

Schlussbericht vom 30.09.2021

zu IGF-Vorhaben Nr. 19995 N

Thema

Verbesserung der pneumatischen Beschickung von Prozessen zur Nutzung halmgutartiger Biomasse

Berichtszeitraum

01.04.2018 bis 30.06.21

Forschungsvereinigung

VGB PowerTech e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Fachgebiet für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitung, TU Berlin (MVTA)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	4
2	Angestrebtes Forschungsziel.....	7
3	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse	8
4	Lösungsweg und Ergebnisse	10
4.1	Auswahl, Vorbehandlung und Charakterisierung geeigneter Halmgüter	11
4.1.1	Biogene Halmgüter	11
4.1.2	Referenzmaterialien.....	12
4.2	Aufbau und Erweiterung der Versuchsanlagen.....	13
4.2.1	Pneumatische Förderanlage.....	13
4.2.2	Biegeversuchsstand	16
4.2.3	Laser-Doppler-Anemometer	17
4.2.4	Highspeed-Kamera-Aufbau zur Partikelverfolgung	18
4.2.5	Befeuchtung von Halmgutproben mittels Deliqueszenzmethode.....	18
4.3	Erweiterung des DEM/CFD-Rahmens	20
4.3.1	Erweiterung der DEM zur Abbildung flexibler Partikel	20
4.3.2	Erweiterung der CFD zur Berechnung der Widerstandskraft biegsamer Partikel	22
4.4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	24
4.4.1	Ergebnisse der Förderversuche an der PNF.....	24
4.4.2	Ergebnisse der Biegeuntersuchungen	31
4.5	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen	33
4.5.1	DEM-CFD Pneumatische Förderung	33
4.5.2	DEM - Biegung von Einzelpartikeln.....	37
5	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU	39
6	Verwendung der Zuwendung.....	40
6.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	41
7	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	42
7.1	Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes	43
8	Veröffentlichungen.....	44
9	Studentische Arbeiten.....	45
10	Literaturverzeichnis	47

Forschungsthema

Verbesserung der pneumatischen Beschickung von Prozessen zur Nutzung halmgutartiger Biomasse

Förderhinweis:

Das IGF-Vorhaben 19995 N der VGB-Forschungstiftung, Deilbachtal 173, 45257 Essen wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Feste Biomasse liefert einen wichtigen Beitrag zu einer langfristigen, dezentralen, CO₂-neutralen und gesicherten Brennstoffversorgung. Während Holz zur Erzeugung von Wärme und Strom mit einem Anteil von ca. 48 % an den in Europa genutzten erneuerbaren Energien schon große Bedeutung hat [1], bleiben weitere Potentiale nachwachsender biogener Brennstoffe zu einem wesentlichen Anteil noch ungenutzt [2]. Insbesondere halmgutartige Biomassen, wie Stroh- und Gräser, sind heutzutage in Deutschland noch geringer genutzt. Mögliche Nutzungsszenarien sind neben der bereits in kleinem Umfang erfolgenden energetischen, in Zukunft auch die verstärkte stoffliche / biotechnologische Nutzung. Der große Vorteil, insbesondere der Nutzung von Stroh, liegt darin, dass es als landwirtschaftliches Koppelprodukt kaum Nutzungskonkurrenz erzeugt. Einzig ein gewisser Anteil muss auf dem Feld verbleiben, um eine ausgeglichene Humusproduktion zu gewährleisten. Die energetische oder stoffliche Nutzung des Strohs kann daher für Landwirte eine zusätzliche Einkommensquelle darstellen und damit auch die Profitabilität des Getreideanbaus erhöhen. Gleiches gilt hinsichtlich der Nutzungskonkurrenz ähnlich auch für das Gräseraufkommen als Bestandteil z.B. von Grünschnitt bzw. Garten- und Parkabfällen, deren stärkere Nutzung ebenfalls einen klaren wirtschaftlichen Mehrwert erzeugen kann.

Eine Auswertung verschiedener Studien durch das Deutsche Biomasse Forschungszentrum (DBFZ) [3] zeigt für das Brennstoffpotential von halmgutartiger Biomasse in der Bundesrepublik Deutschland eine Bandbreite zwischen 16 und 76 TWh/a. Diese Schwankungsbreite resultiert aus unterschiedlichen Rahmenbedingungen der einzelnen Studien, die insbesondere den Strohbedarf im landwirtschaftlichen Bereich (Erhaltung der Humusbilanz und Viehhaltung) unterschiedlich bewerten. Die angegebenen Potentiale halmgutartiger Biomasse würden für die Erzeugung von 1,2–5,6 % des gesamten Wärmebedarfs der Bundesrepublik Deutschland (1320 TWh im Jahr 2014 [4]) ausreichen. So bewertet auch die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V. [5] halmgutartige Biomasse, insbesondere Stroh, als einen wichtigen potentiellen zukünftigen Energieträger. Aufgrund des im Vergleich zu fossilen Energieträgern geringen Heizwerts des Strohs empfiehlt sich eine lokale Erzeugung und Nutzung. Gerade der Transport des Strohs ist dabei ein wichtiger Faktor, der die Energiebilanz beeinflussen kann. Neben dem Transport vom Feld zum Silo, in dem das Stroh zu Ballen gepresst per Lastkraftwagen transportiert wird, ist auch der Transport zur Anlage wichtig. In diesem letzten Schritt werden die Ballen oftmals aufgelöst und das Stroh im losen Zustand gefördert.

Vorreiter in der energetischen Strohnutzung ist Dänemark, wo bereits eine Vielzahl von Anlagen betrieben wird [6]. In Deutschland sind Anlagen aus unternehmerischer Sicht bis 100 kW am interessantesten, da darüber hinaus die Anforderungen an die Emissionen steigen. In den Größenklassen bis 100 kW kommen oft Rostfeuerungen zum Einsatz, in denen das Stroh entweder als Ballen oder ebenfalls mit Hilfe einer pneumatischen Förderung zur Einschleusung transportiert wird. Auch der Einsatz von Stroh in Biogasanlagen erfolgt entweder als Substratergänzung oder teilweise auch im alleinigen Einsatz. Eine erste Anlage, basierend auf dem letzteren Konzept, ist durch die Firma Verbio mit einer Anlagenkapazität von 16,5 MW seit 2014 in Betrieb [7]. In dieser wird Biomethan aus 100% Stroh gewonnen; der Jahresbedarf an Stroh beträgt dabei 40.000 t. Der Transport dieser großen Menge Stroh erfolgt in dieser Art Anlage nach der Ballenauflösung zum Teil per pneumatischer Förderung [8]. Auch in größeren

landwirtschaftlichen Betrieben wird Stroh zur stofflichen Nutzung als Streu oftmals zerkleinert per pneumatischer Förderung transportiert [9].

Es ist davon auszugehen, dass, basierend auf den politischen Entwicklungen der letzten Jahre, die vorsehen, den CO₂-Ausstoß über 2020 hinaus deutlich zu reduzieren [10], die Verbreitung der energetischen/stofflichen Nutzung von landwirtschaftlichen Koppelprodukten wie z.B. Stroh aber auch grasartiger Biomasse insbesondere z.B. als Teil von Grünschnitt deutlich ausgebaut werden kann [11]. In einem solchen Rahmen wird auch die effiziente Förderung von halmgutartiger Biomasse im vermehrten Interesse stehen. Zur kostengünstigen, energieeffizienten Auslegung und Betrieb von pneumatischen Förderanlagen muss das Verhalten von länglichen, biegsamen, halmgutartigen Stoffen vorhergesagt werden können. Dies ist bisher nur eingeschränkt möglich. Gängige Standardwerke wie der VDI-Wärmeatlas [12] bieten dabei keine Auslegungshilfe speziell für halmgutartige Biomasse. Besonders deutlich wird die Notwendigkeit der genauen Kenntnis des Förderverhaltens von halmgutartiger Biomasse aus dem Fakt, dass 50-60% aller Funktionsstörungen pneumatischer Förderanlagen auf eine mangelhafte Auslegung und Einstellungsfehler bei der Luftversorgung zurückzuführen sind [13]. Diese Fehler entstehen in erster Linie, wenn das Förderverhalten unbekannt ist und die Anlage ohne Kenntnisse über den Zusammenhang von Druckverlust, Feststoffbeladung, Gut- und Luftmassenstrom bzw. Transportgrenzen und sonstiger materialspezifischer Effekte ausgelegt und eingestellt wird. Eine experimentelle Ermittlung der benannten notwendigen Kennwerte ist nur unter hohem Aufwand möglich und daher gerade für KMUs oft nicht durchführbar; eine mögliche Alternative können daher numerische Verfahren sein. Mit diesen kann mit deutlich geringerem Aufwand eine große Anzahl an Betriebsparametern untersucht werden, die zur Ableitung von Auslegungshilfsmitteln herangezogen werden können.

Charakterisierung der Problemstellung

Pneumatischer Transport eignet sich grundsätzlich zum Transport einer Vielzahl von Schüttgütern und wird häufig für pulverförmige und gröber granular vorliegende Materialien eingesetzt. Zu den Vorteilen zählen die hohe Flexibilität; es kann sowohl horizontal als auch vertikal gefördert werden und auch die Förderung um Kurven stellt kein Problem dar. Große Förderanlagen können Rohrlängen von mehr als 1000 m oder Durchsätze von mehr als 100 t/h erreichen [14]. Daher ist die pneumatische Förderung auch zum Transport von halmgutartiger Biomasse von Interesse. Dieses kann auf Grund seiner relativ geringen Dichte (ca. 50-70 kg/m³ als Häcksel) schon mit geringen Fluidgeschwindigkeiten gefördert werden [15]. Besonders bei der thermischen Nutzung von Stroh wird oftmals bereits heute eine pneumatische Förderung eingesetzt, um das Stroh zum Brennraum zu befördern. Auch größere landwirtschaftliche Betriebe sind oft mit pneumatischen Förderanlagen ausgestattet, um einfach große Mengen von vereinzelter teilweise zerkleinertem Stroh zu transportieren. Ebenso erfolgt pneumatischer Transport von Stroh abschnittsweise oftmals auch bei dessen Einsatz als Substrat in Fermentern von Biogasanlagen sowie auch bei der Herstellung von Strohpellets [16]. Prinzipiell ist die pneumatische Förderung gut verstanden, jedoch konzentrierten sich bisherige Untersuchungen auf pulverförmige und gröber granulare Materialien. Diese weisen aufgrund der Partikelform, -dichte und -größe ein stark abweichendes Verhalten von länglichen Biomassepartikeln, wie etwa Getreidestrohhalm, auf. Die letzteren können sich aufgrund ihrer Länge ineinander verhaken und damit zu Blockaden in der pneumatischen Förderung oder zu Schwankungen im Massenstrom führen [17]. Auch Druckverluste werden durch die Partikelform beeinflusst. Aus Schüttgutperspektive kann auch die aus der Partikelform resultierende Beanspruchung auf Biegung der Halme zu Problemen führen (resultierend breite Partikelgrößenverteilungen durch

Partikelbruch); besonders kritisch sind hier Umlenkungen, die eine erhöhte Beanspruchung auf die Halme ausüben. Ebenso sind Richtwerte und Diagramme über die Strähnenbildung und Auflösung für diese Partikeltypen nicht verfügbar. Diese sind besonders wichtig, wenn zwei oder mehrere Krümmer in kurzem Abstand hintereinander folgen, da die Partikelgeschwindigkeiten im Krümmer absinken und eine gewisse Beschleunigungsstrecke im Auslauf benötigen, um die ursprüngliche Geschwindigkeit wieder zu erreichen. In derartigen Zonen neigt halmgutartige Biomasse zum Verhaken bzw. der Austrag infolge einer nicht aufgelösten Strähne erfolgt ungleichmäßig, was nachfolgende Prozessschritte beeinträchtigen kann.

2 Angestrebtes Forschungsziel

Im Rahmen des Projekts wurde ein kombiniert numerisch/experimenteller Ansatz verwendet, um das Förderverhalten halmgutartiger Biomasse in pneumatischen Förderungen zu charakterisieren. Der numerische Ansatz basierte hierbei auf der Diskreten Elemente Methode (DEM), mit welcher Partikelsysteme mit hohen Partikelanzahlen abgebildet werden können. Die Bewegung der allgemein als Kugeln abgebildeten Einzelkörper wird anhand der Newtonschen Bewegungsgleichungen als Folge der an ihnen angreifenden Kräfte berechnet. Halmgutartige Biomasse mit üblicherweise hohen Verhältnissen von Länge zu Durchmesser lassen sich als verkettete bzw. vernetzte Einzelpartikel beschreiben [18], [19]. Die Berechnung der Wechselwirkungen zum umgebenden Fluid erfolgte durch die Kopplung der DEM mit einer numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics / CFD) [20].

Die Verformung von Halmen sollte über eigens formulierte Wechselwirkungskräfte realisiert werden, welche sich aus Biegemodellen ableiten lassen. Im Simulationsrahmen sollten Deformationsprozesse dann beispielsweise über Partikel-Wand- oder Partikel-Partikel-Kontaktkräfte sowie über Partikel-Fluid-Interaktionen initiiert werden.

Für die Implementation der beschriebenen Modellerweiterungen musste der bestehende DEM-CFD-Simulationsrahmen maßgeblich erweitert werden. Innerhalb der DEM galt es, eine Methodik für die Berechnung der wirksamen Rückstellkräfte während der Verformung innerhalb eines Einzelhalms zu erarbeiten und einzubinden. Ebenso war die Struktur des aus vernetzten Einzelsphären aufgebauten Halmmodells zu konzipieren. Hinsichtlich Modellierungstiefe und Rechenaufwand musste dabei ein arbeitsfähiger Kompromiss gefunden werden. Innerhalb der CFD-Kopplung war die Einbindung zwischen Fluid und verformbaren Partikeln zu realisieren. Da die dem Fluid entgegenstehenden Angriffsflächen von flexiblen Körpern variabel und nicht vorausberechenbar sind, musste eine Methodik zur simultanen Berechnung ebendieser Flächen während eines Kopplungszeitschrittes entwickelt und implementiert werden. Auch hier war eine Abwägung von Genauigkeit und Rechenzeit zu treffen.

Die final umgesetzte Methodik sollte die simulative Abbildung verschiedener Prozessbedingungen der pneumatischen Förderung von halmgutartiger Biomasse erlauben, unter anderem über die lokalen Verteilungen von Position, Orientierung und Geschwindigkeit der Partikel innerhalb der Förderstrecke, die Geschwindigkeits- und Druckprofile der Fluidphase sowie daraus resultierende integrale Prozessparameter wie Fördermassenstrom, Beladung und lokale bzw. globale Druckverluste. Aus dem Ergebnismenge sollten charakteristische Förderzustände wie Stopfgrenzen, Flug-, Strähnen- oder Ballenförderung mit den korrespondierenden Prozessdaten identifizierbar und in entsprechende Zustandsdiagramme übertragbar sein. Anhand der so gewonnenen Daten sollten für die Auslegung und den Betrieb wichtigen Korrelationen abgeleitet werden. Bisher existieren solche Auslegungshilfsmittel nur für sehr kleine oder annähernd äquidimensionale Partikel.

Die begleitende Verifizierung der Simulationen erforderte umfangreiche, eng an die numerischen Arbeiten gebundene Experimente sowohl an Einzelpartikeln als auch an Partikelkollektiven während pneumatischer Förderprozesse. Die hierzu benötigten Versuchsaufbauten waren konzeptionell zu planen, zu errichten und sukzessive zu erweitern. Vorgesehen waren hierbei 3-Punkt-Biegeversuche an Einzelhalmen sowie umfassende Untersuchungen an der hierfür konzipierten pneumatischen Förderstrecke.

3 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein innovativer experimentell-numerischer Ansatz verwendet, um die angestrebten Forschungsergebnisse zu erreichen. Der entwickelte Simulationsrahmen basierend auf der DEM/CFD ist von seiner Komplexität so beschaffen, dass er für industrielle Prozesse eingesetzt werden kann und mit den hier durchgeführten Modifikationen auch mit kommerzieller Software realisierbar ist. Mit der Simulationsmethodik lassen sich neben speziellen Prozessen auch Modellsysteme untersuchen, mit denen einfache Rechenvorschriften abgeleitet werden können, die in der industriellen Praxis Anwendung finden können.

Zur Erreichung der Projektziele waren auf das Projekt zugeschnittene und über den damaligen Stand der Technik hinausgehende wissenschaftliche Arbeiten notwendig.

Für die Untersuchung des Förderverhaltens wurde eine pneumatische Förderanlage im Labormaßstab aus transparenten PMMA-Rohrleitungen errichtet und mit umfassender Sensorik - darunter diverse Druck-, Temperatur- und Luftfeuchtesensoren, einer Messblende zur Bestimmung des Gasvolumenstroms, einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) sowie einer Highspeed-Kamera ausgestattet. Sowohl Gasvolumenstrom als auch Feststoffmassenstrom sind über einen weiten Bereich einstellbar und werden ebenfalls von der Leitwartensoftware (Labview) des Versuchsstands erfasst. Die Förderanlage wurde im Verlauf des Projekts fortschreitend an sich ändernde Anforderungen angepasst und optimiert.

Zur experimentellen Bestimmung des Biegeverhaltens wurden einführende Untersuchungen mittels digitalem Federkraftmesser durchgeführt. Deren Ergebnisse flossen in die Auswahl und Beschaffung eines Prüfgeräts zur Durchführung hochauflösender Dreipunkt-Biegeversuche ein. Der Versuchsstand wurde um eine Digitalkamera und Leuchtmittel erweitert, um die Halmverformung während der Biegeversuche optisch zu erfassen und auszuwerten.

Für den Einsatz als Fördergut innerhalb des Projektes wurde eine Auswahl von vier Getreidearten getroffen, beschafft und einer ausführlichen Charakterisierung hinsichtlich Größe, Form und Biegeverhalten unterzogen. Zusätzlich wurden zwei Referenzmaterialien - Reis und Kunststofftrinkhalme - für Vergleichsuntersuchungen beschafft.

Die DEM-seitige Implementierung der Modellierung flexibler Partikel wurde unter Verwendung des Bonded-Particle-Ansatzes umgesetzt. Dabei werden innerhalb der Simulation einzelne Partikel mittels virtueller Bindungen (Bonds) zu größeren Strukturen vernetzt. Die zwischen den Bindungspartnern wirksamen lageabhängigen Kräfte und Drehmomente prägen der Gesamtstruktur dann ihre äußere Form auf. Die Einbindung des Bonded-Particle-Modells erforderte erhebliche Modifikationen am genutzten DEM-Quellcode; zusätzlich mussten diverse Schnittstellen zur Einpflegung von Startparametern und der Ausgabe problemspezifischer Simulationsergebnisse geschaffen werden.

Mit Hilfe des implementierten Bonded-Particle-Modells wurden halmgutartige Partikel verschiedener geometrischer Form und Auflösung erstellt und innerhalb verschiedener Simulationsszenarien erprobt. Unter anderem wurde der Versuchsaufbau des Dreipunkt-Biegeversuchs numerisch nachgestellt, wofür ein Partikelmodell hoher Komplexität (bis ca. 1000 vernetzte Einzelpartikel) verwendet wurde. Durch Anpassung diverser Modellparameter ließen sich die simulativ erhaltenen Kraft-Weg-Verläufe an diejenigen der experimentellen Untersuchungen anpassen.

