

Abschlussbericht

zu IGF-Vorhaben 19323 BG

Thema

Interaktion von Axialtransport, Wärmeeintrag und Reaktion in Drehrohren

Berichtszeitraum

01.02.2017 - 31.01.2020

Forschungsvereinigung

Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. - DVV

Leimkugelstraße 10, 45141 Essen

Forschungsstelle(n)

Forschungsstelle 1: Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Energieanlagen u. Energieprozesstechnik, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

Bochum, 30.10.2020

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. V. Scherer

Name und Unterschrift des Projektleiters der (bei einem gemeinsamen Bericht federführenden) Forschungsstelle

Forschungsstelle 2: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,

Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik, Lehrstuhl für Thermodynamik u. Verbrennung, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Magdeburg, 30.10.2020

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. E. Specht

Name und Unterschrift des Projektleiters der (bei einem gemeinsamen Bericht federführenden) Forschungsstelle

Drehrohraxialtransport

IGF-Vorhaben Nr. 19323 BG

INTERAKTION VON AXIALTRANSPORT, WÄRMEEINTRAG UND REAKTION IN DREHROHREN

Kurzfassung

Innerhalb dieses Projekts wurde die Kopplung von Axialtransport, Wärmeeintrag, Trocknung und Reaktion in einem indirekt beheizten Drehrohr untersucht. An der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Forschungsstelle 2) wurden hauptsächlich experimentelle Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse zur Validierung der an der Ruhr-Universität Bochum (Forschungsstelle 1) durchgeführten DEM-Simulationen verwendet wurden.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Pilot-Drehrohrföfen durchgeführt, der je nach Anforderungen der Arbeitspakete transversal oder kontinuierlich betrieben werden kann. Dabei wurden die Parameter Rotationsgeschwindigkeit, Heiztemperatur, Füllungsgrad bzw. Massendurchsatz und Neigungswinkel variiert. Als Versuchsmaterialien kamen Glaskugeln, Blähton und Dolomit zum Einsatz. Über eine Temperaturmessung mit Thermoelementen konnten die Temperaturen von Drehrohrwand, Schüttgut und Gas axial, radial und transversal gemessen werden. Die darüber aufgezeichneten Temperaturverläufe können zur Analyse des Wärmeübergangs herangezogen werden. Zusätzlich wurden bei den Versuchen zur Untersuchung von Trocknung und Reaktion Proben aus dem Schüttbett entnommen und nachfolgend entsprechend der Feuchtegehalt bzw. Reaktionsgrad bestimmt.

Zur Anpassung und Überprüfung der DEM-Simulationen wurden die Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen verwendet. Der zur Abbildung der Systeme gewählte Simulationsansatz (DEM), erlaubt es, sowohl die Partikelbewegung als auch die Wärmeübertragungsmechanismen quantitativ unter Variation der angeführten Parameter abzubilden. Die mit der DEM erzielten Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Werten. Die Möglichkeit des Ergebnistransfers in die Industrie ist gegeben.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang	152 S., 103 Abb., 12 Tab., 46 Lit.
Beginn des Projekts	01.02.2017
Ende des Projekts	31.07.2019 + kostenneutrale Verl. bis 31.01.2020
Zuschussgeber	BMWi / IGF-Nr. 19323 BG
Forschungsstellen	1: Ruhr-Universität Bochum, LS für Energieanlagen & Energieprozesstechnik Leiter: Prof. Dr.-Ing. V. Scherer 2: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik Leiter: Prof. Dr.-Ing. F. Herz, Prof. Dr.-Ing. E. Specht
Bearbeiter und Verfasser	M. Sc. Claudia Meitzner, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg M. Sc. Maik Scharnowski, Ruhr-Universität Bochum
Vorsitzender projektbegleitender Ausschusses	Dr.-Ing. P. Wübben, Linn High Therm GmbH, Eschenfelden
Vorsitzender wiss. Beirat	Dr. Heinz-Peter Gitzinger, Elster GmbH, Wuppertal

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Management Report	1
2 Einleitung	3
3 Stand der Forschung	6
3.1 Materialbewegung	6
3.1.1 Allgemein.....	6
3.1.2 Transversale Materialbewegung.....	7
3.1.3 Axiale Materialbewegung	9
3.2 Wärmeübertragung.....	9
3.3 Trocknung	12
3.4 Reaktionsverhalten/Dolomitzersetzung	13
3.5 Diskrete Elemente Methode.....	16
3.6 Ziele und Ergebnisse des vorausgegangenen Projekts	25
3.7 Projektziel.....	26
4 Vorbetrachtungen	27
4.1 Versuchsanlage (FS1).....	27
4.1.1 Messeinrichtungen zur Parameterbestimmung.....	27
4.1.2 Prüfstands Aufbau.....	33
4.2 Versuchsanlage (FS2).....	40
4.3 Versuchsmaterial (FS1/FS2).....	43
4.3.1 Auswahl der verwendeten Materialien	43
4.3.2 Materialeigenschaften	43
4.4 Versuchsdurchführung und Auswertung (FS1).....	47
4.4.1 Untersuchung des axialen Schüttguttransports im Kaltzustand (FS-1 AP1).....	49
4.4.2 Untersuchung zum axialen Schüttguttransport mit gekoppeltem Wärmeeintrag über die freie Bettoberfläche (FS-1 AP3)	54
4.5 Versuchsdurchführung (FS2).....	61
4.5.1 Untersuchung des Wärmeeintrags im kontinuierlichen Betrieb (FS-2 AP1)	62
4.5.2 Untersuchung der Trocknung von Blähton, transversal (FS-2 AP2).....	63
4.5.3 Untersuchung der Zersetzung von Dolomit (FS-2 AP3)	65

4.5.4	Untersuchung der Trocknung mit axialem Transport (FS-2 AP4)	67
4.5.5	Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Dolomit (FS-2 AP5)	68
4.6	Versuchsauswertung (FS2)	69
4.6.1	Analyse der Schüttbetthöhe	69
4.6.2	Analyse des Schüttwinkels	73
4.6.3	Analyse der Temperaturverteilung	73
4.6.4	Analyse des Trocknungsfortschritts	77
4.6.5	Analyse des Reaktionsfortschritts	81
5	Ergebnisse	84
5.1	Untersuchung des axialen Schüttguttransports im Kaltzustand (FS-1 AP1)	84
5.2	Simulation des axialen Schüttguttransports im Kaltzustand (FS-1 AP2)	89
5.3	Untersuchung zum axialen Schüttguttransport mit gekoppeltem Wärmeeintrag über die freie Bettoberfläche (FS-1 AP3)	91
5.4	Simulation des axialen Schüttguttransportes mit gekoppeltem Wärmeeintrag in das Schüttbett (FS-1 AP4)	99
5.4.1	Simulation einer ruhenden Partikelschüttung	99
5.5	Simulation der Schüttgutreaktion von Blähton und Magnesit ohne Axialen Transport (FS-1 AP5) 103	
5.6	Simulation des axialen Schüttguttransports mit Kopplung von Wärmeeintrag und Schüttgutreaktion (FS-1 AP6)	109
5.7	Untersuchung des Wärmeeintrags im kontinuierlichen Betrieb (FS-2 AP1)	110
5.7.1	Transversales Temperaturprofil	110
5.7.2	Axiales Temperaturprofil	111
5.8	Untersuchung der Trocknung von Blähton, transversal (im Batch Versuch) (FS-2 AP2)	112
5.8.1	Zeitliches Temperaturprofil	112
5.8.2	Einfluss des Füllungsgrades auf die Trocknungsrate	112
5.8.3	Einfluss der Drehzahl auf die Trocknungsrate	113
5.9	Untersuchung der Dolomitzersetzung (FS-2 AP3)	114
5.9.1	Einfluss der Dolomitsorte auf die Zersetzung	114
5.9.2	Einfluss der Partikelgröße auf die Zersetzung	115
5.9.3	Einfluss der Temperatur auf die Zersetzung	116
5.10	Untersuchung der Trocknung mit axialem Transport (FS-2 AP4)	118
5.10.1	Einfluss des Massenstroms auf die Trocknungsrate	118
5.10.2	Einfluss der Drehzahl auf die Trocknungsrate	118
5.10.3	Einfluss des Neigungswinkels auf die Trocknungsrate	119
5.11	Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Dolomit (FS-2 AP5)	120
6	Mathematisches Segregationsmodell (FS2-AP6)	127
6.1	Modellentwicklung	127
6.2	Simulation eines monodispersen Systems	130

6.3	Simulation eines bidispersen Systems	132
7	Zusammenfassung und Ausblick	135
8	Literaturverzeichnis.....	137
9	Verwendung der Zuwendung.....	142
10	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU 143	
11	Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	144
12	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	148
13	Publikationen, Vorträge und Abschlussarbeiten aus dem Projekt.....	149
13.1	Publikationen.....	149
13.2	Vorträge	149
13.3	Abschlussarbeiten	151

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: VERSUCHSANLAGE „PILOTDREHROHROFEN“	4
ABBILDUNG 2: AXIALES FÜLLSTANDSPROFIL	6
ABBILDUNG 3: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER PARTIKELBEWEGUNG IM DREHROHR NACH (HERZ 2012)	7
ABBILDUNG 4: QUERSCHNITTSPROFIL BEI DER ROLLING MOTION (HERZ ET AL. 2012)	8
ABBILDUNG 5: MECHANISMEN DES WÄRMEÜBERGANGS BEI DIREKTER (A) UND INDIREKTER BEHEIZUNG (B) (HERZ ET AL. 2012)	10
ABBILDUNG 6: WÄRMEÜBERGANGSMECHANISMEN IM INDIREKT BEHEIZTEN DREHROHR (WEITERENTWICKELT AUS ABBILDUNG VON (BOATENG 2015))	12
ABBILDUNG 7: DARSTELLUNG DER ZERSETZUNG EINES KALKSTEINPARTIKELS MIT HILFE DES KERN-SCHALE-MODELLS (HALLAK 2019)	15
ABBILDUNG 8: STOBVORGANG ZWISCHEN ZWEI KUGELFÖRMIGEN PARTIKELN	17
ABBILDUNG 9: RELEVANTE GRÖßEN BEIM KONTAKT ZWEIER KUGELFÖRMIGER PARTIKEL	20
ABBILDUNG 10: LINEARES FEDER-DÄMPFER-MODELL FÜR DIE NORMALENRICHTUNG	21
ABBILDUNG 11: LINEARES KRAFTMODELL FÜR DIE TANGENTIALRICHTUNG	24
ABBILDUNG 12: DREHFEDERMODELL	25
ABBILDUNG 13: SCHEMATISCHER VERSUCHSAUFBAU (LINKS), KRAFTMESSGERÄT ZUR BESTIMMUNG VON REIBUNGSKOEFFIZIENTEN (RECHT)	28
ABBILDUNG 14: SCHEMATISCHER FALLVERSUCH (LINKS), FALLVERSUCHSMESSSTAND ZUR STÖßZAHLBESTIMMUNG (RECHS)	29
ABBILDUNG 15: STATISCHER SCHÜTTWINKEL VERSUCHSTAND	30
ABBILDUNG 16: BATCH DREHROHR ZUR BESTIMMUNG DES DYNAMISCHEN SCHÜTTWINKELS	31
ABBILDUNG 17: PRINZIP ZUR BESTIMMUNG DES ROLLREIBUNGSKOEFFIZIENTEN	32
ABBILDUNG 18: PRÜFSTANDSAUFBAU – GESAMTÜBERSICHT	34
ABBILDUNG 19: PRÜFSTANDSAUFBAU – EINLASSBEREICH	35
ABBILDUNG 20: PRÜFSTANDSAUFBAU – AUSLASSBEREICH	36
ABBILDUNG 21: PRÜFSTANDSAUFBAU – VORRICHTUNG FÜR MASSENSTROMWÄGUNG	37
ABBILDUNG 22: PRÜFSTANDSAUFBAU – ANTRIEB MESSTRAVERSE	38
ABBILDUNG 23: APPARATIVER AUFBAU DER VERSUCHSANLAGE „PILOT-DREHROHROFEN“	40
ABBILDUNG 24: PRINZIPIELLES SCHEMA FÜR VERSUCHSAUFBAU BEI KONTINUIERLICHER DURCHFÜHRUNG (OBEN) UND BATCH-FAHRWEISE (UNTEN)	41
ABBILDUNG 25: QUERSCHNITT DES PILOT-DREHROHROFENS MIT MESSTECHNIK WÄHREND DER ROTATION; BEISPIEL FÜR DIE MESSUNG DER LUFTTEMPERATUR (LINKS) SOWIE DER FESTBETTTEMPERATUR (RECHTS)	42
ABBILDUNG 26: MESSZYLINDER FÜR DIE SCHÜTTDICHEMESSUNG	45
ABBILDUNG 27: AUSBILDUNG DES DYNAMISCHEN SCHÜTTWINKELS θ AM BEISPIEL DER ROLLING MOTION (SPECHT 2014)	46
ABBILDUNG 28: GUI DER DREHROHRSTEUERUNGSSOFTWARE	47
ABBILDUNG 29: VERSCHIEDENE ENDSTÜCKE DER ZULAUFLEITUNG	48
ABBILDUNG 30: SENSORSYSTEM ZUR HÖHENMESSUNG	49
ABBILDUNG 31: BILDAUFNAHME EINER BELEUCHTETEN SCHÜTTUNG AUS GLASKUGELN IM DREHROHR	50

ABBILDUNG 32: KAMERA ZUR DETEKTION DER TRACERPARTIKEL	51
ABBILDUNG 33: TRACERPARTIKEL IN DEN DREI GRÖßEN BEIM AUSTRITT AUS DEM DREHROHR	52
ABBILDUNG 34: AUFNAHMEPUNKTE IM DREHROHR	53
ABBILDUNG 35: PIV-SENSOR ZUR BESTIMMUNG DER PARTIKELGESCHWINDIGKEIT AN DER BETTOBERFLÄCHE	53
ABBILDUNG 36: VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE OBERFLÄCHENTEMPERATURMESSUNGEN	54
ABBILDUNG 37: OBERFLÄCHENTEMPERATUREN BEI EINER STRAHLERLEISTUNG VON 500 W	56
ABBILDUNG 38: MITTELPUNKTTEMPERATUREN BEI EINER STRAHLERLEISTUNG VON 500 W	56
ABBILDUNG 39: AN DER MESSEINHEIT BEFESTIGTE MESSLANZEN	59
ABBILDUNG 40: BLICK INS INNERE DES PILOT-DREHROHROFENS WÄHREND KONTINUIERLICHER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	62
ABBILDUNG 41: BEFEUCHTUNG DES BLÄHTONS IM GITTERBEHÄLTER; TROCKENER BLÄHTON (LINKS), BLÄHTON IM WASSERBAD (MITTE) UND ABTROPFENDER BLÄHTON (RECHTS)	63
ABBILDUNG 42: PROBENBEHÄLTER (OBEN) UND STANGE ZUR PROBEENTNAHME (UNTEN)	64
ABBILDUNG 43: ROHROFEN ZUR ANALYSE DES REAKTIONSVERHALTENS VON DOLOMIT	65
ABBILDUNG 44: ZUFÖRDERER AUF DER PLATTFORM OBERHALB DES PILOTDREHROHROFENS	67
ABBILDUNG 45: APPARATIVER AUFBAU DER VERSUCHSANLAGE ZUR UNTERSUCHUNG DER TRANSVERSALEN BEWEGUNG	69
ABBILDUNG 46: SCHÜTTBETHÖHENMESSUNG DURCH ABLESEN	70
ABBILDUNG 47: SCHÜTTBETHÖHENMESSUNG MIT GRAFIKPROGRAMM	71
ABBILDUNG 48: SCHÜTTBETHÖHE UND DYNAMISCHER SCHÜTTWINKEL DEFINIEREN EINDEUTIG DIE POSITION DER SCHÜTTUNG IM DREHROHR	72
ABBILDUNG 49: EXEMPLARISCHES SCHÜTTBETHÖHENPROFIL	72
ABBILDUNG 50: EXEMPLARISCHES FÜLLUNGSGRADPROFIL	73
ABBILDUNG 51: MESSUNG DES DYNAMISCHEN SCHÜTTWINKELS MIT HILFE DES GRAFIKPROGRAMMS IMAGEJ	73
ABBILDUNG 52: AUFBAU DER .TXT-DATEI ZUR SPEICHERUNG DER MESSWERTE	74
ABBILDUNG 53: ANORDNUNG DER THERMOELEMENTE UND ZUGEHÖRIGE WANDABSTÄNDE IM LÄNGSSCHNITT	75
ABBILDUNG 54: ANORDNUNG DER THERMOELEMENTE UND ZUGEHÖRIGE WANDABSTÄNDE IM QUERSCHNITT	76
ABBILDUNG 55: EXEMPLARISCHER VERLAUF DES FEUCHTEGEHALTS (OBEN), DES NORMIERTEN FEUCHTEGEHALTS (MITTE) UND ERMITTLUNG DER TROCKNUNGSRATE (UNTEN) BEI KONTINUIERLICHER TROCKNUNG	78
ABBILDUNG 56: EXEMPLARISCHER VERLAUF DES FEUCHTEGEHALTS (OBEN), DES NORMIERTEN FEUCHTEGEHALTS (MITTE) UND ERMITTLUNG DER TROCKNUNGSRATE (UNTEN) BEI TROCKNUNG IN BATCH-FAHRWEISE	80
ABBILDUNG 57: EXEMPLARISCHER TEMPERATURVERLAUF UND MASSENVERLUST WÄHREND DER ZERSETZUNG VON DOLOMIT	81
ABBILDUNG 58: ZEITABHÄNGIGER UMSATZ WÄHREND DER ZERSETZUNG DES MAGNESIUMCARBONATS	83
ABBILDUNG 59: VERWEILZEITMESSUNG BEI UNTERSCHIEDLICHEN DREHZAHLEN VON DREHROHR UND DOSIERSCHNECKE (7MM)	85
ABBILDUNG 60: VERWEILZEITMESSUNG BEI UNTERSCHIEDLICHEN DREHZAHLEN VON DREHROHR UND DOSIERSCHNECKE (5MM)	85
ABBILDUNG 61: VERWEILZEITMESSUNG BEI UNTERSCHIEDLICHEN DREHZAHLEN VON DREHROHR UND DOSIERSCHNECKE (3MM)	86
ABBILDUNG 62: VERWEILZEITMESSUNG DER REIHE 3 FÜR DIE DREI TRACERPARTIKELGRÖßEN	86
ABBILDUNG 63: MITTLERE VERWEILZEITEN UNTERSCHIEDLICHER PARTIKELGRÖßEN	87
ABBILDUNG 64: GEMITTELTE UND GERUNDETE GESCHWINDIGKEIT IN Y-RICHTUNG	87
ABBILDUNG 65: EXEMPLARISCHES ERGEBNIS DES GESCHWINDIGKEITSPROFILS IN Y-RICHTUNG	88

ABBILDUNG 66: EXEMPLARISCHE SCHÜTTBETHÖHE EINER IM DREHROHR ERFASTEN SCHÜTTUNG	89
ABBILDUNG 67: DREHROHRSIMULATION DES GESAMTEN DREHROHRES	89
ABBILDUNG 68: DREHROHRSEGMENT	90
ABBILDUNG 69: DREHROHR ZUSAMMENGESETZT AUS MEHREREN SEGMENTEN	90
ABBILDUNG 70: VERWEILZEITVERTEILUNG ZWISCHEN SIMULATION UND EXPERIMENT	91
ABBILDUNG 71: EXEMPLARISCHE PARTIKELVERWEILZEITANALYSE.....	91
ABBILDUNG 72: MESSWERTABWEICHUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER GEMESSENEN TEMPERATUR	92
ABBILDUNG 73: TEMPERATURVERLAUF EINES ABKÜHLENDEN PARTIKELS	93
ABBILDUNG 74: PLOT DER SCHICHTTEMPERATUREN FÜR z=1440 MM.....	94
ABBILDUNG 75: TEMPERATURVERTEILUNGEN FÜR VERSUCH 1 (LINKS) UND VERSUCH 2 (RECHTS)	95
ABBILDUNG 76: TEMPERATURVERTEILUNGEN FÜR VERSUCH 2 (LINKS) UND VERSUCH 3 (RECHTS)	98
ABBILDUNG 77: MODELLIERTE KUGELSCHÜTTUNG	100
ABBILDUNG 78: FÜR DIE SIMULATION VERWENDETES CFD-GITTER.....	101
ABBILDUNG 79: DURCH PARTIKEL BELEGTE CFD-ZELLEN IM QUERSCHNITT DES BEHÄLTERS	102
ABBILDUNG 80: STRAHLUNGSINTENSITÄT IM QUERSCHNITT DES BEHÄLTERS	102
ABBILDUNG 81: AUF DIE PARTIKEL AUFTREFFENDE „SURFACE RADIATION“	103
ABBILDUNG 82: KERN-SCHALE MODELL ZUR BESCHREIBUNG DER CALCINIERUNG	104
ABBILDUNG 83: MAGNESITKALZINIERUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR.....	109
ABBILDUNG 84: MODELLIERUNG EINER ERDGASFLAMME	110
ABBILDUNG 85: EXEMPLARISCHES TRANSVERSALES TEMPERATURPROFIL AN MITTLERER OFENPOSITION	110
ABBILDUNG 86: EXEMPLARISCHES AXIALES TEMPERATURPROFIL.....	111
ABBILDUNG 87: EXEMPLARISCHES AXIALES TEMPERATURPROFIL FÜR TROCKENEN BLÄHTON (DURCHGEZOGENE LINIE) UND FEUCHTEN BLÄHTON (GESTRICHELTE LINIE)	112
ABBILDUNG 88: MAXIMALE TROCKNUNGSRATE UNTERSCHIEDLICHER PARTIKELGRÖßEN IN ABHÄNGIGKEIT DES FÜLLUNGSGRADES .	113
ABBILDUNG 89: MAXIMALE TROCKNUNGSRATE UNTERSCHIEDLICHER PARTIKELGRÖßEN IN ABHÄNGIGKEIT DER DREHZAHL	114
ABBILDUNG 90: EINFLUSS DER DOLOMITSORTE AUF DEN UMSATZ	115
ABBILDUNG 91: EINFLUSS DER PARTIKELGRÖßE AUF DEN UMSATZ	116
ABBILDUNG 92: EINFLUSS DER TEMPERATUR AUF DEN UMSATZ	116
ABBILDUNG 93: MAXIMALE TROCKNUNGSRATE IN ABHÄNGIGKEIT DES MASENSTROMS IM KONTINUIERLICHEN VERSUCH.....	118
ABBILDUNG 94: MAXIMALE TROCKNUNGSRATE IN ABHÄNGIGKEIT DER ROTATIONSGESCHWINDIGKEIT IM KONTINUIERLICHEN VERSUCH	119
ABBILDUNG 95: MAXIMALE TROCKNUNGSRATE IN ABHÄNGIGKEIT DES NEIGUNGSWINKELS IM KONTINUIERLICHEN VERSUCH	120
ABBILDUNG 96: DYNAMISCHER SCHÜTTWINKEL VON FEUCHTEM UND TROCKENEM BLÄHTON	124
ABBILDUNG 97: DYNAMISCHER SCHÜTTWINKEL VON DOLOMIT	126
ABBILDUNG 98: GEOMETRIEN DES SCHÜTTBETTS INNERHALB EINES DREHROHRSEGMENTS NACH (SAEMAN 1951).	127
ABBILDUNG 99: QUERSCHNITT EINES DREHROHRES MIT BIDISPERSEM SCHÜTTBETT.....	128
ABBILDUNG 100: GEÄNDERTE DARSTELLUNG DER FLÄCHEN BEIM BIDISPERSEN SCHÜTTBETT.	129
ABBILDUNG 101: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES FÜR DIE SIMULATION VERWENDETEN DREHROHROFENS.	130

