

Schlussbericht vom 04.10.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20409 N

Thema

Wechselwirkung von Fließverhalten und Durchströmung in Schachtöfen

Berichtszeitraum

01.11.2018 - 31.01.2022

Forschungsvereinigung

Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. - DVV

Leimkugelstraße 10, 45141 Essen

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1: VDEh- Betriebsforschungsinstitut GmbH

Abt. Prozessoptimierung Roheisen- und Stahlerzeugung, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf

Forschungsstelle 2: Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik, Universitätsstraße 150, 44780

Bochum

Gefördert durch:

IGF-Vorhaben Nr. 20409 N

WECHSELWIRKUNG VON FLIEßVERHALTEN UND DURCHSTRÖMUNG IN SCHACHTÖFEN

Kurzfassung

In diesem Forschungsvorhaben wurde die Schüttgutströmung von Partikeln mit entgegen der Bewegungsrichtung induzierter Fluidströmung untersucht. Am VDEh-Betriebsforschungsinstitut (Forschungsstelle 1) wurden hauptsächlich experimentelle Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse zur Validierung der an der Ruhr-Universität Bochum (Forschungsstelle 2) durchgeführten DEM-Simulationen verwendet wurden.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Pilot-Schachtversuchsstand durchgeführt, der je nach Anforderungen der Arbeitspakete unterschiedlich stark durchströmt wurde. Es wurden unterschiedliche Materialien auf ihr Bewegungsverhalten und Ausflussverhalten hin untersucht. Als Versuchsmaterialien kamen Holzkugeln, Eisenerzpellets, Koks und Sinter zum Einsatz. Über eine Druckmessung mit Differenzdrucksensoren konnten die zeitlichen Druckentwicklungen gemessen werden.

Zur Anpassung und Überprüfung der DEM-Simulationen wurden die Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen verwendet. Der zur Abbildung der Systeme gewählte Simulationsansatz (DEM-CFD), erlaubt es, die Partikelbewegung im Gegenstrom quantitativ unter Variation der angeführten Parameter abzubilden. Die mit DEM-CFD erzielten Ergebnisse geben qualitativ das experimentell bestimmte Verhalten gut wieder. Eine quantitative Vorausberechnung erfordert noch weitere Modellverbesserungen. Die erarbeiteten Referenzdatensätze stellen eine gute Grundlage für den Ergebnistransfer in die Industrie dar.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang	140 S., 87 Abb., 30 Tab., 15 Lit.
Beginn des Projekts	01.11.2018
Ende des Projekts	31.04.2021 + kostenneutrale Verl. Bis 31.01.2022
Zuschussgeber	BMWi / IGF-Nr. 20409 N
Forschungsstellen	1: VDEh- Betriebsforschungsinstitut GmbH, Abt. Prozessoptimierung Roheisen- und Stahlerzeugung Leiter: Dr. Ing. T. Hauck 2: Ruhr-Universität Bochum, LS für Energieanlagen & Energieprozesstechnik Leiter: Prof. Dr.-Ing. V. Scherer
Bearbeiter und Verfasser	M. Sc. Thomas Piontek, Betriebsforschungsinstitut M. Sc. Maik Scharnowski, Ruhr-Universität Bochum

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	8
1. Einleitung	9
1.1. Anlass für den Forschungsantrag, Ausgangssituation	9
1.2. Forschungsziele	9
1.3. Zielerreichung und wesentliche Arbeitsergebnisse	10
2. Numerische Methoden und Versuchseinrichtungen.....	15
2.1. Numerisches Vorgehen zur Beschreibung durchströmter bewegter Schüttgüter.....	15
2.2. Versuchsapparaturen und Versuchsprinzip (FS1).....	20
2.2.1. Messung der Partikeleigenschaften des Versuchsmaterials (AP 1)	21
2.2.2. Vorversuche im Versuchsrohr (AP 1).....	22
2.2.3. Hauptversuche in einem Schachtmodell (AP 5, AP 8, AP 9).....	24
2.3. Versuchsapparaturen und Versuchsprinzip (FS2).....	29
2.3.1. Ermittlung von Reibungskoeffizienten.....	29
2.3.2. Ermittlung der Stoßzahl	30
2.3.3. Ermittlung des statischen Schüttwinkels	31
2.3.4. Ermittlung des dynamischen Schüttwinkels	32
2.3.5. Ermittlung des Rollreibungskoeffizienten	33
2.3.6. Labor-Versuchseinrichtung	35
3. Ergebnisse	44
3.1. Ermittlung von geometrischen und strömungsmechanischen Schüttungseigenschaften (AP 1, FS 1).....	44
3.2. Ermittlung von mechanischen Materialeigenschaften (AP 2, FS 2)	59
3.3. Auslegung und Aufbau der Labor-Versuchseinrichtungen für Referenzexperimente mit idealisierten Schüttkörpern (AP 3, FS 2)	62
3.4. Begleitende Simulationen der Vorversuche (AP 4, FS 2).....	63
3.5. Entwicklung, Konstruktion und Aufbau der Pilot-Versuchseinrichtung für reale Schüttgüter (AP 5, FS 1).....	68
3.6. Untersuchung durchströmter bewegter, idealisierter Schüttungen in der Labor-Versuchseinrichtung (AP 6, FS 2).....	69
3.7. Numerische Untersuchung durchströmter, bewegter, idealisierter Schüttungen in der Labor-Versuchseinrichtung (AP 7, FS 2).....	83
3.8. Inbetriebnahme der Pilot-Versuchseinrichtung für reale Schüttgüter (AP 8, FS 1)	83
3.9. Versuchsdurchführung in der Pilot-Versuchseinrichtung mit realen Schüttgütern (AP 9, FS 1)	84

3.10.	Begleitende Simulationen der Pilot-Versuche mit realen Schüttgütern (AP 10, FS 2) 105	
3.11.	Nutzung verfügbarer Messungen an Bestandsanlagen zur exemplarischen Anwendung der Erkenntnisse (AP 11, FS 1&2).....	109
3.12.	Identifikation bestimmender Parameter für das Fließverhalten durchströmter Schüttgüter (AP 12, FS 1&2).....	131
4.	Literaturverzeichnis	134
5.	Verwendung der Zuwendung	135
6.	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU 136	
7.	Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	137
8.	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts.....	139
9.	Publikationen und Abschlussarbeiten aus dem Projekt	140

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspakete.....	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung des verwendeten linearen Feder-Dämpfer-Modells (am Beispiel von Kugeln).....	18
Abbildung 3: Schematische Darstellung des verwendeten Tangentialfeder-Modells.....	19
Abbildung 4: Konstruktionen für die Versuchsdurchführung. Links: Versuchsrohr, Rechts: Schachtmodell.....	20
Abbildung 5: Camsizer zur Bestimmung der Partikelgrößen und -formverteilung.....	22
Abbildung 6: Konstruktionen des Versuchsrohr mit markierten Messstellen	23
Abbildung 7: Konstruktionen des Schachtmodells mit Beschreibung der einzelnen Bauteile	25
Abbildung 8: Druckmesspositionen in der Konstruktionszeichnung. Ansicht von hinten.....	26
Abbildung 9: Entworfenener Doppelschieber.....	27
Abbildung 10: Schematischer Versuchsaufbau (links), Kraftmessgerät zur Bestimmung von Reibungskoeffizienten (rechts)	30
Abbildung 11: Schematischer Fallversuch (links), Fallversuchsmessstand zur Stoßzahlbestimmung (rechts).....	31
Abbildung 12: Statischer Schüttwinkel Versuchstand	32
Abbildung 13: Gefülltes Batch-Drehrohr mit 10 mm Buchenholzkugeln	33
Abbildung 14: Prinzip zur Bestimmung des Rollreibungskoeffizienten	34
Abbildung 15: Schemazeichnung Labor-Versuchseinrichtung	35
Abbildung 16: CAD-Modell der Labor-Versuchseinrichtung	36
Abbildung 17: Berechnungsgitter LEAT Labor-Versuchsstand	37
Abbildung 18: Simulationsergebnisse des Fluidströmung im Versuchstand.....	38
Abbildung 19: Strömungssimulation mit Einbauten.....	39
Abbildung 20: Fotografie des leeren (links) und mit Holzkugeln gefüllten Versuchssilos (rechts)	40
Abbildung 21: Versuchsstand mit Sensor- und Aktorpositionen.....	42
Abbildung 22: Schüttgüter	44
Abbildung 23: Q3-Summenkurve einer Partikelanalyse der verwendeten Materialien	45
Abbildung 24: Abnutzung der Sinterpartikel nach 34 Versuchen	47
Abbildung 25: Q3-Verteilung der Versuchsmaterialien des Schachtmodells vor und nach den Versuchen.....	48
Abbildung 26: Druckverluste der Versuchsmaterialien bei ruhender Schüttung im Versuchsrohr	51
Abbildung 27: Vergleich der normierten Standardabweichung des gesamten Druckverlustes gleicher und verschiedener Schüttungen.....	53
Abbildung 28: Geschwindigkeitsprofile über der Schüttung im Versuchsrohr.....	54
Abbildung 29: Absinkgeschwindigkeiten der Versuchsmaterialien unter Einfluss entgegenreisender Luft im Versuchsrohr.....	55
Abbildung 30: Druckverlust in Abschnitt 2 während des Ausfließens der Versuchsmaterialien .	57
Abbildung 31: Permeabilitätsänderung in Abschnitt 2 während des Ausfließens der Versuchsmaterialien im Versuchsrohr	58
Abbildung 32: Ausfluss von Eisenerzsinter aus dem Versuchsrohr nach Öffnung des Schiebers	63
Abbildung 33: Mittels DEM/CFD berechnete Druckverluste für Eisenerzsinter im Versuchsrohr im Vergleich zu den Messungen an FS1	64

Abbildung 34: Simulierte zeitliche Entwicklung des Druckverlustes für Eisenerzsinter und Holzkugeln im Abschnitt 2 des Versuchsrohrs (Luftvolumenstrom 300 m ³ /h)	65
Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der im Versuchsrohr verbliebenen Partikelmasse von Eisenerzpellets und Holzkugeln (Luftvolumenstrom 300 m ³ /h).....	67
Abbildung 36: Füllstandshöhe und ausgelaufene Masse über der Zeit im Nachlaufversuch, die Schütthöhe ist nicht annähernd konstant zu halten.....	69
Abbildung 37: Radialer Auslauf (links), zentraler Auslauf (rechts).....	70
Abbildung 38: Auslaufversuch ohne Durchströmung zu verschiedenen Zeitpunkten	72
Abbildung 39: Schütthöhen mit und ohne Durchströmung (Messung vs. Simulation).....	72
Abbildung 40: Siloausfluss ohne Gegenströmung für verschiedene Spaltweiten; zugehörige Massenströme im Experiment und in der Simulation	73
Abbildung 41: spezifischer Druckverlust als Funktion der Reynoldszahl; Vergleich Messungen gegen Simulationen.....	74
Abbildung 42: Drücke auf verschiedenen Höhen des Silos im Vergleich zur korrespondierenden Simulation	75
Abbildung 43: Ausfluss bei zwei Volumenströmen und Spaltweite 50 mm.....	76
Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf des Drucks in 200 mm Schüttungshöhe in Messung und Simulation	77
Abbildung 45: Massenausfluss bei verschiedenen Spaltweiten und 240 m ³ /h Gegenströmung	78
Abbildung 46: Massenausfluss bei verschiedenen Spaltweiten und 240 m ³ /h Gegenströmung	78
Abbildung 47: Realsense Aufnahmen der Schütthöhe bei 30 mm Spalt, 0 m ³ /h	79
Abbildung 48: Detaillierte Darstellung der Schüttoberfläche	80
Abbildung 49: Auslaufversuche mit 30 mm Spalt und Lochblechstempel	81
Abbildung 50: Massenausfluss aus Silo mit zentralem kreisförmigem Querschnitt	82
Abbildung 51: Druckverlauf im Silo über der Zeit an der Position 200 mm und 400 mm (kreisförmiger Auslauf)	82
Abbildung 52: Schematische Darstellung der Ausflussversuche.....	84
Abbildung 53: Druckverluste der Versuchsmaterialien bei ruhender Schüttung im Schachtmodell	86
Abbildung 54: Vergleich der Druckverlustmessungen von Versuchsrohr und Schachtmodell ...	87
Abbildung 55: Absinkgeschwindigkeiten der Versuchsmaterialien unter Einfluss entgegenströmender Luft im Schachtmodell.....	89
Abbildung 56: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung beim Vergleich von Eisenerzpellets, Sinter und Koks.....	91
Abbildung 57: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Eisenerzpellets über die Zeit	92
Abbildung 58: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Sinter über die Zeit	93
Abbildung 59: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Koks über die Zeit	93
Abbildung 60: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Holzkugeln über der Zeit	94
Abbildung 61: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung zur Erzeugung einer gleichmäßigen Strömung.....	95
Abbildung 62: Permeabilitätsänderung während des Ausfließens der Versuchsmaterialien im Schachtmodell. Links: Mittige Permeabilitätsänderung, Rechts: Seitliche Permeabilitätsänderung.....	96

Abbildung 63: Betrachtung eines asymmetrischen Ausflusses von Sinter mit Fokus auf die Permeabilitätsänderung. Links: Geschwindigkeitsfeld der Partikel, Rechts: Permeabilität über der Zeit.....	98
Abbildung 64: Vergleich des dimensionslosen Druckverlustes über der Anzahl der Versuche zur Qualitätsüberwachung der Versuchsmaterialien.....	100
Abbildung 65: Zeichnung des Schachtmodells von der Seite mit Messposition für Wandverbiegung.....	102
Abbildung 66: Beispielmessungen mit Prozessdaten für den Vergleich der Bilanz des Volumenstromes.....	103
Abbildung 67: vereinfachtes Simulationsschachmodell (links), Konstruktionszeichnung (rechts).....	105
Abbildung 68: Vertikale Partikelgeschwindigkeiten (Holz) im Mittelschnitt bei 80 mm Spaltweite.....	107
Abbildung 69: Vertikale Partikelgeschwindigkeiten (Erzpellets) im Mittelschnitt bei 80 mm Spaltweite.....	107
Abbildung 70: Betriebsdaten über 2 Tage mit Vergleich von Höhe und Permeabilität (Positivbeispiel).....	111
Abbildung 71: Betriebsdaten über 2 Messtage mit Vergleich von Höhe und Permeabilität (Negativbeispiel).....	112
Abbildung 72: Schachtgeometrie.....	116
Abbildung 73: Partikelgeometrie zur Untersuchung des Ausflussverhaltens: e) und f) sind zwei Beispiele aus insgesamt neun unterschiedlichen Typen in der Koks-Mischung.....	117
Abbildung 74: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von Kugeln aus dem Schacht.....	119
Abbildung 75: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von Kugeln aus dem Schacht.....	120
Abbildung 76: Einfluss der Durchströmung auf den Ausfluss von „Kugelpolyedern“.....	121
Abbildung 77: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von „Kugelpolyedern“ aus dem Schacht.....	122
Abbildung 78: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von „Kugelpolyedern“ aus dem Schacht.....	122
Abbildung 79: Einfluss der Durchströmung auf den Ausfluss von Dodekaedern.....	124
Abbildung 80: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von Dodekaedern aus dem Schacht.....	125
Abbildung 81: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von Dodekaedern aus dem Schacht.....	125
Abbildung 82: Einfluss der Durchströmung auf den Ausfluss von Zylindern.....	126
Abbildung 83: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von Zylindern.....	127
Abbildung 84: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von Zylindern aus dem Schacht.....	127
Abbildung 85: Ausfluss von Kokspartikeln bei 0 m/s und 1 m/s Gegenströmung.....	128
Abbildung 86: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss der Koksschüttung.....	129
Abbildung 87: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss der Koksschüttung.....	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der geometrischen Parameter beider Konstruktionen.....	21
Tabelle 2: Abmessungen LEAT-Labor-Versuchseinrichtung.....	36
Tabelle 3: Messinstrumente	41
Tabelle 4: Gewichtsabnahme bei Lagerung nach Anlieferung	45
Tabelle 5: Übersicht der Materialeigenschaften vor den Versuchen	46
Tabelle 6: Materialeigenschaften vor und nach den Versuchen.....	47
Tabelle 7: Verwendete Messgeräte während des Projektes	49
Tabelle 8: Standardabweichung verschiedener Messgrößen.....	50
Tabelle 9: Zusammengefasste Ergebnisse bei ruhender Schüttung im Versuchsrohr	52
Tabelle 10: Zusammenfassung der Ausflussversuche im Versuchsrohr	56
Tabelle 11: Sinter, Partikelgrößen zwischen 8,0 -10,0 mm	59
Tabelle 12: Koks, Partikelgrößen zwischen 10,0 - 35,0 mm	59
Tabelle 13: Eisenerzpellets, Partikelgrößen zwischen 10,0 -12,5 mm	60
Tabelle 14: Buchenholzkugeln, Partikelgröße 10,0 mm	60
Tabelle 15: Rollreibungskoeffizienten	61
Tabelle 16: Zusammenstellung der auswertbaren Experimente und ihrer Parameter	71
Tabelle 17: Zusammengefasste Ergebnisse ruhender Schüttung im Schachtmodell.....	87
Tabelle 18: Beispiel Druckdaten für verschiedene Positionen.....	88
Tabelle 19: Zusammenfassung der Ausflussversuche im Schachtmodell.....	90
Tabelle 20: Standardabweichung der Partikelgeschwindigkeit in einem festgelegten Bereich ..	92
Tabelle 21: Vergleich der Schüttwinkel gemessen am LEAT und aufgenommen im Schachtmodell.....	94
Tabelle 22: Versuchsdaten für die vorgestellten Permeabilitätsmessungen.....	97
Tabelle 23: Versuchsdaten für den asymmetrischen Ausfluss mit Fokus auf die Permeabilität.	97
Tabelle 24: Abweichung der Schieberöffnung vom Sollwert	101
Tabelle 25: Vermessung der Wandbiegung des Schachtmodells	102
Tabelle 26: Bilanzfehler der Volumenströme bei ruhender und bewegter Schüttung	104
Tabelle 27: Zusammenfassung der bekannten und unbekanntenen Prozessdaten des Hochofens	109
Tabelle 28: Auflistung der Fälle bei denen Höhe und die Permeabilität sich gleichzeitig ändern, wobei die Permeabilität selber errechnet wurde	113
Tabelle 29: Auflistung der Fälle, bei denen Höhe und die Permeabilität sich gleichzeitig ändern, wobei die Permeabilität aus den Betriebsdaten genutzt wurde	114
Tabelle 30: Materialeigenschaften der betrachteten Partikel	117

1. Einleitung

1.1. Anlass für den Forschungsantrag, Ausgangssituation

In der Grundstoffindustrie werden viele Umwandlungsprozesse oder thermische Behandlungen in Schachtofen durchgeführt, in denen ein im Gegenstrom zum Fluid bewegtes Schüttgut Wärme und/oder Stoff mit seiner Umgebung austauscht. In solchen Anlagen können die unterschiedlichsten stückigen Materialien eingesetzt werden. Schwankende Materialeigenschaften können dabei zu schwer behebbaren Störungen im Prozessablauf führen. Industrielle Anlagen reichen von kleinen Schächten zur regenerativen Materialerwärmung, Schachtofen zur Umwandlung von Kalkstein oder Magnesit über Schmelzöfen für Nichteisenmetalle oder Kupolöfen in Gießereien bis zu sehr großen Hochöfen und Direktreduktionsöfen der Stahlindustrie.

Wenn in solchen Schachtsystemen die Durchströmung zu Veränderungen der Schüttgutbeweglichkeit führt, können sich im Extremfall bevorzugte Gasströmungskanäle entwickeln. Auch wenn sich die Partikelgröße aufgrund thermochemischer Prozesse (Abbrand, Schmelzen, Schrumpfen) verändert, oder der lokale Gasvolumenstrom durch Phasenübergänge variiert (beispielsweise CO₂-Freisetzung aufgrund von Calcinierung), wird die Durchströmung des Schüttbetts beeinflusst, was direkt auf die erzielbaren Umwandlungsgrade zurückwirkt. Mangelnde energetische und stoffliche Effizienz oder eine breite Streuung der Produktqualität sind die Folge und müssen dann durch verstärkten Energieeinsatz (z. B. für mehr Zerkleinerung) kompensiert werden.

Einer entsprechenden Prozessoptimierung fehlt derzeit das erforderliche Detailverständnis der wechselwirkenden Prozesse. Im abgeschlossenen Projekt wurde als erster Schritt für ein besseres Verständnis solcher Prozess die Wechselwirkung zwischen Schüttgutbewegung und Gasphasenströmung in nicht-reagierenden Systemen untersucht.

1.2. Forschungsziele

In dem vorliegenden Vorhaben sollen die Wechselwirkungen zwischen Partikel- und Gasphasenbewegung im Inneren von Schachtsystemen ermittelt werden. Hieraus ergibt sich unmittelbar der Untersuchungsfokus, d.h. der (gravitationsgetriebene) Feststoffauslauf aus Schächten bei vorhandener Gas-Gegenströmung. Die

Untersuchungen werden dabei auf Strömungssituationen unterhalb der Fluidisierungsgeschwindigkeit beschränkt, dort wo die durch die Strömung induzierten Kräfte von gleicher Größenordnung sind wie die Gravitationskräfte oder interpartikuläre Stützkräfte. Auf die Beschreibung thermochemischer Reaktionsvorgänge wird hierbei verzichtet. Durch Einsatz kalter, isothermer Experimente an generischen Geometrien (mit realen Schüttgütern) und durch korrespondierende DEM/CFD-Simulationen (mit variierender Approximation der Partikelgeometrie) soll das Projekt zu einer überprüften Beschreibung der (strömungs-) mechanischen Wechselwirkungen in Gegenstromsituationen führen. Die Auswirkung von Größen wie Partikeldichte, Kornform oder Oberflächeneigenschaften auf Fließverhalten, Materialbeweglichkeit und Durchströmbarkeit stehen dabei im Fokus. Aus den experimentellen und numerischen Analysen sollen Kennwerte identifiziert werden, die eine Beurteilung der Beeinflussung der Feststoffströmung durch die Gasphase zulassen.

1.3. Zielerreichung und wesentliche Arbeitsergebnisse

In Summe wurden die wesentlichen Projektziele erreicht. Es wurden drei Versuchsstände entwickelt, die mit unterschiedlichem Fokus (kugelförmige Modellpartikel, reales Schüttgutmaterial (Eisenerzsinter, Eisenerzpellets Koks), zwei vereinfachte, zylindrische Schächte und ein Schacht in Anlehnung an eine Hochofengeometrie) den Einfluss einer Gasphasengegenströmung auf den Feststoffaustrag zulassen. Eine Gas-Gegenströmung kann den Partikelmassenstrom erhöhen (kleine Volumenströme) aber auch erniedrigen (große Volumenströme). Wie stark die Effekte sind hängt nicht nur von Größen wie Sphärizität, Dichte und Partikelgrößenverteilung ab, sondern auch von Details der Partikelgeometrie (z.B. Rollreibung, Abrundung der Kanten). Insbesondere die Permeabilität nach Darcy konnte an einer realen Hochofenanlage als ein zentraler Parameter bei Störungen der Schüttgutbewegung identifiziert werden.

Die numerischen Simulationen konnten im Vergleich zu den Experimenten sehr plausibles Verhalten aufzeigen und sind damit als Werkzeug geeignet. Allerdings hat sich auch herausgestellt, dass besonders dann, wenn realistische Partikeleigenschaften und -formen das System kontrollieren, die einfache Approximation durch kugelförmige Partikel mit angepassten mechanischen Parametern nicht zielführend zu sein scheint; hier ist eine genauere Abbildung der Partikelform durch Polyederapproximation notwendig. So konnten durch die DEM/CFD wichtige Hinweise auf den Einfluss der Partikelform beim Schachtausfluss bei betrieblich relevanten Geometrien gewonnen

werden (AP11). Nicht alle im Antrag vorgesehen DEM/CFD-Rechnungen (AP4, AP7, AP10) konnten aufgrund des Rechenaufwands vollumfänglich durchgeführt werden.

Zur Zielerreichung arbeiteten das VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI, FS1) und der Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik der Ruhr-Universität Bochum (LEAT, FS2) zusammen. In Abbildung 1 ist der nach Arbeitspaketen und Forschungsstellen aufgeschlüsselte Ablaufplan des Antrags wiedergegeben.

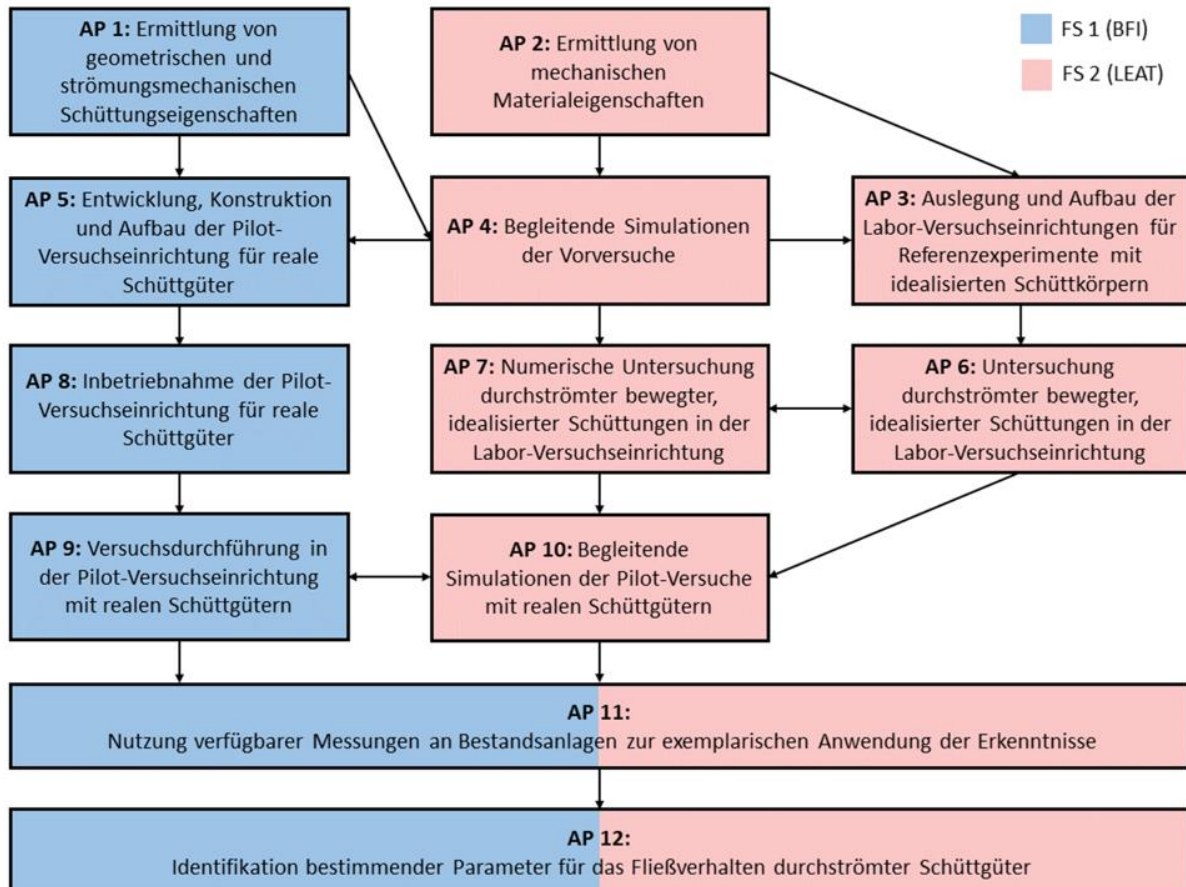


Abbildung 1: Arbeitspakete

Wesentliche Arbeitsergebnisse aus den Arbeitspaketen:

Arbeitspaket 1: Ermittlung von geometrischen und strömungsmechanischen Schüttungseigenschaften

Als Schüttgüter aus der industriellen Praxis wurden Eisenerzpellets, Sinter und Koks untersucht. Hierbei wurden Siebschnitte der Materialien verwendet. Die Partikel wurden hinsichtlich Größe, Form und Materialdichte charakterisiert. Für die Schüttung wurden Schüttdichte respektive Porosität vermessen. In ersten Messungen (Vorversuche) an

einem einfachen Partikel-Ausflussversuchsstand (Versuchsrrohr) mit Gasgegenströmung (Rohrgeometrie) wurden Druckverluste der ruhenden und der ausfließenden Schüttung ermittelt. Ein wesentliches Ergebnis ist hierbei, dass erhöhte Gasmassenströme zu einem geringeren Partikelmassenstrom führen, wobei der Effekt unterschiedlich groß ist, je nach Schüttgutmaterial. Der Effekt konnte auf die Parameter wie Dichte, Formfaktor und Durchmesser zurückgeführt werden. Auch Einflüsse des Partikelmassenstroms auf die Gasströmung (Permeabilität) wurden nachgewiesen.

Arbeitspaket 2: Ermittlung von mechanischen Materialeigenschaften

Es wurden die für numerische Simulation notwendige Parameter (Gleit- und Haftreibungskoeffizienten, Rollreibungskoeffizient, Restitutionskoeffizient) von Eisenerzpellets, Sinter, Koks sowie von Buchenholzkugeln als Modellpartikel ermittelt.

Arbeitspaket 3: Auslegung und Aufbau der Labor-Versuchseinrichtungen für Referenzexperimente mit idealisierten Schüttkörpern

Es wurde ein Laborversuchsstand (Labor-Silo) errichtet, um Referenzmessungen unter sehr definierten Randbedingungen (Messungen des Partikel ausflusses (10 mm Buchenholzkugeln) mit Gas-Gegenströmung) in einer geometrisch einfachen Konfiguration (Zylinder) durchzuführen. Gegenüber den Versuchsanlagen der FS1 erlaubt die Anlage sowohl a) mittig auslaufenden Partikel aus dem Zylinder (z.B. Kalkschachtföfen) als auch b) eine seitlich austretende Feststoffströmung (z. B. Schmelzföfen) zu realisieren. Darüber hinaus c) kann der Füllstand im Silo geregelt werden.

Arbeitspaket 4: Begleitende Simulationen der Vorversuche aus AP1

In begleitenden DEM/CFD-Simulationen zu den Vorversuchen mit dem Versuchsrrohr aus AP1 konnte gezeigt werden, dass DEM/CFD in der Lage ist, Druckverlust mit guter Genauigkeit vorherzusagen, dies sowohl für ein ruhendes als auch bewegtes Partikelbett. Der Partikelmassenstrom wird durch die Simulation noch überschätzt (Eisenerzpellets). Dies zeigt auf, wie wichtig es ist, sowohl die reale Partikelgrößenverteilung als auch die Partikelform abzubilden, was jedoch mit deutlich höheren Rechenzeit einhergehen würde.

Arbeitspaket 5: Entwicklung, Konstruktion und Aufbau der Pilot-Versuchseinrichtung für reale Schüttgüter

Es wurde eine Pilotversuchseinrichtung (Schacht) errichtet, die in ihrer Geometrie an reale Anlagen (Hochofen) angelehnt ist und somit näher an der industriellen Praxis liegt als die Laboranlage des LEAT aus AP3. Dabei ist insbesondere die Änderung des Querschnitts mit der Höhe relevant, die für Fließverhalten und Materialbeweglichkeit wichtig ist. Die Füllmenge beträgt ca. 1 Tonne Schüttgut. Der Schacht besitzt einen mittigen Lufteinlass sowie zwei seitliche, gegenüberliegende Partikelauflüsse.

Arbeitspaket 6: Untersuchung durchströmter bewegter, idealisierter Schüttungen in der Labor-Versuchseinrichtung

In dem an FS 2 aufgebauten runden Labor-Silo wurden zahlreiche Ausflussexperimente mit Buchenholzkugeln als Modellkörpern durchgeführt. Dadurch stehen sowohl für den zentralen, auf der Achse angeordneten als auch den peripheren (Ringspalt) Ausfluss vollständige Datensätze mit und ohne Gegenströmung zur Verfügung, die den gesamten Bereich, vom schnellen dynamischen Ausfluss bis zur Stagnation des Materials, für weiterführende Analysen und Simulationen abdecken.

Arbeitspaket 7: Numerische Untersuchung durchströmter bewegter idealisierter Schüttungen der Labor-Versuchseinrichtung

Für einen Teil (aus Rechenkapazitätsgründen) der im AP6 durchgeführten Experimente wurden CFD/DEM-Simulationen erfolgreich durchgeführt. Hierbei zeigte sich die große Bedeutung der Anfangsbedingung (spontane Öffnung eines Schiebers in der Simulation vs. elektromotorische Öffnung) auf das gesamte Ausflussverhalten. Qualitativ konnten die Ergebnisse wiedergegeben werden, allerdings muss die Beschreibung der Wechselwirkungskräfte noch verbessert werden.

Arbeitspaket 8: Inbetriebnahme der Pilot-Versuchseinrichtung für reale Schüttgüter

Die in AP5 ausgelegte und aufgebaute Versuchseinrichtung wurde in AP8 erfolgreich in Betrieb genommen. Die Anlage wurde wegen der geplanten großen Zahl von Versuchen einer ausführlichen Sicherheitsbetrachtung unterzogen und von einer Sicherheitsfachkraft abgenommen. Es waren besondere Maßnahmen erforderlich, um die Staubfreisetzung in die Umgebung (Abrieb) bei den verwendeten realen Schüttgütern zu unterbinden.

Arbeitspaket 9: Versuchsdurchführung in der Pilot-Versuchseinrichtung mit realen Schüttgütern

Die im AP8 aufgebaute Versuchsanlage wurde verwendet, um umfangreiche Datensätze zum Ausfließen von Eisenerzpellets, Sinter und Koks zu ermitteln. Damit liegen zu den detailliert charakterisierten realen Materialien umfangreiche Daten zum Ausflussverhalten bei unterschiedlichen Gasvolumenströmen in einer industriennahen Geometrie vor.

Arbeitspaket 10: Begleitende Simulationen der Pilot-Versuche mit realen Schüttgütern

Die Ausfluss-Experimente an der Pilotanlage wurden für einen Gasvolumenstrom mit Holzkugeln und Eisenerzsinter simuliert und gegenübergestellt. Die Ergebnisse waren plausibel, wichen im Druckverlust nur um 3 mbar ab, aber zeigten die Stagnation der Bettbewegung über dem Lufteinlass nicht so intensiv auf wie im Experiment.

Arbeitspaket 11: Nutzung verfügbarer Messungen an Bestandsanlagen zur exemplarischen Anwendung der Erkenntnisse

Es wurden Messdaten aus dem Betrieb eines Hochofens analysiert. Als wesentliches Ergebnis konnte eine positive Korrelation zwischen plötzlicher Änderung der Schüttguthöhen (z.B. durch Einbrechen von Brücken) mit der Permeabilität der Schüttung nach Darcy festgestellt werden. Dies deckt sich mit den experimentellen Ergebnissen des Projektes. Durch Simulation einer zwar generischen, aber an Ausflusssituationen realer Anlagen angelehnten Geometrie konnte der starke Einfluss der Partikelgeometrie auf Partikelmassenstrom und Druckverlust aufgezeigt werden. Stark kantige und von der Kugelform abweichende Partikel behindern den Massenstrom erheblich und führen zu größeren Druckverlusten, ein Verhalten, das grundsätzlich bekannt ist, aber hier erstmals für Schachtausfluss mit Gegenströmung numerisch verifiziert wurde.

Arbeitspaket 12: Identifikation bestimmender Parameter für das Fließverhalten durchströmter Schüttgüter

Es wurden anhand der experimentellen und numerischen Betrachtungen die wesentlichen Parameter diskutiert, die das Fließen durchströmter Schüttgüter kontrollieren. Die noch bestehenden Forschungsdefizite, wie eine genauere Beschreibung der Partikelform in DEMCFD werden aufgezeigt.

2. Numerische Methoden und Versuchseinrichtungen

Nachfolgend wird zunächst die verwendete Simulationsmethodik, die Kombination der Diskreten Elemente Methode mit Computational Fluid Dynamics (DEM/CFD) vorgestellt. Im Anschluss wird auf die konstruierten Versuchseinrichtungen sowie auf die Durchführung der Versuche und deren Auswertung eingegangen.

2.1. Numerisches Vorgehen zur Beschreibung durchströmter bewegter Schüttgüter

In fluiddurchströmten Schüttgütern, in denen sich neben dem Fluid auch der Feststoff bewegt, stehen beide Phasen, das homogene Fluid und der heterogene Feststoff, in einer intensiven dynamischen Wechselwirkung. Laufen diese zwei Prozesse auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen ab, so kann man den langsameren Vorgang oft als stationär betrachten und den schnelleren Prozess für eine Reihe aufeinanderfolgender stationärer Zustände zeitaufgelöst berechnen. Betrachtet man beispielsweise die Versperrung der homogenen Berechnungsdomäne durch die heterogene Phase als ein (für jeweils eine kleine Zeitspanne stationäres) „poröses Medium“ so kann man dieses gekoppelte Stokes/Darcy-Problem mit entsprechend modifizierten inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen und zusätzlichen, räumlich aufgelösten Reibungskräften durch das Schüttgut lösen [1]. In den meisten kommerziellen und frei verfügbaren CFD-Codes (u.a. Fluent) ist die Verwendung eines solchen vordefinierten Porositätsfeldes vorgesehen. Allerdings muss dabei das Zeitintervall, über das die Navier-Stokes--Gleichungen integriert und währenddessen die feste Phase als stationär angenommen wird, immer klein genug gewählt sein, um die zeitliche Entwicklung der Porosität aufgrund der Wechselwirkung mit dem Fluid hinreichend aufzulösen.

Besonders für grobstückige Schüttgüter ist es wichtig, die diskrete Natur der mechanischen Wechselwirkungen genügend zu beachten, um Effekte wie Brückenbildung oder Fluidisierung abzubilden. Daher beschreibt die Diskrete Elemente Methode (DEM) die Partikelbewegung jedes einzelnen Partikels, die Kontakte und Kräfte der Partikel untereinander sowie ihre Interaktion mit eventuell bewegten umgebenden Wänden. Hierzu werden die Newtonschen (linearer Anteil) und Eulerschen (rotatorischer Anteil) Bewegungsgleichungen für jedes Partikel zeitaufgelöst berechnet. Die Wechselwirkung mit einer die Schüttung durchströmenden Gasphase verwendet die lokale Porosität der Schüttung zur Bestimmung der Kräfte bzw. zeitintegriert des Impulsübergangs zwischen den zwei Phasen. Aus der sich über der Zeit verändernden

Position und Lage der Partikel werden wiederum die auf das Fluidströmungsfeld wirkenden Porositätsänderungen ermittelt und diese fortlaufend aktualisiert.

Es handelt sich bei der im Weiteren verwendeten DEM/CFD-Methode also um ein hybrides Verfahren, das die homogene (Gas-)Phase durch eine Diskretisierung des Raumes (Zerlegung in Kontrollvolumina) und die heterogene Feststoffphase durch ihre bereits vorhandene Unterteilung in diskret bewegte (translatorisch und rotatorisch) Festkörper einteilt.

Im Rahmen des Projektes verwendete Software:

Für die DEM-Simulation wird ein hauseigener Code des LEAT verwendet, der u.a. schon für die Simulation von Drehrohren, Kalkschachtföfen aber auch zur Simulation der Vorgänge in Hochöfen eingesetzt wurde [2, 3]. Dieses Berechnungsverfahren gestattet in der Simulation auch komplexe Partikelformen, die als Modellkörper unregelmäßig geformte Polyeder zulassen. Zur Beschreibung der Gasphasenströmung wird OpenFOAM, eine weit verbreitete CFD Open-Source Software benutzt. Der Code ist auf CFD- und DEM-Seite vollständig parallelisiert, um die Rechenzeiten trotz des unvermeidbaren großen Berechnungsaufwands zu begrenzen. Die Kopplung der beiden Softwarepakete führt zur DEM/CFD, hierbei tauschen die beiden Programme Daten wie Schüttgutporosität und partikel aufgelösten Impulsübergang (von DEM nach CFD) oder Gasphasengeschwindigkeit und Strömungswiderstand (von CFD an DEM) miteinander aus.

Details und theoretischer Hintergrund von DEM/CFD Simulationen, insbesondere auch bei Verwendung nicht-sphärischer Partikel, sollen hier nicht weiter vertieft werden. Vielmehr wird auf umfassende einschlägige Monographien zu CFD/DEM [4, 5] verwiesen. Da jedoch die mechanische Interaktion der Partikel am Behälterauslass aufgrund möglicher Brückenbildung und damit Durchflussbegrenzung besondere Bedeutung zukommt, was auch die umfangreiche Bestimmung der Materialparameter (Kapitel 3.2) motivierte, wird auf die prinzipielle Vorgehensweise bei der Bestimmung der Kräfte kurz eingegangen.

In der DEM wird, wie schon erwähnt, die Bewegung der Partikel durch die Newtonschen und Eulerschen Bewegungsgleichungen beschrieben. Betrachtet man vereinfacht nur Kontaktkräfte, ergeben sich die in Gleichung (1) und (2) gezeigten Formen der Bewegungsgleichungen. Zu diesen Summen müssen im Fall einer simultanen Umströmung noch die mit der Relativgeschwindigkeit gebildeten Widerstandskräfte hinzuaddiert werden.

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{n_{K,i}} \vec{F}_{ij} + m_i \cdot \vec{g} \quad (1)$$

$$\theta_i \frac{d^2 \vec{\phi}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{n_{K,i}} \vec{M}_{ij} = \sum_{j=1}^{n_{K,i}} \vec{r}_j \times \vec{F}_{ij} \quad (2)$$

Darin sind $d^2 \vec{x}_i / dt^2$ die Beschleunigung, $d^2 \vec{\phi}_i / dt^2$ die Winkelbeschleunigung, m_i die Masse und θ_i das Trägheitsmoment des Partikels i . \vec{F}_{ij} und \vec{M}_{ij} sind die aus den $n_{K,i}$ Kontakten dieses Partikels resultierenden Kräfte und Momente.

Die Kontaktkräfte zwischen den Partikeln werden i und j werden in eine Normal- \vec{F}_{ij}^n und eine Tangentialkomponente \vec{F}_{ij}^t zerlegt und resultieren aus einer im Vergleich zu den Partikelabmessungen geringen, aus der Geometrie resultierenden „virtuellen“ Überlappung.

$$\vec{F}_{ij} = \vec{F}_{ij}^n + \vec{F}_{ij}^t \quad (3)$$

Zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung dieser Kräfte werden vereinfachte Beziehungen auf Basis von Feder-Dämpfermodellen benutzt. Die Normalkraft lässt sich dabei in einen elastischen und einen dissipativen Anteil zerlegen:

$$\vec{F}^n = \vec{F}_{el}^n + \vec{F}_{diss}^n \quad (4)$$

Durch Verwendung einer linearen Feder, die dem Hookeschen Gesetz folgt und in den Kontaktpunkt gesetzt wird, sobald die Partikel in Kontakt treten, lässt sich der elastische Anteil der Normalkraft modellieren. Der elastische Anteil wird nach (5) beschrieben, mit δ der virtuellen Überlappung, k^n der Normalkontaktsteifigkeit und \vec{n} dem Normaleneinheitsvektor.

$$\vec{F}_{el}^n = k^n \cdot \delta \cdot \vec{n} \quad (5)$$

\vec{F}_{diss}^n wird als proportional zur relativen Normalgeschwindigkeit \vec{v}^n (6) der Partikel angenommen.

$$\vec{F}_{diss}^n = \gamma^n \cdot \vec{v}^n \quad (6)$$

Der Proportionalitätsfaktor dabei ist der Dämpfungskoeffizient γ^n .

Für dieses lineare Feder-Dämpfer-Modell (Abbildung 2 resultiert mit den Kräften aus Gleichungen (5) und (6)) für ein Kugel-Kugel Kontakt folgende Normalkraft:

$$\vec{F}^n = \vec{F}_{el}^n + \vec{F}_{diss}^n = k^n \cdot \delta \cdot \vec{n} + \gamma^n \cdot \vec{v}^n \quad (7)$$

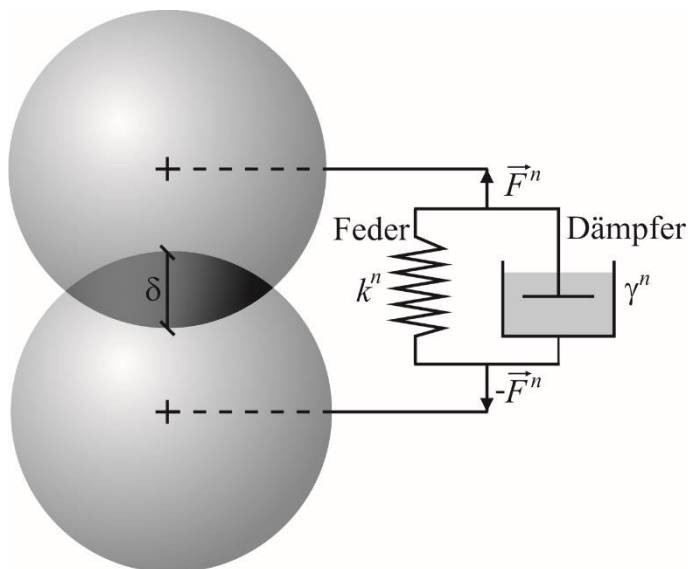


Abbildung 2: Schematische Darstellung des verwendeten linearen Feder-Dämpfer-Modells (am Beispiel von Kugeln)

Der Dämpfungskoeffizient γ^n und die Normalkontaktsteifigkeit k^n werden entsprechend den Gleichungen (8) und (9) so eingestellt, dass die Stoßzahl e^n dieser Materialpaarung resultiert. Die Stoßzahl ist definiert als das Verhältnis der Normalengeschwindigkeiten des Partikels vor (\vec{v}_0) und nach (\vec{v}_1) dem Stoß. Die Ergebnisse für die Stoßzahl der im Rahmen des Projektes verwendeten Materialpaarungen sind in Kapitel 3.2 angegeben. Da die Stoßzeit t^n selbst ist nicht bekannt, experimentell nur mit viel Aufwand zu bestimmen und für die hier dominierenden lang-anhaltenden Kontakte weniger relevant ist, wird die Normalkontaktsteifigkeit k^n vorgegeben und nur die gewünschte Stoßzahl mit dem Dämpfungskoeffizienten eingestellt. Dabei wird darauf geachtet, dass einerseits die Stoßzeit nicht zu klein und andererseits die Überlappungen der Partikel nicht zu groß werden (was auch die lokale Porosität verfälschen würde).

$$e^n = \exp\left(-\frac{\gamma^n}{2 \cdot m_{eff}} \cdot t^n\right) \quad (8)$$

$$t^n = \pi \cdot \left(\frac{k^n}{m_{eff}} - \left(\frac{\gamma^n}{2 \cdot m_{eff}} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (9)$$

$$m_{\text{eff}} = \frac{m_i \cdot m_j}{m_i + m_j} \quad (10)$$

Die tangentialen Reibkräfte werden entsprechend dem Coulomb-Gesetz direkt proportional zur jeweiligen Normalkraft angesetzt:

$$\vec{F}^t = \begin{cases} \mu_s \cdot |\vec{F}^n| \cdot \vec{t} & \text{für } |\vec{v}^t| = 0 \\ \mu_d \cdot |\vec{F}^n| \cdot \vec{t} & \text{für } |\vec{v}^t| > 0 \end{cases} \quad (11)$$

mit der relativen Tangentialgeschwindigkeit \vec{v}^t und dem Einheitstangentialvektor

Hierin sind μ_s und μ_d die Reibungskoeffizienten der Haftreibung (static) bzw. der Gleitreibung (dynamic), die in Kapitel 3.2 des Berichts angegeben werden.

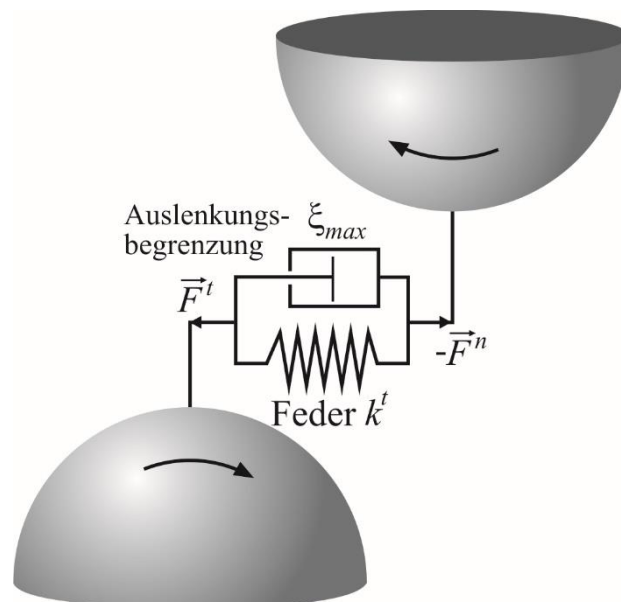


Abbildung 3: Schematische Darstellung des verwendeten Tangentialfeder-Modells

Für die Rollreibung wird folgender Ansatz gewählt mit dem Rollreibungskoeffizient μ_r ,

$$\mu_r = \frac{|\vec{M}_r|}{|\vec{F}_N|} \quad (12)$$

Der Rollreibungskoeffizienten für die Buchenholzkugeln und die Eisenerzpellets wurden wie in Kapitel 2.3.5 angegeben ermittelt. Die Daten für den Rollreibungskoeffizienten sind in Kapitel 3.2 zu finden. Zu bemerken ist hier, dass ein Rollreibungskoeffizient nur zur Beschreibung kompakter und konvexer, als Kugel zu approximierender Partikel geeignet ist. Sobald die Partikel kantig sind und deutlich von der Kugelform abweichen, also nicht

mehr im eigentlichen Sinn „rollen“, dominiert die tatsächliche Partikelform das Bewegungsverhalten.

2.2. Versuchsapparaturen und Versuchsprinzip (FS1)

Die Versuche werden in drei Kategorien eingeteilt. Die Komplexität und der Aufwand steigen mit jeder Kategorie. Zunächst werden in der ersten Kategorie die geometrischen Partikeleigenschaften der Versuchsmaterialien wie Durchmesser, Sphärizität und deren Verteilungen bestimmt. Die zweite Kategorie beinhaltet die sogenannten Vorversuche. Dabei wird die entgegengesetzte Strömung von Luft und Schüttung in einem Zylinder (Versuchsrohr) untersucht. Diese Kategorien gehören zu AP1. Bei der dritten Kategorie wird auch die Gegenströmung von Partikeln und Luft untersucht, wobei die Versuchskonstruktion eine 2-dimensionale Abbildung eines an die industrielle Realität angelehnten Schachtmodells mit rechteckiger Grundfläche ist (vgl. Abbildung 4). Der Aufbau über Inbetriebnahme und Durchführung sind in den Arbeitspaketen 5, 8 und 9 enthalten.



Abbildung 4: Konstruktionen für die Versuchsdurchführung. Links: Versuchsrohr, Rechts: Schachtmodell

In Tabelle 1 sind die Parameter beider Versuchskonstruktionen zusammengefasst. Die letzte Spalte beinhaltet das Verhältnis der verschiedenen Größen.

Tabelle 1: Vergleich der geometrischen Parameter beider Konstruktionen

	Versuchsrrohr	Schachtmodell	Schachtmodell/ Versuchsrrohr
Höhe [m]	1,70	2,55	1,5
Grundfläche [m ²]	0,07	0,34	4,9
Volumen [m ³]	0,12	0,46	3,8
Schüttgutauslass [m ²]	0,02	0,13	6,3
Grundfläche/ Auslassfläche [-]	3,50	2,72	0,8
Volumenstrom Luft [m ³ /h]	400	2000	5,0
Partikel- absinkgeschwindigkeit (Minimal) [m/s]	0,01	0,01	1,0

2.2.1. Messung der Partikeleigenschaften des Versuchsmaterials (AP 1)

Die Verteilungen der Partikelgröße und der Partikelform wurden über kontinuierliche Bildauswertemethoden ermittelt. Diese Größen werden nach einer gewissen Anzahl von Versuchen erneut gemessen, da eine Abnutzung der Partikel in regelmäßigen Abständen auftritt. Die beiden Verteilungen haben wesentlichen Einfluss auf den Lückengrad sowie Druckverlust in der Schüttung, was direkt die Kraftübertragung zwischen Gas- und Schüttgutströmung verändert. Gemessen wird mit dem sogenannten „Camsizer“, der in Abbildung 5 zu sehen ist und der auf dem Prinzip der statischen Bildanalyse beruht. Dieses Gerät der Firma Retsch Technology kann Partikel von 20 µm - 30 mm analysieren und auswerten.