Auf Seiten der numerischen Strömungssimulation wurden Geometriedaten der betrachteten Förderstreckenabschnitte erstellt, darunter Horizontal- und Vertikalrohrleitungen sowie verschiedene Krümmer. Des Weiteren wurde eine Feststoffzufuhr-Quelle konzipiert, welche längliche Bonded-Particle-Objekte in den Simulationsraum einbringt. Für die Abbildung der Wechselwirkung zwischen Fluid- und Feststoffphase musste der zugrundeliegende Programmcode erheblich erweitert werden. Insbesondere für die Berechnung von Widerstandskräften an formveränderlichen Partikeln wurden mehrere Alternativlösungen verglichen. Aufgrund der erforderlichen hohen Anzahl an Partikeln wurde ein Partikelmodell geringerer Komplexität mit 10 bis 40 vernetzten Einzelpartikeln verwendet.

Zur numerischen Untersuchung des pneumatischen Transports wurden eine Vielzahl an DEM-CFD-Simulationen an diversen Abschnitten der Förderstrecke (unter anderem Feststoffzufuhr, Horizontal- und Vertikalrohrleitung, Krümmer) durchgeführt. Dabei wurden Partikellänge, Gasgeschwindigkeit und Feststoffmassenstrom sowie Bond-Parameter variiert und deren Einfluss auf Druckverlust und Partikelauenthaltsverteilungen entlang des Querschnitts dargestellt. Die erhaltenen Prozessdaten wurden sowohl den entsprechenden Werten der experimentellen Untersuchungen als auch etablierten Schätzmodellen gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse geeignet sind, die physikalischen Vorgänge charakteristischer Förderzustände der realen Anlage mit guter Näherung zu beschreiben. Der erarbeitete Simulationsrahmen kann somit auch zur Ableitung von Zustandsdiagrammen und Auslegungsvorschriften genutzt werden.

Über den Projektzeitraum entstanden eine Vielzahl an studentischen Arbeiten, darunter neun Master- und fünf Bachelorarbeiten sowie zwei Arbeiten im Rahmen von Projektpraktika, wodurch ein wertvoller Beitrag zur Ingenieurausbildung geleistet werden konnte. Des Weiteren konnten zwei Beiträge auf renommierten Konferenzen platziert werden, so auf der DEM8 2019 [E1] sowie dem ProcessNet Jahrestreffen Agglomerations- & Schüttguttechnik, Mechanische Flüssigkeitsabtrennung und Zerkleinern & Klassieren 2021 [E2]. Eine Journal-Veröffentlichung befindet sich gerade im Reviewprozess [E3].

4 Lösungsweg und Ergebnisse

Details zum Projektablauf sind in Abbildung 1 dargestellt. In der ersten Projektphase wurde eine initiale Auswahl an geeigneten Halmgütern getroffen, welche anhand späterer Erkenntnisse aus anderen Projektabschnitten erweitert wurde. Auf der numerischen Seite wurden zunächst geeignete Modelle zur Abbildung flexibler Partikel zusammengetragen, erprobt und mit ersten Biegeuntersuchungen verglichen. Auf experimenteller Seite wurde der ursprüngliche für Voruntersuchungen genutzte Biegeversuchsstand durch ein komplexes Setup aus Universalprüfgerät mit digitaler Kraft-Weg-Erfassung, Programmierbarkeit und optischer Erfassung der Verformung mittels Digitalkamera ersetzt. Die dadurch erschlossene Erweiterung der messtechnisch zugänglichen Parameter floss wiederum in die Verfeinerung des im DEM-Code implementierten Biegemodells ein.

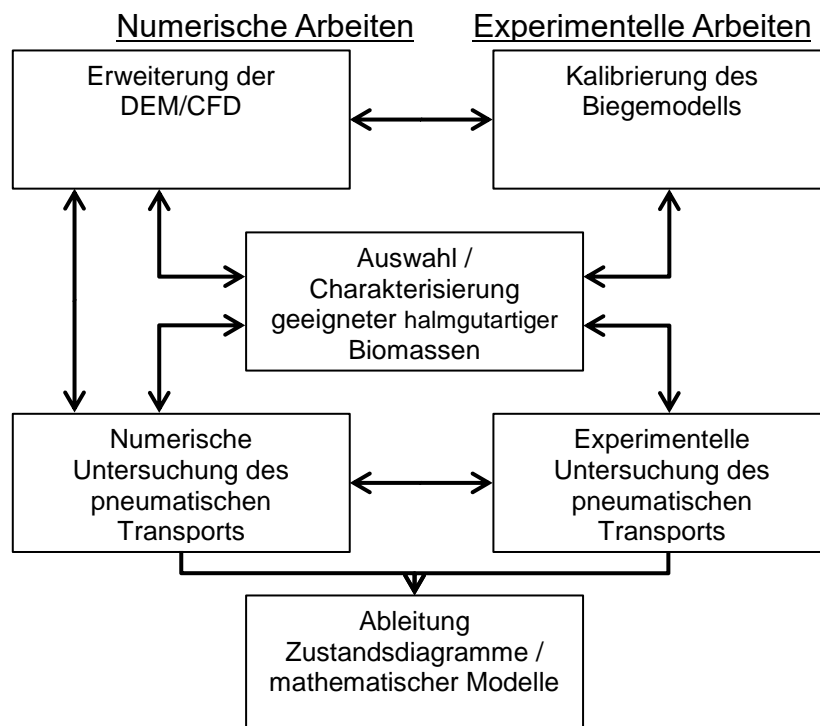


Abbildung 1: Projektablauf des Forschungsvorhabens

Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Transports fand an einer eigens hierfür konzipierten Förderanlage mit einer Gesamtlänge von ca. 20 m statt, welche mit umfassender Messtechnik ausgestattet wurde. An der Förderanlage lassen sich Geschwindigkeitsprofile und Druckverläufe des Fördermediums sowie Massenstrom, Partikelpositionen, Geschwindigkeiten und Orientierungen des Förderguts messen. Die entsprechenden Parameter wurden mit den zugehörigen DEM/CFD-Simulationsergebnissen des numerisch nachgebildeten Versuchs verglichen und dienten so der Kalibration von Modellparametern. Zusammenhänge zwischen Gasgeschwindigkeit, Druckverlust, Feststoffbeladung und Materialart können folglich sowohl auf experimenteller als auch auf numerischer Ebene erlangt und zur möglichen Erstellung von Zustandsdiagrammen und weiteren Auslegungshilfen verwendet werden. Die erarbeitete DEM/CFD-Simulationsmethodik stellt hierbei eine kosten- und zeiteffiziente Alternative dar, mit der auch auf risikofreie Weise die Grenzbereiche des bestimmungsgemäßen Förderbetriebs überschritten und Zustandspunkte extrapoliert werden können.

4.1 Auswahl, Vorbehandlung und Charakterisierung geeigneter Halmgüter

Für die Verwendung als Fördergut wurden vier biogene sowie ein künstliches Halmgut ausgewählt. Zusätzlich für Untersuchungen an rieselfähigem gleichkörnigem Fördergut wurde Reis als Referenzmaterial verwendet. In den folgenden Abschnitten werden die gewählten Materialien, ihre Vorbehandlung und Charakterisierung beschrieben.

4.1.1 Biogene Halmgüter

Zu Beginn der ersten Projektphase musste eine Auswahl des zu untersuchenden Fördergutes getroffen werden. Aus der Vielzahl an in Frage kommenden Arten an halmgutartiger Biomasse wurde Stroh von vier verschiedenen Spezies – Roggen, Weizen, Hartweizen und Miscanthus – identifiziert. Diese sind einerseits aktuell hochrelevant hinsichtlich des Einsatzes in Strohfeuerungsanlagen [3], andererseits weisen sie stark unterschiedliche Partikeleigenschaften auf, wodurch das beobachtbare Förderverhalten eine große Bandbreite aufweist. Alle beschafften Halmgüter wiesen breite Streuungen hinsichtlich der Halmlänge auf, weshalb Vorbehandlungsschritte zur Eingrenzung der Größenverteilung erforderlich waren (Beispiele siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Ausgangsstoffe Roggenstroh (links), Miscanthus (rechts)

Das Aufgabegut wurde einer Vorzerkleinerung mittels Schneidmühle auf Halmlängen < 100 mm unterzogen; anschließend wurde der Feingutanteil mit Partikelgrößen < 2 mm durch Siebklassierung im Mogensen-Sizer abgetrennt (Abbildung 3).

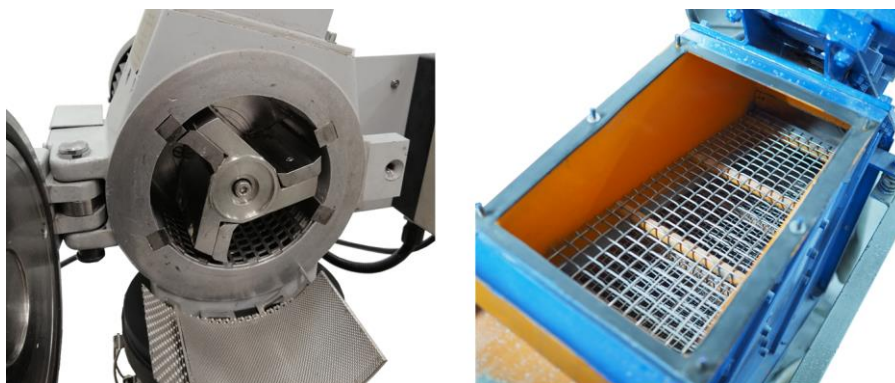


Abbildung 3: Schneidmühle (links), Mogensen-Sizer (rechts)

Die so behandelten Materialien wurden mittels Analysensiebung und digitaler Bildanalyse hinsichtlich Partikelgrößen- und Formverteilung untersucht (Abbildung 4). Des Weiteren erfolgte

eine Ermittlung der Schüttdichte an Haufwerksproben sowie eine Feststoffdichtenbestimmung mittels Gaskymometer.

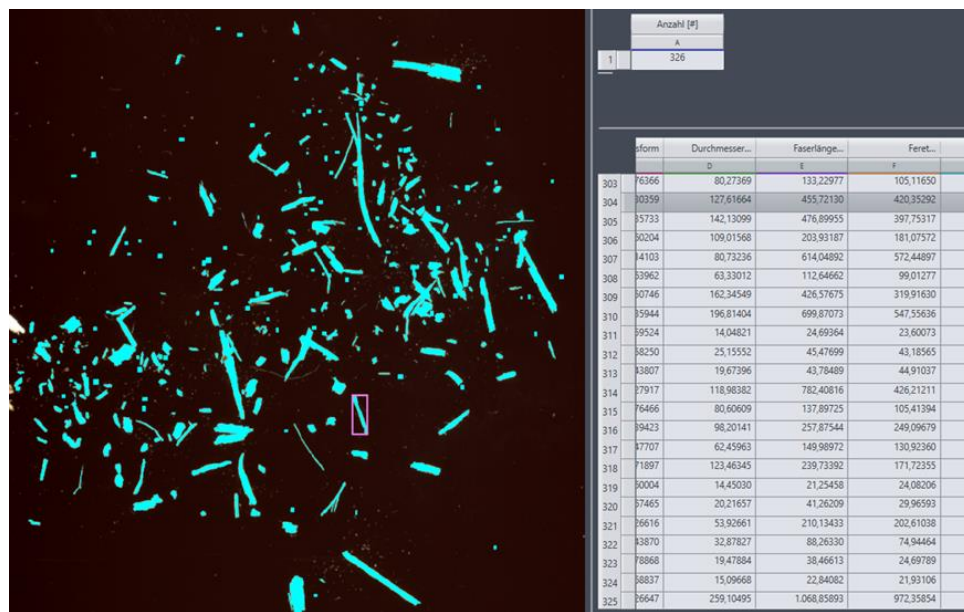


Abbildung 4: Ergebnisse Bildanalyse (Miscanthus, Beispiel)

4.1.2 Referenzmaterialien

Im Sinne der erforderlichen Simulationsvalidierung war es erforderlich, Fördergüter mit annähernd homogenen Partikelmerkmalen zu untersuchen – die zur Verfügung stehenden biogenen Halmgüter wiesen hierfür trotz Vorbehandlung eine zu große Schwankungsbreite ihrer geometrischen und stofflichen Eigenschaften auf. Aus diesem Grunde wurden Polypropylen-Kunststoffhalme des Durchmessers 6 mm in hoher Anzahl beschafft und auf eine Länge von 50 mm zugeschnitten. Insgesamt wurden ca. 2,4 Millionen Halmsegmente bereitgestellt. Für die Abbildung des Förderverhaltens feinerer Partikelfractionen wurde Reis (Jasmin, mehrere Säcke a 20 kg) als weiteres Referenzmaterial beschafft. Beispiele sind in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Referenzmaterialien PP-Trinkhalme (links), Reis (rechts)

4.2 Aufbau und Erweiterung der Versuchsanlagen

Für die experimentellen Untersuchungen der pneumatischen Halmgutförderung sollte eine geeignete Förderanlage konzipiert, errichtet und mit der erforderlichen Sensorik versehen werden. Die initial zur Verfügung stehende Anlage erwies sich hinsichtlich Förderlänge, Kapazität und messtechnischer Ausstattung als ungeeignet und musste umfassend in mehreren Abschnitten erweitert werden. Die resultierende Anlage kann daher als Neukonzept betrachtet werden und wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.2.1 Pneumatische Förderanlage

Für die experimentelle Untersuchung wurde eine Förderanlage zur pneumatischen Saugförderung errichtet. Die Anlage ist in mehreren Ebenen angelegt. Die Förderstrecke im Erdgeschoss der Technikumshalle besteht aus transparenten PMMA-Rohrleitungen des Innendurchmessers von 100 mm und weist eine Gesamtlänge von ca. 20 m auf, welche sich auf zwei Horizontalabschnitte der Längen 10 m und 6 m, einem Steigrohr der Höhe 2,15 m sowie die verbindenden 90°-Krümmer mit Biegeradien von jeweils 385 mm aufteilen. Die saugseitige Feststoffzufuhr erfolgt über einen Trichter mittels Vibrationsrinne. Die Feststoffabscheidung am Ende der Förderstrecke wird über einen Gaszyklon realisiert; optional kann das Fördergut über zwei Prallseparatoren vor dem Steigrohr und vor dem Gaszyklon aus dem Gasstrom abgetrennt werden. Im Kellergeschoss sind ein Messblendenabschnitt zur Gasvolumenstromermittlung sowie die beiden Sauggebläse positioniert (Abbildung 6).

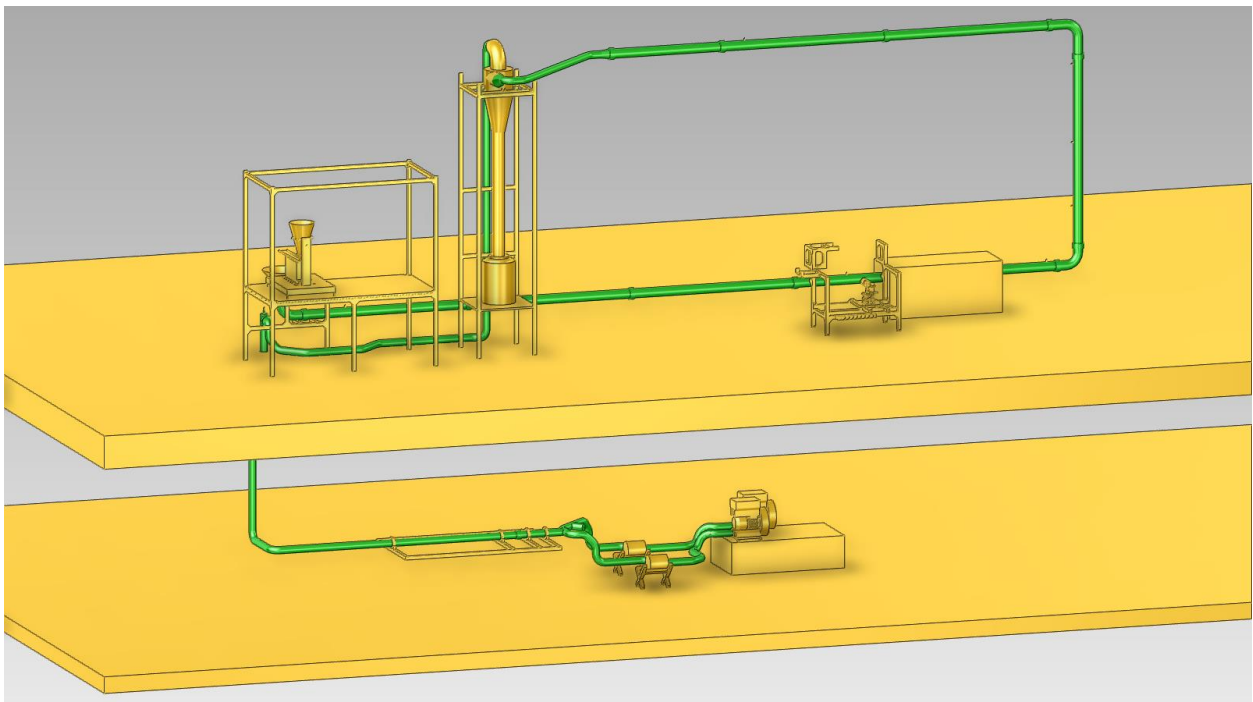


Abbildung 6: Pneumatische Förderanlage, 3D-Schema

Die Anlage ist grundsätzlich auch für die pneumatische Druckförderung geeignet. Dabei werden die Gebläse als Verdichter genutzt. Auf Position des Trichters wird die aus dem Keller aufsteigende Rohrleitung mit der Förderstrecke verbunden; die Feststoffzufuhr erfolgt dort nach dem Venturiprinzip über eine oben geöffnete Rohrverjüngung. Allerdings zeigte sich diese Art der Feststoffzufuhr bei Verwendung von Halmgut als sehr anfällig für Verstopfungen, weshalb die Anlage für die maßgeblichen Untersuchungen im Saugbetrieb gefahren wurde.

Entlang der Förderanlage sind sieben Differenzdrucksensoren (Typ Halstrup Walcher P26) verbaut, welche an Schlüsselstellen die Druckdifferenz zur Umgebung messen und über A/D-Wandler an das Labview Mess- und Steuerungsprogramm angebunden sind (Abbildung 7).

