von etwa 1,5 Jahren. Die erzielbare Umweltentlastung liegt bei ca. 75 % bezogen auf die CO₂-Emissionen.

Die breite Markteinführung dieses Trocknungsverfahrens in bestehende Industrien stößt derzeit noch auf technische und ökonomische Hemmnisse. Der CSD muss als Apparat wärmetechnisch in bestehende Anlagen integriert werden. Falls die Voraussetzungen dafür nicht erfüllt sind, ist der Einsatz des CSD zur Zeit eher unwahrscheinlich. Für die Neuinstallation der Technologie sind weitere Untersuchungen anzustellen, welche die Einbindungsfähigkeit des CSD, die Konditionierungsfähigkeit der Trocknungsgüter und die Behandlungsfähigkeit im CSD (Fluidisierung und Stabilität) nachweisen.

Das vorgeschlagene Konzept zur Trocknung von Biomasse in der Wirbelschicht konnte anhand einiger ausgewählter Produkte als technisch umsetzbar bewiesen werden. Für zukünftige Anwendungen muss mit Hilfe von Versuchen zur Konditionierung und Trocknung das Produktverhalten systematisch in Abhängigkeit variierter Prozessparameter ermittelt werden. Die hieraus erhaltenen technischen und technologischen Ergebnisse bilden in Verbindung mit dem Trocknungsmodell die Grundlage zur Auslegung industrieller Trocknungsanlagen.

Die Forschungspartner danken der Deutsche Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Forschungsprojekts unter dem Förderkennzeichen 26568 - 24/2.

7 *Ausblick*

Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Nachweis erbracht werden, dass originär flüssiges bis pastöses Ausgangsprodukt - konditioniert zu einem grobkörnigen Schüttgut - in der druckaufgeladenen DampfWirbelschicht unter stabilen und reproduzierbaren Prozessbedingungen getrocknet werden kann. Die prognostizierten hohen Einsparungen hinsichtlich des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und die damit verbundenen CO₂-Vermeidungspotentiale im Vergleich zu konventionellen Trocknungsverfahren konnten für einen Teil der untersuchten Rohstoffe bestätigt werden.

Zur Übertragung der vorliegenden Ergebnisse, dieser bisher nur in der Zuckerindustrie eingesetzten Trocknungstechnologie, bedarf es aus Sicht des industriellen Kooperationspartners der in der Prozessindustrie üblichen Schritte zur Maßstabsvergrößerung. Hiermit sollen Vorbehalte und tatsächliche Umsetzungsrisiken in den Produktionsmaßstab reduziert werden.

Die bisherige Befassung mit der Thematik zeigt, dass in bestehenden Industrien mit etablierten Infrastrukturen hinsichtlich der Energieerzeugung von Dampf und Strom und dessen Verbrauch häufig die Einbindung einzelner deutlich energetisch effizienterer Verfahrensstufen aus gesamtwirtschaftlichen Gründen nicht möglich zu sein scheint. Dies liegt vor allem an zu hohen Zusatzinvestitionen in die notwendige Anpassung der bereits vorhandenen Infrastrukturen. Damit sind solche Standorte für den Einsatz der energetisch gekoppelten mit Dampf betriebenen Wirbelschichttrocknung zwar technisch geeignet, allerdings für eine wirtschaftliche Realisierung derzeit nicht in Betracht zu ziehen.

Weitere Hemmnisse zur Verbreitung der hier betrachteten Technologie liegen in deren deutlich höheren Investitionskosten im Vergleich zu den konventionellen Trocknungsverfahren sowie den noch fehlenden Referenzanlagen außerhalb der Zuckerindustrie.

Aus ökologischer Sicht wäre die weitere beispielhafte Anwendung der in diesem Forschungsprojekt aufgezeigten Konditionierungs- und Trocknungstechnologie in bisher nicht betrachtete Prozessindustrien von hohem Interesse. Daher erscheint es zwingend erforderlich weitere wissenschaftlich technische Untersuchungen zur wirtschaftlichen Einbindungsfähigkeit der Verdampfungstrocknung anzustellen. Idealerweise könnte dies im Rahmen eines weiteren Drittmittelprojektes unter Einbindung eines Anwenders aus der Prozessindustrie, einer wissenschaftlichen

Einrichtung und mit Hilfe der in diesem Projekt erstellten Technikumsanlage erfolgen.

Daran anschließend wäre mit einem Demonstrationsvorhaben die zuverlässige Betriebsweise und Verfügbarkeit der Anlagentechnologie nachzuweisen, um somit die Akzeptanz für weitere Industriezweige nachhaltig zu erhöhen.

Die Situation stellt sich grundsätzlich sehr viel positiver dar, wenn Fabriken mit integrierter Dampfwirbelschichttrocknung neu geplant und die im energetischen Verbundsystem einzubindenden Verfahrensstufen im Rahmen eines umfassenden Gesamtkonzeptes optimal aufeinander abgestimmt werden können. Der Nachweis einer hinreichenden Anlagenverfügbarkeit im Hinblick auf die Konditionierung und Trocknung wäre gleichermaßen in einem Demonstrationsvorhaben zu erbringen.

Praxisrelevante Technikumsversuche in der mit überhitztem Wasserdampf druckaufgeladenen Wirbelschicht waren bisher in Deutschland und Europa nicht möglich, weil hierzu keine geeigneten Versuchseinrichtungen zur Verfügung standen. Diese Voraussetzungen sind bei BMA im Rahmen des von der DBU kofinanzierten Drittmittelprojektes geschaffen worden.

Somit können nunmehr alle erdenklichen zu trocknenden Produkte verschiedener Prozessindustrien unter praxisrelevanten Bedingungen untersucht werden. Auf diese Weise kann ein potentieller Beitrag für die Einsparung von fossiler Energie und die Vermeidung von CO₂ - Emissionen geleistet werden.

8 Quellen

- [1] Vauck, W.; Müller, H.: Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 8. Aufl., 1989
- [2] Holmer, B.: Einfluss von Betriebs- und Formulierungsparametern der Zerkleinerung und Pelletierung von Bagasse auf die verarbeitungstechnischen Eigenschaften während der Wirbelschichtverdampfung. Braunschweig, Univ., Bachelorarbeit, 2012
- [3] Hemming, W.; Wagner, W.: Verfahrenstechnik. Würzburg: Vogel Buchverlag, 11. Aufl., 2001
- [4] Naumann, D.: Untersuchungen zu stofflichen Veränderungen von Trocknungsgütern unter Temperatur- und Druckbedingungen der DampfWirbelschicht. Braunschweig, Univ., Diplomarbeit, 2011
- [5] Titscher, L.: Untersuchung zur Bestimmung des Temperaturverlaufs im Trocknungsgut anhand der Pyrolyseerscheinungen von Schlempepartikeln. Braunschweig, Univ., Diplomarbeit, 2012
- [6] Langweg, F.: Untersuchung zur Wirbelschichtverdampfungstrocknung von Zuckerrübenschnitzeln in überhitztem Wasserdampf. Berlin, Univ., Diplomarbeit, 2012
- [7] Machnow, E.: Modellierung der diskontinuierlichen Wirbelschichttrocknung körniger Güter mit überhitztem Wasserdampf und Heißluft. Magdeburg, Univ., Diss. 2001
- [8] Goroschko, W. D.; Rosenbaum, R. B.; Todes, O. M.: ПРИБЛИЖЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГИДРАВЛИКИ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ И СТЕЧЕННОГО ПАЛЕНИЯ. Erdöl und Erdgas (Neft i Gaz) 1 (1958) S. 125
- [9] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 6. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991

9 Veröffentlichungen

Krell, L.; Caspers, G.; Haida, H.; Behns, W.; Mörl, L.

Drying of renewable raw materials in superheated water vapor.

Drying 2010: IDS 2010, Vol. B, S. 1215-1220

Gaßmann, J.

Versuchsanlage in Betrieb genommen.

BMA Informationen 50 (2012) S. 39

Anhang A: Herkunft und Zusammensetzung der untersuchten Biomassen und Materialien

A1 Maisschlempe

Herkunft: Ethanolherstellungsprozeß
Central MN Ethanol Coop., Little Falls, USA

Tabelle A1: Maisschlempe, Hauptbestandteile der Komponenten

Komponente	Dekanterkuchen	Sirup	Trockenschlempe
Wasser	70,8 %	73,3 %	10,5 %
Trockensubstanzgehalt	29,2 %	26,7 %	89,5 %
Proteine	7,9 %	5,2 %	22,8 %
Fett	4,9 %	5,3 %	11,0 %
Faser	6,9 %	0,5 %	6,7 %
Asche	1,4 %	2,4 %	3,6 %

A2 Weizenschlempe

Herkunft: Trinkalkoholherstellungsprozess
NovelFerm GmbH, Dettmannsdorf, Deutschland

Tabelle A2: Weizenschlempe, Hauptbestandteile der Komponenten

Komponente	Dekanterkuchen	Sirup	Trockenschlempe
Wasser	67,8 %	78,2 %	5,4 %
Trockensubstanzgehalt	32,2 %	21,8 %	94,6 %
Proteine	10,1 %	6,7 %	29,4 %
Fett	2,8 %	1,5 %	6,1 %
Faser	4,5 %	0,3 %	7,9 %
Asche	0,7 %	1,5 %	3,7 %

A3 Getreideschlempe aus Weizen, Gerste, Mais

Herkunft: Ethanolfabrik in Deutschland

Tabelle A3: Getreideschlempe aus Weizen, Gerste und Mais, Hauptbestandteile der Komponenten

Komponente	Dekanterkuchen	Sirup	Trockenschlempe
Wasser	67,7 %	67,6 %	8,7 %
Trockensubstanzgehalt	32,3 %	32,4 %	91,3 %
Proteine	10,6 %	8,2 %	30,3 %
Fett	3,0 %	3,0 %	7,2 %
Faser	5,4 %	1,3 %	9,0 %
Asche	0,9 %	3,0 %	4,6 %

A4 Bagasse

Herkunft: Rohrzuckerfabrik
SugarCaneGrowers Coop., Bell Glade, USA

A5 Bagasse

Herkunft: Rohrzuckerfabrik
Sucrierie Raffinerie de Canne (Surac), Ksibia, Marokko

Tabelle A4: Zusammensetzung von Bagasse bezogen auf Trockensubstanz [2]

Zellulose	Hemizellulose	Lignin	Restzucker	Asche
40-60 %	20-30 %	20 %	1,5 %	2,5 %

A6 Treber

Herkunft: Wolters Brauerei, Braunschweig
Trockensubstanzgehalt ca. 20 %.

A7 Klärschlamm

Herkunft: Klärwerk Steinhof, Braunschweig (400.000 Einwohnerequivalente)
Rohschlamm, entwässert, Trockensubstanzgehalt ca. 20 %

Anhang B: Bestimmung des Gutsfeuchteverlaufs aus Messungen bei der chargenweisen Wirbelschichttrocknung (vereinfachtes Trocknungsmodell)

Bei der chargenweisen Trocknung von Partikeln in der Wirbelschicht gibt der Verlauf der zeitlichen Partikelfeuchte die Hinweise auf die Trocknungskinetik der eingesetzten Trocknungsgüter. Mit Hilfe des vereinfachten Trocknungsmodells wird aus den an der Versuchsanlage erfassbaren Messgrößen der Verlauf der Partikelfeuchte (Gutsfeuchte) in der Wirbelschicht bestimmt.

Bekannte Prozessgrößen und Stoffwerte

Aus einem Trocknungsversuch werden die in Tabelle B1 aufgeführten Prozessgrößen erfasst und die angegebenen Stoffwerte sind bekannt.

Tabelle B1: Prozessgrößen und Stoffwerte, die für einen Trocknungsversuch gegeben sind.