Abbildung 5: Camsizer zur Bestimmung der Partikelgrößen und -formverteilung

2.2.2. Vorversuche im Versuchsrohr (AP 1)

Das Prinzip des Versuchsaufbaus zeigt Abbildung 6. Ein vertikales zylindrisches Rohr wird mit den zu untersuchenden Schüttgütern gefüllt und mit entgegenströmender Luft durchströmt. Das zentrale zylindrische Rohr (300 mm Durchmesser) besitzt einen ebenfalls zylindrischen Abzweig (152 mm Durchmesser), über den die Partikel ausströmen (Schüttgutauslass). Dieser seitliche Ausfluss hat einen Winkel von 45° und ist zur Einstellung des Partikelmassenstroms mit einem Schieber versehen. Am unteren Ende des zentralen Rohrs befindet sich ein Sieb mit 6 mm Bohrung, das den Ausfluss von Partikeln verhindert. Über dieses Sieb strömt die Luft in das zentrale Rohr ein. Durch Ventilatoren wird ein nach oben gerichteter vertikaler Luftvolumenstrom durch die Schüttung erzeugt (Saugzug). Um Falschlufansaugung über den Schüttgutauslass zu vermeiden, ist am Schüttgutauslass eine luftundurchlässiger Big Bag angebracht; dieser dient gleichzeitig zum Auffangen der ausfließenden Partikel.

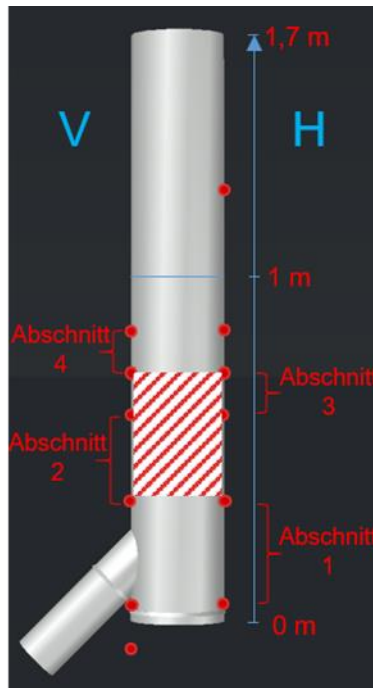


Abbildung 6: Konstruktionen des Versuchsrohr mit markierten Messstellen

Der Befüllvorgang erfolgt von oben gegen geschlossenen Schieber im Schüttgutauslass. Dazu wird das zentrale Rohr von oben geöffnet und auf 1 m Füllstand befüllt. Es wurde in Pottbäcker et al. [6] gezeigt, dass die Befüllung entscheidenden Einfluss auf die Porosität und den Druckverlust der Schüttung hat. Um den zufälligen Fehler gering zu halten, wurde eine Arbeitsanweisung erstellt, in der z.B. die Befüllgeschwindigkeit über alle Versuche gleich gehalten ist. Nach dem gleichmäßigen Befüllen wird mithilfe eines Stabes die Oberfläche über den gesamten Querschnitt geglättet, um eine homogene Durchströmung während der Versuche zu erzeugen.

Als Schüttgutmaterialien werden Eisenerzpellets, Sinter oder Koks eingesetzt. Alle drei Materialien weisen unterschiedliche Eigenschaften von Dichte, Sphärizität und Größenverteilung auf. Die Eisenerzpellets stammen aus einem Siebschnitt von 10-12,5 mm, Sinter aus einem Schnitt von 8-10 mm und Koks von 10-20 mm.

Der Durchmesser des zentralen Rohrs wurde bewusst mit 300 mm gewählt, so dass Strömungsrandeffekte (Wandgängigkeit) der Luft in erster Näherung vernachlässigt werden können [7]. Bei Eisenerzpellets passen, ausgehend vom mittleren Durchmesser, im Versuchsrohr 24 Partikel, bei Sinter 35 und bei Koks 16 nebeneinander. Die Kokspartikel mussten aufgrund der Verfügbarkeit größer gewählt werden. Mit einem mittleren Durchmesser von 18,3 mm statt der nach [7] theoretischen maximalen 15 mm,

sind hier Strömungsrandeffekte zu erwarten. Für den Betrieb wurde Mess- und Steuerungstechnik installiert.

Die roten Markierungen in Abbildung 6 kennzeichnen die Anschlüsse von Differenzdrucksensoren. Hiermit werden die Druckverluste über die Abschnitte 1-4 gemessen. Dabei wird unterschieden zwischen der dem Ausfluss zugewandten Seite „Vorne“ (V) und der abgewandten Seite „Hinten“ (H).

Aufgrund des runden Querschnitts wirken Wandreibungs- und Stützkräfte gleichverteilt und rotationssymmetrisch. Durch das Ausflussrohr entsteht unterhalb einer minimalen Füllhöhe jedoch eine Asymmetrie, die bestimmt wurde. Dass einseitig schnellere Absinken wird durch zwei US-Sensoren gemessen. Jeweils ein Sensor ist auf der dem Ausfluss zugewandten und der abgewandten Seite angeordnet.

Weitere Sensoren sind eine Waage am Ausfluss zur Massenstrombestimmung, Ultraschallsensoren (US-Sensoren) oberhalb der Schüttung zur kontinuierlichen Füllstandsbestimmung und ein Hitzdrahtanemometer zur Luftvolumenstrommessung. Die Umrechnung der gemessenen punktuellen Gasgeschwindigkeit erfolgte über eine Ermittlung der Strömungsprofile bei 3 verschiedenen eingestellten Volumenströmen. Dabei wurde der Ausgang bei Gesamtvolumenströmungen von 200 m³/h, 400 m³/h, 700 m³/h traversiert.

Des Weiteren werden die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit gemessen.

Der Versuchstand verfügt über eine Motorsteuerung der Schieber und der Klappen für den Luftvolumenstrom. Zur Datenerfassung und Vorauswertung der Messergebnisse wurden Programme in DasyLab, Matlab und Excel VBA sowie das Open Source Programm von Arduino programmiert.

2.2.3. Hauptversuche in einem Schachtmodell (AP 5, AP 8, AP 9)

Die Versuche im Schachtmodell (vgl. Abbildung 7) sollen eine vergleichbare Schüttgutbewegung wie in Schachtöfen nachbilden. Die Geometrie des oberen Bereiches des Schachtes ist in Anlehnung an einen Hochofen ein schlanker Kegelstumpf. Der Anstellwinkel wird zur Grundfläche auf 82° gestellt, so dass die maximale Breite bei 1173 mm und die minimale Breite bei 619 mm liegt. Die Tiefe des Schachtmodells beträgt entsprechend des Durchmessers des Versuchsrohrs 300 mm. Die Gesamthöhe liegt bei ca. 2900 mm.

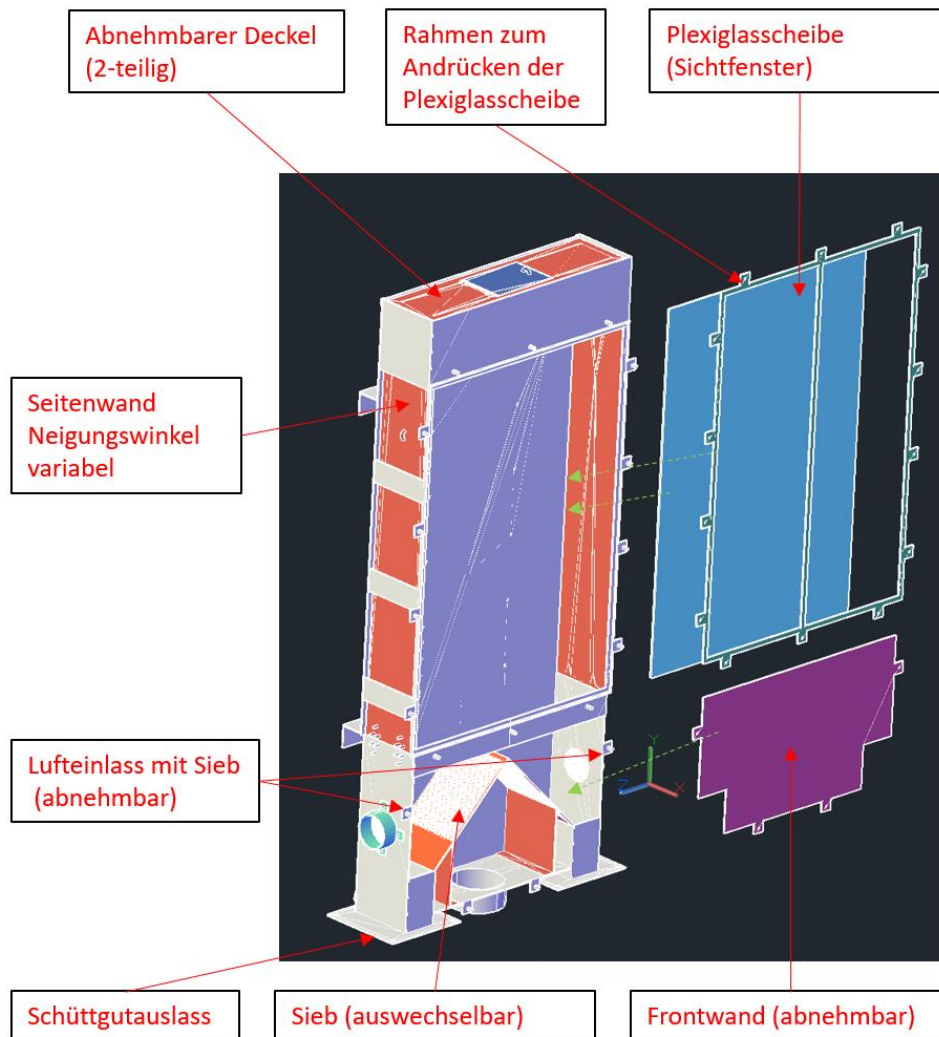


Abbildung 7: Konstruktionen des Schachtmodells mit Beschreibung der einzelnen Bauteile

Der nach unten zunehmende Querschnitt resultiert in einer größer werdenden Bewegungsfreiheit der Partikel, einer veränderten Kraftübertragung der Schüttung auf die Wände und einer höhenabhängigen Veränderung der Fluidströmung. Die Versuchseinrichtung besitzt eine rechteckige Querschnittsfläche. Ein solcher „2-dimensionalen Schnitt“ hat Vor- und Nachteile gegenüber einer Gesamtbetrachtung mit rundem Querschnitt wie sie in den meisten industriellen Schachtofen vorliegt. Vorteilhaft ist die Möglichkeit, im mittleren Bereich der Schüttung an der geraden Wand die Schüttgutbewegung optisch aufnehmen zu können. Nachteilig sind die damit unvermeidbaren Wandeffekte (unterschiedliche Wechselwirkung an der senkrechten und schrägen Wand) und die damit veränderte Kräftebilanz und Schüttgutbewegung. Das Modell besitzt einen oben liegenden Luftauslass. Dazu gehören ein unten mittig liegender Lufteinlass sowie 2 seitliche gegenüberliegende Lufteinlässe. Über dem unteren mittleren

Lufteinlass befindet sich ein Sieb, das die Schüttung zu den beiden seitlichen Schüttgutauslässen leitet. Dort wird diese in die dort befestigten Big Bags geleitet. Die Schüttung kann dann wieder mit Hilfe der Big Bags und einem Kran von oben über eine Klappe in das Modell gefüllt werden. Aufgrund der größeren Grundfläche wurde darauf geachtet, dass über die gesamte Fläche gleichmäßig befüllt wird, um die Bildung von Schütthaufen zu verringern. Dies verhindert eine potentielle Entmischung [8]. Über einen Spiegel gegenüber des Schachtmodells kann durch die Acrylscheibe die Oberfläche der Schüttung beobachtet werden.

In Abbildung 8 sind die verschiedenen Messpositionen in der Konstruktionszeichnung eingezeichnet. Dargestellt ist die Ansicht von hinten.

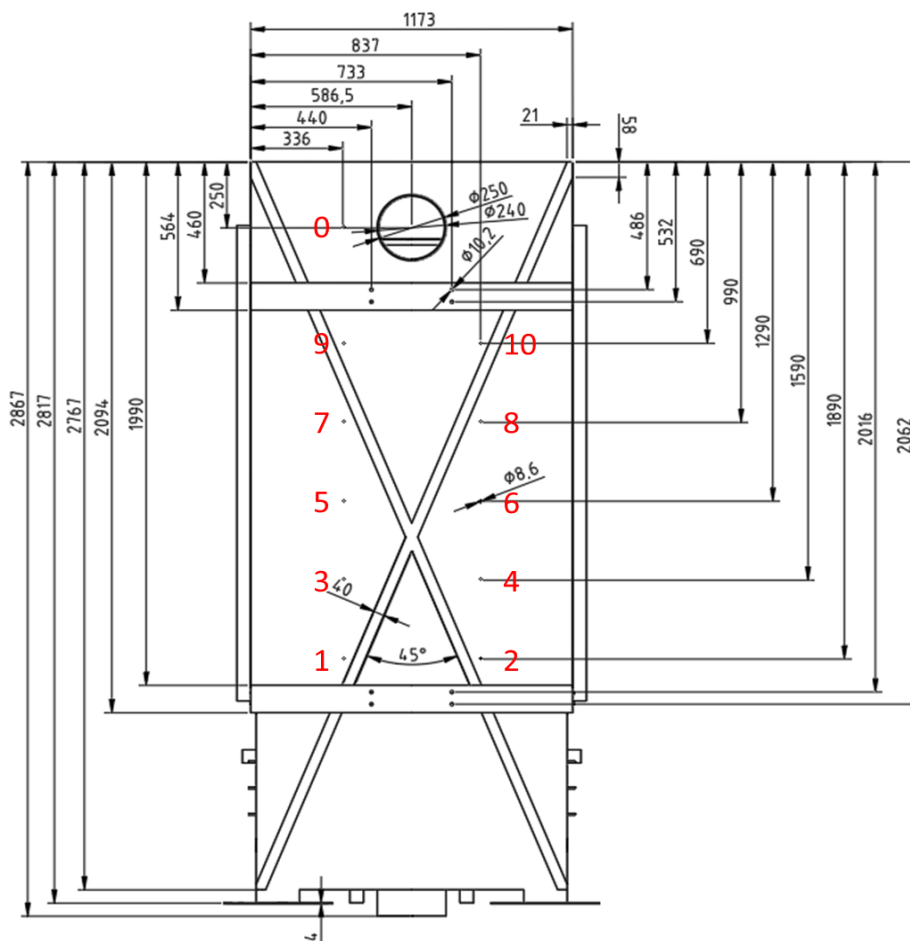


Abbildung 8: Druckmesspositionen in der Konstruktionszeichnung. Ansicht von hinten.

Es werden Differenzdrücke an der Rückwand und über die Seite gemessen. Der Abstand der Messstellen beträgt in vertikaler Richtung 300 mm. Weitere Sensoren sind wieder die Ultraschallsensoren, zwei Waagen an den beiden Partikel-Auslässen sowie Sensoren für Temperatur und Feuchtigkeit der Umgebung. Es werden vier Hitzdrahtanemometer genutzt, die am Luftausgang und den drei Lufteinlässen platziert wurden. Aus den

punktuellen Gasgeschwindigkeitsmessungen erfolgt eine Ermittlung der Strömungsprofile in Abhängigkeit der eingestellten Volumenströme. Dabei wurde der Auslass und die 3 Einlässe bei Gesamtausgangsvolumenströmungen von 400 m³/h, 800 m³/h, 1200 m³/h und 1600 m³/h traversiert.

Was im Vergleich zum Versuchsrohr hinzukommt, sind die Kameraaufnahmen durch die Acrylglasscheibe an der ebenen vorderen Seitenwand. Die Aufnahmen werden mit Matlab ausgewertet. Dabei werden über die geschriebene Software Partikel in jedem Frame wiedererkannt und zurückgelegte Richtung und Distanz erfasst. Daraus wird die Geschwindigkeit ermittelt und Isolinien grafisch dargestellt. Des Weiteren werden beim Schachtmodell die Schieber elektrisch geöffnet. Es handelt sich um eigens entworfene Doppelschieber mit einer 8° Neigung, welche die Brückenbildung verringert. Die Ausflussfläche wurde so ausgelegt, dass für die unterschiedlichen Versuchsmaterialien ein Absinken der Schüttgutoberfläche von ca. 10 mm/s erreicht werden kann. Grundlage waren die Ergebnisse aus dem Versuchsrohr. In Abbildung 9 ist eine Zeichnung des Doppelschiebers zu sehen.

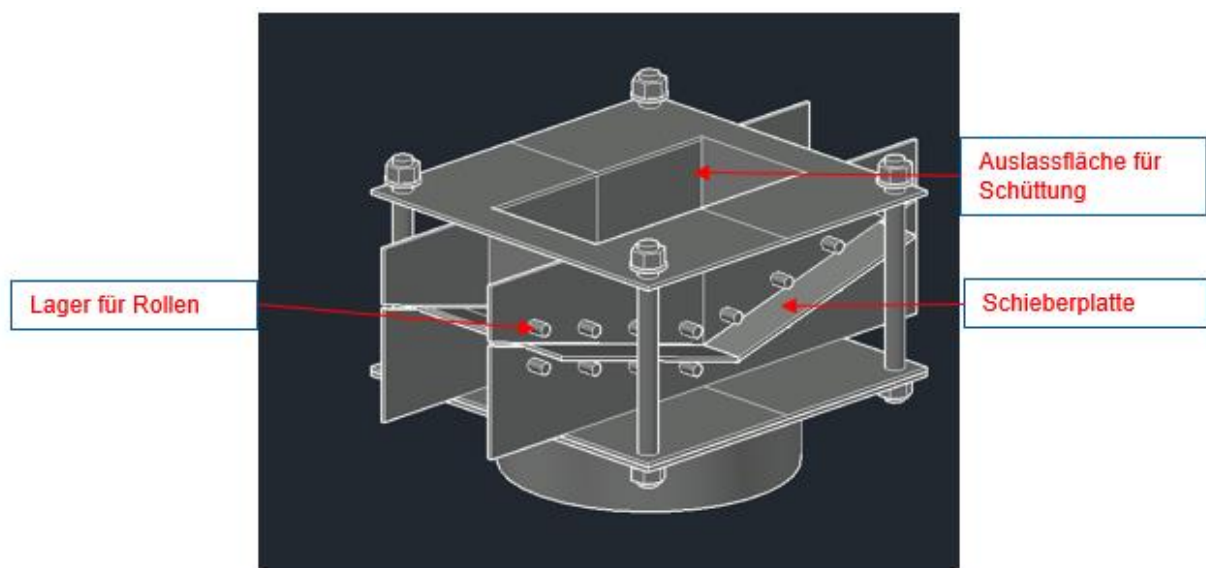


Abbildung 9: Entworfener Doppelschieber

Aufgrund von Staub und Partikeln neigen die Schieber bei den Versuchen dazu, unterschiedliche Reibung zu haben. Daraus folgt, dass bei Verteilung von Partikeln die Schieber in manchen Fällen nicht auf die gewünschte Weite öffnen. Aus diesem Grund werden die Schieberöffnungen nach jedem Versuch gemessen und beurteilt. Eine Durchbiegung der 5 mm Stahlwand wird ebenfalls bei jeder Füllung gemessen, um spätere Vergleiche mit der Simulation zu verbessern. Da durch den Befüllvorgang und

durch die Reibung bei den Versuchen Partikel geschädigt werden, wird das Material, das durch das Sieb fällt, gewogen.

2.3. Versuchsapparaturen und Versuchsprinzip (FS2)

2.3.1. Ermittlung von Reibungskoeffizienten

Für die numerischen Simulationen sind für die dort benutzen Kraftmodell Haft- und Gleitreibungskoeffizienten erforderlich (siehe Kapitel 2.1). Haftreibung zwischen den Kontaktflächen zweier sich berührender Körper liegt vor, wenn beide Körper keine Relativbewegung zueinander erfahren. Sobald diese Haftreibung zwischen den sich berührenden Flächen überwunden wird und zwischen den Kontaktpaaren eine Relativbewegung stattfindet, liegt Gleitreibung vor.

Die Flächenpressung zwischen den beiden in Kontakt stehenden Paaren wird durch die Normalkraft \vec{F}_N beschrieben. Der Grenzwert der Haftkraft \vec{F}_H^{krit} ist erreicht, sobald eine äußere Kraft, die orthogonal zur Kontaktfläche wirkt, die Haftung überwindet. Das Verhältnis dieser beiden Kräfte beschreibt den Haftreibungskoeffizienten μ_H .

$$\mu_H = \frac{|\vec{F}_H^{krit}|}{|\vec{F}_N|} \quad (13)$$

Somit gilt für die Haftkraft

$$|\vec{F}_H^{krit}| = \mu_H |\vec{F}_N| \quad (14)$$

Die Gleitkraft berechnet sich entsprechend zu

$$|\vec{F}_G| = \mu_G |\vec{F}_N| \quad (15)$$

Die Reibungskoeffizienten werden für die einzelnen Materialpaarungen, die im Rahmen des Projektes vorliegen, ermittelt.

Die Messungen von Haft- und Gleitreibung erfolgen über das Kraftmessgerät TA.XTPLUS100C CONNECT TEXTURE ANALYSER der Firma Stable Micro Systems. Die mitgelieferte Software ermöglicht eine direkte Auswertung der Messdaten am PC. Das Messgerät hat dabei eine Auflösung von 0,001 Newton und misst mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von bis zu 2000 Messpunkten pro Sekunde.

Für die Bestimmung der Reibungskoeffizienten wird das Messgerät über eine Umlenkrolle mit der entsprechenden Trägerplatte verbunden. Diese kann zusätzlich mit einem Gewicht beschwert werden, um die Normalkraft $|\vec{F}_N|$ zu variieren. Abbildung 10 zeigt links den schematischen Versuchsaufbau und rechts den realen Versuchstand.

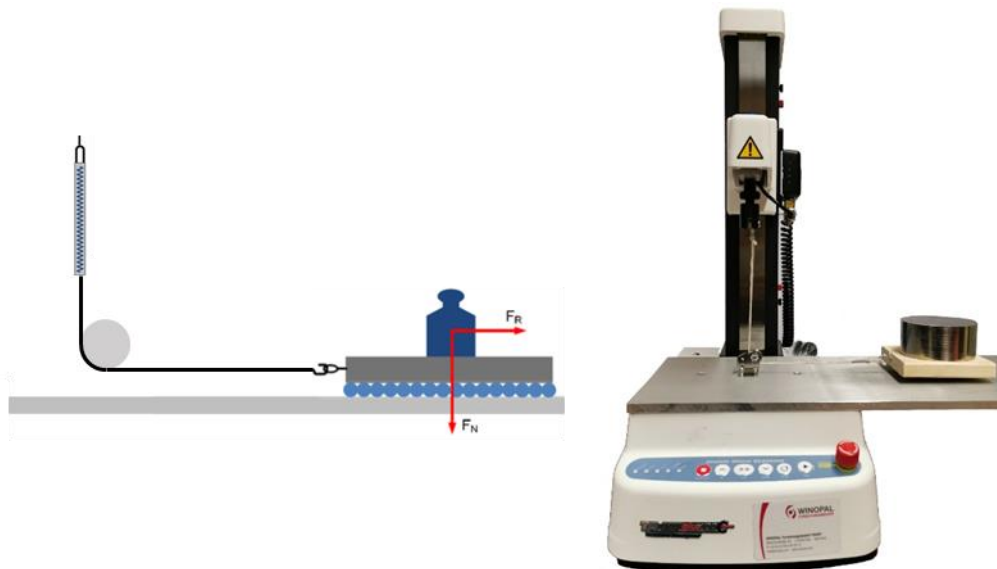


Abbildung 10: Schematischer Versuchsaufbau (links), Kraftmessgerät zur Bestimmung von Reibungskoeffizienten (rechts)

2.3.2. Ermittlung der Stoßzahl

Die Kraftmodelle (Feder-Dämpfer-Modelle) in der DEM-Simulation benötigen Angaben zu Federsteifigkeiten und Dämpfungskoeffizienten. Bei Kenntnis der sog. Stoßzahl lassen sich unter Nutzung weiterer Modellannahmen diese Parameter bestimmen (siehe Kapitel 2.1). Die Stoßzahl ist definiert als das Verhältnis der Normalengeschwindigkeiten des Partikels vor (\vec{v}_0) und nach (\vec{v}_1) dem Stoß. Dies gilt aber nur unter der Voraussetzung, dass sich der Stoßpartner beim Stoßvorgang nicht bewegt.

$$e^n = \frac{\vec{v}_1}{\vec{v}_0} \quad (16)$$

Bei vernachlässigbarer Reibung gilt für die mechanische Energie

$$E_{mech} = E_{pot} + E_{kin} \quad (17)$$

Aufgrund der Energieerhaltung gilt

$$\frac{1}{2} m \vec{v}^2 = mgh \quad (18)$$

Nach \vec{v} umgestellt und eingesetzt ergibt sich daraus

$$e^n = \frac{\vec{v}_1}{\vec{v}_0} = \frac{\sqrt{2gh_1}}{\sqrt{2gh_0}} = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (19)$$

Zur Bestimmung der Stoßzahl eignet sich der in Abbildung 11 skizzierte Fallversuch. Für diesen Versuch wurde ein entsprechender Versuchsaufbau aufgebaut. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, wird ein Partikel, das eine Startgeschwindigkeit von $v=0$ m/s aufweist,

aus der Höhe h_0 fallen gelassen. Das Partikel trifft anschließend auf den zu untersuchenden Stoßpartner; mit Hilfe der Fallhöhe h_0 und der resultierenden maximalen Sprunghöhe h_1 lässt sich anschließend die Stoßzahl rechnerisch nach Gl. (19) bestimmen. Dafür werden die entsprechenden Partikel aus der Höhe von $h_0 = 50$ Zentimetern auf die zu untersuchende Materialpaarung fallen gelassen und die nach dem Stoß erreichte Höhe h_1 mittels Kamera detektiert.

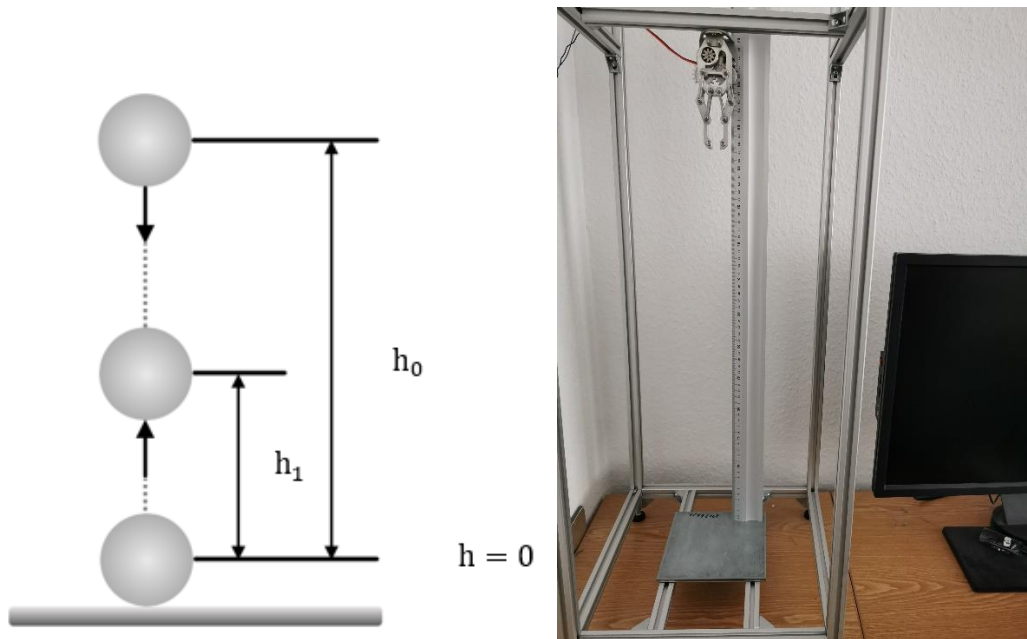


Abbildung 11: Schematischer Fallversuch (links), Fallversuchsmessstand zur Stoßzahlbestimmung (rechts)

2.3.3. Ermittlung des statischen Schüttwinkels

Der statische Schüttwinkel kann unter anderem dazu benutzt werden, die mit den in Kapitel 2.3.1, 2.3.2 und 2.3.5 beschriebenen Messmethoden an Einzelpartikeln bestimmten Kontaktkraftparameter fein zu justieren, da Einzelpartikelversuche nicht vollständig repräsentativ für die Vorgänge im Partikelkollektiv sein müssen. Zur Bestimmung des statischen Schüttwinkels wird der am LEAT existierende Schüttrohrversuchsstand genutzt (vgl. Abbildung 15). Für die experimentellen Untersuchungen stehen transparente Acrylglas-Rohre (PMMA) mit unterschiedlichem Durchmesser zur Verfügung. Es können Durchmesser von 3 cm bis zu 60 cm bei einer Länge von 120 cm genutzt werden. Über mehrere Umlenkrollen wird das Acrylglas-Rohr mit einem an einer Rolle befestigt, die von einem 12V-Gleichstrommotor angetrieben wird. Für die seitliche Stabilisierung werden variable Stangen mit Laufrollen an den Enden bis zum Rohr geführt und mit Stellschrauben befestigt. Das Rohr wird bis zu einer beliebigen Höhe mit den zu

untersuchenden Partikeln befüllt und dann angehoben. Das sich nach vollständigem Entleeren des Rohrs einstellende Schüttgutprofil wird mit Kamera aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgen gegen eine weiße Rückwand, um ein hohes Kontrastverhältnis zu gewährleisten. Die Bildauswertung und Bestimmung des Schüttwinkels erfolgt über Matlab.

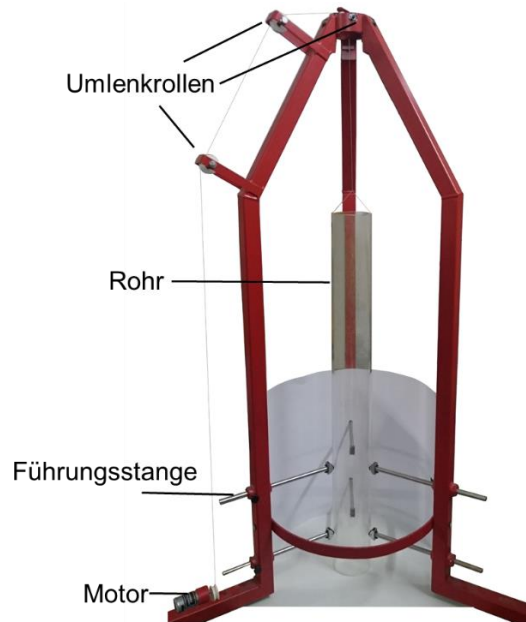


Abbildung 12: Statischer Schüttwinkel Versuchstand

2.3.4. Ermittlung des dynamischen Schüttwinkels

Der dynamische Schüttwinkel ist eine weitere gebräuchliche Größe zur Feinjustierung der DEM-Kraftmodellparametern. Zur Feststellung des dynamischen Schüttwinkels wird ein Batch-Drehrohr benutzt. Die Batchtrommel ist auf einem Tisch montiert, wobei vier der Länge nach variable Stützen deren Aufnahme bilden (vgl. Abbildung 16). Aufgrund der variablen Stützen können Drehrohre von einem Durchmesser von 50 mm bis zu einem Durchmesser von 500 mm montiert und untersucht werden. Ein Frequenzumrichter steuert dabei einen unter dem Tisch montierten Motor mit angeflanschem Zahnrad. Ein endlos gefertigter, einseitig verzahnter Zahnriemen aus Polyurethan sorgt für die Übertragung von Drehmoment und Drehzahl zum Batch-Drehrohr. Eine axiale Verschiebung wird, durch die an der rechten Seite des Drehrohres befindlichen Führungen, verhindert.

In dem Projekt wurde ein Batch-Drehrohr mit einem Innendurchmesser von 390 mm verwendet. Zwei Scheinwerfer sorgen für eine gute Ausleuchtung der vorderen Partikel. Die Schüttung wird mit einer Kamera aufgenommen, die Bildauswertung erfolgte

wiederum mit Matlab. Abbildung 13 zeigt ein Versuch mit Buchenholzkugeln bei einem Füllgrad von ca. 30 %. Der Füllgrad liegt bei allen Versuchen im gleichen Bereich. Die Drehzahl wird dabei zwischen 2 U/min, 4 U/min und 8 U/min variiert. Die Bestimmung des dynamischen Schüttwinkels erfolgt durch eine nachgeschaltete digitale Bildbearbeitung

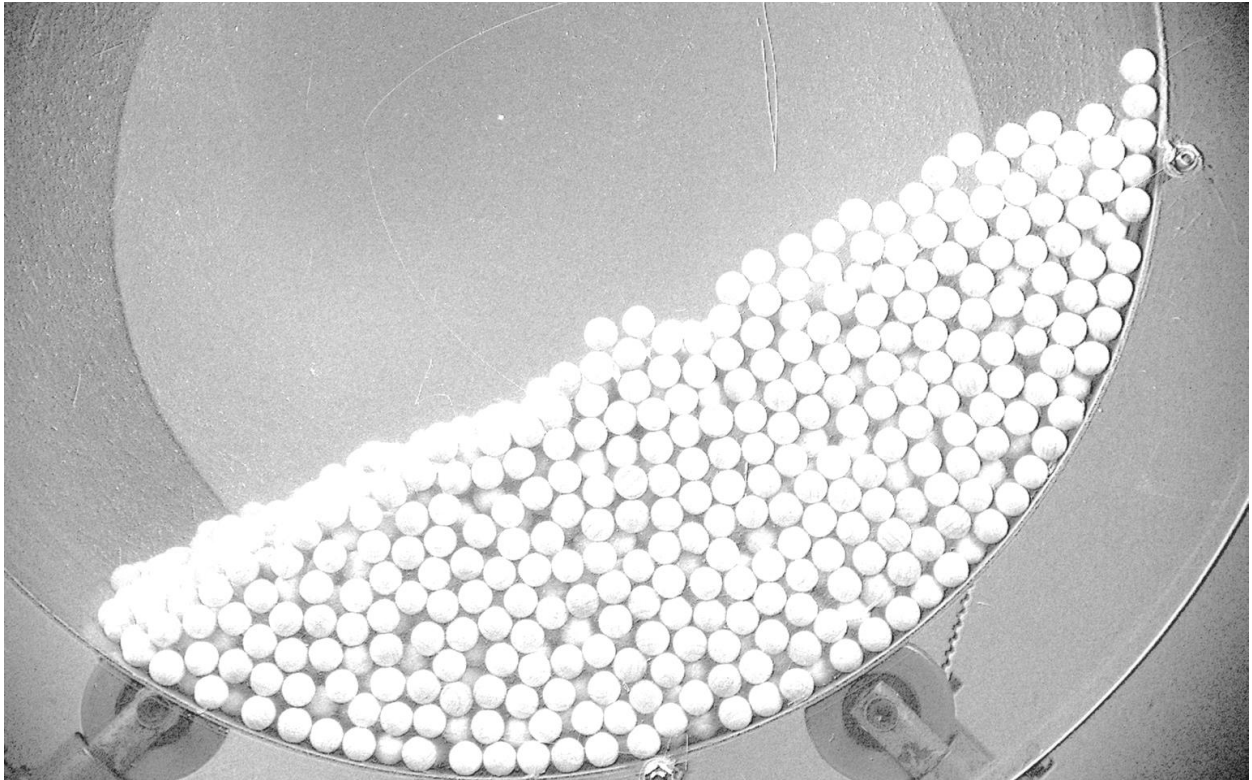


Abbildung 13: Gefülltes Batch-Drehrohr mit 10 mm Buchenholzkugeln

2.3.5. Ermittlung des Rollreibungskoeffizienten

Der Rollreibungskoeffizient μ_{Roll} beschreibt die Energiedissipation aufgrund einer Rollbewegung der Partikel. Für kugelförmige Partikel, bei denen die Normalkraft \vec{F}_N der Gewichtskraft entspricht, gilt

$$\mu_{Roll} = \frac{|\vec{M}_{Roll}|}{|\vec{F}_N|} \quad (20)$$

Zur Bestimmung von μ_{Roll} wurde ein Versuchsaufbau genutzt wie er schematisch in Abbildung 14 zu sehen ist. Hier wird die Rollbewegung einer Kugel auf einer waagerechten Ebene mit einer Kamera erfasst, die Datenauswertung erfolgt über Matlab. Diese Messmethode ist nur zuverlässig unter der Voraussetzung, dass eine schlupffreie Bewegung der Kugel vorliegt. Da es sich um eine waagerechte Ebene handelt, muss nur

die kinetische Energie E_{Kin1} und die durch Rollreibung dissipierte Energie E_{Roll} berücksichtigt werden. Folglich gilt also

$$E_{Kin1} = E_{Kin0} - E_{Roll} \quad (21)$$

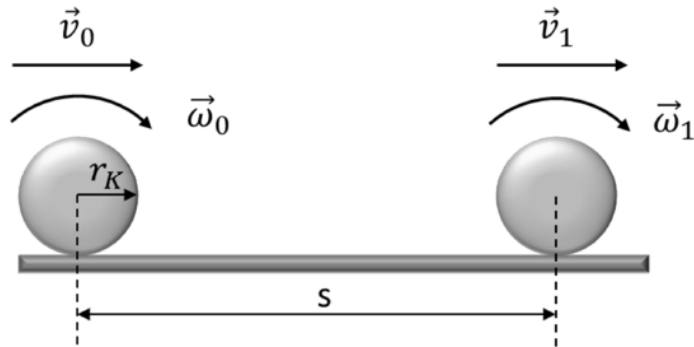


Abbildung 14: Prinzip zur Bestimmung des Rollreibungskoeffizienten

Über die zurückgelegte Strecke s und den Radius der Kugel r_{Kugel} wird \vec{M}_{Roll} berechnet zu

$$|\vec{M}_{Roll}| = E_{Roll} * \frac{r_{Kugel}}{s} \quad (22)$$

Mit \vec{M}_{Roll} lässt sich der Rollreibungskoeffizient μ_{Roll} bestimmen.

2.3.6. Labor-Versuchseinrichtung

Es wurde eine Laborversuchseinrichtung (Laborsilo) zur Untersuchung von durchströmten Schüttungen ausgelegt, konstruiert und in Betrieb genommen. In dieser Laborversuchseinrichtung werden Versuche mit Modellkörpern (10 mm Buchenholzpartikel) durchgeführt, um wohl definierte Randbedingungen zum Vergleich mit DEM/CFD-Simulationen zu schaffen. Das Laborsilo wird mit Modell-Schüttgut gefüllt und in vertikaler Richtung mit einer Gasphase durchströmt werden. Gleichzeitig fließt das Schüttgut schwerkraftgetriebene entgegengesetzt zum Gasvolumenstrom nach unten aus.

Der Ausfluss erfolgt entweder zentral oder seitlich. Ein Schemazeichnung zeigt Abbildung 15.

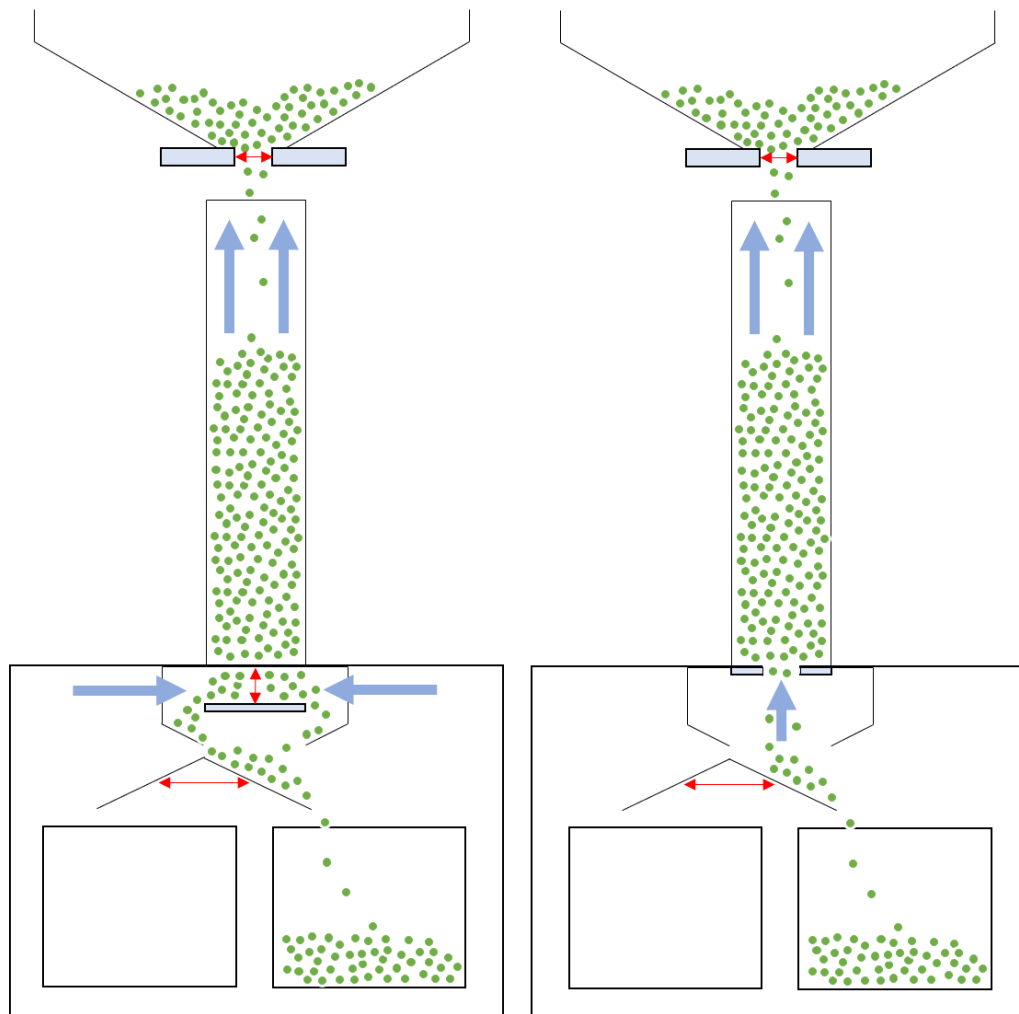


Abbildung 15: Schemazeichnung Labor-Versuchseinrichtung

Ein CAD- Modell mit allen wesentlichen Komponenten und Abmessungen ist in Abbildung 16 dargestellt.

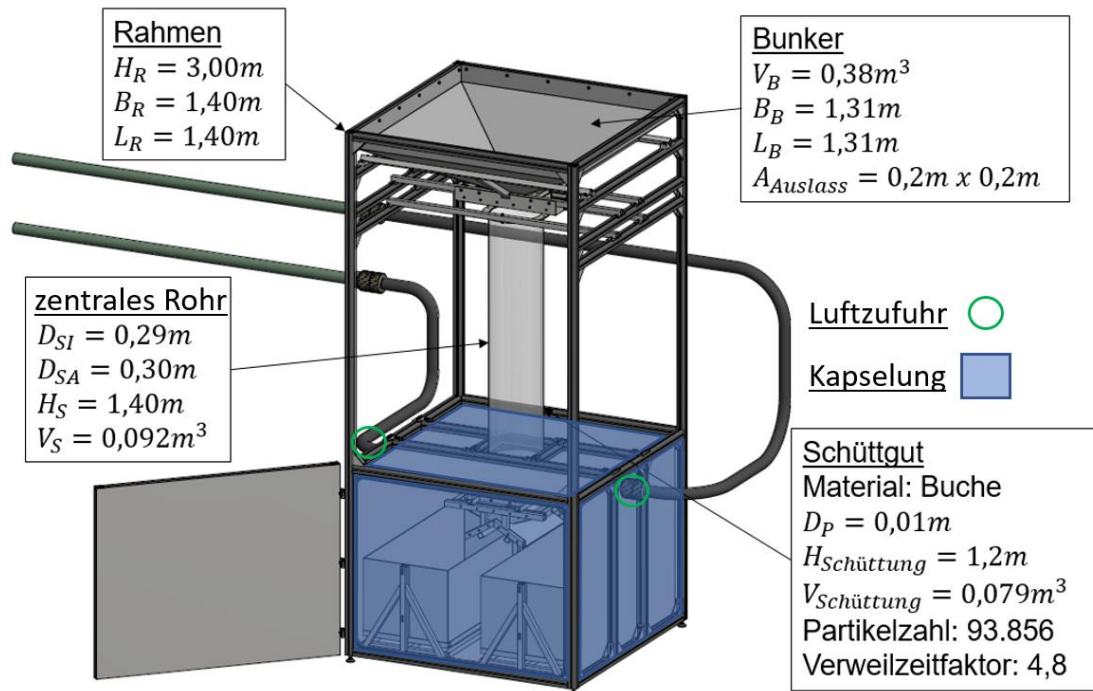


Abbildung 16: CAD-Modell der Labor-Versuchseinrichtung

Das zentrale kreisrunde Rohr, in das das Schüttgut gefüllt wird, hat einen Innendurchmesser von 290 mm und eine Höhe von 1400 mm. Weitere Daten können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Abmessungen LEAT-Labor-Versuchseinrichtung

	Labor-Versuchseinrichtung
Höhe [m]	1,40
Grundfläche [m ²]	0,07
Volumen [m ³]	0,10
Schüttgutauslass [m ²]	0,0 – 0,05
Volumenstrom Luft [m ³ /h]	0-600
Partikelabsinkgeschwindigkeit (Minimal) [m/s]	0,01

Im Falle des seitlichen Auslasses ist der Bunkerboden durch einen Stempel gegeben, dessen Höhenposition durch einen Motor bestimmt werden kann. Zum Befüllen des Versuchsstandes liegt der Stempel zunächst am Boden des zentralen Rohrs an. Zum Start des Versuchs wird der Stempel bis auf ein gewünschtes Maß abgesenkt, sodass

ein kreisrunder Ringspalt entsteht, durch den das Schüttgut austreten kann. Im Falle eines zentralen Auslasses kann ein zusätzlicher Bunkerboden mit einer zentralen Auslassbohrung montiert werden. Ähnlich wie bei dem seitlichen Auslass liegt der Stempel dabei zunächst am Boden des zentralen Rohrs an. Mit dem Absenken beginnt die Versuchsdurchführung. In dieser Variation wird der Stempel jedoch so weit abgesenkt, dass der Fluss des Partikelmassenstroms durch diesen nicht beeinträchtigt wird.

Im Versuchsstand werden die bereits angeführten Buche-Holzkuugeln untersucht werden. Buche besitzt mit ca. $0,7 \text{ g/cm}^3$ eine deutlich kleinere Dichte im Vergleich zu möglichen anderen Materialien wie z. B. Glaskugeln. Der Vorratsbunker oberhalb des Versuchsstands wurde so ausgelegt, dass mindestens die fünffache Menge an Schüttgut vorgehalten werden kann. Bei einem Schacht-/ Rohrdurchmesser von 290 mm und einer Füllhöhe von 1000 mm bis 1200 mm muss der Bunker also ein Volumen von ca. $0,38 \text{ m}^3$ fassen.

Um eine möglichst homogene Anströmung gewährleisten zu können, wurde die Anlage in ANSYS Fluent vereinfacht übertragen und mit einem Berechnungsgitter versehen (vgl. Abbildung 17).

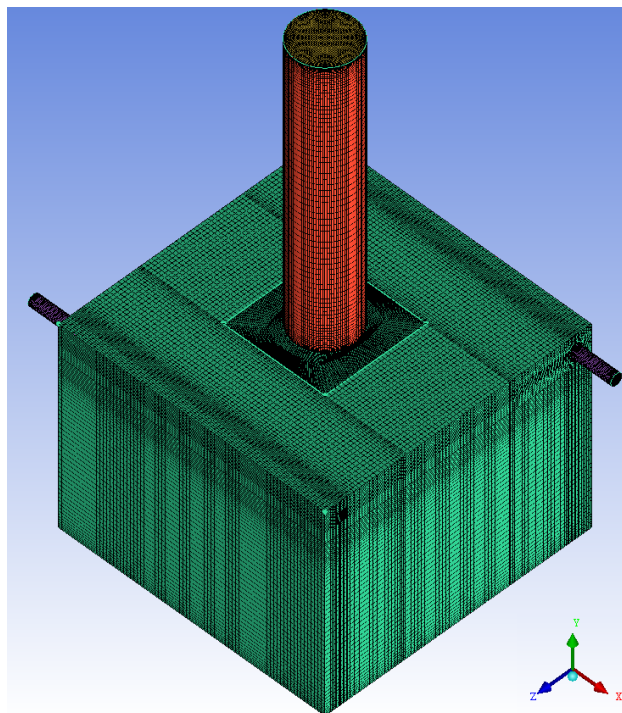


Abbildung 17: Berechnungsgitter LEAT Labor-Versuchsstand

Hierbei strömt die Luft zunächst, durch ein Gebläse gefördert, in eine Gasdichte Kapselung (siehe Abbildung 16) unterhalb des zentralen Rohrs. Die Kapselung ist

bewusst groß gewählt, sodass die Luft in der Kapselung nahezu ruht (Plenum), um so eine gleichmäßige Anströmung der Lufteinlässe in das zentrale Rohr zu gewährleisten. Für die Einlassöffnungen der Fluidströmung wurden verschiedene Positionen untersucht.

Abbildung 18 veranschaulicht die Ergebnisse:

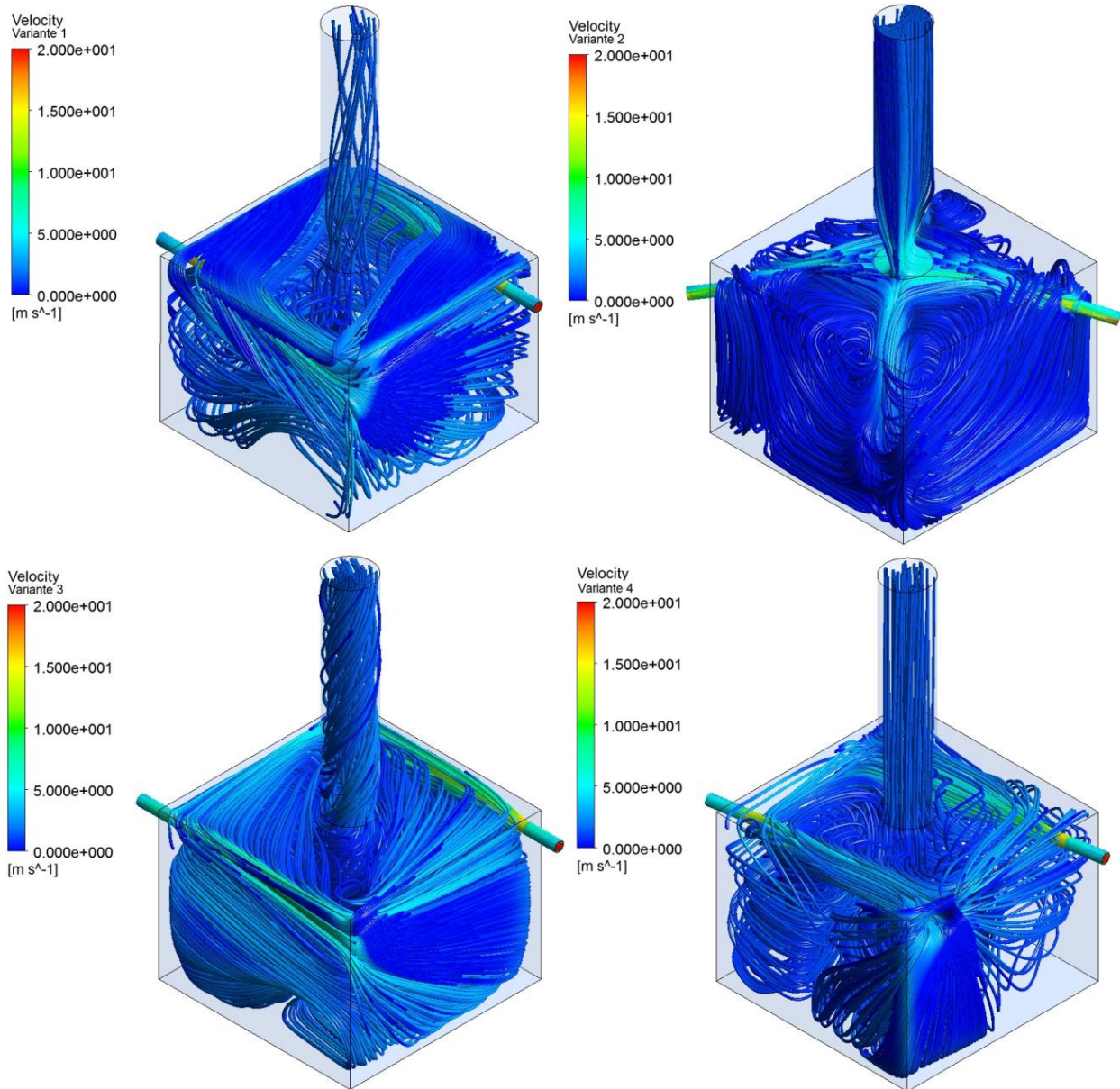


Abbildung 18: Simulationsergebnisse des Fluidströmung im Versuchstand

Bei der Simulation unten links ergibt sich das homogenste Strömungsfeld in der Kapselung. Der sich im Schacht ausbildende spiralförmige Gasstrom wird durch weitere Einbauten (Lochblecheinbau) gleichmäßig.

