Aufbau, Inbetriebnahme und CFD-Simulation einer Anlage zur Bestimmung der Strömungszustände bei der pneumatischen Förderung von Schüttgütern am Beispiel von Teff-Samen – Zusammenfassung

In vielen Teilen der Welt leben Menschen in ländlichen Regionen und sind abhängig von eigenen landwirtschaftlichen Erzeugnissen. Das Getreide Teff ist in westlichen Ländern bislang nur wenig verbreitet, in Äthiopien hingegen gehört Teff zu den wichtigsten Grundnahrungsmitteln. Allerdings gewinnt das glutenfreie Getreide, auch in westlichen Ländern, zunehmend an Bedeutung. [1]

Für die in Äthiopien lebende Bevölkerung ist Teff demnach eines der Grundnahrungsmittel. Dementsprechend ist es überlebenswichtig, dass bspw. geerntetes Getreide dauerhaft gelagert werden kann und der Bevölkerung über das Jahr hinweg zur Verfügung steht.[2] Um dies zu gewährleisten, muss das Getreide zunächst in ein Silo oder ähnliche Aufbewahrungsmöglichkeiten gefördert werden. Hierbei können jedoch etwaige Probleme auftreten, die die Haltbarkeit des Getreides beeinflussen oder im schlimmsten Fall zum Verderb des Getreides führen können. Dementsprechend ist der Vorgang der Förderung von großer Bedeutung und muss sorgfältig geplant und durchgeführt werden. Unzählige mechanische Möglichkeiten stehen heutzutage zur Verfügung, um z.B. Schüttgüter zu fördern. Allerdings sind nicht alle davon geeignet, um verderbliche Lebensmittel zu fördern. Das Ziel der Masterarbeit war die Untersuchung der pneumatischen Förderung von Teff. Insbesondere der Druckverlust sowie die Ermittlung der sich einstellenden Strömungsform stand hierbei im Vordergrund.

Zunächst wurden die allgemeinen Charakteristika von Partikeln sowie die spezifischen Charakteristika von Schüttgütern eruiert. Anschließend wurde das Getreide Teff sowie die für die Untersuchungen notwendigen Eigenschaften und Kennzahlen des Getreides vorgestellt. Die getreidespezifischen Werte, die für die Simulation sowie die Auslegung der Versuchsanlage verwendet wurden, stammen zum einen aus einer im Vorfeld an der TU Kaiserslautern durchgeführten Forschungsarbeit von Ehmsen, End et al. (2019) aber auch aus der einschlägigen Fachliteratur. [3-7]

Teff ist das kleinste Getreide der Welt mit einer durchschnittlichen Länge von 1,1056 mm und einer Breite von 0,6128 mm. Der durchschnittliche projektions-flächenäquivalente Partikeldurchmesser beträgt in Anlehnung an Ehmsen, End et al. (2019) 0,8488 mm. Die Beschreibung der Partikelform erfolgt mit Hilfe von Formfaktoren wie bspw. Sphärizität (ψ =0.4893) und Zirkularität (ψc =0,9541). Aus den Werten der Tabelle 1 lässt sich schließen, dass kein kugelförmiges Partikel (ψ≠0 bzw. ψc≠0) vorliegt. Es handelt sich bei Teff demnach um ein kreisförmig, ellipsoides Partikel. Aus den Ergebnissen der Forschungsarbeit ist zu entnehmen, dass Teff eine Partikeldichte von 1403,24 kg/m3 und eine Schüttgutdichte von 867,8 kg/m3 hat. Bei den Untersuchungen hat sich mit der eben genannten Schüttgutdichte sowie einer durchschnittlichen Verfestigungsspannung von 1,52 kPa eine Porosität von 38,16 % eingestellt.[3]

Insgesamt kann der pneumatische Förderprozess in drei Prozessschritte unterteilt werden. Zunächst wird der Feststoff in den Fördergasstrom eingeschleust. Danach findet der Transport durch die Förderleitung statt. Zum Teil müssen Gas und Feststoff nach der Förderung wieder voneinander getrennt werden. Pneumatisch betriebene Förderanlagen bestehen demnach aus diesen Einzelkomponenten: Feststoffschleuse, Druckerzeuger bzw. Fördergaslieferant, Förderstrecke, Feststoffabscheider. [8-10]

Abbildung 1: Anhaftung der Partikel an dem Kupferdraht [Eigene Darstellung]