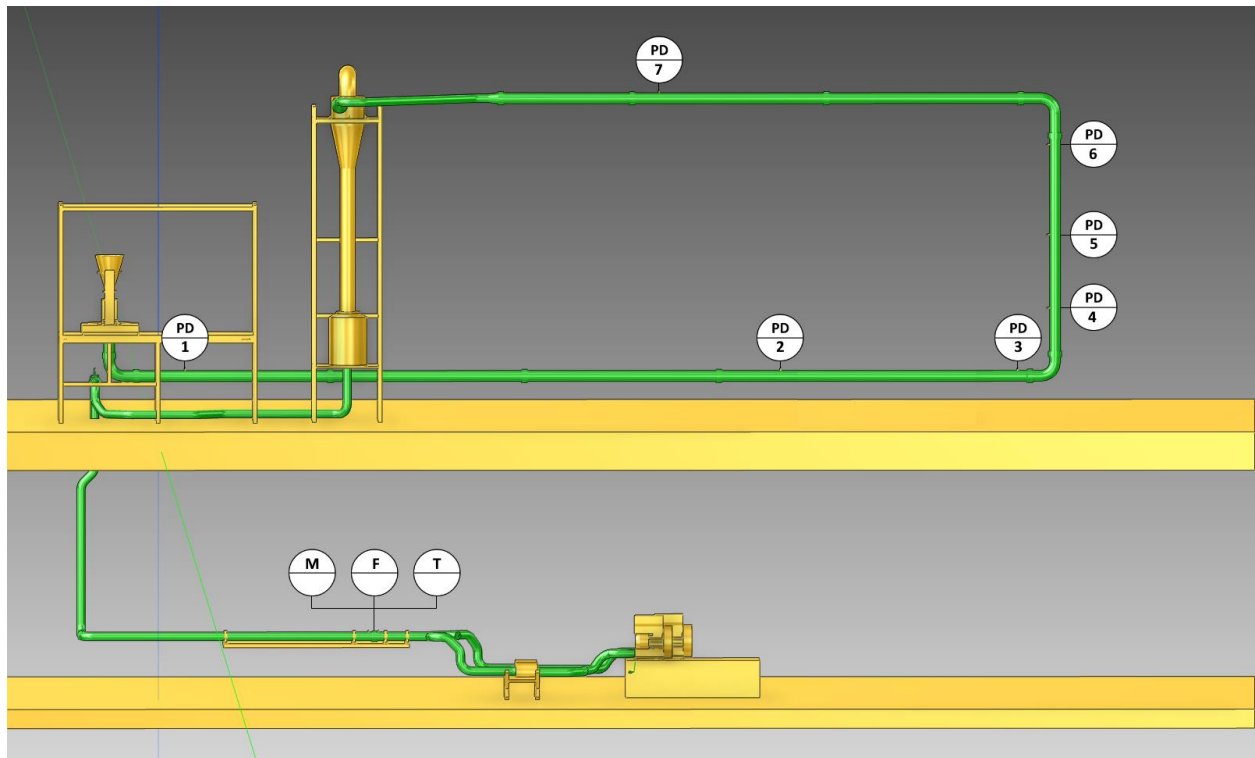


Abbildung 7: Druck-, Feuchte-, Massenstrom- und Temperaturerfassung

Aufgrund ihrer hohen Staubempfindlichkeit wurden sämtliche Differenzdrucksensoren mit Staubfallen versehen (Abbildung 8).



Abbildung 8: Differenzdruckaufnehmer (im Bild links) mit Staubfalle (im Bild oben rechts)

Der Gasvolumenstrom bzw. der Massenstrom des Fördermediums wird über den Druckverlust beim Durchströmen einer D-D/2-Messblende nach DIN EN ISO 5167-2 [21] gemessen (Abbildung 9). Die Berechnung erfolgt innerhalb Labview aus der gemessenen Druckdifferenz, dem Absolutdruck und der Temperatur des Gases an der Messblende.

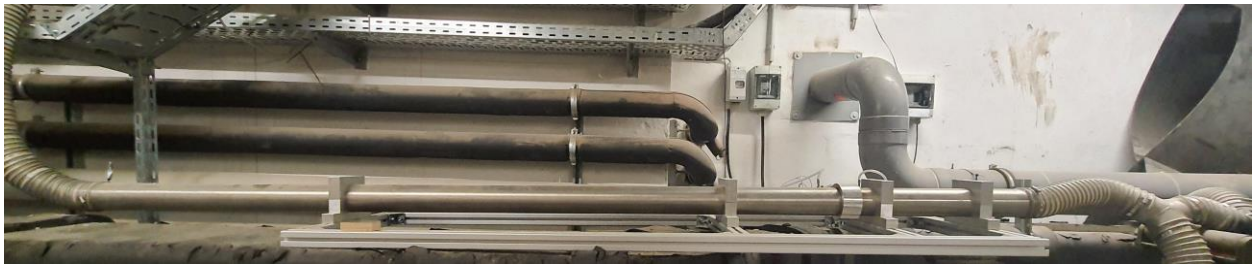


Abbildung 9: Messblende mit Blendeneinlauf- und -auslaufstrecke

Die Steuerung des Gasvolumenstroms erfolgt über die Vorgabe der Leistung der im Keller befindlichen Gebläse (Typ Elmo Rietschle F-Serie, Abbildung 10). Zwischen minimaler und maximaler Gebläseleistung lassen sich Volumenströme zwischen 25 m³/h und 525 m³/h erzeugen, wodurch Leerrohrgeschwindigkeiten von ungefähr 1 m/s bis 18 m/s innerhalb der Förderstrecke realisierbar sind.



Abbildung 10: Sauggebläse (links), Hauptschalter (Mitte) und Steuereinheiten (rechts)

Die Feststoffzufuhr erfolgt über eine Vibrationsrinne mit aufgesetztem Vorlagebehälter. Durch Austausch der Seitenwände lässt sich dessen Öffnungsweite variieren, wodurch eine größere Bandbreite des Massenstroms erzielt wird (Abbildung 11 links / Mitte). Das Halmgut gelangt im freien Fall in den Aufgabetrichter und wird mit dem Fördergas eingesogen. Die Zufuhreinheit befindet sich auf einem Waagensystem (Typ Mettler Toledo PBA757), welches ebenfalls an die Labview Mess- und Steuerungssoftware angebunden ist. Die Feststoffabtrennung erfolgt über einen Gaszyklonabscheider (Abbildung 11 rechts).



Abbildung 11: Vibrationsrinne und Waage (links), Seitenwände (Mitte), Gaszyklon (rechts)

4.2.2 Biegeversuchsstand

Der ursprünglich verwendete Biegeversuchsaufbau bestand aus einem digitalen Federkraftmesser und einer Vorrichtung zur Aufnahme der zu untersuchenden Halme mit variabler Auflagelänge (Abbildung 12). Sowohl Biegekraft als auch Biegeweg wurden per Digitalkamera aufgezeichnet; die Biegekraft hierbei über das Digitaldisplay des Federrkraftmessers und die Durchbiegung unter Zuhilfenahme eines darunter befindlichen Millimeterpapiers. Die Konstruktion der resultierenden Kraft-Weg-Kurven war zeitaufwändig und fehleranfällig, auch ließ die Auflösung zu wünschen übrig (Beispiele siehe Abbildung 35).

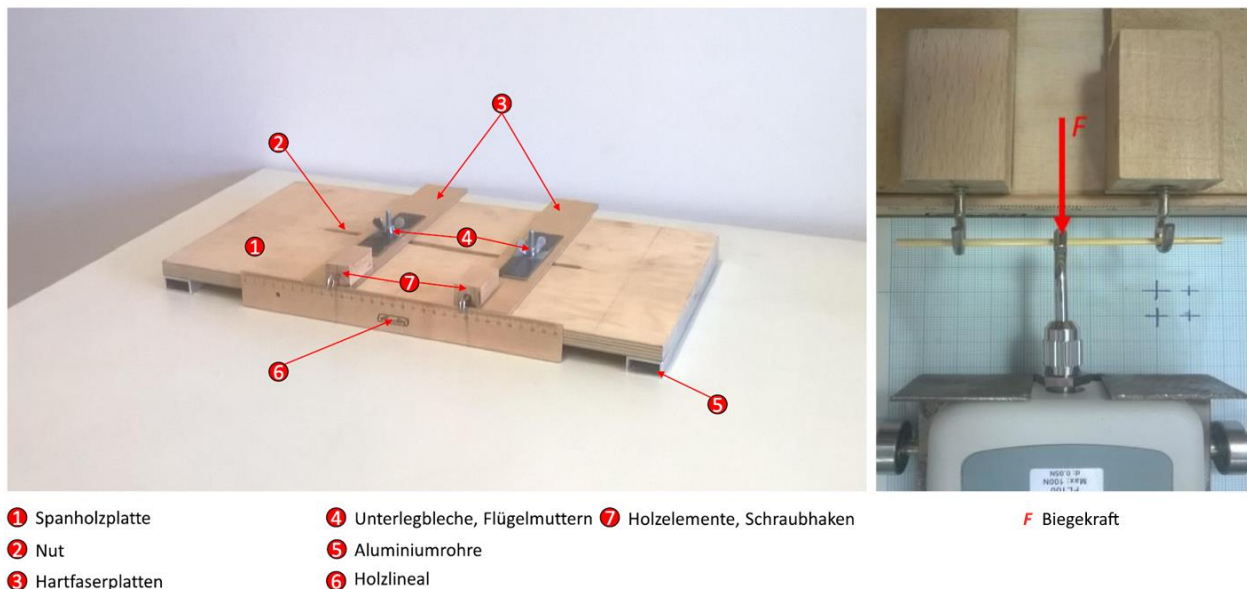


Abbildung 12: Ursprünglicher Biegeversuchsaufbau

Um die Messauflösung der vorgesehenen Biegeexperimente zu erhöhen, wurde ein Universalprüfgerät (Typ Shimadzu AG-X) beschafft. Dadurch erschlossen sich weitere Möglichkeiten zur Untersuchung des Biegeverhaltens von Halmgütern, unter anderem die Verwendung automatisierter Testszenarien mit steuerbaren Kraft- oder Durchbiegungsraten, zyklischen Belastungstests oder anschwellenden Durchbiegungen. Der Versuchsstand wurde mit einer Digitalkamera zur begleitenden Erfassung der Verformung erweitert (Abbildung 13).

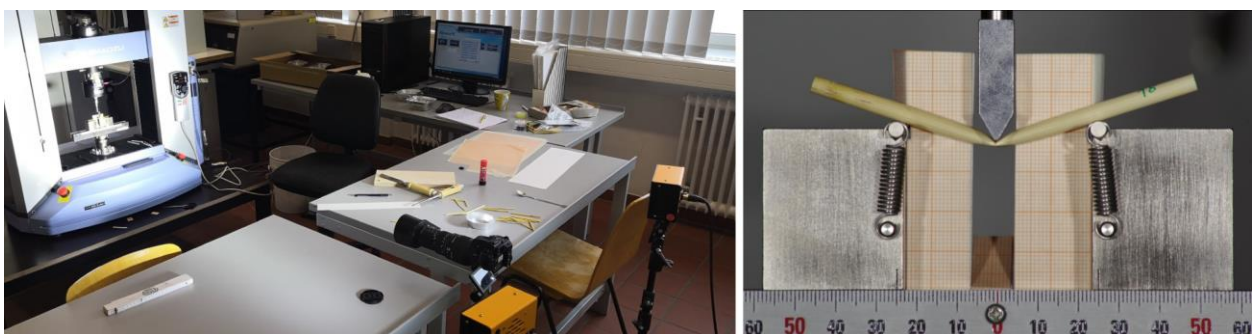


Abbildung 13: Dreipunktbiegeversuchsstand (links), Einzelbild (rechts)

Die Kamera wurde mit einem Objektiv hoher Brennweite (500 mm Vollformat-Äquivalent) versehen und in 2,5 m Entfernung positioniert, um perspektivische Verzerrungen zu minimieren. Für die Auswertung sowohl der Kraft-Weg-Zeit-Verläufe als auch der Digitalaufnahmen der Biegeuntersuchungen wurden halbautomatisierte Matlab-Skripte erzeugt.

4.2.3 Laser-Doppler-Anemometer

Zur Vermessung der Geschwindigkeitsprofile der ein- und zweiphasigen Rohrströmung wurde ein Laser-Doppler-Anemometer (Typ Dantec Flowexplorer 2D) benutzt und in den Versuchsaufbau inkludiert. Die LDA-Messung ermöglicht Geschwindigkeitsbestimmungen nach dem Dopplerprinzip in Messvolumina der Größe $2,8 \text{ mm} \times 0,17 \text{ mm} \times 0,17 \text{ mm}$; der erforderliche Abstand ist mit der Brennweite von 500 mm definiert. Das System ist auf einer Traverse installiert, welche rechnergesteuerte Bewegungen von 610 mm in jeder Achse erlaubt.

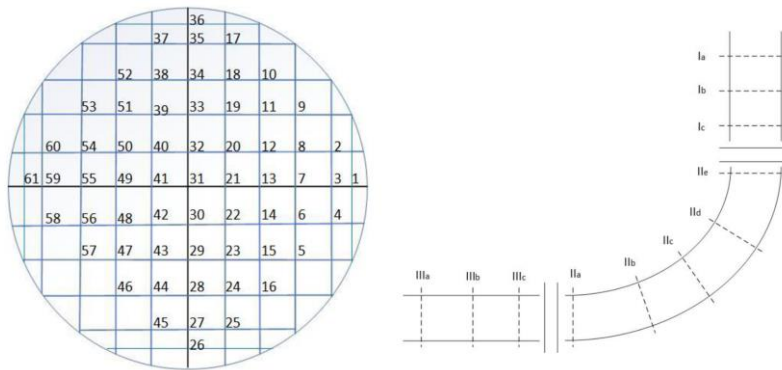


Abbildung 14: Messbereich der LDA

Die erste Messstelle befand sich auf dem ersten Horizontalabschnitt ca. 1 m vor dem Krümmer ins Steigrohr. Eine weitere Messstelle wurde durch den Austausch des Krümmers mit einem identischen Bauteil aus optisch zugänglichem Material (Quarzglas) erschlossen. Als dritte Messstelle kann das anschließende Steigrohr verwendet werden. Aus Sicherheitsgründen ist der Gesamtmessaufbau eingehaust (Abbildung 15).



Abbildung 15: LDA- Messaufbau (links), Einhausung (Mitte), fokussierter Messpunkt (rechts)

Zur verlässlichen Bestimmung der Geschwindigkeiten von Gas- und Feststoffphase wurden umfassende Voruntersuchungen hinsichtlich des optischen Einflusses der Rohrwandung auf Ein- und Ausfallwinkel des Laserwegs sowie zum Abgleich des von der Wellenlänge abhängigen Brechungsindex durchgeführt. Die gemessenen Geschwindigkeiten je erfasstem Einzelpartikel wurden dann gemittelt. Eine Visualisierung ist in Abbildung 16 dargestellt.

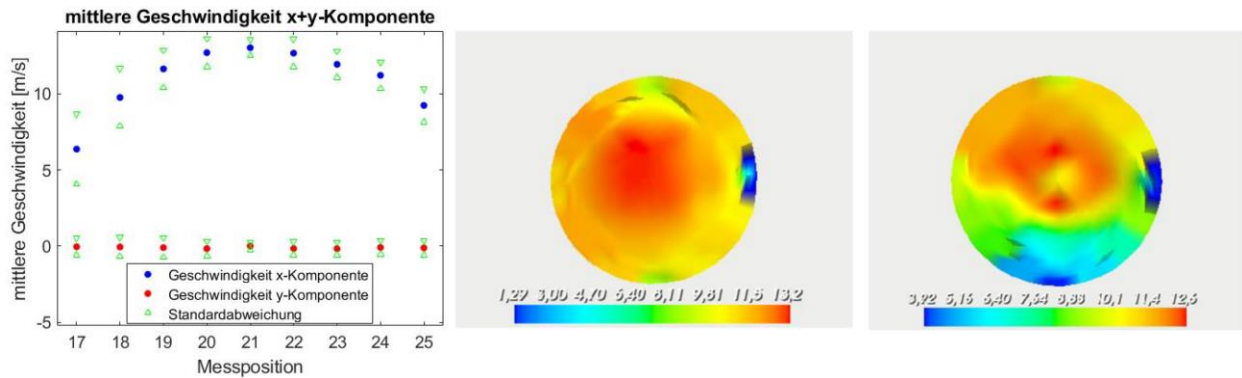


Abbildung 16: LDA - Messungen, Geschwindigkeiten je Messposition (links), Beispiel Flugförderung (Mitte), Beispiel Strähnenförderung (rechts)

4.2.4 Highspeed-Kamera-Aufbau zur Partikelverfolgung

Für die optische Verfolgung von Einzelpartikeln während der pneumatischen Förderung wurde ein vielfältig anpassbares Gestell aus Profilstreben angefertigt, welches Setups zur Bilderfassung aus der Seitenperspektive und Draufsicht ermöglicht (Abbildung 17).

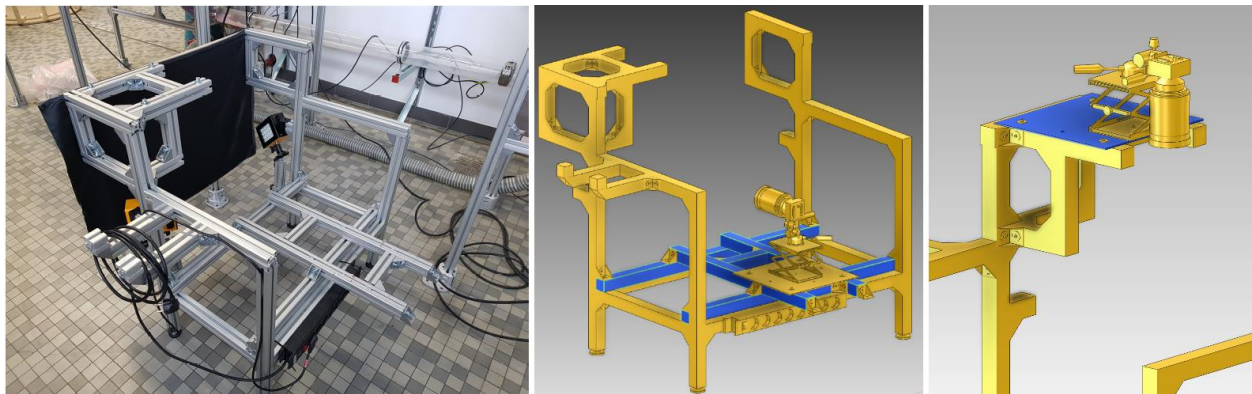


Abbildung 17: Gestell für Highspeed-Kamera (links), Position orthogonal zur Förderstrecke (Mitte) und oberhalb der Förderstrecke (rechts)

Für die Auswertungen der Highspeed-Aufnahmen wurde ein Matlab-Skript geschaffen, welches Partikel erkennt und jeweils Position, Orientierung und Geschwindigkeit ermittelt.

4.2.5 Befeuchtung von Halmgutproben mittels Deliqueszenzmethode

Um den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Biegeeigenschaften von biogenen Halmen zu untersuchen, mussten Halmproben einer definierten Atmosphäre ausgesetzt werden. Hierfür wurde ein Befeuchtungsverfahren entwickelt und erprobt, welches sich der Deliqueszenz verschiedener Salzlösungen bedient, wonach sich oberhalb von gesättigten Lösungen eine spezifische relative Luftfeuchtigkeit einstellt [22]. Biogene Halmgüter wiederum nehmen nach gewisser Zeit eine von der Luftfeuchtigkeit abhängige Gleichgewichtsfeuchte an. Diese Art von gezielter Befeuchtung wurde für Halmgutproben der ausgewählten Fördergüter innerhalb verschiedener Exsikkatoren durchgeführt. Unter Laborbedingungen (Temperatur 22°C, Luftdruck 1012 hPa) stellten sich so für die betrachteten Halmgüter die in Abbildung 18 dargestellten Gleichgewichts-Wassergehalte ein. Nach Abschluss der Untersuchungen wurden die Halmgutproben getrocknet und die Trockenmasse bestimmt.