ABBILDUNG 102: SIMULIERTE TEMPERATURPROFILE (A) UND SCHÜTTBETHÖHE (B) IM DREHROHROFEN WÄHREND EINER
KALZINATION..... 131

ABBILDUNG 103: VERGLEICH DER TEMPERATURVERLÄUFE IM MONO- BZW. BIDISPERSEN SYSTEM. 133

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: GEOMETRISCHE ABMAßE UND EINSTELLBARE PARAMETER DES PILOT-DREHROHROFENS.	41
TABELLE 2: REIBWERTE FÜR VERSCHIEDENE MATERIALKOMBINATIONEN	44
TABELLE 3: SCHÜTTDICHTEN DER VERWENDETEN VERSUCHSMATERIALIEN	45
TABELLE 4: AUFLISTUNG DER DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHE.....	61
TABELLE 5: PARAMETERVARIATION BEI FS-2 AP1.....	63
TABELLE 6: PARAMETERVARIATION BEI FS-2 AP2	64
TABELLE 7: PARAMETERVARIATION BEI FS-2 AP4	68
TABELLE 8: DYNAMISCHE SCHÜTTWINKEL VON TROCKENEM BLÄHTON IN ABHÄNGIGKEIT VON PARTIKELGRÖßE, FÜLLUNGSGRAD UND ROTATIONSGESCHWINDIGKEIT	121
TABELLE 9: DYNAMISCHE SCHÜTTWINKEL VON FEUCHTEM BLÄHTON IN ABHÄNGIGKEIT VON PARTIKELGRÖßE, FÜLLUNGSGRAD UND ROTATIONSGESCHWINDIGKEIT	122
TABELLE 10: DYNAMISCHE SCHÜTTWINKEL VON FEUCHTEM BZW. TROCKENEM BLÄHTON IN ABHÄNGIGKEIT DER PARTIKELGRÖßE ..	124
TABELLE 11: DYNAMISCHE SCHÜTTWINKEL VON UNREAGIERTEM DOLOMIT IN ABHÄNGIGKEIT VON PARTIKELGRÖßE, FÜLLUNGSGRAD UND ROTATIONSGESCHWINDIGKEIT	125
TABELLE 12: FÜR DIE SIMULATION FESTGELEGTE PARAMETER	130

Symbolverzeichnis

Latein. Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Umsatz	%
$A_{\text{Schüttung}}$	Von der Schüttung eingenommene Querschnittsfläche im Drehrohr	m ²
$A_{\text{Querschnitt}}$	Querschnittsfläche des Drehrohr	m ²
D	Durchmesser	m
D_{out}	Dicke des Feuerfestmaterials	m
d_p	Partikeldurchmesser	mm
dv	Abschnittsweise Differenz der Schüttgutgeschwindigkeit	m/s
$d\bar{X}$	Trocknungsrate	%/min
$d\bar{X}_{t,max}$	Maximale normierte Trocknungsrate über Zeitableitung	%/min
E	Energie	J
F_i	Kontaktkraft	N
Fr	Froude-Zahl	-
f_D	Füllungsgrad	-
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
H_{Bett}	Schüttbetthöhe	px
H_0	Gesamtlänge des Stahllineals zur Messung der Schüttbetthöhe	px
H_1	Sichtbarer Teil des Stahllineals zur Messung der Schüttbetthöhe	px
h	Schüttbetthöhe	m
h_{Bett}	Tatsächliche Schüttbetthöhe	mm
h_0	Tatsächliche Länge des Stahllineals zur Messung der Schüttbetthöhe	mm
h_1	Tatsächlich Sichtbarer Teil des Stahllineals zur Messung der Schüttbetthöhe	mm
J	Trägheitsmoment	kg*m ²
k^n	Federsteifigkeit	N/m
L	Länge bzw. Tiefe	m
l_{Flame}	Flammenlänge	m
\dot{M}	Massenstrom des Materials	kg/h
M_i	Moment	N*m
MRT	Mittlere Verweilzeit des Materials	kg
m	Masse	kg

m_{einwaage}	Masse des eingewogenen Materials	kg
n	Drehzahl	s^{-1}
\mathbf{n}	Einheitsnormalenvektor bei der DEM Theorie	
Nu	Nusselt-Zahl	
$p_{\text{eq,CO}_2}$	Gleichgewichts-Partialdruck CO ₂	
P	Leistung	W
P	Impuls	$N*s$
$\dot{Q}_{\text{GS,eff}}$	Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion an der freien Schüttbettoberfläche	W
$\dot{Q}_{\text{GS,konv}}$	Wärmestrom zwischen Gas und Partikelschleier	W
$\dot{Q}_{\text{GW,eff}}$	Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion zwischen Gas und freier Ofenwand	W
\dot{Q}_{Heiz}	Heizwärmestrom	W
\dot{Q}_{Leit}	Calzinierungswärmestrom für eine Kugel	W
\dot{Q}_{R}	Reaktionswärmestrom	W
$\dot{Q}_{\text{WS,kont}}$	Wärmestrom durch Leitung von der Ofenwand auf die bedeckende Schüttung	W
$\dot{Q}_{\text{WS},\epsilon}$	Wärmestrom von Wand auf Feststoff durch Strahlung	W
$\dot{Q}_{\text{WS},\lambda}$	Wärmestrom durch Kontakt zwischen Wand und Schüttung	W
r	Radius	m
R	Radius	m
RT	Verweilzeit des Materials bei Temperatur oberhalb der kritischen Temperatur	s
s_{sw}	Dicke des Feuerfestmaterials	m
Sh	Sherwood Zahl	
T	Temperatur	-
T_{G}	Gastemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_{Heiz}	Eingestellte Heiztemperatur des Drehrohrofens	$^{\circ}\text{C}$
T_{M}	Manteltemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_{ref}	Referenztemperatur zum Erreichen guter Produktqualität	$^{\circ}\text{C}$
T_{S}	Festbetttemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{S,max}}$	Maximale Schüttbetttemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_{U}	Temperatur der Umgebung	$^{\circ}\text{C}$
T_{W}	Temperatur der Ofenwand	$^{\circ}\text{C}$
T_0	Anfangstemperatur	$^{\circ}\text{C}$

t	Zeit	s
t_{Ref}	Zeit die das Material oberhalb einer bestimmten Temperatur behandelt werden soll	s
u	Geschwindigkeit der Partikel	m/s
u_1	Geschwindigkeit der großen Partikel	m/s
u_2	Geschwindigkeit der kleinen Partikel	m/s
v	Geschwindigkeit	m/s
ν	Poissonzahl	
V_{Zylinder}	Volumen des Zylinders zur Bestimmung der Schüttdichte	m ³
\dot{V}	Volumenstrom	m ³
\dot{V}_1	Volumenstrom der großen Partikel	m ³
\dot{V}_2	Volumenstrom der kleinen Partikel	m ³
Y	Massenanteil	
X	Feuchtegehalt der Probe	g
X_0	Ausgangsfeuchte	g
\bar{X}	Normierter Feuchtegehalt	%
\bar{X}_{end}	Normierte Feuchte am Auslass des Drehrohrs	%
z	Axiale Position im Ofenrohr	m
z_0	Position am Einlass des Ofens	m
z_{end}	Position am Auslass des Ofens	m
Δz	Strecke, die das Material im Ofen oberhalb einer kritischen Temperatur zurücklegt	m

Griech. Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
β	Neigungswinkel des Drehrohrs	°
β_{CO_2}	Stoffübergangskoeffizient	m ³ /(sm ²)
γ	Füllungswinkel	°
γ^n	Dämpfungskonstante	
δ	Oberer Schüttwinkel	m
δ	Überlappung bei DEM Theorie	m
ε	Halber Füllwinkel	°
θ	Dynamischer Schüttwinkel	°
λ	Wärmeleitungskoeffizient	W/(mK)
μ	Reibungskoeffizient	
ρ_{roh}	Rohdichte	kg/m ³
ρ_b	Schüttdichte	kg/m ³
φ	Drehwinkel	°
χ	Unterer Schüttwinkel	°
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
ψ	Winkel zwischen der Oberfläche des Schüttbetts und der Drehrohrachse	°

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CFD	Computational Fluid Dynamics
DEM	Diskrete Elemente Methode
FEM	Finite Elemente Methode
FS1	Forschungsstelle 1
FS2	Forschungsstelle 2
CP	Contact Point

1 Management Report

In this project, the interaction of axial transport, the drying process and the reaction in rotary kilns are investigated. Therefore, experiments are conducted at the Otto von Guericke University Magdeburg, while basic experiments and simulations are carried out at the Ruhr-University Bochum.

First, a rotary drum with a length of 1.6 m and a diameter of 0.3 m is run for the basic investigation. The residence time distribution as well as the solid bed heights are measured for varied parameters such as rotational speed, inclination angle, mass flow rate and dam sizes.

In the next step, a radiant heater is attached to supply heat directly to investigate the heat transfer to the surface and inside the solids bed during axial transport.

Additionally, in Magdeburg, continuous experiments are performed in an indirectly heated pilot rotary kiln with a total length of 1.76 m and a diameter of 0.5 m. Thermocouples are used to measure the axial and transversal temperature profiles. The parameters particle size, mass flow rate, inclination angle and rotational speed are varied to analyse their influence on the heat transfer.

Measurements obtained are compared with simulation results to assure the good usability of the chosen DEM-method. The properties of the relevant materials are the basis for all simulations.

In a further step, the drying process is investigated. First, in a batch setup, the parameters particle size, filling degree and rotational speed are varied. Then, the drying process is combined with the axial transport and the influence of the particle size, mass flow rate, inclination angle and rotational speed are analysed. For all experiments, the temperature profiles as well as the drying rate are obtained. By comparing the maximum drying rate as a target value, the effect of all parameters can be compared.

To simulate the drying process, the previously obtained drying curve was adopted to model the drying behaviour using the finite volume method. The results showed good agreement.

To investigate the reaction in a rotary kiln, the processes first are observed uncoupled. Therefore, the calcination of dolomite is studied in a small scale pipe kiln with an inner diameter of 8 cm in which the mass loss during the heating can be measured.

Additionally, the motion behaviour is reviewed in a small rotating drum with a diameter of 0.5 m and a length of 0.15 m which was covered with a glass plate to make the motion obvious. Dynamic angles of repose are measured as characteristic values for the further simulations.

The model to examine the calcination of magnesite is created on the basis of the calcination model from Krause. It can simulate the reaction of magnesite using the core-shell-model and can be implemented in various applications.

Finally, all the results obtained were used to develop a mathematical model which considers the additional segregation effect in a bidisperse system. The difference between the monodisperse and the bidisperse model is shown at an industrial application.

The achieved conclusions can be used for the dimensioning of industrial rotary kilns. Additionally, the operation parameters can be predicted for an optimized process realization.

2 Einleitung

Drehrohröfen werden in vielen verschiedenen industriellen Bereichen zur thermischen Behandlung von Schüttgütern eingesetzt. Prinzipiell handelt es sich bei Drehrohren um lange zylindrische Rohre, die um ihre Achse rotieren und zur Horizontalen leicht geneigt sind. Auf der oberen Seite des Rohres wird das zu behandelnde Material aufgegeben, aus dem sich aufgrund von Neigung und Rotation ein Schüttbett im Drehrohr ausbildet. Es bildet sich je nach Material und Prozessparametern ein charakteristisches axiales Schüttbett aus, bei welchem der Füllungsgrad über der Länge des Drehrohrs abnimmt. Über eine indirekte oder direkte Beheizung wird dem Schüttgut Energie zugeführt um dieses zu erwärmen. Dabei ist es für den Prozess entscheidend, welche Temperatur die Einzelpartikel erleben und welche Verweilzeit diese im Drehrohr haben, um beispielsweise Trocknungs- oder Reaktionsprozesse des Materials gewährleisten zu können.

Je nach Anforderungen an die Wärmebehandlung unterteilt sich ein Drehrohr in unterschiedliche Sektionen, in welchen jeweils unterschiedliche Temperaturen herrschen. Dabei findet der Wärmeübergang in Abhängigkeit der Prozessparameter durch Strahlung, Leitung oder Konvektion statt und wird zudem von den benötigten Reaktionswärmen beeinflusst.

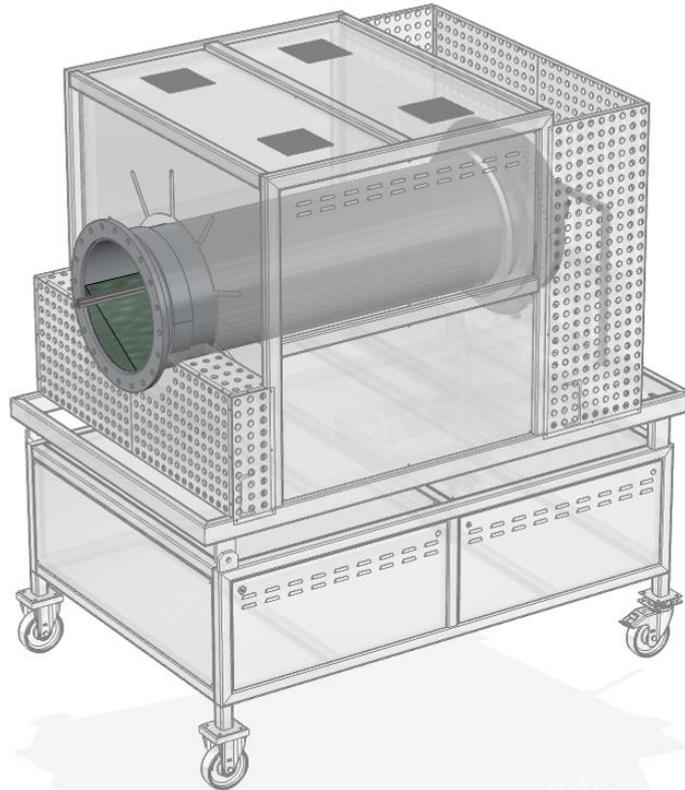
Es kommt zu einer komplexen Überlagerung von axialen und transversalen Bewegungs- sowie Wärmeübergangsmechanismen, welche alle die Temperatur des Materials und somit die Produkteigenschaften beeinflussen. Um optimale Produkteigenschaften erzielen zu können ist somit die Kenntnis über die ablaufenden mechanischen und thermischen Prozesse entscheidend um eine möglichst energieeffiziente Bau- und Fahrweise der Drehrohröfen zu ermöglichen. Damit sollen einerseits Investitionskosten gesenkt werden, indem die Drehrohröfen zielgerichteter ausgelegt werden können. Es sollen aber auch die Betriebskosten gesenkt werden können, indem die Fahrweise mit so wenig Energiezufuhr wie möglich an den Prozess angepasst wird.

Innerhalb dieser Arbeit wurde der transversale und axiale Transport, der Wärmeeintrag, die Trocknung sowie die Reaktion im Drehrohr zunächst separat experimentell untersucht und schließlich stufenweise gekoppelt. Außerdem wurden Teile der Experimente über Simulationen abgebildet, um detailliertere Informationen über die Zustände innerhalb der jeweiligen Schüttungen zu erhalten.

Diese Vorgänge werden, wie bereits gesagt, von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst:

- Drehrohrparameter (Länge, Durchmesser, Art der Beheizung)
- Betriebsparameter (Drehrohrneigung, Materialdurchsatz, Füllungsgrad, Drehzahl, Heizrate/Heiztemperatur)
- Materialparameter (Korngröße und -form, Korngrößenverteilung, Dichte, Porosität, Bewegungsverhalten, Schüttwinkel, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit)

Um die Einflüsse analysieren zu können, wurden Experimente an einem Pilotdrehrohrföfen ($L = 1,76 \text{ m}$, $D = 0,5 \text{ m}$) durchgeführt, siehe Abbildung 1.



FA Linn High Therm

Abbildung 1: Versuchsanlage „Pilotdrehrohrföfen“

Während Temperaturmessungen in industriellen Drehrohrföfen aufgrund der hohen thermischen und mechanischen Belastung nahezu unmöglich sind, können die Temperaturen im Pilotmaßstab mit Hilfe von Thermoelementen aufgezeichnet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden auf diese Weise Wand-, Schüttbett- und Gastemperaturen an unterschiedlichen radialen und axialen Positionen gemessen.

Weiterhin wurden Proben entnommen, um deren Feuchtegehalt bzw. Reaktionsfortschritt in Abhängigkeit von Position und Dauer des Experiments messen zu können.

Als Versuchsmaterial kamen Glaskugeln, Blähton und Dolomit zum Einsatz, wobei die Materialeigenschaften separat in mehreren Voruntersuchungen bestimmt wurden.

Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen wurden zur Erweiterung eines makroskopischen Modells genutzt. Mit Hilfe dieses Modells ist die Auslegung von Drehrohren erleichtert worden und die Fahrweise von Drehrohröfen kann besser an die Voraussetzungen angepasst werden.

3 Stand der Forschung

In industriellen Drehrohröfen sollen spezifische Produkteigenschaften der zu behandelnden Materialien erreicht werden. Diese Produkteigenschaften werden maßgeblich durch die genaue Steuerung der Schüttbetttemperaturen sowie der Verweilzeiten erzielt. Dabei werden die Schüttbetttemperaturen vom Wärmeeintrag aber auch von ablaufenden Prozessen wie Trocknung und Reaktion bestimmt.

Ein umfassendes Verständnis der Bewegungs- und Wärmeübergangsmechanismen sowie des Reaktions- bzw. Trocknungsprozesses ist daher Grundlage der Untersuchungen.

3.1 Materialbewegung

3.1.1 Allgemein

Die Materialbewegung im Schüttbett ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Dazu zählen unter anderem die Art des Materials, die Partikelgröße bzw. das Verhältnis der Partikelgröße zum Durchmesser des Drehrohrs, die Dispersität des Materials, der Materialdurchsatz, die Drehrohrneigung sowie die Rotationsgeschwindigkeit. Entsprechend der vorliegenden Gegebenheiten bildet sich im Drehrohr ein axiales Schüttbettprofil aus, siehe Abbildung 2

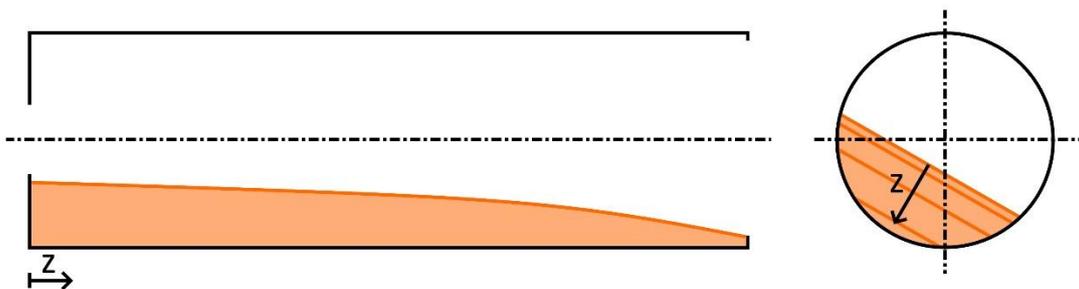


Abbildung 2: Axiales Füllstandsprofil

Dabei ist die Schüttbetthöhe am Einlass am Größten und nimmt dann über die Länge des Drehrohrs ab. Dies führt dazu, dass sich je nach axialer Position unterschiedliche Massen im Querschnitt des Drehrohrs befinden und sich die Kontaktflächen zwischen Schüttbett und Wand sowie Schüttbett und Gas ändern. Dies ist insbesondere für die Bilanzierung der Wärmeströme von Bedeutung, weshalb eine Kenntnis der Schüttbetthöhe in Abhängigkeit der axialen Position essenziell ist.

Prinzipiell kann die Partikelbewegung im Drehrohr in eine transversale sowie eine axiale Komponente unterteilt werden, siehe Abbildung 3.

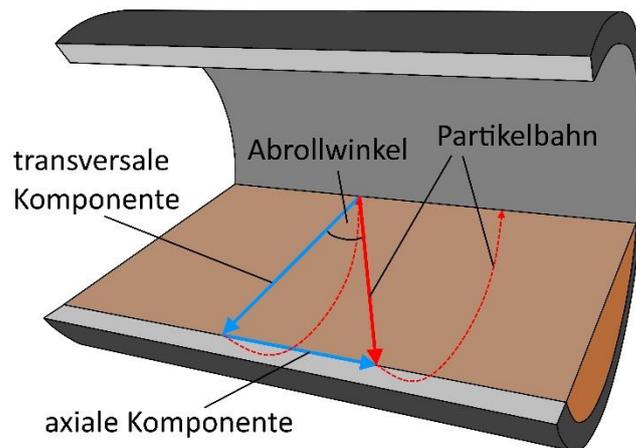


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Partikelbewegung im Drehrohr nach (Herz 2012)

Hierbei hängt die Bewegung in transversaler Richtung hauptsächlich von der Rotationsgeschwindigkeit ab, wohingegen die axiale Bewegung vornehmlich von der Drehrohrneigung beeinflusst wird und dabei fast ausschließlich auf der freien Betoberfläche stattfindet. Gemeinsam bestimmen beide Komponenten die Partikelbahnen, auf denen sich die Einzelpartikel bewegen und definieren deren Verweilzeit im Drehrohr.

3.1.2 Transversale Materialbewegung

Die transversale Schüttgutbewegung war schon Teil zahlreicher Untersuchungen. (Henein et al. 1983) etablierten beispielsweise eine Klassifizierung verschiedener Bewegungsformen im Drehrohr, wobei die dimensionslose Froude-Zahl mit

$$Fr = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad (1)$$

das Verhältnis von Zentrifugal- und Gravitationskraft beschreibt. Dabei ist R der Radius des Drehrohrs, g die Fallbeschleunigung und ω die Winkelgeschwindigkeit welche mit

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (2)$$

aus der Drehzahl n berechnet werden kann.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Bewegungsformen wurden von Mellmann und Specht (Mellmann 2001) untersucht, indem Messergebnisse verwendet wurden und schließlich ein analytisches Modell hergeleitet (Liu et al. 2006).