Abbildung 19 zeigt die Strömungssimulation inklusiver aller für den Gasstrom relevanten Einbauten; ein sehr gleichmäßige drallfreie Anströmung des zentralen Rohres wurde damit erreicht.

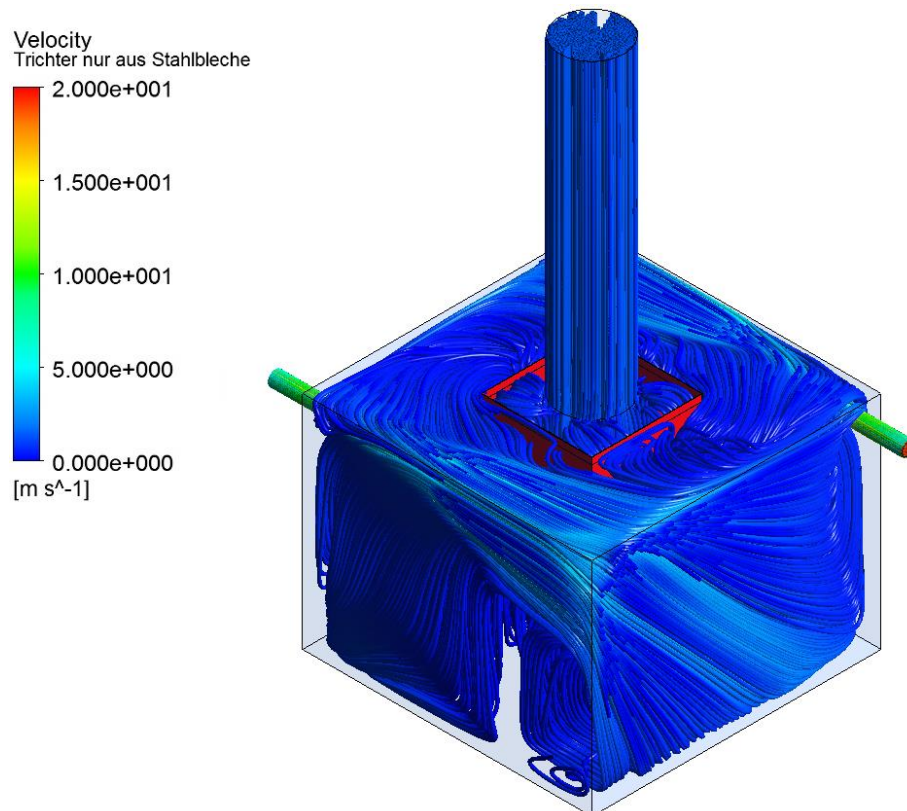


Abbildung 19: Strömungssimulation mit Einbauten

Der Schachtboden soll erst nach einer Vorlaufzeit auf die endgültige Position abgesenkt werden, damit die Eigenschaften des Schüttguts bereits durch den Volumenstrom der Gasphase beeinflusst sind. Um das Schüttgut im Vorlauf durchströmen zu können, wird der Stempel um 9 mm abgesenkt, sodass keine Partikel austreten können. Damit sich nach dem Öffnen ein statischer Zustand der Durchströmung ausbilden kann, besteht die Forderung eines konstanten Füllstands des Schüttguts im Schacht. Um den austretenden Partikelmassenstrom auszugleichen, wird ein Vorratsbunker oberhalb des Schachtmodells montiert und mit dem zu untersuchenden Schüttgut gefüllt. Eine Füllstandsregelung reguliert den Partikelmassenstrom aus dem Bunker in das Versuchssilo so weit, dass die aus dem Schacht ausgetretene Partikelmasse ausgeglichen und somit ein konstanter Füllstand im Schachtmodell realisiert wird.

Die Erfassung des Partikelmassenstroms erfolgt durch zwei Wägekonstruktionen. Durch die Konstruktion eines Ausflusses werden die Partikel zunächst unabhängig von der Montagevariation (seitlicher oder zentraler Partikelaustritt) gesammelt und über eine Sortiervorrichtung abwechselnd in einen der beiden Wägebehälter geleitet. Durch eine gleichmäßige Taktung des Behälterwechsels kann die Massenstromwägung statisch und

zeitdiskret erfolgen. Dabei wird ein Behälter so lange befüllt, bis sich das Schüttgut in dem jeweils anderen Behälter beruhigt hat und anschließend gewogen wurde. Die Wägung erfolgt innerhalb der oben erwähnten Kapselung, da nur so sichergestellt werden kann, dass trotz Wägung der gesamte Gasvolumenstrom durch die Schüttung geleitet wird. Um nach einer Versuchsdurchführung das gesammelte Schüttgut aus den Wägebekältern zu entnehmen, ist die Kapselung mit einer abgedichteten Tür versehen. Das Schüttgut wird über eine Saugvorrichtung in den oberen Vorratsbehälter befördert. Die initiale Schütthöhe wird anschließend an der Versuchsstandsteuerung eingestellt und über eine interne Regelung wird der Füllstand automatisch nachgeregelt.

Abbildung 20 zeigt den realen Versuchsstand im ungefüllten und gefüllten Zustand.



Abbildung 20: Fotografie des leeren (links) und mit Holzkugeln gefüllten Versuchssilos (rechts)

Die Erfassung verschiedener Messgrößen ist die Voraussetzung für die Untersuchung durchströmter Schüttungen. Darüber hinaus dient die Messgrößenerfassung dem späteren Vergleich mit den Ergebnissen aus DEM/CFD-Simulationen. Für aussagekräftige Untersuchungen wurden Messungen der Größen in Tabelle 3 durchgeführt.

Tabelle 3: Messinstrumente

Sensor	Messgröße	Messbereich	Messgenauigkeit
Dwyer 616D-6	Differenzdruck	0,0 – 250,0 mbar	± 0,2%
PT 100	Temperatur	0 – 100 °C	±0,3 % vom Messwert ±0,25 °C
Intel Realsense D435i	Schüttwinkel	0,3 – 2,0 m	± 2 mm
RPI CAM 8MP	Füllstandsregelung	3280 x 2464 Pixel	-
Lorenz K-25	Kraft	0,02 - 50 kN	0,1..0,2
Basler acA1920-50gm	Partikelbewegung	1920 x 1080 Pixel	-
Hilti PS 1000 X-Scan	Porositätsmessung	0,0 – 0,5 m	-

Die Positionen der einzelnen Messpunkte und Sensoren kann in Abbildung 21 nachvollzogen werden. Die Tiefenkamera (Intel Realsense) wird nur bei Auslaufversuchen mit nicht nachgeregelter konstanter Schütthöhe (Füllhöhe nimmt ab mit zunehmenden Partikelaustritt) eingesetzt, da diese zentral am oberen Ende des Rohrs befestigt wird. Die Füllstandskamera (RPI Cam 8MP) wiederum wird nur bei Versuchen mit nachgeregelter konstanter Schütthöhe verwendet. Sie befindet sich seitlich am Versuchstand und kann an den Aluprofilstangen vertikal auf verschiedene Füllhöhen eingestellt werden. Die Differenzdrucksensoren sind gleichmäßig in Abständen von 200 mm über das Rohr verteilt. Die Bestimmung der Volumenströme wird über eine separate Volumenstrommessstrecke bestimmt. Zusätzliche Messungen werden in den entsprechenden Kapiteln beschrieben. Die Messwernerfassung erfolgt über mehrere Python und Arduino Skripte und wird von einem zentralen Python Skript aus automatisiert.

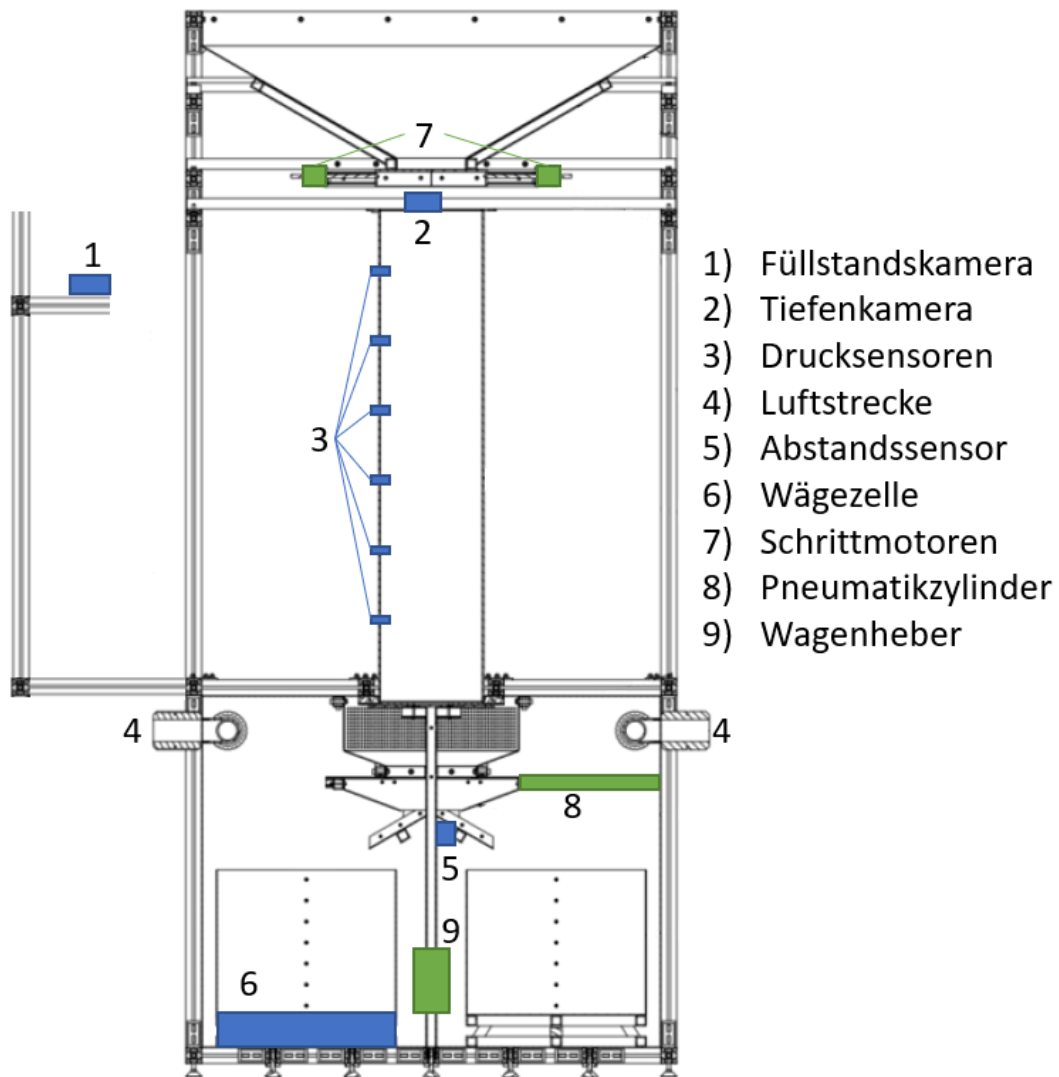


Abbildung 21: Versuchsstand mit Sensor- und Aktorpositionen

Auslegung der wesentlichen Maße:

Es wurde ein Durchmesser Verhältnis $R = 30 = D_{Sch}/D_P$ festgelegt, um keine dominante Randgängigkeit zu haben. Mit dem bereits festgelegten Partikeldurchmesser von 10 mm folgt ein Schachtdurchmesser von 300 mm.

Zusätzlich zum Durchmesser des Rohres ist die Länge und somit die Höhe des Silomodells (zentrales Rohr) festzulegen. Größere Schütthöhen bieten die Möglichkeit den Zusammenhang zwischen Schütthöhe und Druckverlust in einem größeren Parameterbereich untersuchen zu können. Bei der Festlegung der Schütthöhe ist jedoch die Abhängigkeit zu berücksichtigen, die zwischen dem Volumen des zentralen Rohrs, dem Bunkervolumen und dem Volumen zur Wägung der Schüttgutmasse besteht. Darüber hinaus ist die maximal mögliche Konstruktionshöhe des Prüfstands zu beachten, die welche eine beliebige Festlegung der genannten Volumina verhindert.

Es wird von einer Schütthöhe ausgegangen, deren Wert dem vierfachen des zentralen Rohrs entspricht. Daraus ergibt sich ein Wert von 1,2 m für die Schütthöhe. Um ausreichend Höhe für Schwankungen des Füllstands und zur Messung vom Strömungsprofil des Gasvolumenstroms zu gewährleisten, wird eine Rohrlänge von 1,4 m gewählt.

Die erforderliche Höhe des Vorratsbunkers VVB ergibt sich aus dem geforderten Mindestvolumen, das dem fünffachen Schüttvolumen VB entspricht.

$$V_{VB} = 5 * V_B \Leftrightarrow A_{VB} * H_{VB} = 5 * \pi * R_{Sch}^2 * h \quad (23)$$

Dieser Zusammenhang lässt sich nach der Höhe des Vorratsbunkers umformen.

$$H_{VB} = \frac{5 * \pi * R_{Sch}^2 * h}{A_{VB}} = 0,25 \text{ m} \quad (24)$$

Die quadratische Grundfläche des Bunkers besitzt eine Kantenlänge von 1310 mm. Diese ergibt sich aus den Innenmaßen des Prüfstandsrahmens. Der Vorratsbunker wird pyramidenförmig gestaltet. Daher wird ein zusätzlicher Bauraum für die diagonal verlaufenden Trichterwände vorgesehen werden. Die Gesamthöhe des Vorratsbunkers wird daher auf ein maximales Maß von $H_{VB} = 0,5 \text{ m}$ begrenzt.

Eine Abschätzung der Höhe für die Massenwägung folgt aus dem Mindestvolumen, das für die Wägung bereitgestellt wird. Dieses ist die Summe aus Schüttvolumen und Bunkervolumen, um sicherzustellen, dass die gesamte Schüttgutmenge gesammelt und gewogen werden kann.

$$V_W = V_B + V_{VB} \Leftrightarrow A_W * H_W = 6 * V_B \quad (25)$$

Die Grundfläche, die für die Wägung bereitgestellt werden kann, entspricht der Grundfläche des Vorratsbunkers. Damit kann die Höhe der Wägung in Abhängigkeit von den bereits definierten Größen abgeschätzt werden.

$$H_W = \frac{6 * \pi * R_{Sch}^2 * h}{A_W} = 0,3 \text{ m} \quad (26)$$

Es wird berücksichtigt, dass der Partikelmassenstrom in zwei Wägebehältern gemessen wird. Zudem ist zwischen diesen Behältern die Platzierung eines Elektromotors vorgesehen, durch welchen der Schachtboden abgestützt wird. Die angenommene Querschnittsfläche kann daher nicht vollständig ausgenutzt werden. Weiterhin ist ausreichend Bauraum für die Sortierung der aus dem Schacht austretenden Partikelmasse vorgesehen. Aus diesem Gründen wird unterhalb des zentralen Rohrs eine Höhe von $H_W = 1 \text{ m}$ vorgehalten, die zur Sortierung und Wägung des Massenstroms genutzt werden kann.

3. Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Arbeitspakete ausführlich beschrieben und diskutiert. Es werden Eisenerzpellets, Sinter und Koks in spezifischen Siebschnitten untersucht. Zusätzlich werden monodisperse Holzkugeln als Modellpartikel eingesetzt. Die Modellpartikel dienen dazu, die Ausflussversuche an der Labor Versuchseinrichtung des LEAT mit den Versuchen am BFI vergleichen zu können. Alle Materialien haben unterschiedliche mechanische Eigenschaften, die in den Kapiteln 3.1 und 3.1 erläutert werden. In Abbildung 22 sind die eingesetzten Versuchsmaterialien zu sehen.

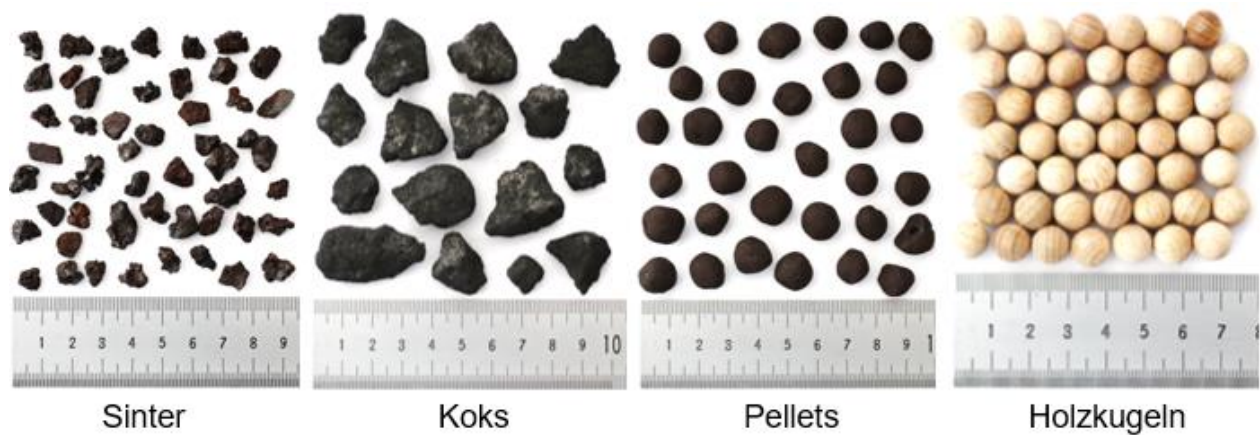


Abbildung 22: Schüttgüter

3.1. Ermittlung von geometrischen und strömungsmechanischen Schüttungseigenschaften (AP 1, FS 1)

3.1.1. Durchführung und Ergebnisse der Partikelanalyse

Für die Analyse der Partikel (im wesentlichen hier Eisenerzpellets, Sinter und Koks) muss zunächst eine repräsentative Probe gezogen werden. Die Lagerung und Anlieferung der Partikel erfolgen in Big Bags. Daraus wurden aus verschiedenen Positionen der Schüttung, also von oben, den jeweiligen Seiten bzw. durch Verschieben der Schüttung auch unterhalb der Oberfläche, Proben entnommen und gemischt. Nach Anlieferung der Versuchsmaterialien werden diese zunächst unter Umgebungsbedingungen eingelagert und die eventuelle Gewichtsabnahme durch Feuchtigkeit beobachtet. Probenmenge ist ca. 1,5-2,3 kg. Innerhalb von ca. einer Woche ist ein stationäres Gewicht erreicht worden, das in Tabelle 4 dokumentiert ist.

Tabelle 4: Gewichtsabnahme bei Lagerung nach Anlieferung

Material	Abgenommene Masse nach 7 Tagen [%]
Eisenerzpellets	2,8
Sinter	<0,001
Koks	2,6

Wie zu erwarten, verändert sich die Sintermasse nicht. Eisenerzpellets und Koks zeigen eine Gewichtsabnahme, die aber nach dem 7. Tag abgeschlossen ist. Gemessen wurde jeweils über ein Zeitintervall von 14 Tagen.

In dem Messgerät „Camsizer“ werden Form und Größenverteilung bestimmt, die Probenmenge ist jeweils 500-1000 g. Daraus werden dann die jeweiligen Verteilungskurven und Sphärizität berechnet. Beispiel einer Partikelmassenverteilung ist in Abbildung 23 zu sehen. Dabei wird Sinter in Rot, Holzkugeln in Blau, Eisenerzpellets in Grün und Koks in Gelb dargestellt. Der xc_min Wert gibt die kleinste Breite eines jeweiligen Partikels an.

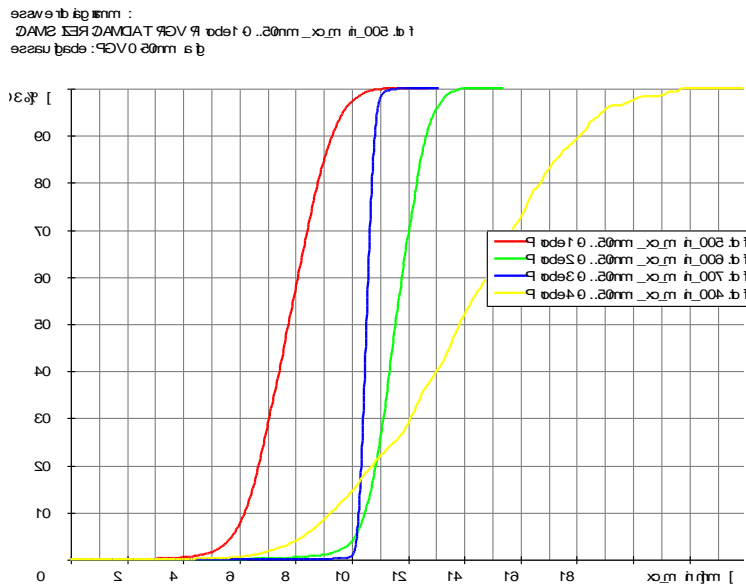


Abbildung 23: Q3-Summenkurve einer Partikelanalyse der verwendeten Materialien

Die industriell gefertigten Holzkugeln haben die engste Verteilung, wogegen vor allem Koks eine größere Spanne aufweist. Für die Durchströmung und die Wechselwirkung der Schüttung mit der Luft sind dies wesentliche Daten. Je breiter die Verteilung, desto kompakter (geringere Porosität) kann die Schüttung im Vergleich zu einer monodispersen Schüttung liegen.

Um die Porosität und die Schüttdichte zu untersuchen, wurden verschiedene Ansätze erprobt. Versuche, die Schüttdichte in einem 3 L Becherglas zu bestimmen, wurden aufgrund der Randeffekte als zu ungenau beurteilt. Festgestellt wurde dies durch den Vergleich über eine andere Methode. Dabei wurde das Versuchsrohr bis auf einen Meter gefüllt und anschließend das Schüttgut bis auf 0,3 m ausfließen lassen. Aus der Materialdichte, der ausgeflossenen Masse und entsprechenden Rohrvolumen können dann Schüttdichte und Porosität errechnet werden. Aufgrund des größeren Durchmessers und Volumens im Vergleich zum Becherglas sind die Werte deutlich genauer, zudem entsprechen sie den Werten, die sich im System bei späteren Versuchen einstellen. In Tabelle 5 sind die Analysen der Materialien zu sehen. Die Daten unterscheiden sich für Versuchsrohr und Schacht, da für die Schachtversuche eine neue Charge geliefert wurde. Der D50 Durchmesser ist der Mediandurchmesser einer Partikelgrößenverteilung. Die Sphärizität wird aus dem Verhältnis theoretischen Umfang eines flächengleichen Kreises der Schattenfläche des Partikels zum tatsächlichen Umfang berechnet.

Tabelle 5: Übersicht der Materialeigenschaften vor den Versuchen

Konstruktion	Material	D50 Durchmesser [mm]	Sphärizität [-]	Schüttdichte [kg/m³]	Porosität [-]
Versuchsrohr	Eisenerzpellets	12,1	0,98	2299	0,39
	Sinter	8,5	0,87	2258	0,41
	Koks	18,9	0,87	632	0,43
Schachtmodell	Holzklugeln	10,5	0,99	399	0,36
	Eisenerzpellets	11,6	0,96	2292	0,39
	Sinter	7,8	0,75	1790	0,41
	Koks	13,8	0,75	651	0,41

Eine Abnutzung der Partikel in den Versuchen wurde sichtbar und im Anschluss an die Versuche ermittelt. Nach 30 Versuchen im Versuchsrohr und nach 15 in dem Schachtmodell treten bemerkbare Veränderungen auf. Dabei runden die Ecken der Partikel ab. Ein Beispiel ist für Sinter in Abbildung 24 zu sehen.

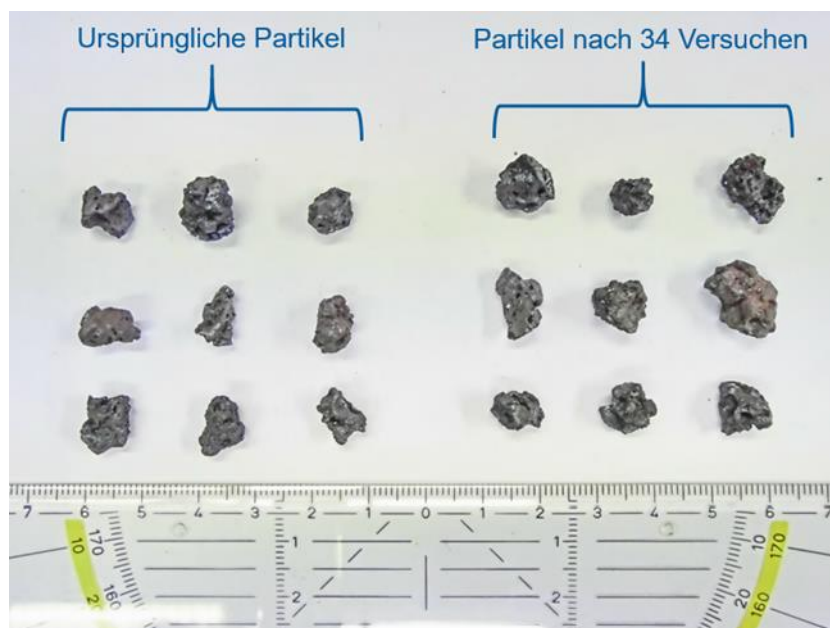


Abbildung 24: Abnutzung der Sinterpartikel nach 34 Versuchen

Durch Wiederholung der Partikelanalyse wurden folgende in Tabelle 6 zusammengefassten Ergebnisse gemessen.

Tabelle 6: Materialeigenschaften vor und nach den Versuchen

Konstruktion	Material	D50 Durchmesser		Sphärizität	
		[mm]	[mm]	[-]	[-]
		Neu	Nach den Versuchen	Neu	Nach den Versuchen
Versuchsrohr (nach 30 Versuchen)	Eisenerzpellets	12,1	12,1	0,98	0,96
	Sinter	8,5	8,0	0,87	0,85
	Koks	18,9	18,3	0,87	0,89
Schachtmodell (nach 15 Versuchen)	Holzkuugeln	10,5	-	0,99	-
	Eisenerzpellets	11,6	12,0	0,96	0,97
	Sinter	7,8	7,3	0,75	0,78
	Koks	13,8	14,4	0,75	0,79

Aus der Tabelle sind unterschiedliche Tendenzen zu erkennen. Bei den Versuchen im Rohr wurden der D50 Durchmesser und die Sphärizität etwas kleiner. In dem Schachtmodell mit größerer Fallhöhe und aufgrund der Versuchsdauer längerer mechanischer Belastung sind die Größenveränderungen nicht eindeutig. Die Abrundung der Sinter-Partikel jedoch ist visuell deutlich zu erkennen.

In Abbildung 25 sind die Partikelmassenverteilungen der Versuchsmaterialien des Schachtmodells aufgetragen. Verglichen wird die Verteilung vor und nach den 15 Versuchen.

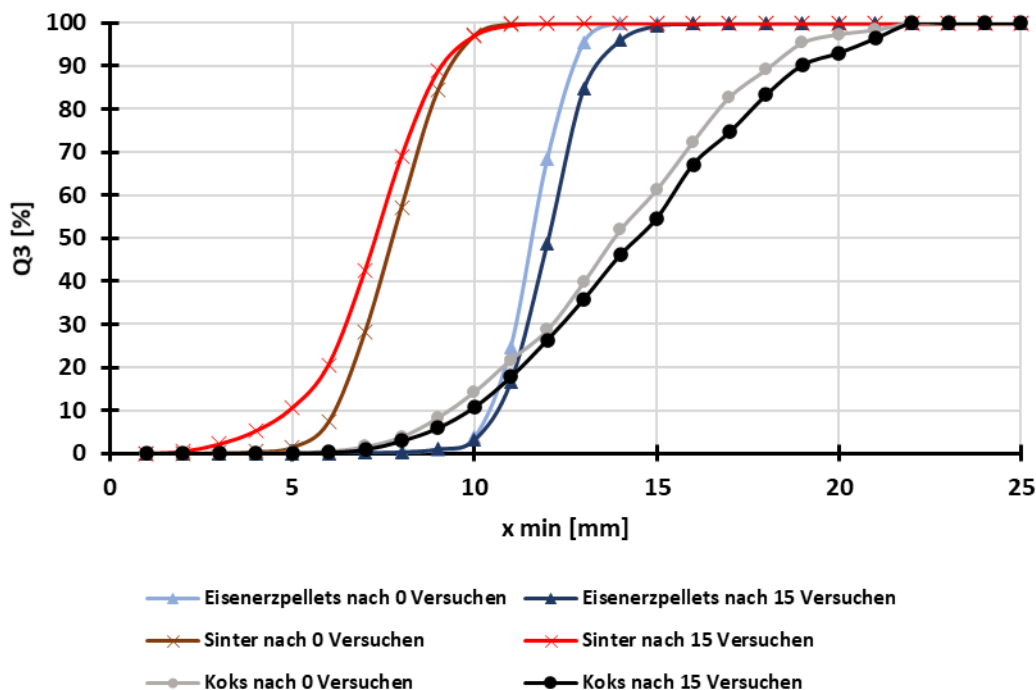


Abbildung 25: Q3-Verteilung der Versuchsmaterialien des Schachtmodells vor und nach den Versuchen

Zu erkennen ist, dass bei Sinter vor allem der Feinanteil steigt. Koks scheint hingegen einen größeren Grobanteil zu haben, was aber auf die Probennahme zurückzuführen ist und nicht auf eine tatsächliche Veränderung der Partikel. Die Eisenerzpellets verändern Ihre Verteilung durch die Versuche nicht. Der durch die mechanische Beanspruchung entstandene höhere Feinanteil im Sinter führt theoretisch zu einem erhöhten Strömungswiderstand. Dieser Feinanteil ist jedoch aufgrund der Versuchsgeometrie automatisch abgesiebt und aus dem Versuch teilweise entfernt worden. Die Mengen wurden nach jedem Versuch abgewogen und sind in Kapitel 3.9.3 näher beschrieben.

3.1.2. Durchführung der Vorversuche im Versuchsrohr

Es werden drei verschiedene Versuchsmethoden durchgeführt. Die erste beinhaltet die stationären Versuche, die mit ruhender Schüttung und einer von unten nach oben erzeugter Luftströmung durchgeführt werden. Die zweite Methode der Versuchsdurchführung beinhaltet die Messung des Geschwindigkeitsfeldes über der ruhenden Schüttung. Dabei wird in ca. 5 mm Abstand zur Oberfläche der Schüttung eine

Sonde (Hitzdrahtanemometer) eingeführt und an verschiedenen Positionen über der Schüttung gemessen. Die dritte Methode sind die sogenannten dynamischen Versuche. Dabei wird über eine Öffnung der Schieber ein Materialfluss erzeugt, der im Gegenstrom zur Luftströmung fließt. Der Partikelfluss und dessen Einfluss auf die Permeabilität wird dabei bestimmt.

3.1.2.1. Betrachtung der Messgenauigkeit

Es werden verschiedene Messgeräte genutzt. Alle sind vom Werk aus kalibriert. Tabelle 7 ist eine Zusammenfassung.

Tabelle 7: Verwendete Messgeräte während des Projektes

Sensor	Messgröße	Messbereich	Messgenauigkeit
CTV 210-R von Kimo	Gasgeschwindigkeit	0-30 m/s	±3 % vom Messwert ±0,03 m/s
DDM/2 von Titec	Differenzdruck	Einstellbar: max. 0-70 mbar	Einstellungsabhängig: 0,1-1 mbar
P47-250- M30-U-2m von PiL	Füllstand	300-2500 mm	<0,3 % vom Messwert ±2 mm
PLW-R320- 15M von rinstrum	Masse	0-1500 kg	Auflösung 500 g
Pt100 von Kimo	Temperatur	0-50 °C	±0,3 % vom Messwert ±0,25 °C
Thermo- Hygro- Barometer PCE-THB38 von PCE	Luftfeuchtigkeit	10-95% r.F:	±3 % vom Messwert ±3 % r.F.
Thermo- Hygro- Barometer PCE-THB38 von PCE	Umgebungsdruck	1000-1100 hPa	±2 hPa

Trotz der Werkskalibrierung wurden die Standardabweichungen für Volumenstrom, Druckverlust und Schüttguthöhe nochmal unter konstanten Versuchsbedingungen (bei zwei unterschiedlichen Volumenströmen) ermittelt (Tabelle 8).

Tabelle 8: Standardabweichung verschiedener Messgrößen

<i>Versuchsbedingungen</i>	<i>Standardabweichung Volumenstrom [m³/h]</i>	<i>Standardabweichung Druckverlust [mbar]</i>	<i>Standardabweichung Höhe [m]</i>
200 $\frac{m^3}{h}$	0,014	0,045	0,003
350 $\frac{m^3}{h}$	0,008	0,033	0,003

Die Messung mittels Hitzdrahtanemometer und Differenzdruckmessumformer zeigen eine geringere relative Standardabweichung mit steigendem Volumenstrom. Die Messung der Schüttguthöhe mit dem Ultraschallsensor scheint zunächst vom Volumenstrom unabhängig. Jedoch ist dieser Sensor störungsanfällig, was während der Versuche deutlich wurde. Es zeigte sich, dass die Reichweite der Ultraschallsensoren stark reduziert wurde, so dass die Höhe des Versuchsrohres um einen halben Meter reduziert werden musste. Für diese Problematik erscheinen mehrere Gründe möglich: Zum einen wird ein runder Kanal genutzt, der bei zwei Ultraschallsensoren den Schall ungünstig reflektiert und die Sensoren stören sich gegenseitig. Eine weitere Möglichkeit ist, dass der Staub die Schallausbreitung behindert und zusätzlich der vorherrschende Unterdruck die Dichte der Luft und somit das Übertragungsmedium verändert. Der letzte Punkt ist, dass die Oberfläche der Schüttung, je nach Beschaffenheit, den Schall streut.

3.1.2.2. Stationäre Versuche im Versuchsrohr zur Charakterisierung der Schüttgutdurchströmung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Durchströmungsversuche bei ruhender Schüttung gezeigt. Die Druckverluste werden mit Differenzdrucksensoren über verschiedene Abschnitte gemessen. Der Gesamtdruckverlust setzt sich zusammen aus dem Druckverlust von 1m Schüttung und einem darunter liegenden Sieb. Die Leerrohrgeschwindigkeit wird mit Hitzdrahtanemometer in der Ausgangsleitung des Gasvolumenstromes außerhalb der Konstruktion gemessen. Daraus wird der

Volumenstrom bestimmt. Um die Vergleichbarkeit der Materialien zu verbessern, wird die Reynoldszahl für Schüttungen genutzt [9].

$$Re_{Schütt} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_F \cdot v_R \cdot x'_{ST}}{(1 - \varepsilon) \cdot \eta_{fl}} \quad (27)$$

Hierbei ist x'_{ST} der Sauterdurchmesser.. Die Porosität ε und Leerrohrgeschwindigkeit v_R wird in radialer und axialer Richtung als gleichverteilt angenommen. Die Dichte ρ_F und dynamische Viskosität η_{fl} der Luft sind abhängig von der Lufttemperatur und dem Luftdruck, die wie schon beschrieben erfasst werden. Bei den Versuchen wurden die Schüttungen auf zwei Weisen verglichen. Zum einen wurde der Druckverlust derselben Schüttung, d.h. ohne das Rohr neu zu befüllen, mehrmals bestimmt und zum anderen wurde untersucht, wie das Neubefüllen mit den gleichen Materialien und die damit verbundene neue Anordnung der Partikel sich auswirkt.

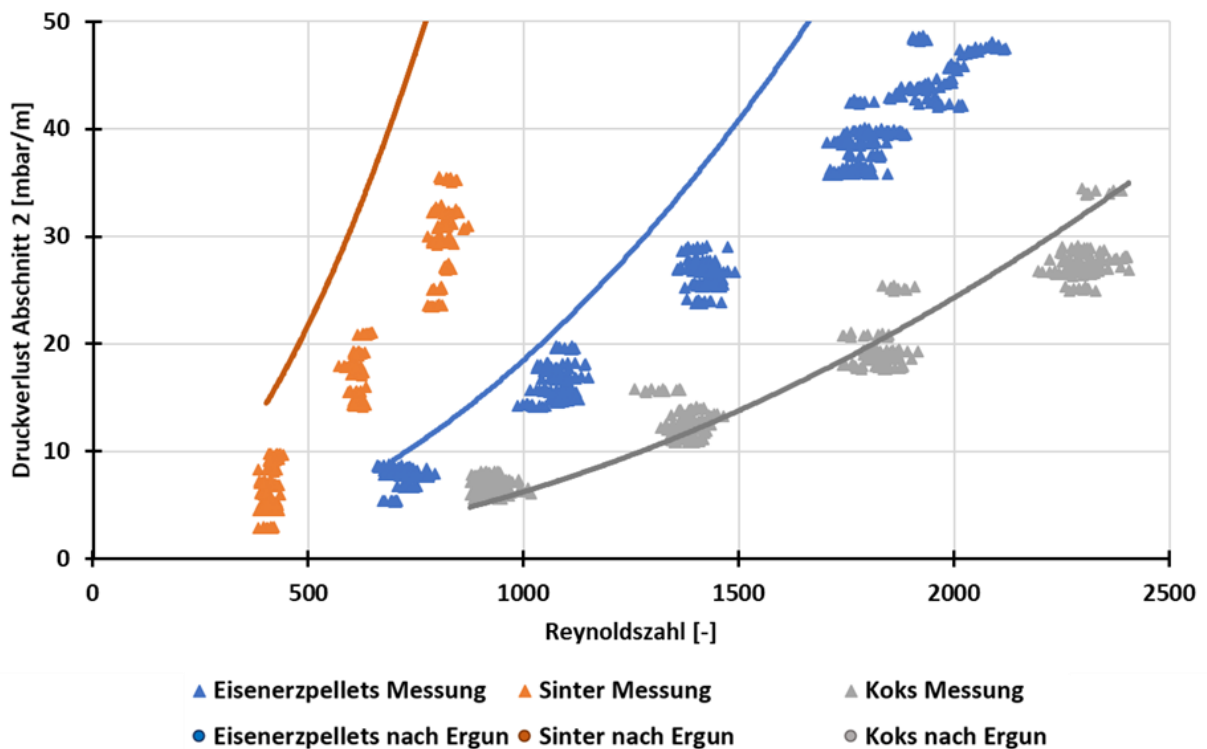


Abbildung 26: Druckverluste der Versuchsmaterialien bei ruhender Schüttung im Versuchsrohr

In Abbildung 26 sind zunächst die Druckverluste als Funktion der Reynoldszahl aufgetragen. Die Dreiecke markieren die gemessenen Werte, während die Linien die theoretischen Druckverluste nach der Gleichung von Ergun [10] wiedergeben.

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \cdot \mu_F \cdot u_0 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{d_{32}^2 \cdot \varepsilon^3} + 1,75 \cdot \rho_F \cdot u_0^2 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{d_{32} \cdot \varepsilon^3} \quad (28)$$

Wie zu erwarten, zeigt Sinter mit der komplexen, stark asphärischen Form größere Abweichungen von der Ergun-Gleichung. Die Übereinstimmung für die großen Kokspartikel ist hingegen sehr gut. Bei den Eisenerzpellets fällt auf, dass die relativ sphärischen Partikel Abweichungen von der Ergun-Gleichung aufweisen.

Sinter hat gefolgt von den Pellets und Koks den höchsten Druckverlust. Mehrere Messergebnisse besitzen einen nahezu identischen Druckverlust bei ähnlicher Reynoldszahl. Erkennbar ist dies besonders bei Koks. Bei diesen Versuchen wurde die Schüttung unverändert mehrfach vermessen. Lässt man die Schüttung ausfließen und füllt sie gleich noch einmal ins Rohr kommt man zu einem anderen Druckverlust. Die Unterschiede durch die Neubefüllungen sind materialabhängig unterschiedlich groß. In Tabelle 9 wurden die Messergebnisse mit Volumenströmen und Druckverlusten zusammengefasst sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen gebildet. Die Durchführung mit Holzkugeln der beiden Forschungsstellen an den jeweiligen Versuchsständen erleichtert die Übertragung der Ergebnisse. Aufgrund des zusätzlichen Aufwandes wurde die Versuchsdurchführung mit den Holzkugeln bei FS1 auf das Schachtmodell beschränkt.

Tabelle 9: Zusammengefasste Ergebnisse bei ruhender Schüttung im Versuchsrohr

	Volumenstrom		Druckverlust	
	Mittelwert [m ³ /h]	Standardabweichung [m ³ /h]	Mittelwert [mbar]	Standardabweichung [mbar]
<i>Eisenerzpellets</i> (500 Versuche)	192	0,02	7,7	0,12
	286	0,02	16,5	0,10
	377	0,01	26,4	0,05
<i>Sinter</i> (300 Versuche)	191	0,02	6,5	0,32
	284	0,01	17,0	0,12
	377	0,01	29,6	0,11
<i>Koks</i> (400 Versuche)	191	0,02	6,9	0,10
	284	0,02	12,7	0,10
	376	0,01	19,6	0,04

Wird die Standardabweichung von gleichen (Wiederholungsversuche mit derselben Schüttung) und verschiedenen Schüttungen (Neubefüllung) verglichen, ergibt dies eine ca. um den Faktor 50 erhöhte Standardabweichung nach Neubefüllung. In Abbildung 27 ist dieser Vergleich zu sehen. Die linke vertikal Achse zeigt die Werte für die

Standardabweichung bei unveränderter Schüttung an. Die rechte Achse zeigt die Standardabweichung von verschiedenen Schüttungen nach neuer Befüllung an.

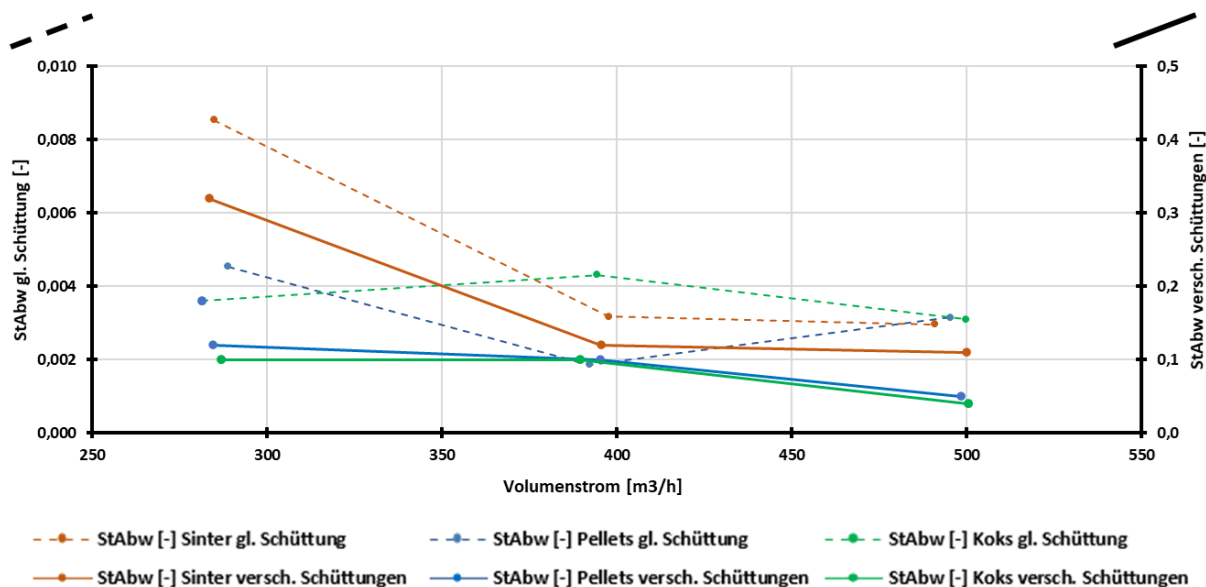


Abbildung 27: Vergleich der normierten Standardabweichung des gesamten Druckverlustes gleicher und verschiedener Schüttungen

Pellets besitzen über den ganzen Bereich die kleinsten Standardabweichungen bei Wiederbefüllen, was auch aufgrund der relativ engen Partikelgrößenverteilung und der hohen Sphärizität der Partikel zu erwarten ist. Insbesondere für Neubefüllen (verschiedene Schüttung) besitzen Sinter und Koks höhere Standardabweichungen aufgrund ihres geringeren Formfaktors und einer breiteren Streuung der Partikelgrößenverteilung. Sinter scheint als einziges Material bei niedrigen Volumenströmen eine höhere Standardabweichung bei den Druckverlusten zu besitzen, dies sowohl für gleiche als auch verschiedene Schüttungen.

Im nachfolgender Abbildung 28 ist die Geschwindigkeit über der radialen Messposition (für drei verschiedene Volumenströme) aufgetragen. Die Geschwindigkeitsprofile wurden von außen mit einer Sonde parallel zur Schüttung vermessen. Dies wurde durch zwei gegenüberliegende Seiten durchgeführt. Die Mitte, bei Radius 0, wurde von beiden Seiten gemessen, so dass zwei Messwerte an dieser Position vorliegen. Sowohl für Koks, Sinter als auch Eisenerzpellets liegen an der Wand Geschwindigkeitsmaxima wegen des dort höheren Lückengrades vor. Die Messergebnisse zeigen die Randeffekte auf, dort werden 2-3 mal höhere Geschwindigkeiten gemessen.

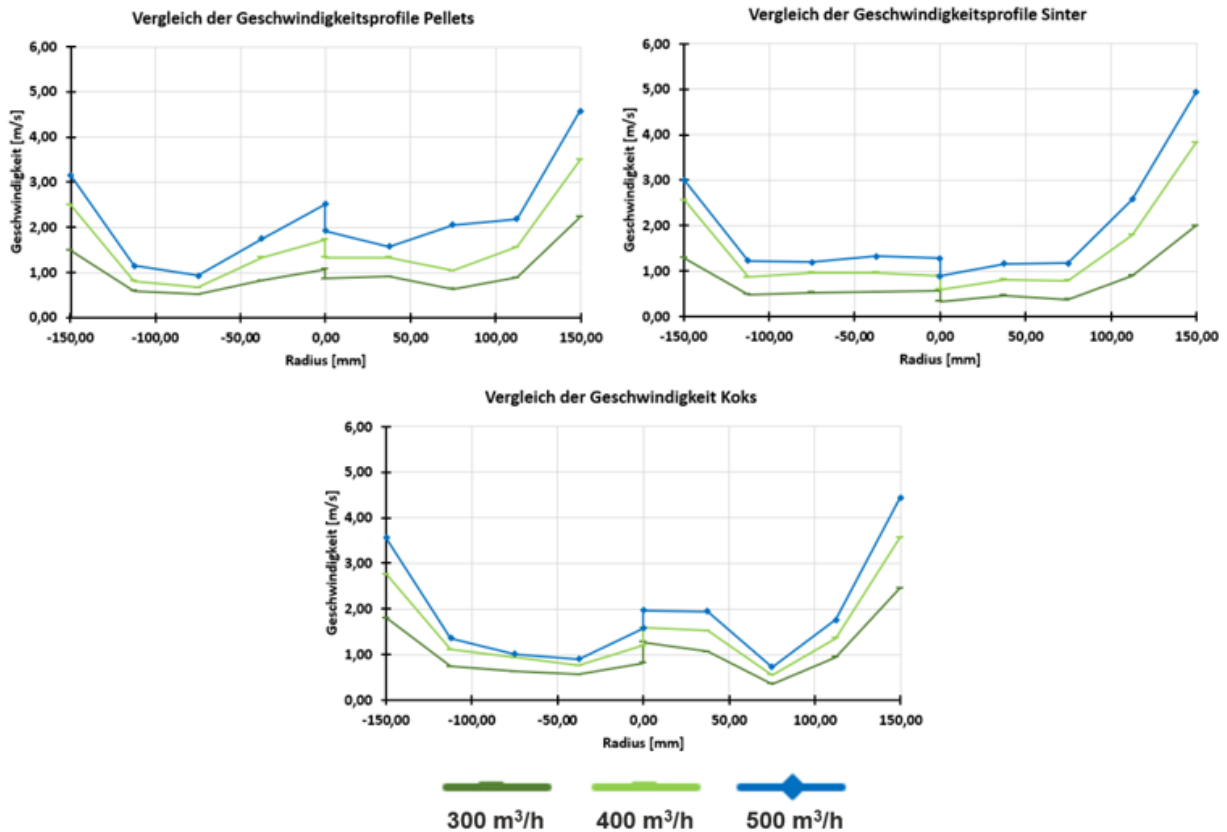


Abbildung 28: Geschwindigkeitsprofile über der Schüttung im Versuchsrohr

3.1.2.3. Ausflussversuche im Versuchsrohr zur Charakterisierung der Wechselwirkung zwischen Gas- und Feststoffphase

Vor jedem Ausflussversuch wird die Schüttung zunächst, wie in Kapitel „Stationäre Versuche im Versuchsrohr“ mit ruhender Schüttung vermessen. Dies soll der spezifischen Schüttgutcharakterisierung dienen und einen späteren Vergleich der Ausflussversuche erleichtern. Im Folgenden wird zunächst die Absinkgeschwindigkeit der verschiedenen Versuchsmaterialien bei Variation des Luftvolumenstromes beschrieben. In Abbildung 29 ist die gemittelte Absinkgeschwindigkeit des Versuchsmaterials aus jeweils 5 Versuchen über der mittleren Luftgeschwindigkeit innerhalb der Schüttung aufgetragen.