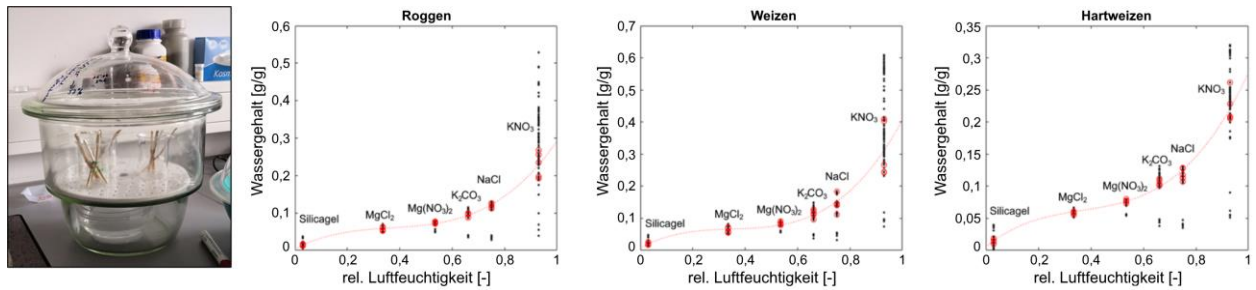


Abbildung 18: Befeuchtung von Halmgutproben mittels Deliqueszenzmethode: Exsikkator (links), Gleichgewichts-Wassergehalte je nach Salzlösung für Roggen, Weizen, Hartweizen (v.l.n.r.)

Anhand der so befeuchteten Halmgutproben wurde der Einfluss des Wassergehalts auf das Biegeverhalten untersucht.

4.3 Erweiterung des DEM/CFD-Rahmens

Für die numerischen Untersuchungen wurde ein am Fachgebiet MVTA mitentwickelter Diskrete-Elemente-Methode (DEM) - Code verwendet, der in der Lage ist, Partikelbewegungen innerhalb eines Mehrkörpersystems anhand der auf das Einzelpartikel wirksamen Kräfte (Kontakt-, Feld-, Fluidkräfte) zu modellieren. Formveränderliche Körper wurden über die Vernetzung von sphärischen Einzelpartikeln mit eigens hierfür definierten Wechselwirkungskräften dargestellt. Über die Kopplung an eine numerische Strömungssimulation (CFD) werden innerhalb Gas-/Feststoffsystemen zusätzlich der Impulsaustausch zwischen der Partikel- und Gasphase berücksichtigt und die Strömungsgrößen der Fluidphase orts- und zeitabhängig abgebildet. Die hierfür erforderlichen Wechselwirkungsterme mussten aufgrund der Formänderung der vernetzten flexiblen Partikel von Grund auf neu definiert und eingebunden werden.

4.3.1 Erweiterung der DEM zur Abbildung flexibler Partikel

Die Bewegung von Einzelpartikeln ergibt sich innerhalb der DEM als Folge der Newtonschen und Eulerschen Bewegungsgleichungen über die Summation aller angreifenden Kräfte und Momente am Einzelpartikel. Die entsprechenden Gleichungen wurden um virtuelle Bindungskräfte und -momente zwischen vernetzten Partikeln (Bondkräfte und -drehmomente) erweitert. Für translatorische Beschleunigungen ergibt sich:

$$m_s \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{F}^c + \mathbf{F}^f + m_s \mathbf{g} + \mathbf{F}^b$$

Hierbei sind:

- \mathbf{F}^c ... Kontaktkraft resultierend aus Stößen zwischen Partikeln oder Wand-Partikelkontakten
- \mathbf{F}^f ... Fluidkraft (insb. Widerstandskraft)
- $m_s \mathbf{g}$... Feldbeschleunigungskraft / Schwerkraft
- \mathbf{F}^b ... Bondkraft

Änderungen des Drehimpulses ergeben sich analog aus:

$$J_s \cdot \frac{d^2 \boldsymbol{\theta}_s}{dt^2} = \mathbf{M}^c + \mathbf{M}^b$$

Hierbei sind:

- \mathbf{M}^c ... Kontaktmoment resultierend aus Partikel-Partikel- oder Partikel-Wandkontakten
- \mathbf{M}^b ... Bondmoment

Die neu eingeführten Bondkräfte und -momente wurden ähnlich zu einer sich spannenden Zug-, Druck- oder Spiralfeder definiert. In Abhängigkeit einer bindungsspezifischen Steifigkeit k_n (Normalrichtung) bzw. k_t (Tangentialrichtung) und der Bindungsquerschnittsfläche A_b , dem Torsionsträgheitsmoment J sowie dem Trägheitsmoment I ergeben sich linearelastische Rückstellkräfte / Momente proportional zur Verformung δ_n^t (Normalrichtung), δ_t^t (Tangentialrichtung), θ_n^t (Torsionsrichtung) bzw. θ_t^t (Biegerichtung). Zur Abbildung der Federdämpfung wurden diese um jeweilige Dämpfungsterme der Normalkraft \mathbf{F}_{dn}^b , der Tangentialkraft \mathbf{F}_{dt}^b , der Torsion \mathbf{M}_{dn}^b bzw. der Biegung \mathbf{M}_{dt}^b erweitert.

Somit folgt für die Bindungskraft in Normal- bzw. Tangentialrichtung \mathbf{F}_n^b bzw. \mathbf{F}_t^b :

$$\mathbf{F}_n^b = k_n \cdot A_b \cdot \boldsymbol{\delta}_n^t + \mathbf{F}_{dn}^b$$

$$\mathbf{F}_t^b = k_t \cdot A_b \cdot \boldsymbol{\delta}_t^t + \mathbf{F}_{dt}^b$$

Hierbei sind:

- $k_n \cdot A_b \cdot \boldsymbol{\delta}_n^t$ und $k_t \cdot A_b \cdot \boldsymbol{\delta}_t^t$... elastische Anteile von Normal- und Tangentialkraft
- \mathbf{F}_{dn}^b und \mathbf{F}_{dt}^b ... Dämpfungsanteile von Normal- und Tangentialkraft

Analog folgt für die Momente unter Berücksichtigung der Verformung $\boldsymbol{\theta}_n^t$ (Torsion) bzw. $\boldsymbol{\theta}_t^t$ (Biegung):

$$\mathbf{M}_n^b = k_t J \boldsymbol{\theta}_n^t + \mathbf{M}_{dn}^b$$

$$\mathbf{M}_t^b = k_n I \boldsymbol{\theta}_t^t + \mathbf{M}_{dt}^b$$

Hierbei sind:

- $k_t J \boldsymbol{\theta}_n^t$ und $k_n I \boldsymbol{\theta}_t^t$... elastische Anteile aus Torsion und Biegung
- \mathbf{M}_{dn}^b und \mathbf{M}_{dt}^b ... Dämpfungsanteile von Torsion und Biegung

Die in den obigen Gleichungen notwendigen Steifigkeiten lassen sich aus den Materialparametern Biegeelastizitätsmodul E_b und Biegeschubmodul G_b und der jeweiligen initialen Bondlänge l_b berechnen:

$$k_n = \frac{E_b}{l_b} \quad \text{bzw.} \quad k_t = \frac{G_b}{l_b}$$

Die Dämpfungsterme \mathbf{F}_{dn}^b , \mathbf{F}_{dt}^b , \mathbf{M}_{dn}^b und \mathbf{M}_{dt}^b ergeben sich zu:

- Dämpfungskraft normal: $\mathbf{F}_{dn}^b = \gamma^b \sqrt{2m_s \cdot k_n \cdot A_b} \cdot \mathbf{v}_n^r$
- Dämpfungskraft tangential: $\mathbf{F}_{dt}^b = \gamma^b \sqrt{2m_s \cdot k_n \cdot A_b} \cdot \mathbf{v}_n^r$
- Dämpfungsmoment normal: $\mathbf{M}_{dn}^b = \gamma^b \cdot \sqrt{2J_s \cdot k_t} \cdot \boldsymbol{\omega}_n^r$
- Dämpfungsmoment tangential: $\mathbf{M}_{dt}^b = \gamma_{bend}^b \cdot \sqrt{2J_s \cdot k_n} \cdot \boldsymbol{\omega}_t^r$
- Dämpfungsverhältnis: $\zeta = \frac{\gamma^b}{\gamma_{bend}^b} \neq 1,$

wobei unterschiedliche Dämpfungskoeffizienten γ^b und γ_{bend}^b (siehe Dämpfungsverhältnis ζ) verwendet werden, was Laufzeitvorteile mit sich bringt.

Zur Abbildung des Übergangs von linearelastischer zu plastischer Verformung wurde ein Ansatz implementiert, der bei Überschreiten einer kritischen Grenzspannung σ_c die Steifigkeit linear herabsetzt („Bond-Softening“, [23]) in Abhängigkeit von einem Erweichungsparameter β , hier exemplarisch für die Normalkraft \mathbf{F}_n^b angegeben:

$$\mathbf{F}_n^b = \begin{cases} k_n \cdot A_b \cdot \boldsymbol{\delta}_n^t & \text{für } |\boldsymbol{\delta}_n^t| < |\boldsymbol{\delta}_{n,\max}^t| \\ (\sigma_c \cdot (\beta + 1) - k_n \cdot \beta \cdot \boldsymbol{\delta}_n^t) \cdot A_b & \text{für } |\boldsymbol{\delta}_{n,\max}^t| < |\boldsymbol{\delta}_n^t| < |\boldsymbol{\delta}_{n,\text{end}}^t| \\ 0 & \text{für } |\boldsymbol{\delta}_{n,\text{end}}^t| < |\boldsymbol{\delta}_n^t| \end{cases}$$

Durch Variation der Bondgeometrie (Länge l_b und Querschnittsfläche A_b), der kritischen Bond-Spannung σ_c sowie insbesondere dem Bond-Erweichungsparameter β lassen sich beliebige von der Längenänderung (hier δ_n) abhängige Rückstellkraftverläufe realisieren (Abbildung 19).

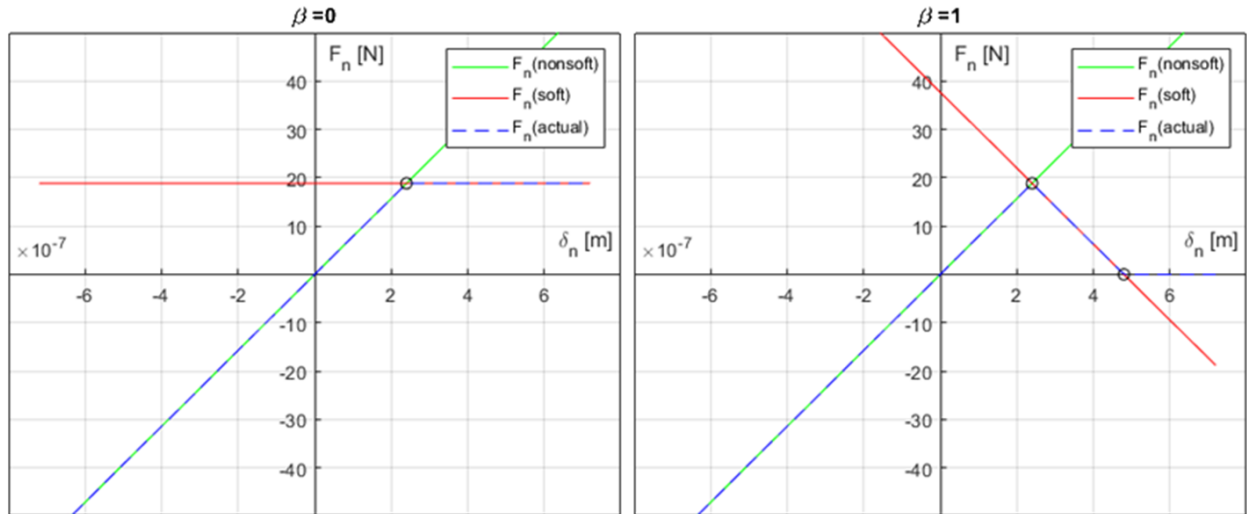


Abbildung 19: Bond-Rückstellkraft, Variation Bond-Erweichungsparameter β

4.3.2 Erweiterung der CFD zur Berechnung der Widerstandskraft biegsamer Partikel

Im Rahmen der Kopplung zwischen DEM und CFD erfolgt die Berechnung der vom Fluid auf ein Partikel ausgeübten Widerstandskraft über die Relativgeschwindigkeit von Fluid \mathbf{u}_f und Partikel \mathbf{v} , die der Strömung entgegenstehende Partikelquerschnittsfläche A_\perp , die Fluidichte ρ_f und Porosität ϵ . Nach [24] kann die Widerstandskraft auch für nichtsphärische Partikel über folgende Gleichung ermittelt werden:

$$\mathbf{F}^D = \frac{1}{2} C_d \rho_f A_\perp (\mathbf{u}_f - \mathbf{v}) |\mathbf{u}_f - \mathbf{v}| \cdot \epsilon^{1-\chi}$$

Der Widerstandsbeiwert lässt sich nach [25] mittels

$$C_D = \frac{8}{Re} \frac{1}{\sqrt{\Phi_\perp}} + \frac{16}{Re} \frac{1}{\sqrt{\Phi}} + \frac{3}{\sqrt{Re}} \frac{1}{\Phi^{3/4}} + 0.42 \cdot 10^{0.4(-\log(\Phi))^{0.2}} \frac{1}{\Phi_\perp}$$

über die Reynoldszahl $Re = \epsilon_f \rho_f d_p |\mathbf{u}_f - \mathbf{v}|$, die Sphärizität Φ und die Querschnittsflächensphärizität Φ_\perp berechnen. Für die Berechnung der Widerstandskraft können nun entweder die Einzelbeträge der vernetzten Partikel summiert werden („Sphere Drag“, vgl. [26]), oder es wird für jeden CFD-Berechnungsschritt die angeströmte Querschnittsfläche des Gesamtpartikels („Clump Drag“, vgl. [27]) ermittelt und für die Widerstandskraftberechnung verwendet (Abbildung 20).

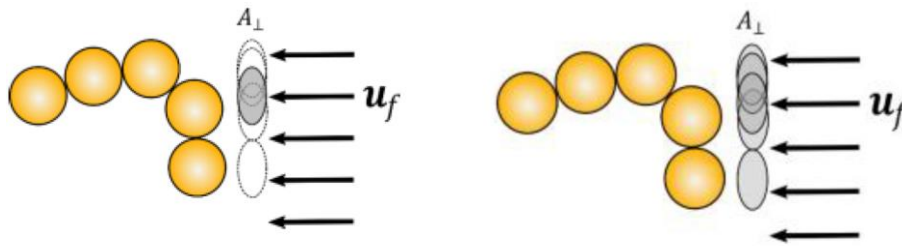


Abbildung 20: Angeströmte Querschnittsfläche eines einzelnen Partikels ("Sphere Drag", links) und eines vernetzten Gesamtpartikels („Clump Drag“, rechts)

Die Querschnittsfläche des Gesamtpartikels lässt sich aufgrund der unvorhersehbaren Formgebung eines flexiblen Partikels nicht vorausberechnen, sondern erfordert eine separate Berechnung innerhalb jedes Zeitschritts. Der grundsätzliche Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung 21 verdeutlicht. Quer zur Strömungsrichtung des Fluids wird ein Raster an Bildpunkten aufgespannt. Die Summe der Bildpunkte, welche ein Partikel überdecken, wird ermittelt und aus dieser über Multiplikation mit der Bildpunktfläche die Projektionsfläche des Partikels berechnet. Je feiner die Rasterung gewählt wird, desto exakter ist die Berechnung. Da der Algorithmus in jedem Zeitschritt ausgeführt wird, musste ein Kompromiss aus Genauigkeit und Recheneffizienz getroffen werden.

Beide Möglichkeiten der Berechnung der Partikel-Widerstandskraft wurden implementiert und hinsichtlich ihrer Eignung erprobt.

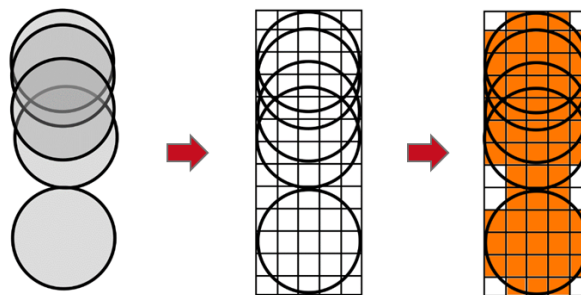


Abbildung 21: Algorithmus zur Berechnung der Projektionsfläche. Partikelabbild aus Anströmrichtung (links), an den Außenkanten aufgespanntes Punktraster (Mitte), Summation der das Abbild überdeckenden Bildpunkte (rechts)

4.4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurden eine Vielzahl an Versuchen an der pneumatischen Förderstrecke durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen erweiterten den Stand der für die Simulation nutzbaren Datenbasis und führten zu einer fortlaufenden Optimierung der experimentellen Förderanlage. Die ebenfalls zahlreichen Untersuchungen der Biegung von Einzelhalmen dienten der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Partikelmodells innerhalb der DEM.

4.4.1 Ergebnisse der Förderversuche an der PNF

Zur Untersuchung des Förderverhaltens von Halmgütern wurden eine Vielzahl von Versuchen an der pneumatischen Förderanlage durchgeführt und ausgewertet. Allein für das Anfahren stabiler Zustandspunkte der Förderung belief sich die Anzahl an Einzelversuchen auf über 100 Versuche je Fördergut, beispielsweise wurden 135 Messungen an Miscanthus, 155 an Trinkhalmen und 205 an Reis durchgeführt. Für jeden angefahrenen Zustandspunkt wurden Gas- und Feststoffstrom stationarisiert und parallel zum Anlagendruckverlust gemittelt. Exemplarisch ist in Abbildung 22 die Mittelwertbildung von **Massenstrom und Anlagendruckverlust** eines einzelnen Betriebspunkts abgebildet.

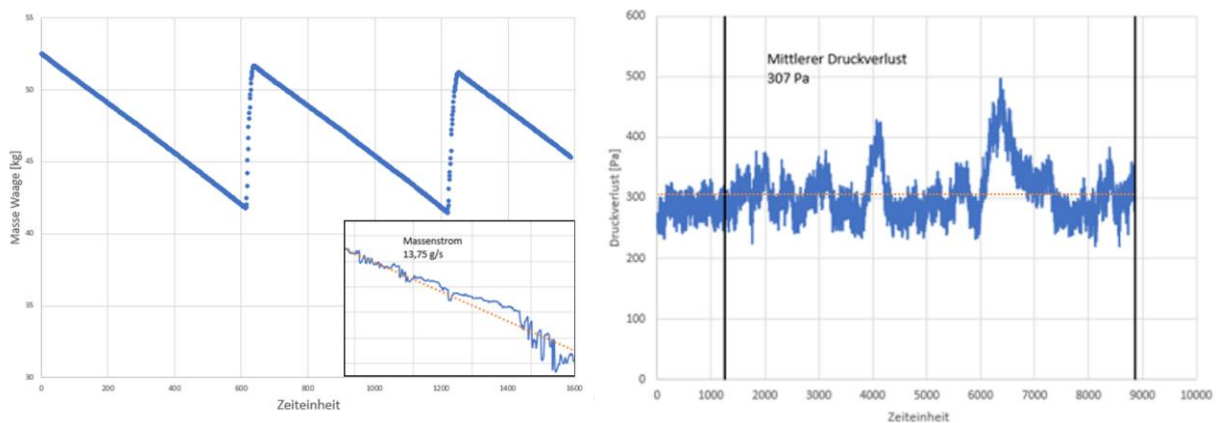


Abbildung 22: Mittelwertbildung von Massenstrom und Druckverlust (Beispiel Trinkhalme)

Aus dem Ergebnismenge aller Experimente ließen sich Förderzustandsdiagramme in Form von Druckverlust-Leerrohrgeschwindigkeits-Kurven ermitteln (Abbildung 23).