Auf die detaillierte Beschreibung aller Bewegungsformen wird hier verzichtet, als besonders relevant ist jedoch die Rolling Motion hervorzuheben, bei der eine sehr gleichmäßige und daher für technische Prozesse favorisierte Bewegung des Materials erreicht wird. Abbildung 4 zeigt den Querschnitt bei einer Rolling Motion.

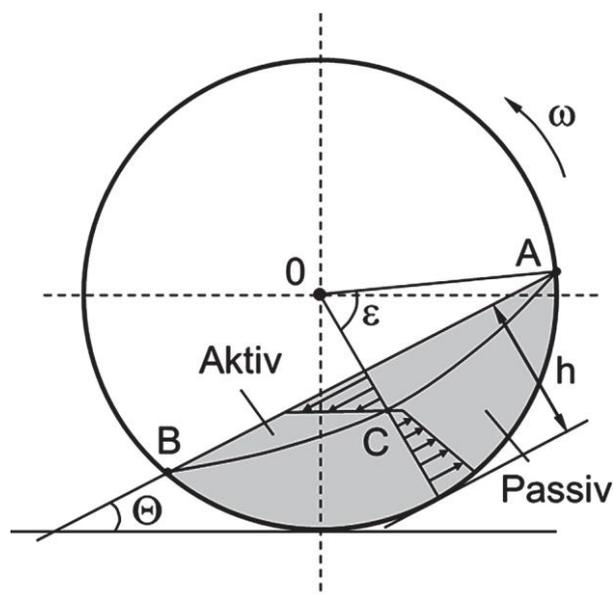


Abbildung 4: Querschnittsprofil bei der Rolling Motion (Herz et al. 2012)

Bei dieser Bewegungsform herrscht ein gleichbleibender dynamischer Schüttwinkel vor und es kommt zur Ausbildung einer Gleitlinie (ACB), oberhalb derer die Partikel von oben nach unten auf der Oberfläche des Schüttbetts nach unten rollen. Unterhalb der Gleitlinie bildet sich eine passive Schicht aus, in der sich die Partikel langsamer, gemeinsam mit der Wand bewegen und dabei angehoben werden. Um die Gleitlinie berechnen zu können, existieren makroskopische Modelle von (Henein et al.) , Mellmann und Specht et al (Mellmann 2001) sowie (Liu et al. 2006)., bei denen Kräftebilanzen aufgestellt werden. Die Quervermischung bei der Rolling Motion wurde von Liu untersucht. Hier treten bei industriellen Prozessen realer Materialien häufig Entmischungseffekte auf, auch Segregation genannt. Segregationseffekte haben ihre Ursache in unterschiedlichen Eigenschaften der Einzelpartikel, wie beispielsweise Größe, Form, Dichte und Oberflächenbeschaffenheit. (BOATENG und Barr 1996a) ermittelten eine unterschiedliche Korngröße als Hauptursache von Segregation in Drehrohröfen, wobei schon geringe Größenunterschiede zu einer Entmischung führen können. Segregationseffekte während einer Rolling Motion, bei der sich eine Ring-Kern-Struktur ausbildet wurden von (Nityanand et al. 1986; Henein et al. 1985), (Henein et al. 1985), (Dury und Ristow 1999) untersucht.

3.1.3 Axiale Materialbewegung

Die Beschreibung der axialen Materialbewegung wird hauptsächlich durch die Anwendung von Kontinuumsmodellen erreicht.

Die makroskopische Gleichung von (Saeman 1951) ermöglicht eine Berechnung des axialen Schüttgutverlaufs aus den Eingangsgrößen Massenstrom, Drehzahl, Schüttwinkel sowie Neigungswinkel. Auf diese Weise kann auch die mittlere Verweilzeit des Materials ermittelt werden. Die genannten Modelle sind jedoch hauptsächlich für monodisperse Schüttungen mit einer idealen Durchmischung im Querschnitt gültig. In der Industrie sind jedoch hauptsächlich polydisperse Schüttungen präsent, bei denen Segregationseffekte eine Rolle spielen. Es kommt zu einer Verweilzeitverteilung, die von der Partikelgröße abhängt und beispielsweise mit Hilfe von axialen Dispersionskoeffizienten beschrieben werden kann (Gonzalez 2009) (Bensmann 2010).

3.2 Wärmeübertragung

Der Wärmetransport im Drehrohr hängt in erster Linie davon ab, ob die Wärme direkt von einer Brennerflamme oder durch einen heißen Gasstrom an das Material übertragen wird, oder ob das Drehrohr indirekt, also über die Wandflächen beheizt wird.

(Herz et al. 2012) zeigt anschaulich für beide Fälle die auftretenden Wärmeübergangsmechanismen, siehe Abbildung 5

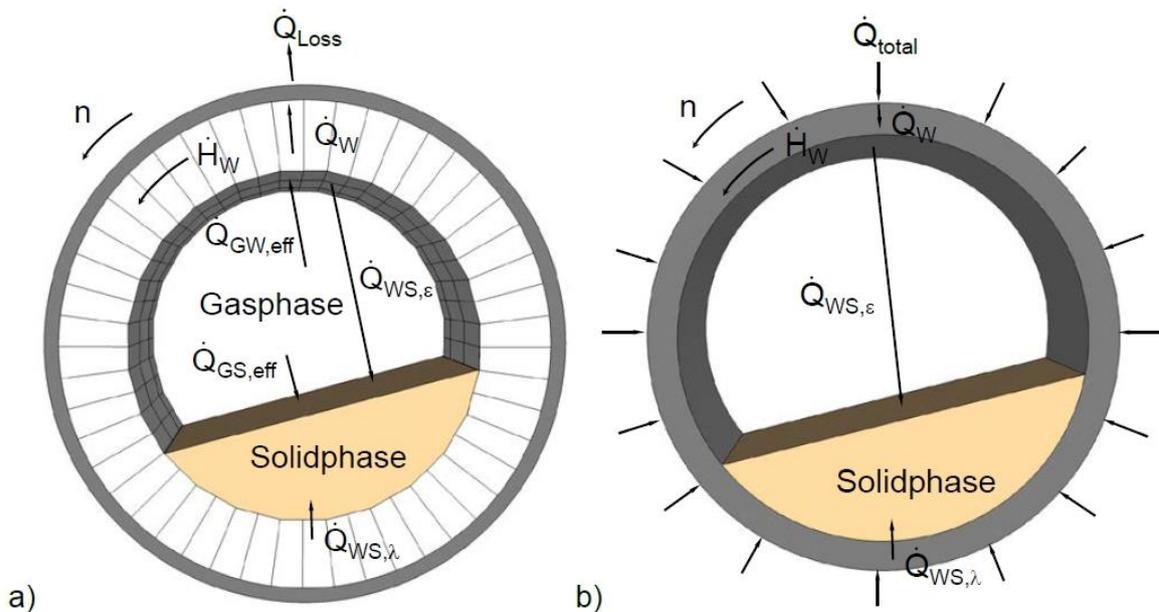


Abbildung 5: Mechanismen des Wärmeübergangs bei direkter (a) und indirekter Beheizung (b) (Herz et al. 2012)

Bei einer direkten Beheizung wird die Wärme primär durch Strahlung und Konvektion an die Schüttung sowie die Wand übertragen. Durch Leitung wird Wärme weiterhin innerhalb der Wand und von der heißen Wand über die bedeckte Oberfläche an die Schüttung übertragen. Außerdem strahlt die heiße Wand auf die freie Oberfläche der Schüttung. Über die Außenfläche des Drehrohrs geht Wärme als Verluststrom an die Umgebung ab.

Im Fall der indirekten Beheizung wird das Drehrohr über die Wandfläche erwärmt. Von der Wand aus wird Wärme zum einen in die Schüttung geleitet, zum anderen strahlt die heiße Wand Wärme auf die freie Oberfläche der Schüttung ab.

Die Temperatur der Einzelpartikel, die dessen Eigenschaften beeinflusst ist weiterhin davon abhängig, wie die Wärme ins Zentrum der Schüttung vordringt, was wiederum maßgeblich von der Durchmischung abhängig ist. Dazu wurden von Boateng verschiedene Wärmeübergangsmechanismen innerhalb der Schüttung unterschieden (Boateng 2015).

Den Wärmeübergang über die bedeckte Oberfläche thematisierten (Lehmberg et al. 1977), (Tscheng und Watkinson 1979) sowie (Li et al. 2005), die den Kontaktwiderstand über eine fiktive Gasschicht zwischen der ersten Partikellage und der Wandoberfläche annähernten. (Schlünder 1971), (Mollekopf und Martin 1982) sowie (Schlünder und Mollekopf 1984) verfolgten einen Modellansatz, in dem ein Gasspalt bzw. Gaszwickel zwischen Partikel und Wand verwendet wird. Nafsun und Herz

führten eine Vielzahl von Experimenten durch, die die Wärmeleitung ins Innere der Schüttung untersuchten (Nafsun et al. 2015; Nafsun et al. 2016) und gingen dabei insbesondere auf den Kontaktwärmeübergang über die bedeckte Bettoberfläche ein (Nafsun et al. 2014).

Der Wärmeeintrag über die freie Oberfläche des Schüttbetts wird von der Bewegung der Partikel auf der Oberfläche beeinflusst. Im Fall der häufig favorisierten Rolling-Motion ist dies die aktive Schicht in der im Gegensatz zur passiven Schicht fortlaufend Partikelkollisionen stattfinden. Aus diesem Grund können die zahlreichen Modellansätze zur effektiven Wärmeleitfähigkeit von unbewegten Schüttungen nicht zum Einsatz kommen. (BOATENG und Barr 1996b), (Dhanjal et al. 2004) entwickelten einen Diffusionsansatz, der jedoch durch die experimentellen Untersuchungen von (Nafsun et al. 2014; Nafsun et al. 2015) nicht validiert werden konnte. Mögliche Erklärungen dafür bieten beispielsweise die Vernachlässigung von Drehzahl und Segregation innerhalb des Modells. (Komossa et al. 2015, 2014) entwickelte in Bochum einen DEM-Code, mit welchem die Partikelgeschwindigkeiten an der Wand unter der Berücksichtigung von Schlupf erfasst werden konnten. Dies bietet die Grundlage zur Ermittlung von Partikelverweilzeiten auf der Oberfläche beziehungsweise Kontaktzeiten an der Wand.

In der vorliegenden Arbeit wurde ausschließlich an einem indirekt beheizten Drehrohr gearbeitet. Die dort auftretenden Wärmeübertragungsmechanismen sind für diesen Fall in Abbildung 6 dargestellt.

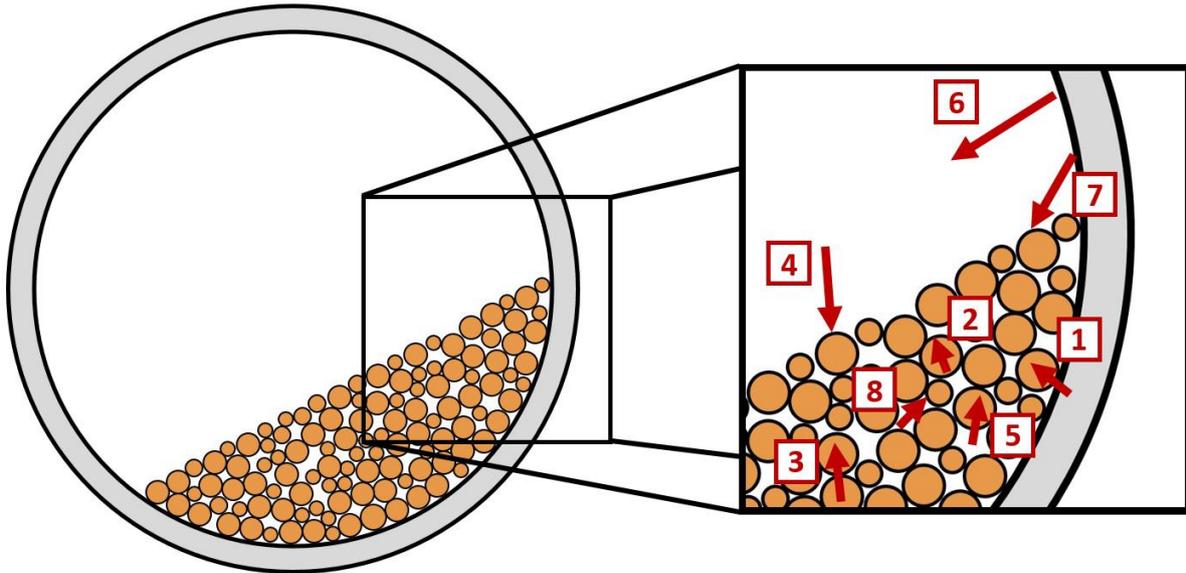


Abbildung 6: Wärmeübergangsmechanismen im indirekt beheizten Drehrohr (weiterentwickelt aus Abbildung von (Boateng 2015))

Es lassen sich folgenden Wärmeübergangsmechanismen unterscheiden:

- Leitung
 - von der Ofenwand zur Schüttung (1)
 - innerhalb eines Partikels in der Schüttung (2)
 - zwischen zwei Partikeln innerhalb der Schüttung (3)
- Konvektion
 - von der Luft zur Schüttbettoberfläche (4)
 - vom Hohlraumgas zu den Partikeln der Schüttung (5)
 - von der Ofenwand zur Luft (6)
- Strahlung
 - von der Ofenwand auf die Schüttbettoberfläche (7)
 - innerhalb des Schüttbetts zwischen den Partikeln (8)

3.3 Trocknung

Die Trocknung von Feststoffen ist eine Verfahrensstufe, die in den unterschiedlichsten Industriezweigen auftritt. Prinzipiell kann zwischen einer mechanischen Trocknung (z. B. Schleudern oder Pressen) und der thermischen Trocknung unterschieden werden (Krischer 1978). In dieser Arbeit wird ausschließlich die thermische Trocknung weiter thematisiert, bei welcher die Feuchtigkeit durch Erwärmen des Guts verdunstet oder verdampft wird.

Es handelt sich um einen energieintensiven Prozess (Kneule 1975), bei dem unter Berücksichtigung der Produktqualität ein Optimum zwischen Betriebs- und Investitionskosten gefunden werden muss.

Die Anforderungen an die Trocknung sind vielfältig. In der Lebensmittelindustrie sollen häufig zu hohe Temperaturen und lange Verweilzeiten vermieden werden um unter anderem Aromaverluste und Denaturierungen zu verhindern. Teilweise wird auch eine Trocknung unter Sauerstoffausschluss favorisiert, die jedoch relativ kostenintensiv ist. Je nach Bindung und Art der Feuchtigkeit gibt es eine Vielzahl an Trocknungsapparaten, die für die jeweiligen Anforderungen an den Prozess (Durchsatz, definierte Endfeuchte, Energieverbrauch, uvm.) zum Einsatz kommen.

Auch Drehrohre werden für die Trocknung verschiedener Schüttgüter verwendet. Dabei kann man zwischen Anwendungen unterscheiden, in denen das Material ausschließlich getrocknet werden soll oder in denen das Material in einem ersten Prozessschritt getrocknet wird und nachfolgend beispielsweise eine Reaktion des Materials angestrebt wird. In diesem Fall kann das Drehrohr in unterschiedliche Sektionen unterteilt werden, in welchen jeweils verschiedene Prozesse ablaufen. Eine genaue Kenntnis über den Trocknungsmechanismus ist daher Grundlage für eine optimale Auslegung und Fahrweise dieser Drehrohre. Der Trocknungsmechanismus wird durch die Bindung und die Art der Feuchtigkeit beeinflusst. Flüssigkeit kann chemisch, physikalisch-chemisch und mechanisch an das Gut gebunden sein. Chemisch gebundenes Wasser (Kristallwasser) wird in der Regel nicht bei einer Trocknung entfernt, da hier eine Zersetzung des Materials notwendig wäre. Bei der physikalisch-chemischen Feuchtigkeitsbindung wird die Feuchtigkeit aufgrund des osmotischen Drucks im Gut gehalten. Die Feuchtigkeit kann auch mechanisch, durch Kapillarkräfte und Oberflächenkräfte an das Gut gebunden sein.

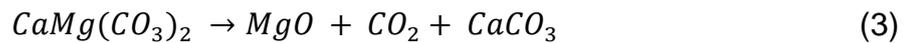
3.4 Reaktionsverhalten/Dolomitzersetzung

Als Dolomit werden Karbonat-Gesteine bezeichnet, die zu einem hohen Anteil aus dem Mineral Dolomit bestehen. Gestein, das weniger mineralischen Dolomit enthält, wird als Kalkstein bezeichnet. Die genaue Zusammensetzung des Gesteins variiert dabei je nach Herkunft sehr stark. Dolomit setzt sich dabei Calcium- und Magnesiumcarbonaten zusammen ($\text{CaMg}(\text{CO}_2)_3$).

Die Zersetzung von Dolomit, die auch als Kalzination bezeichnet wird, lässt sich in zwei Reaktionen unterteilen, die teilweise gleichzeitig ablaufen. Bei geringen

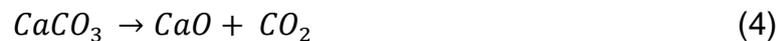
Temperaturen bzw. Partialdrücken läuft die Reaktion einstufig ab. Bei höheren Temperaturen bzw. Partialdrücken läuft die Reaktion entsprechend zweistufig ab. Dabei entsteht als erstes Reaktionsprodukt halbgebrannter Dolomit und als zweites Reaktionsprodukt gebrannter Dolomit. Bei der einstufigen Reaktion laufen beide Reaktionen parallel ab.

Während der ersten Reaktion werden die Magnesiumcarbonate unter dauerhafter Wärmezufuhr bei Temperaturen ab 600°C unter Abgabe von Kohlenstoffdioxid in Magnesiumoxid entsprechend der Reaktionsgleichung



zersetzt.

Bei der zweiten Reaktion werden die Calciumcarbonate unter Abgabe von Kohlenstoffdioxid zu Calciumoxid



zersetzt. Die Temperatur, bei der diese Zersetzung stattfindet ist stark vom Partialdruck sowie der Zusammensetzung der Luft und der Art der Umströmung. Findet die Zersetzung in Luftatmosphäre statt und kann die umströmende Luft das Kohlenstoffdioxid abtransportiert, bleibt der Partialdruck des Kohlenstoffdioxids gering. Beim Austausch von Luft und Kohlenstoffdioxid findet die Zersetzung bei hohen Partialdrücken von Kohlenstoffdioxid statt. Die Reaktionstemperatur liegt dann bei ca. 800 °C. Findet die Zersetzung unter Kohlenstoffdioxid statt, erhöht sich die Zersetzungstemperatur auf ca. 910 °C.

Zur Herstellung von Kalk kommen zumeist Schachtöfen und Drehrohröfen zum Einsatz, weshalb die Untersuchung des Reaktions- bzw. Bewegungsverhaltens von Dolomit im Drehrohr wirtschaftlich interessant ist.

Um die Zersetzung des Gesteins abbilden zu können, wird häufig das Kern-Schale Modell verwendet, siehe Abbildung 7.

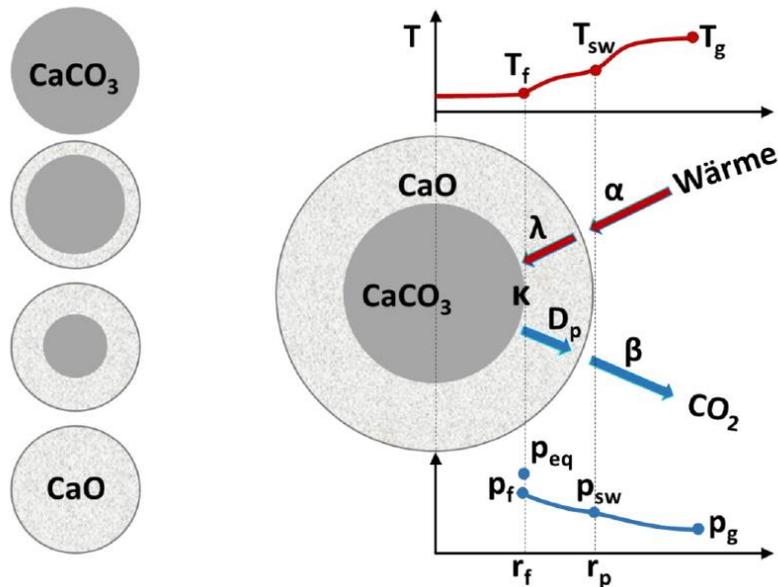


Abbildung 7: Darstellung der Zersetzung eines Kalksteinpartikels mit Hilfe des Kern-Schale-Modells (Hallak 2019)

Hierbei wird der Idealfall eines kugelförmigen Partikels betrachtet. Die Zersetzung beginnt an der Oberfläche des Partikels. Eine Reaktionsfront bildet sich aus, die sich von Rand des Partikels in die Mitte bewegt. Außen entsteht eine Ascheschicht, welche mit Fortschreiten der Reaktion immer dicker wird. Die Wärme, die für die Zersetzung notwendig ist, muss daher den Widerstand der Ascheschicht überwinden, damit die Reaktion stattfinden kann. Auch der Stofftransport des Kohlenstoffdioxids durch die Ascheschicht verlangsamt den Prozess der Zersetzung.

Zur Untersuchung der Zersetzung von Dolomit wurden Versuche in einem Rohrfen durchgeführt, in welchem die Reaktionsgeschwindigkeit sowie die Reaktionstemperatur analysiert wurden, siehe Kapitel 4.5.3. Außerdem wurde das Bewegungsverhalten von Dolomit in Abhängigkeit von Partikelgröße, Füllungsgrad und Drehzahl analysiert und die dynamischen Schüttwinkel bestimmt, siehe Kapitel

3.5 Diskrete Elemente Methode

Bei der Diskrete Elemente Methode (DEM) handelt es sich um ein numerisches Verfahren, mit welchem die Bewegung dichter, bewegter Schüttungen aufgrund äußerer mechanischer Einwirkung zeitaufgelöst simuliert werden kann. Dazu werden die mechanischen Interaktionen aller Einzelobjekte (Partikel) untereinander und mit bewegten und unbewegten Wänden berechnet. Daraus lassen sich Bahnkurven individueller Partikel, und darauf aufbauend Mittelwerte und Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeiten und Verweilzeiten bestimmen. Wird die Modellierung um eine Berechnung der Gasphasenströmung und von Energietransportvorgänge erweitert, dann ist die Beschreibung thermischer Vorgänge in bewegten Schüttgütern möglich. Simulationen zum Bewegungsverhalten von Schüttungen, speziell in Drehrohren wurden in der Vergangenheit bereits vielfach durchgeführt. So konnten beispielsweise das Geschwindigkeitsfeld und die Durchmischung bei verschiedenen transversalen Bewegungszuständen in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen abgebildet werden [Zhu et al. (2008), Kwapinska et al. (2006)].