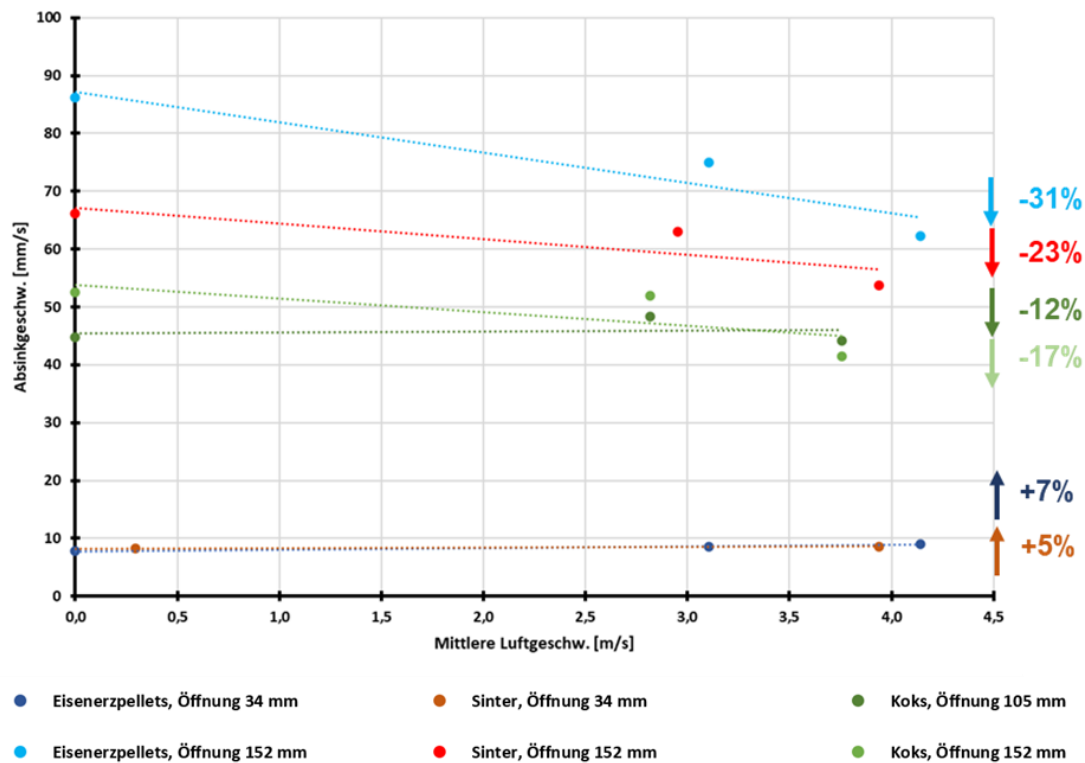


Abbildung 29: Absinkgeschwindigkeiten der Versuchsmaterialien unter Einfluss entgegenströmender Luft im Versuchsrohr

Eisenerzpellets sind in diesem Diagramm Blau, Sinter rot/braun und Koks grün markiert. Der Ausfluss wurde über die Öffnungsweite der runden Schieberöffnung gesteuert. Die erste Öffnung ist die minimale nutzbare Öffnungsweite. Wird die Öffnung kleiner gewählt, bildet das jeweilige Material Brücken und der Ausfluss wird blockiert. Bei Eisenerzpellets und Sinter ist diese minimale Öffnung 34 mm. Bei Koks ist diese 105 mm.

Die zweite Weite der Öffnung ist die maximale Öffnung und diese ist konstruktionsbedingt bei allen Materialien 152 mm. Bei den minimalen Öffnungen von Eisenerzpellets und Sinter scheint die Absinkgeschwindigkeit mit erhöhter Luftgeschwindigkeit leicht um 5% bzw. 7% zu steigen. In allen übrigen Fällen sinkt die Absinkgeschwindigkeit um jeweils 12% bis 31%. In Tabelle 10 sind die Daten zusammengefasst.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ausflussversuche im Versuchsrohr

<i>Material</i>	<i>Spalt- breite [mm]</i>	<i>Gasvolumen- strom [m³/h]</i>	<i>Luftge- schwindigkeit in Schüttung [m/s]</i>	<i>Absinkge- schwindigkeit [mm/s]</i>	<i>Partikel- strom [kg/s]</i>
<i>Eisenerzpellets</i> $\bar{T} = 19,4^{\circ}\text{C}$ $\bar{p}_U = 1,021 \text{ bar}$ $\bar{\varphi}_{rel.} = 34,2 \%$	34	0	0,0	7,8	1,2
	34	319	3,3	8,6	1,4
	34	438	4,5	9,1	1,4
	152	0	0,0	86,2	13,6
	152	308	3,2	75,0	11,8
	152	425	4,4	62,3	9,8
<i>Sinter</i> $\bar{T} = 19,3^{\circ}\text{C}$ $\bar{p}_U = 1,010 \text{ bar}$ $\bar{\varphi}_{rel.} = 35,8 \%$	34	0	0,0		
	34	301	3,0	8,2	1,0
	34	402	4,0	8,6	1,1
	152	0	0,0	66,2	8,2
	152	294	2,9	63,0	7,8
	152	397	3,9	53,7	6,6
<i>Koks</i> $\bar{T} = 20,9^{\circ}\text{C}$ $\bar{p}_U = 1,009 \text{ bar}$ $\bar{\varphi}_{rel.} = 34,5 \%$	105	0	0,0	44,8	3,4
	105	305	2,9	48,4	3,7
	105	412	3,9	44,2	3,4
	152	0	0,0	52,6	4,0
	152	298	2,8	51,9	4,0
	152	389	3,7	41,4	3,2

Die Wechselwirkung der Schüttung mit der Fluidströmung äußert sich auch im Druckverlust der Luftströmung. In der Auswertung der Ausflussversuche über die Zeit wurden zunächst die ersten 5 Sekunden bei ruhender Schüttung vermessen. Der in Abbildung 30 gezeigte Druckverlust der ersten Sekunden entspricht dem initialen Druckverlust der Schüttung.

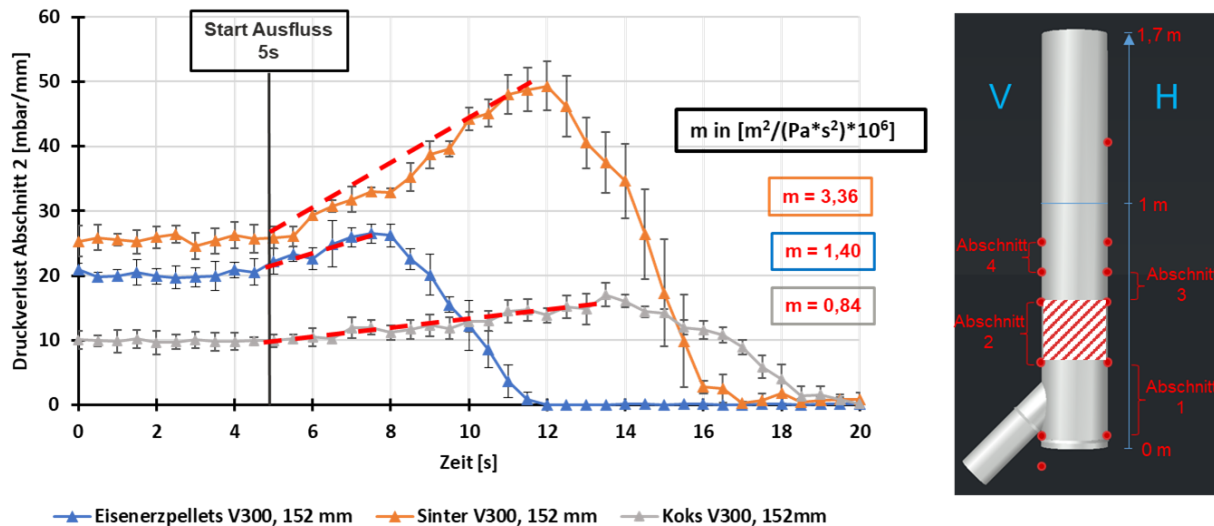


Abbildung 30: Druckverlust in Abschnitt 2 während des Ausfließens der Versuchsmaterialien

Zu erkennen ist, dass nach dem Start der Schüttgutbewegung (maximale Öffnungsweite) der Druckverlust steigt. Dies geschieht bis zu einem Maximum. Dies ist jeweils der Zeitpunkt, an dem die Schüttung so weit abgesunken ist, dass die Schüttgutoberfläche die Messposition des Drucksensors passiert und der Druckverlust damit über eine geringere Schütthöhe vermessen wird. In Abbildung 30 ist zusätzlich in gestrichelt rot, die Steigung des Druckverlusts m bei einsetzender Schüttgutbewegung dargestellt, diese ist am größten für Sinter.

Neben der Beweglichkeit der Schüttung und dem Druckverlust, ist die Permeabilität und deren Änderung während der Bewegung der Schüttung ein entscheidender Parameter. Die Permeabilität K wird mit der Gleichung nach Darcy als Koeffizient aus Leerrohrluftgeschwindigkeit und Druckverlust berechnet. H ist die Schüttguthöhe zwischen den Messpositionen [11]

$$K = \frac{u}{\Delta p/H} \quad (29)$$

Die in Abbildung 31 gezeigte Permeabilität der ersten Sekunden entspricht der Permeabilität der ruhenden Schüttung. Koks mit dem größten mittleren Partikeldurchmesser (kleinstem Druckverlust) besitzt die höchste Permeabilität gefolgt von den runden Eisenerzpellets und dann Sinter.

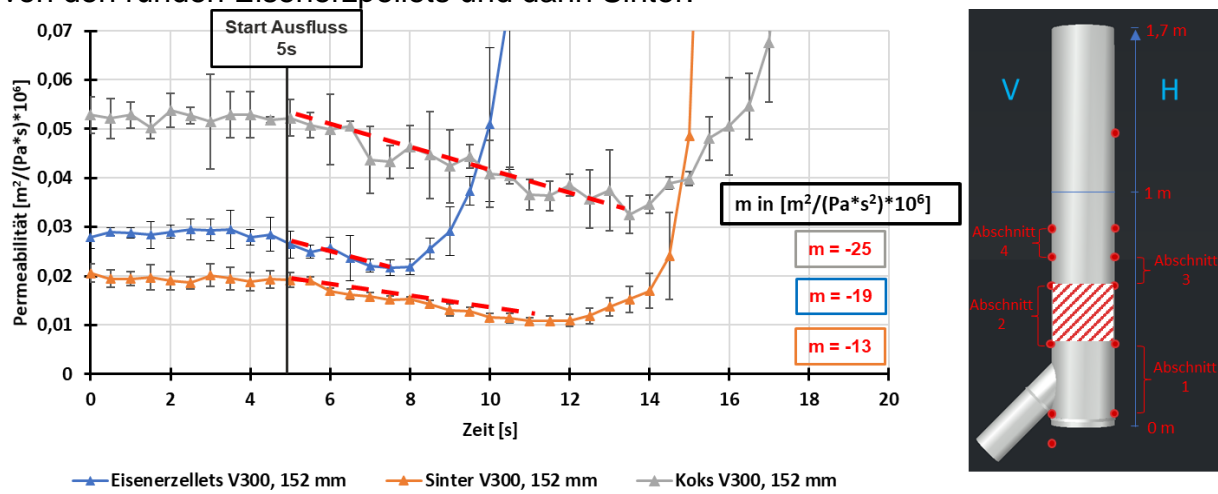


Abbildung 31: Permeabilitätsänderung in Abschnitt 2 während des Ausfließens der Versuchsmaterialien im Versuchsrohr

Des Weiteren besitzen die Versuche mit Koks die größte Standardabweichung. Nach dem Start des Ausflusses sinkt die Permeabilität aller Materialien ab, bis ein Minimum erreicht wird. Dieses Minimum und der plötzliche Anstieg sind der Zeitpunkt, bei dem die Schüttungsoberfläche die Messstelle des Drucksensors passiert. Danach wird eine geringere Schütthöhe vermessen und somit sinkt der gemessene Druckverlust, was dazu führt, dass die Permeabilität steigt. Alle drei Steigungen „m“ der Permeabilität sind unterschiedlich und in Abbildung 31 eingetragen.

3.2. Ermittlung von mechanischen Materialeigenschaften (AP 2, FS 2)

Im Kapitel 2.3 wurden die verschiedenen Versuchsstände und Versuchsdurchführungen für die Messung der mechanischen Materialeigenschaften beschrieben. Die untersuchten Materialpaarungen beziehen sich auf die in den Versuchsständen eingesetzten Konstruktionsmaterialien. Bei den Werten für die Haft-/Gleitreibung werden für die Simulationen Mittelwerte gebildet.

Für Sinterpartikel ergeben sich die in Tabelle 11 aufgeführten Daten. Die hier gemessenen Ergebnisse unterscheiden sich leicht von den in der Literatur zu findenden Werten. Hierbei muss darauf verwiesen werden, dass bei den Literaturwerten keine Informationen zu Siebschnitten oder Partikelgrößenverteilungen zu Verfügung stehen. Die hohen Reibungskoeffizienten zwischen Sinter und Buchenholz sind auf die scharfkantigen Sinterpartikel zurückzuführen. Diese graben sich während des Versuchs in das wesentlich weichere Buchenholz ein und erzeugen somit einen erhöhten Reibungswiderstand. Sinter besitzt eine mittlere Dichte von 3827 kg/m^3 .

Tabelle 11: Sinter, Partikelgrößen zwischen 8,0 -10,0 mm

Material	Haft- /Gleitreibung	Stoßzahl	Statischer Schüttwinkel	Dynamischer Schüttwinkel
Stahl S235	0,37 / 0,35	0,24	Literatur 29-33 ° Messung 31-37 °	Messung 45-47 °
Aluminium	0,36 / 0,35	0,20		
Buchenholz	0,59 / 0,50	0,26		
Plexiglas	0,43 / 0,42	0,28		

Im Vergleich zu den Sinterpartikeln haben die Kokspartikel größere Auflageflächen. Ebenso spielt bei den Reibungswerten der Abrieb eine wichtige Rolle, da die Kokspartikel im Vergleich zu den anderen Materialien wesentlich weicher sind (vgl. Tabelle 12). Die mittlere Dichte von Koks beträgt 1109 kg/m^3

Tabelle 12: Koks, Partikelgrößen zwischen 10,0 - 35,0 mm

Material	Haft-/Gleitreibung	Stoßzahl	Statischer Schüttwinkel	Dynamischer Schüttwinkel
Stahl S235	0,39 / 0,36	0,17	Literatur 35-38 ° Messung 31-41 °	Messung 43-44 °
Aluminium	0,38 / 0,37	0,40		
Buchenholz	0,39 / 0,34	0,33		
Plexiglas	0,41 / 0,39	0,20		

Eisenerzpellets haben aufgrund ihrer sphärischen Form und hohen Festigkeit geringere Reibwerte im Vergleich zu den beiden anderen Hochofenmaterialien. Auch die Werte für die Stoßzahlen sind aufgrund der Form deutlich größer (vgl. Tabelle 13). Auch sind hier die statischen und dynamischen Schüttwinkel deutlich geringer, da die Partikelform ein Abrollen begünstigt. Eisenerzpellets mit 3769 kg/m^3 unterscheiden sich in der Dichte nur marginal von Sinter.

Tabelle 13: Eisenerzpellets, Partikelgrößen zwischen 10,0 -12,5 mm

Material	Haft-/Gleitreibung	Stoßzahl	Statischer Schüttwinkel	Dynamischer Schüttwinkel
Stahl S235	0,33 / 0,29	0,32	Literatur 25-26 ° Messung 28-34 °	Messung 34-36 °
Aluminium	0,31 / 0,30	0,47		
Buchenholz	0,49 / 0,45	0,40		
Plexiglas	0,33 / 0,32	0,48		

Buchenholzkugeln haben von den untersuchten Schüttgütern die geringsten Reibwerte, dafür aber die größten Stoßzahlen. Auch hier ist die sphärische Form für die geringeren Schüttwinkel verantwortlich. Die Dichte der Buchenholzkugeln liegt im Mittel bei 750 kg/m^3 .

Tabelle 14: Buchenholzkugeln, Partikelgröße 10,0 mm

Material	Haft-/Gleitreibung	Stoßzahl	Statischer Schüttwinkel	Dynamischer Schüttwinkel
Stahl S235	0,27 / 0,25	0,55	Messung 17-22 °	Messung 21-27 °
Aluminium	0,26 / 0,25	0,60		
Buchenholz	0,29 / 0,20	0,58		
Plexiglas	0,23 / 0,22	0,58		

Die Koeffizienten für die Rollreibung können für die verschiedenen Materialpaarungen Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 15: Rollreibungskoeffizienten

Material	Rollreibung Holzkugeln [1/m]	Rollreibung Eisenerzpellets [1/m]
Stahl S235	0,026	0,15
Aluminium	0,024	0,16
Buchenholz	0,056	-
Plexiglas	0,019	0,15

3.3. Auslegung und Aufbau der Labor-Versuchseinrichtungen für Referenzexperimente mit idealisierten Schüttkörpern (AP 3, FS 2)

Die Auslegung und der Aufbau der LEAT Labor-Versuchseinrichtung wurde bereits in Kapitel 2.3.6 ausführlich beschrieben.

3.4. Begleitende Simulationen der Vorversuche (AP 4, FS 2)

Das im Abschnitt 2.2.2 beschriebene Versuchsrohr zur grundlegenden Ermittlung des Fließverhaltens in Vorversuchen wurde für zwei Materialien, die Holzkugeln und die Eisenerzpellets, die sich in ihrer Dichte und Oberflächenstruktur (Materialeigenschaften, siehe Abschnitt 3.1 und 3.2) deutlich unterscheiden, vergleichend numerisch untersucht. Die dabei benötigten sehr großen Partikelzahlen gestatten keine Simulationen mit realitätsnaher geometrischer Approximation der Partikel durch Polyeder, sondern müssen aus Rechenzeitgründen auf die Kugelform beschränkt bleiben. Eisenerzpellets sind ohnehin geometrisch nahe an der Kugelform und die Holzkugeln werden sowohl in der Versuchsanlage an FS2 (Silo) als auch im Pilot-Versuchsaufbau (Schacht) an FS1 bzw. dessen Simulation an FS2 eingesetzt, was einen direkten Vergleich ermöglicht. Die simulierte Geometrie entspricht der Skizze in Abbildung 4 und der Ausfluss der Eisenerzpellets ist zum Zeitpunkt 1.22 und 3.95 Sekunden nach dem Öffnen des Schiebers in Abb. 3.4.1 visualisiert. Man sieht deutlich, dass das Ausflussrohr während dieser dynamischen Phase nur etwa halb gefüllt ist.

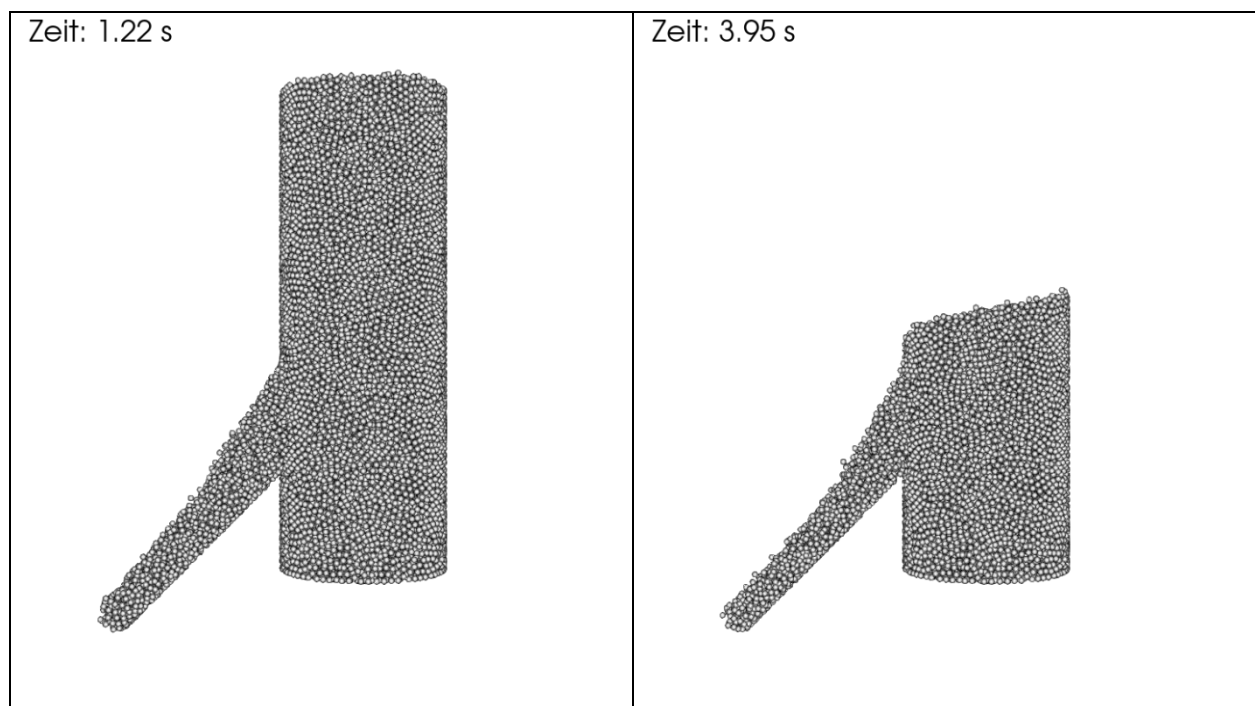


Abbildung 32: Ausfluss von Eisenerzsinter aus dem Versuchsrohr nach Öffnung des Schiebers

Untersucht wurden für beide Materialien die stationäre Situation, also Durchströmung bei ruhender Schüttung und der dynamische Vorgang bei auslaufender Schüttung. Ausgewertet wurden die zugehörigen Druckverluste sowie im dynamischen Versuch der zeitliche Verlauf der Massenabnahme im Silo.

In Abbildung 33 sind die berechneten Druckverluste beim Durchströmen der ruhenden Schüttung aus Eisenerzsinter im Vergleich zu den Ergebnissen in Abbildung 26 bei den Reynoldszahlen, die den Volumenströmen von 192, 286 und 377 m³/s (Tabelle 8) entsprechen, eingezeichnet. Die Druckverluste sind generell zwar etwas niedriger als die Experimente von FS 1 aufzeigen, damit aber schon realistischer als die Ergun-Beziehung vorhersagt. Hier ist zu beachten, dass in dieser Simulation weder Formfaktoren noch die tatsächliche Größenverteilung berücksichtigt wurden.

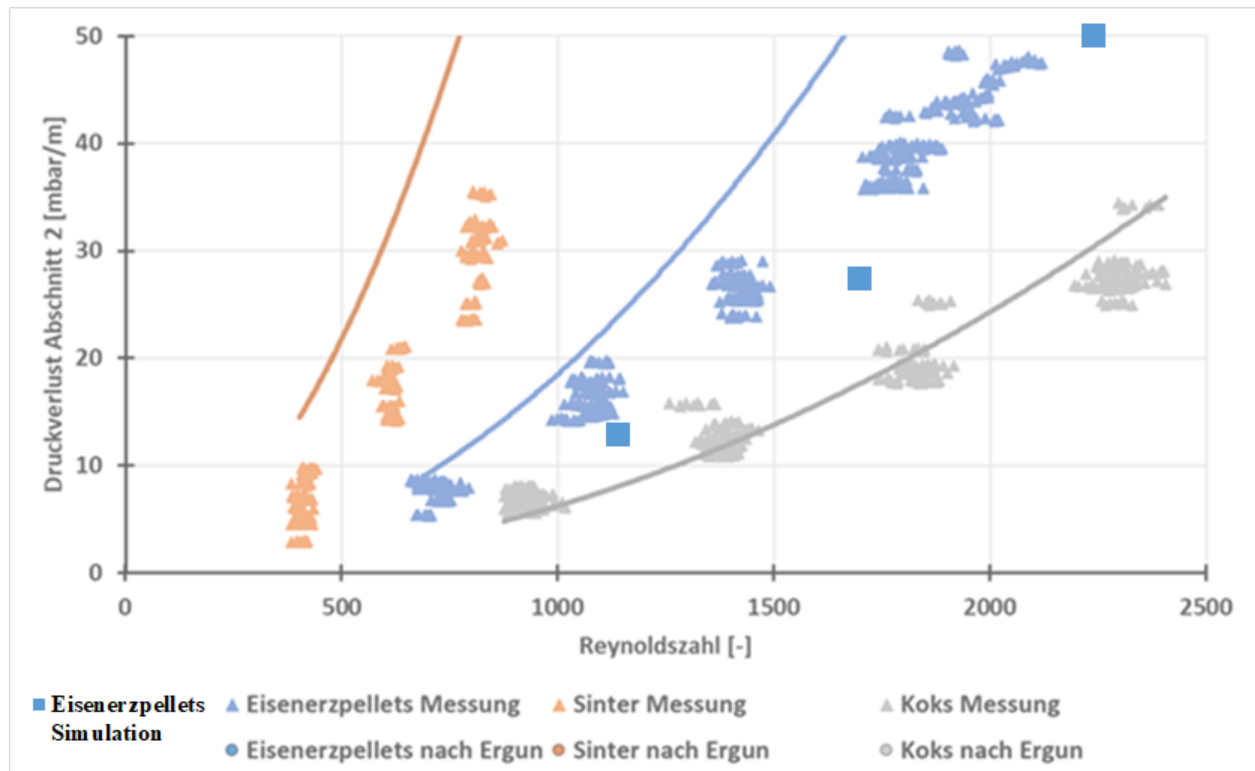


Abbildung 33: Mittels DEM/CFD berechnete Druckverluste für Eisenerzsinter im Versuchsrohr im Vergleich zu den Messungen an FS1

Die simulierten zeitlichen Entwicklungen der Druckverluste während des Ausfließens aus dem Versuchsrohr sind für Eisenerzpellets (monodispers, 12,3 mm Durchmesser) und Buchenholzkugeln (bidispers; zur Hälfte 8 mm und 10 mm Durchmesser) in Abbildung 34 dargestellt. Analog zu den Messungen von FS1 wurde die Druckänderung je Meter Schütthöhe über den „Abschnitt 2“ (Abbildung 30) ausgewertet.

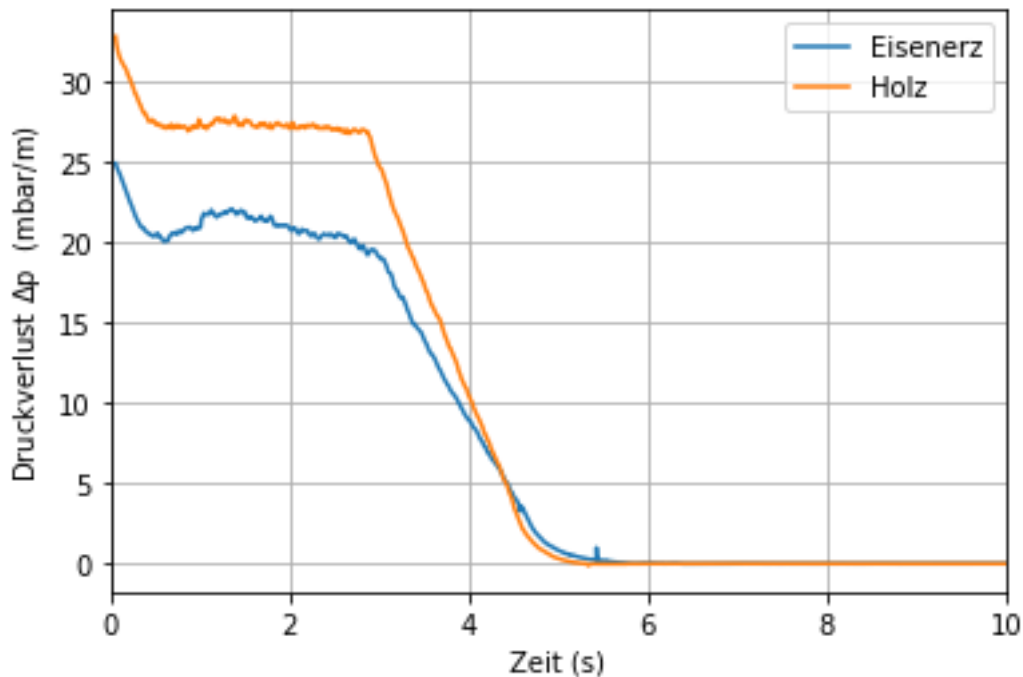


Abbildung 34: Simulierte zeitliche Entwicklung des Druckverlustes für Eisenerzsinter und Holzkugeln im Abschnitt 2 des Versuchsrohrs (Luftvolumenstrom 300 m³/h)

Der Kurvenverlauf für Eisenerzpellets beginnt zum Zeitpunkt der Schieberöffnung bei $t = 0$ mit dem Druckverlust der ruhenden Schüttung (etwa 25 mbar/m), fällt innerhalb von 0,5 Sekunden auf 20 mbar ab (was dem Druckverlust in ruhender Schüttung bei FS 1 entspricht) um anschließend über einen Zeitraum von einer Sekunde anzusteigen und anschließend wieder abzufallen. Nach etwa drei Sekunden knickt die Kurve deutlich ab und der Druckverlust reduziert sich linear bis die Schüttgutoberfläche nach 5,5 Sekunden den unteren Druckmesspunkt des Abschnitts 2 im Versuchsrohr passiert. Der Kurvenverlauf und die damit verbundenen Zeiten sind dem Verlauf der Messung von FS1 in Abbildung 30 recht ähnlich, es gibt jedoch sowohl qualitative als auch quantitative Unterschiede. Der initiale Unterschied, während der ersten 0,5 Sekunden, resultiert aus unterschiedlichen Anfangsbedingungen (anfängliche Porositätsverteilung, nicht simulierter Vorgang der Schieberöffnung). Der anschließende Anstieg des Druckverlusts fällt in der Simulation geringer aus als in den Experimenten (etwa nur ein Drittel) und beginnt auch schon vor dem Knickpunkt wieder abzusinken, offensichtlich wird die Permeabilitätsänderung in dieser Phase der Simulation nicht gut wiedergegeben. Die eigentliche Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten konnte im Projektverlauf nicht geklärt werden. Mögliche Ursachen sind die noch nicht hinreichend genaue Approximation der Materialeigenschaften (weil Kugeln angenommen werden), Ungenauigkeiten in der Porositätsbestimmung oder eine zum Zeitpunkt der

Schieberöffnung auftretende aber sofort wieder abklingende Strömung durch das Auslassrohr, da an das im Experiment ein zwar dichtes aber vergleichsweise großes Volumen zu Aufnahme der Partikel angeschlossen ist. Im Vergleich zu Abbildung 30 beginnt die lineare Abnahme des Druckverlusts ebenfalls drei Sekunden nach Öffnung des Schiebers, der Ausfluss erfolgt aber deutlich schneller, so dass sich diese Phase über etwa zwei Sekunden erstreckt, während sie im Experiment mindestens 3,5 Sekunden andauerte. Die Approximation des realen Materials durch Kugeln scheint, trotz angepasster mechanischer Reibungsbeiwerte, die Bewegungsfreiheit im engsten Querschnitt noch nicht hinreichend einzuschränken. Der Druckverlust der polydispersen Holzkugelschüttung startet wegen der wegen der geringeren mittleren Porosität höher. Der Druckanstieg während des Ausflussbeginns ist zudem deutlich weniger ausgeprägt, was einem geringen anfänglichen Zusammensacken der Schüttung (aufgrund geringerer Partikeldichte) geschuldet ist.

Die nach Öffnung des Schiebers erfolgende Abnahme der im Versuchsrohr verbliebenen Masse ist in Abbildung 35 für Erzsinter und Holzkugeln dargestellt. Erkennbar ist in der ersten halben Sekunde die anfängliche Entleerung des Auslaufrohrs, bis sich ein stationäres Fließen eingestellt hat. Anhand der unterschiedlichen Gradienten im linearen Bereich der Massenabnahme zeigt sich der Einfluss unterschiedlicher Materialdichte auf den Auslaufvorgang. Im linearen Bereich beträgt die simulierte Ausflussrate für Eisenerzpellets 21,3 kg/s, was in etwa 180% der in Tabelle 10 angegebenen Ausflussrate des Experiments entspricht. Die im Diagramm auch dargestellte Ausflusskurve für Holzpellets zeigt der Schüttdichte entsprechend geringere Raten, im linearen Bereich liegt der Ausfluss bei 4,3 kg/s. Experimente mit den Holzkugeln wurden im Versuchsrohr von FS1 nicht durchgeführt.

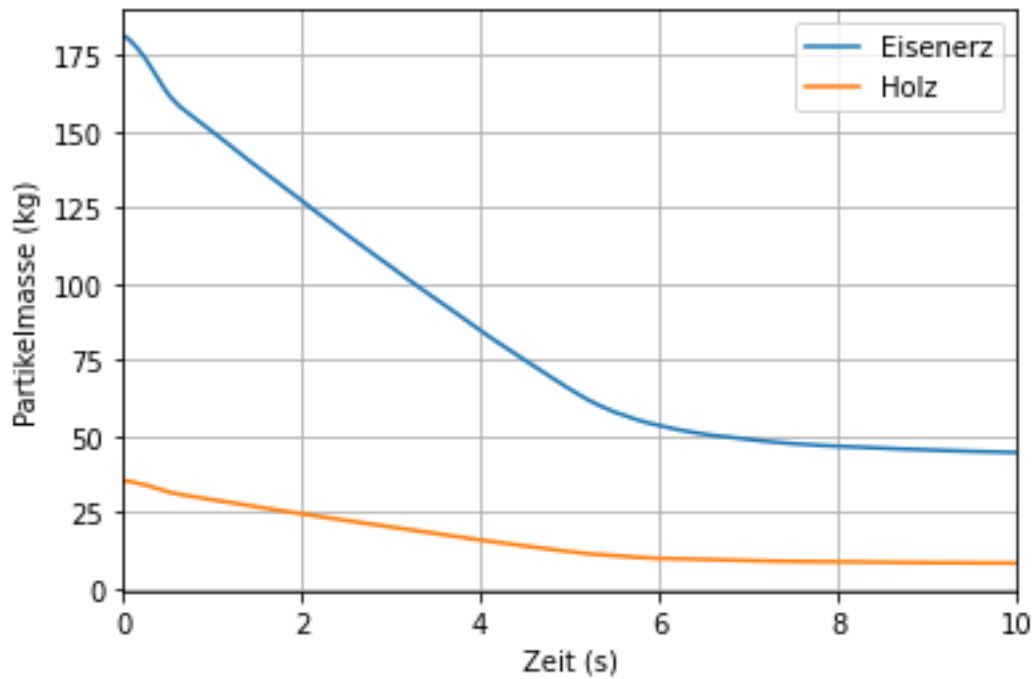


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der im Versuchsrohr verbliebenen Partikelmasse von Eisenerzpellets und Holzkugeln (Luftvolumenstrom 300 m³/h)

Die ursprünglich geplante Anpassung der Ausflussraten durch Adaption der Parameter eines Kohäsionsmodells musste verworfen werden, da damit zwar die Kräfte auf der Feststoffseite beeinflusst werden können, sich so die notwendigen Wirkungen auf die Druckverluste aber nicht ohne weitere Parameter realisieren lassen. Zusätzliche, für jedes Stoffsystem anzupassende Parameter würden die physikalische Aussagekraft zudem schwächen.

3.5. Entwicklung, Konstruktion und Aufbau der Pilot-Versuchseinrichtung für reale Schüttgüter (AP 5, FS 1)

Grundlage für die Konstruktion der Pilot-Versuchseinrichtung bzw. des Schachtmodells, sind die Ergebnisse aus AP1. Das Ausflussverhalten der verschiedenen Schüttgüter wurde, wie in Kapitel AP1 beschrieben, ausgewertet. Die Tiefe von 300 mm wurde analog zum Durchmesser des Versuchsrohrs gewählt. Aus den Versuchsdaten wurde über die Grundfläche, die Auslassfläche so ausgelegt, dass eine Absinkgeschwindigkeit von 10 mm/s für die Schüttgüter erreicht werden kann, ohne dass sich Brücken bilden und das Ausfließen verhindern wird. Für die Eisenerzpellets und den Sinter wurde das erzielt. (s. Abbildung 29). Koks, welches mit 10-20 mm deutlich größer ist und eine größere Verteilung besitzt, hat über eine größere Spanne der Schieberöffnung Brücken gebildet und ist anschließend mit einer größeren Geschwindigkeit ausgeflossen.

Die Messstellen der Drucksensoren wurden entsprechend des vergrößerten Aufbaus angepasst. Es wurden zudem im Winkel veränderliche Seitenwände eingebaut, sodass zukünftig verschiedene Schachtöfen untersucht werden können. Für die Versuchseinrichtung wurde ein Gerüst gebaut, das die Konstruktion trägt und die Zugänglichkeit an alle wichtigen Stellen gewährleistet. Zudem wurde die Einrichtung in eine Kranachse gelegt, um das Befüllen der ca. 1 t Versuchsmaterialien mit Big Bags zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Kapitel 3.9 aufgezeigt.

3.6. Untersuchung durchströmter bewegter, idealisierter Schüttungen in der Labor-Versuchseinrichtung (AP 6, FS 2)

Zur Analyse des Ausfließverhaltens wurden mit der im Abschnitt 2.3.6 beschriebenen Versuchseinrichtung, dem Versuchssilo, Referenzexperimente mit Buchenholzkugeln als Schüttgut durchgeführt und ausgewertet. Im Weiteren sind in diesem Abschnitt die Ergebnisse zusammen mit den jeweils zugehörigen Simulationen (AP7, FS2) dargestellt.

Variiert wurden die Volumenströme der Gegenströmung, die Größe der Auslauföffnung und die Anordnung der Auslauföffnung. Dabei wurden sowohl die Druckverluste bei der Durchströmung der ruhenden Schüttung als auch der Auslauf ohne Gegenströmung vermessen.

Geplant waren ursprünglich reine Auslaufversuche (dabei wird der Schachtversuchsstand bis zu einer vorher definierten Höhe gefüllt und anschließend leerlaufen gelassen) Versuche mit kontinuierlichem Nachlauf (dabei wird das Füllungs-niveau des Versuchstandes über eine Kamera erfasst und die Zuführung aus dem Silo oberhalb des Schachtes so dosiert, dass die Füllhöhe nahezu konstant bleibt). Diese Nachlaufversuche stellten sich in der Durchführung jedoch als problematisch heraus, weil die Konstanz der Schütthöhe nicht hinreichend gut geregelt werden konnte, die meisten Experimente waren aufgrund der dabei entstehenden Fluktuation der Messwerte unbrauchbar (siehe dazu auch Abbildung 36). Daher liegt der Fokus der Ergebnisse auf den reinen Auslaufversuchen. In Tabelle 6.1 sind die auswertbaren Experimente und ihre Parameter zusammengestellt.

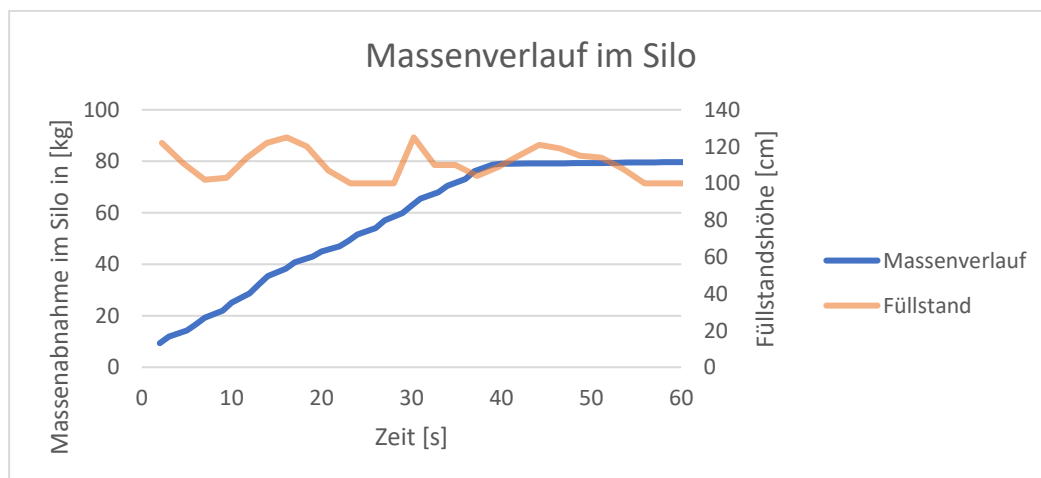


Abbildung 36: Füllstandshöhe und ausgelaufene Masse über der Zeit im Nachlaufversuch, die Schütthöhe ist nicht annähernd konstant zu halten

Implementiert wurde auch eine PTV (Particle Tracking Velocimetry) Einrichtung mit Kamera und Matlab-Skript zur Auswertung. Bei den ersten Versuchen stellte sich jedoch heraus, dass sich die Partikel an der Wand sehr gleichmäßig nach unten bewegen und daher nur rein vertikale Tracks ergeben. Deren Geschwindigkeit entspricht der linearen Schütthöhenabnahme (wie in Abb. 34 gezeigt). Daher wurden diese Tracks nicht weiter ausgewertet.

Der Austritt am Siloboden (siehe Abbildung 37) erfolgte entweder als radialer Auslauf an der Peripherie des Bodens (geöffnet durch vertikales Verfahren einer zentral angeordneten Bodenplatte) oder durch eine kreisförmige Öffnung auf der Achse des Bodens (realisiert durch eine seitlich verschiebbare Lochplatte). Tabelle 16 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Parameterstudien.

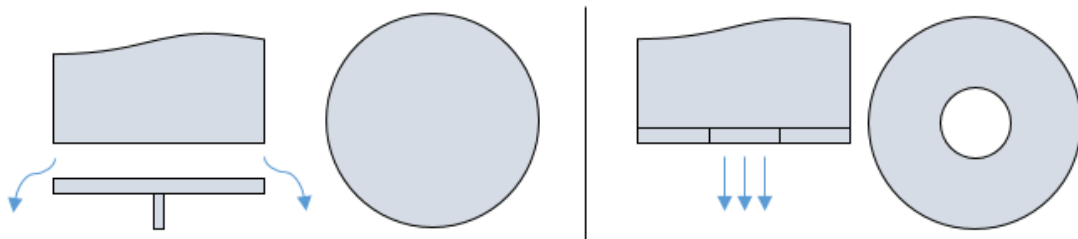


Abbildung 37: Radialer Auslauf (links), zentraler Auslauf (rechts)

Tabelle 16: Zusammenstellung der auswertbaren Experimente und ihrer Parameter

Auslassart	Spaltbreite / Durchmesser in [mm]	Volumenstrom in [m ³ /h]	Ausfluss	Nachlauf
radial	20	0	ja	nein
radial	30	0	ja	nein
radial	40	0	ja	nein
radial	50	0	ja	nein
radial	20	200	nein	nein
radial	20	220	nein	nein
radial	20	240	nein	nein
radial	20	260	nein	nein
radial	20	280	nein	nein
radial	20	300	nein	nein
radial	20	320	nein	nein
radial	20	340	nein	nein
radial	20	360	nein	nein
radial	40	160	ja	nein
radial	40	180	ja	nein
radial	40	200	ja	nein
radial	40	300	ja	nein
radial	45	200	ja	nein
radial	45	220	ja	nein
radial	45	240	ja	nein
radial	45	260	ja	nein
radial	50	200	ja	nein
radial	50	240	ja	nein
radial	50	260	ja	nein
radial	50	280	ja	nein
radial	50	300	ja	nein
radial	50	240	ja	ja
radial	50	260	ja	ja
radial	50	280	ja	ja
radial	50	320	ja	ja
zentral	80	0	ja	nein
zentral	80	200	ja	nein
zentral	80	240	ja	nein
zentral	80	280	ja	nein
zentral	80	320	ja	nein

Nachfolgend (Abbildung 38) sind Fotografien eines Auslaufversuchs ohne Durchströmung bei radialem Auslass abgebildet, die anfängliche Füllhöhe beträgt 1200 mm, der Silodurchmesser 300 mm und die Spaltbreite des radialen Austritts 50 mm.

Darunter ist in Abbildung 39 ist der zugehörige zeitliche Verlauf der Schütthöhe im Vergleich zur korrespondierenden Simulation dargestellt.



Abbildung 38: Auslaufversuch ohne Durchströmung zu verschiedenen Zeitpunkten

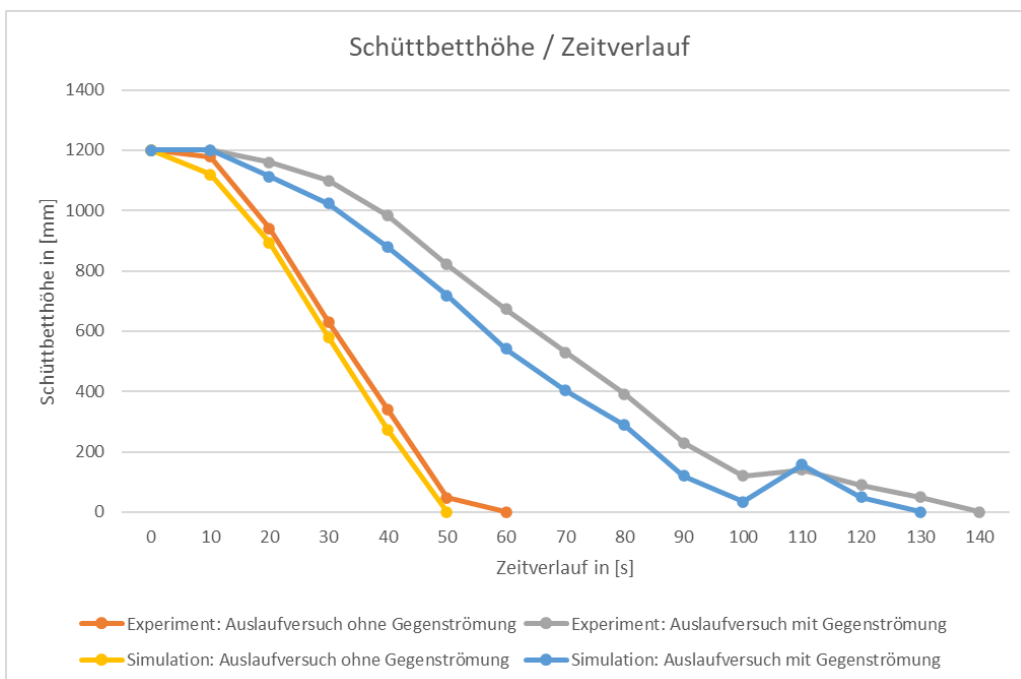


Abbildung 39: Schüttbetthöhen mit und ohne Durchströmung (Messung vs. Simulation)

In den Versuchen erfolgt die Öffnung des peripheren Spalts anhand einer vertikalen Verschiebung der Bodenplatte, ein Vorgang der aufgrund der Konstruktion nicht linear

abläuft und zudem bis zur vollständigen Öffnung etwa 5 Sekunden benötigt. In den Simulationen wird dagegen die Öffnung spontan freigegeben, was nicht nur zu anfänglichen Unterschieden im Auslauf führt, sondern auch den sich einstellenden Massenstrom beeinflusst. In der Simulation in Abbildung 39 wurde dagegen der tatsächliche Öffnungsverlauf zugrunde gelegt. Die Übereinstimmung ist bei gleichen Randbedingungen zwischen Simulation und Experiment sehr gut. Der leichte Anstieg im blauen und grauen Kurvenzug zeigt den Beginn der Fluidisierung bei geringer verbleibender Schütthöhe an.

Abbildung 40 zeigt die Massenänderung während des Ausfließens über der Zeit für drei verschiedene Ringspalthöhen (ohne Gegenströmung). Es stellt sich der aus den Experimenten und Simulationen bekannte lineare Ausflussbereich ein, der zugehörige Massenstrom im linearen Bereich \dot{m} ist neben den Graphen dargestellt. Der Auslaufmassenstrom der Simulationen \dot{m}_S (bei denen die Spaltöffnung spontan erfolgt) ist jeweils darunter angegeben. Bei kleinen Spaltweiten entspricht die Ausflussrate in der Simulation in etwa den Experimenten (sie ist generell immer etwas größer), bei großen Spaltweiten ist sie deutlich größer.

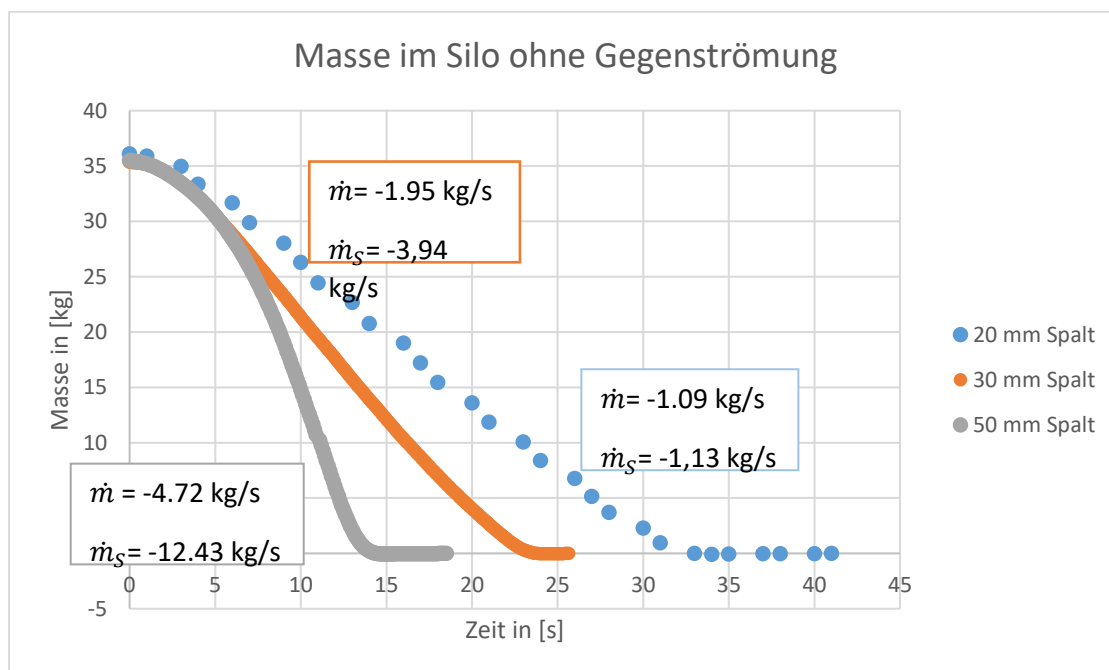


Abbildung 40: Siloausfluss ohne Gegenströmung für verschiedene Spaltweiten; zugehörige Massenströme im Experiment und in der Simulation

Werden die initialen unbewegten Schüttungen durchströmt, resultieren daraus die in Abbildung 41 dargestellten (spezifischen) Druckverluste. Sie sind dort bereits als Funktion der (mit der Leerohrgeschwindigkeit gebildeten) Partikel-Reynoldszahl für alle gemessenen Volumenströme dargestellt. Im Diagramm werden die Experimente mit den zugehörigen DEM/CFD-Simulationen und der theoretischen Kurve nach Ergun verglichen. Hier zeigt sich ein vergleichbares Ergebnis wie in Abbildung 26, die experimentellen Werte liegen generell unterhalb der theoretischen Kurve, die Simulationen liefern noch niedrigere Druckverlustwerte. Die für die drei letzten Messpunkte sichtbaren Abweichungen traten aufgrund von Undichtigkeiten auf (geringere Volumenströme durch die Schüttung) und zeigen, wie empfindlich das System auf technische Details reagiert bzw. welcher Kontrollaufwand notwendig ist, valide Messungen zu erzielen.