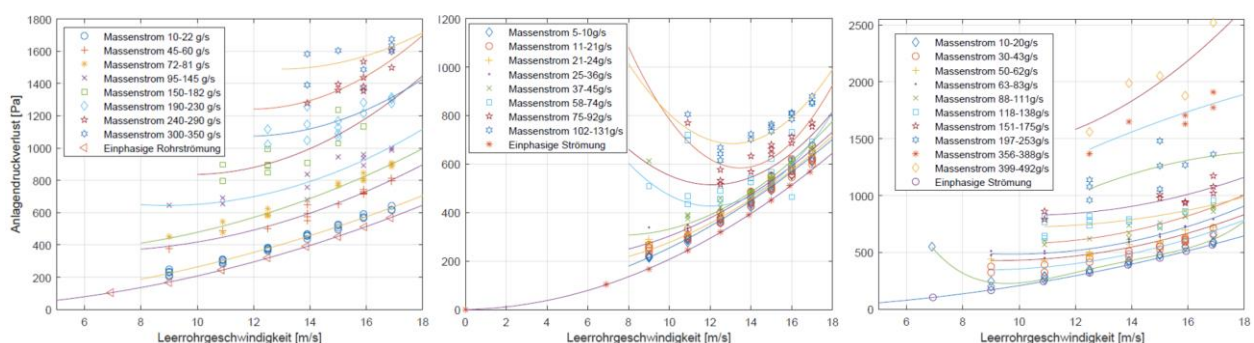


Abbildung 23: Zustandsdiagramme Trinkhalme (links), Reis (Mitte), Miscanthus (rechts)

Die ermittelten Verläufe sind qualitativ mit typischen Zustandsdiagrammen der pneumatischen Förderung vergleichbar. Anhand der Lage charakteristischer Zustandspunkte wie etwa dem Verlauf der Leerrohrgeschwindigkeit und dem beladungsabhängigen Druckminimum - können auch Förderregime zugeordnet werden (vgl. Abbildung 24).

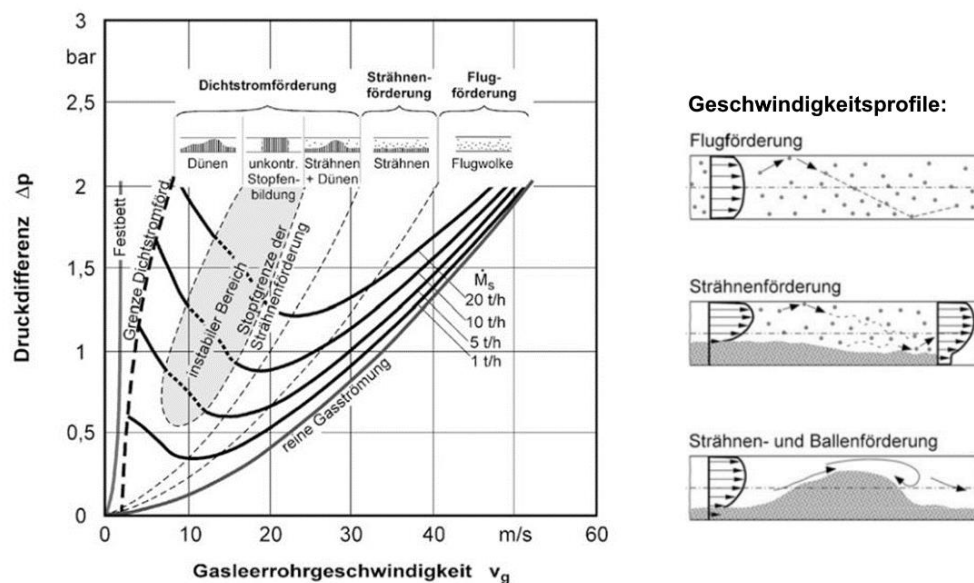


Abbildung 24: Zustandsdiagramm der horizontalen pneumatischen Förderung, Rohrdurchmesser 150 mm (links), Geschwindigkeitsprofile (rechts) [28]

Parallel zur Messdatenaufzeichnung wurden für Förderungsengpässe wie dem Ansaugtrichter oder dem Krümmer auch **Verstopfungseignisse** protokolliert. Abbildung 25 zeigt den Einfluss der Geometrie des Zufuhr-Vorlagenbehälters auf den Feststoffmassenstrom und den Beginn der Verstopfungsneigung.

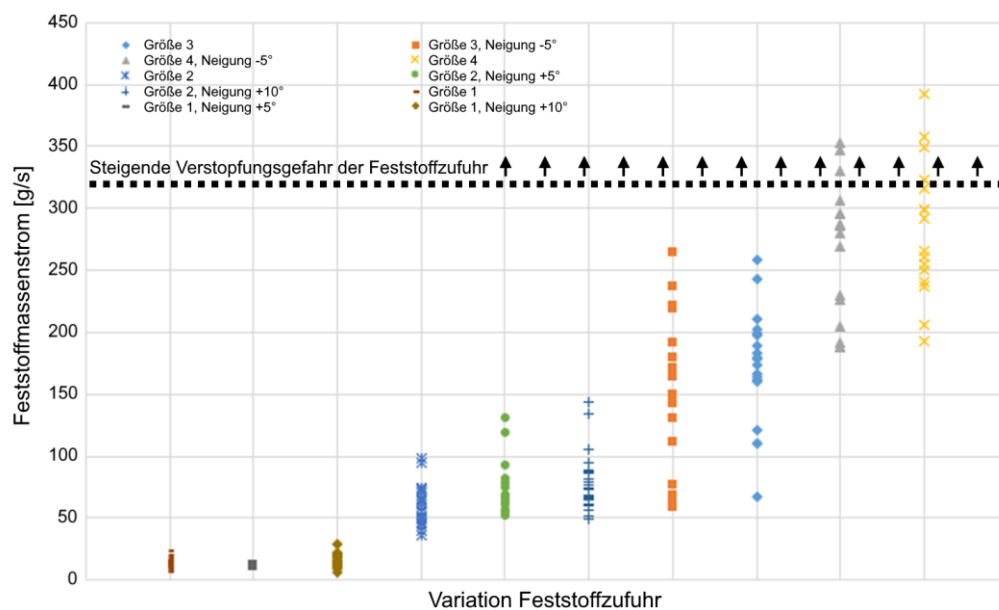


Abbildung 25: Gemessene Feststoffmassenströme und Stopfgrenze der Feststoffzufuhr bei Variation der Öffnungsgröße des Vorlagenbehälters aufsteigend von 1 (klein) bis 4 (groß) und dessen Neigungswinkels

Mit Hilfe der **LDA-Messungen** konnten zweiphasige Geschwindigkeitsprofile entlang des Rohrquerschnitts für verschiedenste Zustandspunkte ermittelt werden. Je nach Sensitivitätseinstellung wurden so für die Regionen I – Steigrohr nach Krümmer, II – Krümmer und III – Horizontalabschnitt vor Krümmer Geschwindigkeitsprofile von Gas- und Feststoffphase für verschiedene Förderregime gemessen (vgl. Abbildung 14). Je höher die Sensitivität dabei gewählt wird, desto kleiner waren die erfassten Partikel. Bei geringen Sensitivitäten wurden nur wenige große Partikel detektiert; mit der höchsten Sensitivitätseinstellung dominierten viele kleine Partikel das Messergebnis. In Abbildung 26 sind die Anzahlen von Partikeln dargestellt, die von den Detektoren der Messlaser in horizontaler (x) und vertikaler Richtung (y) erkannt wurden, jeweils von Messposition 26 (mittig unten) bis 36 (mittig oben) (vgl. Abbildung 14). Bei hoher Sensitivität sind die Partikelanzahlen um ein Vielfaches höher. Sowohl bei hoher als auch niedriger Sensitivität entspricht die gemessene Partikelverteilung qualitativ der zu erwartenden, mit der Höhe abnehmenden Feststoffkonzentration der Strähnenförderung.

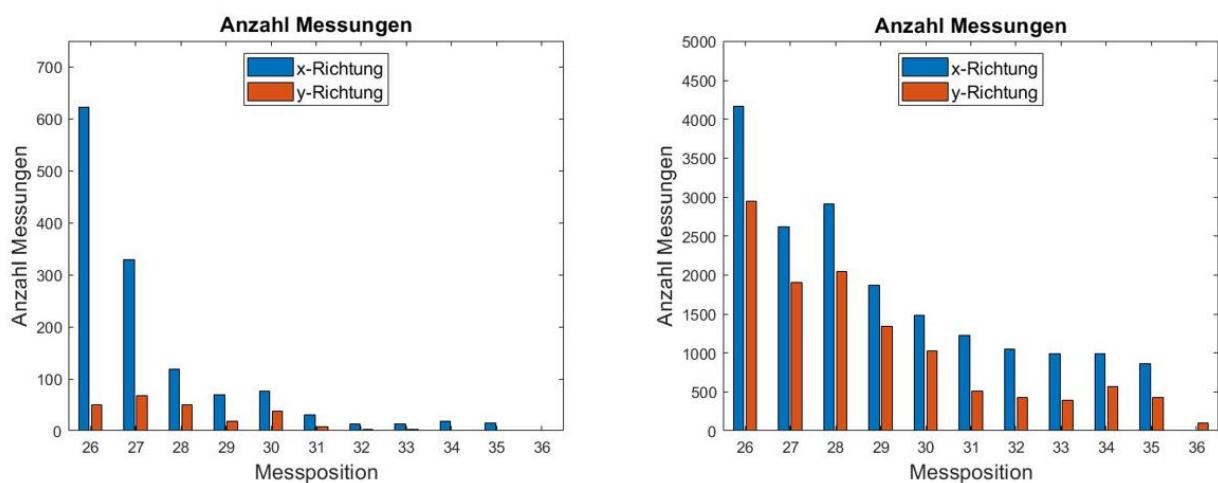


Abbildung 26: Horizontalabschnitt III (vgl. Abbildung 14), Strähnenförderung von Reis. Anzahl der per LDA detektierten Partikel. Gebläseleistung 50%, Sensitivitäten des LDA 700 V (links), 1200 V (rechts)

In Abbildung 27 ist die gemittelte Horizontalgeschwindigkeit der erfassten Partikel abgebildet. Erst bei hoher Sensitivität lässt sich ein klares Geschwindigkeitsprofil erkennen, welches auf Höhe der Rohrachse (Messposition 31) sein Maximum aufweist und zu den Wänden hin auf geringere Werte abfällt. Aufgrund der am Boden (Messposition 26) vorangeschobenen Strähne erscheint das Profil in Richtung höherer Rohrabschnitte gewölbt (vgl. Abbildung 24 rechts).

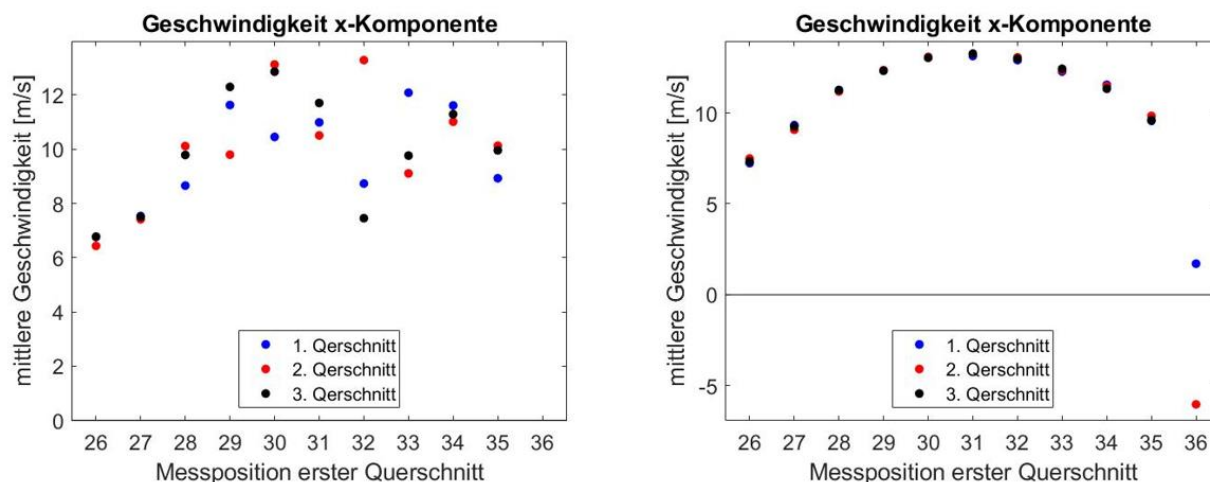


Abbildung 27: Horizontalabschnitt III (vgl. Abbildung 14), Strähnenförderung von Reis. Mittlere Horizontalgeschwindigkeit der detektierten Partikel. Gebläseleistung 50%, Sensitivitäten des LDA 700 V (links), 1200 V (rechts)

Durch Messungen im Krümmer war das Anschmiegen der Feststoffphase an die äußere Rohrwandung zu beobachten. In Abbildung 28 kann eine Verschiebung der Feststoffkonzentration beim Durchlaufen des Krümmers hin zur äußeren Rohrwandung (Messposition jeweils außen rechts) erkannt werden. Bereiche im Innern des Krümmers waren bei Erreichen des vertikalen Austritts nahezu frei von Partikeln.

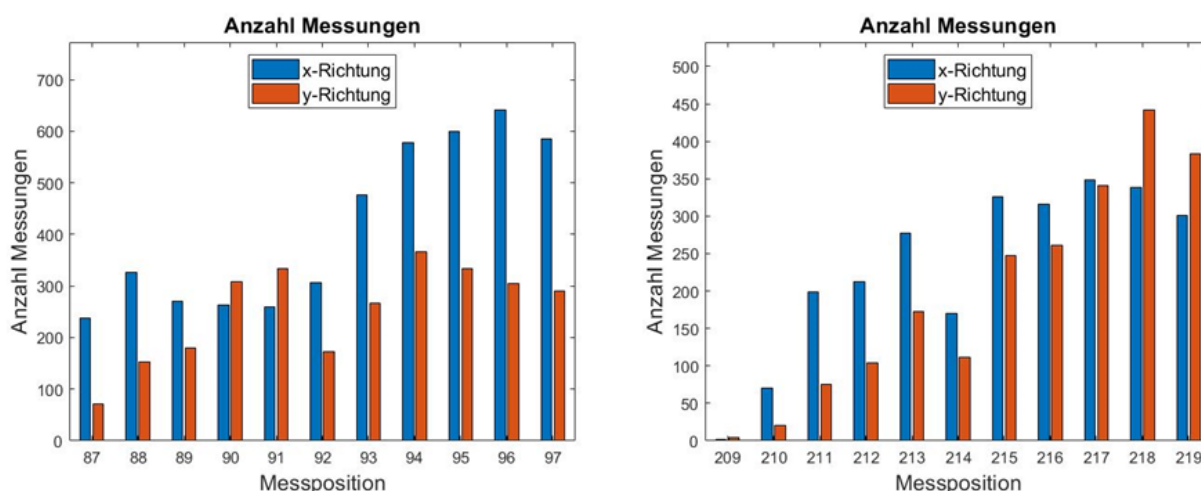


Abbildung 28: Krümmerabschnitt IIb / 30° (vgl. Abbildung 14) (links), II d / 60° (vgl. Abbildung 14) (rechts), Strähnenförderung von Reis. Anzahl der per LDA detektierten Partikel.

Bei Betrachtung der ermittelten Partikelgeschwindigkeiten (Abbildung 29) fällt auf, dass sowohl in horizontaler (x) als auch vertikaler Richtung (y) die Geschwindigkeiten entlang der 30°-Querschnittsfläche mit Annäherung an die Außenwand abfallen. Innerhalb des 60°-Querschnitts wird deutlich, dass die Vertikalkomponente der Geschwindigkeit mit Annäherung an die Außenwand dominiert.

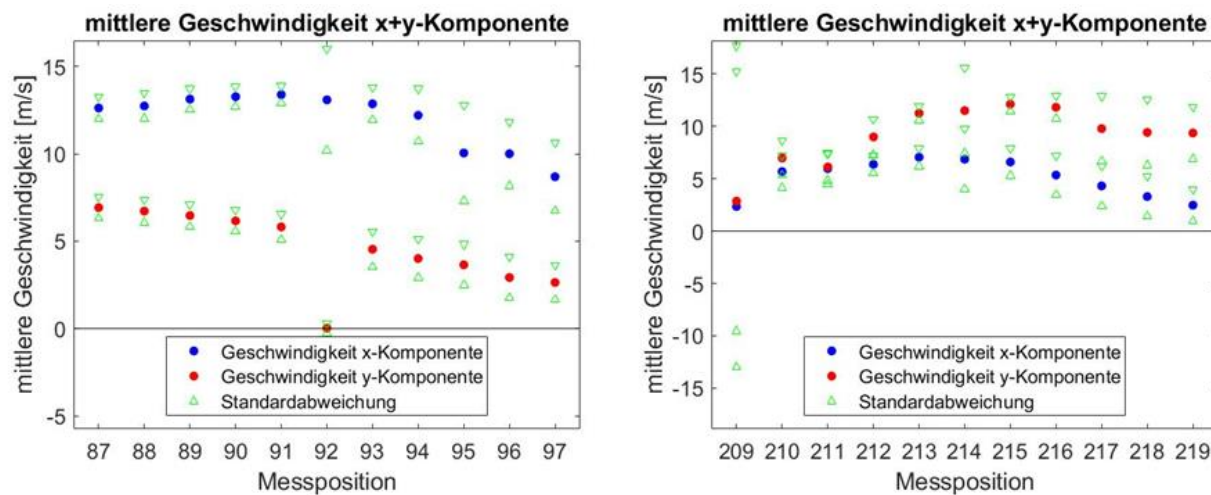


Abbildung 29: Krümmerschnitt IIb / 30° (vgl. Abbildung 14) (links), IIId / 60° (vgl. Abbildung 14) (rechts), Strähnenförderung von Reis. Geschwindigkeit (x/y) der detektierten Partikel

Die **Partikelerfassung mittels Highspeed-Kamera** ermöglichte die Verfolgung von Einzelpartikeln innerhalb der Förderstrecke sowie die Bestimmung ihrer jeweiligen Positionen, Orientierungen und Geschwindigkeiten. In Abbildung 30 ist beispielhaft die Partikelverteilung im Glaskrümmen während einer Messung visualisiert.

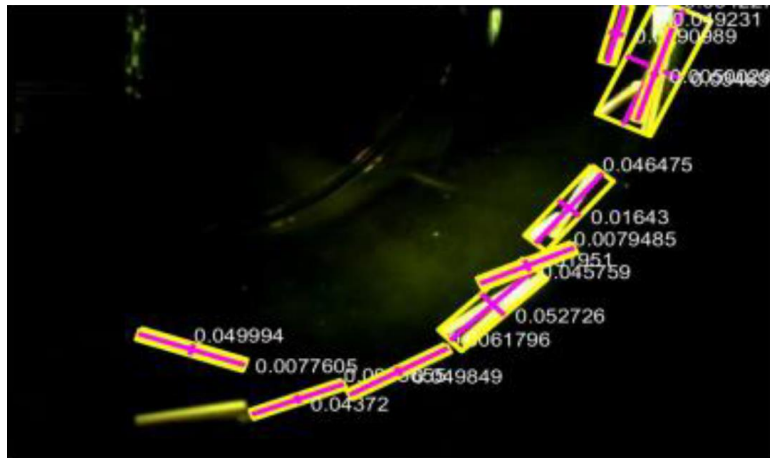


Abbildung 30: Einzelpartikelerfassung, Visualisierung von Position und Orientierung, Geschwindigkeit als Zahlenwert (pixelbasierte Relativangabe)

Die optische Erfassung von Biegeereignissen während der pneumatischen Förderung wurde nicht realisiert. Dies lag einerseits an den zu geringen resultierenden Biegewinkeln, welche auch bei hohen Fördergeschwindigkeiten nicht detektiert bzw. quantifiziert werden konnten. Zusätzlich wurde die optische Vereinzelung von Partikeln bereits bei geringen Feststoffmassenströmen durch gegenseitige Überdeckungen erschwert (Abbildung 31).