Der Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik hat in den letzten Jahren ein DEM-Berechnungsverfahren, LeatDEM genannt, entwickelt, [Ivanov et. al. (2004), Kruggel-Emden et al. (2007), Simsek et al. (2009), Komossa et al. (2014)], bei dem zusätzlich zur mechanisch induzierten Bewegung des Feststoffs auch die Wärmeübertragung zwischen den einzelnen Partikeln und ihrer Umgebung berücksichtigt werden kann.

Zudem wird die partikel aufgelöste numerische Simulation unterschiedlicher Schüttgüter, wie kugelförmige Partikel, ungleichförmiger Polyeder- und polydisperser Partikelgemische ermöglicht. Für die Berechnung des Impuls-, Wärme- und Stoffaustauschs mit zusätzlichen gasförmigen Phasen kann der DEM-Code bidirektional mit einem CFD-Simulationsprogramm gekoppelt werden.

Beschreibung des Stoßvorgangs

Die Bewegung eines Schüttguts wird wesentlich durch die mechanische Interaktion der Partikel untereinander, mit festen oder bewegten Wänden sowie mit möglicherweise zusätzlich vorhandenen Fluiden bestimmt. Die an den Interfaces zwischen den Partikeln sowie Partikeln und Wänden aufgrund von kurzzeitigen Stößen oder langanhaltenden Kontakten (Flächen-, Linien-, Punktkontakten) wirkenden Kräfte werden dabei zur Bilanzierung des zeitlich veränderlichen Kräftegleichgewichts im System herangezogen.

In der DEM gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Modellansätze, um die Impulsübertragung zwischen zwei Partikeln bzw. Partikeln und Wänden zu beschreiben. Im sogenannten Hard-Sphere-Modell werden ausschließlich binäre, instantane Stöße berücksichtigt und statistisch ausgewertet. Langanhaltende Kontakte und eine Verformung der Stoßpartner sind dabei ausgeschlossen. Solche Modelle sind ereignisgesteuert und können daher den zeitlichen Verlauf realer Vorgänge nicht auflösen.

Dem Soft-Sphere-Modell hingegen liegt die Annahme zugrunde, dass sich Partikel während des zeitaufgelösten Kontaktes elastisch verformen und die Veränderung von Kräften und Bewegung über der Zeit integriert werden kann. Ein Vorteil dieses Modells liegt in der Möglichkeit, auch mehrere zeitgleich ablaufende „Stöße“ (mehrere gleichzeitig und länger wirkende Kontakte) berechnen zu können, wodurch Voraussetzungen für eine Simulation dichter Partikelsysteme, wie sie in Silos oder Drehrohröfen vorzufinden sind, geschaffen werden.

Aus diesem Grund ist in LeatDEM ein Soft-Sphere-Modell implementiert. Ein, in diesem Modell abgebildeter „Stoß“vorgang ist in Abbildung 8 veranschaulicht.

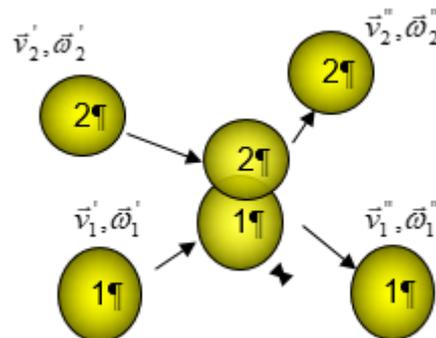


Abbildung 8: Stoßvorgang zwischen zwei kugelförmigen Partikeln

Statt dabei das elastische und mit einer Verformung einhergehende Verhalten der Partikel aufzulösen, werden in LeatDEM eine virtuelle Überlappung und eine darauf basierende Federkraft als Ersatzmodell des elastischen Kontakts verwendet. Durch einen geschwindigkeitsabhängigen Dämpfungsterm wird dem dissipativen Charakter des Vorgangs Rechnung getragen (lineares Feder-Dämpfer Modell).

Bilanziert werden müssen die Impulsänderungen aufgrund der Kontaktkräfte, Trägheitskräfte und angreifenden Gravitationskräfte sowie deren Pendants im rotierenden System.

Dabei dient der Impulssatz

$$m * \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i + m * \vec{g} \quad (5)$$

zur Beschreibung der translatorischen Bewegung eines Partikels. In diese Gleichung, welche auch Newton'sche Bewegungsgleichung genannt wird, gehen die Partikelmasse m , der Ortvektor des Körperschwerpunktes \vec{r} , die Erdbeschleunigung g sowie die normal und tangential wirkenden Komponenten der Kontaktkräfte \vec{F}_n und \vec{F}_t ein.

Für die Beschreibung der Partikelrotation wird der Drallsatz,

$$\underline{J} * \frac{d^2 \vec{\varphi}}{dt^2} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i \quad (6)$$

welcher auch als Euler'sche Bewegungsgleichung bezeichnet wird, angewendet. In diesem werden das Trägheitsmoment mit J , die Verdrehung um den Schwerpunkt mit $\vec{\varphi}$ und an das am Partikel aufgrund äußerer Kräfte angreifende Moment \vec{M}_i bezeichnet. (D. Höhner 2014)

Integration der Bewegungsgleichung

Die zwei Bewegungsgleichungen werden innerhalb der DEM numerisch über der Zeit integriert gelöst. Hier hat sich das Verlet-Verfahren als, auch bei größeren Zeitschritten stabiles Verfahren, erwiesen.

Verlet für Impuls

In LeatDEM wird nicht die Position zeitlich integriert, sondern der Impuls der linearen Bewegung und der Impuls der Drehbewegung. Dieses Vorgehen hat den großen Vorteil, dass auch zeitlich veränderliche Massen einfach berücksichtigt werden können.

Dabei lautet die Gleichung für den Impuls der linearen Bewegung

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d(m(t) * \vec{v}(t))}{dt} = \vec{F}(t) \quad (7)$$

und die Gleichung für den Impuls der Drehbewegung

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(\Theta(t) * \vec{\omega}(t))}{dt} = \vec{M}(t) \quad (8)$$

Die zeitliche Diskretisierung erfolgt anschließend, um den gesuchten neuen Zeitschritt mit

$$\frac{\vec{P}\left(t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - \vec{P}\left(t - \frac{1}{2}\Delta t\right)}{dt} = \vec{F}(t) \quad (9)$$

und

$$\frac{\vec{L}\left(t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - \vec{L}\left(t - \frac{1}{2}\Delta t\right)}{dt} = \vec{M}(t) \quad (10)$$

zu ermitteln.

Mit Hilfe der bekannten Impulse P und L können so zu jedem Zeitpunkt der Geschwindigkeitsvektor durch Division mit der aktuellen Masse bzw. die Drehgeschwindigkeiten analog anhand des Trägheitstensors bestimmt werden.

Kontaktkräfte

Die Kontaktkräfte aus den Gleichungen 2.2 und 2.3 wirken auf die in Kontakt stehenden Partikel (bzw. Partikel-Wand) und entsprechend den Kräften der durch die Überlappung gespannten „virtuellen“ Federn. Die Beschreibung der Kraftmodelle erfolgt hier exemplarisch anhand kugelförmiger Partikel. Abbildung 9 zeigt zwei in Kontakt stehende Kugeln mit allen relevanten Größen.

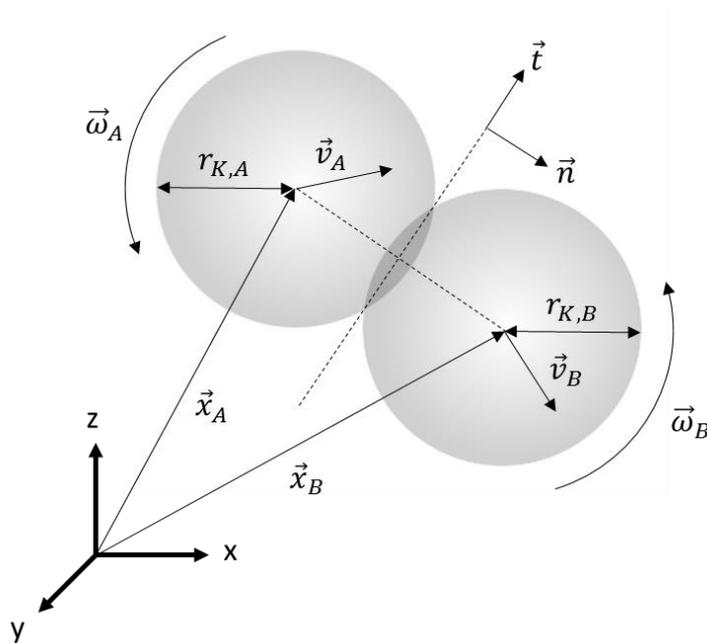


Abbildung 9: Relevante Größen beim Kontakt zweier kugelförmiger Partikel

Normalkraftmodell

Für das Normalkraftmodell wird in dieser Arbeit das lineare viskoelastische Feder-Dämpfer-Modell (H. Kruggel-Emden 2007) angewendet. Es gibt neben dem in dieser Arbeit verwendeten Modell eine Vielzahl von weiteren Modellen. Eine Übersicht der Normalkraftmodelle für unterschiedliche Partikelformen findet sich in (H. Kruggel-Emden, E. Simsek, S. Rickelt, S. Wirtz und V. Scherer 2007).

Die Normalkraft setzt sich beim linear-viskoelastischen Feder-Dämpfer-Modell aus einer elastischen und einer dissipativen Komponente zusammen.

$$\vec{F}^n = \vec{F}_{el}^n + \vec{F}_{diss}^n \quad (11)$$

Abbildung 10 veranschaulicht das Normalkraftmodell.

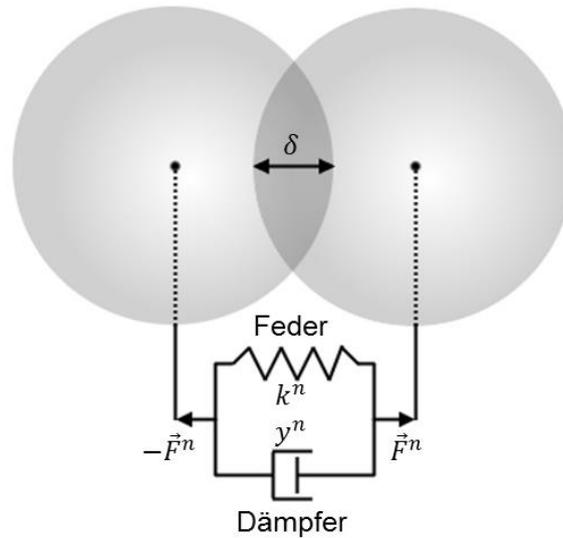


Abbildung 10: Lineares Feder-Dämpfer-Modell für die Normalenrichtung

Der elastische Anteil der Normalkraft \vec{F}_{el}^n wird durch eine elastische Feder abgebildet, deren Verformung über das Hookesche Gesetz beschrieben wird.

$$\vec{F}_{el}^n = k^n * \delta * \vec{n} \quad (12)$$

Somit setzt sich der elastische Anteil der Normalkraft aus der Stauchung der Feder mit der zugehörigen Federsteifigkeit k^n zusammen. Die Stauchung der Feder wird durch die Überlappung δ beider Stoßpartner abgebildet und ist damit für die resultierende Federkraft verantwortlich. Der Ort des Kontaktes (Stoßes) ist der Kontaktpunkt, welcher sich bei Kugelpaaren auf einem Punkt der Verbindungslinie beider Schwerpunkte befindet. Für komplexere Körper werden weiterführende Ansätze benötigt.

Für den dissipativen Anteil der Normalkraft \vec{F}_{diss}^n wird ein Dämpfer angenommen, der eine Kraft proportional und entgegengesetzt zur Relativgeschwindigkeit in Normalenrichtung \vec{v}_{rel}^n der beiden Kontaktpartner erzeugt.

$$\vec{F}_{diss}^n = -\gamma^n * \vec{v}_{rel}^n \quad (13)$$

γ^n ist somit äquivalent zu einer Dämpfungskonstanten.

Für Kugeln liegt, wie bereits erwähnt, ein Kontakt vor, wenn der Abstand der beiden Kugelschwerpunkte \vec{x}_A und \vec{x}_B kleiner ist als die Summe der beiden Kugelradien $r_{K,A}$ und $r_{K,B}$. Die Partikelüberlappung δ entspricht dabei der Differenz aus der Summe der beiden Kugelradien und des Abstandes der Schwerpunkte

$$\delta = (r_{K,B} + r_{K,A}) - |\vec{x}_B - \vec{x}_A| \quad (14)$$

Der Einheitsnormalenvektor \vec{n} , der entlang der Verbindungslinie der beiden Kugelschwerpunkte liegt, berechnet sich dabei aus

$$\vec{n} = \frac{\vec{x}_B - \vec{x}_A}{|\vec{x}_B - \vec{x}_A|} \quad (15)$$

womit für die Lage des Kontaktpunktes \vec{CP} , an dem die Kontaktkräfte angreifen,

$$\vec{CP} = \vec{x}_A + \left(r_{K,A} - \frac{\delta}{2} \right) * \vec{n} \quad (16)$$

gilt.

Unter der Annahme, dass die Relativgeschwindigkeiten nur in einem kleinen Bereich schwanken, wurde von (J. Schäfer, S. Dippel und D. E. Wolf 1996) eine analytische Lösung für das lineare Feder-Dämpfer-Modell hergeleitet, die zu einer konstanten Stoßzahl e^n und einer konstanten Stoßzeit t_{coll} führt.

Mit Hilfe der Lösung lässt sich eine einfache Beziehung zwischen den Modellparametern k^n und γ^n und den makroskopischen Stoßparametern e^n und t_{coll} herstellen

$$k^n = m_{eff} * \left(\left(\frac{\pi}{t_{coll}} \right)^2 + \left(-\frac{\ln(e^n)}{t_{coll}} \right)^2 \right) \quad (17)$$

$$\gamma^n = -\frac{2 * m_{eff}}{t_{coll}} * \ln(e^n) \quad (18)$$

Dabei wird die effektive Masse m_{eff} der beiden Kontaktpartner verwendet:

$$m_{eff} = \frac{m_A * m_B}{m_A + m_B} \quad (19)$$

Tangentialkraftmodell

Reibkräfte wirken per Definition nur in tangentialer Richtung zur Oberfläche. Um Reibungseffekte modellieren zu können, wird zusätzlich zur Normalkraft eine Kraftkomponente in tangentialer Richtung benötigt. Auch für die Tangentialrichtung gibt es wiederum verschiedene Modelle (H. Kruggel-Emden 2007). Analog zur Normalkraft wird sich hier auf die Beschreibung des verwendeten linear-viskoelastischen Feder-Dämpfer-Modells mit Reibkraft-Limitierung beschränkt.

Allgemein lässt sich die Tangentialkraft mit Hilfe des Coulombschen Gesetzes beschreiben. Hierbei setzt sich die Tangentialkraft aus dem Reibkoeffizienten und der Normalkraft zusammen, wobei zwischen Haft- und Gleitreibung zu unterscheiden ist. Bei einer Relativgeschwindigkeit der Kontaktpartner in tangentialer Richtung von $|\vec{v}_{rel}^t| = 0$ liegt Haftreibung und bei $|\vec{v}_{rel}^t| > 0$ Gleitreibung vor (E. Simsek 2010).

Da die Tangentialkraft die Reibung im Kontaktbereich nicht überschreiten darf, wird die tangentiale Federkraftkomponente durch die Coulomb-Kraft \vec{F}_{Coul} begrenzt, wobei

eine Fallunterscheidung für den zu berücksichtigenden Reibungskoeffizienten μ_{Coul} getroffen wird

$$\vec{F}_{Coul} = \begin{cases} \mu_H |\vec{F}_n| \vec{t} & \text{für } |\vec{v}_{rel}^t| = 0 \\ \mu_C |\vec{F}_n| \vec{t} & \text{für } |\vec{v}_{rel}^t| > 0 \end{cases} \quad (20)$$

Über die Relativgeschwindigkeit des Kontaktpunktes \vec{v} wird die Tangentialgeschwindigkeit \vec{v}_t berechnet zu

$$\vec{v}_t = \vec{v} - \vec{v}_n \quad (21)$$

Während des Kontaktes wird eine Verschiebung

$$\vec{\delta} = \int_{t_0}^{t_c} \vec{v}_t dt \quad (22)$$

auf der Kontaktfläche festgelegt. Mit den entsprechenden Parametern für die Federsteifigkeit und dem Dämpferkoeffizienten errechnet sich die Tangentialkraft zu

$$\vec{F}_{FD} = k_t \vec{\delta} + y_t \vec{v}_t \quad (23)$$

Die Federsteifigkeit k_t berechnet sich dabei aus dem Querkontraktionsfaktor (B. Brosch 2012)

$$\kappa = \frac{\frac{1 - \nu_A}{G_A} + \frac{1 - \nu_B}{G_B}}{\frac{1 - 0.5 * \nu_A}{G_A} + \frac{1 - 0.5 * \nu_B}{G_B}} \quad (24)$$

Die jeweilige Querkontraktionszahl ν der beiden Materialien lässt sich dabei aus dem Elastizitätsmodul und dem Schubmodul berechnen.

$$\nu = \frac{E}{2G} \quad (25)$$

Somit lassen sich

$$k_t = \kappa * m_{eff} * \left(\frac{\pi}{t_{coll}} \right)^2 \quad (26)$$

und

$$y_t = 2 * \sqrt{m_{eff} * k_t} \quad (27)$$

bestimmen.

Damit ergibt sich letztendlich für die Tangentialkraft

$$F_t = -\min(\vec{F}_{FD}, \vec{F}_{Coul}) \quad (28)$$

Abbildung 11 veranschaulicht das beschriebene Tangentialkraftmodell.

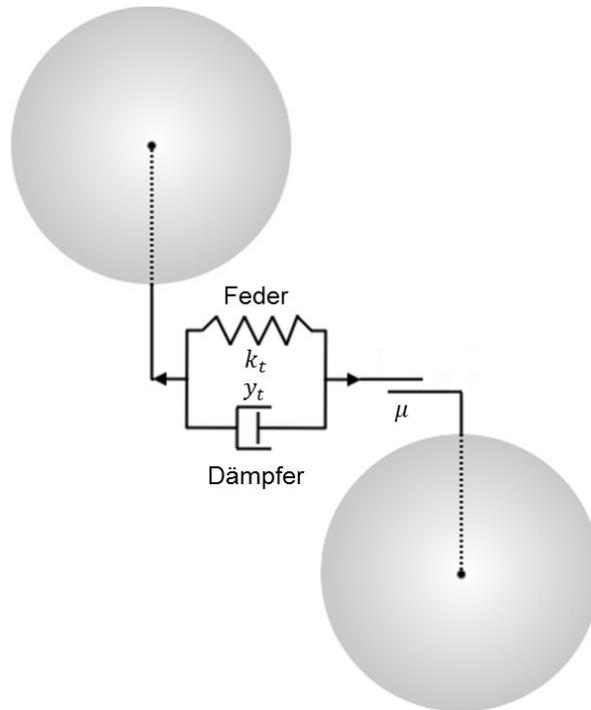


Abbildung 11: Lineares Kraftmodell für die Tangentialrichtung

Rollreibungsmodell

Die Dissipation von Energie aufgrund von Partikelrotation hat einen großen Einfluss auf das Verhalten von Partikelschüttungen (J. Ai, J. F. Chen, J. M. Rotter und J. Y. Ooi 2011). Um dieses Partikelverhalten korrekt wiedergeben zu können, muss innerhalb der DEM ein Rollwiderstand berücksichtigt werden. In diesen Modellen wird der Rollbewegung der Partikel ein Moment in Gegenrichtung gegenübergestellt. Eine mögliche Form der Darstellung kann dabei der Abbildung 12 entnommen werden.

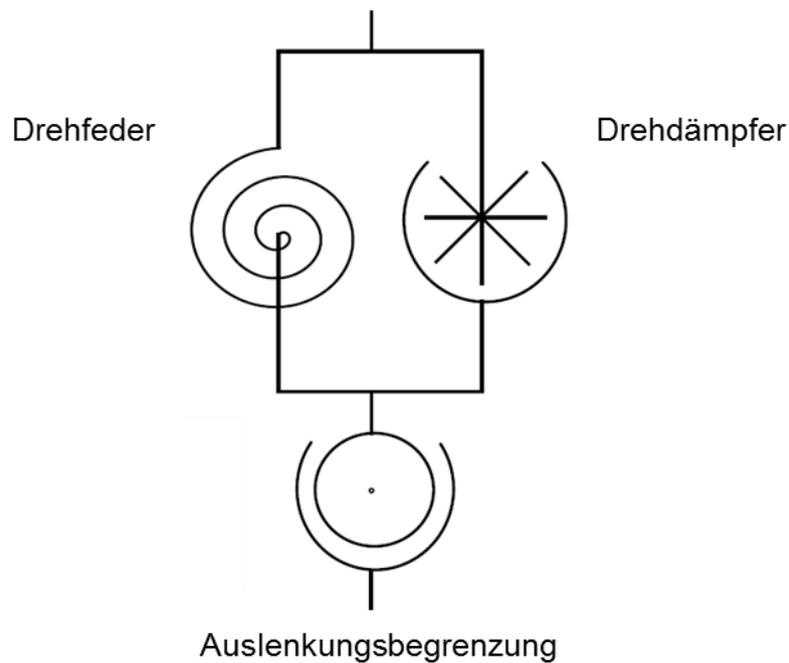


Abbildung 12: Drehfedermodell

Hier setzt sich das Rollreibungsmodell aus einer Drehfeder und einem Drehdämpfer zusammen. Ähnlich zum tangentialen Modell wirken hier die Drehfeder und der Drehdämpfer nur, wenn die Drehwiderstände eingehalten werden.

3.6 Ziele und Ergebnisse des vorausgegangenen Projekts

Im vorausgegangenen Projekt „Analyse und Modellierung des Wärmeübergangs in Drehrohren mit Hubschaufeln“ (IGF Vorhaben Nr. 18916 BG) wurde der Wärmeübergang in beschauften Drehrohren untersucht. Dieses Projekt wurde ebenfalls von den beiden Forschungsstellen Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Ruhr-Universität Bochum betreut. Es wurden experimentelle Analysen des Wärmeübergangs sowie DEM-Simulationen durchgeführt. Maßgeblich war die Bestimmung der für den Wärmeübergang relevanten Flächen um den konvektiven Wärmeübergang zwischen der Luft und der sich bildenden Partikelschleier ermitteln zu können. Dabei wurde der Einfluss der Parameter Drehzahl, Füllungsgrad, Luft-Durchsatz, Hubschaufelanzahl und -längenverhältnis sowie Partikeldurchmesser und -dichte untersucht. Die Experimentellen Ergebnisse wurden zur Validierung der numerischen Arbeiten verwendet, sodass mit Hilfe der DEM die sowohl die Partikelbewegung als auch die Wärmeübertragungsmechanismen qualitativ und quantitativ dargestellt werden konnten. Mit den erzielten Ergebnissen können Drehrohröfen gezielter ausgelegt werden.