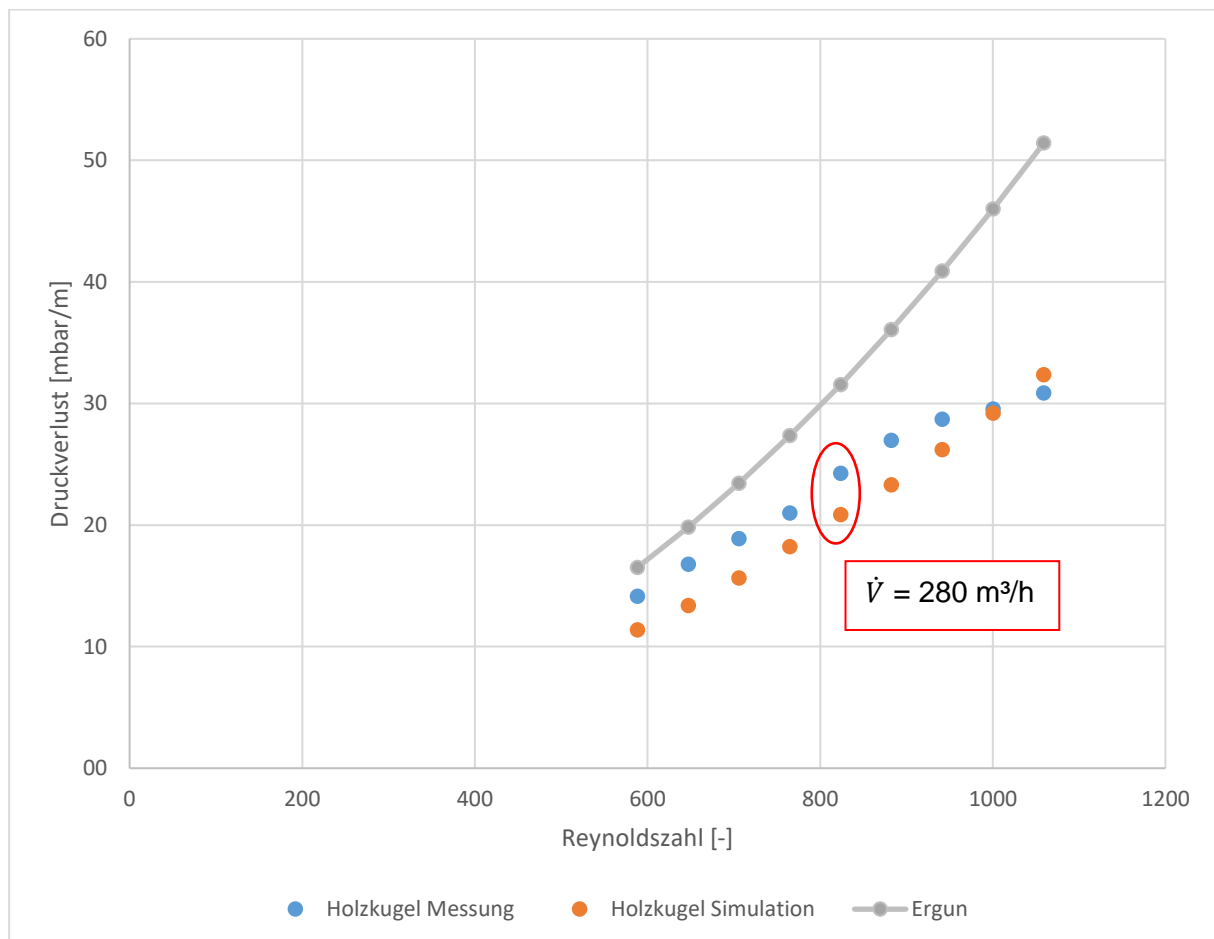


Abbildung 41: spezifischer Druckverlust als Funktion der Reynoldszahl; Vergleich Messungen gegen Simulationen

Für die in Abbildung 41 eingekreisten zwei Messpunkte, sind die vertikalen Druckverläufe im Silo in Abbildung 42 aufgetragen. Es sind die gemessenen Druckdifferenzen zur

Umgebung an den verschiedenen Höhen (200 mm bedeutet 200 mm über dem oberen Auslassrand) den korrespondierenden Werten in der Simulation gegenübergestellt. Die simulierten Druckverluste sind etwas geringer, weil die Simulation glatte, sphärische Partikel von exakt 10 mm Durchmesser zugrundlegt, die Buchenholzkugeln dagegen eine geringe Größenverteilung aufweisen und die Partikel keine idealen Kugeln sind.

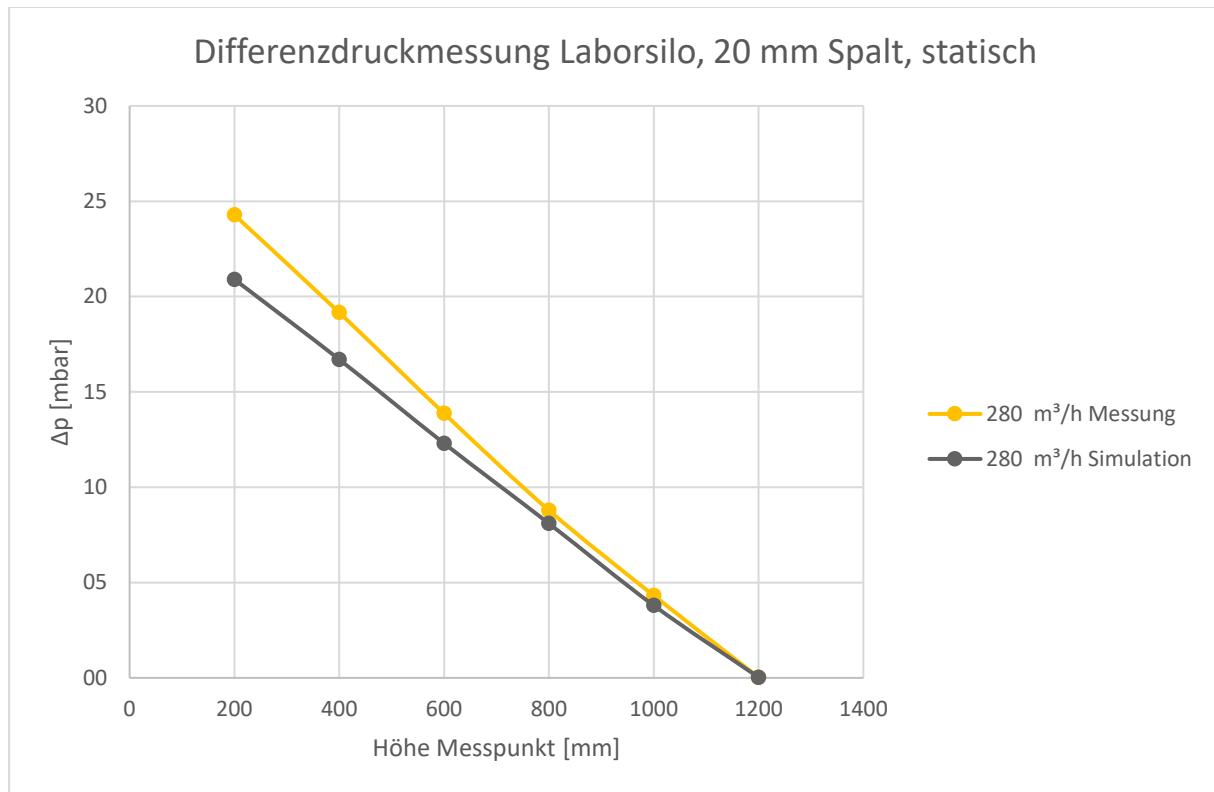


Abbildung 42: Drücke auf verschiedenen Höhen des Silos im Vergleich zur korrespondierenden Simulation

Nachfolgend (Abbildung 43) sind die Massenabnahmen des Siloinhalts über der Zeit bei zwei Gasvolumenströmen und einer Spaltweite von 50 mm aufgezeigt und den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Es zeigt sich, neben den qualitativ korrekten Verläufen, dass die spontane Öffnung des peripheren Spalts in der Simulation nicht nur den anfänglichen Ausfluss beeinflusst, sondern auch zu dauerhaft höheren Ausflussraten führt, was die gezeigten Unterschiede erklärt. Sowohl für Simulation als auch Experiment nehmen die Partikel-Massenströme mit zunehmendem Gas-Volumenstrom ab, ein ähnlicher Effekt wie bei den Versuchen im Versuchsrohr des BFI.

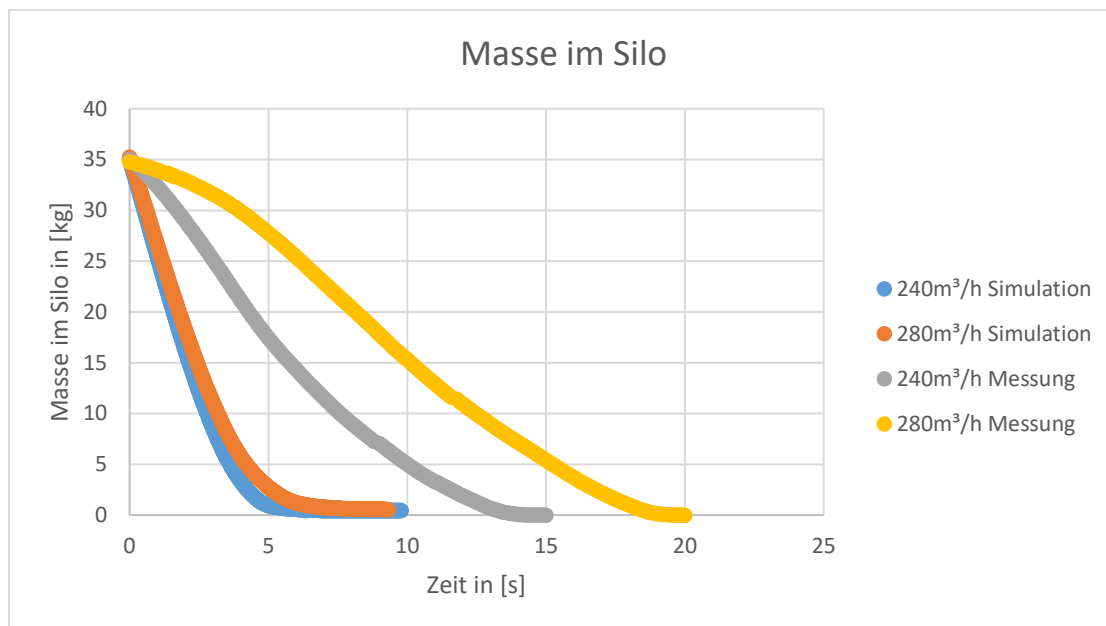


Abbildung 43: Ausfluss bei zwei Volumenströmen und Spaltweite 50 mm

Die zugehörigen Druckverläufe über der Zeit (wiederum für Messung und Simulation) sind in Abbildung 44 dargestellt. Der rapide Druckanstieg in den Simulationen resultiert aus der mit der spontanen Öffnung zunächst viel größeren Beschleunigung der Partikelmasse und der damit verbundenen Abnahme der Permeabilität. Die dadurch eingebrachte kinetische Energie der Partikel hat dann aber scheinbar zur Folge, dass die bewegte Schüttung die mechanische Verzögerung im Spalt und durch die Gegenströmung dauerhaft besser überwinden kann und damit schneller ausfließt. Eine Überprüfung dieser Hypothese anhand von variablen Spaltöffnungszeiten war innerhalb des Projekts leider nicht möglich. Dieser Druckanstieg ist, beim vergleichsweise langsamen Öffnen des Spalts, im Experiment nicht vorhanden, vielmehr nehmen die Werte von Beginn an kontinuierlich ab. Die in den experimentellen Druckkurven sichtbaren „Stufen“ resultieren aus einer zu hohen Abtastrate des Messsystems, der die vergleichsweise langsamen Druckaufnehmer nicht folgen konnten. Bei den Versuchen im Versuchsrohr der FS1, wo der Partikelauslass deutlich schneller geöffnet wird, zeigt einen ähnlichen initialen Druckanstieg, wie die Simulationen des hier betrachteten Versuchssilo.

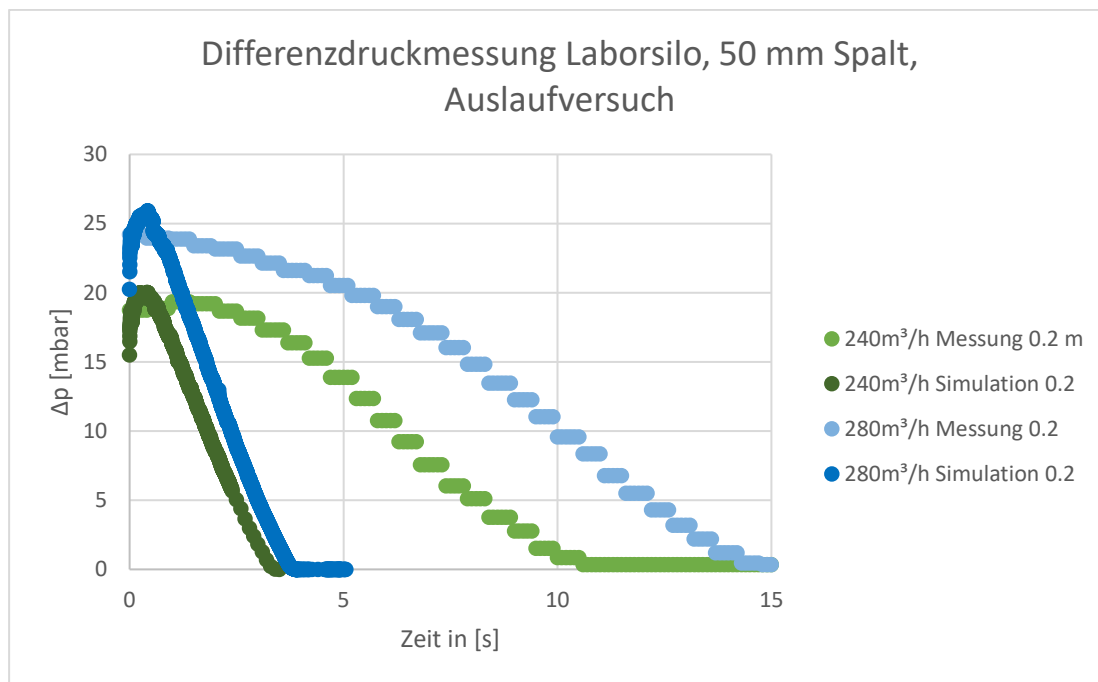


Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf des Drucks in 200 mm Schüttungshöhe in Messung und Simulation

Betrachtet man den Verlauf der Massenabnahme im Silo für verschiedene Spaltbreiten bei einem konstanten Gasvolumenstrom von 240 m³/h so resultieren die in Abbildung 45 dargestellten Verläufe.

Die Ausgangsmasse im Fall des 45 mm Spaltes war etwas geringer als in den anderen Fällen. Die Messungen geben die erwartete Reihenfolge wieder und basieren alle auf derselben, langsam erfolgenden Öffnung des Spaltes. Wegen der oben bereits aufgezeigten Unterschiede bei spontaner Öffnung in den Simulationen wird auf deren Darstellung hier verzichtet.

Die zugehörigen Differenzdruckmessungen sind in Abbildung 46 dargestellt. Hier zeigt sich, dass sich mit abnehmender Spaltweite ein zunehmender initialer Gegendruck aufbaut (trotz der langsamen Spaltöffnung). Dies unterstreicht die bereits oben angeführte Auswirkung der Öffnungsgeschwindigkeit auf den Ausfluss.

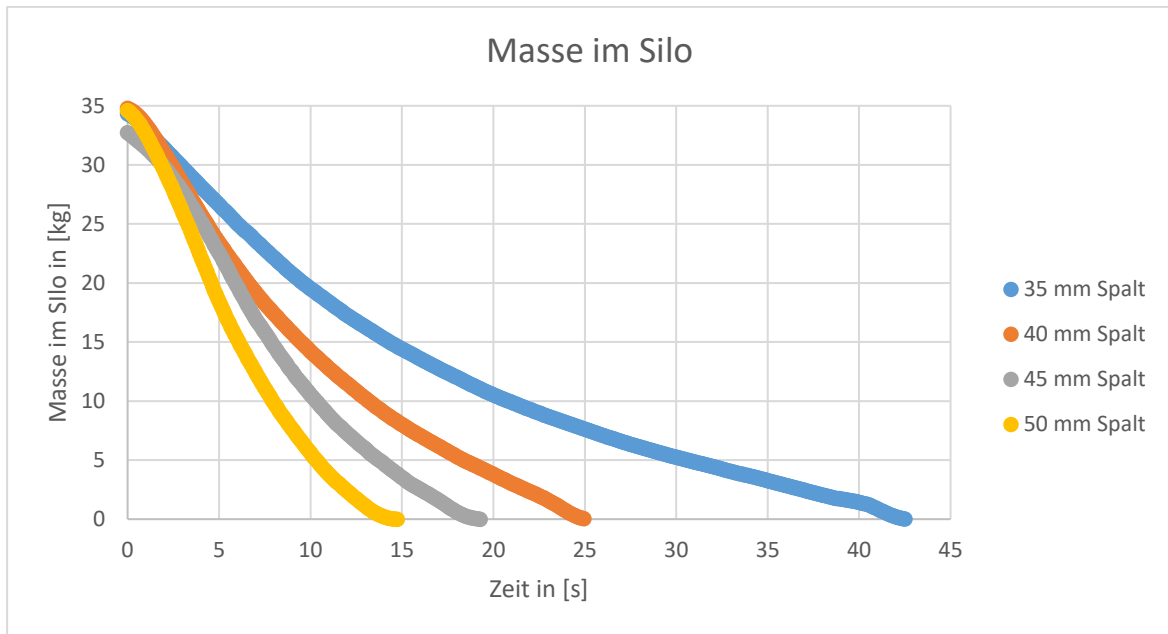


Abbildung 45: Massenausfluss bei verschiedenen Spaltweiten und 240 m³/h Gegenströmung

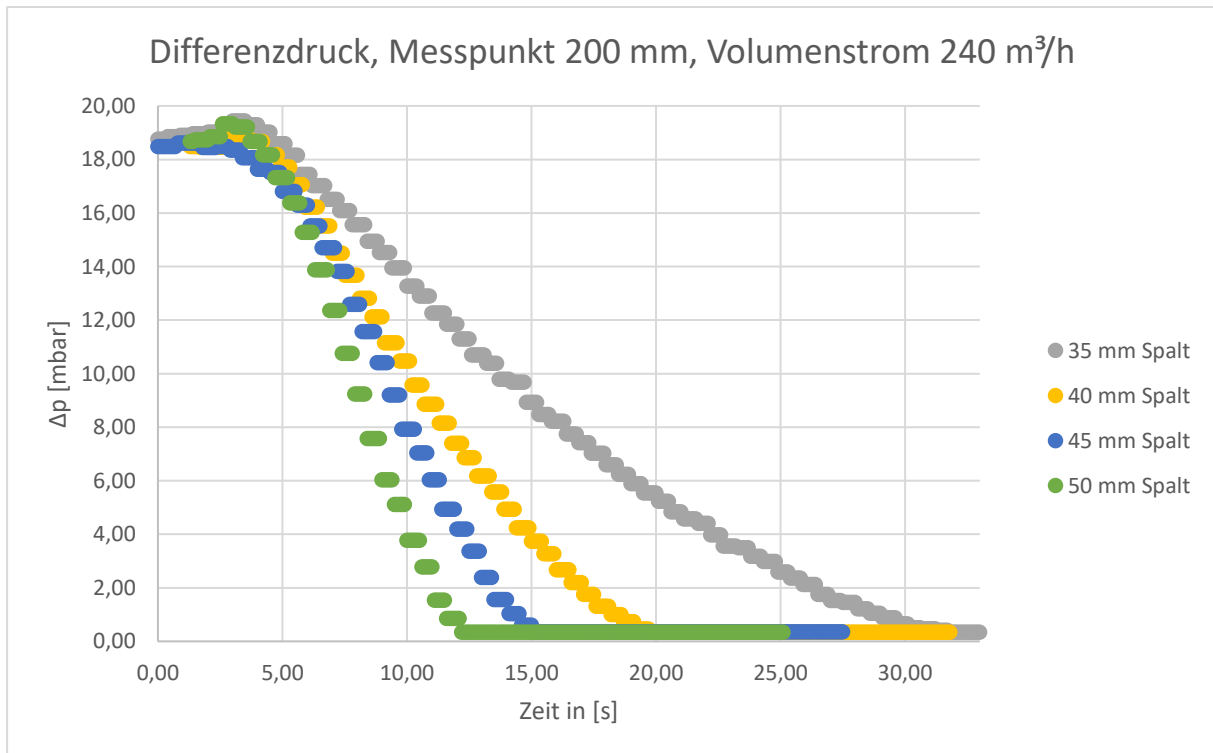


Abbildung 46: Massenausfluss bei verschiedenen Spaltweiten und 240 m³/h Gegenströmung

In Abbildung 47 werden für den nicht durchströmten Versuch mit 30 mm Spalt die Höhenaufnahmen der Realsense-Kamera dargestellt. Die Skala entspricht dabei der gesamten Höhe des Versuchsstandes. Die dargestellten Entfernungen sind von der Kameraposition auf die Schüttung gerichtet zu verstehen. Somit nimmt die Höhe der

Schüttung von anfänglich 0,3 Metern (1,2 Meter Füllstand) auf bis zu 1,5 Meter zu (Silo vollständig entleert).

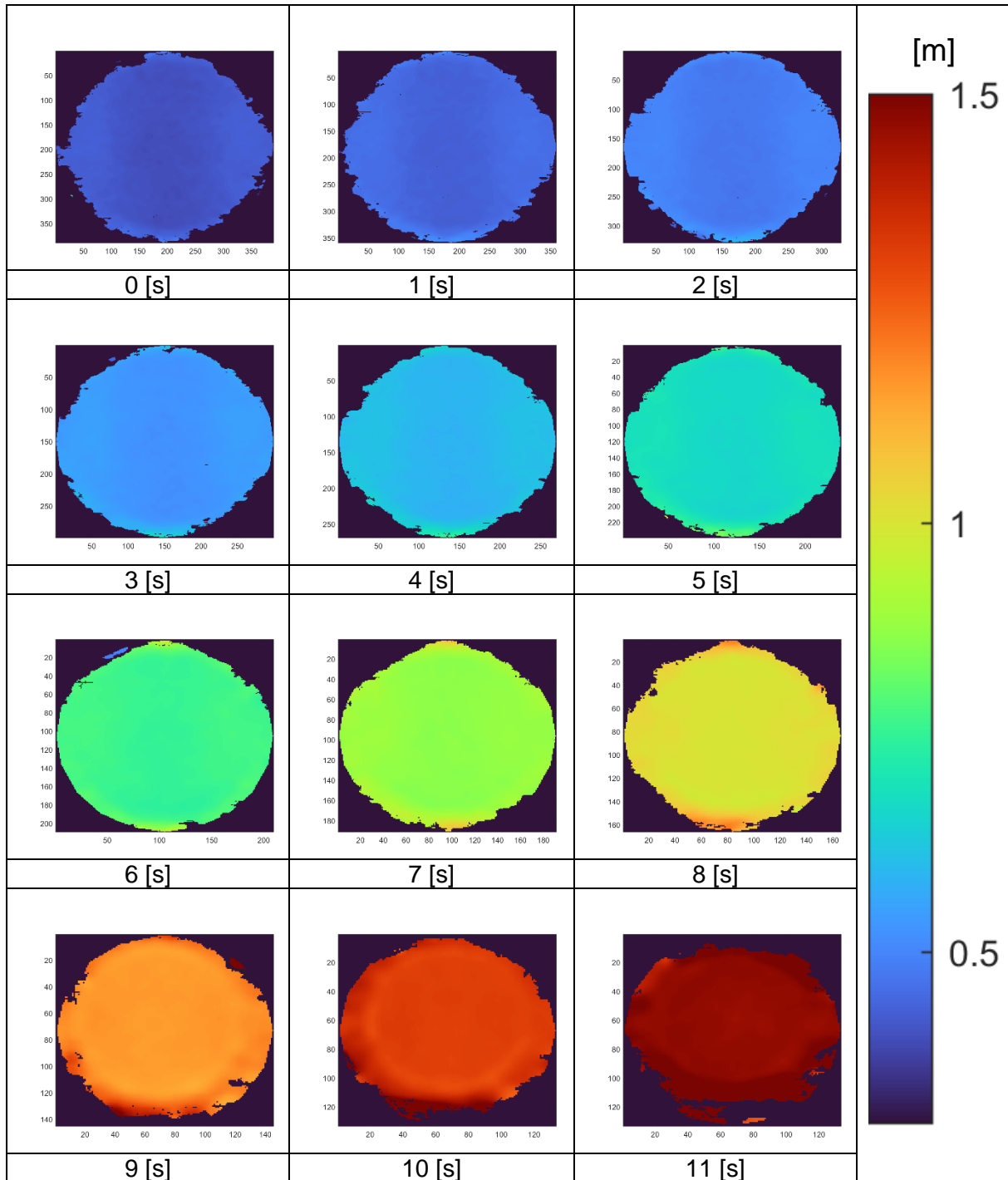


Abbildung 47: Realsense Aufnahmen der Schüttbetthöhe bei 30 mm Spalt, 0 m³/h

Die Details des Schüttkegels sind hier aufgrund des großen Skalenumfangs nicht gut zu erkennen. Abbildung 48 zeigt für die Zeitpunkte von 0, 4 und 8 Sekunden die Entwicklung des sich einstellenden Schüttkegels.

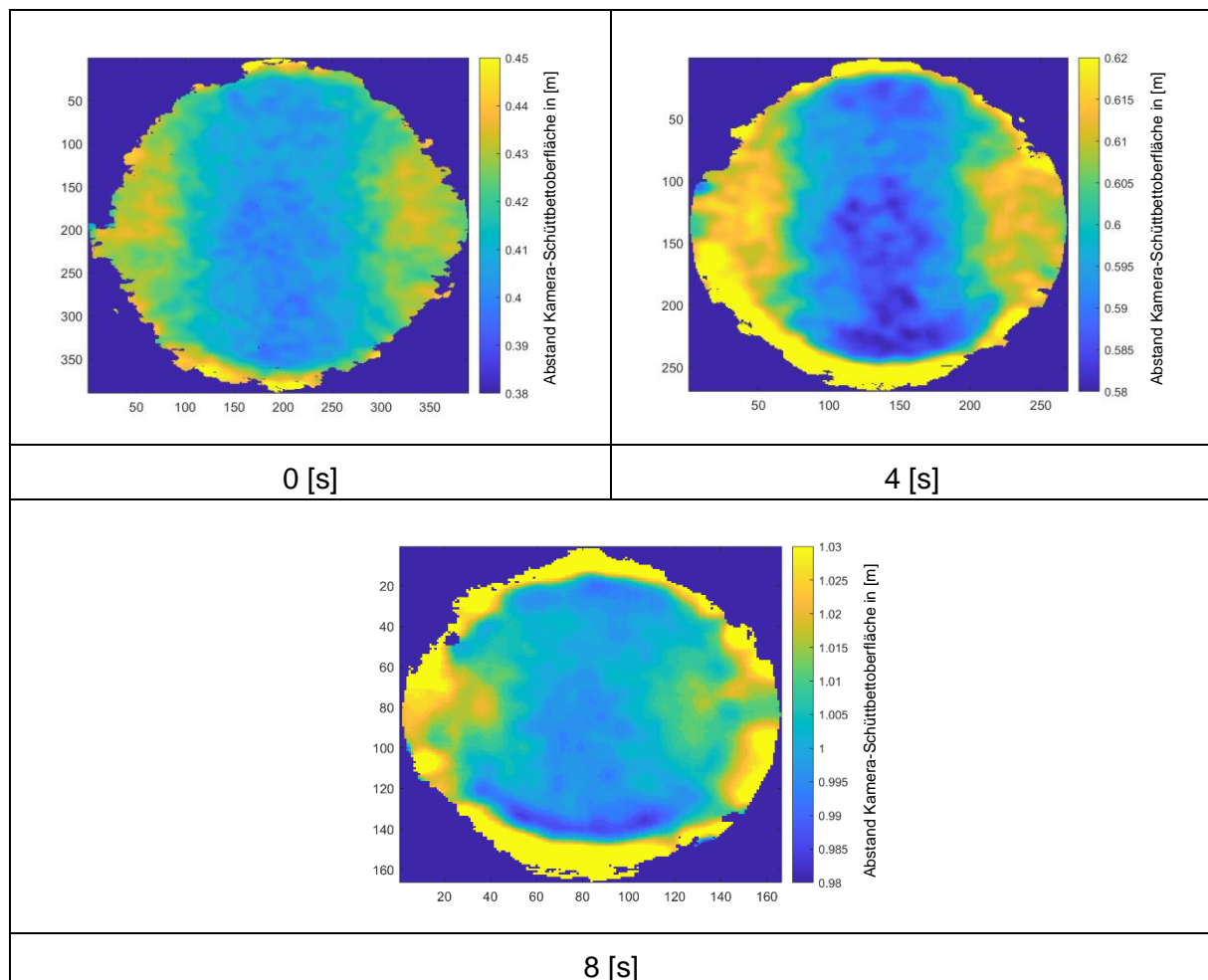


Abbildung 48: Detaillierte Darstellung der Schüttbettoberfläche

Durch die initiale Befüllung entsteht an der Oberfläche der Schüttung eine gut zu erkennende Verteilung. Diese bleibt über die Höhenabnahme der Schüttung über 4 Sekunden nahezu konstant. Erst ab einer Schütthöhe von ca. 0,5 Metern werden am Rand Bereiche sichtbar, bei denen sich Partikel auftürmen (dunkelblauer Bereich). Das Oberflächenprofil ändert sich im Wesentlichen nicht, unabhängig davon, ob ein durchströmter oder nicht durchströmter Versuch betrachtet wird.

Der Effekt eines schnelleren Auslaufens der Partikel bei geringen Volumenströmen im Gegenstrom, wie er im Versuchsrohr der FS1 und den zugehörigen Simulationen erkennbar war, konnte in der Versuchskonfiguration mit radialem Auslass der FS2 zunächst nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Die Versuchskonfiguration wurde daher in der im Folgenden beschriebenen Versuchsreihe angepasst. Dazu wurde die Metallplatte des Stempels unterhalb des Silos durch ein Lochblech ersetzt. Dadurch wurde die radiale Einströmung durch den Austragsspalt durch eine achsparallele Strömung während des Auslaufens ersetzt.

Die Abbildung 49 zeigt die Versuche mit dem Lochblechstempel bei einer Spaltbreite von 30 mm.

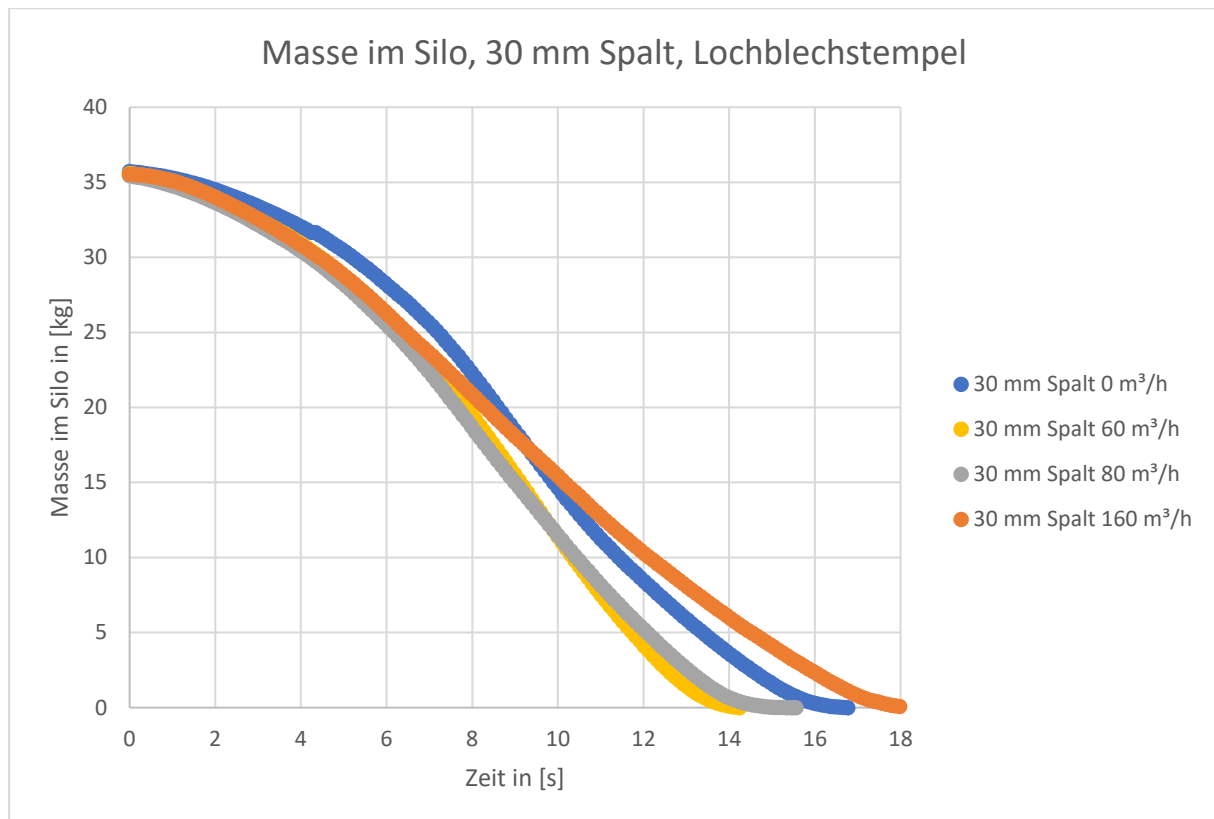


Abbildung 49: Auslaufversuche mit 30 mm Spalt und Lochblechstempel

Hier zeigt sich die anfänglich vergrößerte Auslaufgeschwindigkeit bei allen drei Volumenströmen deutlich. Mit zunehmender Entleerung wird der Feststoffstrom jedoch wieder verzögert, was bei dem Volumenstrom von 160 m³/h dazu führt, dass die Schüttung ab Sekunde 9 langsamer ausläuft als im nicht durchströmten Fall.

Zwischen den Volumenströmen mit 60 und 80 m³/h sind nur geringe Unterschiede zu erkennen.

Experimente mit zentralem Auslass, die dem Ausfluss konventioneller Silos mit flachem Boden entsprechen, sind in den Abbildung 50 und Abbildung 51 exemplarisch für einen Durchmesser der Auslassöffnung von 80 mm bzw. 100 mm bei fehlender Durchströmung und bei einem Gasvolumenstrom von 60 m³/h dargestellt. Bei einem Durchmesser von 100 mm fließt das Schüttgut annähernd doppelt so schnell aus im Vergleich zu einem Durchmesser von 80 mm. Das Auslaufen der Schüttung bei Versuchen mit 80 mm wird schon bei geringen Volumenströmen vollständig verhindert. Für den Versuch mit 100 mm Durchmesser und 60 m³/h ist ein sprunghafter Anstieg des Druckverlustes beim Entfernen des Lochblechs bei ca. 16 Sekunden zu erkennen, obwohl hier der

Druckverlust durch das Lochblech entfällt. Die Ursache hierfür ist in einer kurzzeitigen Veränderung der (lokalen) Permeabilität und/oder der Beschleunigung des Schüttguts zu suchen. Die Druckänderung bei 400 mm fällt geringer aus was auf einen lokalen Effekt in der Nähe der Auslassöffnung schließen lässt.

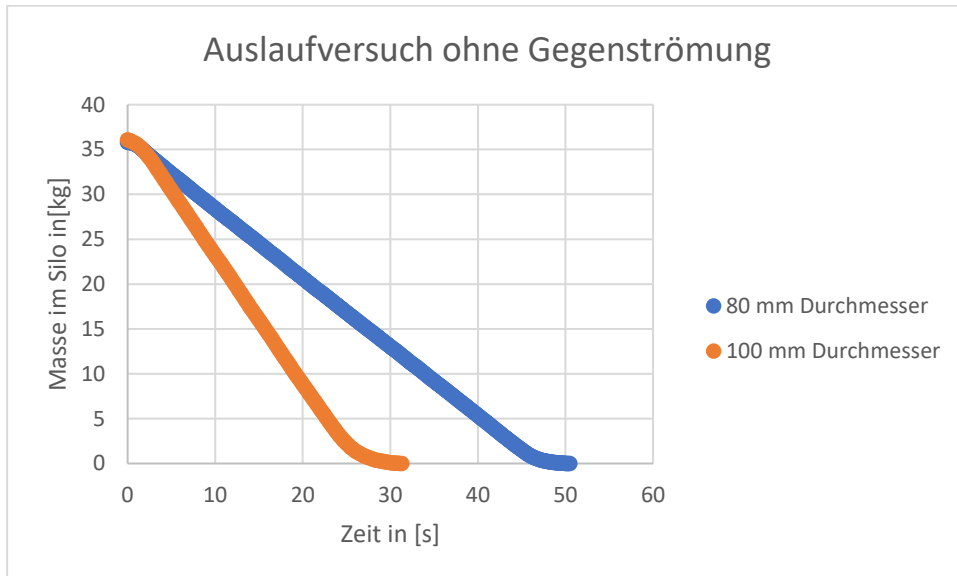


Abbildung 50: Massenausfluss aus Silo mit zentralem kreisförmigem Querschnitt

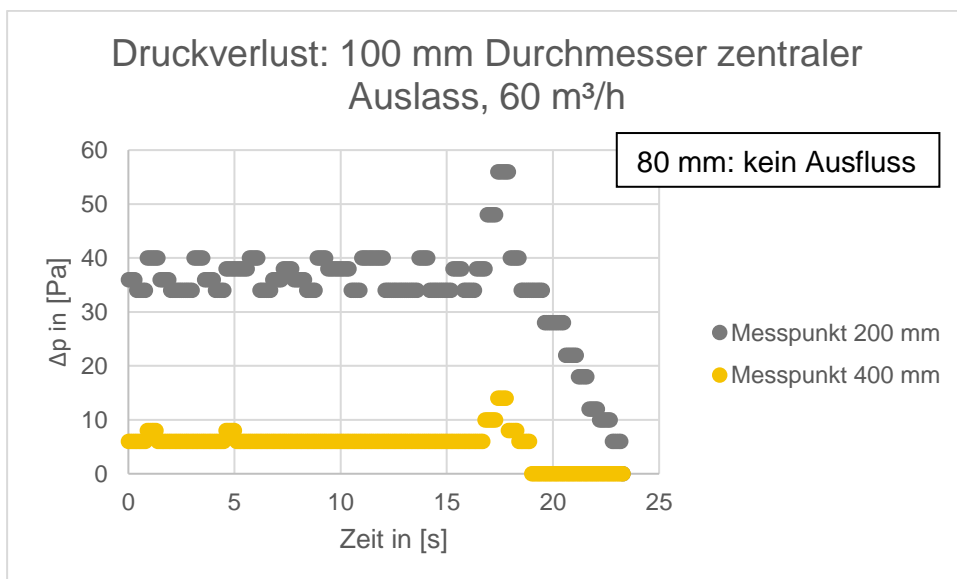


Abbildung 51: Druckverlauf im Silo über der Zeit an der Position 200 mm und 400 mm (kreisförmiger Auslauf)

3.7. Numerische Untersuchung durchströmter, bewegter, idealisierter Schüttungen in der Labor-Versuchseinrichtung (AP 7, FS 2)

Die im AP6 der FS2 durchgeführten Experimente wurden durch zahlreiche vergleichende Simulationen mittels DEM/CFD begleitet. Die Ergebnisse des AP7 sind in die Diagramme der zugehörigen Experimente im Kapitel 3.6 eingepflegt.

3.8. Inbetriebnahme der Pilot-Versuchseinrichtung für reale Schüttgüter (AP 8, FS 1)

Vor der Inbetriebnahme der Pilot-Versuchseinrichtung wurde eine Sicherheitsbetrachtung durchgeführt und von der Sicherheitsfachkraft abgenommen. Die Sensoren wurden vom Hersteller kalibriert und vor Ort gegeneinander abgeglichen. Die Steuerungen der 4 Motoren der Schieber am Materialauslass wurden synchronisiert und die Öffnungsweite bei verschiedenen Versuchsmaterial kalibriert. Dabei klemmten besonders Sinterpartikel gelegentlich zwischen Schieber und Versuchskonstruktion ein, so dass die Motoren nicht öffnen konnten. Messdaten werden über eine Schaltbox und über das C Serien Modul NI9205 von National Instruments an den PC gesendet, wo es von DasyLab verarbeitet wird. Hier sind die Kalibrierungen hinterlegt. Die Daten werden zum einen in Echtzeit visualisiert und zum anderen in eine ASC-Datei geschrieben. In der späteren Auswertung werden die Daten mit einem Excel-VBA Programm weiter aufbereitet. Es wurde ein Ablaufplan erstellt, der unter anderem enthält, wie die Funktion der Anlage vor Versuch zu prüfen und während dem Versuch zu bedienen ist. Dabei wird Wert auf die Dichtigkeit der Anlage und die Funktionsfähigkeit der Sensoren geachtet. Beim Befüllen ist vorgeschrieben, über der Höhe gleichmäßig zu befüllen, um Entmischung zu vermeiden.

3.9. Versuchsdurchführung in der Pilot-Versuchseinrichtung mit realen Schüttgütern (AP 9, FS 1)

Wie bei den Versuchen im Rohr werden stationäre Versuche und dynamische Ausflussversuche durchgeführt. Neben den Unterschieden in der Geometrie sind wesentliche Unterschiede die Anzahl der Luftein- sowie Materialauslässe und der Füllhöhe bzw. Materialmenge. Zusätzlich zu den Materialien Eisenerzpellets, Sinter und Koks werden auch Versuche mit runden Holzpellets durchgeführt. Diese besitzen einen Durchmesser von 10,5 mm und einem Formfaktor von 0,99. Eine wesentliche Verteilung ist nicht vorhanden. Auch dieses Material wurde in Größen- und Formverteilung vermessen. 97% der Partikel haben eine Größe von ca. 10,5 mm. Der kleinste gemessene Wert beträgt 10,3 mm und der größte Wert 10,8 mm.

In Abbildung 52 ist schematisch die Front des Schachts gezeigt und die Luftströme in Blau sowie die Schüttgutströme in Rot dargestellt.

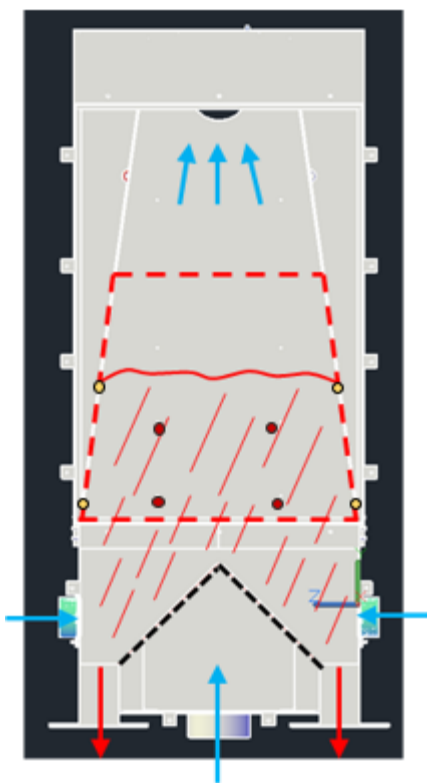


Abbildung 52: Schematische Darstellung der Ausflussversuche

Die gelben Punkte stellen die seitlichen Drucksensoren dar und die roten Punkte sind die Messstellen auf der Rückwand, die für die folgenden Ergebnisse genutzt wurden. Der gestrichelte trapezförmige Kasten ist ungefähr der visuell zugängliche Auswertebereich zur Bestimmung der Schüttgutbewegung (s. unten). Nicht gezeigt sind die Messpositionen mit den Waagen unterhalb der Konstruktion und den

Ultraschallsensoren, die von oben über den roten Druckmessstellen den Füllstand messen.

Die Ermittlung des Partikelgeschwindigkeitsfelds erfolgt mittels einer Kamera durch die Acrylscheibe (Particle Tracking Velocimetry). Die Auswertung der Kamerabilder erfolgte mit „Matlab“. Genutzt werden die Toolboxen „Computer Vision Toolbox“ und „Image Processing Toolbox“ mit den Funktionen „VideoReader“, „opticalFlowFarneback“ und „estimateFlow“. Diese lesen das Video ein, erkennen Objekte in einem Bildframe und bestimmen anschließend durch Wiedererkennung desselben Objektes in den nächsten Frames die Bewegungsrichtung und- geschwindigkeit.

Wie bei dem Versuchsrohr wurden die gleichen Hitzdrahtanemometer genutzt. Auch hier wurden die Geschwindigkeitsfelder der Einlässe und des Auslasses traversiert. Dies wurde bei 400 m³/h, 800 m³/h, 1200 m³/h, 1600 m³/h durchgeführt, um eine Kalibrierung aufzustellen.

3.9.1. Stationäre Versuche im Schachtmodell zur Charakterisierung der Schüttgutdurchströmung

Wie bei den Versuchen im Rohr werden zunächst stationäre Versuche durchgeführt. Das Schachtmodell ist mit 2,8 m Höhe und 1,2 m breite deutlich größer dimensioniert und kann über eine Tonne Material fassen. Es sind daher deutlich geringere Randeffekte bei den Druckverlustmessungen zu erwarten. In Abbildung 53 ist der Druckverlust pro Meter Höhe über der Reynoldszahl aufgetragen.

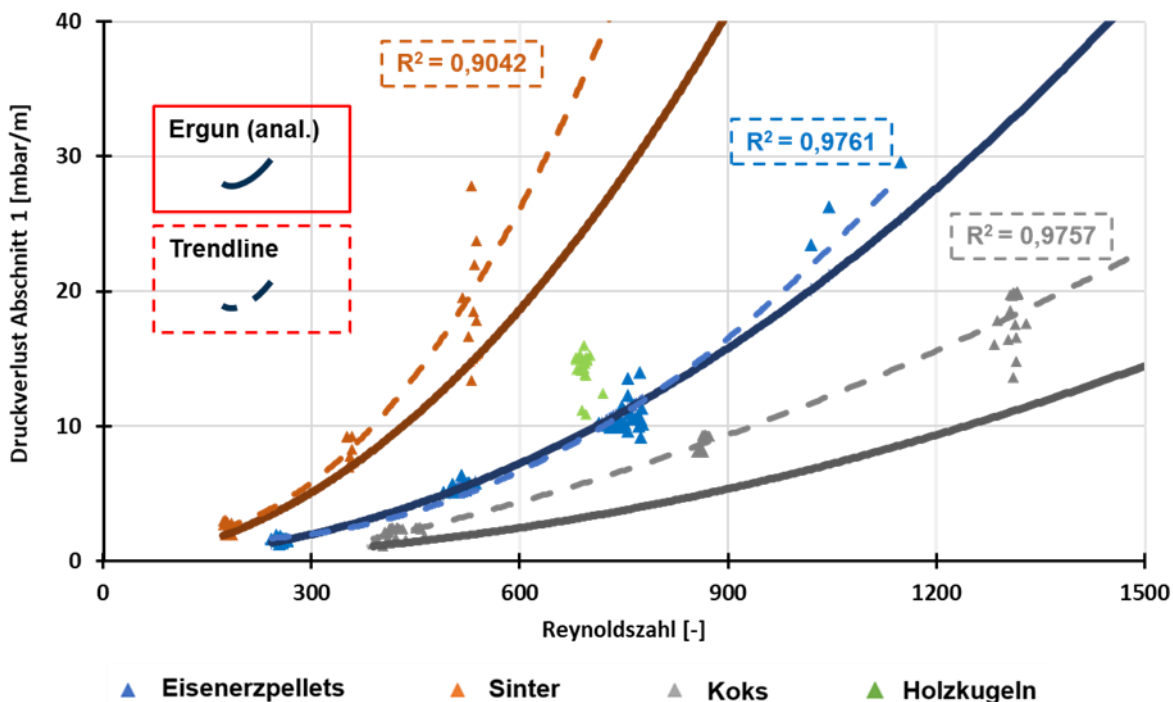


Abbildung 53: Druckverluste der Versuchsmaterialien bei ruhender Schüttung im Schachtmodell

In diesem Diagramm sind zwei Linien für Eisenerzpellets, Sinter und Koks eingetragen. Die durchgezogene Linie entspricht dem Druckverlust nach Ergun. Die gestrichelte Linie zeigt die Trendlinie der Messdaten. Der Druckverlust von Sinter ist bei einer Reynoldszahl von 750 um ca. den Faktor 4 größer als der von Eisenerzpellets und Koks. Zudem hat Sinter auch bei dieser Reynoldszahl bereits eine Streuung von mehr als 10 mbar wogegen die anderen Materialien eine geringere Spanne aufweisen. Dies spiegelt sich auch im Korrelationskoeffizienten R der Trendlinie wider: Eisenerzpellets und Koks besitzen einen ähnlichen Wert von ca. 0,98 und Sinter von 0,90.

Die Berechnung mit der Ergunggleichung gibt den Druckverlust der runden Eisenerzpellets sehr gut wieder. Bei Sinter und Koks fällt auf, dass die Gleichung zu Werten unterhalb der tatsächlich gemessenen Druckverluste führt. Dies wird damit zusammenhängen, dass bei Ergun keine Größen- oder Formverteilung berücksichtigt wird, sondern mit mittleren Partikelgrößen und einer mittleren Partikelform gerechnet wird. In Tabelle 17 wurden die Messergebnisse für ähnliche Volumenströme und Druckverluste zusammengefasst sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen gebildet.

Tabelle 17: Zusammengefasste Ergebnisse ruhender Schüttung im Schachtmodell

	Volumenstrom		Druckverlust	
	Mittelwert [m ³ /h]	Standardabweichung [m ³ /h]	Mittelwert [mbar/m]	Standardabweichung [mbar/m]
<i>Eisenerzpellets</i> (134 Versuche)	410	0,018	1,6	0,072
	812	0,019	5,3	0,054
	1184	0,024	10,4	0,065
<i>Sinter</i> (25 Versuche)	408	0,029	2,5	0,158
	804	0,008	8,3	0,115
	1202	0,012	19,9	0,226
<i>Koks</i> (124 Versuche)	446	0,031	2,4	0,025
	878	0,019	8,9	0,066
	1311	0,008	17,8	0,084
<i>Holzkuugeln</i> (20 Versuche)	1223	0,012	14,2	0,096

Die Druckverluste der von Versuchsrohr und Schacht werden in Abbildung 54 dargestellt.

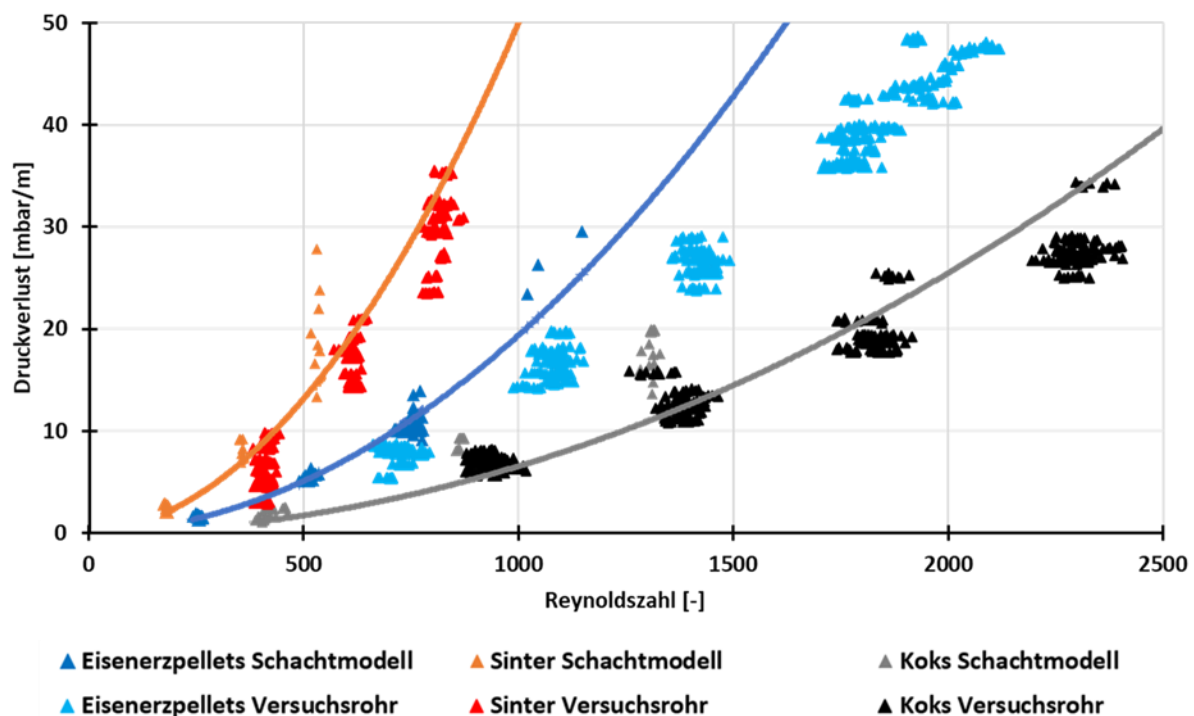


Abbildung 54: Vergleich der Druckverlustmessungen von Versuchsrohr und Schachtmodell

Im Schachtmodell wurden grundsätzlich größere Druckverluste als im Versuchsrohr gemessen. Die niedrigeren Druckverluste beim Versuchsrohr erklären sich durch die größere Randgängigkeit im Versuchsrohr aufgrund des größeren Verhältnisses von Grundfläche zu Umfang. Da am Rand ein geringerer Druckverlust auftritt (zwar erhöhten

Geschwindigkeit aber deutlich reduzierte Porosität) als in der Mitte der Schüttung [3.1.2.2] sinkt der Gesamtdruckverlust. In Tabelle 5 sind die Unterschiede der eingesetzten Materialien zusammengefasst.

In folgender Tabelle 18 sind exemplarisch für jedes Material jeweils ein Versuch die Druckdaten dargestellt. Die entsprechenden Dateinamen sind in der Tabelle angegeben.