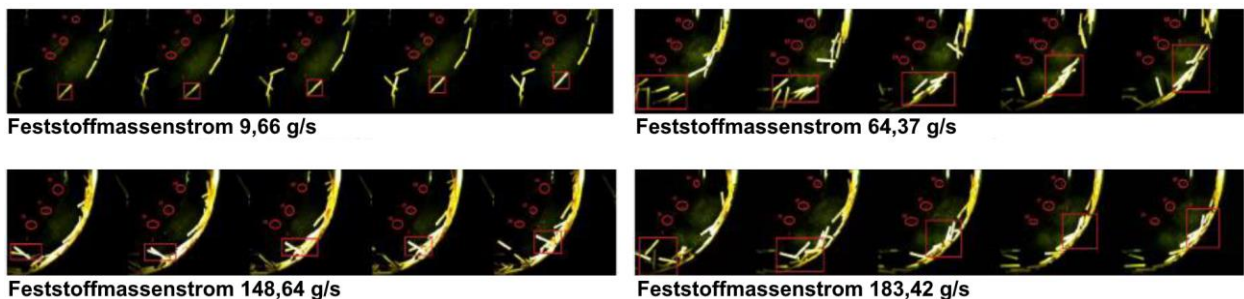


Abbildung 31: Einzelpartikelerfassung, Verringerung der optischen Separation einzelner Partikel bei ansteigendem Feststoffmassenstrom

Für die optische Erkennung von Dünenbildungsprozessen bestand dieses Problem nicht. Vielmehr wurde die Größe einer zusammenhängenden Partikelprojektionsfläche als Erkennungskriterium verwendet. Eine beispielhafte Abfolge ist in Abbildung 32 dargestellt. Nach der Zuordnung aller Bildpixel zu Vorder- oder Hintergrund anhand ihres Farb- oder Helligkeitswertes werden benachbarte Vordergrundpixel zu verbundenen Bildbestandteilen („Connected Components“) zusammengefasst. Bei Überschreitung einer kritischen Fläche wird das entsprechende Objekt als Düne gekennzeichnet.



Abbildung 32: Dünenerkennung. Originalbild (links), Partikelerkennung (Mitte), größte zusammenhängende Fläche (rechts)

Die Berechnung der Dünengeschwindigkeit erfolgt anhand der Bewegung markanter Punkte des detektierten Objekts, beispielsweise dem höchsten oder obersten Pixel oder dem Flächenschwerpunkt der zusammenhängenden Fläche (Abbildung 33).

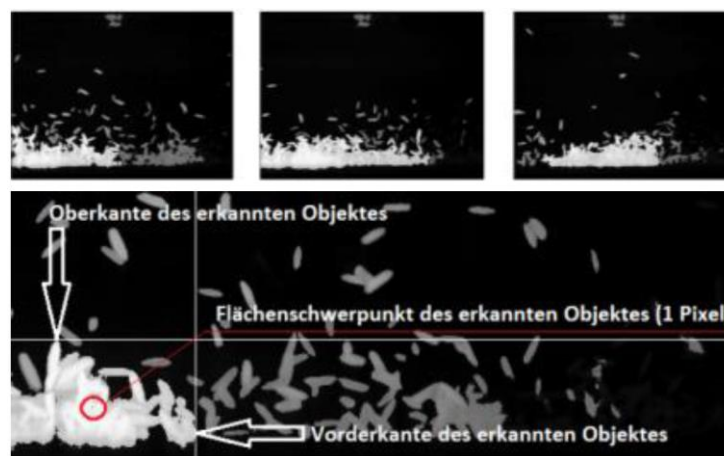


Abbildung 33: Dünenerkennung. Bestimmung der Wanderungsgeschwindigkeit einer Düne anhand von Referenzpunkten des erkannten Objektes.

Die Betriebspunkte der pneumatischen Förderung, zu denen Dünen festgestellt wurden, liegen im entsprechenden Zustandsdiagramm im Bereich, in dem Dünen erwartet werden können (Abbildung 34, vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24).

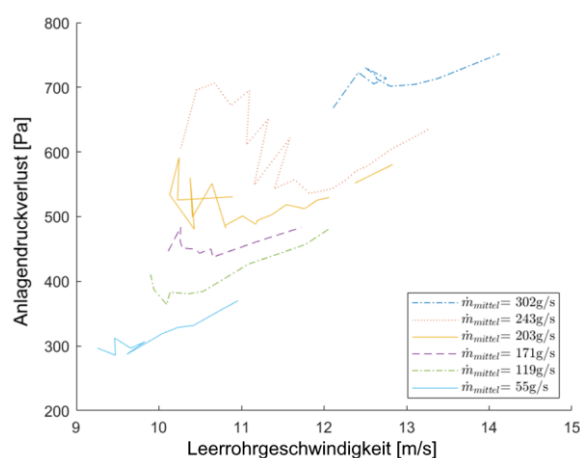


Abbildung 34: Zustandsdiagramm, Betriebspunkte mit auftretender Dünenförderung

4.4.2 Ergebnisse der Biegeuntersuchungen

Mit Hilfe des ursprünglichen Biegeversuchsaufbaus (vgl. Abbildung 12) wurden initiale Messungen der maximalen Biegekraft und der dabei zurückgelegten Durchbiegung bestimmt. Je nach Spezies und Pflanzenabschnitt wurden dabei Maximalkräfte bis zu 18 N und Durchbiegungen bis zu 2 mm gemessen (Abbildung 35). Halme mit Wachstumsknoten erfuhren dabei üblicherweise in Knotennähe einen Bruch (rechts), während zwischen Knoten befindliche Segmente (Internodien) im allgemeinen knickten, aber weiter verformt wurden (links).

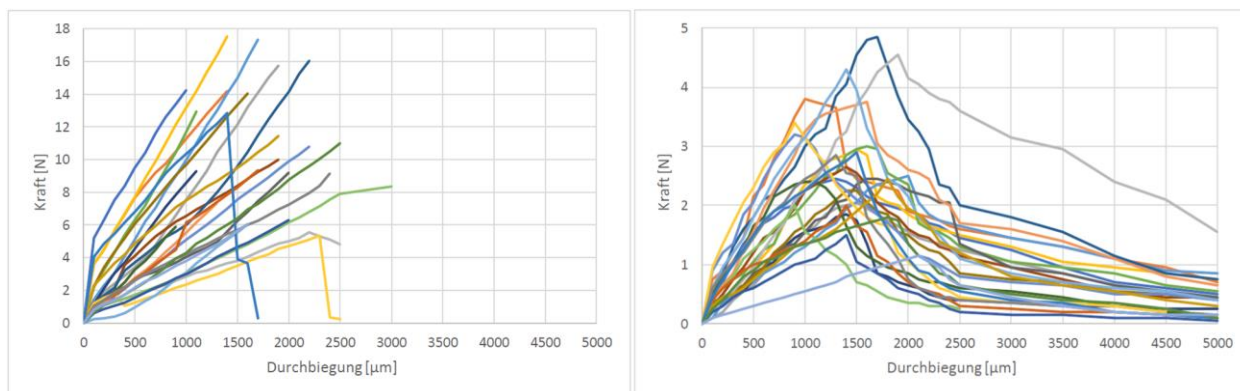


Abbildung 35: Kraft-Durchbiegungskurven, Weizenhalme mit (links) und ohne Wachstumsknoten (rechts)

Die mittels des Universalprüfgeräts Shimadzu AG-X plus (vgl. Abbildung 13) gemessenen Kraft-Weg-Kurven der Biegeversuche zeigten erwartungsgemäß eine vielfach höhere Messauflösung. In Abbildung 36 (links) sind summarisch die Messergebnisse von 30 Proben biogener Halmgut-Internodien der Länge 100 mm (Roggen) dargestellt, welche mit einer Biegegeschwindigkeit von 2 mm/min um 10 mm durchgebogen und dann wieder entlastet wurden. Als Auflagenabstand wurde eine Länge von 50 mm gewählt. Auf gleiche Weise (rechts) wurden die Kunststofftrinkhalme untersucht.

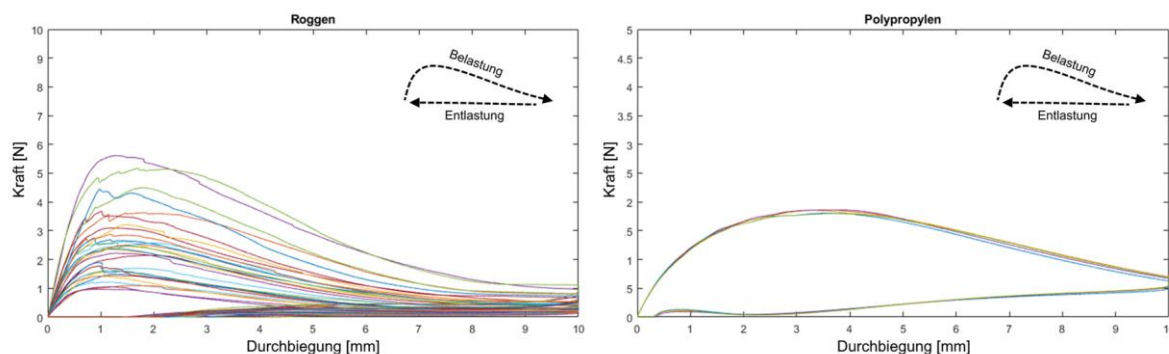


Abbildung 36: Kraft-Durchbiegungskurven, gemessen mit Universalprüfgerät Shimadzu AG-X plus, biogene Halmgut-Internodien verschiedener Feuchten, Roggen (links), Kunststofftrinkhalme (rechts)

Die Ergebnisse der biogenen Halme wiesen erwartungsgemäß eine hohe Streuung auf, einerseits aufgrund der starken Schwankungen der geometrischen Abmaße der Halme untereinander, andererseits durch die variablen Wassergehalte der Halme, welche für die Messungen gezielt eingestellt wurden. Das Kurvenfeld der Kunststoffhalm-Untersuchungen hingegen lag vergleichsweise eng aneinander.

Aus den linearen Abschnitten wurde der Biege-Elastizitätsmodul ermittelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich für sehr trockene Halme auch sehr hohe Moduln mit Werten bis zu ca. 7.000 N/mm² ergeben und mit steigender Feuchte auf geringe Beträge von ungefähr 1.000 N/mm² abfallen. Beispielhaft ist der gemessene Verlauf für Roggenhalme in Abbildung 37 dargestellt.

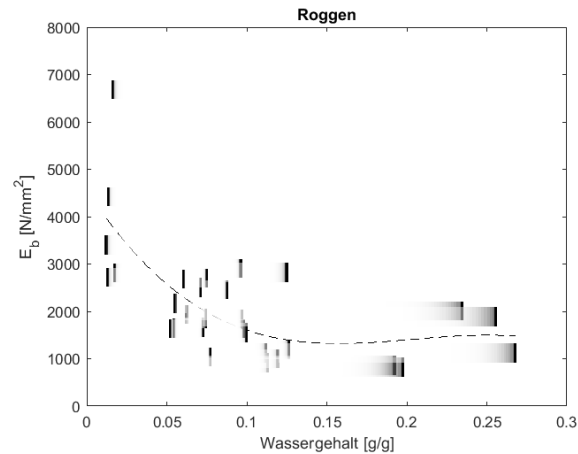


Abbildung 37: Biege-Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit des Wassergehalts von Roggenhalmen

Während der Biegeversuche wurde die **Verformung der Halme mittels Digitalkamera** erfasst und analysiert. Als Ergebnis konnten die Verläufe der oberen und unteren Extrempfasern, deren Winkel und die Höhe der zentralen Biegezone berechnet werden (Abbildung 38). Die Ergebnisse wurden anschließend ebenfalls für Validierung und Kalibration der DEM-Simulation verwendet.

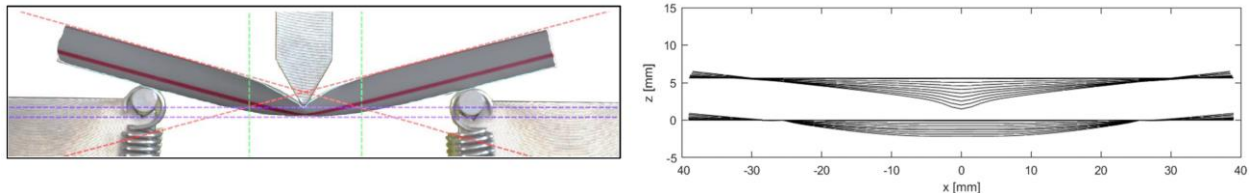
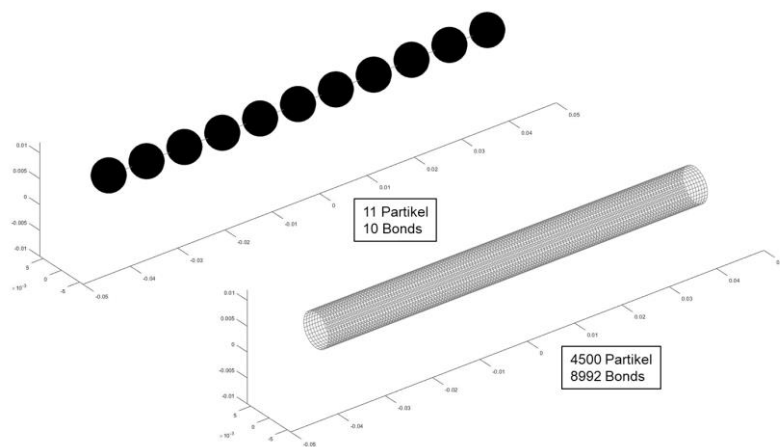


Abbildung 38: Bildanalyse der Durchbiegung

4.5 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Mit den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen des Verformungsverhaltens biogener und künstlicher Halmgüter wurden zwei Basistypen an Partikeln in den DEM/CFD-Simulationsrahmen eingebunden und für numerische Untersuchungen verwendet. Für die Simulation von Förderprozessen war es notwendig, mehrere zehntausend flexible Partikel abzubilden. Aus Gründen der Rechenökonomie wurde daher ein Modell mit reduzierter Anzahl an vernetzten Partikeln verwendet (Abbildung 39 links). Für die möglichst detaillierte Abbildung von Verformungsvorgängen wurde ein Modell verwendet, welches mehrere tausend vernetzte Partikel verwendet (Abbildung 39 rechts). Mit diesem geometrisch hochauflösenden Modell wurden Dreipunkt-Biegeversuche numerisch nachgebildet. Da es sich dabei um Simulationen an Einzelhalmen handelte und eine Kopplung zwischen DEM und Strömungssimulation nicht erforderlich war, konnte eine entsprechend hohe Anzahl an vernetzten Partikeln verwendet werden.



Auf Seiten des Partikelmodells wurden die Partikellänge, die Bond-Steifigkeiten in Normal- und Tangentialrichtung sowie die Bond-Dämpfungsparameter variiert. Auf der Prozessebene wurden Variationen der Gasleerrohrgeschwindigkeit und des Feststoffmassenstroms betrachtet. Kopplungsspezifisch wurden auch die Varianten der Widerstandskraftberechnung („Sphere drag“ und „Clump drag“) verglichen. In Tabelle 1 sind die Variationsparameter aufgeführt. Die Bond-Steifigkeiten im Fall S5 entsprechen dabei denen von Weizenstroh.

Tabelle 1: Variierte Parameter während der numerischen Untersuchungen des Förderverhaltens

	v^{air} , m/s	l_p , mm	\dot{m} , kg/s	k_n , N/m ³	k_t , N/m ³	ζ	β^b	β_{bend}^b
BS	20	60	0.5	$9.82 \cdot 10^8$	$3.78 \cdot 10^8$	0.07	1.23	34
S2				$9.82 \cdot 10^7$	$3.78 \cdot 10^7$			
S3				$9.82 \cdot 10^9$	$3.78 \cdot 10^9$			
S4				$9.82 \cdot 10^{10}$	$3.78 \cdot 10^{10}$			
S5				$9.82 \cdot 10^{11}$	$3.78 \cdot 10^{11}$			
S6						0.14	2.5	68
S7						0.21	3.7	102
S8						0	0	0
S9			0.25					
S10			1					
S11		30					0.6	8
S12		120					2.5	140
S13	10							
S14	30							

Aus dem Ergebnismenge wurden CFD-seitig die zeitlichen Entwicklungen des Strömungsfeldes innerhalb der Förderstrecke in Form lokaler Geschwindigkeiten und Drücke ermittelt. Auf Seiten der DEM ließen sich die zeitlich aufgelösten Positionen der vernetzten Partikel entlang der Förderanlage berechnen. Nach einer Simulationszeit von ca. 0,2 s hatten die ersten eingebrachten Partikel die abgebildete Förderstrecke passiert. In Abbildung 41 sind die zeitliche Entwicklung des Gesamtdruckverlustes (links, unter Variation der Normalsteifigkeit k_n) sowie der Partikelpositionen (rechts, hier $k_n = 9.82 \cdot 10^8$ N/m³) für sukzessiv aufeinanderfolgende Zeitpunkte dargestellt.

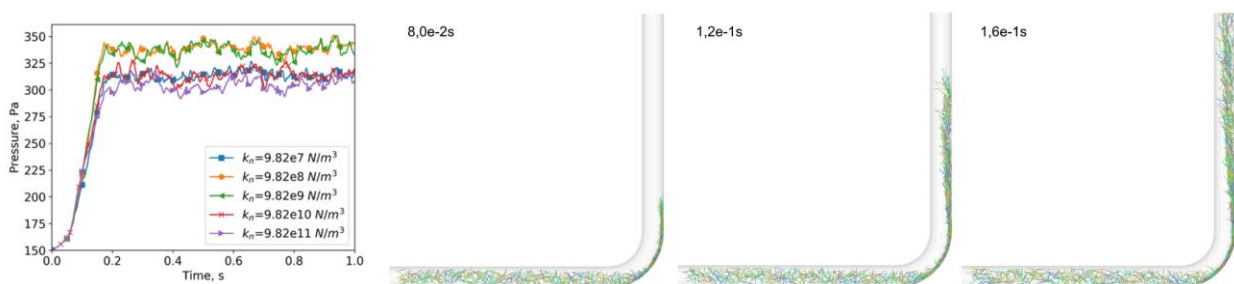


Abbildung 41: Zeitliche Entwicklung des Druckverlustes in Abhängigkeit von der Bond-Steifigkeit (links), sowie der Partikelpositionen für verschiedene Simulationszeiten (rechts, Basisparametersatz BS)

Die Verteilung der Feststoffphase innerhalb der Simulation entspricht bereits mit dem gewählten Basisparametersatz mit guter Näherung den Beobachtungen während der experimentellen Untersuchungen des Förderverhaltens. Weiterhin ist ein Sinken des gemittelten Druckverlustes mit ansteigenden Bond-Steifigkeiten festzustellen. Weitere Einflüsse von Simulationsparametervariationen auf die Feststoffverteilung (insbesondere im Steigrohr) und den Druckverlust werden im Folgenden diskutiert.