3.7 Projektziel

Die in vielen industriellen Drehrohröfen simultan ablaufenden kinetischen, thermischen und reaktionstechnischen Prozesse können momentan nicht vollständig modelliert werden. Daher werden die auftretenden Mechanismen zunächst entkoppelt untersucht und später immer weiter zusammengeführt.

Ziel des aktuellen Projekts ist die Erstellung eines makroskopischen Modells zur Beschreibung des axialen Schüttguttransports, welches den Wärmetransport sowie die Reaktionskinetik im segregierenden Schüttbett berücksichtigt. Dafür wurden erstmalig experimentelle Untersuchungen durchgeführt, welche den axialen Transport, Wärmeeintrag, Trocknung und Reaktion betrachten. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse werden zur Validierung von DEM Simulationen verwendet.

Um dieses Ziel zu erreichen arbeiten der Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik der Ruhr-Universität Bochum (FS1) und das Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (FS2) zusammen. FS1 setzt dabei die numerischen Untersuchungen um. Die experimentellen Untersuchungen werden von FS2 an einem indirekt beheizten Drehrohröfen ($D = 0,5 \text{ m}$, $L = 1,76 \text{ m}$) durchgeführt. Ein ständiger Ergebnisaustausch garantiert eine erfolgreiche Zusammenführung der gewonnenen Erkenntnisse. Über die Experimente ist eine Validierung der DEM Simulationen möglich, welche auch ein Scale-Up für industriell relevante Anlagen sicherstellt.

4 Vorbetrachtungen

4.1 Versuchsapparatur (FS1)

4.1.1 Messeinrichtungen zur Parameterbestimmung

Für die Simulationen in den Arbeitspaketen AP2, AP4 und AP5 mussten die Stoßparameter für die vorliegenden Kontaktpaarungen aus den folgenden Materialien bestimmt werden:

Kalknatronglas, S235, Plexiglas, Dolomit, Blähton

Daraus ergeben sich die konkret eingesetzten Materialpaarungen:

Kalknatronglas / Kalknatronglas, Kalknatronglas/S235, Kalknatronglas/Plexiglas

Blähton/Blähton, Blähton/S235, Blähton/ Plexiglas

Dolomit/Dolomit, Dolomit/S235, Dolomit/Plexiglas

Für die Bearbeitung des Projekts wurden diverse Messeinrichtungen benutzt, modifiziert bzw. neu gebaut. Nachfolgend die Messeinrichtungen zur Ermittlung der für DEM benötigten Parameter.

Einrichtung zur Ermittlung der Reibungskoeffizienten:

Allgemein wird bei der Reibung zwischen Haft-, Gleit- und Rollreibung unterschieden. 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 .

$$\mu_H = \frac{|\vec{F}_H^{krit}|}{|\vec{F}_N|} \quad (29)$$

Somit gilt für die Haftkraft

$$|\vec{F}_H^{krit}| = \mu_H |\vec{F}_N| \quad (30)$$

Die Gleitkraft berechnet sich entsprechend zu

$$|\vec{F}_G| = \mu_G |\vec{F}_N| \quad (31)$$

Für die Bestimmung der Reibungskoeffizienten werden die einzelnen Materialpaarungen in verschiedenen Versuchen 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 13 zeigt links den schematischen Versuchsaufbau und rechts den realen Versuchstand. Hier ist die Trägerplatte mit 7 mm Glaskugeln bestückt.

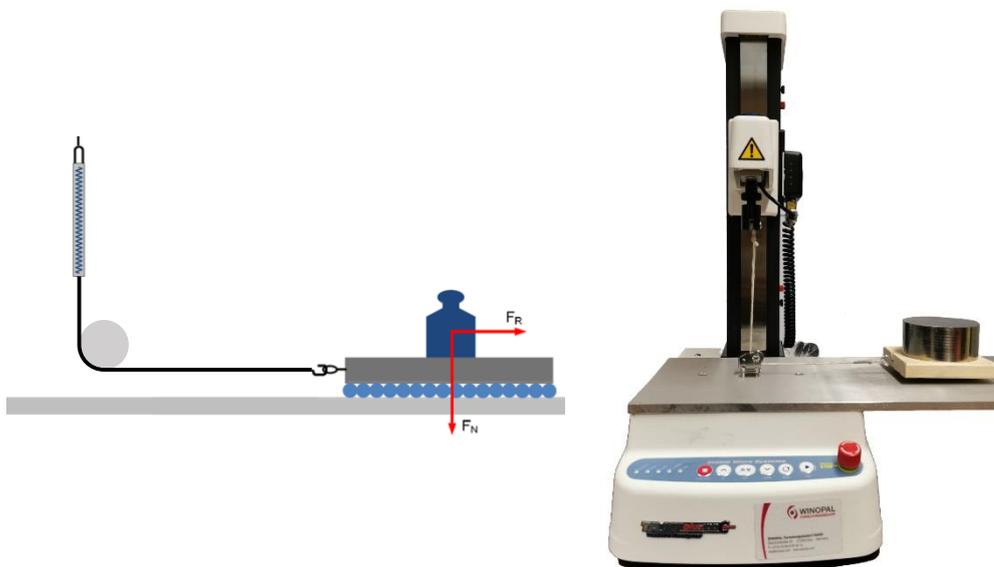


Abbildung 13: Schematischer Versuchsaufbau (links), Kraftmessgerät zur Bestimmung von Reibungskoeffizienten (rechts)

Fallversuch zur Ermittlung der Stoßzahl:

Ein realer Stoß zwischen zwei Massen ist immer eine Kombination aus einem elastischen und einem plastischen Anteil. Die Stoßzahl e^n zwischen Partikel und Wand 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 die Wand beim Stoßvorgang nicht bewegt.

$$e^n = \frac{\vec{v}_1}{\vec{v}_0} \quad (32)$$

Bei vernachlässigbarer Reibung gilt für die mechanische Energie

$$E_{mech} = E_{pot} + E_{kin} \quad (33)$$

Aufgrund der Energieerhaltung gilt

$$\frac{1}{2} m \vec{v}^2 = mgh \quad (34)$$

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

$$e^n = \frac{\vec{v}_1}{\vec{v}_0} = \frac{\sqrt{2gh_1}}{\sqrt{2gh_0}} = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (35)$$

Zur Bestimmung der Stoßzahl eignet sich der in Abbildung 14 skizzierte Fallversuch. Für diesen Versuch wurde ein entsprechender Versuchstand 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. 3.11 bestimmen. Dafür wurden 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.

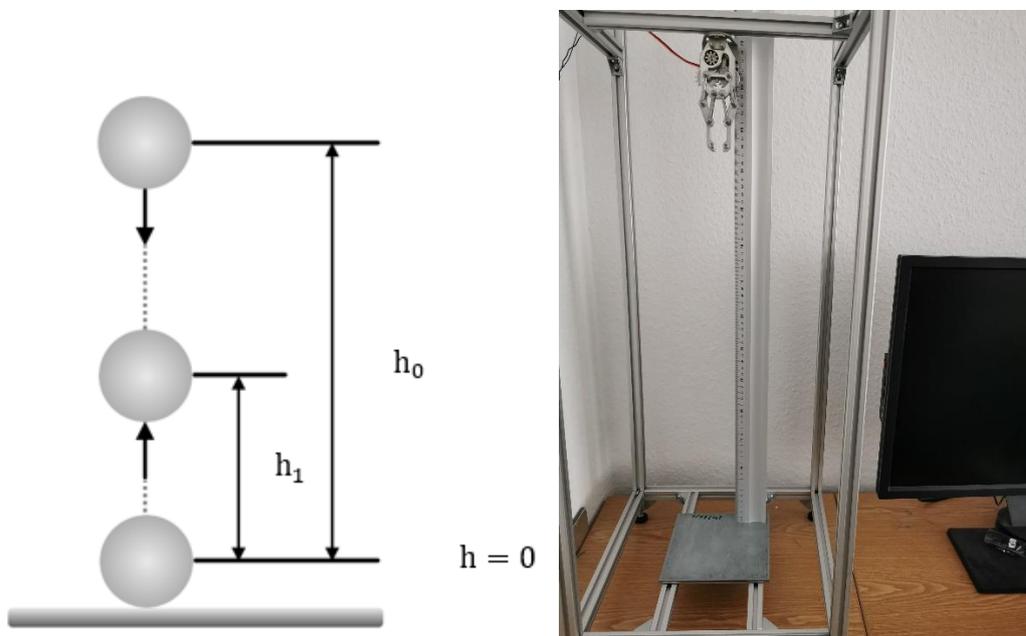


Abbildung 14: Schematischer Fallversuch (links), Fallversuchsmessstand zur Stoßzahlbestimmung (rechts)

Schüttrohr

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. Zur Visualisierung und Erfassung der sich einstellenden statischen Schüttwinkel wird für die Versuche eine weiße Rückwand gewählt. Dies ermöglicht ein großes Kontrastverhältnis und erleichtert die spätere Auswertung der Bilder in Matlab. Über mehrere Umlenkrollen wird in dieser Arbeit ein Acrylglas-Rohr mit einem Innendurchmesser von 10 cm an einer Rolle befestigt, welche von einem 12V-Gleichstrommotor angetrieben wird. Das Rohr wird bis zu einer beliebigen Höhe mit den zu untersuchenden Partikeln befüllt und dann angehoben. Für die seitliche Stabilisierung werden variable Stangen mit Laufrollen an den Enden bis zum Rohr geführt und mit Stellschrauben befestigt.

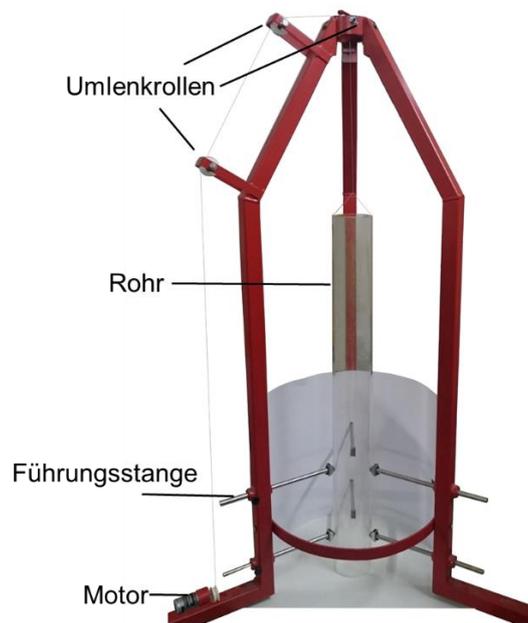


Abbildung 15: Statischer Schüttwinkel Versuchstand

Batch-Drehrohr

Zur Feststellung des dynamischen Schüttwinkels wird das vorhandene Batch-Drehrohr am LEAT 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 5 cm bis zu einem Durchmesser von 50 cm 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 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 39 cm verwendet. Zwei Scheinwerfer sorgen für eine gute Ausleuchtung der vorderen Partikel.

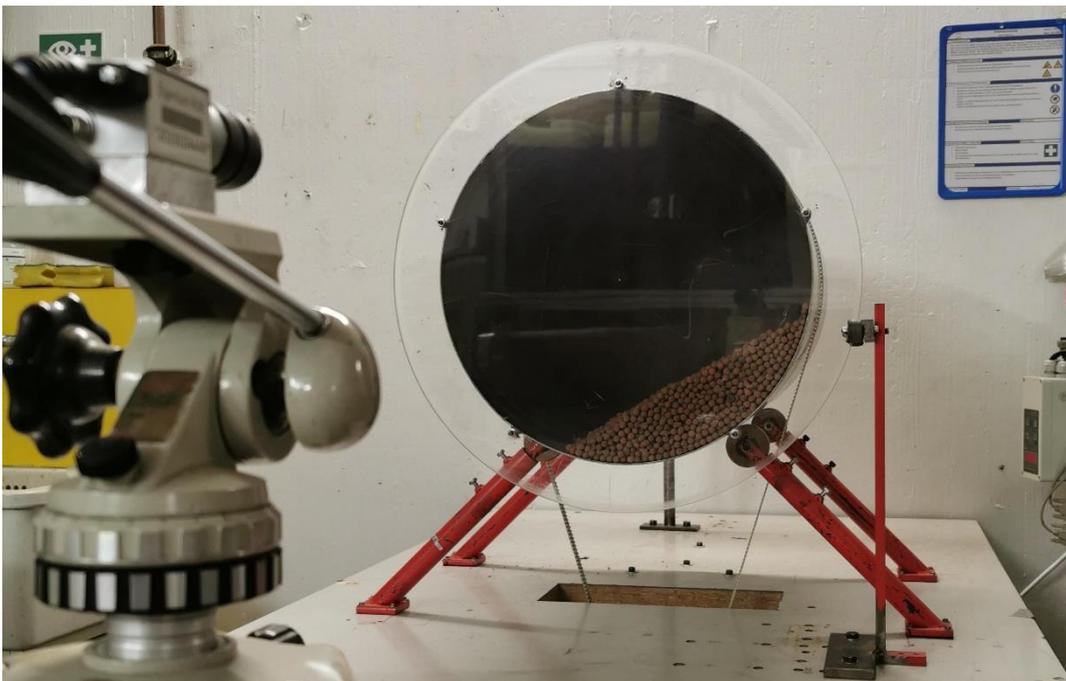


Abbildung 16: Batch Drehrohr zur Bestimmung des dynamischen Schüttwinkels

Rollreibungskoeffizient

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

$$\mu_{Roll} = \frac{|\vec{M}_{Roll}|}{|\vec{F}_N|} \quad (36)$$

Zur Bestimmung von μ_{Roll} eignet sich ein Versuchsaufbau wie er schematisch in Abbildung 17 zu sehen ist. Hier wird die Rollbewegung einer Kugel auf einer waagerechten Ebene mit einer Kamera erfasst. Diese Messmethode gilt nur 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

$$E_{Kin1} = E_{Kin0} - E_{Roll} \quad (37)$$

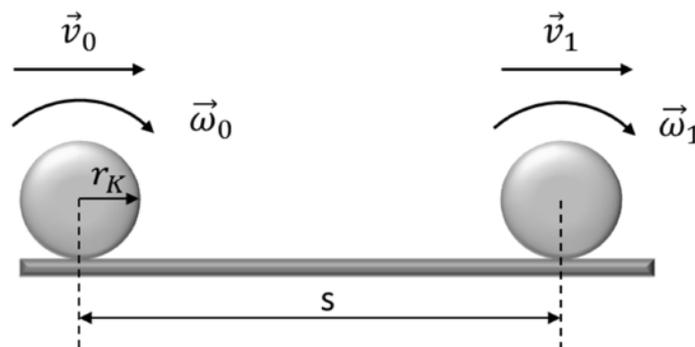


Abbildung 17: Prinzip zur Bestimmung des Rollreibungskoeffizienten

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

$$|\vec{M}_{Roll}| = E_{Roll} * \frac{r_{Kugel}}{s} \quad (38)$$

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

4.1.2 Prüfstands Aufbau

Der Drehrohrprüfstand des LEAT ermöglicht nach der durchgeführten Modifikation die Nachbildung eines direkt beheizten Drehrohrofens ohne chemische Reaktionen. Durch die Verwendung von unterschiedlich großen sphärischen Partikeln können mono- oder polydisperse Schüttungen untersucht werden.

Für die Untersuchung von verschiedenen Betriebszuständen können die Betriebsparameter in gewissen Bereichen variiert werden:

- Drehrohdrehzahl: bis zu $7,5 \frac{\text{U}}{\text{min}}$
- Drehrohrneigungswinkel: 0° bis 5°
- Durchsatz: $8 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ bis $57 \frac{\text{g}}{\text{s}}$
- Stauscheibendurchmesser: 160 mm, 200 mm, 260 mm, 280 mm
- Heizleistung: 0 W bis 1700 W

Die Partikel werden innerhalb des Prüfstandes in einem Kreislauf geführt. Über eine Dosierschnecke gelangen die Partikel mit einem definierten Massenstrom in den Einlassbereich des Drehrohres. Innerhalb des Drehrohres werden die Partikel in die Schüttung eingemischt und fallen nach dem Durchlaufen des Rohres am Auslass über eine Rutsche in einen Auffangbehälter. In diesem Auffangbehälter werden die Partikel über einen bestimmten Zeitraum gesammelt und anschließend gewogen. Hieraus wird der Auslassmassenstrom berechnet. Nach der Wägung gelangen die Partikel über eine weitere Rutsche in ein unteres Silo, von wo aus sie durch einen Olds-Elevator vertikal zu einem höher liegenden Silo gefördert werden. Der Olds Elevator ist eine Konstruktion aus einem schneckenförmigen Körper, der von einem Hüllrohr umgeben ist. Im Vergleich zu einer Förderschnecke dreht sich lediglich das äußere Hüllrohr und transportiert so die Partikel vertikal nach oben. Aus dem oberen Silo gelangen die Partikel anschließend erneut zur Dosierschnecke.

In Abbildung 18 ist der Gesamtüberblick des Drehrohrprüfstandes veranschaulicht.

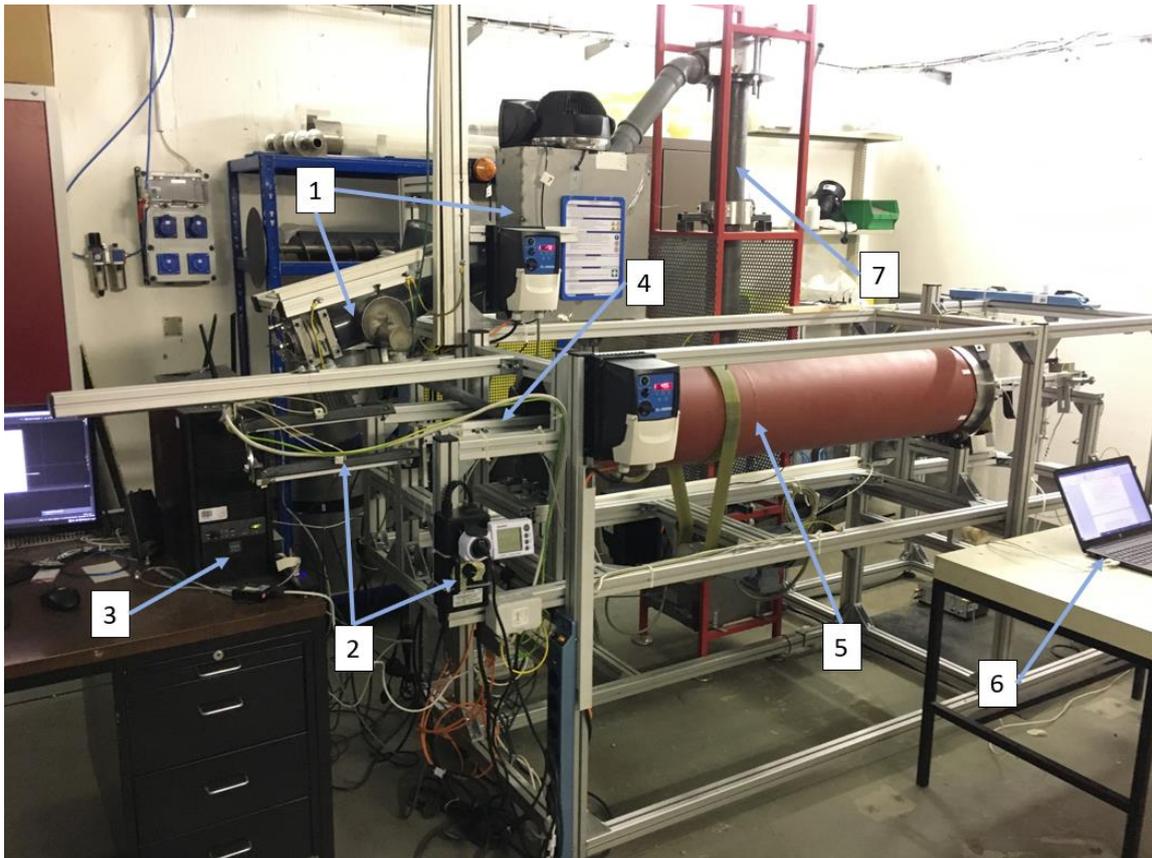


Abbildung 18: Prüfstands Aufbau – Gesamtübersicht

Position 1 zeigt die Dosierschnecke mit dem zugehörigen oberen Partikelsilo. Die Dosierschnecke wird durch einen Elektromotor des Herstellers „M.T. Motori Elettrici“ betrieben. Die Drehzahl des Elektromotors kann über einen Frequenzumrichter des Herstellers „Peter Electronic“ gesteuert werden. Das Partikelsilo besitzt einen Abstandssensor mit dessen Hilfe der Füllstand permanent überwacht werden kann. Position 2 zeigt den abgebauten Infrarotstrahler mit dem entsprechenden Leistungssteller und dem Leistungsmessgerät für die Überwachung der Heizleistung. Die Steuerung des Prüfstandes geschieht hauptsächlich über den Laborrechner (Position 3) und die Steuerung der Messwertaufnahme über einen zusätzlichen Computer (Position 6). Der Computer zur Messwertaufnahme wird im Folgenden auch als Messrechner bezeichnet. Das Drehrohr, welches eine Länge von 1600 mm und einen Innendurchmesser von 300 mm besitzt und auf zwei Lagerböcken gelagert ist, ist mit Position 5 gekennzeichnet. Der Antrieb des Drehrohres erfolgt mittels Riemen, einem Elektromotor und einem weiteren Frequenzumrichter, deren Hersteller identisch zu denen des Dosierschneckenantriebes sind. Die Vermessung des Schüttbettes geschieht über eine durch das Drehrohr verlaufende Traverse, deren Längsachse koaxial zur Drehrohrachse verläuft (Position 4). Die Messtraverse ist auf zwei

separaten Lagerböcken gelagert. Auf der Traverse befindet sich eine in axialer Richtung verfahrbare Messeinheit, auf welcher verschiedene Messinstrumente angebracht werden können. Die gesamte Traverse kann um die Längsachse rotiert werden. Für weitere Untersuchungen ist eine Vorrichtung vorhanden, welche eine parallele Verschiebung der Traverse aus der Drehrohrachse ermöglicht. Der für die vertikale Rückförderung verwendete Olds Elevator ist mit Position 7 gekennzeichnet. Dieser wird ebenfalls durch einen Elektromotor und einen entsprechenden Frequenzumrichter der genannten Hersteller angetrieben. Um den Neigungswinkel des Drehrohres variieren zu können, befindet sich das Drehrohr gemeinsam mit dem Heizstrahler und der Messtraverse auf einem neigbaren Gestell.