Prozessgröße / Stoffwert	Formelzeichen	Dimension
Trockensubstanzmasse des Trocknungsgutes	m_{TS}	kg
Wasserbeladung des Feststoffes zum Zeitpunkt $t = 0$	X_0	kg W/kg TS
Wasserbeladung des Feststoffes zu Ende des Trocknungsversuchs	X	kg W/kg TS
Trocknungszeit	t	s
Dampfeintrittsstrom	$\dot{m}_{Dampf-ein}$	kg/s
Dampfeintrittstemperatur	$T_{Dampf-ein}$	°C
Dampfaustrittstemperatur	$T_{Dampf-aus}$	°C
Wärmekapazität des Dampfes	$c_{p-Dampf}$	kJ/kg K

Temperaturverlauf für den Dampfstrom

Der Verlauf der Dampfeintritts- und Dampfaustrittstemperatur wird während des Trocknungsversuches messtechnisch erfasst. Ein typischer Verlauf ist in Abbildung B1 dargestellt. Einzelne Phasen des Temperaturverlaufs können mit zugehörigem Zeitintervall und Temperaturbereich anhand Abbildung B2 entsprechenden Phasen der Modellvorstellung zugeordnet werden.

Vereinfachte Bilanzierung

Für ein einzelnes Zeitintervall von t_0 bis t_1 beträgt die vom Dampf abgegebene Wärme unter vereinfachten Bedingungen:

$Q_{\text{Dampf-ab-1}} = \dot{m}_{\text{Dampf}} \cdot c_{P\text{-Dampf}} \cdot \left(T_{\text{Dampf-ein-eff}} - \frac{T_{\text{Dampf-aus-0}} + T_{\text{Dampf-aus-1}}}{2} \right) \cdot (t_1 - t_0) \quad (\text{B1})$	
---	--

Diese Wärmemenge soll für die Wasserverdampfung und für die Temperaturänderung der Apparatewand aufgebracht werden (Gleichung B2). Dabei wird angenommen, dass die Apparatewand sofort nach Einschleusen des Gutes die effektive Dampfaustrittstemperatur annimmt und dieser im Verlaufe des Prozesses folgt.

$Q_{\text{Dampf-ab-1}} = Q_{\text{Wasserverdampfung-1}} + Q_{\text{Wand}} = \Delta m_{\text{Wasser-1}} \cdot r_{\text{Wasser}} + m_{\text{Wand}} \cdot c_{\text{Wand}} \cdot \left(T_{\text{Wand-0}} - \frac{T_{\text{Wand-0}} + T_{\text{Wand-1}}}{2} \right)$	(B2)
--	------

Aus Gleichung B1 und B2 kann die Wassermenge berechnet werden, die im Zeitintervall von t_0 bis t_1 verdampft. Das entspricht der Änderung des Wassergehaltes des Feststoffes im betrachteten Zeitintervall.

Für die Trocknungszeit eines Gutes kann auf diesem Wege schrittweise die gesamte Trocknungskurve berechnet werden. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist in Abbildung B3 dargestellt.

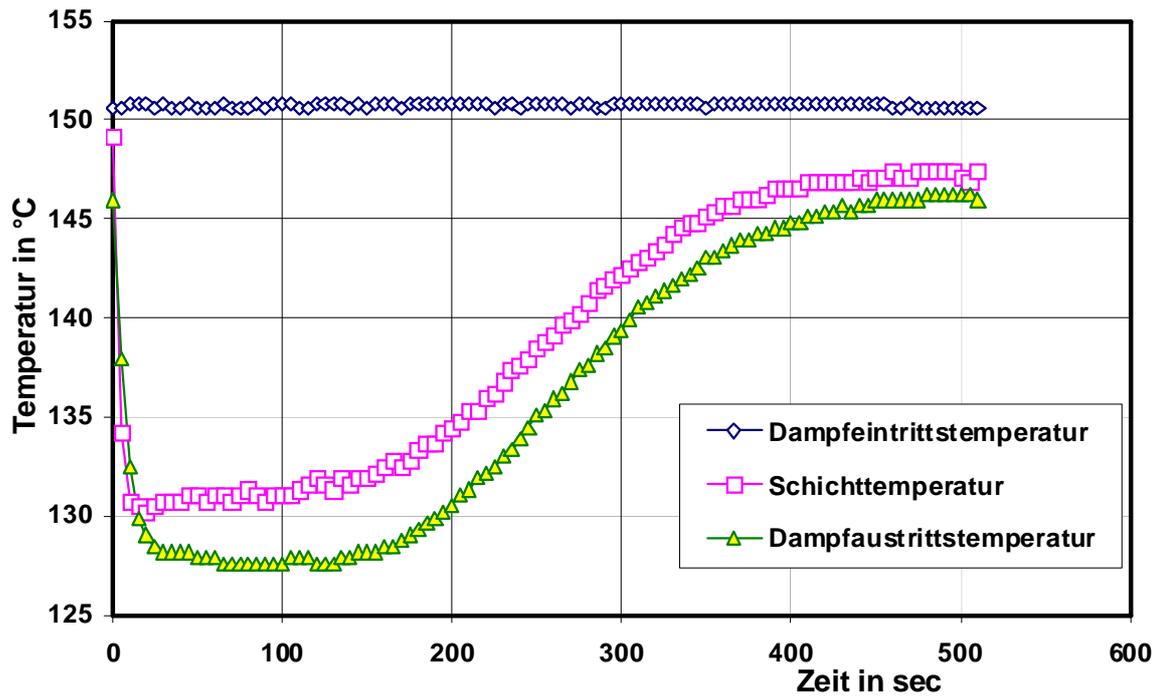


Abbildung B1: Gemessener Verlauf der Dampfein- und Dampfaustrittstemperatur während eines Trocknungsversuches

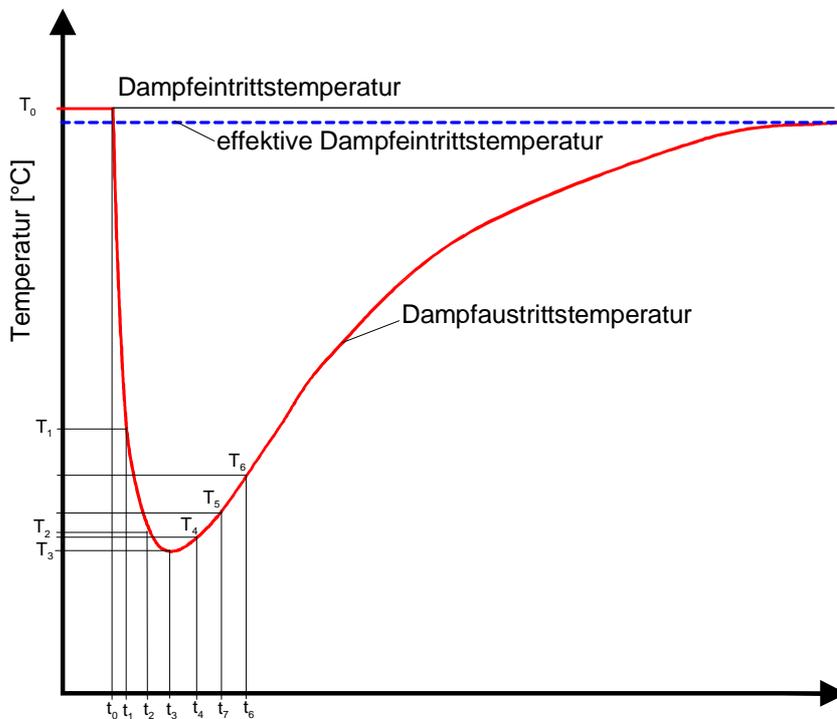


Abbildung B2: Schematische Darstellung der Dampftemperaturen mit Zuordnung der Trocknungszeitintervalle zur gemessenen Dampfaustrittstemperatur

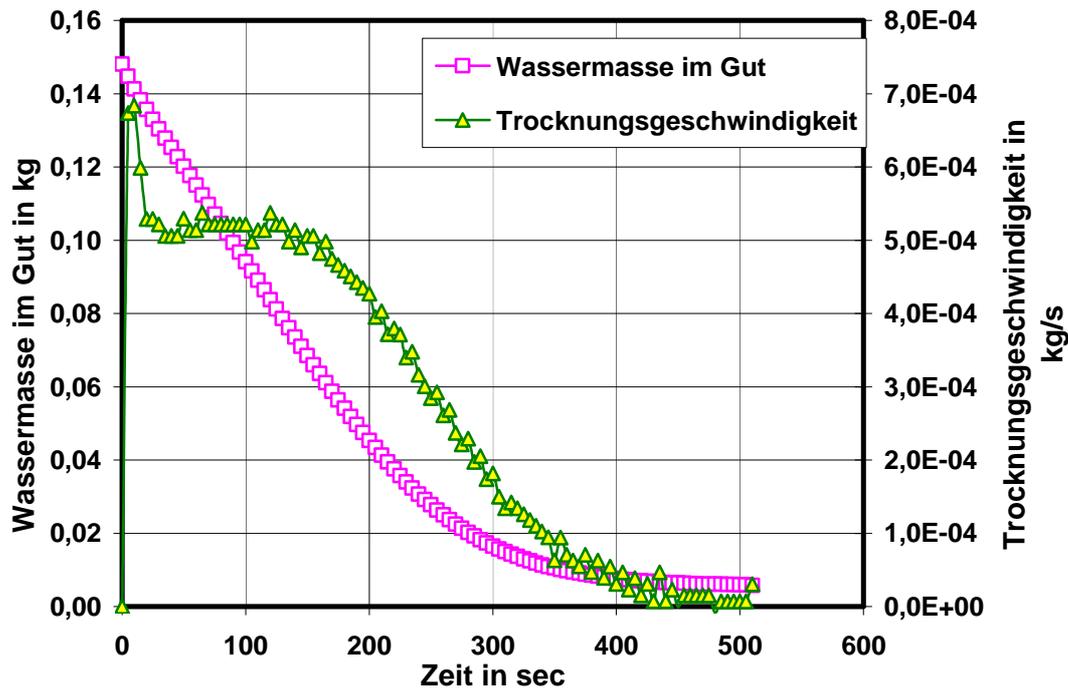


Abbildung B3: Berechneter Trocknungsverlauf: Wassermasse im Trocknungsgut und Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Trocknungszeit

In Abbildung B3 ist weiterhin die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion der Trocknungszeit dargestellt. Diese wird gemäß Gleichung B3 aus dem Verlauf der Gutsfeuchte berechnet:

$n_i = \frac{\Delta X_i}{\Delta t_i}$	in kg Wasser / kg Trockensubstanz und Sekunde	(B3)
---------------------------------------	---	------

Zur Überprüfung der berechneten Gutsbeladung als Funktion der Zeit werden Gutsfeuchtwerte experimentell ermittelt und den Berechnungen gegenüber gestellt. Dabei werden jeweils unter gleichen Anfangsbedingungen (Produktfeuchte, Temperatur, Produktmasse, Dampfmassenstrom) mehrere Versuche durchgeführt und die einzelnen Versuche nach einem definierten Zeitraum beendet. Das Gut wird aus dem Trockner entnommen und der verbleibende Wassergehalt im Trocknungsgut bestimmt.

Anmerkungen zum Trocknungsmodell

Bei der Nutzung des Trocknungsmodells muss berücksichtigt werden, dass dieses auf einer Reihe vereinfachender Voraussetzungen basiert. Es werden folgende, möglicherweise wesentliche Einflüsse nicht berücksichtigt:

- die Anwärmung des eventuell kalt eintretenden Gutes und die damit verbundene Kondensation
- der Einfluss der Apparatewand
- der Verlustwärmestrom der Gesamtanlage
- die Veränderung der Stoffwerte während des Trocknungsprozesses

Dies Verwendung des Modells ermöglicht es dennoch, den Trocknungsverlauf des Gutes in einer Wirbelschicht nur aus den sich mit der Zeit ändernden Dampftemperaturen zu berechnen, die relativ einfach messtechnisch erfasst werden können. Die sich ergebende Fehlerbreite des Berechnungsmodells wird umso kleiner, je höher die Anfangsgutsfeuchte ist.

Anhang C: Modellvorstellung zur Trocknung von dispersen Gütern im überhitzten Wasserdampf

Für die Berechnung des Trocknungsverhaltens von dispersen Gütern in einer mit überhitztem Wasserdampf betriebenen Wirbelschicht wurde ein von Machnow [7] entwickeltes physikalisch begründetes mathematisches Modell zugrunde gelegt. Dem Modell basiert auf folgenden Überlegungen:

Der disperse Feststoff wird mit Umgebungstemperatur in den Apparat eingebracht. Der im Apparat strömende überhitzte Wasserdampf gibt Wärme an den Feststoff ab, wodurch die Temperatur des Dampfes absinkt. Solange der Feststoff noch nicht die Sättigungstemperatur des Wasserdampfes (bei Normaldruck 100 °C) erreicht hat, wird an der Oberfläche des Feststoffes zunächst Wasserdampf kondensieren. Damit wird in dieser **Phase 1**

- der Feststoff aufgeheizt bis er die Dampfsättigungstemperatur erreicht hat,
- der zuströmende Dampf so lange kondensiert, bis der Feststoff die Dampfsättigungstemperatur erreicht hat,
- Wärme von der Apparatewand an die Wirbelschicht abgeben und
- der Feststoff ideal durchmischt.