Analog zu existierenden Zustandsdiagrammen und den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen konnte in gekoppelten DEM/CFD-Simulationen ein Anstieg des Druckverlustes bei Erhöhung des Feststoffmassenstroms festgestellt werden (Abbildung 42 links). Während für Massenströme von 0,25 kg/s durchschnittliche Differenzdrücke von ca. 250 Pa ermitteln ließen, wurden für Massenströme von 1 kg/s Druckverluste von ca. 600 Pa festgestellt. Unter Verwendung des „Clump drag“ - Widerstandskraftmodells zeigten sich größere Differenzdrücke. Die Feststoffverteilung nach Verlassen des Krümmers tendierte in Simulationen mit höherem Feststoffmassenströmen zur früheren Rückkehr in die Rohrmitte (Abbildung 42 rechts), insbesondere bei Verwendung des „Sphere drag“-Modells der Widerstandskraft.

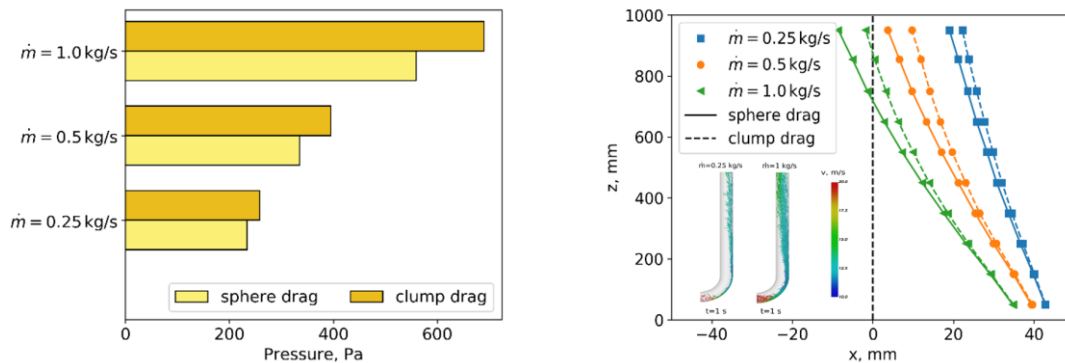


Abbildung 42: Einfluss des Feststoffstroms auf Druckverlust (links) und radiale Partikelverteilung (rechts)

Eine Erhöhung der Leerrohrgeschwindigkeit der Gasphase zeigte erwartungsgemäß einen Anstieg des Druckverlustes (Abbildung 43 links). Auch hier wurden bei Verwendung des „Clump drag“ - Modells höhere Druckverluste erzielt. Die radiale Rückverteilung des Feststoffes zur Rohrachse benötigte geringere Vertikalstrecken bei geringeren Gasgeschwindigkeiten, was hauptsächlich auf die längere Verweilzeit in der Förderstrecke zurückzuführen ist (Abbildung 43 rechts).

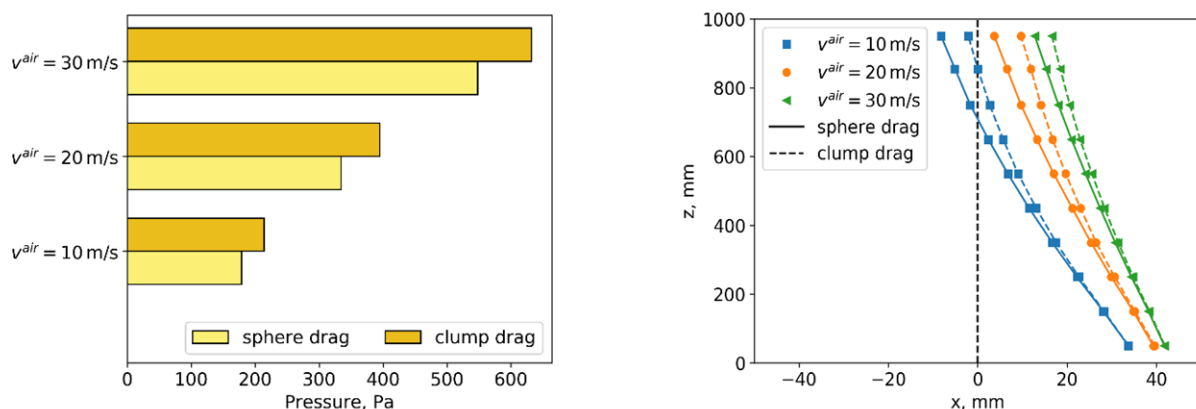


Abbildung 43: Einfluss der Gasleerrohrgeschwindigkeit auf Druckverlust (links) und radiale Partikelverteilung (rechts)

Der Einfluss der Bond-Normalsteifigkeit auf Druckverlust und Feststoffverteilung ist in Abbildung 44 wiedergegeben. Der Druckverlust der Förderstrecke reagierte nur gering sensitiv auf Parametervariationen. Die kürzesten Rückbewegungen zur Rohrachse zeigten Partikel mit mittlerer Steifigkeit. Insgesamt kann aber ein deutlich verschiedenes Verhalten im Vergleich zur simulierten Förderung von Starrkörperhalmen („Rigid clump“) erkannt werden. Nahezu alle

Parameterkombinationen der flexiblen Modellpartikel weisen eine signifikant schnellere Ausgleichsbewegung zur Rohrachse auf, was auf die Halmverformung beim Wandaufprall o.ä. und anschließend wirkende Rückstellkräfte sowie die variierenden Strömungsangriffsflächen zurückzuführen ist.

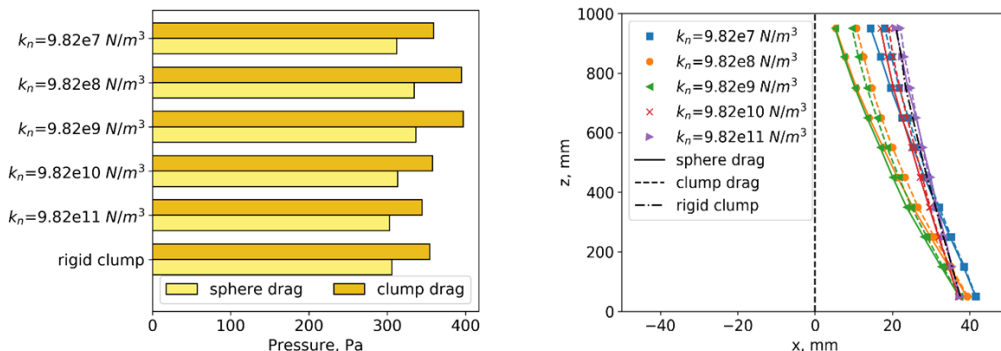


Abbildung 44: Einfluss der Bond-Steifigkeit auf Druckverlust (links) und radiale Partikelverteilung (rechts)

Die Variation der Partikellänge zeigte, dass die größten Druckverluste und schnellsten Rückverteilungen der Feststoffphase für Partikel mittlerer Länge eintraten (Abbildung 45). Längere Partikel verhakten vermehrt untereinander und behinderten sich gegenseitig in der Rückbewegung. Kürzere Partikel waren weniger stark durch das umgebende Fluid beeinflusst und verformten sich auch weniger, wodurch die Rückmischung ebenfalls verzögert wurde. Aufgrund der vergleichsweise kürzeren Vertikalstrecke der Partikel mittlerer Länge übten diese auch einen höheren Strömungswiderstand aus, was sich im höheren Druckverlust äußerte.

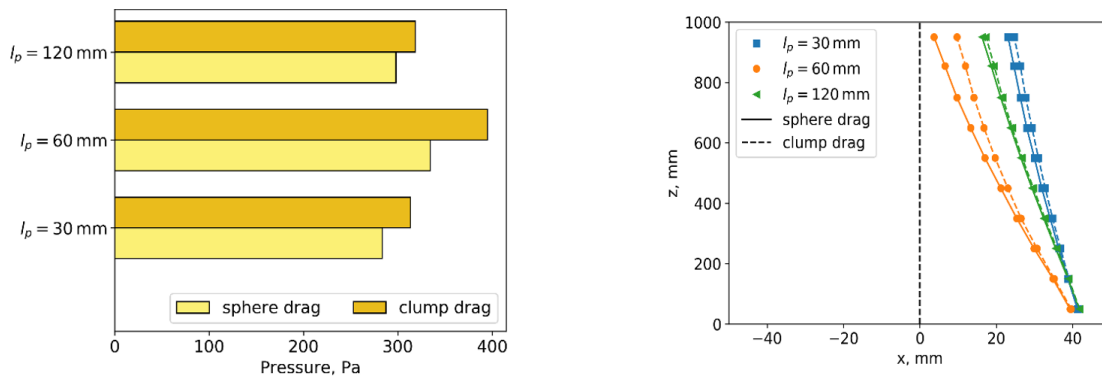


Abbildung 45: Einfluss der Partikellänge auf Druckverlust (links) und radiale Partikelverteilung (rechts)

Unter Kalibration aller notwendigen Modellparameter für PP-Trinkhalme (vgl. Abbildung 5 (links)) wurden abschließend Fördersimulationen an der zwischen den Druckmessstellen P1 und P7 (vgl. Abbildung 7)) nachgebildeten Förderstrecke (Abbildung 46) durchgeführt. Entsprechend konnte auch der Gesamtdruckverlust der Anlage berechnet und zum Abgleich der experimentellen Untersuchungen verwendet werden. Durch die Variation von Feststoffmassenstrom und Gasleerrohrgeschwindigkeit war so auch die simulationsbasierte Erstellung von Zustandsdiagrammen der pneumatischen Förderung erschlossen.

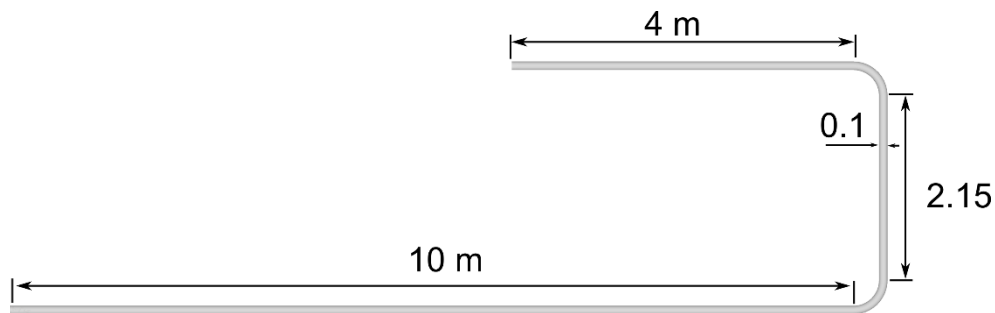


Abbildung 46: Geometrie der gesamten Förderstrecke

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 47 den Ergebnissen der experimentellen Förderversuchen von Trinkhalmen gegenübergestellt. Die Zustandspunkte der einphasigen Durchströmung ($m_s=0$ g/s) wurden bereits in frühen Projektphasen mit nur geringen Abweichungen von den experimentellen Messwerten berechnet. Mit der über die Projektlaufzeit entwickelten und verfeinerten Methodik konnten über einen betrachteten Bereich der Leerrohrgeschwindigkeit von 9 m/s bis 17 m/s und einen Feststoffmassenstrom von 76,5 g/s bis 325 g/s die Anlagendruckverluste mit guter Näherung mittels DEM/CFD-Simulationen berechnet werden.

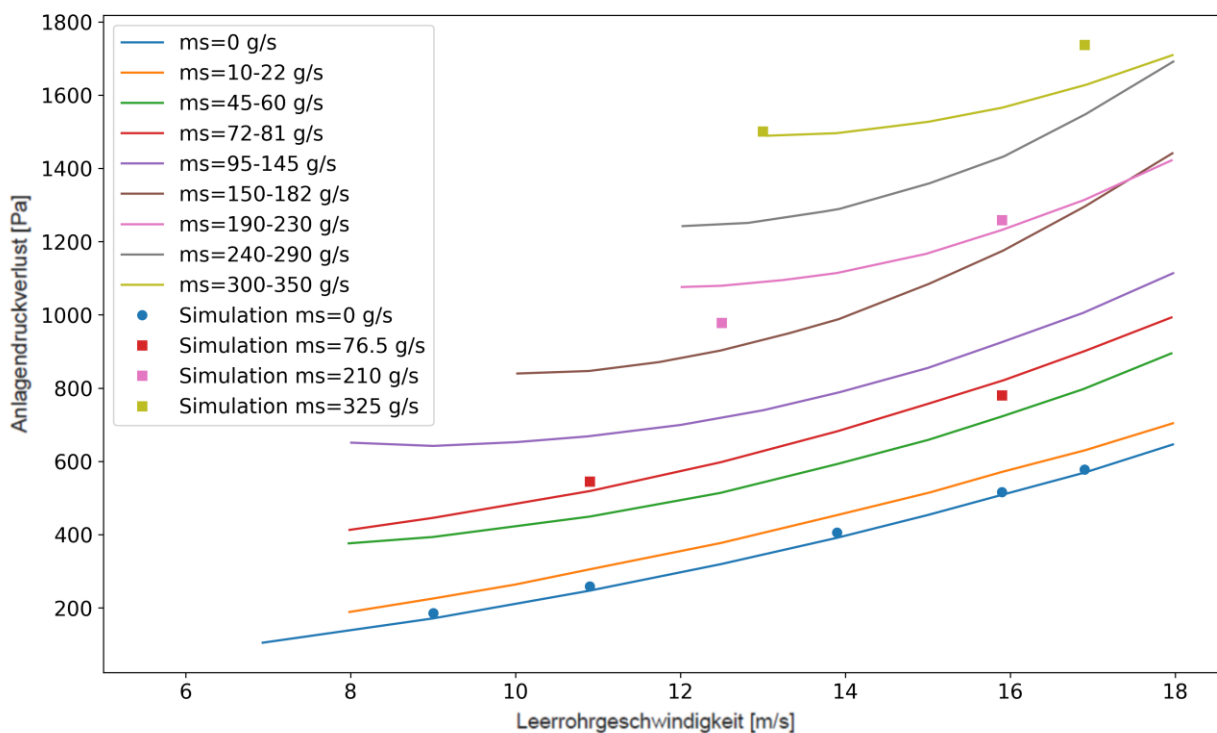


Abbildung 47: Zustandsdiagramm Trinkhalme, Vergleich Experiment - Simulation

4.5.2 DEM - Biegung von Einzelpartikeln

Für die detaillierte Simulation von Verformungsprozessen während der Halmbiegung wurde die Geometrie des Dreipunkt-Biegeversuchsstands nachgebildet. Entsprechend wurde hierfür ein Abstand der 5 mm breiten Auflagezylinder von 50 mm eingestellt. Die Biegefinne wurde mittels einer horizontalen mittigen Wand nachgebildet, welche sich innerhalb der Simulationszeit um 10 mm nach unten bewegt. Neben den Positionen der über virtuelle Bindungen vernetzten

Partikel wurden die innerhalb dieser Bonds wirksamen Kräfte und Momente, ihre translatorischen und rotatorischen Verformungen sowie die auf die Wandabschnitte (Auflagen und Biegefinne) wirkenden Kräfte ausgegeben. Ein Beispiel einer solchen Biegesimulation ist in Abbildung 48 dargestellt. Normalkräfte innerhalb der Bonds sind farblich hervorgehoben (blau für Druckkräfte, rot für Zugkräfte).

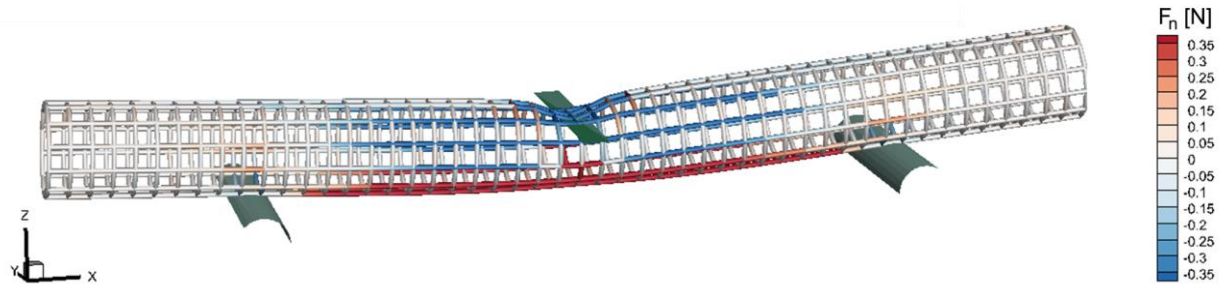


Abbildung 48: Visualisierung von makroskopischer Halmverformung und Zonen hoher lokaler Beanspruchung, hier: Normalkraft F_n , dabei Zugkraft positiv (rot), Druckkraft negativ (blau)

Die während der experimentellen Biegeversuche aufgenommenen Kraft-Weg-Verläufe wurden in analoger Weise auch aus den Simulationsergebnissen abgeleitet, indem der Zeitverlauf von vertikaler Position der Biegefinne und die dabei auf sie wirkende Vertikalkraft gegenübergestellt wurden. Die Verformung während der Durchbiegung ließ sich aus den zeitaufgelösten Koordinaten der vernetzten Partikel herleiten und mit den Verläufen geometrischer Größen aus der digitalen Bildanalyse vergleichen. Beispiele hierfür sind in Abbildung 49 dargestellt.