Tabelle 18: Beispiel Druckdaten für verschiedene Positionen

Dateiname	<i>Umgebungs- druck [mbar]</i>	<i>Druck Position 1 [mbar]</i>	<i>Druck Position 3 [mbar]</i>	<i>Druck Position 5 [mbar]</i>
<i>Holzpellets_Stationaer_ 800mm_03_V1200_050</i>	1001	985	980	975
<i>Pellets_Stationaer_ 1000mm_01_V1200_035</i>	1010	998	994	991
<i>Sinter_Stationaer_ 800mm_06_V1200_035</i>	1022	985	979	973
<i>Koks_Stationaer_ 1100mm_01_V1200_050</i>	1024	1020	1015	1009

3.9.2. Ausflussversuche im Schachtmodell zur Charakterisierung der Wechselwirkung zwischen Gas- und Feststoffphase

Die Ausflussversuche im Schachtmodell werden analog zum Versuchsrohr durchgeführt. Nachdem die Schüttung im ruhenden Zustand vermessen wurde, werden die Schieber geöffnet. Wie bei dem Versuchsrohr wurde eine minimale Öffnung (Spaltweite) bestimmt, bei der das Material noch ausfließt. Diese minimale Spaltweite ist für Sinter und Eisenerzpellets 60 mm und für Koks 100 mm. Zudem wurde weitere Messungen mit größerer Spaltweite durchgeführt (Sinter und Eisenerzpellets 80 mm, Koks 120 mm). In Abbildung 55 sind die Absinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit der mittleren Luftgeschwindigkeit innerhalb der Schüttung zu sehen.

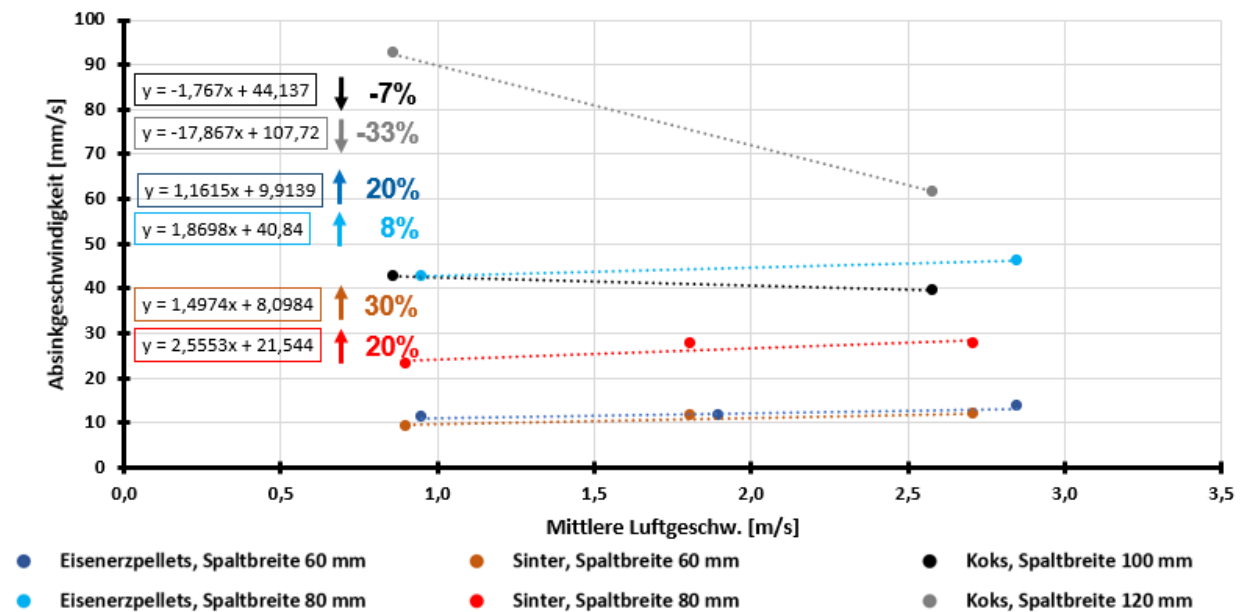


Abbildung 55: Absinkgeschwindigkeiten der Versuchsmaterialien unter Einfluss entgegenströmender Luft im Schachtmodell

Wie bei dem Versuchsrohr steigt die Absinkgeschwindigkeit von den Eisenerzpellets und mit erhöhter Luftgeschwindigkeit bei minimaler Spaltbreite. Dies ist auch noch bei den größeren Spaltweiten der Fall. Nur bei Koks, der eine bedeutend geringere Dichte hat, bewirkt der Gasstrom eine Absenkung der Absinkgeschwindigkeit (Partikelmassenstrom). Im Versuchsrohr ist die Steigerung des Partikelmassenstromes bei minimaler Öffnung bei 5-7 %, wogegen der Einfluss im Schachtmodell bei 20-30% bei gleichen Luftgeschwindigkeiten liegt. Der Vergleich zwischen Eisenerzpellets und Sinter ist interessant, weil diese Materialien eine ähnliche Dichte besitzen. In Tabelle 5 ist eine Übersicht der Materialeigenschaften. Obwohl der mittlere Partikeldurchmesser von Sinter mit 7,8 mm ca. 33% kleiner ist als der Partikeldurchmesser von Eisenerzpellets, ist der Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf Sinter größer. Betrachtet man die stationären Werte aus Abbildung 54, kann man ablesen, dass Sinter etwa den dreifachen Druckverlust bei gleicher Reynoldszahl verursacht. Dies führt dazu, dass der Volumenstrom einen größeren Einfluss auf die Schüttung besitzt und somit die Steigung von Sinter in Abbildung 55 größer ist als von Eisenerzpellets. Zudem sinkt Sinter bei gleicher Schieberöffnung um fast 50% langsamer ab. Der wichtigste Unterschied zwischen diesen beiden Materialien ist der Formfaktor. Sinter hat einen Wert von 0,75, für Eisenerzpellets liegt dieser in den Versuchen bei 0,96 liegt. Die Abweichung ist ca. 22%. Die Form hat einen wesentlichen Einfluss. Der dynamische Schüttwinkel wurde von FS2 vermessen und ist in den Tabelle 11 bis Tabelle 14 aufgelistet. Sinter besitzt mit einem Winkel von

45-47° einen größeren als Eisenerzpellets mit 28-34°. Der größere Winkel führt zu höheren Wandscherkräften, die dem Ausfließen entgegenwirken. In Tabelle 19 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Ausflussversuche im Schachtmodell

<i>Material</i>	<i>Spalt- breite</i>	<i>Gasvolumen- strom (Leerrohr)</i>	<i>Luftge- schwindigkeit in Schüttung</i>	<i>Absinkge- schwindigkeit der Partikel</i>	<i>Partikel- massen- strom</i>
	<i>[mm]</i>	<i>[m³/h]</i>	<i>[m/s]</i>	<i>[mm/s]</i>	<i>[kg/s]</i>
<i>Eisenerzpellets</i>	60	400	0,9	11,3	5,2
$\bar{T} = 21,1\text{ °C}$	60	800	1,9	11,5	4,4
$\bar{p}_U = 1,019\text{ bar}$	60	1200	2,8	13,5	5,2
$\bar{\varphi}_{rel.} = 43,0\text{ %}$	80	400	0,9	42,6	12,3
	80	1200	2,8	46,2	17,4
<i>Sinter</i>	60	400	0,9	9,1	3,0
$\bar{T} = 16,9\text{ °C}$	60	800	1,8	11,5	3,8
$\bar{p}_U = 1,013\text{ bar}$	60	1200	2,7	11,8	4,3
$\bar{\varphi}_{rel.} = 38,2\text{ %}$	80	400	0,9	23,1	8,0
	80	1200	2,7	27,7	8,9
<i>Koks</i>	100	400	0,9	42,6	3,7
$\bar{T} = 17,7\text{ °C}$	100	1200	2,6	39,6	3,2
$\bar{p}_U = 1,004\text{ bar}$	120	400	0,9	92,3	5,1
$\bar{\varphi}_{rel.} = 38,3\text{ %}$	120	1200	2,6	61,6	4,7
<i>Holzkuugeln</i>	50	0	0	12,4	0,3
$\bar{T} = 23,8\text{ °C}$	50	1200	3,1	14,6	0,4
$\bar{p}_U = 1,008\text{ bar}$	100	0	0	60,0	1,6
$\bar{\varphi}_{rel.} = 48,5\text{ %}$	100	1200	3,1	36,5	1,0

Abbildung 56 zeigt Isolinien des Betrags der lokalen Partikelgeschwindigkeit ermittelt durch Particle Tracking Velocimetry für Eisenerzpellets, Sinter und Koks. Rot eingrahmt ist die Schüttung. Der gepunktete Bereich oberhalb Schüttung sind Staubablagerungen und Blasen in der Folie, die durch die Vibration der Scheibe erkannt werden. Oben angegeben ist die flächengemittelte Partikelgeschwindigkeit; diese bleibt über den

gesamten Versuch konstant. Diese deckt sich mit den Messungen mittels Ultraschalles und Waage.

Bei allen Versuchen war eine Leerrohrgeschwindigkeit von $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt. Die Reynoldszahl ist ebenfalls in der Abbildung 56 angegeben. Die Schieberöffnung beträgt jeweils 100 mm . Die Anfangsschütthöhe von Holzkugeln beträgt 800 mm , von Eisenerzpellets 909 mm , von Sinter 817 mm und von Koks 1027 mm .

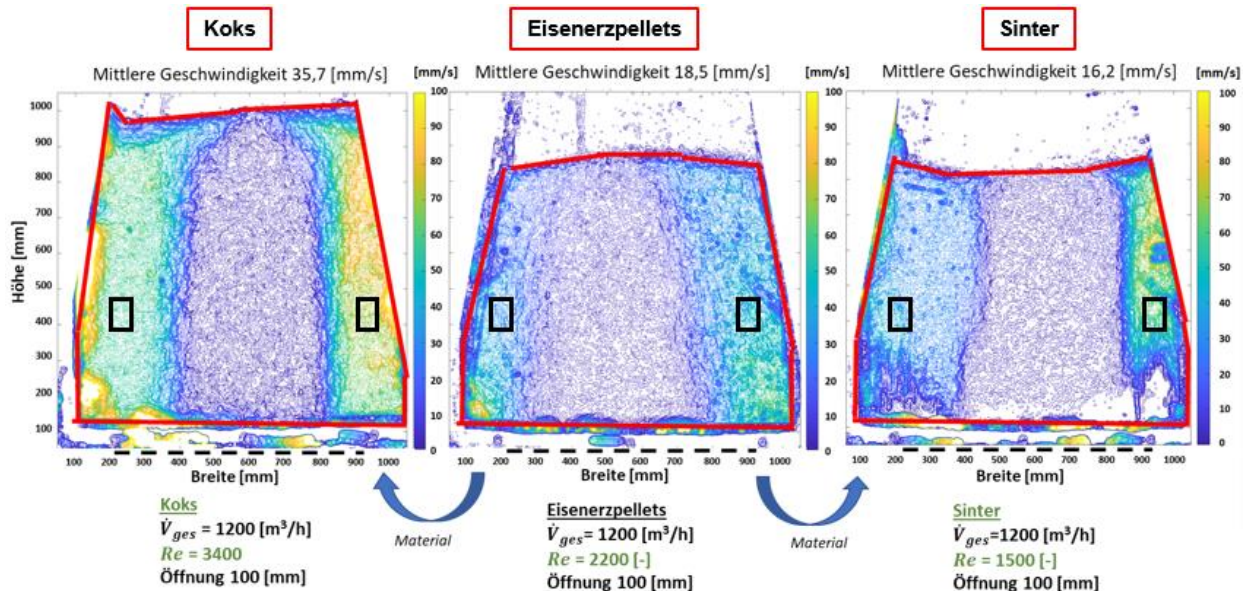


Abbildung 56: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung beim Vergleich von Eisenerzpellets, Sinter und Koks

Zunächst auffällig ist bei allen Versuchen jeweils der Bereich in der Mitte. Dort befindet sich ein Bereich ohne Bewegung. Diese sind evtl. durch die Wandeffekte der vertikalen Front- und Rückwand zurückzuführen. Die Partikel strömen seitlich an diesem Bereich ruhender Partikel vorbei. Dabei zeigt Koks bei gleicher Öffnung und größerem mittleren Partikeldurchmesser eine doppelt so hohe Geschwindigkeit wie die anderen Materialien. Die deutlich geringere Dichte führt dazu, dass die Partikel eine geringere Kraft gegen die Wand ausüben und scheinbar mobiler sind. Betrachtet man die in der Abbildung schwarz umrandeten Bildsegmente über der Zeit, kann man aus der Schwankung der Partikelgeschwindigkeit weitere Informationen gewinnen. In Tabelle 20 sind die Standardabweichung der Geschwindigkeiten aus dem oben gekennzeichneten Bereich angegeben.

Tabelle 20: Standardabweichung der Partikelgeschwindigkeit in einem festgelegten Bereich

**Material Std.Abw. der lokalen Geschw.
über 4 sek [mm/s]**

Eisenerz- pellets	0,168
Sinter	0,048
Koks	0,024

Auffällig ist, dass Eisenerzpellets eine höhere Standardabweichung der Geschwindigkeit aufweisen als Sinter und Koks. Zunächst würde man erwarten, dass runde Partikel gleichmäßiger absinken als Partikel mit vielen Kanten. Diese Aussage deckt sich auch mit dem visuellen Eindruck, wenn man sich die Videos anschaut. Die Eisenerzpellets neigen dazu kurzzeitig Hohlräume an der Wand zu bilden um anschließend nach zu rutschen. Bei Sinter und Koks ist dies nicht zu beobachten.

Diese Auswertung ist über einen Zeitraum von 4 Sekunden geschehen. Um einmal den Versuch über einen längeren Zeitraum darzustellen, sind in Abbildung 57 drei Auswertungen jeweils nach 3 Sekunden zu sehen. Beginnend ist die Folge ab Sekunde 3.

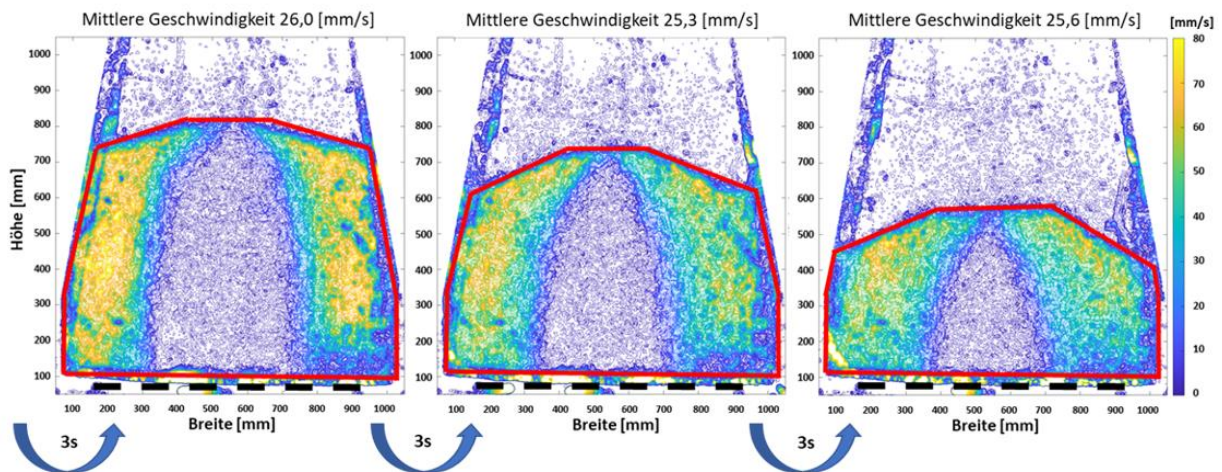


Abbildung 57: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Eisenerzpellets über die Zeit

In diesem Versuch wurden Eisenerzpellets untersucht. Zu sehen ist über dem gesamten zeitlichen Verlauf, dass der ruhende Partikelbereich in der Mitte bestehen bleibt, jedoch seine Größe abnimmt. Die mittlere Geschwindigkeit ist über dem Diagramm angegeben. Diese bleibt – wie schon erwähnt - über der Zeit konstant, wobei die lokale

Geschwindigkeit abnimmt, da die Partikel sich über eine größere Fläche nach unten bewegen.

In Abbildung 58 ist der zeitliche Verlauf für Sinter dargestellt. Hier ist die verstärkte Interaktion mit den seitlichen Wänden anhand zusätzlicher Schüttwinkel an der Wand zu erkennen. Die weißen Flächen im unteren Bereich sind auf die Abrasion der beschichteten Acylglasscheibe zurückzuführen.

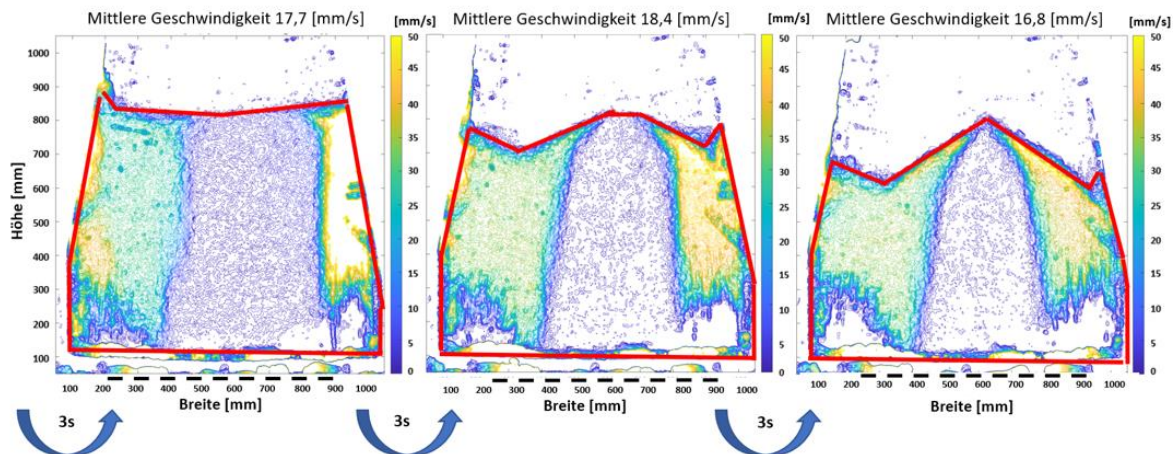


Abbildung 58: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Sinter über die Zeit

Der zeitliche Verlauf des Ausflusses von Koks ist in Abbildung 59 zu sehen. Auch hier ist die Tendenz zu einem zweiten Schüttwinkel zu erkennen, jedoch gegenüber Sinter stark abgeschwächt. Dieses ähnliche Verhalten ist auf fast identische Formfaktoren zurückzuführen.

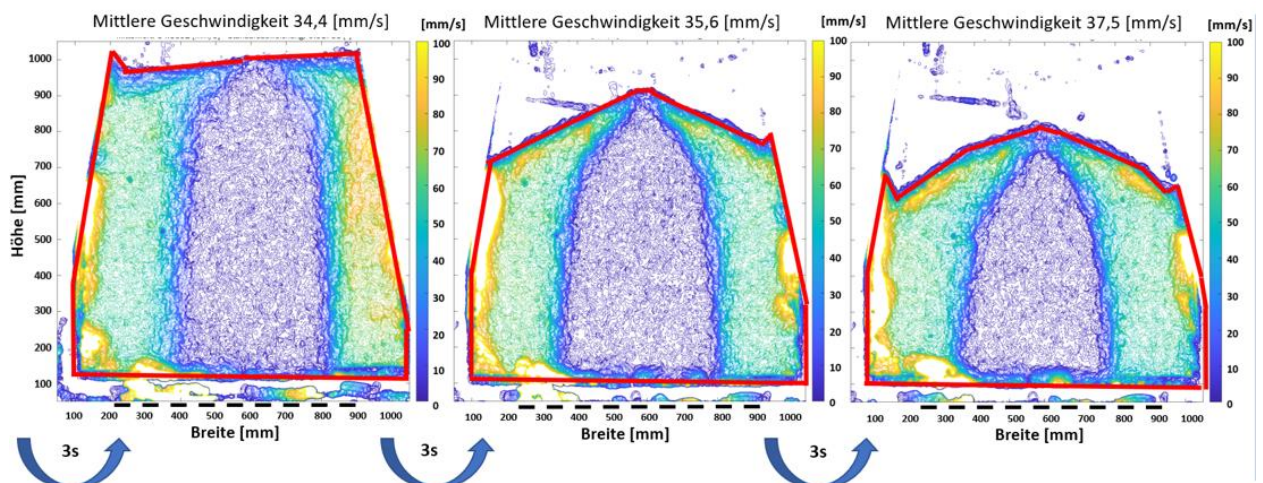


Abbildung 59: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Koks über die Zeit

In Abbildung 60 der zeitliche Verlauf für Holzkugeln und einer Schieberöffnung von 50 mm zu sehen. Ein Schüttwinkel ist kaum zu erkennen.

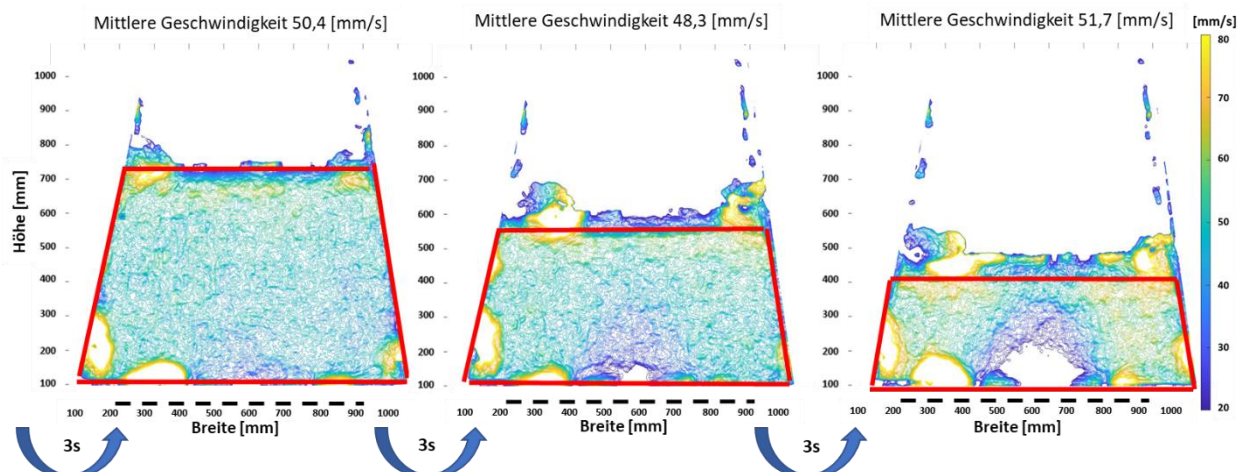


Abbildung 60: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung von Holzkugeln über der Zeit

Ein Bereich ohne wesentliche Bewegung bildet sich erst am Ende des Versuches. Der Unterschied der Holzpellets ist im Wesentlichen die geringere Reibung an den Wänden. Zudem ist auch die Dichte im Vergleich zu Eisenerzpellets und Sinter kleiner.

Es bildet sich, wie in Abbildung 58 und Abbildung 59 zu sehen, ein zentraler Schüttwinkel für Koks, Sinter und Eisenerzpellets aus. Diese wurden grafisch ausgewertet und sind in Tabelle 21 den Versuchen für den dynamischen Schüttwinkel des LEAT's gegenübergestellt.

Tabelle 21: Vergleich der Schüttwinkel gemessen am LEAT und aufgenommen im Schachtmodell

Material	Dynamischer Schüttwinkel gemessen (LEAT) [°]	Schüttwinkel Schacht-konstruktion [°]
Eisenerz-pellets	28-34	25
Sinter	45-47	46
Koks	43-44	31

Eisenerzpellets und Sinter zeigen ähnliche Werte bei beiden Messverfahren. Koks hat hingegen bei der Bestimmung des dynamischen Schüttwinkels einen größeren Wert. Für kontrollierte Prozessbedingungen und einheitliche Produkteigenschaften ist eine enge Verweilzeitverteilung wichtig. In Abbildung 56 wurde festgestellt, dass sich bei Eisenerzpellets, Sinter und Koks ein Bereich ohne Bewegung ausbildet. Sollen Partikel möglichst die gleiche Zeit im Schacht bleiben, müssen demnach Prozessparameter verändert werden. Eine Veränderung der Geometrie, die auch eine Möglichkeit ist, ist im

Rahmen dieser Arbeit nicht angedacht. In Abbildung 57 sind Eisenerzpellets mit ca. 19 mm/s ausgeflossen und wurden mit 1200 m³/h Luft durchströmt. Die nachfolgende Abbildung 61 zeigt nun die in dieser Konstruktion minimal erreichbare Absinkgeschwindigkeit von Eisenerzpellets bei 1200 m³/h und 400 m³/h sowie den Vergleich mit den Holzpellets.

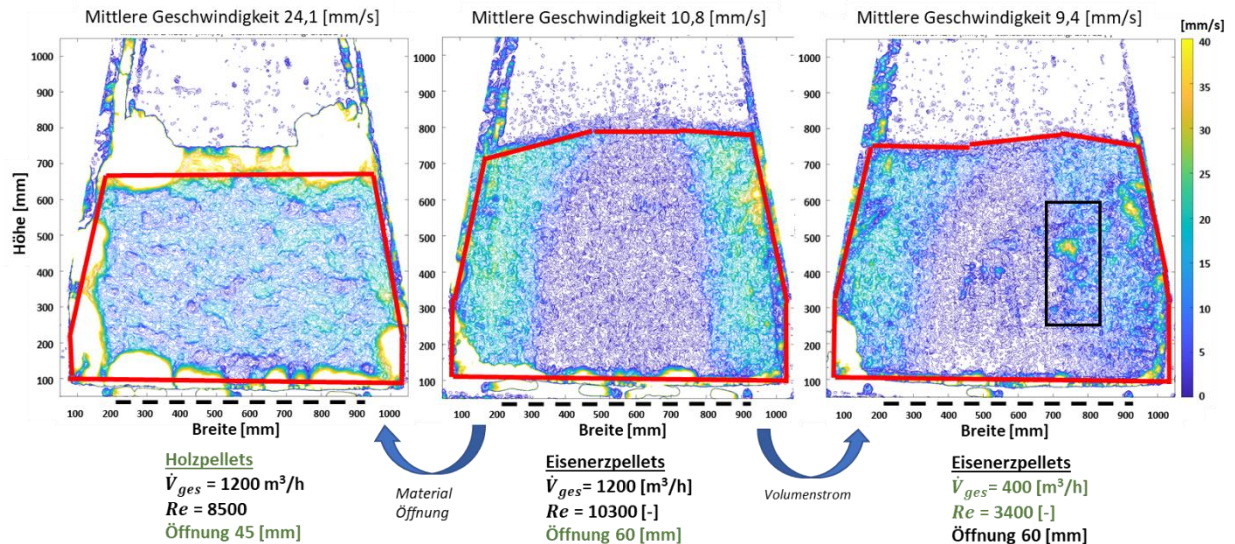


Abbildung 61: Auswertung der Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Partikelbewegung zur Erzeugung einer gleichmäßigen Strömung

Ausgehend von dem mittleren Diagramm, kann man erkennen, dass auch bei geringeren Massenströmen der unbewegte Bereich vorhanden ist. Das rechte Diagramm zeigt Eisenerzpellets mit gleicher Schieberöffnung und reduzierten Gasvolumenstrom. Hier erkennt man im schwarzen Kasten, dass der unbewegte Bereich zeitweise kleiner wird. Im Diagramm ist dies auf der rechten Hälfte sichtbar, aber generell geschieht dies dynamisch auch links. In der Arbeit von Wright et. al. [12] wurde festgestellt, dass der stagnierende Bereich mit ansteigendem Volumenstrom größer wird. Dies ist in Abbildung 61 bedingt zu sehen, jedoch bedingt die dynamische Veränderung bei kleiner Volumenstrom im zeitlichen Mittel einen kleineren Bereich ruhender Schüttung. Die mit erhöhter Gasgeschwindigkeit steigende Ausflussgeschwindigkeit in Abbildung 29 unterstützt diese Aussage.

Ein Versuch mit Holzpellets ist im linken Diagramm zu finden. Diese rutschen gleichmäßig hinunter. Die geringere Oberflächenreibung hat einen positiven Einfluss auf das gleichmäßige absinken.

Ein interessanter Ansatz ist es ruhende und bewegte Schüttung durch Druckmessungen zu unterscheiden, wenn diese nicht durch eine Acrylscheibe sichtbar sind. Im Kapitel 3.1.2.3 wurde festgestellt, dass bei bewegter Schüttung aus den Messwerten eine

geringere Permeabilität errechnet wird. Jetzt zeigt das Schachtmodell die Situation, dass die Mitte der Schüttung ruht und die Seiten fließen. Im Schachtmodell wurden mittig und an den Seiten Messanschlüsse installiert, um dort die Drücke zu messen und die Permeabilität lokal zu bestimmen. In Abbildung 62 ist im linken Diagramm die Permeabilität mit den mittig gelegenen Druckverlustmessung und im rechten Diagramm die Permeabilität mit den seitlich gelegenen Druckverlustmessung dargestellt (1200 m³/h). In der Zeichnung sind die entsprechenden Messstellen rot für „mittig“ und gelb für „seitlich“ eingetragen. Die Ergebnisse entsprechen dem Mittelwert aus jeweils 3 Versuchen.

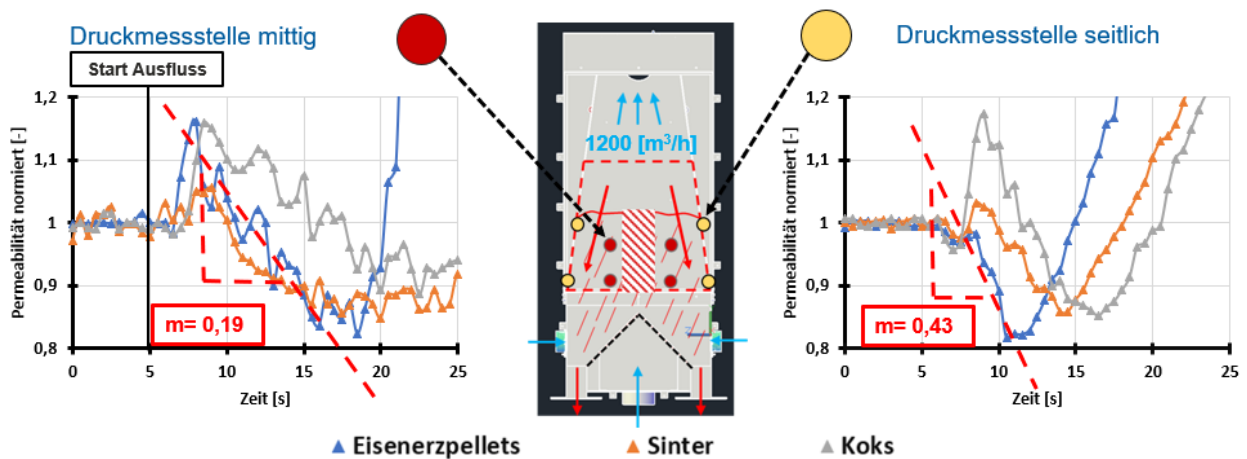


Abbildung 62: Permeabilitätsänderung während des Ausfließens der Versuchsmaterialien im Schachtmodell. Links: Mittige Permeabilitätsänderung, Rechts: Seitliche Permeabilitätsänderung

Die normierte Permeabilität ist über der Zeit aufgetragen. Die ersten fünf Sekunden ruht die Schüttung. Anschließend werden die Schieber geöffnet mit ca. 20-30 mm/s. Nach einer Permeabilitätsspitze fällt, wie auch im Versuchsrohr, dieser Wert bis auf 80-90% des Ursprungswertes bei allen Versuchsmaterialien. Interessant ist die Permeabilitätsspitze, die zeigt, dass das Material für einen Moment lockerer gepackt, bzw. die Porosität kurzzeitig erhöht war. Eisenerzpellets, Sinter und Koks zeigen auch im Schachtmodell eine unterschiedliche Steigung des zeitlichen Permeabilitätsverlaufs. Eingezeichnet in die beiden Diagramme ist die Steigung für Eisenerzpellets. Wie im Video zu erkennen, setzt die Bewegung der Schüttung in der Mitte später ein. Auch die Permeabilitätsänderung tritt um ca. 3 Sekunden später auf. Die Schüttung strömt hauptsächlich an den Seiten und hier ist die Permeabilitätsänderung, um mehr als den Faktor 2 erhöht. In Tabelle 22 sind die Daten der Versuche zu sehen.

Tabelle 22: Versuchsdaten für die vorgestellten Permeabilitätsmessungen

Material	Partikelstrom [kg/s]	Permeabilität zu Beginn [m²/(Pa*s)*10⁶]
Eisenerzpellets	17,4	0,11
Sinter	4,2	0,04
Koks	6,4	0,03

Diese Ergebnisse sollen nun genutzt werden, um anhand der Permeabilität asymmetrische Ausflüsse zu messen, also ein Doppelschieber wird weiter geöffnet als der andere. Im nachfolgenden Beispiel wird aus der Kameraperspektive betrachtet links weiter geöffnet als rechts. Tabelle 23 zeigt die Versuchsbedingungen und den Unterschied zwischen den beiden Seiten. Der Volumenstrom war ca. 1200 m³/h. Untersucht wurde Sinter.

Tabelle 23: Versuchsdaten für den asymmetrischen Ausfluss mit Fokus auf die Permeabilität

	Wert „Links“	Wert „Rechts“	Verhältnis „Links“/„Rechts“
Massenstrom [kg/s]	4,63	2,04	2,28
Steigung der Permeabilität [m ² /(Pa*s)/s]	-0,079	-0,028	2,82
Öffnung [mm]	47	29	1,62

Der Massenstrom wurde „links“ mehr als verdoppelt. Dies führt zu einer deutlicheren negativen Steigung der Permeabilität von -0,079 auf der linken Seite, was dem 2,8-fachen von der rechten Seite entspricht. In Abbildung 63 ist links das Geschwindigkeitsfeld der Partikel und rechts der Druckverlust und die Permeabilität über der Zeit für die seitlichen Sensoren aufgetragen.

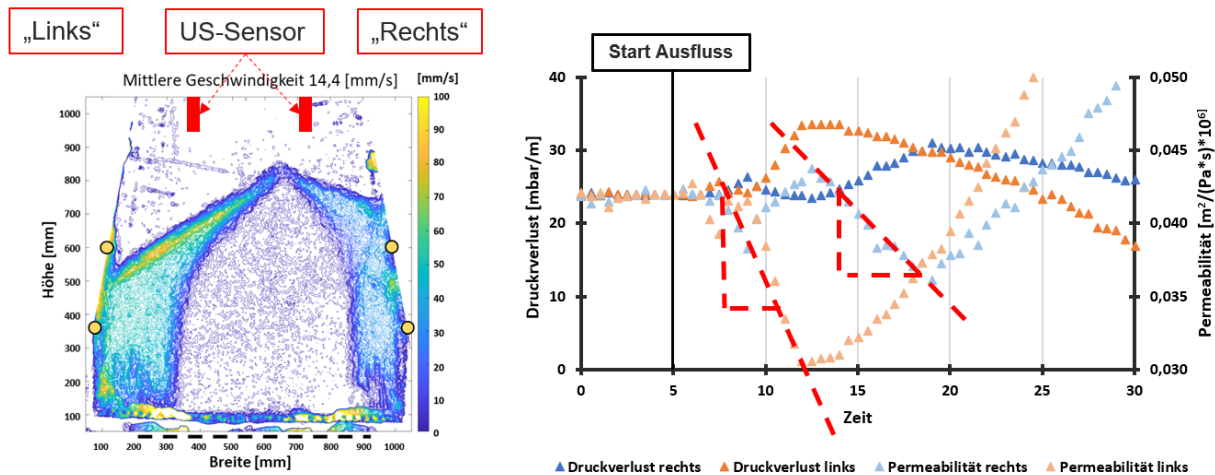


Abbildung 63: Betrachtung eines asymmetrischen Ausflusses von Sinter mit Fokus auf die Permeabilitätsänderung. Links: Geschwindigkeitsfeld der Partikel, Rechts: Permeabilität über der Zeit

Es ist erkennbar, dass die linke Seite deutlich schneller absinkt. Die Messung mit den Ultraschallsensoren ergab, dass links die Geschwindigkeit 11,1 mm/s und rechts 6,9 mm/s war. Die mittlere Geschwindigkeit im gesamten Bereich betrug 14,4 mm/s und wurde über die Videoauswertung bestimmt. Im rechten Diagramm sind mit der intensiveren Färbung die Druckverluste und mit den blässeren Farben die Permeabilitäten zu sehen. Der Druckverlust steigt auf der rechten Seite mit geringerer Absinkgeschwindigkeit geringer an als auf der linken Seite. Der Abfall nach dem Maximum ist auf die geringere Schütthöhe zurückzuführen, die ab dem Zeitpunkt vermessen wird. Die Steigung ist proportional zur Absinkgeschwindigkeit. Die Werte der Permeabilität stammen aus Tabelle 22. Wie erwartet sinkt diese bei bewegter Schüttung schneller, so dass man aus diesen Daten auch ohne visuelle Bestätigung die Bewegung einer Schüttung auch bei asymmetrischer Schüttgutbewegung erkennen kann. Problematisch ist, dass die lokale Gasgeschwindigkeit in der Schüttung nicht gemessen werden kann. Das führt dazu, dass dieser Wert nur über die Hitzdrahtanemometer an den Eingängen abgeschätzt werden kann. Eine ähnliche Situation besteht auch in der Prozessindustrie. Drucksensoren können zwar gut positioniert sein, jedoch wird die Gasgeschwindigkeit nicht gemessen. In Abbildung 63 ist zu erkennen, dass die Permeabilität sensibler als die reine Druckverlustmessung reagiert.

3.9.3. Fehlerbetrachtung der Versuche im Schachtmodell

Neben dem reinen Fehler der Messgeräte treten noch weitere Quellen für Ungenauigkeiten auf. In Kapitel Partikelanalyse wurde schon gesagt, dass

Abnutzungserscheinungen an den Partikeln auftreten, diese jedoch nur geringen Einfluss auf die Verteilungen haben. Beim Befüllen des Schachtmodells und beim Ausfließen der Schüttung fällt Feinmaterial durch das mittlere Sieb und teilweise durch die Schlitze der Schieber. Dieser Abrieb wird nach jedem Versuch nach einer festen Methode aufgesammelt, gewogen und notiert.

Eisenerzpellets besitzen keinen wesentlichen Materialverlust. Es entsteht lediglich Staub, der welcher über die Absaugung aus dem System entfernt wird. Generell wird der Anstieg des Druckverlustes im Filter gemessen und notiert. Diese Daten dienen aber nur der Planung zum Austausch der Luftfilter.

Koks besitzt einen gewissen Abrieb und Materialverlust. Werden in den Schacht befüllt wurde die Konstruktion mit ca. 320 kg Koks eingebracht, dann entsteht ein. Der Abrieb beim Ausfließen von ist mit ca. 30 g pro Versuch, aber lediglich ein Abrieb beim Befüllen von ca. 3 g. um den Faktor 10 höher als beim Befüllen mit ca. 3 g. Sinter wurde mit ca. 810 kg befüllt und hat einen deutlich höheren Materialverlust von 177 g beim Ausfließen und 73 g beim Befüllen. Hier scheint der Unterschied bei den Materialverlusten mit einem Faktor von 2,4 deutlich geringer zu sein. Dies zeigt, dass der Aufprall aus der Befüllhöhe von über 2,8 m Höhe bei Sinter anteilig einen größeren Einfluss hat als bei Koks. Um den Einfluss der Partikelformänderung auf die Versuche zu verfolgen, wurden die dimensionslosen Druckverluste ψ über der Anzahl der Versuche aufgetragen. Nach Gleichung 3 wurde diese berechnet [7].

$$\psi = \frac{\Delta p \cdot d_p}{H \cdot \rho \cdot u^2} \quad (30)$$

Die Auftragung der Ergebnisse ist in Abbildung 64 zu sehen.

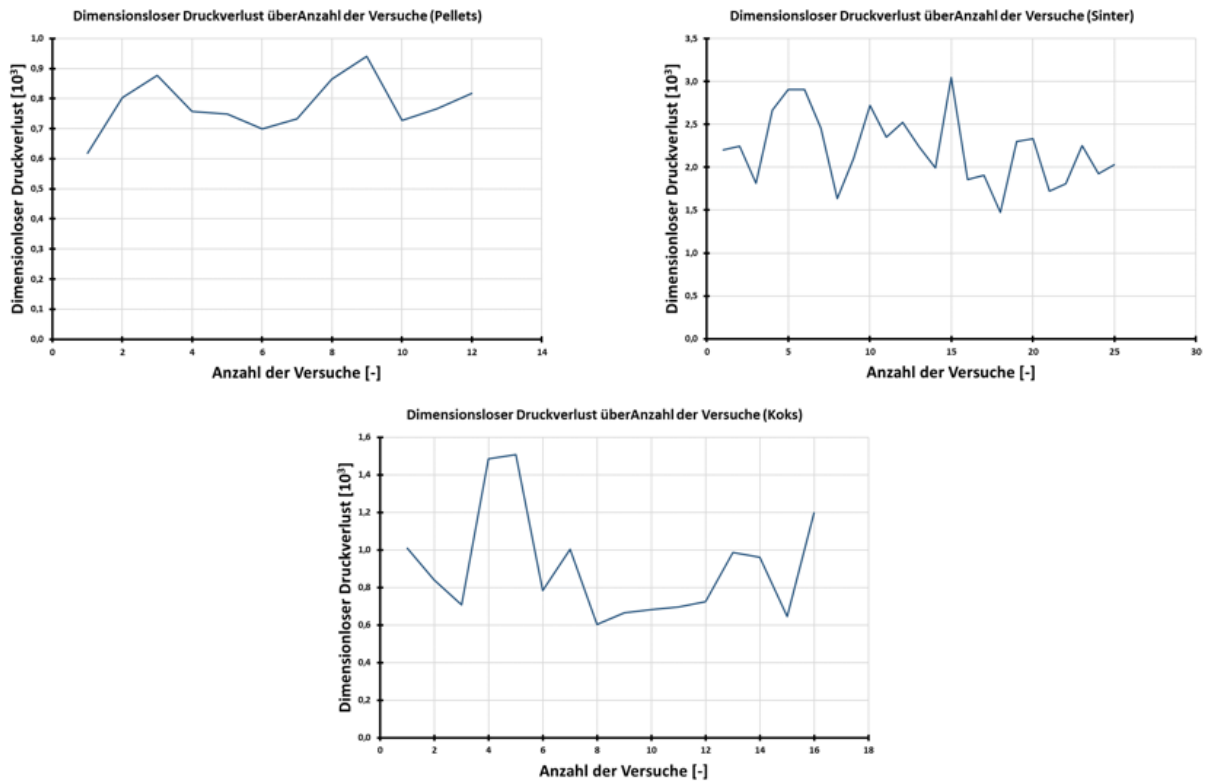


Abbildung 64: Vergleich des dimensionslosen Druckverlustes über der Anzahl der Versuche zur Qualitätsüberwachung der Versuchsmaterialien

Zu erkennen ist, dass die dimensionslosen Druckverluste bei allen Versuchsmaterialien über der Zeit näherungsweise konstant sind. Dabei haben die Eisenerzpellets eine geringere Schwankung als Sinter und Koks. Sinter besitzt einen mittleren dimensionslosen Druckverlust von 2,2, Koks von 0,9 und Eisenerzpellets von 0,8. Die Konstanz des Druckverlustes über der Anzahl der Versuche zeigt, dass der Widerstand der Materialien gegen die Luftströmung sich nicht wesentlich ändert. Aus diesen Daten wurde geschlossen, dass die Versuche untereinander vergleichbar geblieben sind. Für den Massenfluss der Schüttung ist es essenziell, dass die Schieber zuverlässig öffnen. Da bei den Schiebern regelmäßig Partikel eingeklemmt wurden, konnten die Schieber trotz Kalibrierung in Abhängigkeit der zufälligen Positionierung der Partikel nicht immer gleich öffnen. Eine Zusammenfassung dieser Daten findet sich in Tabelle 24.

Tabelle 24: Abweichung der Schieberöffnung vom Sollwert

Material	Sollwert [mm]	Mittlere Öffnung [mm]	Standard- abweichung [mm]
Eisenerzpellets	30	31,7	5,7
	40	42,5	4,1
Sinter	30	27,6	4,4
	40	38,1	3,8
Koks	50	50,5	2,0
	60	59,6	3,4

Vor allem Sinter hat in der Praxis zu häufigeren Problemen geführt. Die scharfen Partikel haben sich zwischen Schieber und Konstruktion geklemmt, so dass nicht bzw. nur teilweise geöffnet werden konnte. Die größten Hindernisse traten beim Anfahren auf. Mittlerweile wurde die Kraft der Motoren vergrößert und ein Regelschaltkreis eingebaut, der den Schieber zuverlässig bis zu einem Sollwert auffährt.

Weniger für die direkte experimentelle Arbeit jedoch für den Vergleich zur Simulation, sind Durchbiegungen der Wände interessant. Wenn das Schachtmodell nicht gefüllt ist, sind die Wände nach Konstruktionszeichnung gerade. Nach dem Befüllen biegen sich die Seitenwände jedoch durch. Diese Durchbiegung verändert die tatsächliche Geometrie der Konstruktion und kann zu Unterschieden zwischen Versuch und Simulation führen. Um die Durchbiegung zu quantifizieren, wurden an beiden Seiten jeweils 3 Messpunkte ausgewählt und nach jeder Befüllung vermessen. In Abbildung 65 sind die Messpositionen von der linken Seite eingetragen. Gespiegelt sind diese auch auf der rechten Seite.

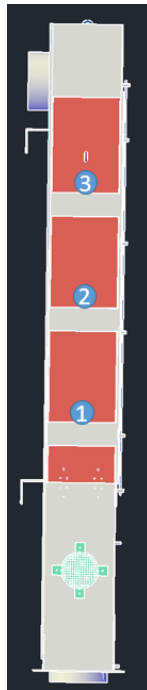


Abbildung 65: Zeichnung des Schachtmodells von der Seite mit Messposition für Wandverbiegung

Die Messpositionen sind von unten nach oben durchnummeriert. Gemessen wird der Abstand der Wand zur äußeren Kante der Konstruktion. Dieser Wert wird nach jedem Versuch dokumentiert und den entsprechenden Versuchsdaten zugeordnet. In Tabelle 25 sind die gemittelten Ergebnisse aller Versuchs aufgetragen. Eine Änderung der Biegung über der Zeit wurde nicht festgestellt.

Tabelle 25: Vermessung der Wandbiegung des Schachtmodells

Position	1	2	3
Sollwert [mm]	55	63	72
Abweichung	-10,4	1,1	6,4
Eisenerzpellets [%]			
Abweichung	-9,9	1,2	6,3
Sinter [%]			
Abweichung	-8,7	1,7	6,5
Koks [%]			

Es sind nacheinander in den Spalten die Positionen 1 bis 3 eingetragen. Der Sollwert in Millimetern steht über den jeweiligen prozentualen Abweichungen der Versuchsmaterialien. Man erkennt, dass unten in der Versuchskonstruktion aufgrund der Belastung durch die Schüttung eine Ausbeulung nach außen auftritt mit ca. 9-10 % des

Sollwertes. Die Position 2 in der Mitte liegt bei +1 % und die obere Position 3 ist mit ca. 6 % nach innen gewölbt. Die Wölbung nach innen geschieht aufgrund des Unterdruckes, der durch die Absaugung geschieht. Um das nach innen bzw. nach außen Beulen zu verringern, wurden zum einen Drahtseile gespannt und nach dem Projekt quer Verstrebungen aufgeschweißt.

Die Strömung wird mit vier, auf dem Prinzip eines Hitzdrahtanemometers basierenden Sensoren erfasst. Einer ist am Ausgang montiert und misst den Gesamtvolumenstrom. Drei weitere Sensoren sind an den Eingängen linke Seite, rechte Seite und im Haupteinlass jeweils mittig angeordnet. Eine Volumenstrombilanz sollte in etwa Null ergeben. Die Messstellen vom Eintritt und Austritt sind ca. 6 m voneinander entfernt, so dass zusätzlich eine Zeitverzögerung vorhanden ist. Bei durchschnittlichen Luftgeschwindigkeiten 4-12 m/s sind das ca. 0,5-1 Sekunde. Dazu kommt noch eine geringe Dichteänderung aufgrund der Druckunterschiede von 1-3 %. In Abbildung 66 sind Beispielmessungen mit Angaben von Luftgeschwindigkeit, Volumenströmen und Absinkgeschwindigkeiten gezeigt.

› Eisenerzpellets

› Sinter

› Koks

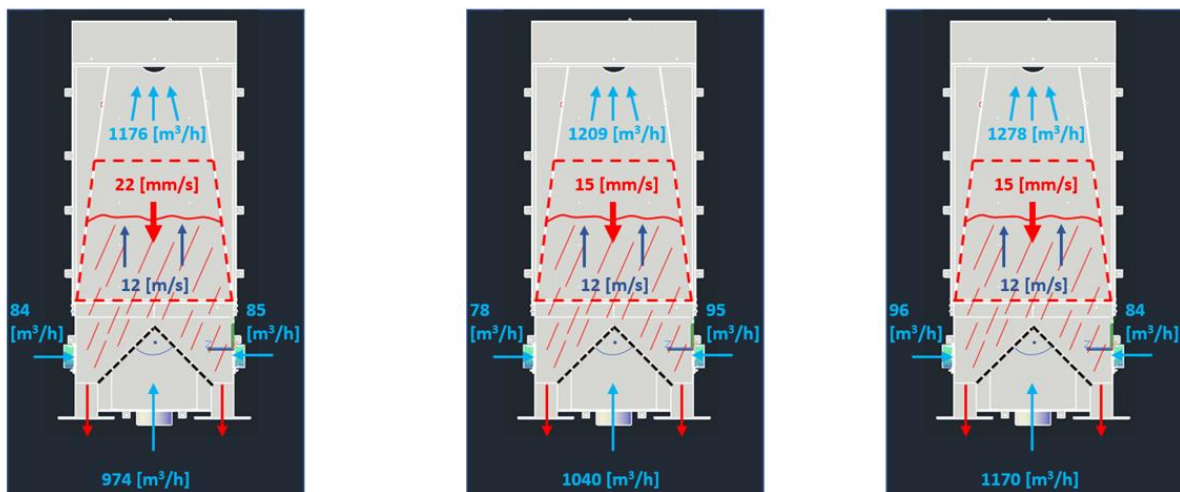


Abbildung 66: Beispielmessungen mit Prozessdaten für den Vergleich der Bilanz des Volumenstromes

Generell lagen die Ungenauigkeiten der Bilanz mal im negativen und mal im positiven Bereich. Jedoch konnten die Messwerte genutzt werden, um Undichtigkeiten oder Defekte bei den Sensoren festzustellen. In Tabelle 26 sind die Spannen der Messfehler aufgelistet. Dabei wird zwischen den stationären Versuchen mit ruhender Schüttung und den dynamischen Versuchen mit ausfließendem Material unterschieden.

Tabelle 26: Bilanzfehler der Volumenströme bei ruhender und bewegter Schüttung

	Eisenerzpellets	Sinter	Koks
Bilanzfehler stationär	± 6%	± 4%	± 10%
Bilanzfehler dynamisch	± 12%	± 13%	± 17%

Koks weist den größten Bilanzfehler mit 10 bzw. 17% auf. Interessant und plausibel ist, dass bei einer dynamischen Änderung des Prozesses die lokalen Messungen größere Unterschiede aufweisen. Für die Nutzung von Prozessdaten und dem Vergleich von Volumenstrom- und Druckverlustmessungen zeigt dies eine erhöhte Ergebnisunsicherheit.

3.10. Begleitende Simulationen der Pilot-Versuche mit realen Schüttgütern (AP 10, FS 2)

Für die Simulation des Pilotversuchstandes beim BFI musste zunächst das bereitgestellte CAD-Modell in ein für die DEM-Simulation geeignetes Format überführt werden. Das benutzte Datenformat beim CAD-Modell ist „dwg“ und wurde dazu in ein „stl“ Format umgewandelt. Gleichzeitig wird die geometrische Komplexität der Versuchseinrichtung reduziert, da bei der DEM nur die Wände mit Partikelberührung berücksichtigt werden müssen.