Dabei werden alle Wärmeverluste und die fühlbare Wärme des überhitzten Wasserdampfes vernachlässigt. Außerdem soll der Feststoff eine so große Oberfläche haben, dass die Dampfaustrittstemperatur mit hinreichender Genauigkeit gleich der Feststofftemperatur gesetzt werden kann. Das Modell soll außerdem für kleine Biot-Zahlen gelten, so dass man die Wärmeleitung im Gut vernachlässigen kann. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich ein Differentialgleichungssystem aufstellen, mit dessen Hilfe sogar eine geschlossene Lösung für die gesuchten Parameter finden lässt. Die Lösung für diese Phase 1 hat die Form:

$$\Theta_K(t) = \Theta_{D-aus}(t) = \frac{C_1}{B} \cdot (r_1 - A) \exp(r_1 \cdot t) + \frac{C_2}{B} \cdot (r_2 - A) \exp(r_2 \cdot t) + b_b,$$

$$\Theta_w(t) = C_1 \cdot \exp(r_1 \cdot t) + C_2 \cdot \exp(r_2 \cdot t) + b_a \text{ und}$$

$$X_w(t) = X_{w0} + \frac{t \cdot \dot{m}_{Dampf}}{M_{TS}}$$

Dabei sind:

\dot{m}_{Dampf} Dampfmassenstrom, M_{TS} Masse des Produktes in der Wirbelschicht, $\Theta_K(t)$, $\Theta_W(t)$ und $\Theta_{D-aus}(t)$ dimensionslose Korn-, Wand- und Dampf-temperatur, t ist die Zeit, $X_W(t)$ ist die Wasserbeladung des Gutes und alle anderen Größen sind im Prinzip Konstanten, die sich aus der Herleitung der Lösung ergeben.

Für ein gewähltes Beispiel ist der berechnete Verlauf im folgenden Diagramm (Abbildung C1) dargestellt:

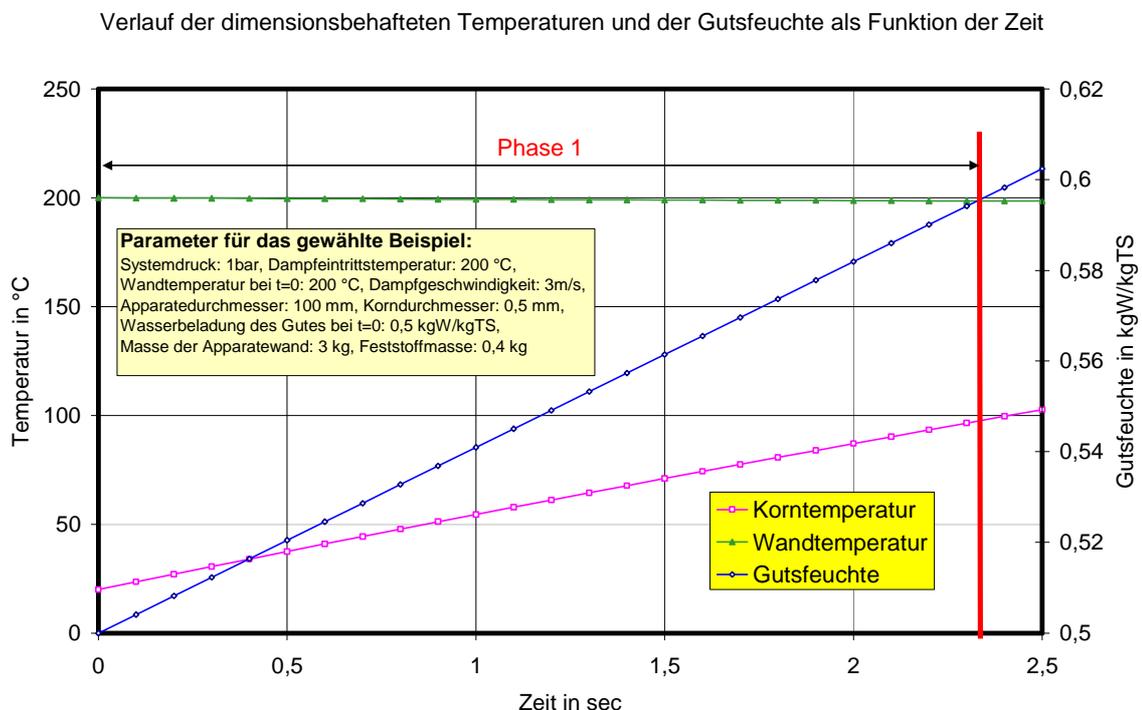


Abbildung C1: Verlauf von Korntemperatur, Wandtemperatur und Gutsfeuchte in Phase 1 für ein Beispiel.

Wie in Abbildung D1 zu erkennen ist, steigt die Korntemperatur in dieser Phase von Umgebungstemperatur (20 °C) in einer Zeit von ca. 2,35 s auf 100 °C an. Dies ist ein kurzer Zeitraum, der die Fluidisation wenig stören wird, der aber dennoch nicht zu vernachlässigen ist, da im gleichen Zeitraum die Wasserbeladung des Gutes von 0,5 kg Wasser pro kg Trockensubstanz auf ca. 0,6 kg Wasser pro kg Trockensubstanz ansteigt. Zusammengefasst kann also festgestellt werden, dass in diesem (kurzen) Zeitraum das Gut erwärmt und gleichzeitig befeuchtet wird.

Wenn die Feststofftemperatur die Sättigungstemperatur des Wasserdampfes erreicht hat, ist die Phase 1 abgeschlossen und es beginnt die Phase 2. In der **Phase 2** beginnt die Dampfaustrittstemperatur wieder leicht anzusteigen, wobei das an der Oberfläche des Feststoffes in der Phase 1 kondensierte Wasser wieder verdampft wird. Da die Oberfläche des Feststoffes gleichmäßig mit Wasser benetzt ist und auch das oberflächennahe Wasser im Feststoff genügend schnell durch die oberflächennahen Poren diffundieren kann, wird somit die gesamte Feststoffoberfläche für den Stoffübergang wirksam. Eine solche Phase wird in der Literatur als 1. Trocknungsabschnitt bezeichnet. In diesem 1. Trocknungsabschnitt bleibt die Trocknungsgeschwindigkeit nahezu konstant. Das hat wiederum zur Folge, dass die Wasserbeladung des Feststoffes linear abnimmt. Allerdings hat auf diesen (idealen) Verlauf die Apparatewand, besser die Masse der Apparatewand und des Anströmbodens, einen Einfluss.

Bei der Zugabe des Feststoffes in die Wirbelschicht hat die Apparatewand eine Anfangstemperatur, die in etwa der Dampfeintrittstemperatur entspricht. Nach Zugabe des Feststoffes sinkt die Temperatur in der Wirbelschicht, und die Apparatewand gibt Wärme an die Wirbelschicht ab. Dieser Vorgang geht so lange, wie die Apparatewand eine höhere Temperatur als die Wirbelschicht besitzt. Steigt die Wirbelschichttemperatur über die Wandtemperatur, dann kehrt sich dieser Vorgang um.

Über eine Massen- und Energiebilanzierung dieses Vorgangs kann das folgende Differentialgleichungssystem unter vereinfachenden Voraussetzungen hergeleitet werden, wobei folgende Bezeichnungen gelten:

\dot{m}_{Dampf} Dampfmassenstrom,

M_{TS} Masse des Produktes in der Wirbelschicht,

$\Theta_K(t)$, $\Theta_W(t)$ und $\Theta_D(t)$ $\Theta_{D\text{-aus}}(t)$ dimensionslose Korn-, Wand- und Dampftemperatur,

t ist die Zeit,

$x_W(t)$ ist die dimensionslose Wasserbeladung des Gutes,

NTU ist der NTU-Wert.

Alle Größen sind im Prinzip Konstanten bzw. Prozessparameter, die sich aus der Herleitung der Lösung ergeben.

$$\Theta_K = const = \Theta_{Sätt} = 0$$

$$\Theta_D(H_{DL}) = \frac{a^*}{1+a^*} \cdot \Theta_W + \left(\Theta_{D-ein} - \frac{a^*}{1+a^*} \cdot \Theta_W \right) \cdot \exp(-NTU_{ges} \cdot H_{DL})$$

$$\Theta_{D-aus} = \frac{a^*}{1+a^*} \cdot \Theta_W + \left(\Theta_{D-ein} - \frac{a^*}{1+a^*} \cdot \Theta_W \right) \cdot \exp(-NTU_{ges})$$

$$\frac{d\Theta_W}{dt} = \left[\frac{a^*}{m_W^*} \cdot \left(\frac{a^* \cdot NTU^* - 1}{1+a^*} \right) \right] \cdot \Theta_W - \frac{a^*}{m_W^*} \cdot NTU^*$$

$$\Theta_W = \frac{NTU^*}{H_1} + \left(\Theta_{W0} - \frac{NTU^*}{H_1} \right) \cdot \exp\left(\left[\frac{a^*}{m_W^*} \cdot H_1 \right] \cdot t \right)$$

$$\frac{dx}{dt} = -H_2 \cdot (H_1 \cdot \Theta_W - NTU^*) \quad (53) \quad \text{oder :} \quad \frac{dx}{dt} = - \left(H_4 \cdot \exp\left(\left[\frac{a^*}{m_W^*} \cdot H_1 \right] \cdot t \right) \right)$$

$$x = x_0 - \left(\frac{H_4 \cdot m_W^*}{H \cdot a^*} \right) \cdot \left(\exp\left(\left[\frac{a^*}{m_W^*} \cdot H_1 \right] \cdot t \right) - 1 \right)$$

Für ein gewähltes Beispiel ist der berechnete Verlauf der relevanten Parameter in Phase 2 im folgenden Diagramm (Abbildung C2) dargestellt:

2. Etappe (1. Trocknungsabschnitt)

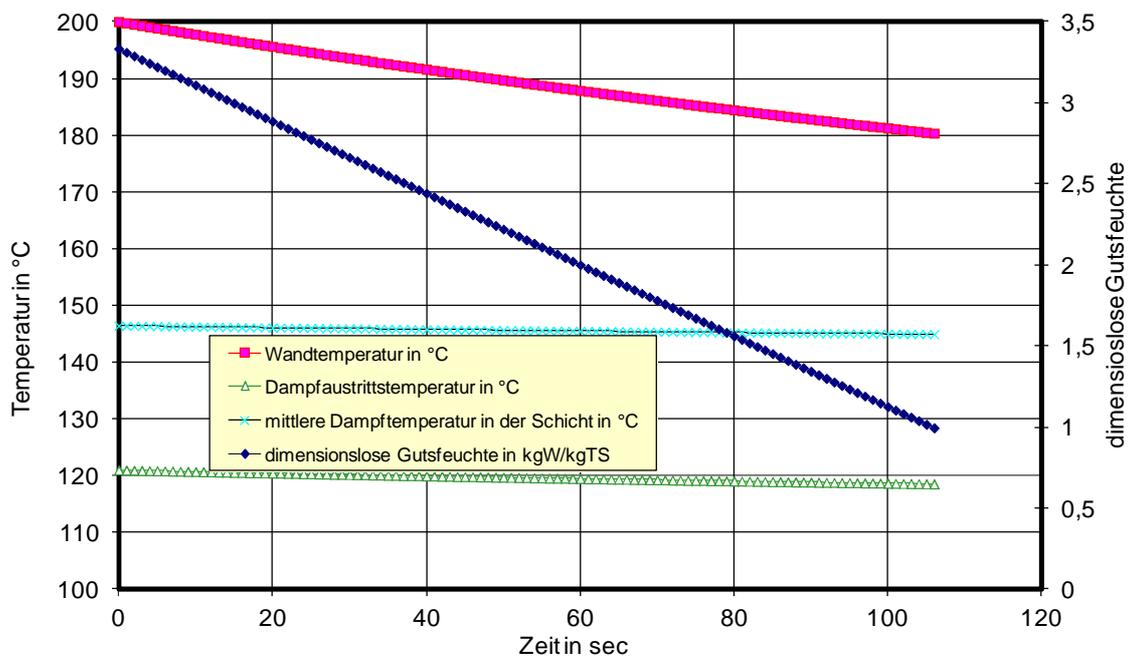


Abbildung C2: Verlauf von Korntemperatur, Wandtemperatur und Gutsfeuchte in Phase 2 für ein Beispiel.