Damit die pneumatische Förderung von Teff experimentell untersucht werden konnte, wurde eine Versuchsanlage aufgebaut. Die Bestandteile der Versuchsanlage und die damit zusammenhängenden Schwierigkeiten wurden ebenfalls im Verlauf der Arbeit diskutiert. Dazu zählten unter anderem die elektrostatische Aufladung der Glasrohrelemente durch die Reibung der Teff-Samen an den Rohrwänden. Um diese abzuführen bzw. deren Entstehung gar zu verhindern, wurde ein Kupferdraht durch die gesamte Anlage verlegt. Dadurch wurde die Problematik der elektrostatischen Aufladung behoben. Durch den Draht entstand jedoch das Problem der Anhaftung der Partikel (Abbildung 1) an dem Kupferdraht, wodurch die Strömung der Partikel beeinflusst wurde. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass die Untersuchung der Strömungsform mit der vorliegenden Versuchsanlage zu keinen brauchbaren Erkenntnissen führen wird.

Zudem sollte der Druckverlust untersucht werden. Dies war jedoch aufgrund der unzureichenden Genauigkeit der vorhandenen Manometer nicht möglich. Aufgrund der auftretenden Probleme sowie dem begrenzten Zeitrahmen der Arbeit wurde die angestrebte experimentelle Untersuchung beendet. Allerdings wurden einige Optimierungsvorschläge für die bestehende Versuchsanlage genannt. Hierzu zählen z.B. die Verwendung von Glasrohren mit eingefügtem Kupferband oder die Verwendung von Schrägrohrmanometern mit Wassersäule. Weiterhin konnte eine erste qualitative Tendenz der experimentellen Ergebnisse ermittelt werden. Allgemein wurde eine Tendenz zur Ausbildung einer Strähnen- und Ballenförderung erkannt. (Abbildung 2)

Abbildung 2: Bei der Förderung ausgebildete Strähnen- und Ballenförderung [Eigene Darstellung]

Neben den experimentellen Untersuchungen wurde die pneumatische Förderung von Teff-Samen ebenfalls mithilfe computergestützter Simulation untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Geometrie der Versuchsanlage in 3D erstellt. Die pneumatische Förderung von Teff wurde anhand unterschiedlicher Anfangs-Gasgeschwindigkeiten und Beladungen untersucht. Zum einen wurde der gesamte Druck am In- und Outlet ermittelt, was zu dem Schluss führte, dass mit steigender Gasgeschwindigkeit sowie Partikelbeladung der Druckverlust ansteigt. (Abbildung 3)