Abbildung 67 zeigt den Vergleich zwischen DEM-Geometriemodell und der CAD-Konstruktionszeichnung als Wireframe.

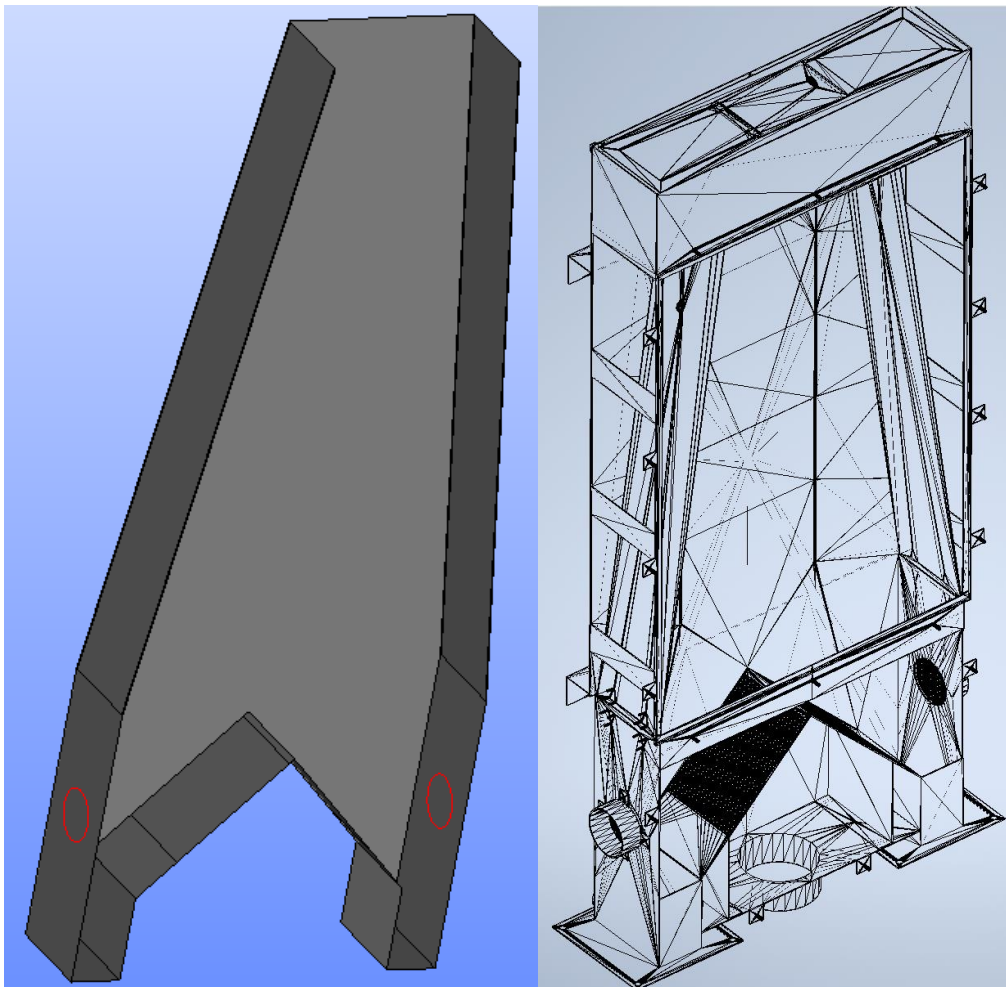


Abbildung 67: vereinfachtes Simulationsschachmodell (links), Konstruktionszeichnung (rechts)

Durch das Lochblech (schwarzer Bereich im rechten Bild) wird der zentrale Volumenstrom in die Versuchsanlage eingebracht. Der experimentell ermittelte Volumenstrom wurde über eine entsprechend gleich große Fläche im Simulationsmodell aufgeprägt. Gleiches gilt für die rot markierten seitlichen Einlässe. Zudem wurde der

Spalt, der zwischen den oberen verstellbaren Seitenwänden besteht, modelliert. Der dort auftretende Druckverlust kann somit in der Simulation berücksichtigt werden.

Die Nutzung der vertikalen Symmetrie (Halbmodell der rechten oder linken Seite) hätte im Prinzip eine Reduktion des Rechenaufwands gestattet, dies wurde aber bewusst vermieden, um eine Schiefelage zwischen den zwei Ausflusseiten und die daraus resultierende Verlagerung der Strömung nicht schon durch die Randbedingungen zu unterdrücken.

Für die Simulation der korrespondierenden Experimente wurden im Schacht 484.000 monodisperse Holzkugeln von 10 mm Durchmesser und 285.000 Eisenerzpellets mit einem Durchmesser von 12,1 mm eingesetzt. Beide Schüttungen wurden zunächst ohne Feststoffausfluss mit 1200 m³ Luft (Aufteilung wie in Abbildung 66) durchströmt, wobei sich im Fall der Holzkugeln ein Druckverlust von 17,35 mbar/m und der Eisenerzpellets ein Druckverlust von 12,9 mbar/m einstellte. Diese Werte liegen jeweils 3 mbar über den im Experiment ermittelten Daten (s. Abbildung 53), geben aber das richtige Verhältnis wieder.

Für eine Spaltweite von 80 mm im Ausflussquerschnitt sind in Abbildung 68 die Vertikalgeschwindigkeiten der Holzkugeln (links) und der Betrag der Gasgeschwindigkeit (rechts) im Mittelschnitt der Berechnungsdomäne zu einem Zeitpunkt 2,5 Sekunden nach der Öffnung des Schiebers dargestellt. Im Feststoffgeschwindigkeitsfeld zeigt sich hier schon die Entwicklung der im Experiment aufgetretenen Stagnationszone (dunkleres Blau) oberhalb der mittleren Gaseinströmung durch die Lochbleche und das Abfließen durch die seitlichen Auslässe. Im Gasgeschwindigkeitsfeld, das die physikalische Geschwindigkeit (höhere Werte im Bereich der Versperrung durch den Feststoff) visualisiert, ist die Schüttgutoberfläche, an der die Werte auf die Leerrohrgeschwindigkeit abfallen, deutlich zu erkennen. Auch die Einströmungen durch die seitlichen Öffnungen und die schräg angeordneten Lochbleche sind erkennbar. Die Versperrung durch das Schüttgut verursacht hier bereits im Nahfeld eine Umverteilung des Gasstromes und verhindert ein tiefes Eindringen.

Für die Eisenerzpartikel findet sich die entsprechende Darstellung in Abbildung 69.

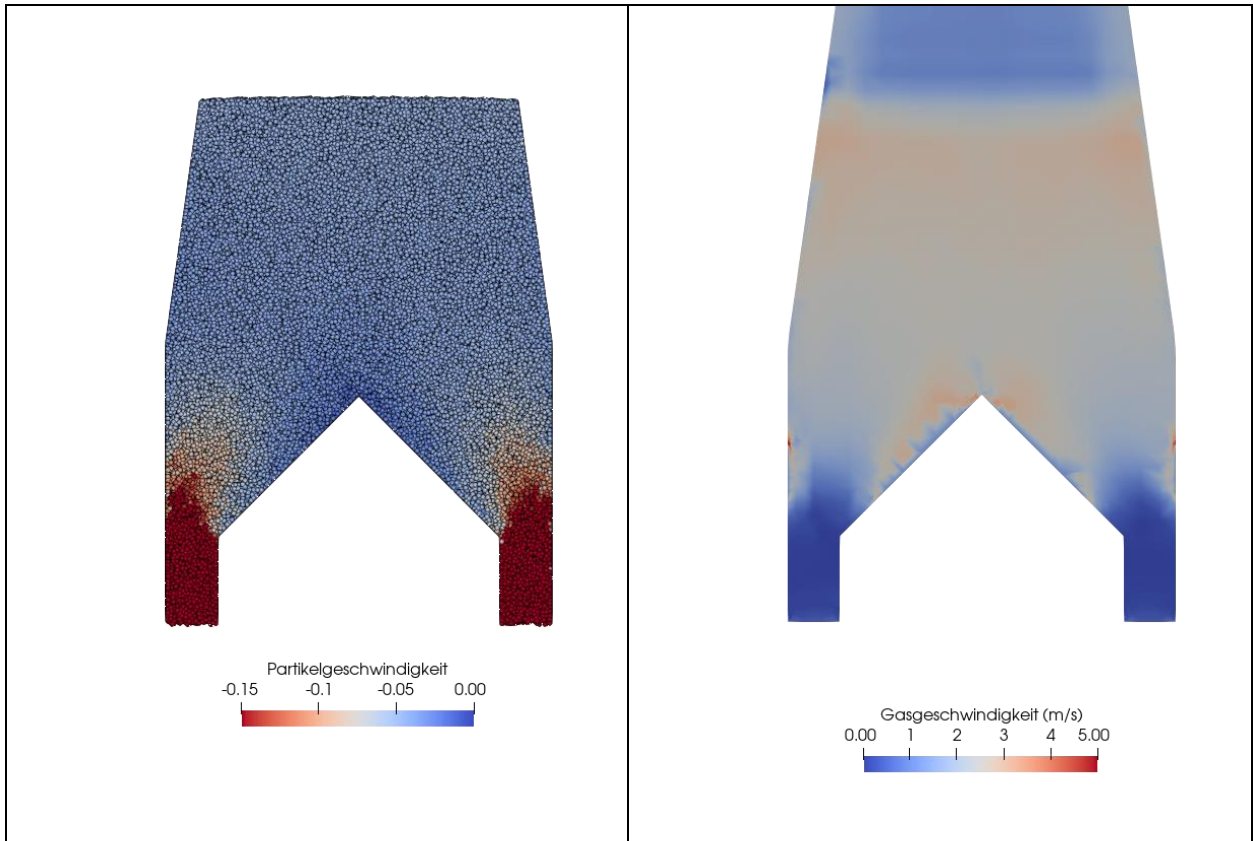


Abbildung 68: Vertikale Partikelgeschwindigkeiten (Holz) im Mittelschnitt bei 80 mm Spaltweite

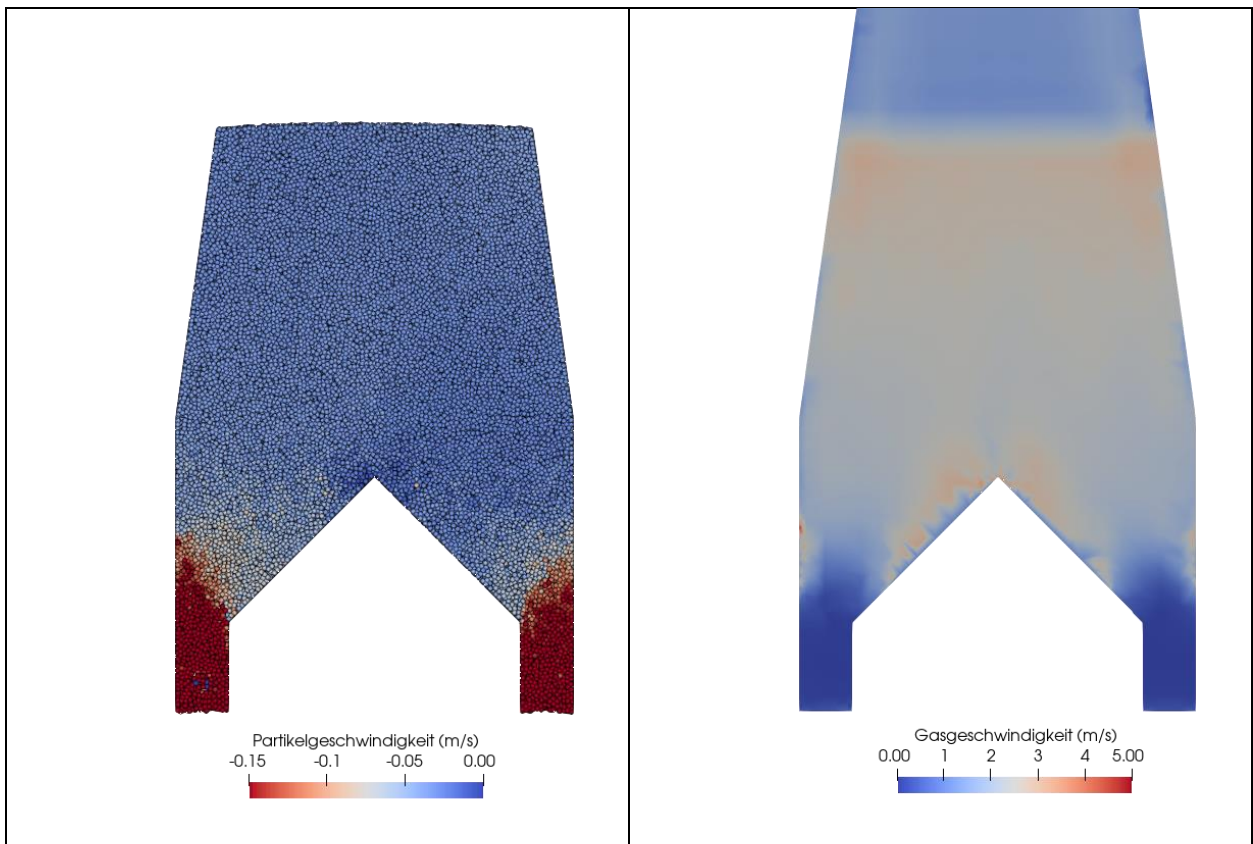


Abbildung 69: Vertikale Partikelgeschwindigkeiten (Erzpellets) im Mittelschnitt bei 80 mm Spaltweite

Bei den Eisenerzpellets ist die Stagnation weniger ausgeprägt; bei gleichem Gasvolumenstrom sind die übertragenen Kräfte im Vergleich zu den gravitationsbedingten Kräften geringer.

Im Vergleich zu den Darstellungen der Experimente auf Seite Abbildung 58 sind die Verteilungen homogener und die Stagnation in der Mitte ist weniger ausgeprägt, die Ursache ist in der noch nicht abgeschlossenen Beschleunigungsphase der Partikel zu suchen (Darstellung 2,5 Sekunden Öffnung). Erst zu späterer Zeit stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Feststoffausfluss und Gasdurchströmung ein.

3.11. Nutzung verfügbarer Messungen an Bestandsanlagen zur exemplarischen Anwendung der Erkenntnisse (AP 11, FS 1&2)

Auswertung von Betriebsmessungen:

In der betrieblichen Praxis sind die meisten Parameter nicht bekannt oder können lokal nur abgeschätzt werden. Dazu gehört bereits das Wissen welche Geometrie und Größenverteilung das eingesetzte Schüttgut besitzt. Der Gasvolumenstrom ist nur als Summe bekannt oder wird sogar durch gasbildende Reaktionen verändert. Das führt dazu, dass die Gasdichte sich verändert, die durch zusätzliche unbekannte lokale Temperaturänderungen weiter beeinflusst wird, was letztlich nur Abschätzungen erlaubt. In Tabelle 27 sind die vorhandenen Messdaten den unbekanntem Einflussgrößen am Beispiel Hochofen gegenübergestellt.

Tabelle 27: Zusammenfassung der bekannten und unbekanntem Prozessdaten des Hochofens

<i>Vorhandene Hochofendaten</i>	<i>Unbekannte Einflussgrößen</i>
Druck auf verschiedenen Höhen	Temperatur
Integraler Volumenstrom (mit bis zu 10 % unbekannter zusätzlicher Einblasung)	Gaszusammensetzung
Gesamtpermeabilität	Schüttguteigenschaften
Füllstand (mittig)	Lokale Gasgeschwindigkeiten
	Reaktionskinetik (gas- und feststoffseitig)

...

In Summe ist es also eine komplexe Aufgabe, Messdaten zu interpretieren. Dennoch sollen anhand der erarbeiteten Ergebnisse praktische Hilfen für reale Prozesse entwickelt werden. Eine Kernerkenntnis ist die Abhängigkeiten der Permeabilität von den Materialeigenschaften und von der Absinkgeschwindigkeit. Um die Permeabilität im großtechnischen Kontext zu untersuchen, wurden über einen Zeitraum von vier Monaten Prozessdaten an einem Hochofen aufgezeichnet. Generell werden in diesem Prozess verschiedene Schüttgüter in Schichten eingesetzt, so dass es im Prinzip möglich ist diese Schichten anhand der lokalen Druckverluste zu erkennen. Leider sind die Aufgabezeitpunkte der verschiedenen Schichten nicht bekannt und die Druckmessungen weisen einen großen räumlichen Abstand auf, so dass immer mehrere Schichten auf einmal vermessen werden. Es wurde aufgrund der vielen Einflussgrößen auch kein periodischer Verlauf im Druckverlust festgestellt.

Ein Fokus bei der Auswertung wurde auf die Materialbewegung und die Absinkgeschwindigkeit gelegt. Da der Möller im Hochofen kontinuierlich absinkt und Material regelmäßig nachgefüllt wird, wurde auf das sogenannte Herabstürzen geachtet. Das sind die Momente, in denen zuvor gebildete Hohlräume einbrechen und die Schütthöhe sich stark verringert. Es kann sich dabei um Höhenunterschiede von mehreren Metern handeln. Dies ist gleichzusetzen mit einer stark erhöhten Absinkgeschwindigkeit, die zu einer messbaren Permeabilitätsänderung führen sollte. Die Höhendaten sind bekannt ebenso wie die Lage von 7 Druckmessebenen, verteilt über der Höhe mit jeweils drei am Umfang angeordneten vertikalen Messreihen. Der Gasvolumenstrom ist mit ca. 10 % Fehler bekannt. Zudem ist auch die im Prozess fortlaufend berechnete Gesamtpermeabilität bekannt.

In dem auszuwertenden Zeitraum wurden nur Situationen betrachtet, die keinen Stillstand zu Folge hatten. Es wurden drei Datensätze für Druck, Höhen und Volumenstrom analysiert. Ein einfacher Zusammenhang zwischen den Parametern ist in den Daten nicht vorhanden. Selbst ein Volumenstromanstieg führt nicht zu einem einheitlichen Anstieg des Druckverlustes an den Messstellen. Bei der Permeabilität aus den Prozessdaten verhält es sich ähnlich. Hierzu ist anzumerken, dass vom Betreiber nicht gesagt werden konnte wie dieser Permeabilität in der Anlage konkret berechnet wird. Auch die Einheit ist nicht bekannt. Aus diesem Grund ist die Permeabilität zusätzlich anhand der Gleichung von Darcy [11] berechnet worden.

In Abbildung 70 sind Betriebsdaten von 2 Tagen aufgetragen. Alle Daten sind über 60 Werte geglättet. Dabei sind im oberen Diagramm die Daten von drei versetzten Höhenmessungen, welche die Höhe ab einem Referenzpunkt angeben, dargestellt. Danach folgt die in dieser Arbeit berechnete Permeabilität, die anhand des Druckverlusts über die gesamte Höhe oberhalb der flüssigen Phase bestimmt wurde. Danach folgt die Permeabilität, die im Betrieb bestimmt und angezeigt wird. Danach folgen der normierte Volumenstrom und der Druckverlust pro Meter. Die Druckmessstellen sind von oben nach unten nummeriert und in Abstand von ca. 2,2 m angeordnet. Die Permeabilität wurde mit den Druckmessstellen 1 und 7 berechnet, was bei den Druckverlustdiagramm dpEA17 ist. EA ist dabei die interne Bezeichnung der vertikalen Achse, in der sich die Messstellen befinden.

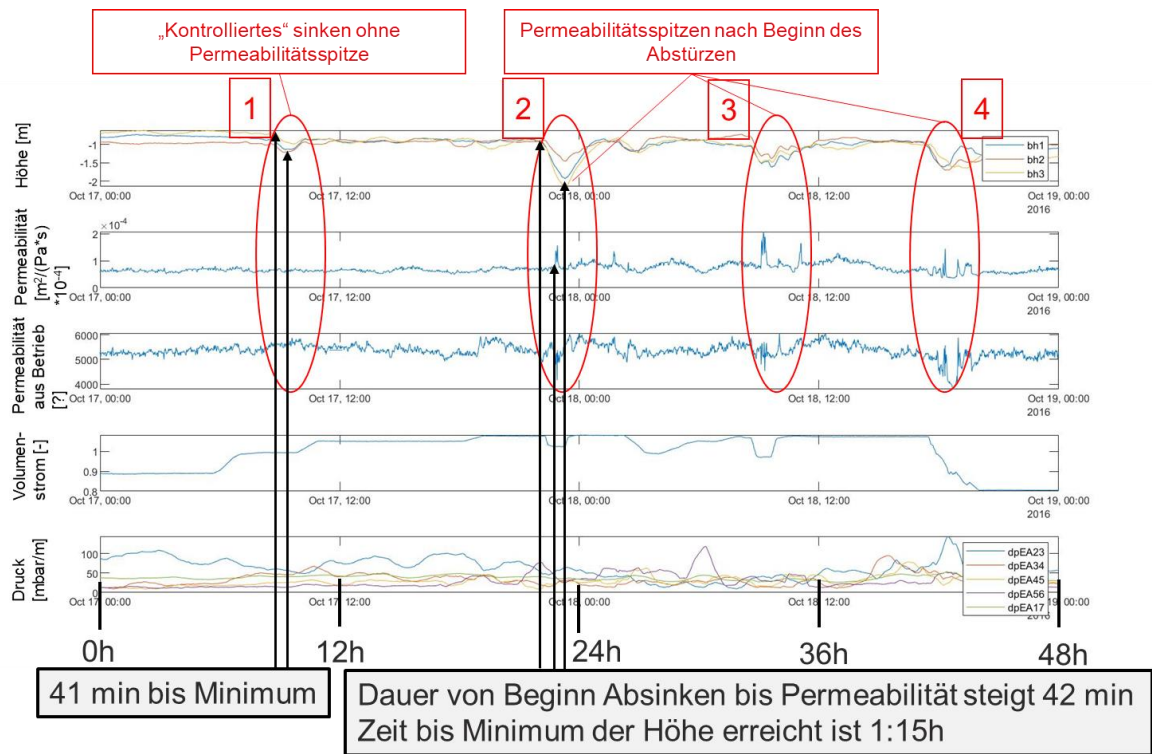


Abbildung 70: Betriebsdaten über 2 Tage mit Vergleich von Höhe und Permeabilität (Positivbeispiel)

Es sind Zeitabschnitte rot markiert, in denen sich die Höhe wesentlich ändert. Im ersten Abschnitt sinkt die Schüttung ab, ohne dass dies zu einer Permeabilitätsveränderung führt. Die Dauer des Absinkens beträgt 41 min. Es ist aus den Daten nicht interpretierbar, ob die Absinkgeschwindigkeit der Schüttung unverändert geblieben ist und das Befüllen gestoppt wurde oder ob die Absinkgeschwindigkeit gestiegen ist und es deswegen zu einer verminderten Höhe gekommen ist. Bei den nächsten 3 markierten Zeitintervallen sind beim Herabsinken Permeabilitätsspitzen bei den Permeabilitätsberechnungen nach Darcy vorhanden. Diese zeigen ein temporäres Auflockern der Schüttung an. Die Permeabilitätsdaten aus dem Betrieb zeigen auch Schwankungen mit stärkerer Amplitude an, die jedoch nicht so eindeutig sind. Im zweiten rot markierten Abschnitt tritt die Permeabilitätsspitze 42 min nachdem das Absinken begonnen hat auf. Das ist der Zeitpunkt zudem das Minimum in der Höhenmessung beim ersten Zeitabschnitt aufgetreten ist. Diesmal tritt das Minimum der Höhe später und nach dem Permeabilitätspeak auf. Gemäß der ausgeprägten negativen Steigung der Permeabilität nach dem Maximum und dem tieferen Herabsinken der Permeabilität kann hier evtl. ein Stürzen stattgefunden haben. Ein Beispiel für Daten, in denen keine Permeabilitätsänderung auftritt, ist in Abbildung 71 zu sehen.

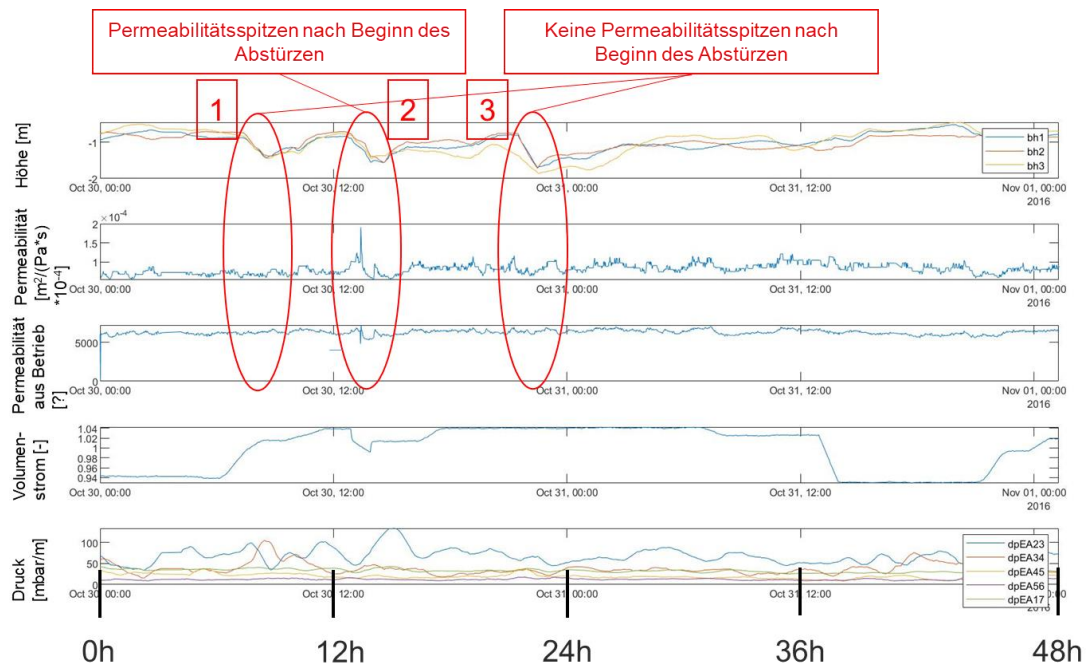


Abbildung 71: Betriebsdaten über 2 Messtage mit Vergleich von Höhe und Permeabilität (Negativbeispiel)

Die Zeitabschnitte 1 und 3 besitzen eine Höhenänderung, die als beschleunigtes Absinken bzw. Stürzen bewertet wurden. Weder die Permeabilität nach Darcy noch die aus dem Betrieb zeigen eine Veränderung. In Abschnitt 2 sind Ausschläge bei beiden Diagrammen der Permeabilitäten zu erkennen.

Diese Analyse wurde für 30 von 120 Tagen stichprobenartig gemacht. Verglichen wurde bei beiden Permeabilitäten, wann diese auf Höhenveränderung, wie bei den Zeitabschnitten 2 bis 4 reagiert haben, bzw. nicht reagiert haben. Unterschieden wird zwischen „richtig“, „falsch positiv“ und „falsch negativ“. „falsch positiv“ meint, dass die Permeabilität angestiegen ist, ohne dass sich die Höhe verändert hat und „falsch negativ“, dass die Permeabilität sich nicht verändert hat, obwohl die Höhe sich nach dem obigen Beispiel änderte. In Tabelle 28 ist dies für die eigene Berechnung der Permeabilität zusammengefasst.

Tabelle 28: Auflistung der Fälle bei denen Höhe und die Permeabilität sich gleichzeitig ändern, wobei die Permeabilität selber errechnet wurde

<i>Auswertung Nummer [-]</i>	<i>Eigene Permeabilitätsberechnung</i>		
	Falsch positiv	Falsch negativ	Richtig
1	1	1	0
2	0	0	0
3	0	0	3
4	1	0	1
5	0	0	3
6	0	0	3
7	0	0	0
8	0	2	1
9	2	0	5
10	0	0	0
11	1	0	3
12	0	0	2
13	0	0	0
14	1	0	1
15	0	0	0
<i>Summe</i>	6	3	22
<i>Anteil an den gesamten Situationen [%]</i>	24	12	88

Es wurden insgesamt 15-mal zwei Tage analysiert. Bei 88% der aufgetretenen Muster der Höhenänderung hat auch die entsprechende Permeabilität Spitzen gezeigt. 12% wurden nicht erkannt und bei 6 Fälle gab es Spitzen in der Permeabilität, ohne dass sich die Höhe veränderte. Die gleiche Betrachtung wurde für die betrieblichen Permeabilitätsdaten in Tabelle 29 durchgeführt.

Tabelle 29: Auflistung der Fälle, bei denen Höhe und die Permeabilität sich gleichzeitig ändern, wobei die Permeabilität aus den Betriebsdaten genutzt wurde

Auswertung Nummer [-]	Betriebliche Permeabilitätsberechnung		
	Falsch positiv	Falsch negativ	Richtig
1	0	1	0
2	0	0	0
3	0	0	3
4	0	1	0
5	0	2	1
6	0	2	1
7	0	0	0
8	0	2	1
9	0	1	4
10	1	0	0
11	0	3	0
12	0	2	0
13	0	0	0
14	0	0	1
15	0	0	0
Summe	1	14	11
Anteil an den gesamten Situationen [%]	4	56	44

Der Anteil, der eine eindeutige Änderung der Permeabilität bei gleicher Höhenänderung wie in Tabelle 29 zeigt, ist mit 44% deutlich geringer als bei der Berechnung der Permeabilität nach Darcy. 56 % der plötzlichen Höhenänderung führten nicht zu einer Änderung der betrieblichen Permeabilitätswerte. Lediglich einmal ist eine Situation aufgetreten, in der die Permeabilität reagierte, ohne dass sich die Höhe änderte. Die betrieblichen Permeabilitätsdaten haben generell stärkere Schwankungen, so dass Informationen darin nicht erkannt werden. In der sogenannten Japanese Permeability Number [13] wird der Druckverlust pro Höhe mit einem Exponenten von 0,6 anders gewichtet. Diese Berechnung wurde ebenfalls getestet, führte aber zu keiner erkennbaren Verbesserung.

Das oben angeführte Beispiel zeigt deutlich, wie schwer es ist, unter realen Betriebsbedingungen Vergleiche mit berechneten Daten durchzuführen, insbesondere wenn die betrachteten Systeme messtechnisch nur sehr schwer zugänglich sind. Andererseits ermöglicht die numerische Simulation der Schüttgutbewegung und ihrer Wechselwirkung mit Umgebungsprozessen einen vertieften Einblick in die Vorgänge und die direkte Ermittlung von material- und betriebsbedingten (kritischen) Grenzzuständen.

Simulation betriebsrelevanter Szenarien:

Bei einer Betrachtung der Betriebsszenarien, die einen direkten Einfluss auf die Schüttgutbewegung haben, stellt die Brückenbildung beim Ausfluss aus intermittierend arbeitenden, nicht durchströmten Aufgabebehältern (z. B. bei der Mölleraufgabe im Hochofen) und bei zyklisch wirkenden durchströmten Austragsorganen (z.B. Branntkalk beim Kalkschacht oder Sinterkühler im Stahlwerk) die entscheidende Größe dar. Vor dem Hintergrund der für reale, industrielle Konfigurationen benötigten erheblichen Rechenzeiten, der schlechten Vergleichbarkeit bei Verwendung unterschiedlicher Materialien und fehlenden verlässlichen industriellen Daten, wurde eine skalierte, geometrisch vereinfachte, den wesentlichen Prozess aber abdeckende Ausflusssituation untersucht. Dabei resultieren die interessanten primären Zielgrößen, die zeitliche Entwicklung des Feststoffmassenstroms und des Gasvolumenstroms aus drei Gruppen von Parametern und deren Wechselwirkungen:

- Schacht-/Austragsgeometrie (zeitlich veränderlich) und initiale Füllhöhe,
- Zustandsgrößen/Eigenschaften des Fluids sowie anliegende Druckdifferenz oder alternativ vorgegebener Volumenstrom,
- mechanische und strömungsmechanische Eigenschaften des Schüttguts.

Hieran wird deutlich, dass sich daraus eine in letzter Konsequenz unendlich große Zahl von Variationsmöglichkeiten ergibt, die nur material- und einsetzspezifisch zu wählen sind.

Der daher hier exemplarisch aufgezeigte generische Fall ermittelt den instationären Ausfluss von Schüttgütern unterschiedlicher Partikelgeometrien und Eigenschaften aus einem Behälter/Schacht mit schrägem Boden (Skizze in Abbildung 72), der entgegen der Schüttgutbewegung von Luft durchströmt wird. Am unteren Ende des Schachtes wird eine seitliche Öffnung (vertikaler Schieber, spontane Öffnung) freigegeben, aus der das Material ausfließen und die entgegenströmende Luft eintreten kann. In der Anordnung werden durch den Materialauslass über der Zeit konstante Volumenströme (1 m/s, 2,5 m/s und 4 m/s Leerrohrgeschwindigkeit aufgeprägt (bei zeitlich und räumlich konstantem Fluidzustand, trockene Luft bei 300 K und 1 atm) und die zeitliche Entwicklung der Stoffströme und/oder des Druckverlustes über den Apparat aufgezeichnet.

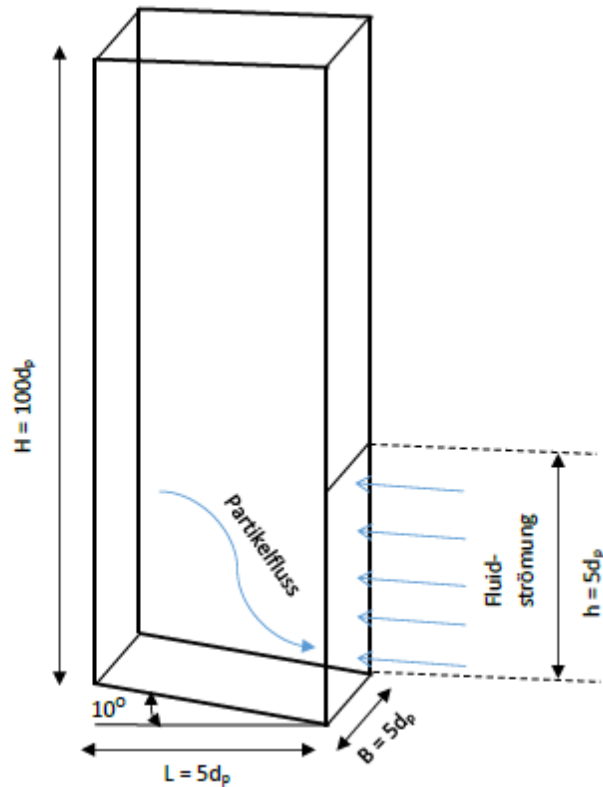


Abbildung 72: Schachtelgeometrie

Die untersuchten Partikelformen, die hier exemplarisch zur Darstellung der Variationsmöglichkeiten und zur Plausibilitätskontrolle eingesetzt wurden, sind in Abbildung 73 skizziert, die verwendeten Materialeigenschaften in Tabelle 30 aufgeführt. Die Simulation verwendet im Fall der Kugeln die (klassische und rechenzeiteffizienteste) Punkt-Radius Approximation, während in den anderen Fällen regelmäßiger Partikel Polyederapproximationen verwendet werden. Für die Kokspartikel wurde schließlich unregelmäßige, in Form und Größe variierende Polyederapproximationen (neun Partikeltypen) verwendet.

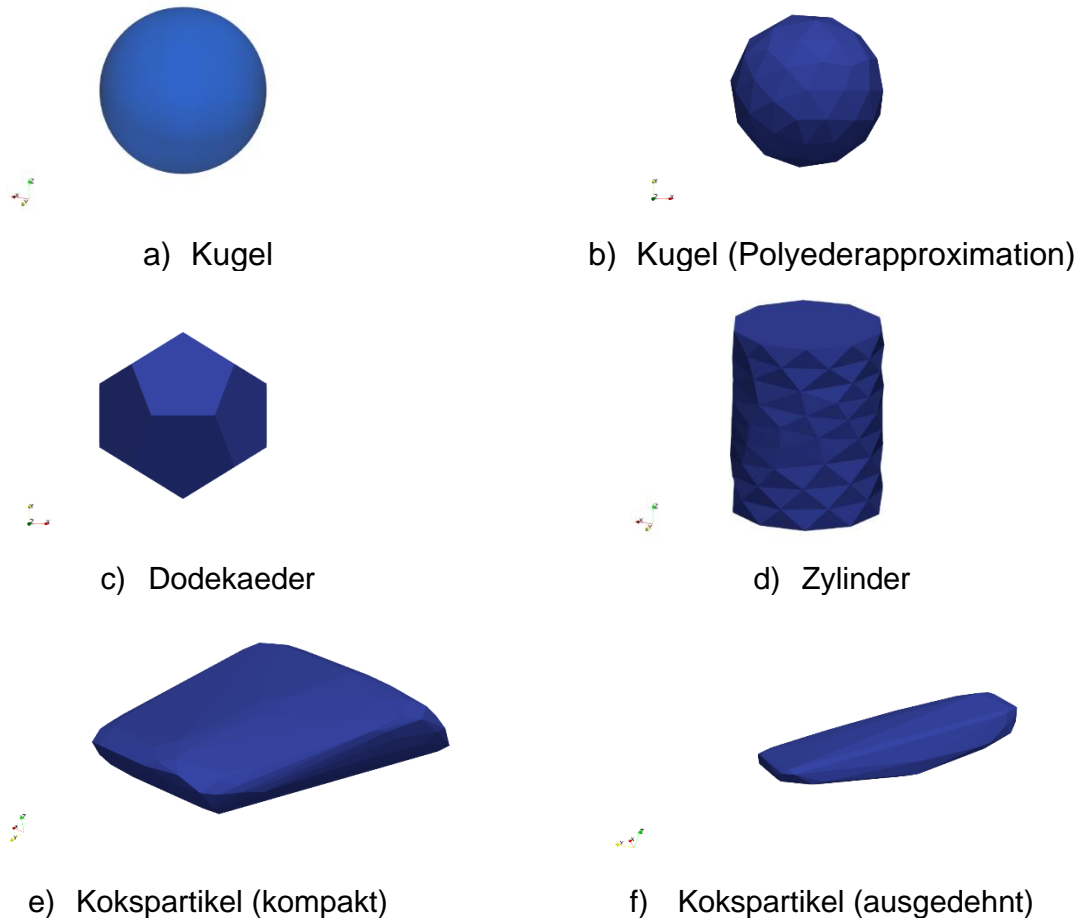


Abbildung 73: Partikelgeometrie zur Untersuchung des Ausflussverhaltens: e) und f) sind zwei Beispiele aus insgesamt neun unterschiedlichen Typen in der Koks-Mischung

Tabelle 30: Materialeigenschaften der betrachteten Partikel

Parameter	Wert			
Form	Kugel&Kugelpolyeder	Dodekaeder	Zylinder	Kokspartikel
Umkugeldurchmesser (m)	0.01	0.011558	0.015	0.044
Dichte (kg/m ³)	1370	1283	1370	1283
Normale Federkonstante (N/m)		50000		
Normale Dämpfungsk. (m/s)		7		
Tangentiale Federk. (N/m)		37500		
Tangentiale Dämpfungsk. (m/s)		6.07		
Reibungskoeffizient (-)		0.4		
Initiale Schütthöhe (m)	0,57	0,61	0,77	0,4

Da die geometrisch wichtigste Einflussgröße das Verhältnis von Austrittsquerschnitt zur Partikelabmessung ist, sind die Abmessungen der Schächte mit der Partikelabmessung (maximaler Umkugeldurchmesser) skaliert. Die der Simulation zugrundeliegenden Materialeigenschaften und Berechnungsparameter sind in Tabelle 30 zusammengestellt.

Auf eine Variation der Gasdichte bzw. eine Veränderung des Gaszustandes durch Prozesseffekte (Erwärmung, Reaktion) wurde zunächst verzichtet, um den Aufwand zu begrenzen und weil dadurch die (hier relativ große) Dichtedifferenz zum Feststoff nur marginal beeinflusst würde, weshalb auch die Auswirkungen entsprechend gering wären. Grundsätzlich sind mit dem Berechnungsverfahren, insbesondere wegen des zugrundeliegenden CFD-Codes (OpenFoam), auch hier beliebige Zustandsvariationen und entsprechende Analysen möglich.

Der zeitliche Verlauf der im Schacht verbliebenen Partikelanzahl ist in Abbildung 74 für die nicht durchströmte Schüttung und drei vorgegebene Luft-Volumenströme (Leerrohrgeschwindigkeiten in der Legende) angegeben. Dabei sind die Kugeln der monodispersen Schüttung als sogenanntes Punkt-Radius Modell definiert, was der klassischen DEM-Beschreibung entspricht. Deutlich erkennbar ist, dass es durch die Gegenströmung (bei 1 m/s) zunächst zu einer Auflockerung mit größeren Beweglichkeiten der Kugeln im Ausflussquerschnitt kommt, was zu einem schnelleren Partikelaustritt führt (der Kurvenzug 1 m/s liegt leicht unterhalb der Kurve für 0 m/s). Bereits bei 2,5 m/s induziert die Strömung eine Gegenkraft, die zu einer Verringerung der Ausflussgeschwindigkeit führt. Bei 4 m/s wird der Ausfluss schon deutlich behindert. In allen Fällen ist während der Ausflussphase ein längerer Bereich konstanten Massenstroms zu sehen, was bedeutet, dass die Partikel im Vergleich zum Ausflussquerschnitt klein genug und beweglich genug sind, um in dieser Phase ein dynamisches Kräftegleichgewicht zu ermöglichen.

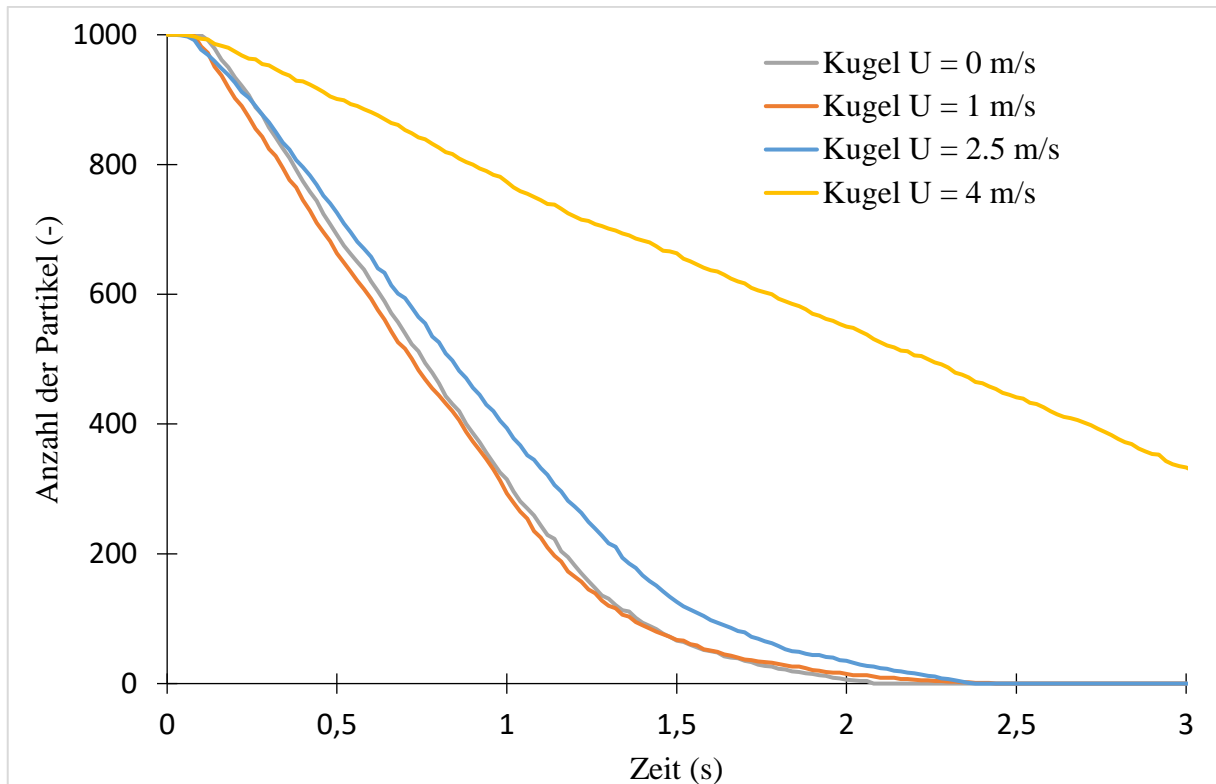


Abbildung 74: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von Kugeln aus dem Schacht

Den zugehörigen Verlauf des Druckverlusts zeigt Abbildung 75, die Kurvenzüge beginnen jeweils bei den Druckverlusten, die sich für die vorgegebenen Parameter und Volumenströme aus der Ergun-Beziehung [14] in etwa ergeben würden, obwohl sie auf anderem Weg, mit Hilfe der Korrelation nach Di-Felice (siehe [15]) für die einzelnen Partikel individuell bestimmt und somit über das gesamte Schachtvolumen integriert wurden. Dies ist ein erster Hinweis auf eine konsistente und korrekte Implementierung. Zu Beginn des Auslaufs steigt der Druckverlust in allen drei Fällen kurz an, ein Effekt, der auch in den Experimenten am Versuchsrohr der FS 1 auftrat. Nach Öffnung des Schachtes muss zunächst die Trägheit der ruhenden Partikelmasse überwunden werden, was zu höherem Druckverlust in dieser Phase führt. Mit zunehmender Zeit nimmt anschließend die Druckdifferenz ab, da sich die Schütthöhe kontinuierlich verringert.

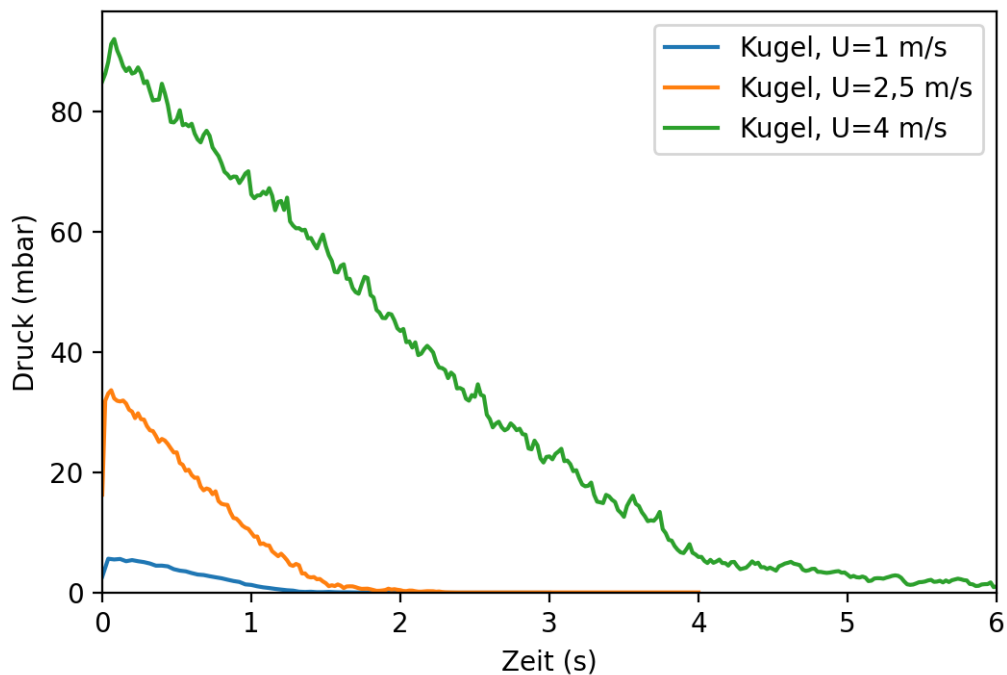


Abbildung 75: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von Kugeln aus dem Schacht

Um zu quantifizieren ob und in welchem Maße sich eine Polyederapproximation der Kugeln auswirkt, wurden dieselben Simulationen mit „Polyederkugeln“ durchgeführt, bei denen die Kugeloberfläche durch 140 Dreiecke approximiert ist. Durch die „mathematisch scharfen“ Kanten der diskreten Oberfläche existieren nur noch mechanische Kontakte zwischen Flächen und Kanten, damit ist ein „Roller“ der Partikel im eigentlichen Sinn nicht mehr möglich. Dies sollte die Beweglichkeit im Ausflussquerschnitt etwas verringern.

Einen visuellen Eindruck des Schüttgutauslaufs und die Abnahme der Schachtfüllung für vier unterschiedliche Leerrohrgeschwindigkeiten (Abszisse) gibt Abbildung 76 zu vier Zeitpunkten wieder. Die dargestellte Farbskala entspricht dem Betrag der lokalen Partikelgeschwindigkeit.

Wie man deutlich sieht, hat die Gegenströmung einen erheblichen Einfluss auf das Ausflussverhalten. Der nicht durchströmte Schacht ist bereits nach 2,5 Sekunden nahezu entleert, während bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 4 m/s auch nach 3 Sekunden weniger als 10 Prozent des Materials ausgeflossen ist.

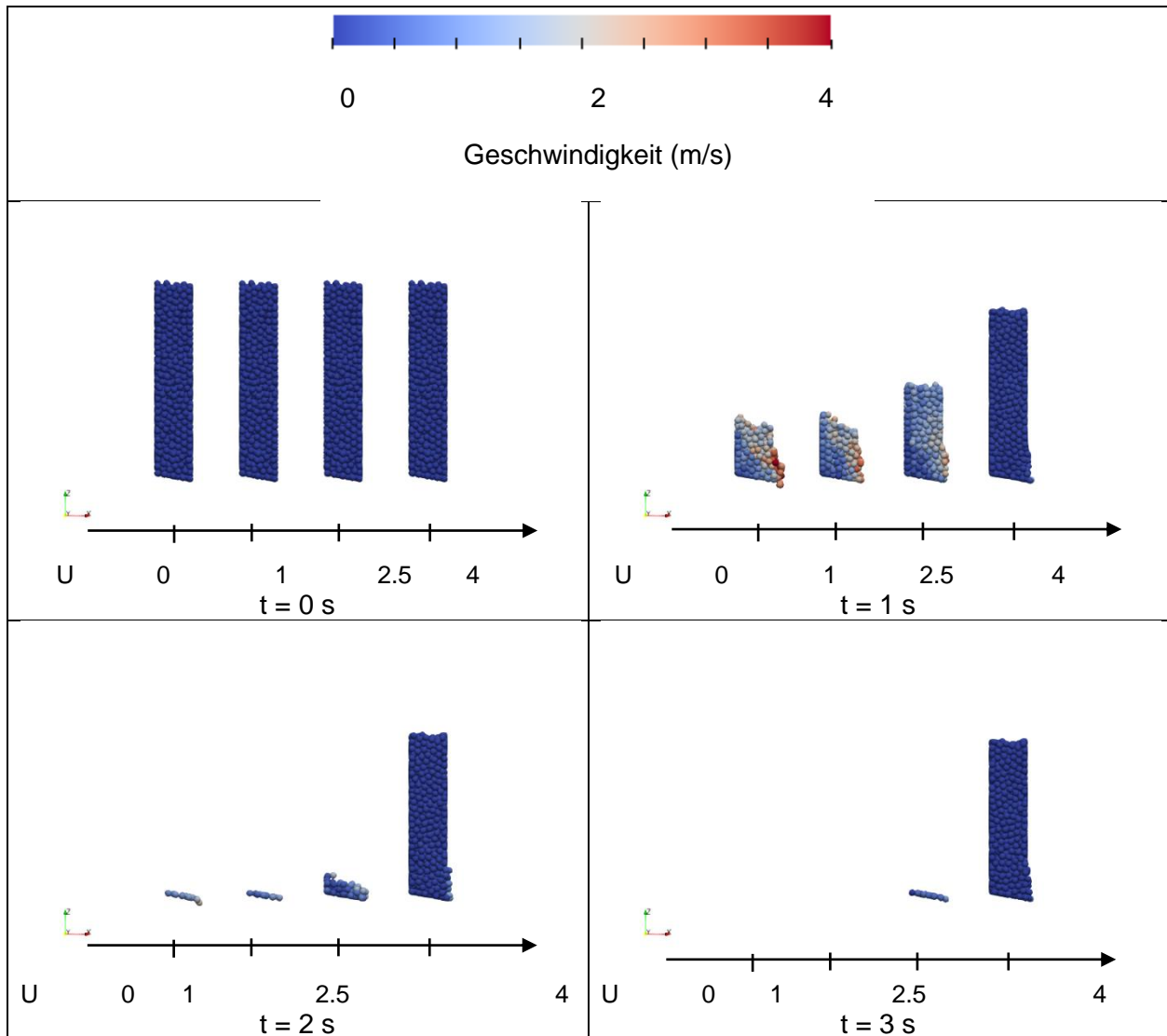


Abbildung 76: Einfluss der Durchströmung auf den Ausfluss von „Kugelpolyedern“

Quantitativ, dargestellt in Abbildung 77, weichen die Ergebnisse des Partikelauflusses bei fehlender und geringer Durchströmung nicht von den Ergebnissen in Abbildung 74 für tatsächliche Kugeln ab. Dies zeigt, dass eine Approximation der Kugeln durch entsprechend aufgelöste Polyeder zu demselben mechanischen Verhalten führt. Bei größeren Volumenströmen (2,5 m/s, 4 m/s) zeigen sich jedoch Unterschiede aufgrund strömungsmechanischer Effekte. Die Ausflussraten der Kugelpolyeder werden durch den Gasvolumenstrom stärker verzögert als jene der Kugeln, was aus der diskreten Approximation der Kugeloberfläche bei der Bestimmung der Widerstandskräfte resultiert.