Diese 2. Phase (1. Trocknungsabschnitt) läuft so lange, bis die kapillare Nachförderung von Wasser aus dem Gutsinneren nicht mehr ausreicht, um alle Guts-oberflächen zu benetzen.

Wenn dies der Fall ist, dann verringert sich die Trocknungsgeschwindigkeit und es beginnt die **Phase 3** (2. Trocknungsabschnitt). Während für die 1. und 2. Phase die Berechnung der Verläufe rein theoretisch erfolgen kann, wenn die erforderlichen Parameter bekannt sind, machen sich für die Berechnung des Verlaufes der relevanten Größen in jedem Falle experimentelle Untersuchungen erforderlich. Für diese Untersuchungen wird zunächst eine dimensionslose Gutsfeuchte wie folgt

definiert: $x = \frac{X - X_{\text{hyg}}}{X_K - X_{\text{hyg}}}$, wobei folgende Bezeichnungen gelten sollen:

x dimensionslose Gutsfeuchte, X dimensionsbehaftete Gutsfeuchte, X_{hyg} hygroskopische Endfeuchte, X_K kritische Gutsfeuchte, bei der der 1. In den 2. Trocknungsabschnitt übergeht.

Wenn eine dimensionslose Trocknungsgeschwindigkeit wie folgt definiert wird:

$f = \frac{dx}{dt}$, dann kann experimentell die Abhängigkeit der dimensionslosen

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_i$$

Trocknungsgeschwindigkeit von der dimensionslosen Gutsfeuchte ermittelt werden. Wenn weiterhin diese Funktion $f = f(x)$ in erster Näherung durch eine lineare Funktion der Art: $f = f(x) = a + b \cdot x$ angenähert wird, dann lässt sich für diese 3. Phase (2. Trocknungsabschnitt) ein Differentialgleichungssystem formulieren, das nur noch numerisch gelöst werden kann. Die unter den getroffenen Voraussetzungen hergeleiteten Gleichungen sind im Folgenden zusammengefasst:

Dimensionslose Korntemperatur:

$$\frac{d\Theta_K}{dt} = \Theta_K \cdot (1-f) \cdot (C_3 - 1) + \Theta_W \cdot C_4 \cdot (1-f) - E^* \cdot (1-f)$$

Dimensionslose Wandtemperatur:

$$\frac{d\Theta_W}{dt} = \frac{a^*}{m_W^*} \cdot C_3 \cdot \Theta_K + \frac{a^*}{m_W^*} \cdot (C_4 - 1) \cdot \Theta_W - \frac{a^*}{m_W^*} \cdot E^*$$

Dimensionslose Gutsbeladung:

$$\frac{dx}{dt} = -C_5 \cdot C_3 \cdot f \cdot \Theta_K - C_5 \cdot C_4 \cdot f \cdot \Theta_W + C_5 \cdot f \cdot E^*$$

Abhängigkeit der dimensionslosen Dampftemperatur von der dimensionslosen Schichthöhe:

$$\begin{aligned} \Theta_D(H_{DL}) = & \Theta_W \cdot \frac{a^*}{1+a^*} \cdot [1 - \exp(-NTU_{ges} \cdot H_{DL})] + \\ & + \Theta_K \cdot \left(\frac{1-f}{1+a^*} \right) \cdot [1 - \exp(-NTU_{ges} \cdot H_{DL})] + \\ & + \Theta_{D-ein} \cdot \exp(-NTU_{ges} \cdot H_{DL}) \end{aligned}$$

Dimensionslose Dampfaustrittstemperatur aus der Schicht:

$$\begin{aligned} \Theta_{D-aus}(H_{DL} = 1) = & \Theta_W \cdot \frac{a^*}{1+a^*} \cdot [1 - \exp(-NTU_{ges})] + \\ & + \Theta_K \cdot \left(\frac{1-f}{1+a^*} \right) \cdot [1 - \exp(-NTU_{ges})] + \\ & + \Theta_{D-ein} \cdot \exp(-NTU_{ges}) \end{aligned}$$

Näherung:

$$f = a + b \cdot x$$

Für ein gewähltes Beispiel ist der berechnete Verlauf der relevanten Parameter in Phase 3 im folgenden Diagramm (Abbildung C3) dargestellt:

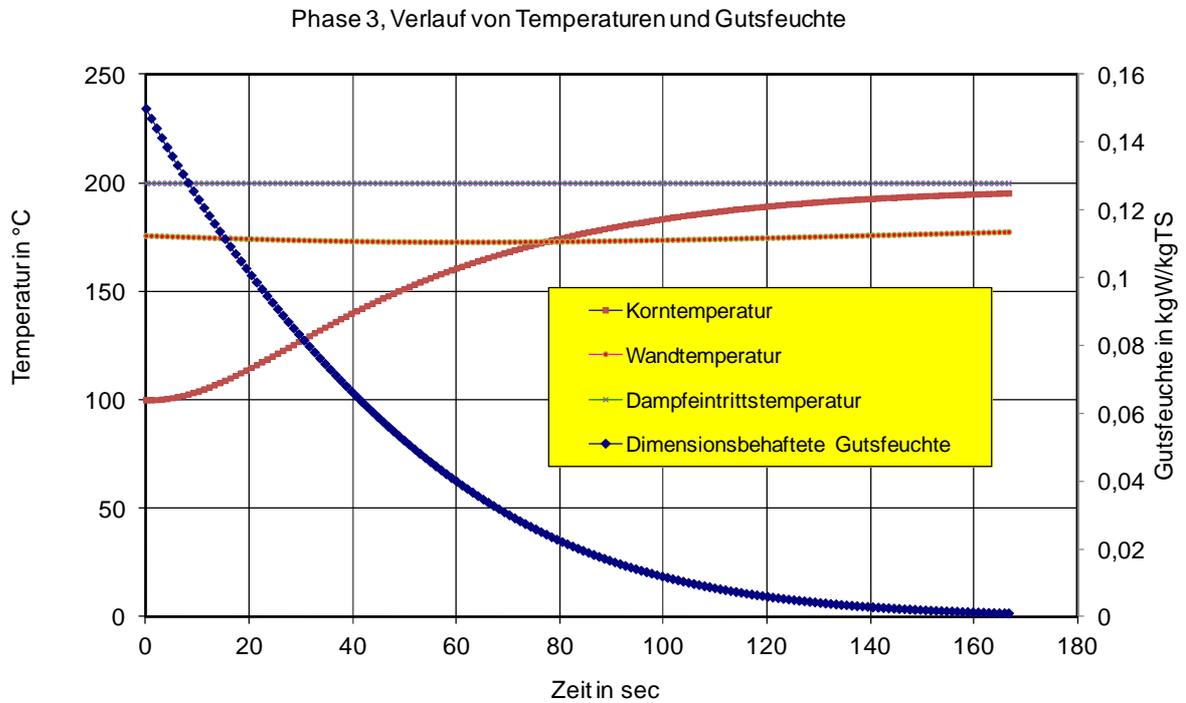


Abbildung C3: Verlauf von Korntemperatur, Wandtemperatur und Gutsfeuchte in Phase 3 für ein Beispiel.

In den folgenden Abbildungen C4 und C5 sind die Verläufe für das gewählte Beispiel für alle 3 Phasen zusammenfassend dargestellt.

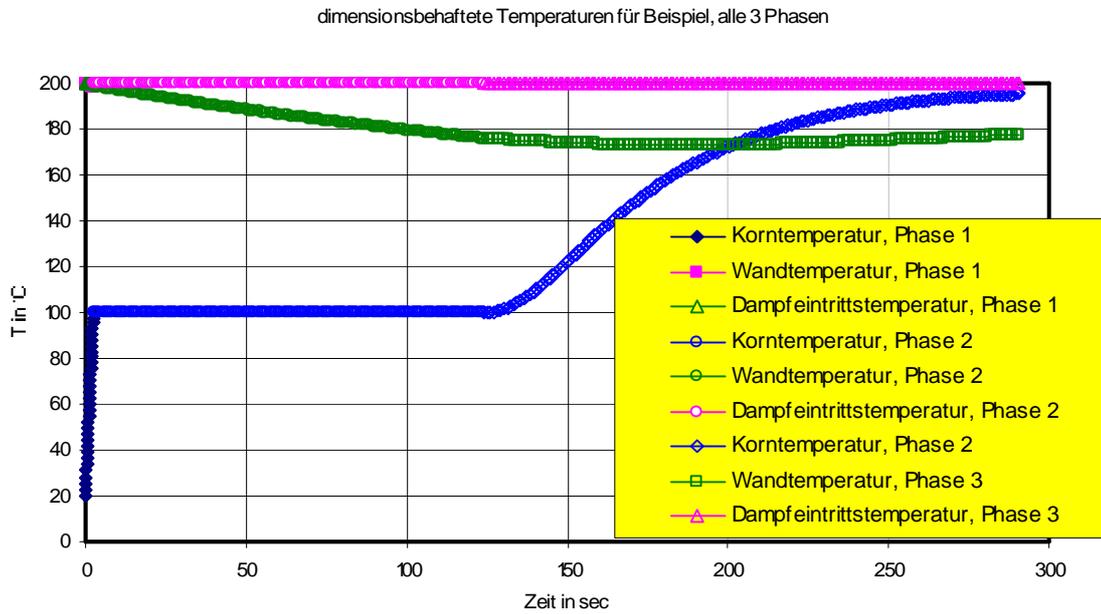


Abbildung C4: Verlauf der dimensionslosen Temperaturen in Phasen 1 bis 3 für ein Beispiel.

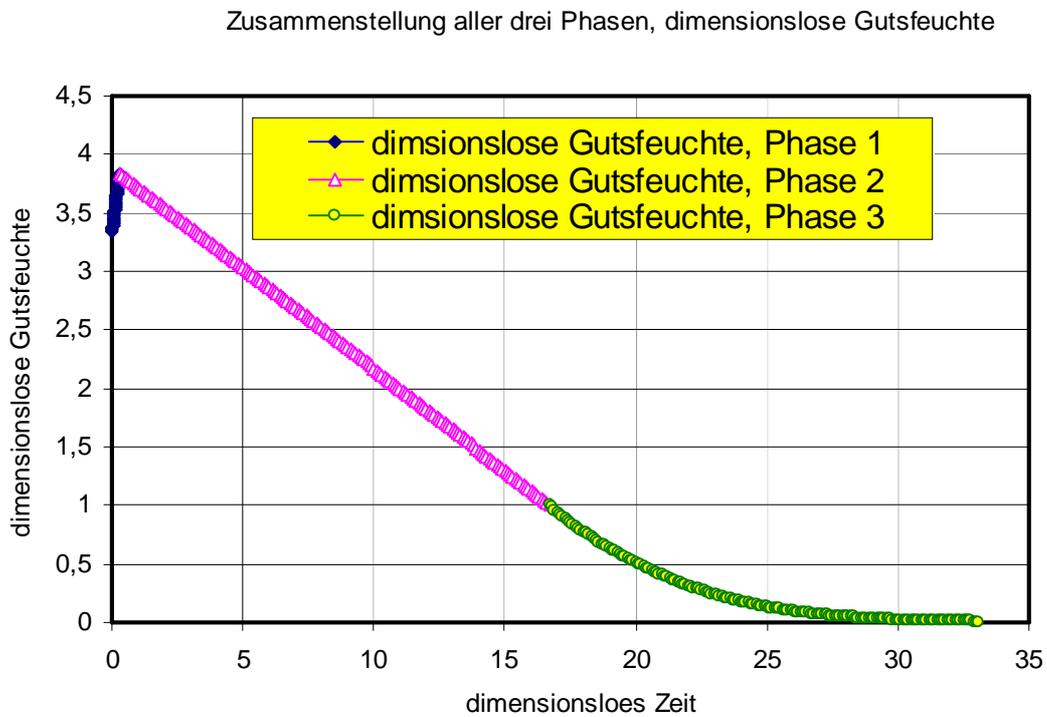


Abbildung C5: Verlauf der dimensionslosen Gutsfeuchte in Phasen 1 bis 3 für ein Beispiel.