In Abbildung 19 ist der Einlassbereich des Prüfstandes während des Betriebes zu sehen. Die Drehrichtung des Rohres ist in Bezug auf diese Abbildung im Uhrzeigersinn. Der Partikelzulauf geschieht über eine flexibel ausgeführte Leitung, die mit der starren Leitung der Dosierschnecke verbunden ist und einen Innendurchmesser von 30 mm aufweist (Position 1). Aufgrund des variierenden Neigungswinkels ist ein Ausgleich des Winkelversatzes zwischen Drehrohr und Dosierschnecke notwendig, welcher durch ein flexibles Schlauchstück in der Zulaufleitung gewährleistet wird. Das Ende der Zulaufleitung ist mit einem 90° Rohrbogen versehen, welcher zu einer Abbremsung der einlaufenden Partikel führt und ein Einmischen der Partikel im Einlassbereich des Drehrohres sicherstellt.

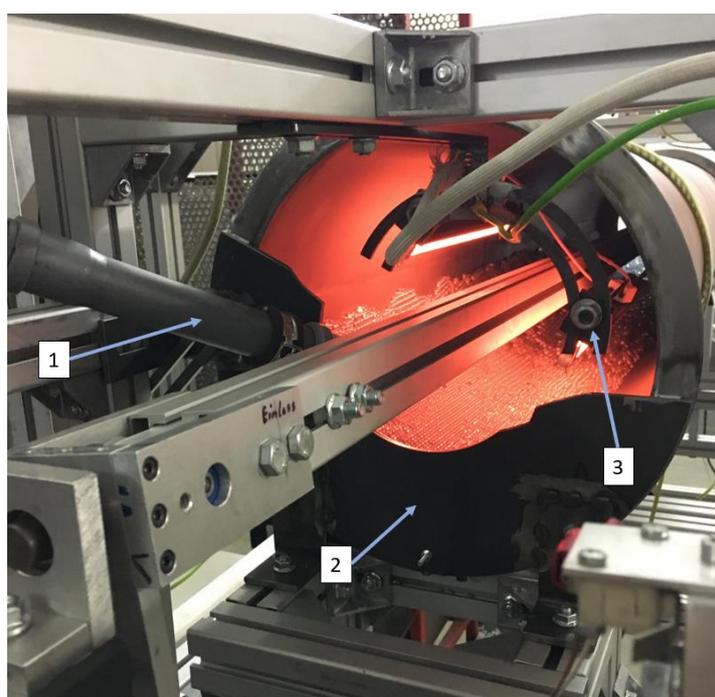


Abbildung 19: Prüfstandsaufbau – Einlassbereich

Position 2 zeigt eine statische Verschlusscheibe des Drehrohres, die mit einem Ring aus Teflon versehen ist und ein Anlaufen der Rohrstirnseite ermöglicht. Auf der einen Seite wird hierdurch das Rückfließen der Partikel aus dem Auslass verhindert, auf der anderen Seite ist durch die statische Konstruktion das Einbringen des Heizstrahlers möglich. Position 3 kennzeichnet den Heizstrahler in eingebautem Zustand. Beide Einzelstrahler sind in einem Winkel von ca. 45° zur Horizontalen positioniert, sodass die emittierte Wärmestrahlung an der Messtraverse vorbeiführt und auf das Schüttbett trifft. Der Strahler ist in axialer Richtung so positioniert, dass die ersten 100 mm des Einlassbereiches unbeheizt sind, da sich die Schüttung in diesem Bereich zunächst beruhigen soll. Hiernach beginnt der beheizte Bereich des Drehrohres und endet nach ca. 270 mm. Die Einzelstrahler sind parallel zur Drehrohrachse ausgerichtet. Durch die schräge Anordnung der Verschlusscheibe und der Strahlerhalterung wird das Herausziehen des Strahlers für Positionierungszwecke während des Betriebes ermöglicht. Die Positionierung des Strahlers bleibt jedoch für die Durchführung aller hier aufgezeigten Versuche gleich.

Abbildung 20 zeigt den Auslassbereich des Prüfstandes. Die zuvor angesprochene Aufstauung der Partikel wird durch die angeschraubte, zweiteilig ausgeführte Stauscheibe (Position 1) erzielt. Für die Variation dieses Parameters stehen Stauscheiben mit verschiedenen Innendurchmessern zur Verfügung. Durch die Zweiteilung ist das Auswechseln der Stauscheiben auch ohne Demontieren der Messtraverse möglich.

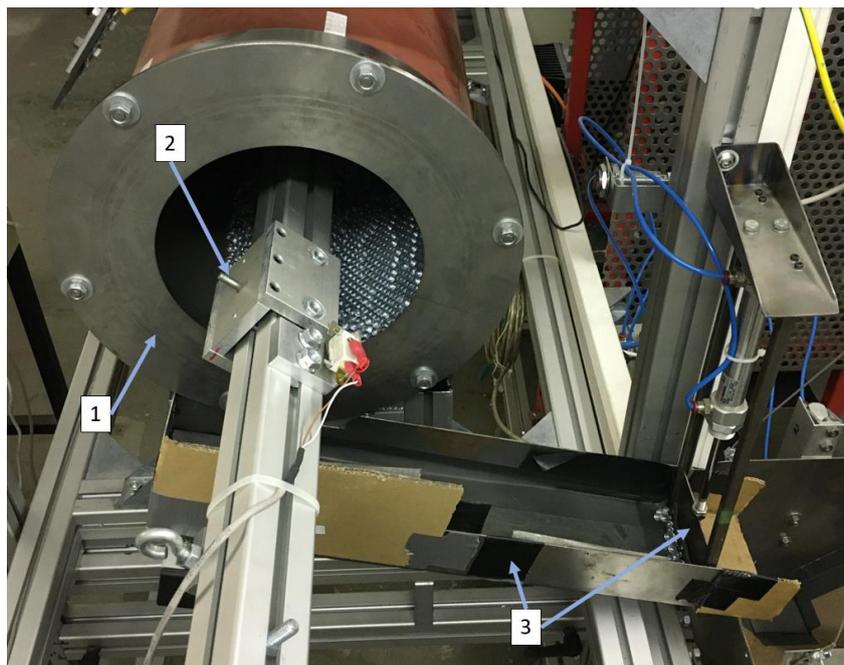


Abbildung 20: Prüfstandsaufbau – Auslassbereich

Die bereits beschriebene verfahrbare Messeinheit ist mit der Position 2 gekennzeichnet. Auf ihr können die verschiedenen Messinstrumente installiert werden. Durch den auf der Traverse angebrachten Endschalter wird der Verfahrweg der Messeinheit kalibriert – die Position des Endschalters stellt den Nullpunkt des axialen Verfahrweges dar. Nachdem die Partikel das Drehrohr durchlaufen haben, fallen diese in eine Rutsche, welche mit einem Absperrschieber versehen ist (Position 3). Der Absperrschieber stellt eine dosierte Zuführung der Partikel zum Auffangbehälter sicher. Aufgrund der durch die Neigungswinkelvariation entstehenden Höhendifferenzen ist die Rutsche höhenverstellbar, damit die Partikel auch bei großen Neigungswinkeln ablaufen können.

Die für die Wägung des Auslassmassenstroms erforderliche Einrichtung ist in Abbildung 21 dargestellt. Nach dem Austreten aus dem Drehrohr gelangen die Partikel über die zuvor beschriebene Rutsche in den Auffangbehälter (Position 1), welcher mit Hilfe von Drahtseilen an einem Kraftsensor des Herstellers „Lorenz Messtechnik“ (Position 2) angebracht ist. Der Kraftsensor besitzt einen Messbereich von 0 kN bis maximal 1 kN, was einer Last von 0 kg bis etwa 100 kg entspricht (Lorenz Messtechnik GmbH 2020).

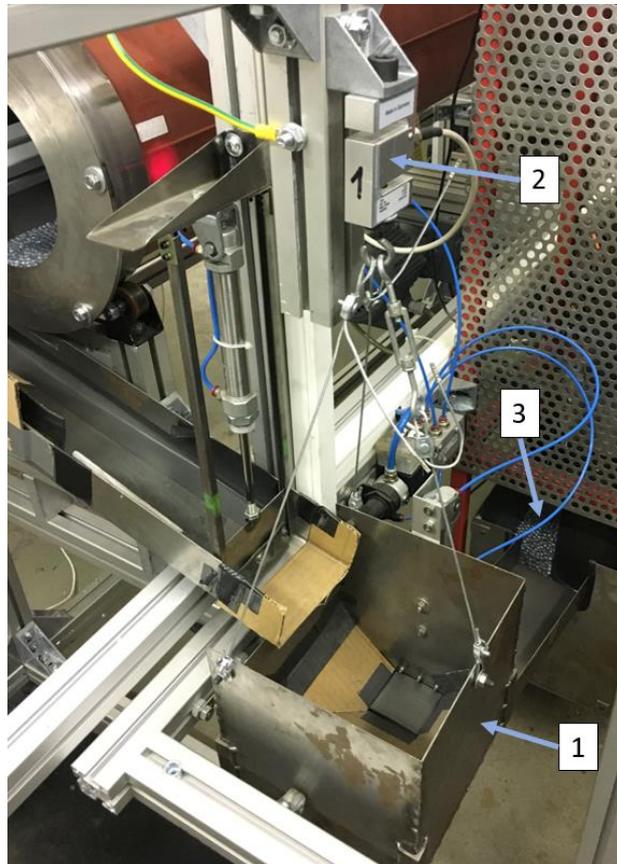


Abbildung 21: Prüfstands Aufbau – Vorrichtung für Massenstromwägung

Nach einem einstellbaren Zeitraum schließt der an der Rutsche befestigte Absperrschieber und die im Auffangbehälter befindliche Schüttung wird für drei Sekunden ruhen gelassen. Anschließend wird durch den Kraftsensor die Wägung der sich im Auffangbehälter befindlichen Partikel durchgeführt. Nach der Massenbestimmung öffnet die an dem Auffangbehälter angebrachte Klappe für einen einstellbaren Zeitraum und lässt die Partikel aus dem Behälter ab, sodass diese über eine weitere Rutsche in das untere Partikelsilo (Position 3) gelangen. Anschließend schließt die Klappe wieder, der Absperrschieber öffnet sich und ein neuer Wägungszyklus beginnt. Auch das untere Partikelsilo ist mit einem Abstandssensor zur Füllstandüberwachung ausgestattet. Der Antrieb des Absperrschiebers und der Klappe erfolgen pneumatisch.

In Abbildung 22 ist der Antrieb der Messtraverse dargestellt. Das axiale Verfahren der Messeinheit geschieht mit Hilfe eines in der Traverse befindlichen Riemens, der über zwei Umlenkrollen geführt und durch einen Schrittmotor des Herstellers „Nanotec“ angetrieben wird.

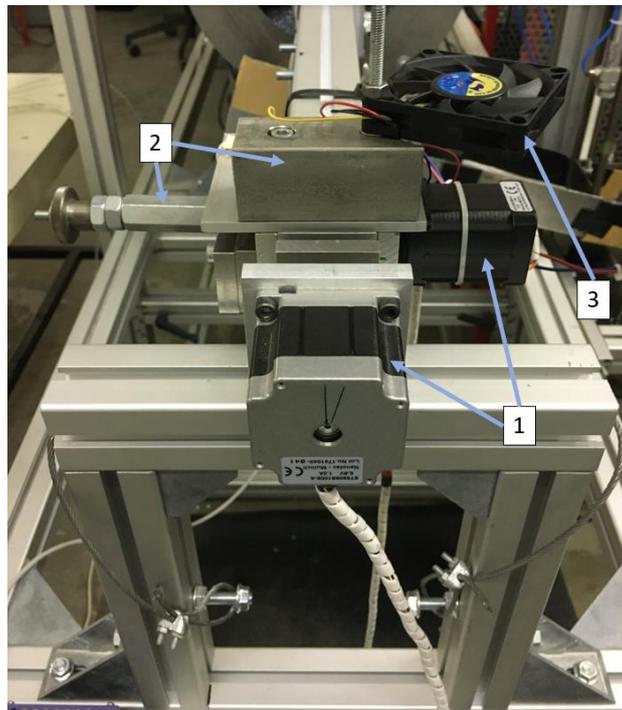


Abbildung 22: Prüfstandsaufbau – Antrieb Messtraverse

Für den Antrieb der Rotationsbewegung kommt ebenfalls ein Schrittmotor desselben Herstellers zum Einsatz. Beide Schrittmotoren sind mit der Position 1 gekennzeichnet. Durch diese Anordnung wird das Anfahren beliebiger Axial- und Winkelpositionen ermöglicht. Die verbauten Gegengewichte (Position 2) gleichen hierbei das Gewicht

des Schrittmotors für den Horizontalantrieb und das Gewicht der Messeinheit aus, sodass die Last des Motors für den Rotationsantrieb möglichst gering bleibt. Da der Motor des Horizontalantriebes während des Betriebes ein dauerhaftes Haltemoment aufbringen muss, wird dieser sehr heiß. Zur Kühlung ist ein Lüfter mit externem Netzteil verbaut (Position 3).

4.2 Versuchsanlage (FS2)

Zur experimentellen Untersuchung kam ein Pilot-Drehrohrföfen der Firma Linn High Therm GmbH zum Einsatz, der sowohl in kontinuierlicher, als auch in Batch-Fahrweise betrieben werden kann. Dieser Versuchsofen besteht im Hauptteil aus einem Stahlrohr mit einer Länge von $L = 1,76 \text{ m}$ und einem Durchmesser von $D = 0,5 \text{ m}$, welches mit Hilfe eines Kettenantriebs um die Längsachse rotiert wird. Der Ofen wird indirekt über um die Mantelfläche herum angeordnete elektrische Heizelemente beheizt, die nach außen isoliert sind, siehe Abbildung 23.

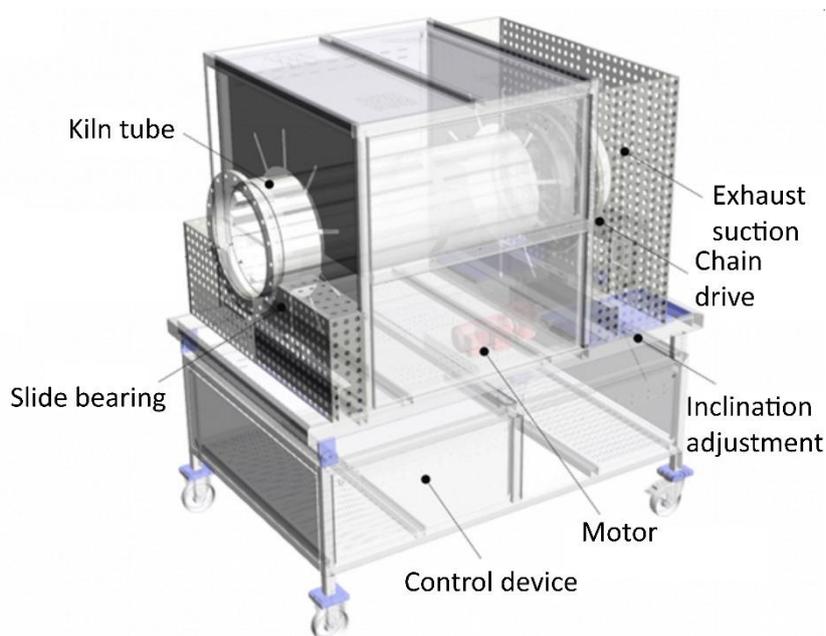


Abbildung 23: Apparativer Aufbau der Versuchsanlage „Pilot-Drehrohrföfen“

Ein seitlich angebrachtes Steuermodul dient zur Einstellung von Drehzahl sowie Heiztemperatur und Heizrate. Bei kontinuierlicher Fahrweise kann der Neigungswinkel stufenlos über ein Schneckenrad justiert werden. In diesem Fall wird das Material kontinuierlich über einen Zuförderer aufgegeben, an welchem der Massenstrom des Materials definiert werden kann. Der Zuförderer ist oberhalb der Anlage positioniert und das Material wird über ein Rohr in das Drehrohr eingeleitet, siehe Abbildung 24.

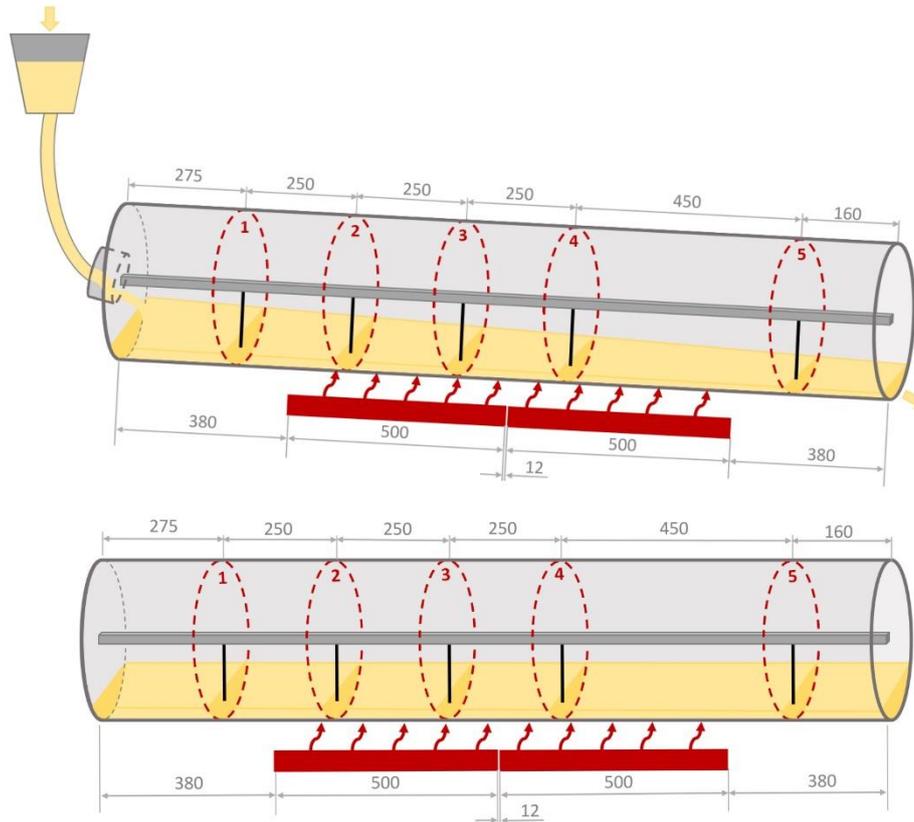


Abbildung 24: Prinzipielles Schema für Versuchsaufbau bei kontinuierlicher Durchführung (oben) und Batch-Fahrweise (unten)

Vor der Auslassseite des Drehrohrofens werden bei Bedarf zwei dimmbare Videoleuchten der Firma Menik sowie eine Systemkamera der Firma Panasonic (Modell: DMC-G70 LUMIX G DSLM) mit Blick auf das Innere des Rohres aufgestellt um den Prozess aufzeichnen zu können. Tabelle 1 stellt die Abmaße sowie mögliche Parametereinstellungen der Versuchsanlage dar.

Tabelle 1: Geometrische Abmaße und einstellbare Parameter des Pilot-Drehrohrofens.

Parameter	Wert
Länge des Pilot-Drehrohrofens L	1,76 m
Durchmesser des Pilot-Drehrohrofens D	0,5 m
Drehzahl n	1 – 8 rpm
Heiztemperatur T_{Heiz}	Bis 500 °C
Neigungswinkel β	0 – 5 °
Massenstrom \dot{M}	Bis 300 kg/h

Um die Temperaturen von Ofenwand, Schüttbett und Luft messen zu können, kamen Nickel-Chrom Thermoelemente (Typ K) mit einem Durchmesser von 0,5 mm zum Einsatz. Über von innen in die Ofenwand gedrehte Schrauben wurden die

Thermoelemente zur Messung der Wandtemperaturen befestigt, indem das Thermoelement unter dem Schraubenkopf positioniert wurde, während die Schraube vorsichtig angezogen wurde. Außerdem wurde ein Strebenprofil auf der Mittelachse des Drehrohrs positioniert und über Gewindestangen fest an der Außenwand fixiert. An diesem Strebenprofil wurden zur Messung der maximalen Betthöhe an 5 unterschiedlichen axialen Positionen Stahllineale angebracht. Zusätzlich wurden an das Strebenprofil an diesen Positionen auch Präzisionsröhrchen befestigt. Durch diese Röhrchen konnten dann die Thermoelemente an unterschiedliche radiale Positionen im Drehrohr geführt werden. Diese rotieren zusammen mit dem Drehrohr, und können so während der Rotation sowohl Luft- als auch Festbetttemperaturen aufzeichnen, siehe Abbildung 25.

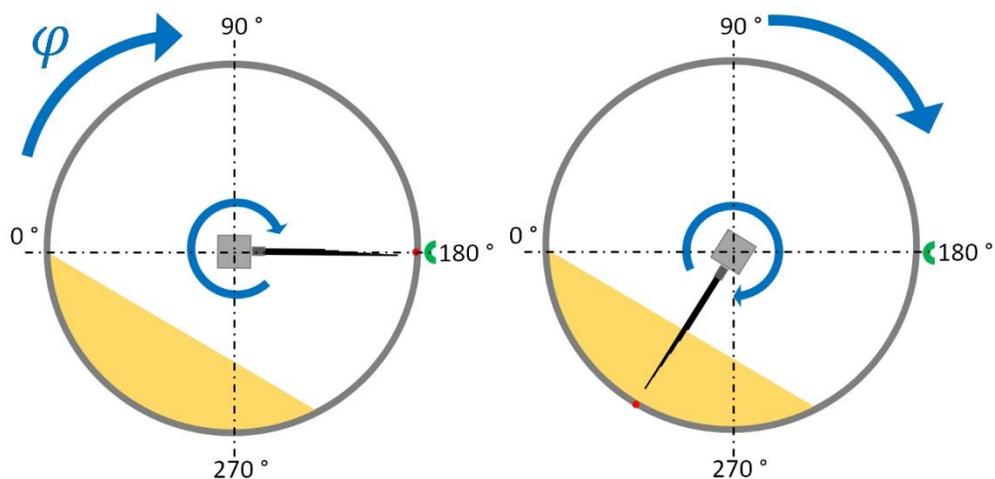


Abbildung 25: Querschnitt des Pilot-Drehrohrrofens mit Messtechnik während der Rotation; Beispiel für die Messung der Lufttemperatur (links) sowie der Festbetttemperatur (rechts)

Ein Sensor (rot) befindet sich in Verlängerung der Messachse und registriert das Passieren des stationären Magnets (grün). Auf diese Weise können die Temperaturen exakt den Positionen im Drehrohr zugeordnet werden. Ein Koordinatensystem wird eingeführt, bei dem die 9-Uhr-Position mit 0° definiert wird und sich der Drehwinkel φ im Uhrzeigersinn erhöht. Über eine Messbox werden die Daten per Funk an einen PC gesendet, welcher die Daten als Textdatei im .txt-Format aufzeichnet.