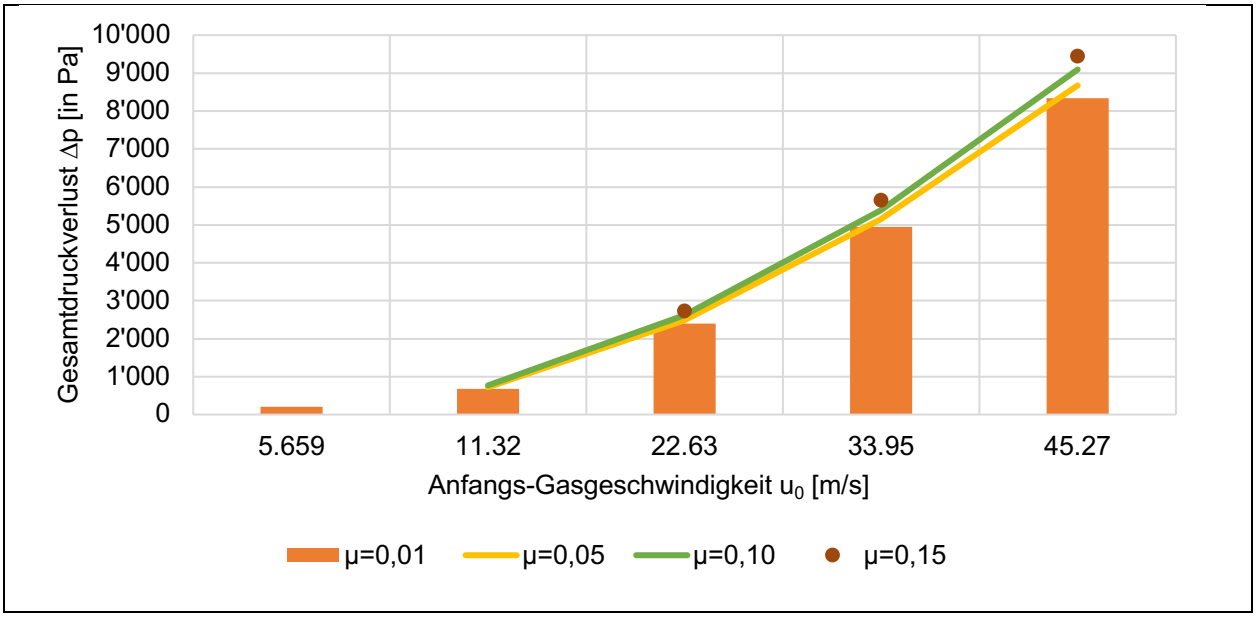

Abbildung 3: Druckverlust für unterschiedliche Anfangs-Gasgeschwindigkeiten und Beladungen μ [Eigene Darstellung]

In Anlehnung an Bohnet [11], Gericke [12] und Stieß [13] liegt die hier untersuchte pneumatische Förderung von Teff im Bereich der Niederdruckförderung. Alle untersuchten Simulationen weisen ein ähnliches Druckprofil auf, die Höhe des Druckes variiert jedoch in Abhängigkeit der Anfangs-Gasgeschwindigkeit. Der nachstehenden Abbildung 4 können beispielhafte Abbildungen der Druckprofile am In- und Outlet entnommen werden. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die im linken Teil der Abbildung gezeigte Skala lediglich für dieses Druckprofil gütig ist. Am Inlet sind die Druckschichten kreisförmig um einen mittig zentrierten Punkt angeordnet. Der maximal gemessene Druck liegt hierbei in unmittelbarer Nähe zur Rohrwand. Weiterhin wird ersichtlich, dass der Druck

insgesamt in Richtung der Rohrmitte abnimmt. Zudem ist zu erkennen, dass die einzelnen Druckschichten, bei Betrachtung des Rohrquerschnitts, keine Kreisform mehr annehmen, wie dies beim Inlet der Fall war. Am Outlet kann keine einheitliche Darstellung des Druckprofils festgestellt werden.

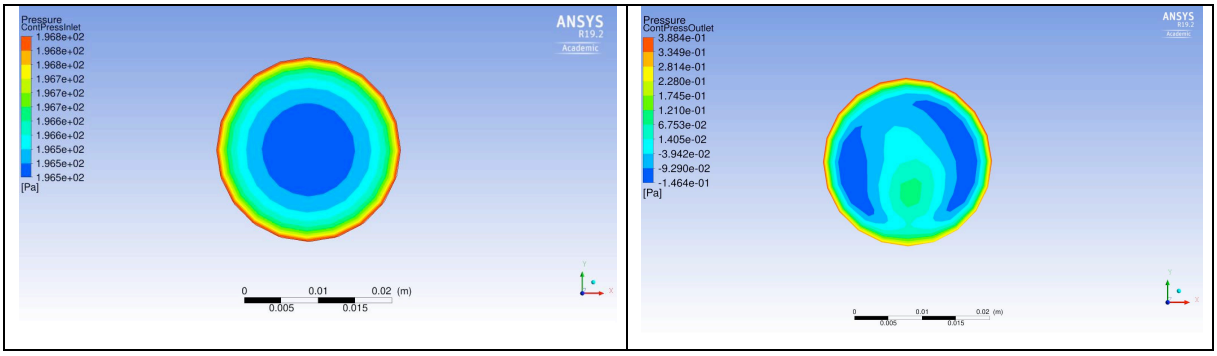

Abbildung 4: Links Druckprofil am Inlet (u_0=5,659 m/s und μ=0,01); Recht Druckprofil am Outlet (u_0=11,32 m/s und μ=0,01) [Eigene Darstellung]

Weiterhin wurde erfasst, wie viele Partikel am Ende der Simulation das Rechengebiet verlassen und welchen Weg sie im Verlauf der Förderung durchlaufen. Hierbei wurde festgestellt, dass nicht bei allen durchgeführten Simulationen sämtliche Partikel das Rechengebiet innerhalb der Simulationszeit verlassen haben. (Abbildung 5)