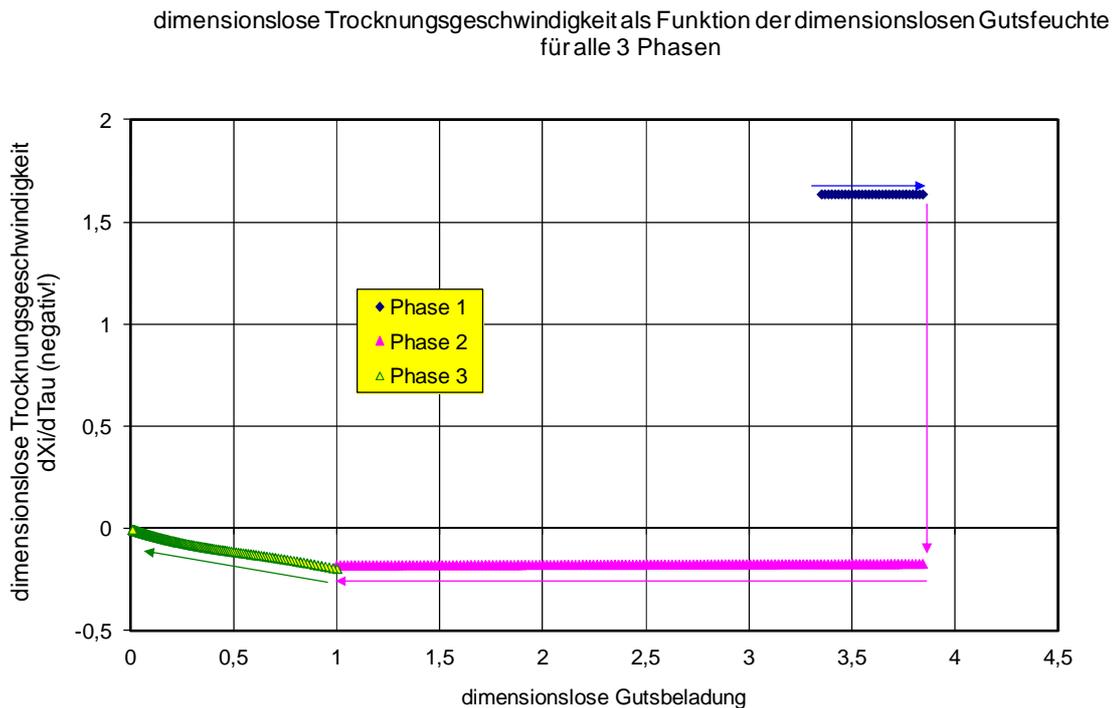


Abbildung C6: Verlauf der dimensionslosen Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion der dimensionslosen Gutsbeladung in Phasen 1 bis 3 für ein Beispiel.

Wenn für alle 3 Phasen eine dimensionslose Trocknungsgeschwindigkeit gebildet und deren negativer Wert als Funktion der dimensionslosen Gutsbeladung aufgetragen wird, ergibt sich der in Abbildung C6 dargestellte Verlauf.

Es ist dabei zu beachten, dass im Diagramm aus Darstellungsgründen der negative Wert aufgetragen ist. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass die Gutsbefeuchtung während der Kondensationsphase (Phase 1) wesentlich schneller verläuft als die Trocknung in den beiden nachfolgenden Abschnitten (Phase 2 und Phase 3).

Anhang D: Notwendige Fluidgeschwindigkeit in einer Wirbelschicht bei veränderten Stoffwerten am Beispiel für Luft und Dampf

Bei der Änderung von Stoffwerten des Fluidisierungsmediums einer Wirbelschicht soll durch Anpassung der Fluidisierungsgeschwindigkeit der gleiche Fluidisationszustand hergestellt werden, d. h. gleiches relatives Lückenvolumen der Wirbelschicht mit unveränderten Feststoffparametern (Partikeldichte und Partikeldurchmesser).

Das relative Lückenvolumen der Wirbelschicht kann nach Todes [8] wie folgt berechnet werden:

	$e = \left(\frac{(18 \cdot \text{Re} + 0,36 \cdot \text{Re}^2)}{\text{Ar}} \right)^{0,21}$	<i>Epsilon</i>	(D1)
--	---	----------------	------

Dabei sind:

	$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{n}$	<i>Re-Zahl</i>	(D2)
--	-----------------------------------	----------------	------

und:

	$\text{Ar} = \frac{g \cdot d^3 \cdot (r_{\text{Partikel}} - r_g)}{n_g^2 \cdot r_g}$	<i>Ar-Zahl</i>	(D3)
--	---	----------------	------

Nun werden für Luft zunächst die Stoffwerte berechnet. Für die Dichte der Luft werden aus dem VDI-Wärmeatlas [9] die Luftdichten für 25 °C bei unterschiedlichen Drücken entnommen. Außerdem werden diese Dichten mit dem idealen Gasgesetz berechnet und einander gegenübergestellt.

Temperatur = 25°C

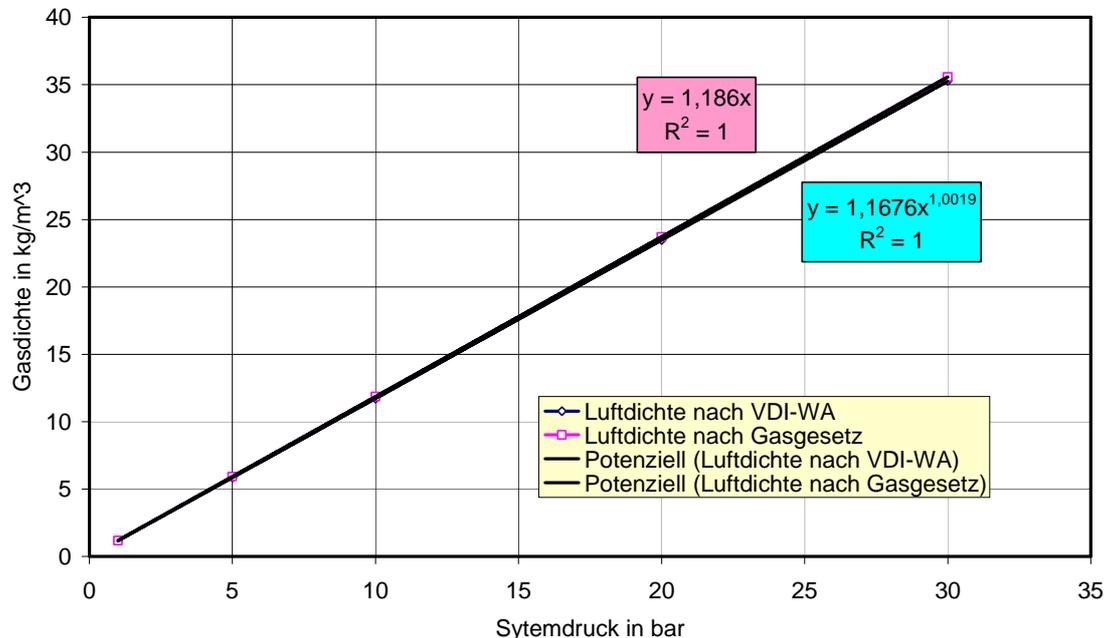
Aus VDI-WA:

Medium Luft

		Nach			berechnet
		Gasgesetz	dynamische	kinematische	nü=eta/rho
Druck	Gasdichte	Gasdichte	Viskosität	Viskosität	Viskosität
bar	kg/m ³	kg/m ³	Pas	m ² /s	m ² /s
1	1,168	1,186031879	0,00001848	0,000015820	1,55814E-05
5	5,858	5,930159396	0,00001852	0,000003168	3,12302E-06
10	11,71	11,86031879	0,00001859	0,000001587	1,56741E-06
20	23,48	23,72063758	0,00001872	0,000000797	7,89186E-07
30	35,3	35,58095638	0,00001888	0,000000535	5,30621E-07

Es ergibt sich folgende Darstellung:

Gasdichte für Luft bei 25 °C als Funktion des Systemdruckes



Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Berechnung der Luftdichte nach dem idealen Gasgesetz im betrachteten Bereich nur sehr wenig von den realen Werten abweicht. Somit kann die Luftdichte mit hinreichender Genauigkeit nach folgender Gleichung berechnet werden:

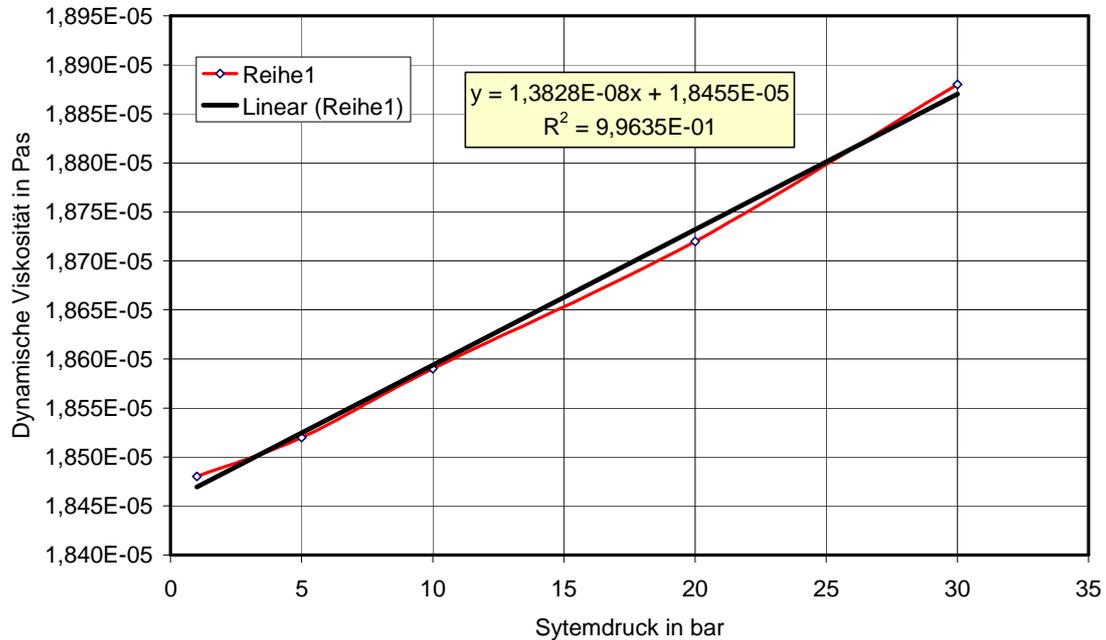
$r_g = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + t_g)} \cdot \frac{P}{P_0}$	(D4)
---	------

Für einen Systemdruck von 1 bar und einer Gastemperatur von 25 °C ergibt sich somit:

$r_{g-1bar-25^\circ C} = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + 25)} \cdot \frac{1}{1} = 1,186 \quad \frac{kg}{m^3}$	(D5)
---	------

Für die dynamische Viskosität von Luft bei 25 °C werden die Werte aus dem VDI-Wärmeatlas [9] in Abhängigkeit vom Systemdruck im folgenden Diagramm dargestellt und über eine Regression angenähert.

Dynamische Viskosität für Luft bei 25 °C in Abhängigkeit vom Systemdruck



Danach gilt mit genügender Genauigkeit:

	$h_{g-1bar-25^{\circ}C} = P \cdot 1,3828 \cdot 10^{-8} + 1,8455 \cdot 10^{-5} \quad Pas$	(D6)
--	--	------

Der Regressionskoeffizient beträgt dabei $R^2 = 0,006$.