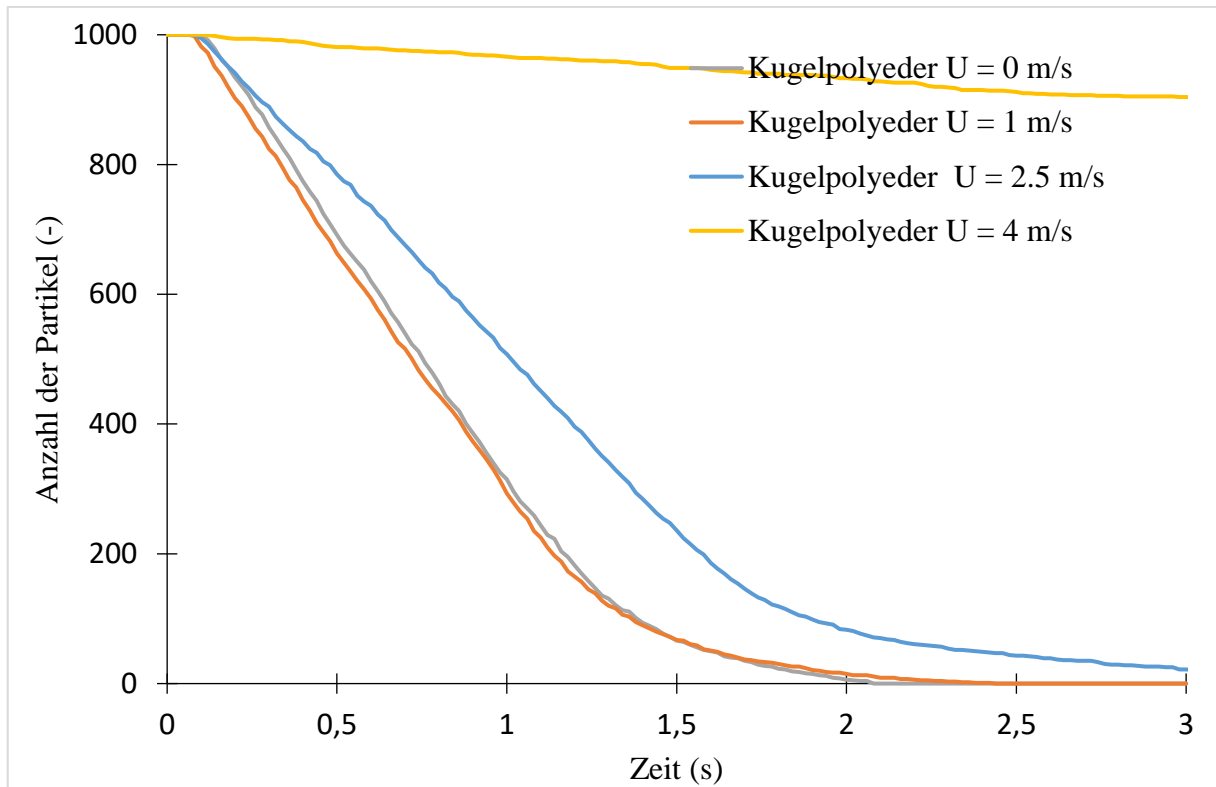


Abbildung 77: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von „Kugelpolyedern“ aus dem Schacht

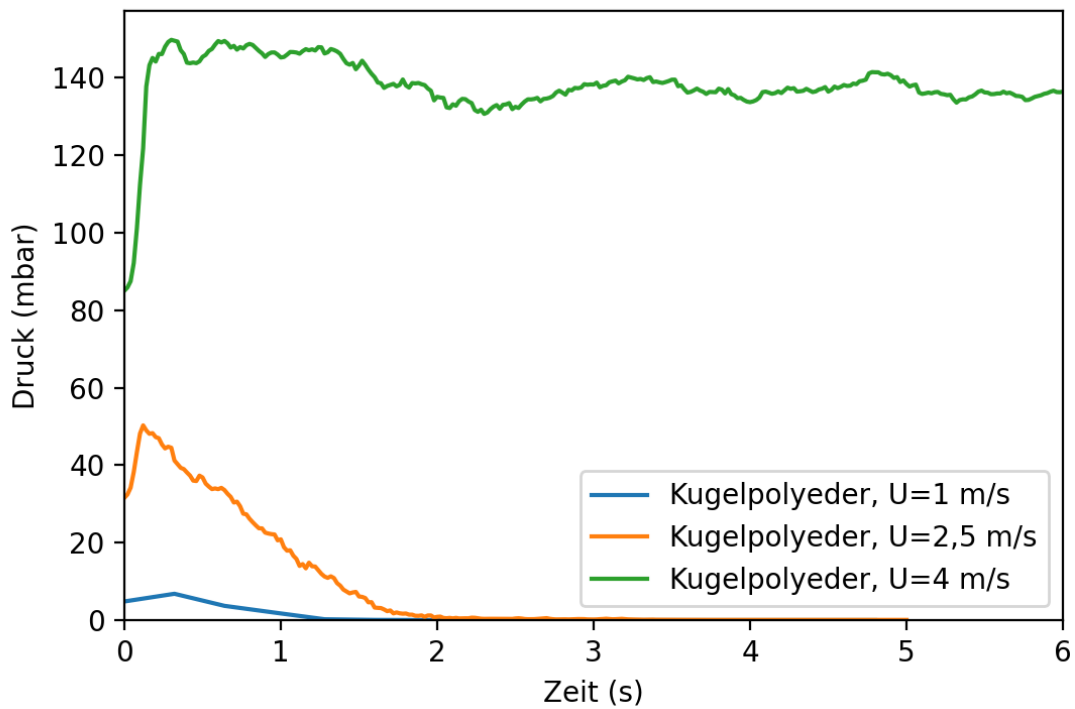


Abbildung 78: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von „Kugelpolyedern“ aus dem Schacht

Die zugehörigen Druckverluste über der Schütthöhe sind in Abbildung 78 dargestellt. Daran ist die Stagnation des Ausfließens bei 4 m/s sofort ersichtlich. Bei allen drei Volumenströmen sind die anfänglichen Anstiege der Druckverluste deutlich größer als im Fall glatter Kugeln, offensichtlich sind die auf die Partikel übertragenen Strömungskräfte im Fall der Polyederapproximation entsprechend größer.

Regelmäßige Dodekaeder, die man auch als sehr grobe Approximation von Kugeln mit lediglich zwölf Flächen ansehen kann, zeigen eine ähnliche Abhängigkeit von der Durchströmung (visuelle Darstellung in Abbildung 79, quantitativer Vergleich in Abbildung 80). Allerdings ist der Ausfluss insgesamt viel langsamer (Achtung, Skalierung der Abszisse ist anders) und die anfängliche Auswirkung der Strömungskräfte auf den Ausfluss ist deutlicher (1 m/s im Vergleich zu 0 m/s). Auch sind die Partikelgeschwindigkeiten beim Auslauf geringer als im Fall der „Polyederkugeln“. Bei 4 m/s ist vor allem der Kurvenzug viel weniger glatt, was auf intermittente Brückenbildung und entsprechende Störung der Fließfähigkeit schließen lässt. Die zugehörigen Druckverlustverläufe sind wiederum in Abbildung 81 dargestellt.

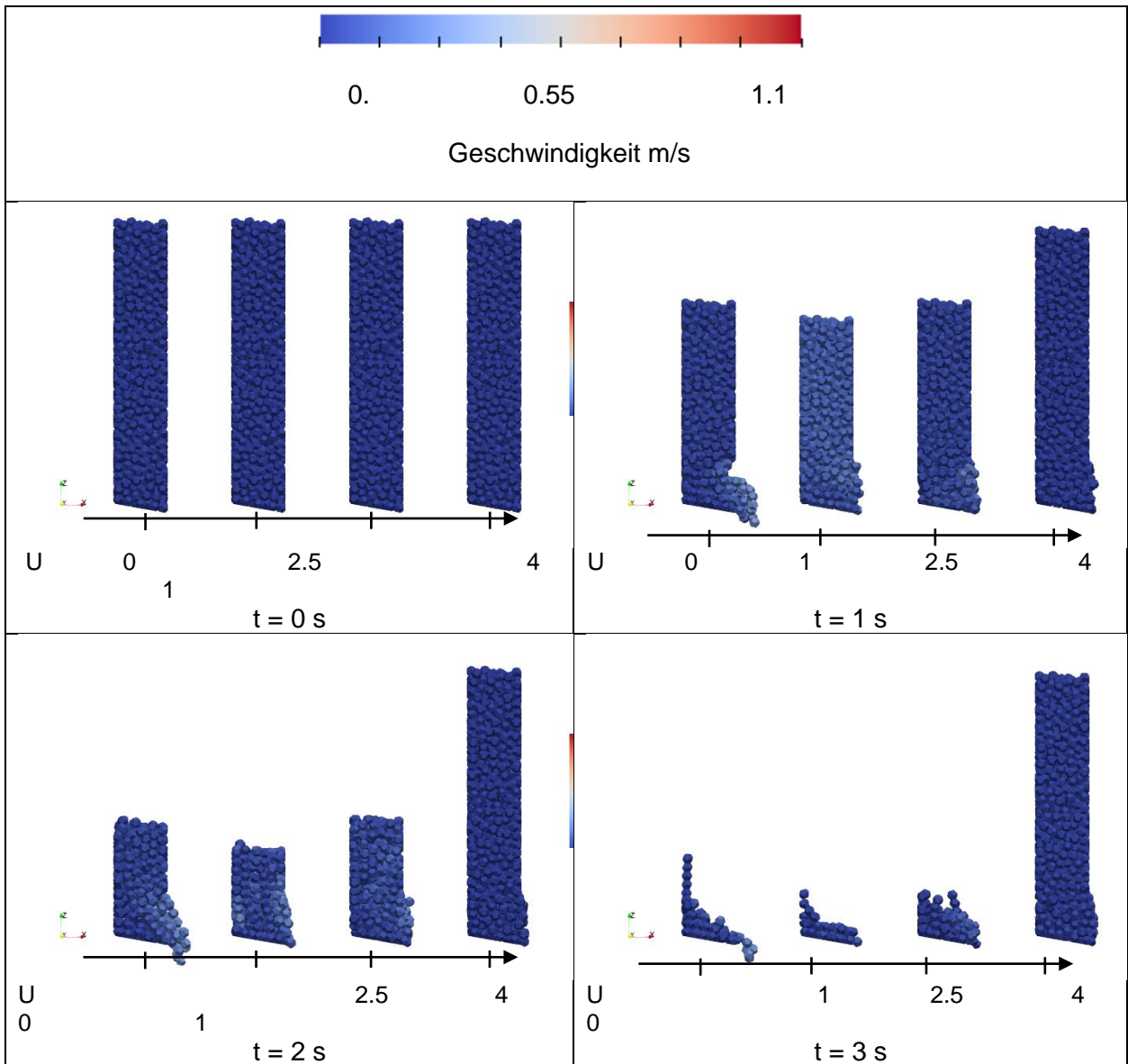


Abbildung 79: Einfluss der Durchströmung auf den Ausfluss von Dodekaedern

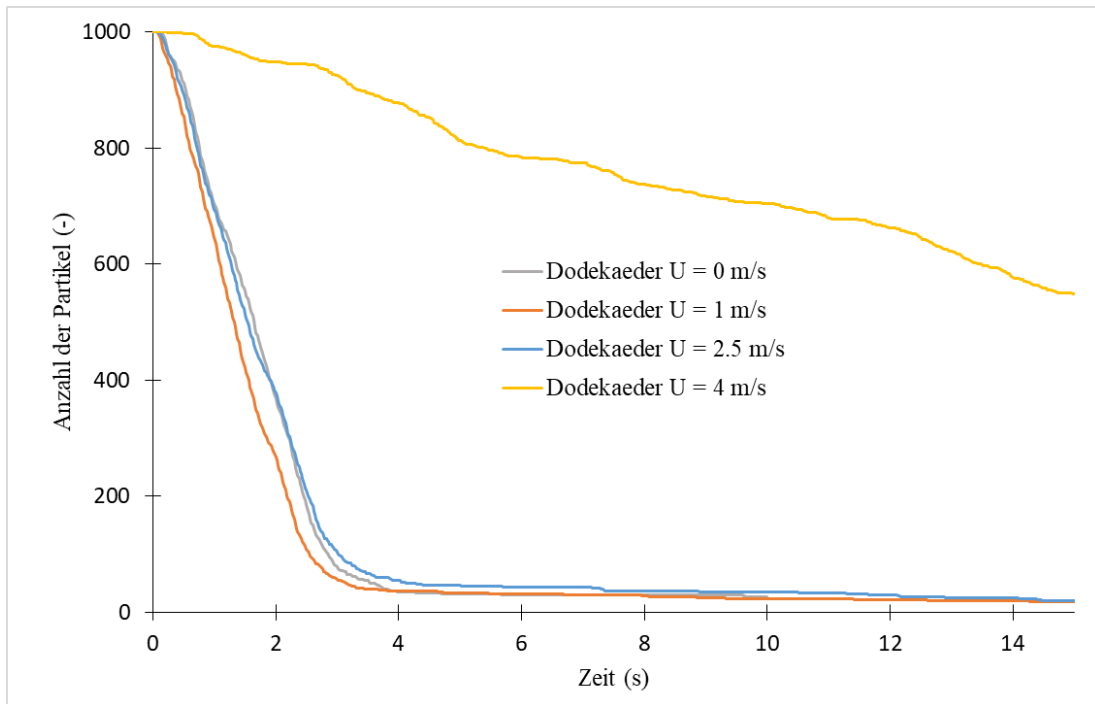


Abbildung 80: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von Dodekaedern aus dem Schacht

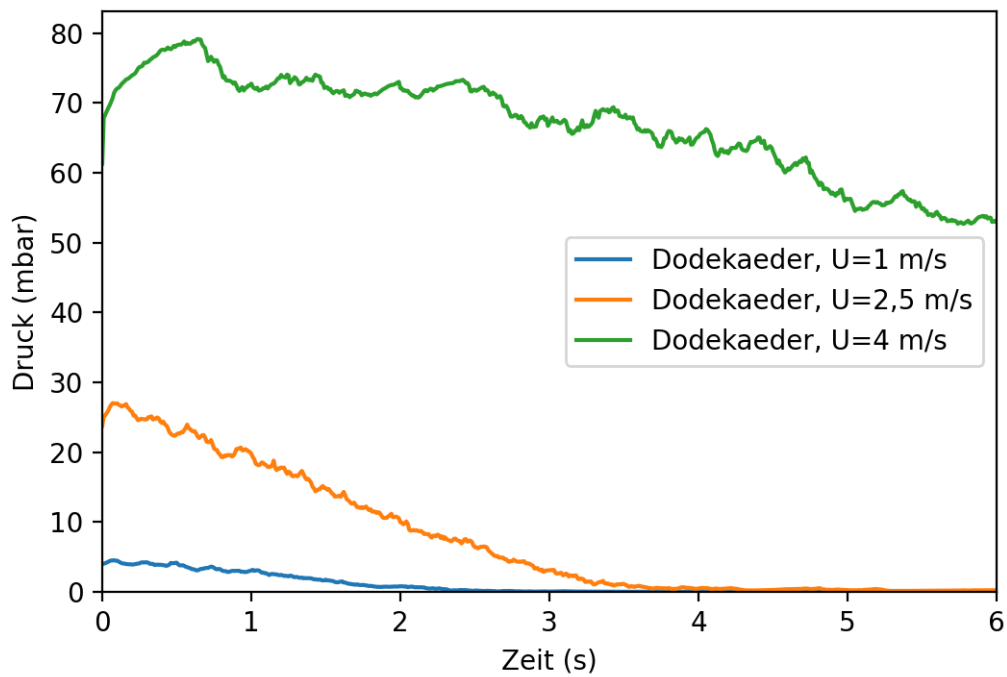


Abbildung 81: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von Dodekaedern aus dem Schacht

Als weniger kompakte Partikel werden im Weiteren monodisperse Zylinder betrachtet. Hier ist die räumliche Ausdehnung in einer Raumkoordinate größer.

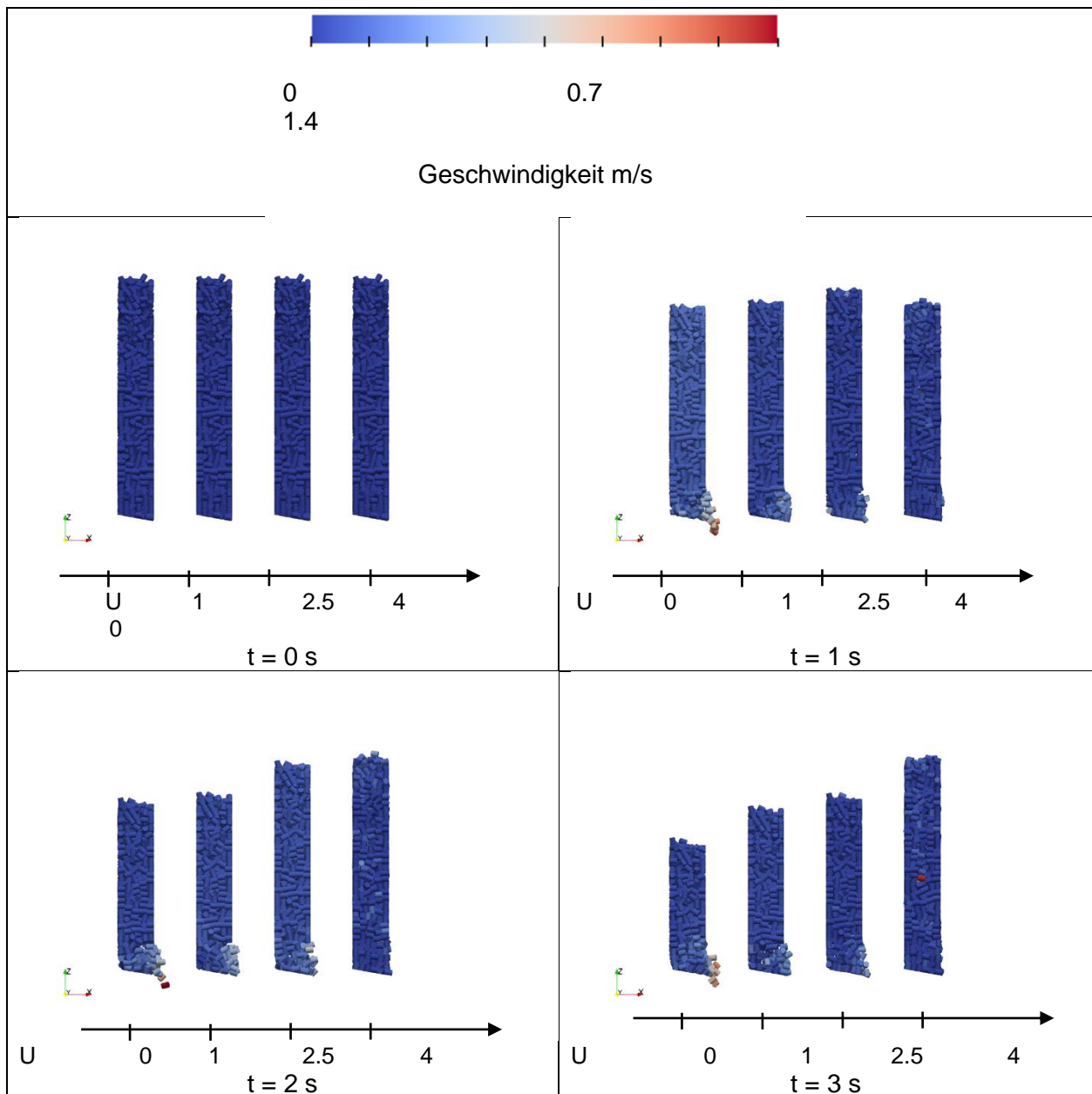


Abbildung 82: Einfluss der Durchströmung auf den Ausfluss von Zylindern

Der Ausfluss ist dadurch, wie in Abbildung 82 ersichtlich, erheblich behindert. Auch bei fehlender Gegenströmung dauert es über sechs Sekunden bis der Schacht entleert ist (Abbildung 83), bei der Leerrohrgeschwindigkeit von 4 m/s stagniert der Ausfluss sofort. Ein durch geringe Gegenströmung (1 m/s im Vergleich zu 0 m/s) verbesserter Ausfluss ist für diese Geometrie nicht mehr erkennbar. Die Druckverluste sind noch größer als im Fall der Dodekaeder, obwohl die Lückengrad der Zylinderschüttung eigentlich größer sein sollte. Im Fall der Stagnation bei 4 m/s liegt ein unerwartet großer Druckverlust von 300 mbar vor (vgl. Abbildung 84).

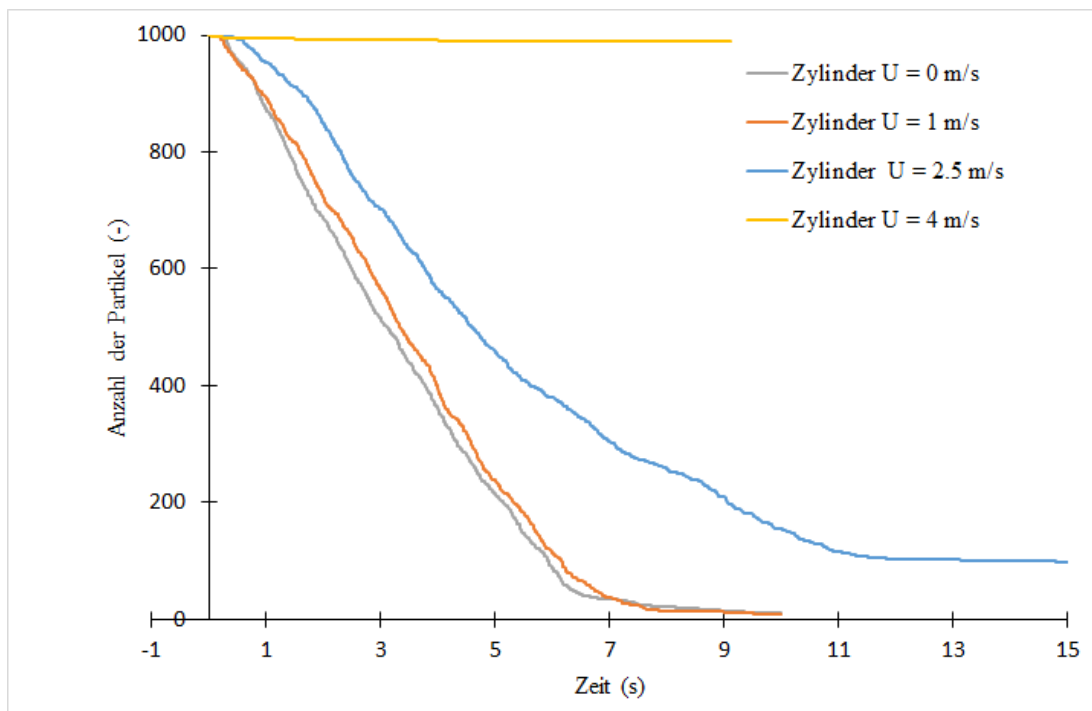


Abbildung 83: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss von Zylindern

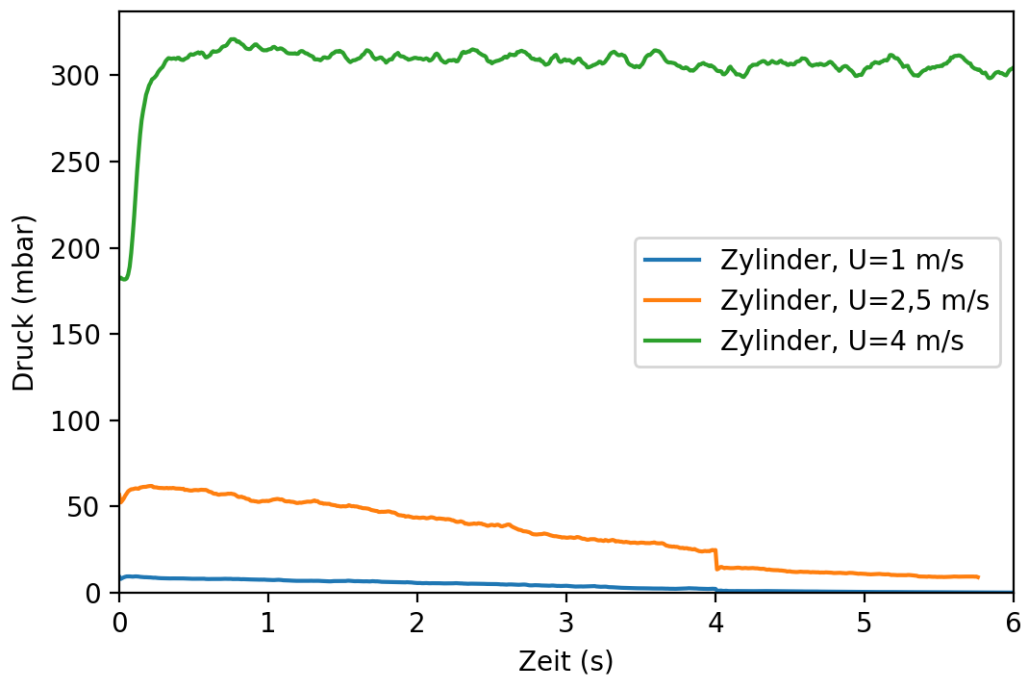


Abbildung 84: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss von Zylindern aus dem Schacht

Um die auch Anwendung der Polyederapproximation für beliebige Objektgeometrien zu erproben und dabei die in FS 1 verwendeten realen Kokspartikel zu approximieren, wurde die Schachtgeometrie mit einem Gemisch aus insgesamt neun unterschiedlichen

Partikelformen befüllt. Aufgrund der Partikelgeometrie ergeben sich völlig andere Schütthöhen und bereits die Durchströmung bei 2,5 m/s führt zur Stagnation des Materialflusses. Daher ist im Folgenden die nur die Ausflusssituation in den ersten 0,6 Sekunden bei einer Gegenströmung von 1 m/s visualisiert Abbildung 85.

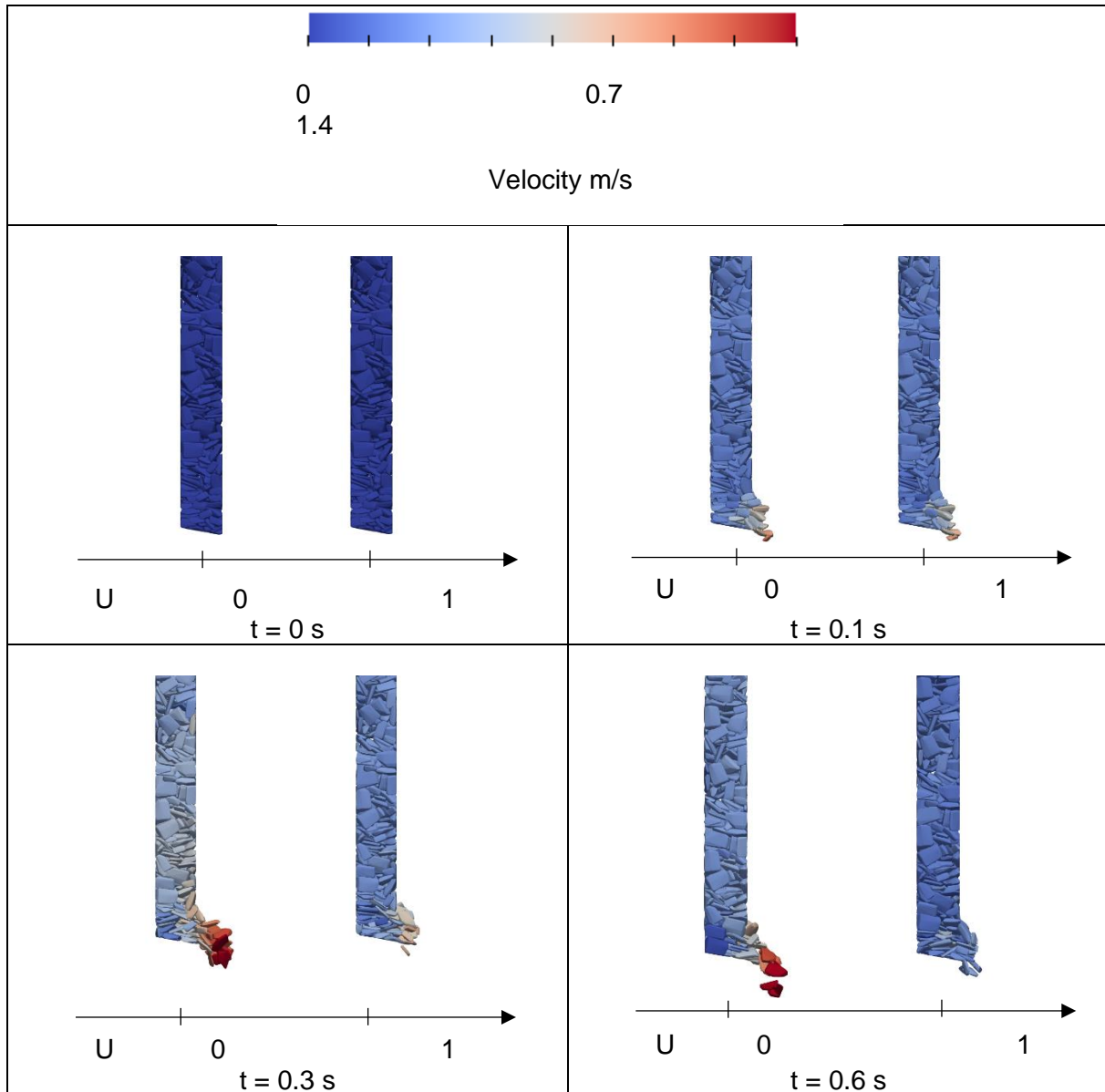


Abbildung 85: Ausfluss von Kokspartikeln bei 0 m/s und 1 m/s Gegenströmung

Der zeitliche Verlauf des, aufgrund der Partikelgeometrie sehr langsamen Ausfließens (Partikelzahl dargestellt), ist in Abbildung 86 ohne Gegenströmung und mit einer Gegenströmung von 1 m/s für die ersten 2 Sekunden dargestellt. Während der Verlauf ohne Gegenströmung noch vergleichsweise glatt verläuft, zeigt schon die geringe Gegenströmung von 1 m/s ein intermittentes Verzögern des Ausflusses.

Den korrespondierenden Verlauf des Druckverlusts über die Schüttung und die aus der stockenden Bewegung resultierenden Druckschwankungen zeigt Abbildung 87.

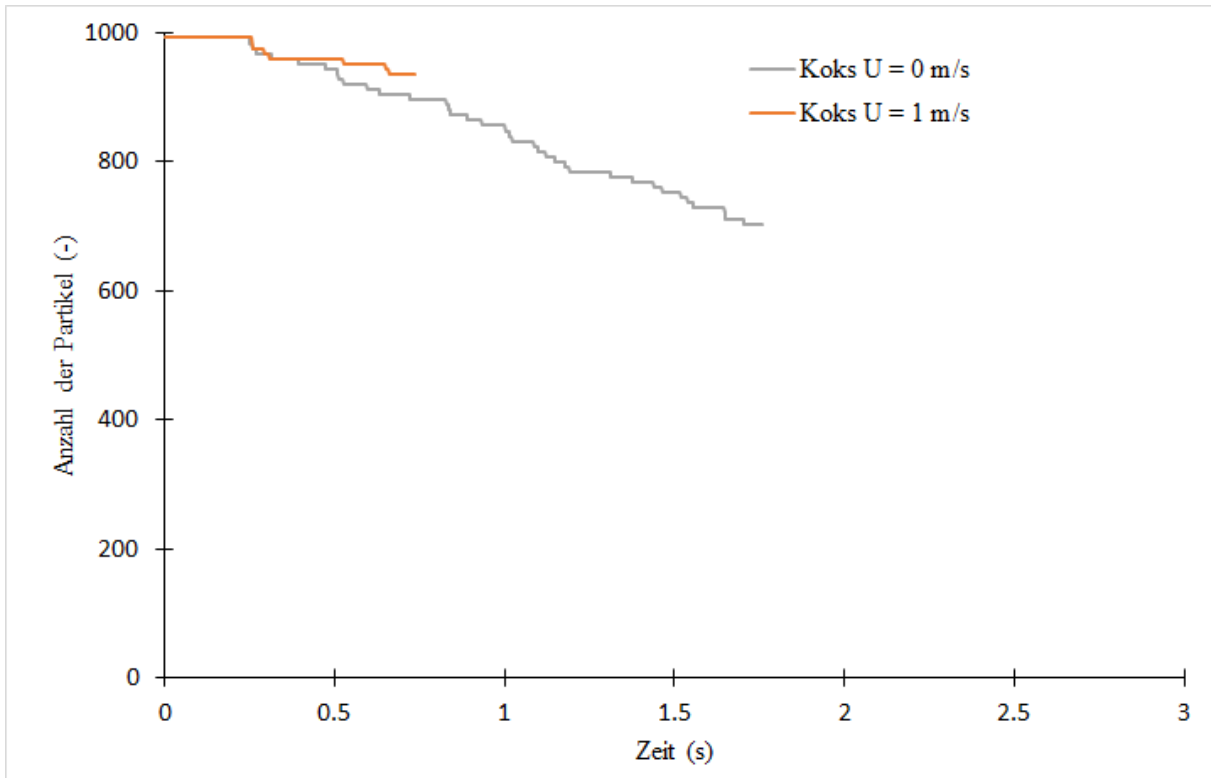


Abbildung 86: Einfluss der Gasströmung auf den Ausfluss der Koksschüttung

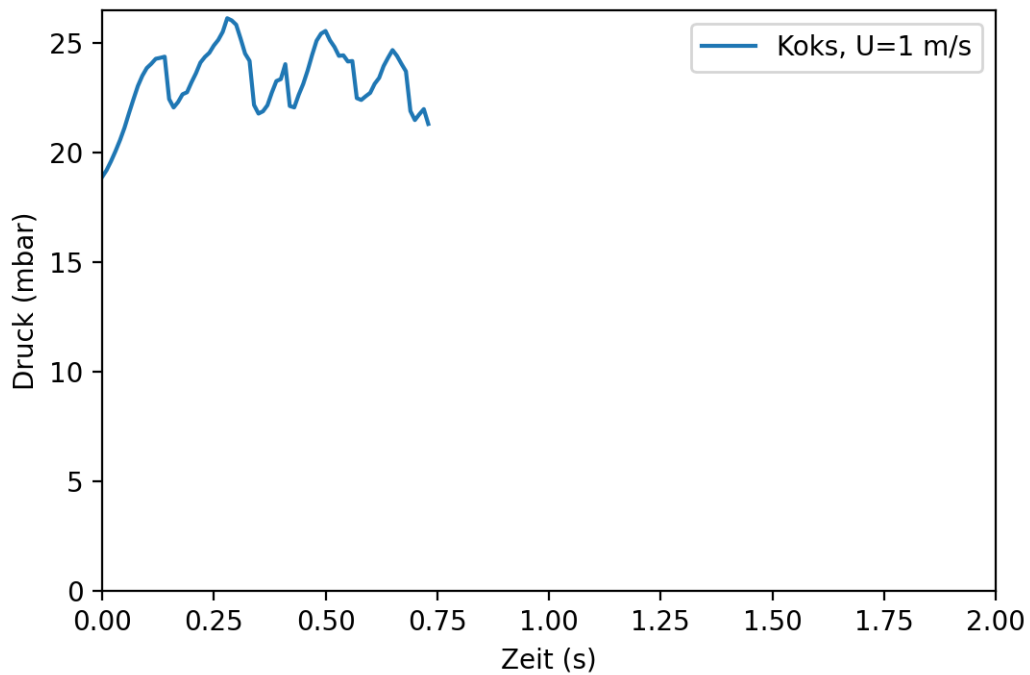


Abbildung 87: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts beim Ausfluss der Koksschüttung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die gezeigten Simulationen die in den experimentellen Arbeiten gesehenen Effekte qualitativ gut wiedergeben, für eine quantitativ abgesicherte Nutzung aber noch weitere Entwicklung notwendig ist, u.a. auch die Berechnungszeiten noch reduziert werden müssen.

3.12. Identifikation bestimmender Parameter für das Fließverhalten durchströmter Schüttgüter (AP 12, FS 1&2)

Wird die Schüttung von einem Fluid im Gegenstrom durchströmt, so wird ein Teil der durch die Gravitation aufgeprägten Kräfte durch die Strömungskräfte kompensiert, wodurch die Ausflussrate massiv beeinflusst wird. Umgekehrt beeinflusst die Durchströmung die räumliche Verteilung des Feststoffs (lokale Porosität), was wiederum eine Umverteilung der Strömung und damit der Strömungskräfte im Schüttgut verursacht. Sind die mit diesen Strömungsvorgängen assoziierten Zeiträume lang genug, z.B. beim stationären Durchströmen und kontinuierlicher Nachförderung des Feststoffs, so stellen sich stationäre Gleichgewichtszustände ein. Ist die Summe aus mechanischen Stützkraften und resultierenden Strömungskräften im engsten Querschnitt groß genug die antreibenden Kräfte zu kompensieren, so stagniert der Ausfluss und es kommt zu einer strömungsinduzierten Brückenbildung, die es zu vermeiden gilt. Oftmals muss auch die Kontinuität eines Mindestmassenstroms des Feststoffs im Austrittsquerschnitt gewährleistet werden, was problematisch sein kann, wenn die räumlichen Veränderungen im Porositätsfeld zeitlich fluktuieren.

In den in diesem Vorhaben durchgeführten Experimenten und den begleitenden numerischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass es nicht ausreichend ist, allein die Materialeigenschaften empirisch, also anhand vordefinierter generischer Experimente zu ermitteln, um damit dann den Ausfluss für unterschiedliche Anordnungen vorhersagen zu können. Bereits ohne Durchströmung hängt die Ausflussrate von der Kräfteverteilung im Nahbereich des Austragsorgans ab. Wird ein Großteil der die Bewegung antreibenden Kräfte (Gravitation oder Schürelement) von der Struktur des Apparats aufgenommen (z.B. durch den Boden bei dem seitlich ausströmenden Versuchsrohr der FS 1) so stellen sich andere Bedingungen ein als bei einem zentral auslaufenden, vertikal angeordneten Silo.

Die Schüttgut- und Gasbewegung ist daher auf Seiten des Feststoffs das Ergebnis der komplizierten und nicht einfach integral zu beschreibenden Wechselwirkung zwischen der Geometrie und Stoffdaten auf der Mikroskala (u.a. Form der Partikel, Radius der Partikelkanten) und der Geometrie auf der Makroskala (Form des Apparats, Anordnung und Querschnitt des Auslasses). Auf der Fluidseite bestimmen die sich durch die Feststoffverteilung entwickelnde Lückengradanordnung, der Dichteunterschied zum Feststoff sowie die zwischen Fluid und Partikeln wechselseitig ausgetauschten Kräfte das übergeordnete Bewegungsverhalten.

Dennoch lassen sich folgende Trends eindeutig identifizieren:

- In einer statischen Schüttung ohne Partikelaustritt werden die Druckverluste durch die Ergun-Gleichung in der Regel überschätzt. Dies trifft insbesondere für reale Materialien zu, die zwar von der Kugelform abweichen, aber keine sehr ausgeprägte Größenverteilung aufweisen. Anpassungen über Formfaktoren sind zwar möglich, erfordern aber für jedes konkrete Schüttgut eine neue Messung. Eine einfache Skalierung (Apparate-/Einlassdurchmesser/Anordnung) kann hier leicht falsche Werte liefern. Die Druckverluste aus DEM/CFD-Simulationen liegen dabei näher an den Messwerten, vor allem dann, wenn die geometrische Anordnung mehrerer Einströmungen zu berücksichtigen ist (es wird nicht nur mit einer einzigen Leerrohrgeschwindigkeit für den ganzen Apparat gerechnet).
- Bei Auslauf mit Gas-Gegenströmung führen kleine Volumenströme für die hier betrachteten Partikel (im Wesentlichen kompakte, konvexe Formen) zu einer „Lockerung“ der Schüttung, was den ausfließenden Partikelmassenstrom vergrößert. Je größer die Abweichung von der Kugelform ist, desto geringer ist dieser Effekt ausgeprägt (siehe Kap. 3.11). Bei größeren Volumenströmen kommt es zur Stagnation des Ausflusses, wenn der Gasvolumenstrom einen partikelspezifischen Grenzwert übersteigt.
- Der Druckverlust steigt beim Öffnen der Austragsorgane in den Experimenten und auch in den Simulationen zunächst an, da die Schüttung durch die Schwerkraft erst beschleunigt wird und während dieser Phase zusätzliche Arbeit verrichtet wird, um den Lückengrad zu schaffen, der den aufgeprägten Volumenstrom erst ermöglicht. Die Größe dieses Effekts ist primär von der Materialdichte abhängig.
- Die Permeabilität nach Darcy kann als Indikator in realen Anlagen für ein plötzliches Absinken der Schüttguthöhen (z.B. Zusammenbrechen von Brücken) dienen. Hier konnte eine hinreichende Korrelation zwischen Schüttguthöhe und Permeabilität identifiziert werden.
- Der Zustand des Ausfließens (Ausflussrate, Druckverluste) ist abhängig von der Geometrie der Umschließung, der Geometrie der Partikel und den sich über der

Zeit entwickelnden und im stationären Fall ein Gleichgewicht erreichenden Wechselwirkungskräften. Diese wiederum sind im bewegten Schüttgut vom dynamischen Zustand beider Phasen abhängig, bereits kleine Abweichungen können hier zu vollständig anderem Verhalten führen (Ausfluss vs. Stagnation).

Es zeigt sich, dass die numerischen Simulationen im Vergleich zu den Experimenten sehr plausibles Verhalten aufzeigen und damit als Werkzeug zur Untersuchung des kombinierten Bewegungsverhaltens durchaus geeignet sind. Für sorgfältig (im Wechselspiel mit der Simulation) eingestellte Geometrie- und Materialparameter lassen sich beispielsweise Massenausflusskurven von Modellkörpern auch korrekt wiedergeben. Allerdings hat sich auch herausgestellt, dass im Detail noch viele offene Fragen zu beantworten sind. Dies gilt besonders dann, wenn realistische Partikeleigenschaften und -formen das System kontrollieren. Die einfache Approximation durch kugelförmige Partikel mit angepassten mechanischen und strömungsmechanischen Parametern scheint hier nicht zielführend zu sein.

4. Literaturverzeichnis

- [1] F. Cimolin and M. Discacciati, "Navier–Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media," *Applied Numerical Mathematics*, no. 72, pp. 205–224, 2013.
- [2] B. Krause, B. Liedmann, J. Wiese, S. Wirtz, and V. Scherer, "Coupled three- dimensional DEM-CFD simulation of a lime shaft kiln - Calcination, particle movement and gas-phase flow-field," *Chem. Eng. Sci.*, no. 134, pp. 834–849, 2015.
- [3] F. Bambauer, S. Wirtz, V. Scherer, H. Bartusch, "Transient DEM-CFD simulation of solid and fluid flow in a three dimensional blast furnace model," *Powder Technology*, no. 334, pp. 53–64, 2018.
- [4] H. R. Norouzi, R. Zarghami, R. Sotudeh-Gharebagh, and N. Mostoufi, *Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows*: Wiley & Sons, 2016.
- [5] S. Ji and L. Liu, *Computational Granular Mechanics and Its Engineering Applications*. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [6] J. Pottbäcker and O. Hinrichsen, "Experimental Study on the Influence of Filling Method and Particle Material on the Packed-Bed Porosity," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 89, no. 4, pp. 454–458, 2017, doi: 10.1002/cite.201600151.
- [7] C. Limberg, *Computergenerierte Kugelschüttungen in zylindrischen Röhren als Basis für eine differenzierte Modellierung von Festbettreaktoren*. Cottbus: Technische Universität Cottbus, 2002.
- [8] M. e. Geerdes, *Modern blast furnace ironmaking*. Düsseldorf: Stahleisen GmbH, 2004.
- [9] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzungen*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [10] W. Bohl and W. Elmendorf, *Technische Strömungslehre: Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, inkompressible Strömungen, kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik*, 13th ed. Würzburg: Vogel, 2005.
- [11] J. e. Hommel, "Porosity–Permeability Relations for Evolving Pore Space: A Review with a Focus on (Bio-)geochemically Altered Porous Media," *Transp Porous Med.*, no. 124, 2018.
- [12] B. e. a. Wright, "Gas–solid flow in an ironmaking blast furnace — I: Physical modelling," *Powder Technology*, no. 208, pp. 86–97, 2011.
- [13] E. Lwamba and A. M. Garbers-Craig, "Control of the grain size distribution of the raw material mixture in the production of iron sinter," *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, no. 108, pp. 293–300, 2008.
- [14] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns," *Chem Eng Prog1*, no. 48, pp. 89–94, 1952.
- [15] R. Di Felice, "The voidage function for fluid-particle interaction systems," *Int. J. Multiph. Flow*, no. 20, pp. 153–159, 1994.

5. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - BFI (FS1) – 27,71 PM
Planung und Aufbau von Versuchsständen, Durchführung und Auswertung von Messungen
- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - LEAT (FS2) – 28 PM
Inbetriebnahme des Versuchstandes, Untersuchungen durchströmter idealisierter Schüttungen, Aufsetzen und Auswerten von Simulationen
- Ausgaben für Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - BFI (FS1) – 6.700 €
 - LEAT (FS2) – Keine Ausgaben
- Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - BFI (FS1) – Keine Ausgaben
 - LEAT (FS2) – Keine Ausgaben

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Hiermit bestätigen die Forschungseinrichtungen, dass alle durchgeführten Arbeiten notwendig und angemessen sind. Die Fördermittel und das Personal werden zielorientiert und adäquat, den Aufgaben angemessen, eingesetzt. Die verwendeten Geräte sind gemäß der Projektplanung vorhanden und werden gemäß ihrer Bestimmung verwendet.

6. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Die Situation, in der ein Teil der durch die Gravitation aufgeprägten Kräfte durch die Strömungskräfte kompensiert wird, was sowohl die die Ausflussrate massiv beeinflusst als auch auf die räumliche Verteilung des Feststoffs zurückwirkt, ist bisher nicht hinreichend betrachtet worden.

Vor allem für die im Umfeld von Grundstoffindustrie, Schüttguttechnik und mechanischer Fördertechnik tätigen KMU sind die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse von Nutzen. Hier treten sowohl bei Auslegung und Entwicklung als auch bei Betrieb und Produktionsüberwachung Fragestellungen auf, die mit dem Ausfließen von Schüttgütern im Gegenstrom eine Rolle spielen. Da eine vollständige und überprüfte Beschreibung solcher Ausfließvorgänge, insbesondere dann, wenn das Partikelkollektiv aus unregelmäßig geformten, eventuell scharfkantigen Objekten besteht, derzeit noch nicht existiert, stellen die hier erarbeiteten Ergebnisse eine erste Hilfe dar. Das vorliegende Projekt stellt einen ersten vollständigen experimentellen Datensatz für solche Situationen sowohl für reale Schüttgüter als auch realitätsnahe Geometrien (Schacht der FS1). Die Permeabilität konnte als ein wichtiger Indikator für Störungen im Schüttgutausfluss identifiziert werden. Die experimentell bestimmten Daten und die dabei gewonnenen Erfahrungen werden auf Anfrage Interessierten zur Verfügung gestellt.

Die im Projekt durchgeführten ersten, auf diese Auslaufsituationen abzielenden numerischen Simulationen und die dabei verwendeten methodischen Ansätze, stehen interessierten KMU's (Ingenieurbüros, Software-/Entwicklungsabteilungen, Herstellern) auf Anfrage ebenfalls zur Verfügung und unterstützen so die Entwicklung im Allgemeinen oder können zur Lösungen bei konkreten Fragestellungen beitragen.

7. Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

▪ Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahmen	Ort/Rahmen	Ziel	Zeitraum
Informationen der Unternehmen im projektbegleitenden Ausschuss (PA)	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Bochum (Kick Off) 1. PA		15.05.2019
	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Bochum 2. PA	kontinuierlicher Transfer der Ergebnisse, Diskussion der Zwischenberichte,	25.02.2020
	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses - online 3. PA	Festlegung der weiteren Arbeitsschritte	20.11.2021
	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses - online 4. PA		28.01.2022
in anderen Fach- und Branchenverbänden und auf Fachtagungen	Präsentation bei der DVV JHV	Nationaler und internationaler Ergebnistransfer	14.11.2019
			12.11.2020
			11.11.2021

- Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahmen	Ort/Rahmen	Ziel	Zeitraum
Information der Unternehmen im PA	Präsentation des Abschlussbericht für den Projektbegleitenden Ausschuss	kontinuierlicher Transfer der Ergebnisse, Diskussion des Abschlussberichtes	2022
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Bereitstellung der Zwischenberichte und des Abschlussberichts auf der DVV- und Lehrstuhlhomepage des LEAT	branchenübergreifende Verbreitung der Ergebnisse (Umwelt-, Prozess-, Energietechnik, chemische Industrie, usw.)	2022
Dissertation	Thema Wechselwirkung von Fließverhalten und Durchströmung in Schachtöfen (M.Sc. Scharnowski)	Vermitteln von wissenschaftlichen Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten	2022/2023
Dissertation	Thema Wechselwirkung von Fließverhalten und Durchströmung in Schachtöfen (M.Sc. Piontek)	Vermitteln von wissenschaftlichen Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten	2023/2024

8. Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Interessierten Unternehmen werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts über den Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Vorträgen bei Fachtagungen und Konferenzen sowie über den Schlussbericht international und national bereitgestellt. Das veröffentlichte Material beinhaltet sowohl die erlangten Erkenntnisse als auch die für die Simulation von industriellen Anlagen benötigten Daten. Hierdurch sind Anlagenbetreiber in der Lage Rückschlüsse auf das Bewegungsverhalten durchströmter Schüttgüter zu erhalten.

Darüber hinaus werden die Ergebnisse durch die Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss und die akademische Lehre in die Praxis getragen.

Die Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden im Wesentlichen wie geplant durchgeführt. Ebenso werden die nach Abschluss des Forschungsvorhabens geplanten Maßnahmen als realisierbar bewertet.

9. Publikationen und Abschlussarbeiten aus dem Projekt

- 2019 Dennis Schurf, Masterarbeit: „Konstruktion und Inbetriebnahme eines Prüfstands zur Untersuchung von durchströmten Schüttungen“ [FS2]
- 2019 Igor Polosin, Masterarbeit: „Strömungsmechanische Simulation und Auslegung eines Versuchstands“ [FS2]
- 2021 Alexander Apfeld, Projektarbeit: „Aufbau und Inbetriebnahme eines 3D-Druckers zur Herstellung komplexer Partikelformen“ [FS2]
- 2021 Alexander Apfeld, Bachelorarbeit: „Automatisierung der Versuchsdurchführung zur Untersuchung von durchströmten Schüttungen“ [FS2]