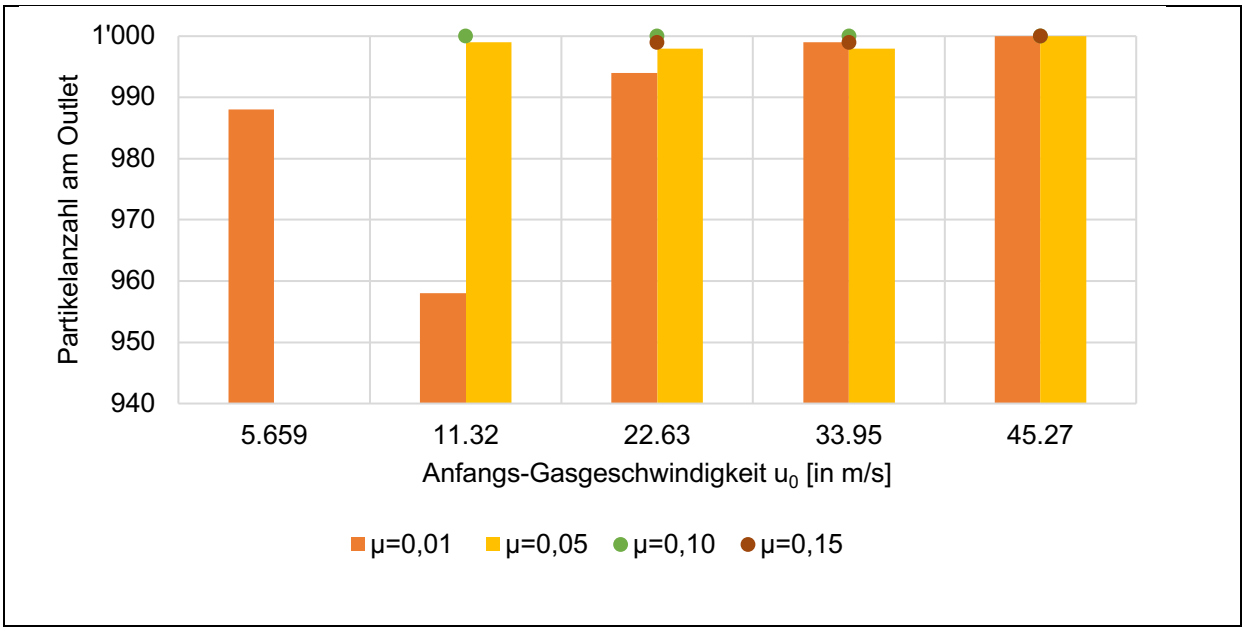

Abbildung 5: Anzahl der Partikel, die das Rechengebiet am Outlet verlassen haben für unterschiedliche Anfangs-Gasgeschwindigkeiten u_0 und Beladungen μ [Eigene Darstellung]

Neben dem Druck und dem Druckverlust wurde ebenfalls die Entwicklung der Fördergeschwindigkeit innerhalb der Rohre untersucht. Für die Aufbereitung der berechneten Daten wurde das Programm CFD-Post (ANSYS) verwendet. Anschließend wurde die Entwicklung des gesamten Druckes, aber auch der Geschwindigkeit innerhalb der Anlage untersucht. Simulationen mit reiner Luftströmung (μ=0) als auch mit unterschiedlichen Partikelmassenströmen bzw. Beladungen (μ>0) wurden durchgeführt.

Hierbei wurde unter anderem festgestellt, dass insbesondere in den Umlenkungen die Geschwindigkeiten stark schwanken. (Abbildung 6 und Abbildung 7)