Somit ergibt sich also für diesen Fall:

	$h_{g-1bar-25^{\circ}C} = 1 \cdot 1,3828 \cdot 10^{-8} + 1,8455 \cdot 10^{-5} = 18,47 \cdot 10^{-6} \quad Pas$	(D7)
--	--	------

Die kinematische Viskosität der Luft kann daraus wie folgt berechnet werden:

	$n_{g-1bar-25^{\circ}C} = \frac{h_{g-1bar-25^{\circ}C}}{r_{g-1bar-25^{\circ}C}} = \frac{18,47 \cdot 10^{-6}}{1,186} = 15,58 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$	(D8)
--	--	------

Für das **Beispiel** der Fluidisierung mit Luft von 25 °C sollen für den Systemdruck von 1 bar also gegeben sein:

Bezeichnung	Formelzeichen	Dimension	Wert
Partikeldurchmesser	d	m	0,006
Partikeldichte	$\rho_{Partikel}$	kg/m ³	1200
Gasdichte	ρ_g	kg/m ³	1,186
Kinematische Viskosität des Gases	ν_g	m ² /s	0,00001558
Effektive Gasgeschwindigkeit bei befriedigendem Fluidisationszustand	w_{eff}	m/s	2

Mit diesen Werten ergibt sich:

	$Re = \frac{2 \cdot 0,006}{0,00001558} = 770$	(D9)
--	---	------

und

	$Ar = \frac{9,81 \cdot 0,006^3 \cdot (1200 - 1,2)}{0,00001558^2 \cdot 1,186} = 8823800$	(D10)
--	---	-------

und

	$e = \left[\frac{(18 \cdot 770 + 0,36 \cdot 770^2)}{8823800} \right]^{0,21} = 0,464$	(D11)
--	---	-------

Damit ist das relative Lückenvolumen, mit dem die Wirbelschicht bei Luft mit den gegebenen Feststoffparametern stabil arbeitet, berechnet.

Nun soll bei anderen Gasparametern mit denselben Feststoffparametern die Geschwindigkeit errechnet werden, bei der sich das gleiche Lückenvolumen einstellt.

Die neuen Gasparameter (Wasserdampf bei 200 °C und 5 bar Absolutdruck) werden auf die gleiche Art berechnet:

Temperatur = 200°C

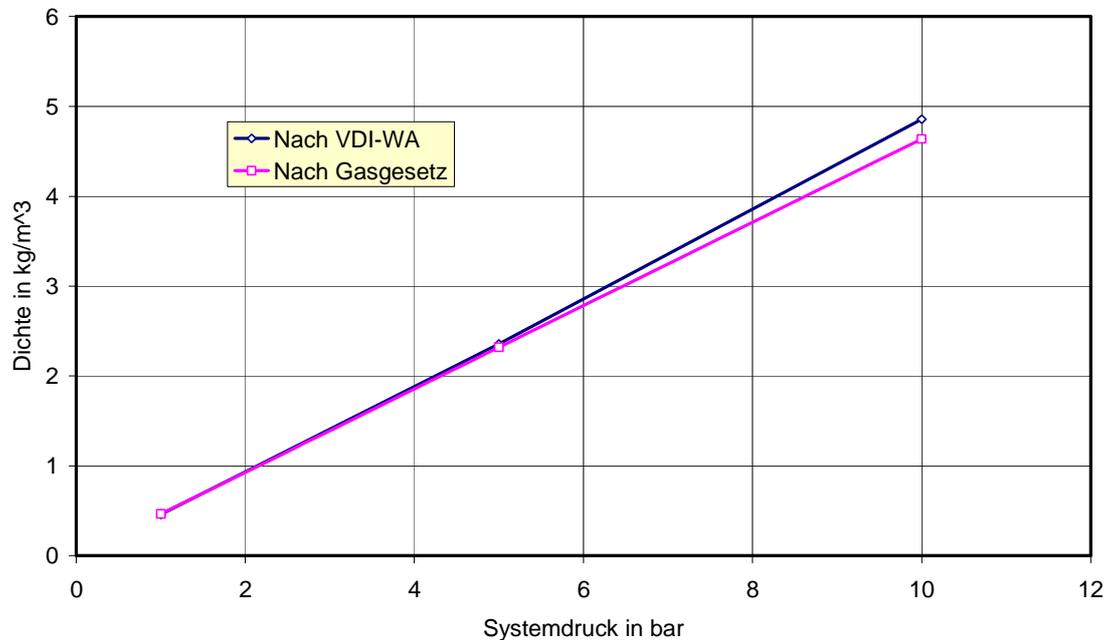
Aus VDI-WA:

Medium Wasserdampf

		Nach	VDI-WA	VDI-WA	berechnet
		Gasgesetz	dynamische	kinematische	$\nu = \eta / \rho$
Druck	Gasdichte	Gasdichte	Viskosität	Viskosität	Viskosität
bar	kg/m ³	kg/m ³	kg/(ms)	m ² /s	m ² /s
1	0,4604	0,463794926	0,00001618	0,000035140	3,48861E-05
5	2,3537	2,31897463	0,00001605	0,000006819	6,92116E-06
10	4,8566	4,63794926	0,00001589	0,000003272	3,42608E-06

Die folgenden Diagramme geben die Abhängigkeiten wieder:

Dichte von Wasserdampf bei 200 °C als Funktion vom Systemdruck



Aus oben stehendem Diagramm geht hervor, dass die Berechnung der Dampfdichte nach dem idealen Gasgesetz im betrachteten Bereich nur sehr wenig von den realen Werten abweicht. Somit kann die Dampfdichte mit hinreichender Genauigkeit nach folgender Gleichung berechnet werden:

$r_{Dampf} = \frac{18}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + t_{Dampf})} \cdot \frac{P}{P_0}$	(D12)
---	-------

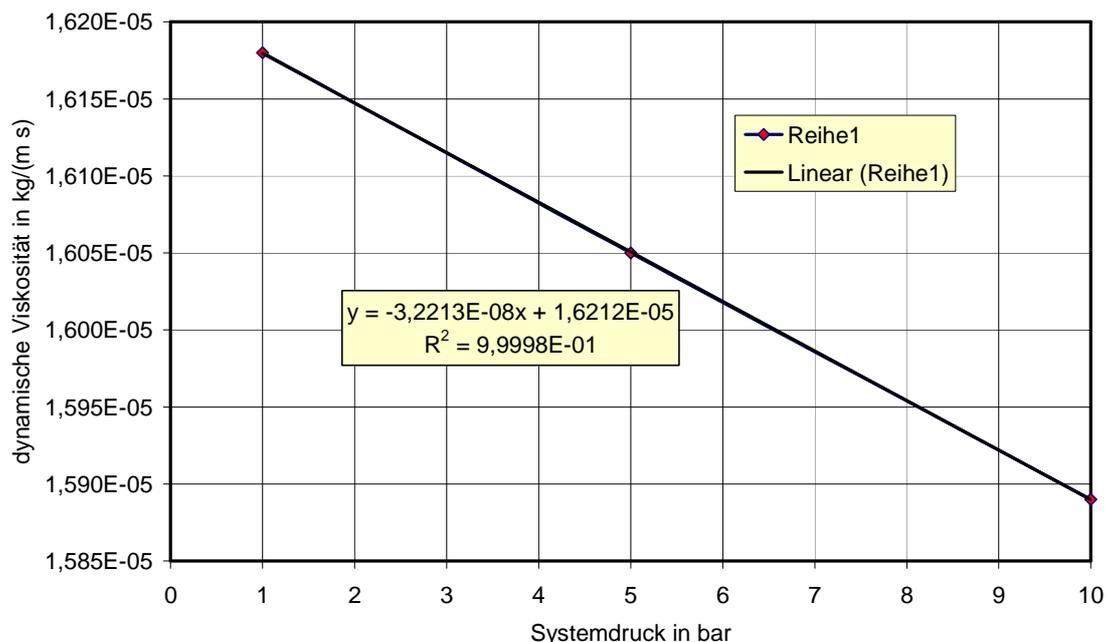
Für einen Systemdruck von 1 bar und einer Gastemperatur von 25 °C ergibt sich somit:

$r_{Dampf - 5bar - 200^\circ C} = \frac{18}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + 200)} \cdot \frac{5}{1} = 2,32 \frac{kg}{m^3}$	(D13)
--	-------

Für die dynamische Viskosität von Luft bei 25 °C werden die Werte aus dem VDI-Wärmeatlas [9] in Abhängigkeit vom Systemdruck im folgenden Diagramm dargestellt und über eine Regression angenähert.

Für die Viskositäten ergibt sich:

dynamische Viskosität für Wasserdampf bei 200 °C in Abhängigkeit vom Systemdruck



Die dynamische Viskosität kann also mit genügender Genauigkeit für den betrachteten Bereich durch folgende Gleichung angenähert werden:

$$y = -3,2213E-08 x + 1,6212E-05$$

$$R^2 = 9,9998E-01$$

Danach gilt mit genügender Genauigkeit:

	$h_{g-1bar-25^\circ C} = P \cdot (-3,2213 \cdot 10^{-8}) + 1,6212 \cdot 10^{-5} \quad Pas$	(D14)
--	--	-------

Der Regressionskoeffizient beträgt dabei $R^2 = 0,006$.

Somit ergibt sich also für diesen Fall:

	$h_{g-1bar-25^\circ C} = 1 \cdot (-3,2213 \cdot 10^{-8}) + 1,6212 \cdot 10^{-5} = 16,05 \cdot 10^{-6} \quad Pas$	(D15)
--	--	-------

Die kinematische Viskosität der Luft kann daraus wie folgt berechnet werden:

	$n_{g-1bar-25^\circ C} = \frac{h_{g-1bar-25^\circ C}}{r_{g-1bar-25^\circ C}} = \frac{18,47 \cdot 10^{-6}}{1,186} = 15,58 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$	(D16)
--	---	-------

Somit ergibt sich also für Wasserdampf bei 200 °C und 5 bar Absolutdruck

Bezeichnung	Formelzeichen	Dimension	Wert
Partikeldurchmesser	d	m	0,006
Partikeldichte	$r_{Partikel}$	kg/m ³	1200
Gasdichte (nach Gasgesetz berechnet für 5 bar und 200 °C)	$r_{Dampf-neu}$	kg/m ³	2,32
Dynamische Viskosität des Gases (Extrapoliert nach VDI WA)	$h_{Dampf-neu}$	Pas	0,00001605
Kinematische Viskosität des Gases (berechnet $n_{g-neu} = \frac{h_{g-neu}}{r_{g-neu}}$)	n_{g-neu}	m ² /s	0,00000692

Mit diesen Werten für Wasserdampf ergibt sich:

	$Ar_{neu} = \frac{9,81 \cdot 0,006^3 \cdot (1200 - 2,32)}{0,00000692^2 \cdot 2,32} = 22844000$	(D17)
--	--	-------

Nun muss die Re-Zahl berechnet werden, für die die folgende Gleichung erfüllt ist:

	$e_{neu} = e_{alt} = \left(\frac{(18 \cdot Re_{neu} + 0,36 \cdot Re_{neu}^2)}{Ar_{neu}} \right)^{0,21}$	(D18)
--	--	-------

oder auch:

	$e \cdot Ar_{neu}^{0,21} = (18 \cdot Re_{neu} + 0,36 \cdot Re_{neu}^2)^{0,21}$	(D19)
--	--	-------

oder auch:

	$\frac{e^{\frac{1}{0,21}}}{0,36} \cdot Ar_{neu} = \frac{18}{0,36} \cdot Re_{neu} + Re_{neu}^2$	(D20)
--	--	-------

Für das gefundene e von 0,729 und die neue Ar-Zahl von 52781 folgt daraus:

	$\frac{0,464^{\frac{1}{0,21}}}{0,36} \cdot 22844000 = 163855 = 50 \cdot Re_{neu} + Re_{neu}^2$	(D21)
--	--	-------

Daraus wird durch Zielwertsuche gefunden:

	$Re = 1245$	(D22)
--	-------------	-------

Probe:

	$e = \left(\frac{(18 \cdot 1245 + 0,36 \cdot 1245^2)}{22844000} \right)^{0,21} = 0,464$	(D23)
--	--	-------

Stimmt!