4.3 Versuchsmaterial (FS1/FS2)

4.3.1 Auswahl der verwendeten Materialien

Die Auswahl der zum Einsatz kommenden Schüttgüter, richtete sich vor Allem nach den Anforderungen an das Material. Durch vorteilhafte Materialeigenschaften, konnte beispielsweise der experimentelle Aufwand minimiert werden oder eine gute Vergleichbarkeit der Bedingungen zwischen DEM und Experiment erreicht werden.

Um den Wärmeeintrag zu untersuchen wurden Glaskugeln verwendet. Diese haben eine nahezu ideal kugelförmige Form und einheitliche Größe.

Weiterhin kam für die Untersuchung des Wärmeeintrags noch Quarzsand zum Einsatz. Dieser wurde als Beispiel für ein sehr feinkörniges Material gewählt. Vergleiche zur DEM waren jedoch aufgrund der daraus resultierenden enormen Partikelanzahl im Drehrohr nicht möglich.

Bei der Untersuchung des Trocknungsverhaltens sollte ein Material mit einer hohen Porosität zum Einsatz kommen, damit Feuchtigkeit leicht aufgenommen werden kann. Dieses Kriterium erfüllte Blähton, welcher zudem thermisch stabil ist und nach der Trocknung wiederverwendet werden kann. Auch wenn Abrieb beim Blähton eine Rolle spielt, ist dessen Einfluss hier jedoch minimal. Eine Korngrößenanalyse vor und nach den Versuchen zeigte keine signifikant veränderte Korngrößenverteilung. Beim Einsatz von Hubschafeleinbauten, wie im vorausgegangenen Projekt (18916 BG), wies der Blähton eine signifikant höhere Abrasion auf.

Für die Untersuchungen der Zersetzung von Dolomit kam eine Dolomitart aus dem Dolomitwerk Wünschendorf zum Einsatz.

4.3.2 Materialeigenschaften

Für die spätere Auswertung der experimentellen Untersuchungen und die Simulation der Experimente ist die Kenntnis über die Materialeigenschaften aller verwendeten Stoffe elementar. Deshalb wurden von allen verwendeten Versuchsmaterialien wichtige Stoffeigenschaften und DEM-Parameter bestimmt.

Reibwerte

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Reibwerte aufgelistet. Dabei ist kein gravierender Unterschied zwischen den einzelnen Korngrößen festzumachen. Dolomit hat dabei den größten Reibungswiderstand in der Kombination mit Plexiglas, da die unebenen Partikel sich in das relativ weiche Plexiglas schneiden.

Tabelle 2: Reibwerte für verschiedene Materialkombinationen

Materialkombination	Reibwerte
Blähton klein/Blähton klein	0.291
Blähton mittel/Blähton klein	0.318
Blähton groß/Blähton klein	0.293
Blähton klein/S235	0.251
Blähton mittel/S235	0.255
Blähton groß/S235	0.253
Dolomit/Dolomit	0.353
Dolomit/S235	0.166
Dolomit/Plexiglas	0.429
Silibeads Glaskugeln/Stahl	0.152
Silibeads Glaskugeln/Plexiglas	0.349

Dichte

Bei der Dichte wird hier zwischen der Rohdichte und der Schüttdichte des Materials unterschieden.

Bei Blähton muss hier berücksichtigt werden, dass in der Rohdichte des Materials nicht nur die Zwischenräume der Schüttung, sondern auch die Poren der Partikel Wasser aufnehmen können. Es wurde daher zusätzlich noch überschlägig die Reindichte des Blähtons bestimmt.

Bei der Rohdichtemessung wurde eine definierte Masse $m_{einwaage}$ des Materials abgewogen und nachfolgend in ein Wasserbad gegeben. Durch Kenntnis über das verdrängte Wasservolumen $V_{W,verdr.}$ kann somit eine Rohdichte ρ_{roh} berechnet werden.

$$\rho_{roh} = \frac{m_{einwaage}}{V_{W,verdr.}} \quad (39)$$

Zur Messung der Schüttdichte kam ein Zylinder mit einem Gesamtvolumen von $V_{Zylinder} = 0,01705 \text{ m}^3$ zum Einsatz, siehe Abbildung 26.



Abbildung 26: Messzylinder für die Schüttdichtemessung

Dieser wurde mit dem zu untersuchenden Material bis zur Oberkante gefüllt und die Masse des Materials $m_{einwaage}$ wurde abgewogen. Über das Verhältnis beider Größen kann nun die Schüttdichte ρ_b ermittelt werden.

$$\rho_b = \frac{m_{einwaage}}{V_{Zylinder}} \quad (40)$$

Tabelle 3: Schüttdichten der verwendeten Versuchsmaterialien

Material	d_p [mm]	ρ_b [kg/m ³]
Glaskugeln	0,7	1437
Glaskugeln	2	1496
Glaskugeln	4	1513
Blähton	1-3	1002
Blähton	3-5	832
Blähton	5-8	659
Blähton	1-8	774
Dolomit	1-5	1472
Dolomit	5-8	1372
Dolomit	8-10	1431

Dynamischer Schüttwinkel

Während der Rotation des Drehrohrs bildet die freie Oberfläche des Schüttguts einen Winkel zur Horizontalen aus, welcher als dynamischer Schüttwinkel bezeichnet wird.

Bei der Rolling Motion bleibt der dynamische Schüttwinkel θ konstant, siehe Abbildung 27 links, während es bei der Slumping Motion einen unteren Schüttwinkel (χ) sowie einen oberen Schüttwinkel (δ) gibt, siehe Abbildung 27 rechts.

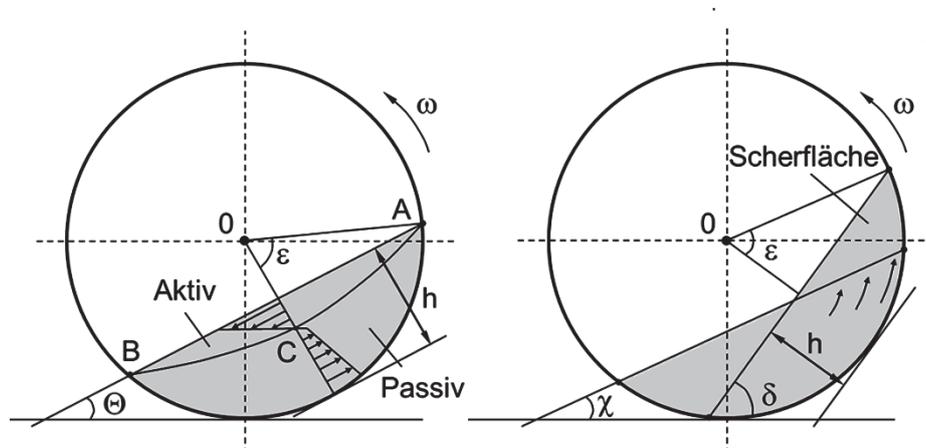


Abbildung 27: Ausbildung des dynamischen Schüttwinkels θ am Beispiel der Rolling Motion (Specht 2014)

Um auch für die Slumping Motion einen vergleichbaren Schüttwinkel zu erhalten, wird in diesem Fall ein Mittelwert in Form von

$$\theta = \frac{\chi + \delta}{2} \quad (41)$$

verwendet.

Der dynamische Schüttwinkel ist von den Haftkräften zwischen den Partikeln sowie zwischen Partikeln und Wand abhängig. Das bedeutet er unterscheidet sich, je nachdem welches Material zum Einsatz kommt, welchen Feuchtegehalt dieses aufweist und wie die Oberfläche der Ofenwand beschaffen ist (Material und Rauigkeit). Außerdem haben der Füllungsgrad und die Rotationsgeschwindigkeit einen Einfluss auf den dynamischen Schüttwinkel. Hierbei besteht zwischen der Schüttbetthöhe h und dem Füllungsgrad f_D ein direkter Zusammenhang.

Über den Schüttwinkel und den Füllungsgrad kann eindeutig die Lage bestimmt werden, wo sich das Schüttbett befindet. Dies ist vor allem für die Auswertung der im Pilotdrehrohr durchgeführten Versuche essenziell um die aufgezeichneten Temperaturen der Luftphase bzw. dem Schüttbett zuordnen zu können.

Aus diesem Grund wurde der dynamische Schüttwinkel für alle verwendeten Materialien in einer kleinen Versuchsanlage gemessen, wie in Kapitel 4.5.5 näher erläutert wird.

4.4 Versuchsdurchführung und Auswertung (FS1)

Für die Versuchsdurchführungen an dem rückfördernden Drehrohrversuchsstand werden für die Untersuchungen der einzelnen Prozessgrößen jeweils speziell entwickelte Sensorsysteme verwendet. Diese werden an der bereits beschriebenen Messtraverse befestigt und betrieben.

Zu Beginn eines Versuches werden zunächst die Parameter Neigungswinkel und Stauscheibendurchmesser eingestellt. Die Drehrohrneigung wird hierbei anhand einer Querstrebe, auf der das neigbare Gestell des Drehrohres aufliegt, variiert.

Der Durchmesser der Stauscheibe wird durch das Demontieren der alten und das Anschrauben der neuen Stauscheibengröße verändert. Hierfür liegen Stauscheiben in vier verschiedene Größen vor. Nach dem Einstellen der beiden Parameter wird die Steuerungssoftware des Drehrohres gestartet. Hier werden die Parameter Drehrohdrehzahl und Einlassmassenstrom eingetragen (vgl. Abbildung 28).

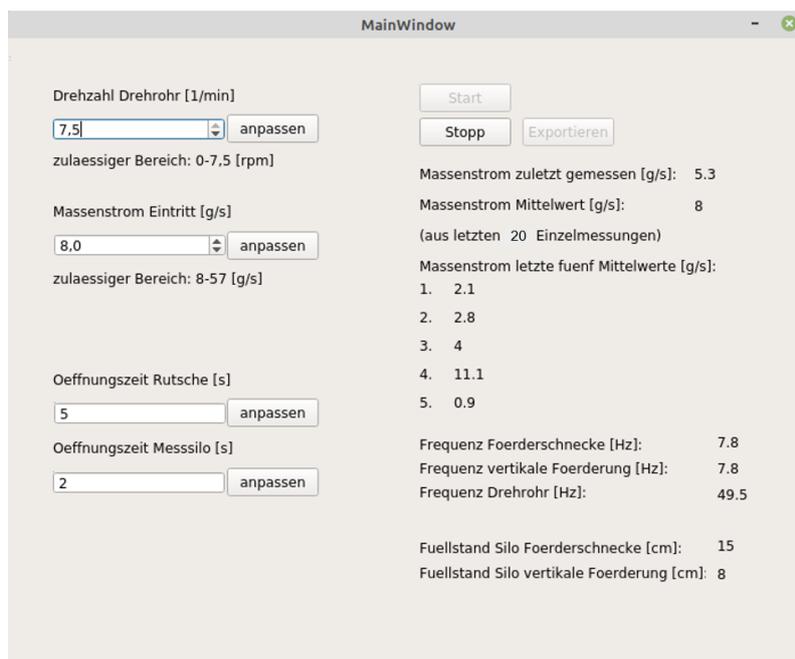


Abbildung 28: GUI der Drehrohrsteuerungssoftware

Des Weiteren können hier die Öffnungszeiten des Schiebers und der Klappe für die Wägung des Auslassmassenstromes verändert werden. Die Parameter können während des Betriebes jederzeit durch Betätigen des Buttons „anpassen“ verändert werden. Bei Anpassung der Öffnungszeiten wird die Änderung automatisch für die Berechnung des Auslassmassenstromes berücksichtigt. Die GUI gibt während des Betriebes den zuletzt gemessenen Massenstrom sowie die letzten sechs Mittelwerte des Massenstromes, welche jeweils aus 20 Einzelmessungen gebildet werden, aus.

Außerdem werden die aktuellen Frequenzen der Antriebsmotoren und die aktuellen Füllstände der Partikelsilos angezeigt.

Durch Klicken auf „Start“ wird zunächst eine Leerung des Auffangbehälters und ein Tarieren des Kraftsensors durchgeführt. Anschließend starten die Antriebe des Drehrohres und der Fördereinrichtungen und der Wägungszyklus beginnt. Wird während des Betriebes die Drehzahl des Olds-Elevators aufgrund des Regelkreises angepasst, erscheint in der Konsole eine Mitteilung. Außerdem erscheint eine Meldung, wenn beide Füllstände zu niedrig oder zu hoch sind und sich somit zu wenig oder zu viele Partikel im Prüfstand befinden. Da der Prozess jedoch nicht automatisch gestoppt wird, ist es gerade bei der Einstellung eines neuen Transportzustands wichtig, regelmäßig die Meldungen der Konsole zu überprüfen. Des Weiteren ist es wichtig, auf den Füllungsgrad des Drehrohres im Einlassbereich zu achten, da Parameterkonfigurationen existieren, die zu einem Überlaufen des Drehrohres führen können und somit nicht fahrbar sind. Bei großen Neigungswinkeln und geringen Füllungsgraden neigen die Kugelpartikel dazu, durch das Drehrohr zu rollen, anstatt sich in das Schüttbett einzumischen. Dies kann durch drei verschieden lange Endstücke der Zulaufleitung beeinflusst werden (vgl. Abbildung 29). Je länger das Endstück der Zulaufleitung ist, umso ruhiger laufen die Partikel ein, jedoch führt ein zu langes Endstück zu einem Aufstauen des Schüttbettes, sodass die Partikel nicht mehr kontinuierlich abfließen können.



Abbildung 29: Verschiedene Endstücke der Zulaufleitung

Das System benötigt besonders bei niedrigen Neigungswinkeln und geringen Drehzahlen einige Zeit zum Einschwingen. Sobald die Mittelwerte des gemessenen Auslassmassenstromes über einen längeren Zeitraum dem vorgegebenen Einlassmassenstrom entsprechen, kann von einem stationären Vorgang ausgegangen werden. Für diesen Fall entspricht der eingestellte Einlassmassenstrom dem

Durchsatz des Drehrohres. Der gemessene Auslassmassenstrom schwankt stetig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verweilzeit der Partikel durch zufällige Vermischungseffekte auch für monodisperse Schüttungen schwankt, was anhand von zufällig auftretenden Schüttbettherhöhungen erkennbar ist. Außerdem ist bei der Dosierung des Einlassmassenstromes und bei der Wägung des Auslassmassenstromes mit Abweichungen zu rechnen, weshalb stets Mittelwertbetrachtungen durchgeführt werden sollten.

4.4.1 Untersuchung des axialen Schüttguttransports im Kaltzustand (FS-1 AP1)

Bei der Untersuchung des axialen Schüttguttransports im Kaltzustand wird die Schüttbetthöhe, die Geschwindigkeit an der Bettoberfläche sowie die Verweilzeitverteilung bei unterschiedlichen Stauscheiben, Massenströmen, Neigungswinkeln und Drehzahlen gemessen.

Schüttbetthöhe

Das wichtigste Instrument bei der hier eingesetzten optischen Höhenbestimmung ist die Kamera. Sie ist dafür zuständig, qualitativ hochwertige Bilder aufzunehmen, die anschließend analysiert werden können. Im Versuch der Schüttbetthöhenvermessung wird eine Raspberry Kamera der zweiten Generation verwendet. Sie verfügt über eine Auflösung von 3280x2464 Pixeln und kann sowohl Fotos als auch Videos aufnehmen. Der Öffnungswinkel beträgt in der vertikalen Richtung 48.8° und in der horizontalen Richtung 62.2° . Über ein Rädchen vor der Linse kann der Fokus der Kamera manuell eingestellt werden. Zudem wird ein Neopixel LED Ring um die Kamera herum installiert, welcher es erlaubt jede LEDs einzeln anzusteuern. Der Aufbau ist in Abbildung 30 zu sehen.

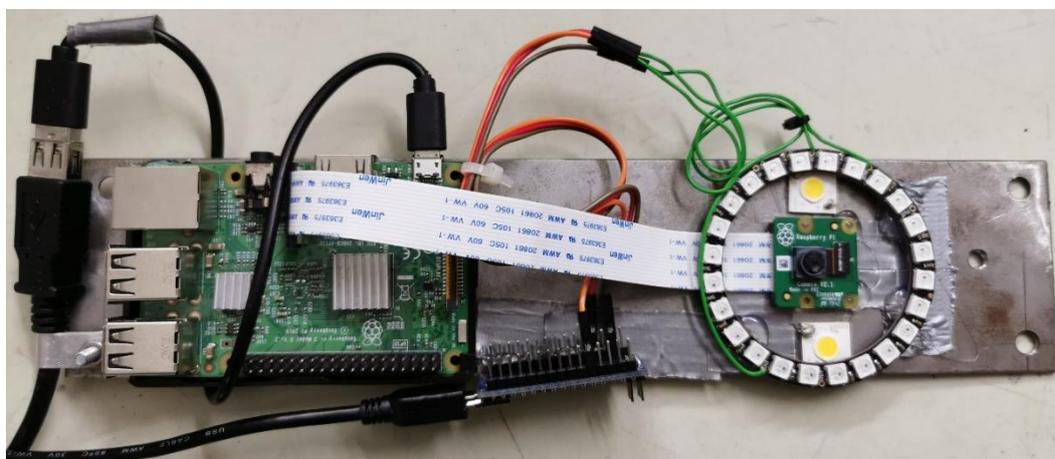


Abbildung 30: Sensorsystem zur Höhenmessung

Durch die frei einstellbaren Farben und Intensitäten kann dafür gesorgt werden, dass die Randbereiche der Glaskugeln hell ausgeleuchtet werden (vgl. Abbildung 31).

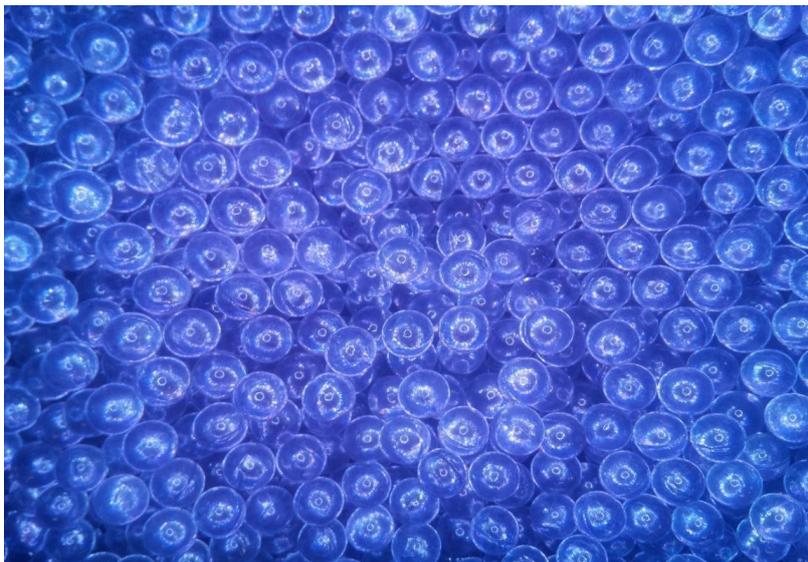


Abbildung 31: Bildaufnahme einer Beleuchteten Schüttung aus Glaskugeln im Drehrohr

Für die Vermessung der Schüttbetthöhe wird weiterhin der Umstand genutzt, dass die untersuchten Partikel einen festen Durchmesser haben (3, 5 und 7 mm). Die Kameralinse wird so platziert, dass sie einen konstanten Abstand von 150 mm zur Rohrwand hat. Durch die `imfindcircles()` Funktion von Matlab lassen sich die Kugelpositionen im Bild bestimmen. Anhand des Durchmessers der erkannten Kugel in der Einheit Pixel, dem Öffnungswinkel der Kamera sowie der x und y Position lässt sich die Position der Kugel im R^3 ausrechnen. Die einzelnen Koordinaten werden später mit den Simulationsdaten verglichen und die Abweichung bestimmt.

Verweilzeitverteilung

Für die Messung der Verweilzeitverteilung werden an der Zuführung zum Drehroreinlass Tracerpartikel in Paketen zu je 50 Stück aufgegeben und die Zeit bestimmt bis die Kugeln am Drehrohrauslass austreten. Zur automatischen Detektion der Kugeln wird ein Matlab Skript eingesetzt. Die Kamera ist dabei so positioniert, dass die Partikel direkt nach dem Austritt aus dem Drehrohr erfasst werden können (vgl. Abbildung 32).

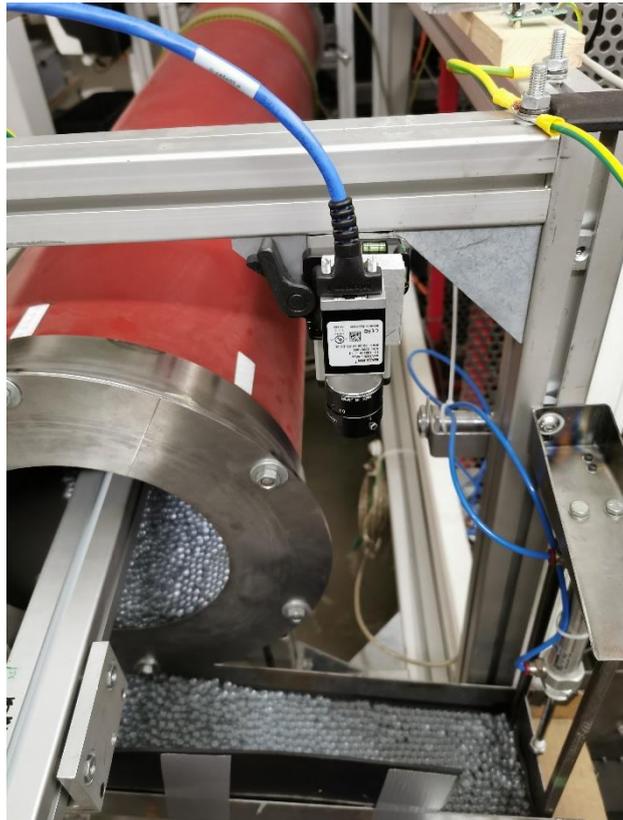


Abbildung 32: Kamera zur Detektion der Tracerpartikel

Durch die unterschiedlich gewählten Farben für die einzelnen Partikelgrößen lassen sich die Partikel optisch gut bestimmen.

Die Abbildung 33 zeigt Aufnahmen der Partikel beim Austritt.