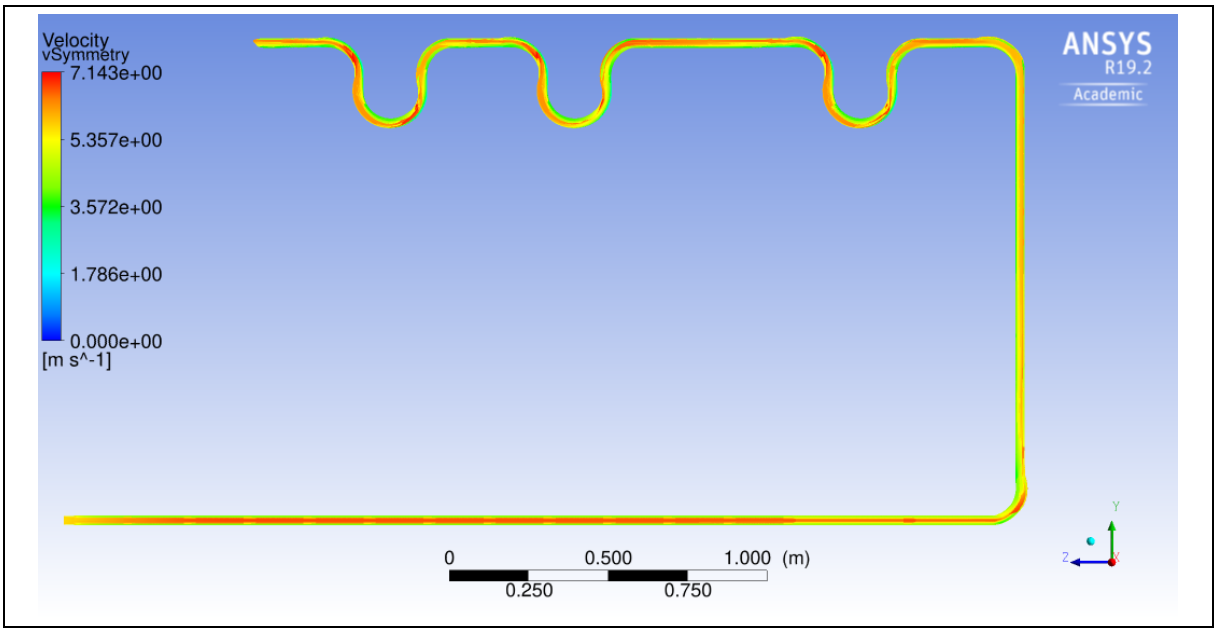

Abbildung 6: Geschwindigkeitsvektoren bei u_0=5,659 m/s und μ =0 [Eigene Darstellung]

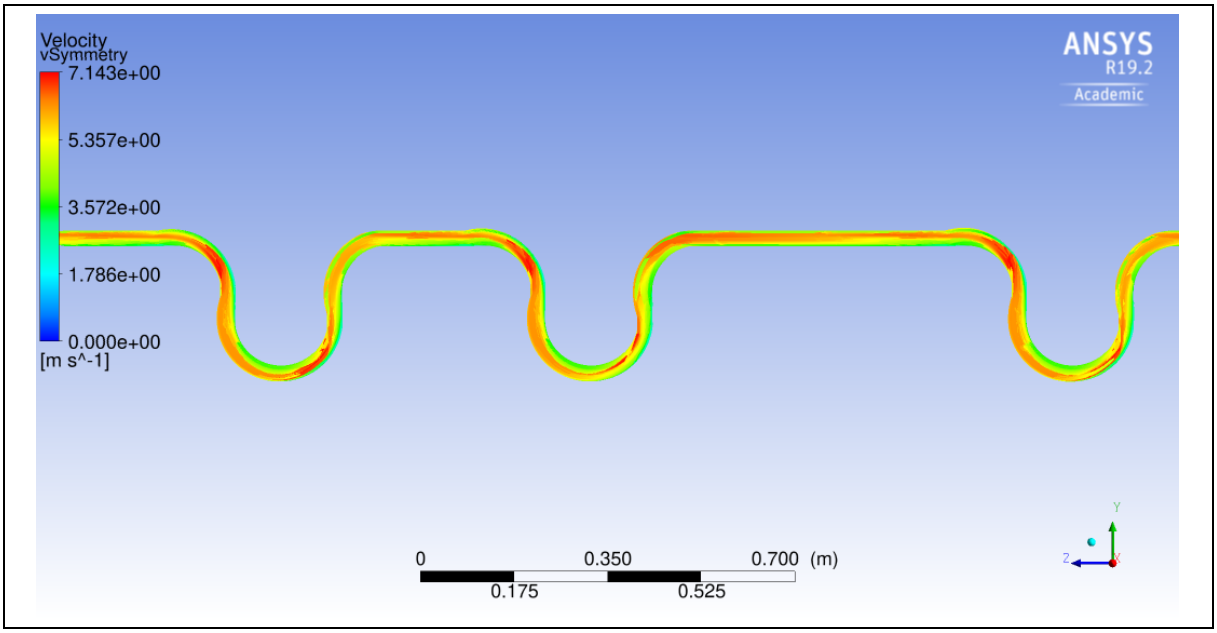

Abbildung 7: Geschwindigkeitsvektor innerhalb der drei U-Förmigen Umlenkungen, bei u_0=5,659 m/s und μ =0 [Eigene Darstellung]