Gleichung (D20) kann auch umgestellt werden:

$\text{Re}_{neu}^2 + \frac{18}{0,36} \cdot \text{Re}_{neu} - \frac{e^{\frac{1}{0,21}}}{0,36} \cdot \text{Ar}_{neu} = 0$	(D24)
---	-------

Daraus kann mit dem Vieta'schen Wurzelsatz die Lösung für Re_{neu} direkt berechnet werden. Es gilt

$\text{Re}_{neu} = -\frac{18}{2 \cdot 0,36} + \left(\left(\frac{18}{2 \cdot 0,36} \right)^2 + \frac{e^{\frac{1}{0,21}}}{0,36} \cdot \text{Ar}_{neu} \right)^{0,5}$	(D25)
--	-------

oder:

$\text{Re}_{neu} = -\frac{18}{2 \cdot 0,36} + \left(\left(\frac{18}{2 \cdot 0,36} \right)^2 + \frac{0,464^{\frac{1}{0,21}}}{0,36} \cdot 22844000 \right)^{0,5} = 1245$	(D26)
--	-------

Damit lässt sich nun die erforderliche Gasgeschwindigkeit unter den neuen Bedingungen berechnen:

$w_{neu} = \frac{\text{Re}_{neu} \cdot n_{g-neu}}{d} = \frac{1245 \cdot 0,00000692}{0,006} = 1,436 \quad m/s$	(D27)
---	-------

Das heißt, dass sich mit dieser Geschwindigkeit unter den neuen Gasparametern das gleiche beobachtete Fluidisationsregime einstellen sollte, wie bei den unter Normalbedingungen durchgeführten Versuchen. Allgemein kann nach diesen Überlegungen für die neue Gasgeschwindigkeit daraus auch geschrieben werden:

$w_{neu} = \frac{\left[-\frac{18}{2 \cdot 0,36} + \left(\left(\frac{18}{2 \cdot 0,36} \right)^2 + \frac{e^{\frac{1}{0,21}}}{0,36} \cdot \text{Ar}_{neu} \right)^{0,5} \right] \cdot n_{g-neu}}{d}$	(D28)
---	-------

oder:

$w_{neu} = \frac{\left[-25 + \left(25^2 + \frac{e^{\frac{1}{0,21}}}{0,36} \cdot \text{Ar}_{neu} \right)^{0,5} \right] \cdot n_{g-neu}}{d}$	(D29)
--	-------

oder:

$$w_{neu} = \frac{\left[-25 + \left(25^2 + \frac{1}{0,36} \cdot \frac{g \cdot d^3 \cdot (r_{Partikel} - r_{g-neu})}{n_{g-neu}^2 \cdot r_{g-neu}} \right)^{0,5} \right] \cdot n_{g-neu}}{d} \quad (D30)$$

Für das Beispiel folgt:

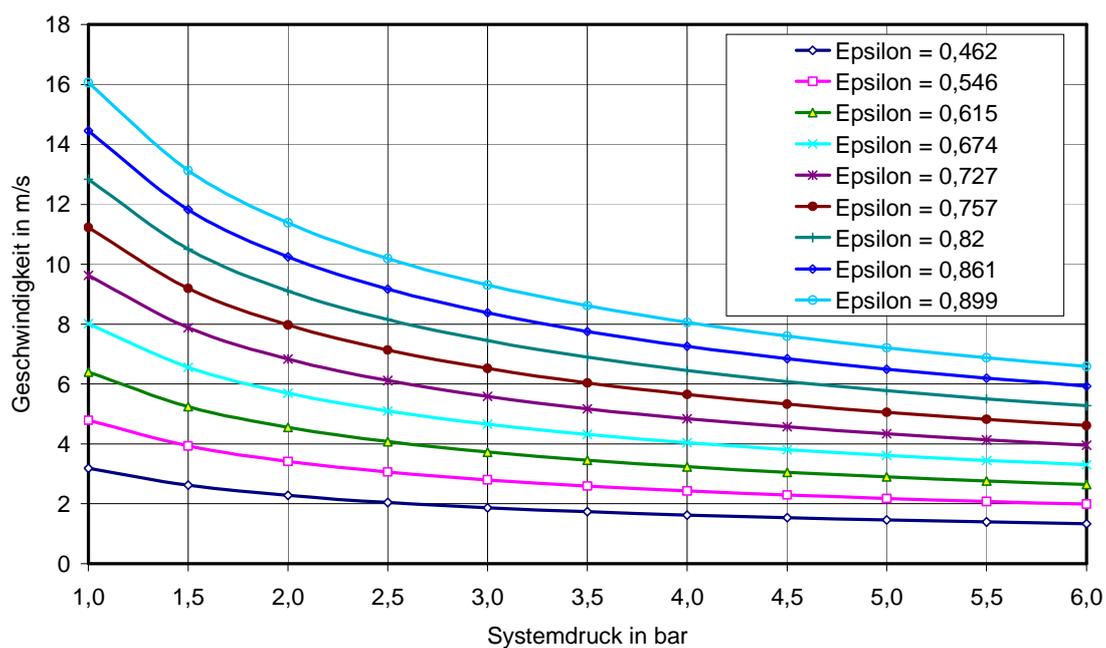
$$w_{neu} = \frac{\left[-25 + \left(25^2 + \frac{0,464^{0,21}}{0,36} \cdot \frac{9,81 \cdot 0,006^3 \cdot (1200 - 2,32)}{0,00000692^2 \cdot 2,32} \right)^{0,5} \right] \cdot 0,00000692}{0,006} \quad (D31)$$

$$w_{neu} = 1,44 \text{ m/s}$$

Um eine allgemeine Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit vom Druck zu finden, wurde dieser Rechnungsgang für verschiedene Drücke wiederholt und die jeweilige Gasgeschwindigkeit berechnet bei der der vergleichbare Fluidisierungszustand, gekennzeichnet durch ein experimentell bestimmtes Epsilon, herrscht.

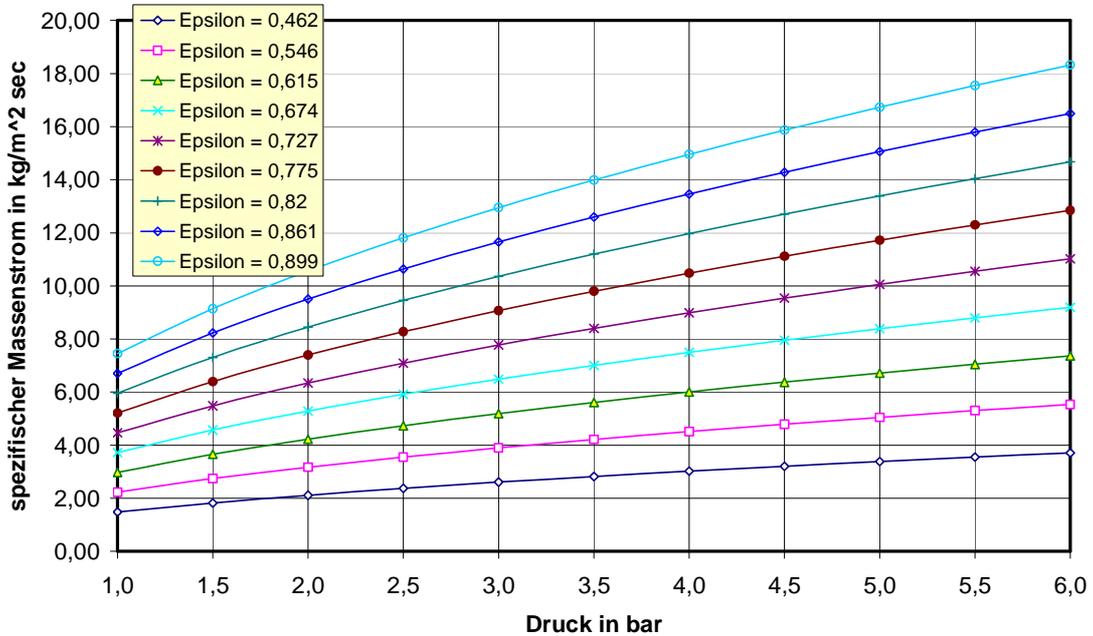
Das Ergebnis ist im folgenden Diagramm dargestellt:

Äquivalente geschwindigkeiten als Funktion vom Druck mit Epsilon gut als Parameter



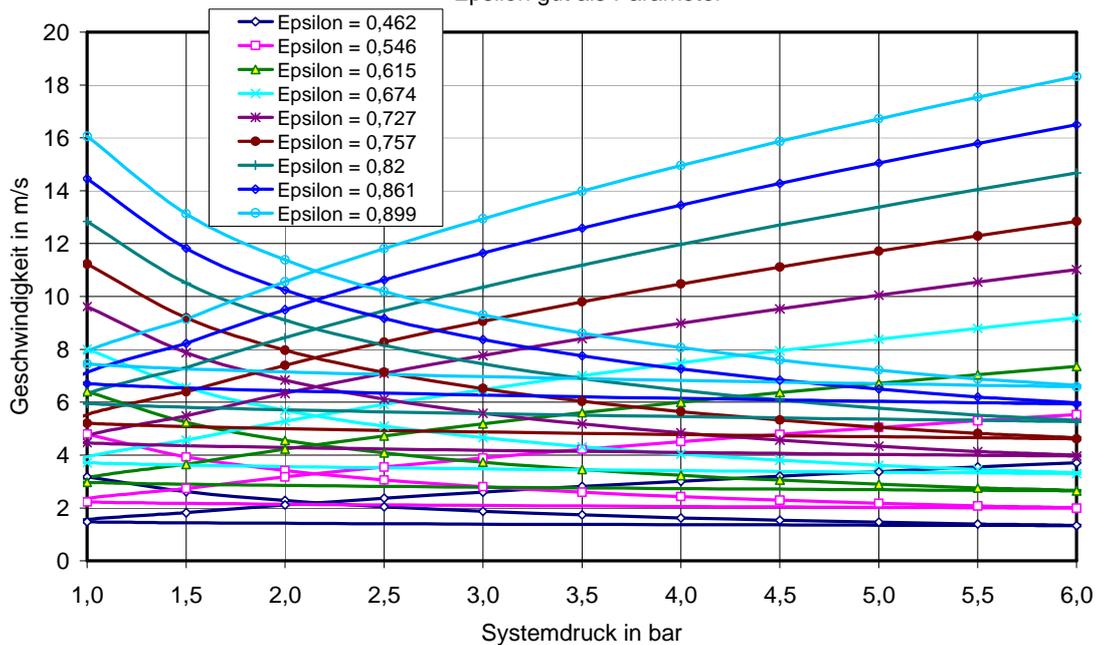
Aus Dampfgeschwindigkeit und zugehöriger Dampfdichte lässt sich nun auch der spezifische Dampfmassenstrom auf die gleiche Art darstellen:

Spezifischer Massendurchsatz als Funktion vom Druck mit Epsilon als Parameter



Im folgenden Diagramm sind sowohl Dampfgeschwindigkeit als auch spezifischer Massenstrom mit Epsilon als Parameter zusammen dargestellt.

Äquivalente Geschwindigkeiten und spez. Massenströme als Funktion vom Druck mit Epsilon gut als Parameter



Überprüfung einer anderen Berechnungsmethode, die die Viskosität des Fluidisationsmediums unberücksichtigt lässt:

Bisher wird in der Literatur auch der folgende Weg zur Berechnung der unter anderen Gasparametern erforderlichen neuen Gasgeschwindigkeit aus den alten Parametern gewählt, der nur die veränderte Dichte, nicht aber die Viskosität des Fluidisationsmediums berücksichtigt.

Nach diesem Berechnungsweg soll gelten:

	$w_{neu} = w_{alt} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{g-alt}}{\rho_{g-neu}}} \quad m/s$	(D32)
--	--	-------

Für das gewählte Beispiel galt für Luft von 25 °C und einen Systemdruck von 1 bar:

Bezeichnung	Formelzeichen	Dimension	Wert
Partikeldurchmesser	d	m	0,006
Partikeldichte	$\rho_{Partikel}$	kg/m ³	1200
Gasdichte	ρ_g	kg/m ³	1,186
Kinematische Viskosität des Gases	ν_g	m ² /s	0,00001558
Effektive Gasgeschwindigkeit bei befriedigendem Fluidisationszustand	w_{eff}	m/s	2

Daraus ergibt sich nach Gleichung (D30) sich für Dampf von 5 bar und 200 °C nach der obigen Berechnungsmethode:

	$w_{neu} = 1,436 \quad m/s$	(D33)
--	-----------------------------	-------

Nach der vereinfachten Gleichung folgt mit $\rho_{alt} = 1,186 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_{neu} = 2,32 \text{ kg/m}^3$

	$w_{neu} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,186}{2,32}} = 1,43 \quad m/s$	(D34)
--	--	-------

Der Unterschied ist also für diesen Fall vernachlässigbar.