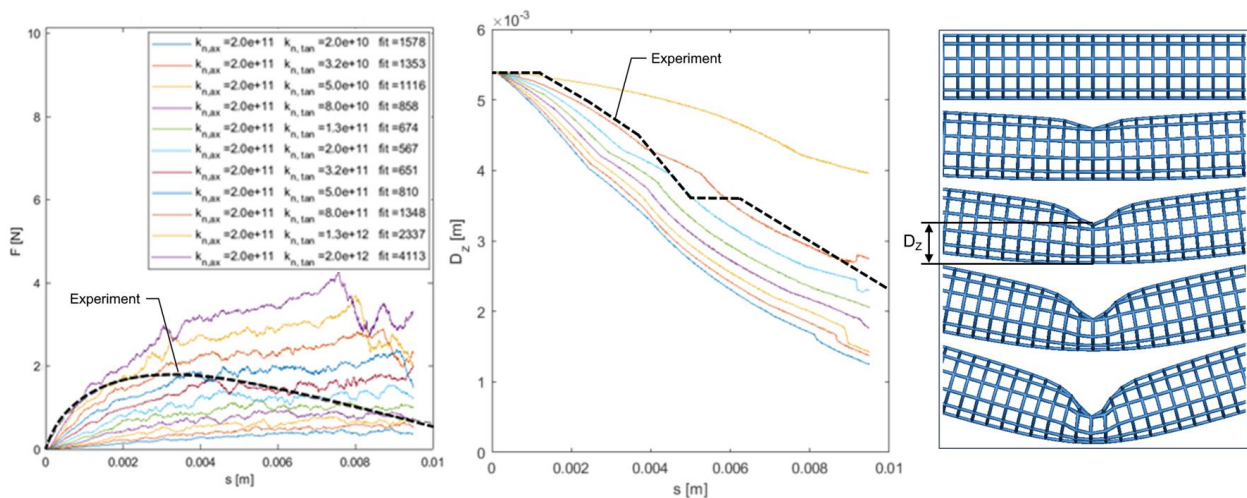


Abbildung 49: Variation der axialen und tangentialen Steifigkeiten $k_{n,ax}$ und $k_{n,tan}$ im Simulationsmodell und deren Einfluss auf simulierte Kraft-Weg-Verläufe (links) sowie die Höhe D_z der Knickzone (Mitte: Parametervariation, rechts: Einzelbeispiel)

5 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Die Erschließung einer immer breiter werden Palette an nachwachsenden Rohstoffen für die stoffliche oder energetische Nutzung stellt auch die einzusetzende Transport- und Lagerungstechnik vor zunehmend schwierigere Herausforderungen. Insbesondere die große Variabilität von Partikelgröße und -form, aber auch des partikelspezifischen Verformungsverhaltens führt das Problem mit sich, dass etablierte Heuristiken zur Prozessauslegung nur noch bedingt anwendbar sind. Für die Bereiche der Materialentnahme, Förderung und Übergabe an Folgeprozesse muss somit oft wissenschaftlich-technisches Neuland betreten werden. Die in diesem Projekt entwickelte und erprobte Methodik liefert hierfür wertvolle Erkenntnisse, welche auch außerhalb der Aufbereitung nachwachsender Rohstoffe Einsatz finden können, etwa in der Lebensmittelbranche, der Kunststoffverarbeitung oder Baustoffindustrie. Branchenübergreifend ergeben sich aus den erzielten Ergebnissen zusammenfassend unter anderem folgende wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Vorteile für KMUs:

- **Systematische Prozessauslegung.** Der entwickelte / validierte Simulationsrahmen basierend auf der DEM/CFD ist von seiner Komplexität her so beschaffen, dass er unmittelbar eingesetzt werden kann, mit kommerzieller Software realisierbar ist und eine ernsthafte Alternative zu experimentellen Untersuchungen des pneumatischen Förderverhaltens flexibler Halmgüter oder Fasermaterialien darstellt. So können bereits in der Planungsphase mögliche Förderungsengpässe identifiziert und gegebenenfalls angepasst werden. Bei bevorstehender Umstellung auf Fördergüter anderer Zusammensetzung kann deren Förderverhalten mit geringem Aufwand prognostiziert werden. Bestehende Auslegungshilfen lassen sich auch für schwierige Materialien und über technische Grenzen hinweg risikofrei und kostenarm erweitern.
- **Weiterentwicklung der experimentellen Methodik.** Die in diesem Projekt entwickelte Methodik weist nach, dass Förderzustände nicht nur über Druck-Geschwindigkeits-Korrelationen abzuschätzen sind. Durch den Einsatz von Digitalbildauswertung und LDA-Messungen lassen sich Strähnen-, Dünen oder Ballenentstehung bereits in Frühphasen detektieren. Entsprechende Messstellen können präzise an kritischen Stellen der Prozesskette positioniert und inline betrieben werden. Die Weiterentwicklung der experimentellen Untersuchung von Biegevorgängen führt zu neuen Erkenntnissen des Partikelverhaltens, deren Gesamtheit zum Aufbau von Materialdatenbanken dienen kann, welche wiederum von verschiedensten KMU-Sparten genutzt werden können. Die Untersuchungen zur zeitabhängigen Feuchteaufnahme bzw. -abgabe lässt wertvolle Aussagen u.a. zur Lagerstabilität biogener Halmgüter zu.
- **Etablierung der Simulationsmethodik.** Mit der Weiterentwicklung des numerischen Verfahrens kann im Bereich von Ingenieurbüros oder Ingenieurdienstleistern (ebenfalls oft KMUs), der Geschäftsbereich der Simulation auf dem Gebiet der pneumatischen Förderung stärker etabliert werden. Die Verfügbarkeit eines realitätsnahen deformierbaren Partikelmodells für DEM- und gekoppelte DEM/CFD-Simulationen erzeugt voraussichtlich in vielen Anwendungsgebieten ein hohes Interesse.

6 Verwendung der Zuwendung

Beschaffung ECT-Sensor

Ein ECT-Sensor war im Rahmen des Projektes vorgesehen, um ein Tomographie System am Fachgebiet MVTA aufzubauen, das die sichere / nicht-invasive Erfassung der Partikelverteilung innerhalb der Förderleitung in den experimentellen Untersuchungen erlaubt hätte. Damit sollte es ermöglicht werden die Simulationsergebnisse (DEM/CFD) experimentell weiter zu validieren.

Aufgrund der Beeinträchtigung durch die Corona-Pandemie wurde der Antrag an die AiF gestellt den ECT-Sensor nicht zu beschaffen und stattdessen die Personenmonate des wissenschaftlich-technischen Personals von 30 PM auf 37 PM aufzustocken. Diesem Antrag wurde durch die AiF auch stattgegeben, was in den weiter unten stehenden Ausgaben für das wissenschaftlich-technisches Personal berücksichtigt wurde.

Ausgaben für wissenschaftlich-technisches Personal

Arbeitspaket 1: Auswahl / Charakterisierung geeigneter halmgutartiger Biomassen

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Dr. Gerber war für die Auswahl und nachgeschaltete Charakterisierung von halmgutartigen Biomassen bzw. Materialien zuständig (2 Personenmonate).

Arbeitspaket 2: Erweiterung der pneumatischen Förderanlage

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Dr. Gerber war für die Erweiterung der pneumatischen Förderanlage und die Installation von zugehöriger Messtechnik verantwortlich (2 Personenmonate).

Arbeitspaket 3: Experimentelle Bestimmung des Biegeverhaltens halmgutartiger Biomasse

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Dr. Gerber war für die Charakterisierung des Biegeverhaltens der halmgutartigen Materialien zuständig (4 Personenmonate). Unterstützung erhielt er durch Herrn Dr. Platzk (haushaltsfinanziert).

Arbeitspaket 4: Erweiterung des DEM/CFD-Rahmens zur Abbildung biegsamer halmgutartiger Biomasse

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Schmidt (3 Personenmonate) und Drescher (3 Personenmonate) nahmen die Erweiterung des DEM/CFD-Rahmens vor. Unterstützung erhielten sie durch Herrn Dr. Markauskas (haushaltsfinanziert).

Arbeitspaket 5: Experimentelle Untersuchung des pneumatischen Transports von halmgutartiger Biomasse

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Dr. Gerber nahm die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Transports vor (7 Personenmonate).

Arbeitspaket 6: Numerische Untersuchung des pneumatischen Transports von halmgutartiger Biomasse

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter Rosemann (2 Personenmonate), Drescher (5 Personenmonate) und Dr. Gerber (1 Personenmonat) waren für die numerischen

Untersuchungen des Transports der halmgutartigen Materialien zuständig. Unterstützung erhielten sie durch Herrn Dr. Platzk und Dr. Markauskas (haushaltsfinanziert).

Arbeitspaket 7: Ableitung von Zustands- / Förderdiagrammen und Auslegungsvorschriften

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Dr. Gerber war für die Ableitung von Zustands- / Förderdiagrammen und Auslegungsvorschriften zuständig (8 Personenmonate). Unterstützung erhielt er durch Herrn Dr. Platzk (haushaltsfinanziert).

6.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die geleistete Arbeit entspricht der im Projektantrag definierten Aufgabenstellungen bzw. den Inhalten der einzelnen Arbeitspakete und war notwendig und angemessen.

7 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen und Erfüllungsstatus
Information der Unternehmen des PA	a) Unmittelbarer und kontinuierlicher Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft b) Diskussion und Klärung von Problemstellungen c) Festlegung weiterer Arbeitsschritte	Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) Alle fünf planmäßigen PA-Treffen (28.11.18, 27.05.19, 04.12.19, 31.08.20, 30.06.21) haben stattgefunden.
Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Einbindung interessierter Unternehmen, somit direkter Ergebnistransfer in die Industrie	Individuelle Ansprache von Unternehmen mit spezifischem Know-how zum Kenntnistransfer Während des Projektes wurden Projektergebnisse auf Konferenzen (z.B. DEM-Konferenz, ProcessNet-Jahrestreffen) mit interessierten Unternehmen ausgetauscht (siehe Abschnitt 8).
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen ggf. auch branchenübergreifend	Zusammenfassungen auf der Homepage des Fachgebietes Eine Zusammenfassung des Projektes sowie eine Auflistung der im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen sind auf der Fachgebietshomepage zu finden.
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertationen und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	a) Vermitteln von wissenschaftlichen Kenntnissen und Heranführen an wissenschaftliches Arbeiten b) Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und international	a) Bachelor-, Masterarbeiten sowie Dissertationen Im Rahmen des Projektes entstandene Arbeiten sind unter Abschnitt 9 gelistet. b) Veröffentlichung in z.B. Powder Technology, Chemical Engineering Science, Advanced Powder Technology, Schüttgut Eine Auflistung der während des Projektes entstandenen Veröffentlichungen ist in Abschnitt 8 gegeben.
Vorträge und Präsentationen	Verbreitung der Ergebnisse im Rahmen nationaler/internationaler Tagungen/Messen	Vorträge: Chops 2018, 8th World Congress on Particle Technology 2018, Schüttgut 2019 Siehe Abschnitt 8.
Weitergabe von num. und exp. Ergebnissen	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und international	Herausgabe auf individuelle Anfrage Die Weitergabe von Projektergebnissen erfolgte, wenn angefragt, während der PA-Treffen und auf fachspezifischen Konferenzen.

Spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen und Erfüllungsstatus
Personaltransfer	Erhaltung des Wissens und direkter Wissenstransfer in die Wirtschaft	Durchführung von stud. Arbeiten und Dissertationen in branchenspezifischen Unternehmen. Ggf. anschließende Übernahme des Mitarbeiters im Unternehmen. Ein direkter Personaltransfer von der Forschungseinrichtung ist während der Projektlaufzeit nicht erfolgt. Durch Betreuung von Abschlussarbeiten (insgesamt 16 Arbeiten, siehe Abschnitt 9) und Anlernen von mehreren Hilfskräften, wurde jedoch eine breite Basis an Personen mit Expertise in dem Gebiet ausgebildet.
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertationen und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und international	a) Veröffentlichung in Powder Technology, Chemical Engineering Science, Advanced Powder Technology, Schüttgut Publikation in "Powder Technology" (Status: eingereicht und aktuell in Überarbeitung) noch in 2021.

		b) Einstellen in die Universitätsbibliothek
		Im Rahmen des Vorhabens ist keine Dissertation/Habilitation entstanden, die in der Universitätsbibliothek hätte eingestellt werden können.
Vorträge und Präsentationen	Verbreitung der Ergebnisse im Rahmen nationaler Tagungen und Konferenzen	Vorträge: Process Net Tagung, 8th World Congress on Particle Technology 2018, Chops 2018, Schüttgut 2019 Weitere Vorträge zu dem Thema sind angedacht z.B. auf in Zukunft stattfindenden Messen/Konferenzen z.B. der Schüttgut 2022.

7.1 Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes

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

8 Veröffentlichungen

[E1] *Stephan Gerber, Stefan Platzk, Harald Kruggel-Emden*

A mixed experimental/numerical Euler-Lagrangian study of pneumatic conveying of biomass particles

DEM8-Konferenz, Twente, Niederlande, 2019.

[E2] *Stefan Platzk, Darius Markauskas, Harald Kruggel-Emden*

Experimentelle Untersuchungen zum Biegeverhalten von Halmgütern

Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Agglomerations- & Schüttguttechnik, Mechanische Flüssigkeitsabtrennung und Zerkleinern & Klassieren, Online Konferenz, 2021.

Geplante Veröffentlichungen nach Projektende

[E3] *Darius Markauskas, Stefan Platzk, Harald Kruggel-Emden*

Comparative numerical study of pneumatic conveying of flexible elongated particles through a pipe bend by DEM-CFD

(eingereicht in Powder Technology, 2021 und aktuell in Überarbeitung).

9 Studentische Arbeiten

- [S1] Johannes Rößler, Bachelorarbeit, Inbetriebnahme und Erprobung eines LDA-Messsystems zur experimentellen Untersuchung von Fluidströmungen (11/2018), Technische Universität Berlin
- [S2] Paul Berner, Bachelorarbeit, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Biegeversuchsstands sowie Durchführung von experimentellen Untersuchungen des Biegeverhaltens halmgutartiger Biomasse (05/2019), Technische Universität Berlin
- [S3] Simon Schieberlein, Projektpraktikum, Installation ergänzender Messtechnik an der pneumatischen Förderanlage (05/2019), Technische Universität Berlin
- [S4] Sebastian Hall, Bachelorarbeit, Zweiphasige Geschwindigkeitsmessungen in einer pneumatischen Förderung unter Berücksichtigung von Beugungseffekten an der Rohraußenwand (06/2019), Technische Universität Berlin
- [S5] Markus Bannert, Masterarbeit, Inbetriebnahme einer pneumatischen Förderanlage für verschiedene Biomassen und Vergleich experimenteller und analytischer Berechnungen von zweiphasigen Druckabfällen (09/2019), Technische Universität Berlin
- [S6] Louis Meyer, Masterarbeit, Inbetriebnahme einer pneumatischen Förderanlage für verschiedene Biomassen und Realisierung verschiedener Strömungsregime mit Ausschleusung durch einen Zyklon (11/2019), Technische Universität Berlin
- [S7] Mert Akkus, Masterarbeit, Untersuchung der pneumatischen Förderung von Biomassen für verschiedene Strömungsregime mit Hilfe einer Parameterstudie auf Basis der multi-fluid-Methode (12/2019), Technische Universität Berlin
- [S8] Jurij Richter, Bachelorarbeit, Untersuchungen zum Einfluss der Gleichgewichtsfeuchte von Getreidehalmen auf deren Biegeeigenschaften (03/2020), Technische Universität Berlin
- [S9] Burak Bayram, Masterarbeit, Zweiphasige Geschwindigkeitsmessungen in einem Glaskrümmern einer pneumatischen Förderung (08/2020), Technische Universität Berlin
- [S10] Catherina Clausnitzer, Bachelorarbeit, Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung und Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte halmgutartiger Biomasse in der Atmosphäre oberhalb gesättigter Salzlösungen (08/2020), Technische Universität Berlin
- [S11] Yana Ustyugova, Masterarbeit, Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur optischen Erfassung der Verformung halmgutartiger Partikel unter Biegebeanspruchung (09/2020), Technische Universität Berlin
- [S12] Hussein Hygazi, Masterarbeit, Erstellung von Zustandsdiagrammen auf Basis von Druckverlustmessungen an einer pneumatischen Förderanlage und Vergleich mit empirischen Berechnungen (09/2020), Technische Universität Berlin
- [S13] Hao Lui, Masterarbeit, Messung von Geschwindigkeitsprofilen der Festphase durch computergestützte Partikelverfolgung in einer pneumatischen Förderung (10/2020), Technische Universität Berlin
- [S14] Dennis Jeske, Projektpraktikum, Dichtebestimmung von Miscanthus durch ein trockenes Pyknometer (01/2021), Technische Universität Berlin

- [S15] Rui Hong, Masterarbeit, Optische Untersuchung des Biegeverhaltens von halmgutartiger Biomasse in einer pneumatischen Förderanlage sowie Modellierung und Messung des Biegeverhaltens von Einzelpartikeln (01/2021), Technische Universität Berlin

- [S16] Phil Biese, Masterarbeit, Messung der Geschwindigkeit von heterogenen Bestandteilen der Festphase durch computergestützte Partikelverfolgung in einer pneumatischen Förderung (01/2021), Technische Universität Berlin

10 Literaturverzeichnis

- [1] C. Calderón, "European Bioenergy Outlook," in *greenGrain project conference*, 2016, p. 15.
- [2] Landesamt für Natur Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, "Potenzialstudie Erneuerbare Energien Teil 3 - Biomasse-Energie," 2014.
- [3] Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum GmbH (DBFZ), "Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung," *Energetische Biomassenutzung Band 2*, p. 53, 2011.
- [4] Bundesministerium für Energie und Wirtschaft, "Erneuerbare Energien im Jahr 2014," *Berlin*, 2015.
- [5] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, *Gülzower Fachgespräche 2. Internationale Fachtagung Strohenergie*. Berlin, 2012.
- [6] Fachagentur Nachwachsende Rohstoff e.V., "Heizen mit Stroh," Gülzow-Prüzen, 2007.
- [7] Verbio Vereinigte BioEnergie AG, "Biomethan aus Stroh," 2017.
- [8] O. Lüdtke, M. Schlimbach, E. Fichter, J. Horn, G. Pollert, and J. Kühling, "Verfahren und Anlage zur Herstellung von Biogas aus lignocellulosehaltiger Biomasse, Patent, DE102012112898 A1." Deutschland, 2014.
- [9] B. Mittelbach, "Verhalten von Kunststoffschläuchen bei Stroh- und Heuförderung mit Gebläse," *Grundlagen der Landtechnik*, vol. 20, pp. 32–36, 1964.
- [10] Deutsche Bundesregierung, "Integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung," no. August 2007, 2007.
- [11] D. Peisker, T. Hering, and A. Vetter, "Energetische Verwertung von Stroh - Möglichkeiten und Grenzen," *Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft*, 2007.
- [12] S. Kabelac, M. Kind, H. Martin, D. Mewes, K. Schaber, and P. Stephan, *VDI-Wärmeatlas*. VDI e.V., 2013. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3.
- [13] H. Telschig, "Technische und energieeffiziente Auslegung pneumatischer Förderanlagen zum Transport von Schüttgütern," in *Treffen des DSIV*, 2015, p. 37.
- [14] E. Muschelknautz and H. Wojahn, "Auslegung pneumatischer Förderanlagen," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 46, no. 6, pp. 223–272, 1974, doi: 10.1002/cite.200700070.
- [15] K. Persson and H. Have, "Handling and Storage of Chopped Straw for Heating Purposes," 1981.
- [16] J. Tolmac, D. Tolmac, S. Prvulovic, and M. Pavlovic, "Air Transport Plan of Grinded Straw," *Modern Environmental Science and Engineering*, vol. 1, no. 5, pp. 269–272, 2015, doi: 10.15341/mese(2333-2581)/05.01.2015/008.

- [17] J. Dai, H. Cui, and J. R. Grace, "Biomass feeding for thermochemical reactors," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, no. 5, pp. 716–736, 2012, doi: 10.1016/j.pecs.2012.04.002.
- [18] B. Lenaerts *et al.*, "Simulation of grain–straw separation by Discrete Element Modeling with bendable straw particles," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 101, pp. 24–33, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.COMPAG.2013.12.002.
- [19] Y. Guo, C. Wassgren, B. Hancock, W. Ketterhagen, and J. Curtis, "Computational study of granular shear flows of dry flexible fibres using the discrete element method," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 775, Jul. 2015, doi: 10.1017/jfm.2015.289.
- [20] H. Kruggel-Emden and T. Oschmann, "Numerical study of rope formation and dispersion of non-spherical particles during pneumatic conveying in a pipe bend," *Powder Technology*, vol. 268, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.08.033.
- [21] DIN EN ISO 5167-2:2004-01, "Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 2: Blenden".
- [22] DIN EN ISO 12571:2013-12, "Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2013); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2013".
- [23] Y. Ma and H. Huang, "DEM analysis of failure mechanisms in the intact Brazilian test," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 102, pp. 109–119, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.IJRMMS.2017.11.010.
- [24] R. di Felice, "The voidage function for fluid-particle interaction systems," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 20, no. 1, pp. 153–159, Feb. 1994, doi: 10.1016/0301-9322(94)90011-6.
- [25] A. Hölzer and M. Sommerfeld, "New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles," *Powder Technology*, vol. 184, no. 3, pp. 361–365, Jun. 2008, doi: 10.1016/J.POWTEC.2007.08.021.
- [26] Y. Jiang *et al.*, "Discrete element method–computational fluid dynamics analyses of flexible fibre fluidization," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 910, Mar. 2021, doi: 10.1017/jfm.2020.930.
- [27] J. E. Hilton and P. W. Cleary, "The influence of particle shape on flow modes in pneumatic conveying," *Chemical Engineering Science*, vol. 66, no. 3, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.ces.2010.09.034.
- [28] *VDI-Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3.