Zudem wurde die mittlere Gasgeschwindigkeit ($\bar{u}$) für alle Anfangs-Gasgeschwindigkeiten und Partikelmassenströme berechnet. Hieraus wird ersichtlich, dass der Unterschied der mittleren Gasgeschwindigkeit für die reine Gasströmung und die Partikel-beladenen Strömungen lediglich marginal sind. Auf den ersten Blick kann jedoch festgestellt werden, dass die mittlere Geschwindigkeit ($\bar{u}$) für alle untersuchten Strömungen unterhalb der Anfangs-Gasgeschwindigkeit u_0 liegt. Bei den Strömungen mit reiner Luft beträgt die mittlere Gasgeschwindigkeit zwischen 72,73 % und 55,57 % der Anfangs-Gasgeschwindigkeit. Mit steigendem u_0 sinkt der Anteil der mittleren Gasgeschwindigkeit an

der Anfangs-Gasgeschwindigkeit. Für u_0=45,27 m/s und einen Partikelanteil von 15 % am Gasmassenstrom beträgt die mittlere Gasgeschwindigkeit nur rund 55 % der Anfangs-Gasgeschwindigkeit.

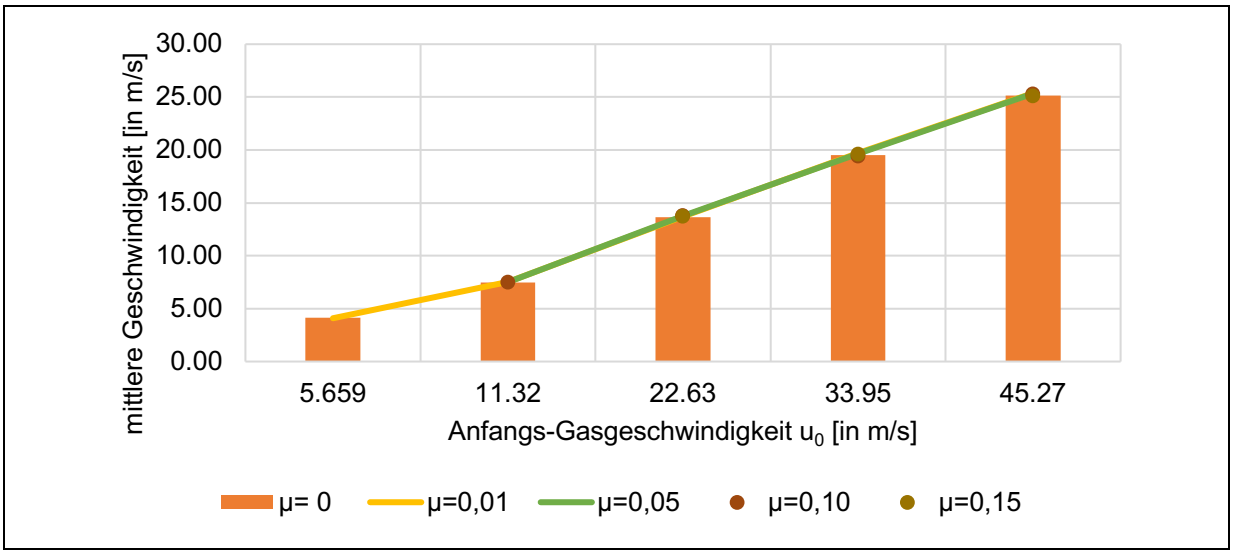

Abbildung 8: Mittlere Geschwindigkeit der einzelnen Simulationen [Eigene Darstellung]

Die mittlere Gasleerrohrgeschwindigkeit wurde mithilfe von CFD-Post ermittelt. Die Berechnung der Vergleichsgeschwindigkeit ist in diesem Fall jedoch wertlos, da hier bereits Luft als Fördermedium verwendet wird. Demnach ist die Vergleichsgeschwindigkeit identisch mit der berechneten Geschwindigkeit. Die Berechnung der Vergleichsgeschwindigkeit liefert lediglich für den Fall, dass andere Gase verwendet werden, sinnvolle Erkenntnisse.