Anhang E: Tabellen zur ökonomischen und ökologischen Bewertung

Tabelle E1: Kostenvergleich Trommeltrocknung und CSD-Trocknung von Biomassen

Kostenvergleich Trocknungskosten Schlempe Trommeltrocknung - CSD-Trocknung						
Heuanlagen		Trommel Fa. SwissCombi [®] bei Fa. NovelFerm	Trommeltrocknung (Baugröße F)	CSD - Trocknung (Baugröße D)	CSD - Trocknung (Baugröße C)	CSD - Trocknung (Baugröße B)
Rohstoffbasis		Weizen	Mais	Mais, Weizen	Mischung: Gerste, Mais, Weizen	Treber
Durchsatz Naßschlempe-Mischung	[t/h]	19,0	79,3	75,1	75,2	71,6
Durchsatz Dekanterkuchen und Sirup	[t/h]	7,8	30,5	42,7	42,8	40,8
Wasserverdampfungsleistung	[t/h]	5,4	22,0	30,0	30,7	30,1
Elektroenergie für Elektrische Antriebe	[kW]	240	315	1.992	1.992	1.900
Wärmeenergie Trocknung	[kW]	4.500	18.174	30.814	30.420	30.765
Nutzbare Brüdenenergie	[kW]	650	0	26.884	26.540	26.841
Effektive Wärmeenergie Trocknung	[kW]	3.850	17.447	3.930	3.880	3.924
Kesselwirkungsgrad	[-]	0,96	0,96	0,91	0,91	0,91
Wärmeleistung Heizöl EL	[kW]	4.010	18.174	4.319	4.263	4.312
Massenstrom Heizöl EL	[t/h]	0,34	1,52	0,36	0,36	0,36
Heizwert Heizöl EL	[MJ/kg]			43,08		
Dichte Heizöl (T=15 °C)	[kg/m³]			840		
Kosten Elektroenergie	[EUR/kWh]			0,06		
Kosten Heizöl EL ¹⁾	[EUR/m³]			500,22		
Kosten Heizöl EL	[EUR/t]			595,50		
Betriebsstage pro Jahr	[d/a]			333		
Betriebsstunden pro Jahr	[h/a]			7.992		
Kosten Heizöl pro Jahr	[EUR/a]	1.594.974	7.227.941	1.717.573	1.695.611	1.714.951
Kosten Elektroenergie pro Jahr	[EUR/a]	115.085	151.049	955.204	955.204	911.088
Energiekosten	[EUR/a]	1.710.059	7.378.989	2.672.777	2.650.815	2.626.039
Investitionssumme Schätzung/Budget	[EUR]	850.000	3.400.000	9.900.000	7.900.000	6.700.000
Abschreibungszeitraum	[a]	10	10	10	10	10
Abschreibungen	[EUR/a]	85.000	340.000	990.000	790.000	670.000
Prozentuale Reparatur- und Instandhaltungskosten (Basis: Abschreibungen)	[%]	2	2	2	2	2
Reparatur- und Instandhaltungskosten	[EUR/a]	1.700	6.800	19.800	15.800	13.400
Prozentuale Finanzierungskosten (Basis: Abschreibungen)	[%]	4	4	4	4	4
Finanzierungskosten	[EUR/a]	3.400	13.600	39.600	31.600	26.800
Spezifische Personalkosten	[EUR/At/h]	50	50	50	50	50
Anzahl Arbeitskräfte	[Stck.]	0,50	0,75	0,75	0,75	0,75
Personalkosten	[EUR/a]	199.800	299.700	299.700	299.700	299.700
Gesamtkosten	[EUR/a]	1.999.959	8.039.089	4.021.877	3.787.915	3.635.939
Spezifische Trocknungskosten bezogen auf 30,5 t/h Dekanterkuchen und Sirup	[EUR/t]	32,08	32,98	11,79	11,07	11,15
Prozentuale spezifische Trocknungskosten bezogen auf 30,5 t/h Dekanterkuchen und Sirup	[%]	97	100	36	34	34
Amortisationszeit Investitionssumme CSD im Vergleich zur Investitionssumme Trommel F bezogen auf 30,5 t/h Dekanterkuchen und Sirup	[a]	-	-	1,3	0,8	0,6
*1)	http://www.finanzen.net/rohstoffe/heizoelpreis_20.12.2010					
*2)	http://de.wikipedia.org/wiki/Prim%C3%A4renergiebedarf					
*3)	Trommeltrockner mit geschlossenem Gaskreislauf und integrierter Nachverbrennung					

Tabelle E2: Vergleich Primärenergieeinsatz bei Trommeltrocknung und CSD-Trocknung von Biomassen

Neuanlagen		Trommel Fa. SwissCombi *3) bei Fa. NovelFerm	Trommeltrocknung (Baugröße F)	CSD - Trocknung (Baugröße D)	CSD - Trocknung (Baugröße C)	CSD - Trocknung (Baugröße B)
Rohstoffbasis	-	Weizen	Mais	Mais, Weizen	Mischung: Gerste, Mais, Weizen	Treber
Durchsatz Naßschlempe-Mischung	[t/h]	19,0	79,3	75,1	75,2	71,6
Durchsatz Dekanterkuchen und Sirup	[t/h]	7,8	30,5	42,7	42,8	40,8
Wasserverdampfungsleistung	[t/h]	5,4	22,0	30,0	30,7	30,1
Elektroenergie für Elektrische Antriebe	[kW]	240	315	1.992	1.992	1.900
Spezifische Elektroenergie ^{*1)} für Elektrische Antriebe	[kJ/kg]	111	37	168	168	168
Primärenergiefaktor Strom ^{*2)}	[-]	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Spezifischer Einsatz Primärenergie Strom	[kJ/kg]	288	97	437	436	436
Wärmeenergie für Trocknung	[kW]	4.500	18.174	30.814	30.420	30.765
Spezifische Wärmeenergie für Trocknung ^{*1)}	[kJ/kg]	2.077	2.145	2.598	2.559	2.715
Primärenergiefaktor Heizöl ^{*2)}	[-]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Spezifischer Einsatz Primärenergie Heizöl	[kJ/kg]	2.285	2.360	2.858	2.815	2.986
Nutzbare Brödenenergie	[kW]	650	0	26.884	26.540	26.841
Spezifische nutzbare Brödenenergie ^{*1)}	[kJ/kg]	300	0	2.267	2.232	2.368
Primärenergiefaktor Heizöl ^{*2)}	[-]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Spezifische nutzbare Primärenergie aus Bröden	[kJ/kg]	330	0	2.493	2.456	2.605
Effektive Wärmeenergie für Trocknung	[kW]	3.850	18.174	3.930	3.880	3.924
Spezifische Effektive Wärmeenergie für Trocknung	[kJ/kg]	1.777	2.145	331	326	346
Primärenergiefaktor Heizöl ^{*2)}	[-]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Effektiver spezifischer Einsatz Primärenergie Trocknung ^{*1)}	[kJ/kg]	1.955	2.360	364	359	381
Summe spezifische Energie gesamt ^{*1)}	[kJ/kg]	1.888	2.182	499	494	514
Summe Einsatz Primärenergie ^{*1)}	[kJ/kg]	2.243	2.456	801	795	817
Prozentuale spezifische Energie gesamt	[%]	86	100	23	23	24
Prozentualer spezifischer Primärenergieeinsatz	[%]	91	100	33	32	33

*1) bezogen auf Dekanterkuchen und Sirup
*2) <http://de.wikipedia.org/wiki/Prim%C3%A4renergiebedarf>
*3) Trommeltrockner mit geschlossenem Gaskreislauf und integrierter Nachverbrennung

Tabelle E3: Vergleich CO₂-Bildung bei Trommeltrocknung und CSD-Trocknung von Biomassen

Vergleich CO₂-Bildung Trocknung Schlempe Trommeltrocknung - CSD-Trocknung						
Neuanlagen		Trommel Fa. SwissCombi ^{*3)} bei Fa. NovelFerm	Trommeltrocknung (Baugröße F)	CSD - Trocknung (Baugröße D)	CSD - Trocknung (Baugröße C)	CSD - Trocknung (Baugröße B)
Rohstoffbasis	-	Weizen	Mais	Mais, Weizen	Mischung: Gerstl., Mais, Weizen	Treber
Durchsatz Naßschlempe-Mischung	[t/h]	19,0	79,3	75,1	75,2	71,6
Durchsatz Dekanterkuchen und Sirup	[t/h]	7,8	30,5	42,7	42,8	40,8
Wasserverdampfungsleistung	[t/h]	5,4	22,0	30,0	30,7	30,1
Elektroenergie für Elektrische Antriebe	[kW]	240	315	1.992	1.992	1.900
Spezifische Elektroenergie ^{*1)} für Elektrische Antriebe	[kJ/kg]	111	37	168	168	168
Wärmeenergie Trocknung	[kW]	4.500	18.174	30.814	30.420	30.765
Spezifische Wärmeenergie Trocknung ^{*1)}	[kJ/kg]	2.077	2.145	2.598	2.559	2.715
Nutzbare Brödenenergie	[kW]	650	0	26.884	26.540	26.841
Spezifische nutzbare Brödenenergie ^{*1)}	[kJ/kg]	300	0	2.267	2.232	2.368
Effektive Wärmeenergie Trocknung	[kW]	3.850	18.174	3.930	3.880	3.924
Spezifische Effektive Wärmeenergie Trocknung ^{*3)}	[kJ/kg]	1.777	2.145	331	326	346
Wirkungsgrad Elektroenergie ^{*2)}	[-]	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Kesselwirkungsgrad Wärmeenergie	[-]	0,96	0,96	0,91	0,91	0,91
Wärmeleistung Heizöl EL für Elektroenergie	[kW]	615	808	5.108	5.108	4.872
Spezifische Wärmeleistung Heizöl EL Elektro ^{*1)}	[kJ/kg]	284	95	431	430	430
Wärmeleistung Heizöl EL für Wärmeenergie Trocknung	[kW]	4.010	18.931	4.319	4.263	4.312
Spezifische Wärmeleistung Heizöl EL Trocknung ^{*1)}	[kJ/kg]	1.851	2.235	364	359	380
Massenstrom Heizöl EL für Elektroenergie	[t/h]	0,02	0,03	0,17	0,17	0,16
Spezifischer Massenstrom Heizöl EL Elektro ^{*1)}	[kg/kg]	0,0026	0,0009	0,0039	0,0039	0,0039
Massenstrom Heizöl EL für Wärmeenergie Trocknung	[t/h]	0,34	1,58	0,36	0,36	0,36
Spezifischer Massenstrom Heizöl EL Trocknung ^{*1)}	[kg/kg]	0,0430	0,0519	0,0085	0,0083	0,0088
Summe Massenstrom Heizöl	[t/h]	0,36	1,61	0,53	0,52	0,52
Summe Spezifischer Massenstrom Heizöl EL ^{*1)}	[kg/kg]	0,0455	0,0527	0,0124	0,0122	0,0127
Heizwert Heizöl EL	[MJ/kg]	43,08				
Dichte Heizöl (T=15 °C)	[kg/m ³]	840				
Spezifische CO ₂ -Bildung	[kg _{CO2} /kg _{Heizöl EL}]	3,16				
Massenstrom CO ₂	[t/h]	1,12	5,08	1,67	1,65	1,64
Spezifischer Massenstrom CO ₂ ^{*1)}	[kg/kg]	0,14	0,17	0,04	0,04	0,04
Prozentualer spezifischer Massenstrom CO ₂	[%]	86	100	23	23	24
Massenstrom CO ₂ im Jahr Dekanterkuchen und Sirup bezogen auf 30,5 t/h	[t/a]	35.076	40.618	9.513	9.408	9.800

*1) bezogen auf Dekanterkuchen und Sirup
*2) nach: Khartchenko, N.V.; Umweltschonende Energietechnik; Vogel Buchverlag, Würzburg, 1997
*3) Trommeltrockner mit geschlossenem Gaskreislauf und integrierter Nachverbrennung