Im Hinblick auf weitere Forschungsfragen könnte die pneumatische Förderung von Teff-Samen unter Verwendung von anderen Gasen (z.B. Inertgas) untersucht werden. Weiterhin könnte durch den Austausch der vorhandenen Glasrohre durch Glasrohrelemente mit Kupferband die Anlage für experimentelle Testzwecke genutzt werden. Dadurch könnte ein Vergleich zwischen den experimentell ermittelten Daten und den simulierten Daten gezogen werden. Die Anlage könnte auch zur Untersuchung der pneumatischen Förderung von anderen Stoffen verwendet werden. Zudem könnte durch Veränderung der Geometrie der Anlage, die Simulation ausgebaut werden, so dass bspw. ein Teil der Förderstrecke schräg aufwärts verläuft.

Quellenverzeichnis:

[1] Global Hunger Index - A Peer-Reviewed Publication (2020): Äthiopien: Eine Eingehendere Betrachtung von Hunger und Unterernährung. Online verfügbar unter https://www.globalhungerindex.org/de/case-studies/2018-ethiopia.html, zuletzt aktualisiert am 13.09.2020, zuletzt geprüft am 13.09.2020.

[2] Minten, Bartholomeus; Seyoum, Taffesse Alemayehu; Brown, Petra: The economics of Teff. Exploring Ethiopia's biggest cash crop. Washington. Online verfügbar unter https://books.google.lu/books?id=-4tlDwAAQBAJ&pg=PA191&lpg=PA191&dq=statistics+about+teff+acreage&source=bl&ots=vyhQ_bLj32&sig=ACfU3U36oK2oFvrN6kGiGfjM2l-bhEMqQg&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwimip-1y9voAhWfQEEAHUSRCsUQ6AEwCnoECBUQJw#v=onepage&q=statistics%20about%20teff%20acreage&f=false.

[3] Ehmsen, Svenja; End, Matthias; Körber, Teresa (2019): Experimentelle Untersuchungen von Teffsamen sowie Teffmehl und Analyse zur Optimierung des Mahlprozesses. Forschungsprojekt. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, zuletzt geprüft am 18.11.2019.

[4] Herak, D. (2016): Image analysis of the shapes and dimensions of Teff seeds (Eragrostis tef). In: *Agroeconomy Research* 14 (2), S. 1299–1305, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

[5] Bultosa, G.; Taylor, J. R. N. (2004): Teff. In: Harold Corke und Charles Walker (Hg.): Encyclopedia of Grain Science. Unter Mitarbeit von Colin Wrigley. 1. Aufl., S. 281–290, zuletzt geprüft am 23.04.2020.

[6] Bultosa, G. (2007): Characterization of grain and flour quality factor in tef (Eragrostis tef) varieties for i. In: *Journal of Applied Sciences Research* 3 (12), S. 2042–2051. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Geremew_Bultosa/publication/228515289_Physicochemical_characteristics_of_grain_and_flour_in_13_tef_Eragrostis_tef_Zucc_Trotter_grain_varieties/links/56e182d308aec09a8bc07d9c/Physicochemical-characteristics-of-grain-and-flour-in-13-tef-Eragrostis-tef-Zucc-Trotter-grain-varieties.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2020.

[7] Zewdu, A. D.; Solomon, W. K. (2007): Moisture-Dependent Physical Properties of Tef Seed. In: *Biosystems Engineering* 96 (1), S. 57–63. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2006.09.008.

[8] Hilgraf, Peter (2019): Pneumatische Förderung. Grundlagen, Auslegung und Betrieb von Anlagen. Berlin: Springer Vieweg, zuletzt geprüft am 18.11.2019.

[9] Akhil, Raj P.; Anish, Joseph; Harinarayanan, S.; Tobin, Thomas (2017): Design of Pneumatic Conveying System. In: *International Journal for Innovative Research in Science & Technology* 3 (11), 246-251, zuletzt geprüft am 18.11.2019.

[10] Kraume, Matthias (2020): Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Grundlagen und apparative Umsetzungen. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Lehrbuch), zuletzt geprüft am 06.07.2020.

[11] Bohnet, M. (2012): Mechanische Verfahrenstechnik. Hoboken: John Wiley & Sons, zuletzt geprüft am 11.03.2020.

[12] Gericke, Willi: Wirth, Karl-Ernst (1984): Pneumatische Schüttgutförderer. Regensdorf/Zürich, zuletzt geprüft am 18.11.2019.

[13] Stieß, Matthias (1997): Mechanische Verfahrenstechnik 2. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch), zuletzt geprüft am 18.11.2019.