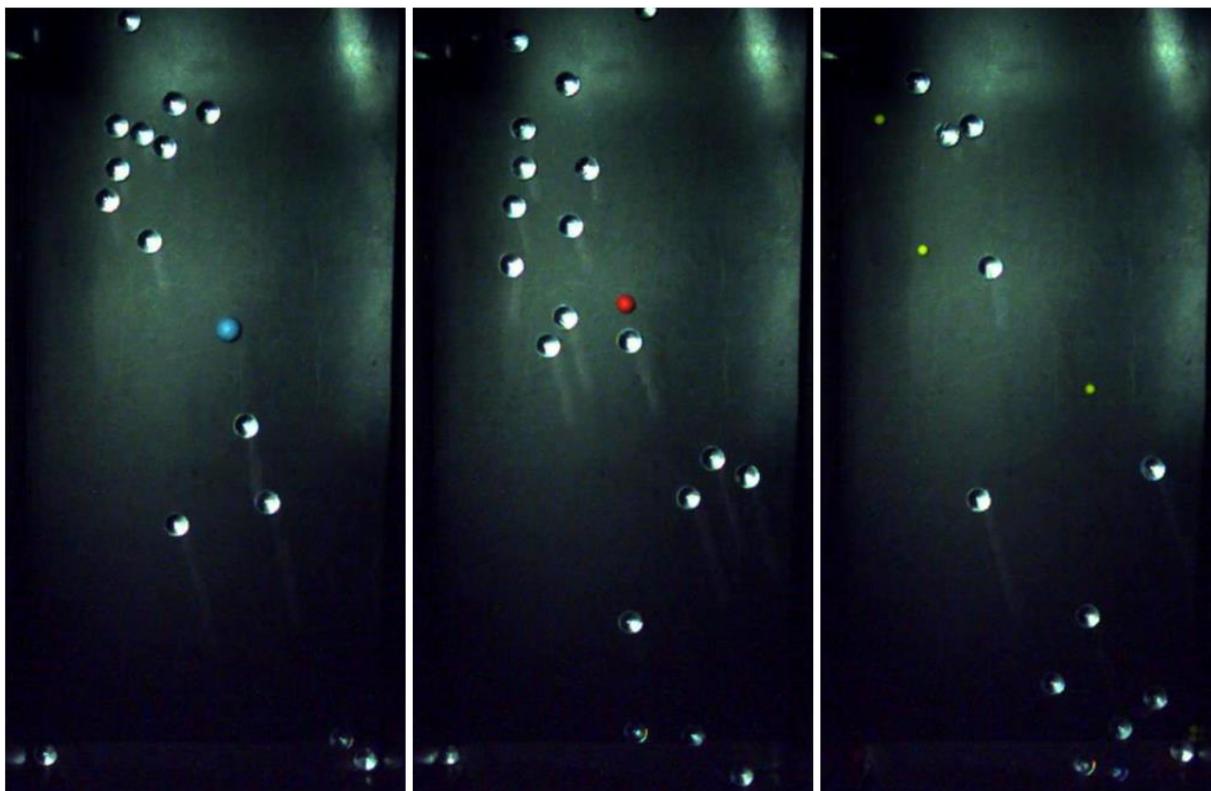


Abbildung 33: Tracerpartikel in den drei Größen beim Austritt aus dem Drehrohr

Die Verweilzeiten werden in Kapitel 5.1 für die Grundsüttung von 7 mm Kugeln exemplarisch dargestellt.

Geschwindigkeiten an der Schüttbettoberfläche

Zur Erfassung der Geschwindigkeit an der Schüttbettoberfläche wird ein PIV Sensor eingesetzt. Die Daten des Sensors werden dabei über eine Wireless LAN Verbindung an den Messrechner übertragen. Die Ausgabe des Sensors besteht aus einer Geschwindigkeitskomponente in X- und Y-Richtung.

Abbildung 34 stellt die Aufteilung des Drehrohres in Abständen von $22,5^\circ$ dar. Der erste Messpunkt befindet sich bei 135° . Nach der Erfassung der Geschwindigkeit dreht sich die Kamera jeweils um $22,5^\circ$ nach links. Nach der Aufnahme der Geschwindigkeit bei 270° fährt das Messmodul die vorgegebene Anzahl an Schritten entlang des Drehrohres zur nächsten Position. Anschließend dreht sich die Kamera in $22,5^\circ$ Schritten zurück nach rechts.

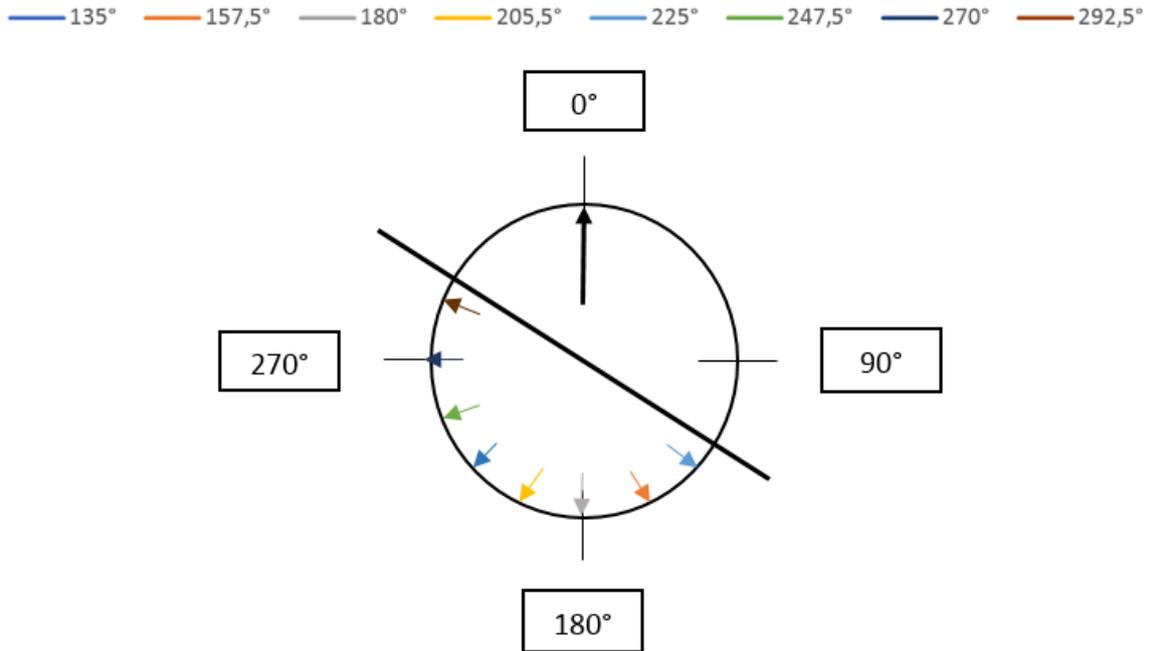


Abbildung 34: Aufnahmepunkte im Drehrohr

Das PIV Sensormodul ist in Abbildung 35 abgebildet. Der Strom wird dabei von handelsüblichen Batterien zur Verfügung gestellt. Zusätzlich besitzt der Sensor einen Ultraschall Entfernungsmesser, der aber erst ab 300mm Distanz zuverlässige Werte liefert und somit für den Gebrauch im Drehrohr keine Anwendung findet.

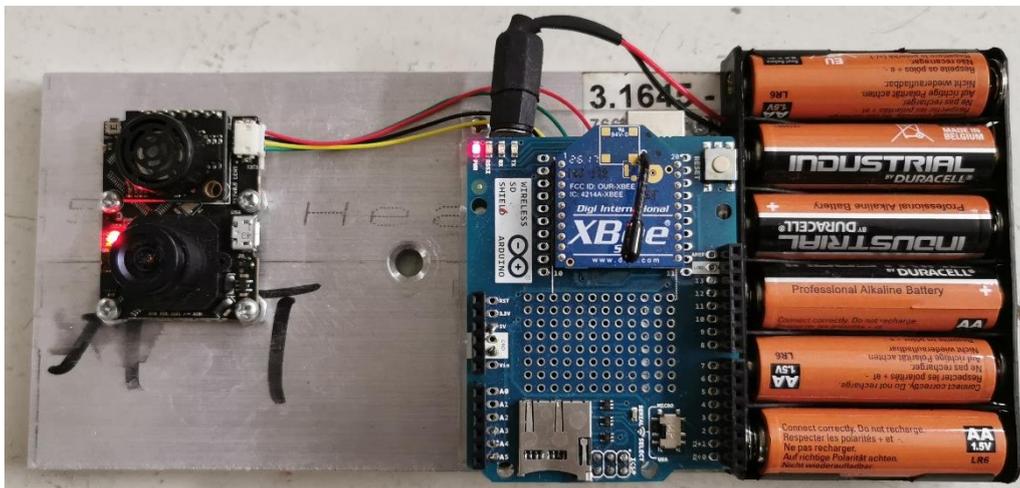


Abbildung 35: PIV-Sensor zur Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit an der Bettoberfläche

4.4.2 Untersuchung zum axialen Schüttguttransport mit gekoppeltem Wärmeeintrag über die freie Bettoberfläche (FS-1 AP3)

In Arbeitspaket 3 sollen die stationären Oberflächen- und Schichttemperaturen des Schüttbettes für verschiedene Parametereinstellungen gemessen werden.

Kleine Partikelschüttung

Dafür werden zunächst Testmessungen an kleinen Partikelschüttungen durchgeführt, da die Simulationen für große Partikelanzahlen entsprechend lange dauern.

Bei den hier durchgeführten Oberflächen- und Mittelpunkttemperaturmessung befinden sich die Kugelpartikel in einem quaderförmigen Behältnis aus Stahl, dessen Länge 100 mm, Breite 70 mm und Höhe 40 mm beträgt. Die Wandstärke des Behälters beträgt 2 mm. Zur Wärmeisolierung gegenüber der Umgebung wird das Behältnis mit den Kugelpartikeln auf einer 50 mm starken Styroporschicht platziert. In Abbildung 36 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

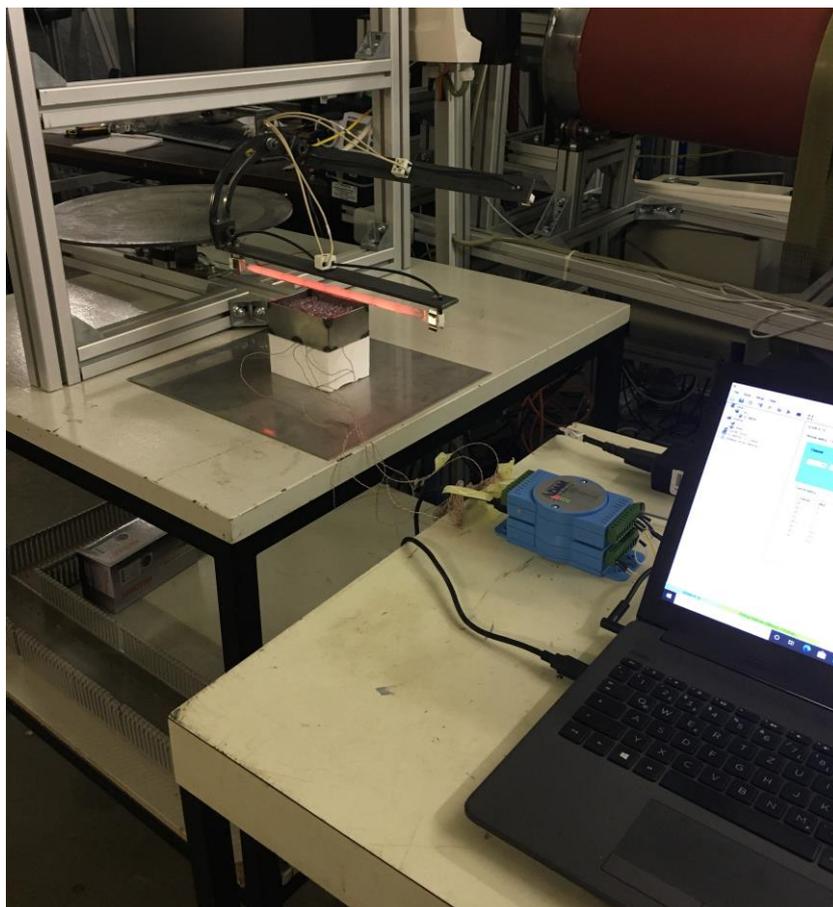


Abbildung 36: Versuchsaufbau für die Oberflächentemperaturmessungen

Die Schüttung besteht aus fünf Schichten, was einer Anzahl von ungefähr 800 Partikeln entspricht. In jeder Schicht befindet sich ein Partikel mit einem auf der Oberfläche platzierten bzw. durch eine Bohrung mit einem Durchmesser von 1 mm bis

zum Mittelpunkt der Kugeln eingeschoben Typ T Thermoelements. Die mit Thermoelementen bestückten Partikel sind mittig in einer Reihe, parallel zu den langen Seitenwänden des Behälters ausgerichtet. Außerdem sind die bestückten Partikel in einem Abstand von 15 mm zueinander angeordnet, wobei diese der Reihe nach jeweils eine Schicht tiefer angeordnet sind. Die Leitungen der Thermoelemente führen durch Bohrungen auf der Unterseite des Behälters aus der Schüttung heraus. Der Heizstrahler ist ebenfalls mittig und parallel zu den langen Seitenwänden ausgerichtet und besitzt einen Abstand von 20 mm zur Oberkante des Behälters.

Die Infrarotstrahler des Herstellers „Optron Infrared Systems“ besitzen eine Nennheizleistung von 1000 W bei einer Wechselspannung von 230 V. Die Glasumhüllung der Strahler ist mit einer 180° Reflektorschicht aus Keramik beschichtet und besitzt einen Durchmesser von 11 mm. Die Länge der Strahler beträgt 352 mm, wobei 272 mm der Gesamtlänge beheizt sind. Die mittlere Heizfadentemperatur des aus Wolfram bestehenden Glühfadens beträgt bei Nennleistung 1800 K. Die hierbei emittierte Wärmestrahlung besitzt einen Wellenlängenschwerpunkt von 1,6 μm .

Die Leitungen der einzelnen Thermoelemente sind mit einem „ADAM 4118“ Thermoelement Modul des Herstellers „Advantech“ verbunden. Hiermit werden die analogen Eingangssignale der Thermoelemente ausgewertet und in digitale Ausgangssignale umgewandelt.

Abbildung 36 zeigt die aufgezeichneten Datenpunkte der Oberflächentemperaturmessungen der einzelnen Schichten für eine Heizleistung von 500 W. Zu Vergleichszwecken mit dem nachfolgenden Versuch ist die Darstellung der Zeitachse auf 400 s und die Darstellung der Temperaturachse auf 120 °C begrenzt. Die Bezeichnung der Schichten erfolgt von unten nach oben. Demnach stellt die 1. Schicht die unterste und die 5. Schicht die oberste, freiliegende Schicht dar. Zu Beginn der Messreihe besitzen die Kugeln eine Temperatur von 25 °C.

Es ist erkennbar, dass sich die 5. Schicht deutlich schneller und intensiver als alle anderen Schichten erwärmt. Die Aufheizrate ist hierbei zu Beginn des Versuches am höchsten und flacht mit zunehmender Zeit kontinuierlich ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Temperaturdifferenz zwischen Heizstrahler und Kugeloberfläche zu Beginn der Messung am größten ist und mit zunehmender Zeit geringer wird und sich somit ein zunächst hoher jedoch mit der Zeit abfallender Wärmestrom an die Oberfläche ergibt.

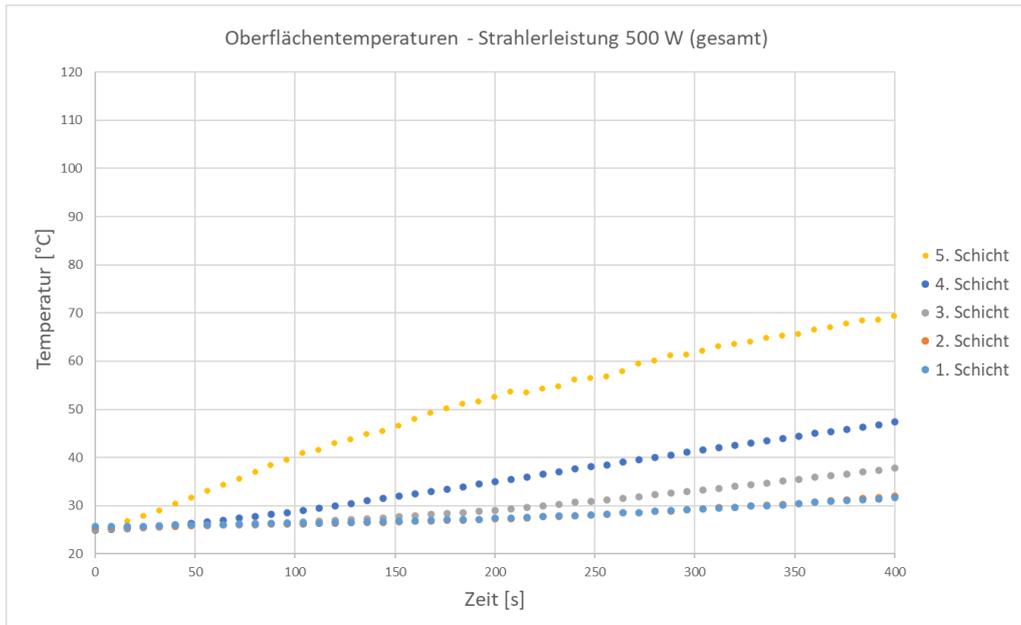


Abbildung 37: Oberflächentemperaturen bei einer Strahlerleistung von 500 W

Generell nehmen die gemittelten Aufheizraten der Schichten mit zunehmender Schichttiefe stetig ab, weshalb sich weiter oberliegende Schichten schneller und intensiver erwärmen als darunterliegende Schichten.

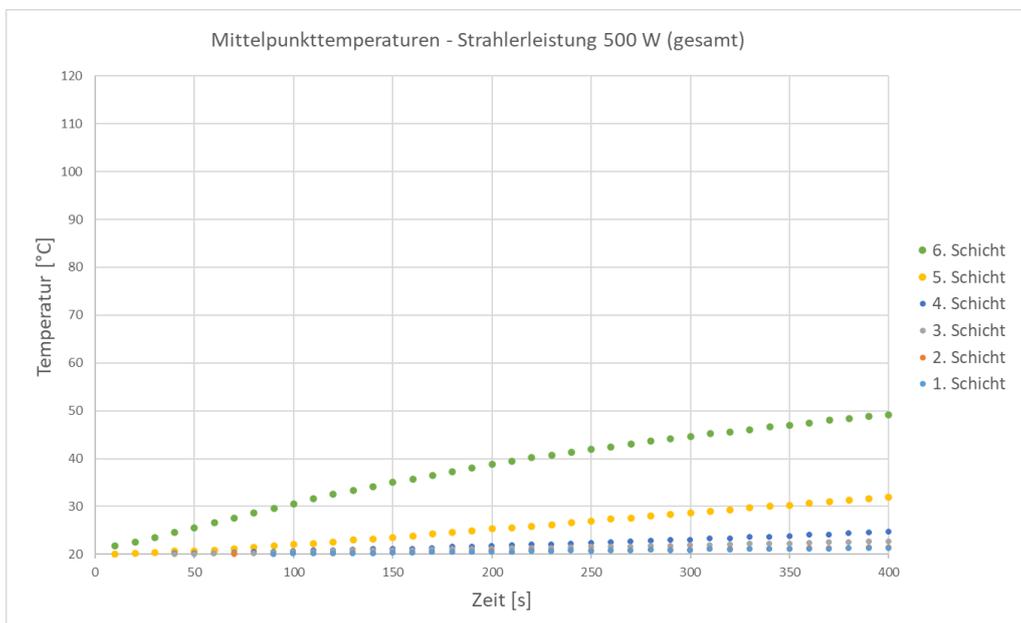


Abbildung 38: Mittelpunkttemperaturen bei einer Strahlerleistung von 500 W

Die Temperaturverläufe der Mittelpunkttemperaturen sind denen der Oberflächentemperaturen sehr ähnlich. Die Kurvenverläufe sind jedoch generell flacher, da die Wärme erst durch das Partikel geleitet werden muss. Auch in diesem

Versuch nehmen die mittleren Aufheizraten und die maximalen Schichttemperaturen mit zunehmender Schichttiefe ab. Es ist auch der zuvor beschriebene Unterschied des Kurvenverlaufes zwischen der obersten und den darunterliegenden Schichten zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass auch in diesem Versuch lediglich die oberste Schicht durch Wärmestrahlung erwärmt wird. Es bestätigt sich die auch beim Vorversuch beschriebene Tendenz, dass die Temperaturdifferenzen von benachbarten Schichten mit zunehmender Schichttiefe abnehmen

Für eine Heizleistung von 500 W ist demnach bei beiden Versuchen keine nennenswerte Transmission der Wärmestrahlung durch die Glaspartikel festzustellen.

Beheizte Drehrohrversuche

Die Einstellung eines stationären Prozesses erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird anhand der Drehrohrsteuerungssoftware ein annähernd stationärer Transportprozess eingestellt. Anschließend wird der Heizstrahler eingeschaltet und das System so lange aufgeheizt, bis sich näherungsweise thermodynamisch stationäre Bedingungen ergeben. Anschließend werden die Messungen der Oberflächen- und Schichttemperaturen durchgeführt.

Befindet sich der Transportprozess in einem stationären Zustand, kann der Wärmestrahler (nach der Messung der Schüttbetthöhe für die Berechnung des Fahrplans) eingeschoben und über den Leistungssteller eingeschaltet werden. Die Heizleistung wird hierbei über das Drehpotentiometer eingestellt und über das Leistungsmessgerät abgelesen. Die Heizleistung sinkt zunächst nach Einschalten des Strahlers aufgrund der Erwärmung, weshalb sie nachgestellt werden muss. Bei Heizleistungen ab 1000 W werden die Messtraverse und die Halterung des Strahlers sehr heiß. Es kommt zum Schmelzen der Kunststoffverbindungsstücke. Aus diesem Grund werden die Heizleistungen auf maximal 750 W begrenzt. Es ist nicht ohne Weiteres ersichtlich, wann sich das System in einem thermisch stationären Zustand befindet. Bei dieser Versuchsdurchführung wird die Austrittstemperatur der Partikel anhand einer zweiten Thermografiekamera (FLIR E6) so lange gemessen, bis diese annähernd konstant bleibt. Ab diesem Zeitpunkt wird von einem stationären Betriebszustand ausgegangen. Das Einschwingen des Systems benötigt zwischen 40 und 50 Minuten und ist abhängig von den gewählten Parametern.

Nach dem Einstellen von annähernd stationären Betriebsbedingungen werden die Oberflächen- und Schichttemperaturmessungen durchgeführt. Da der Heizstrahler für

die Strahlungstemperaturmessung aufgrund der Eigenstrahlung auch im ausgeschalteten Zustand eine große Störquelle darstellt, wird dieser für die Oberflächentemperaturmessungen entfernt. Durch das Entfernen des Strahlers würden bei weiterem Betrieb des Prüfstandes nicht beheizte Partikel durch das Drehrohr transportiert werden, welche die Messungen deutlich verfälschen würden. Aus diesem Grund wird der gesamte Prüfstand nach Entfernen des Strahlers gestoppt, sodass sich das Schüttbett unmittelbar zum Abschaltzeitpunkt noch in einem stationären Zustand befindet, sich jedoch nicht mehr bewegt. Dieser Zustand soll vermessen werden. Aufgrund der für die Vermessung benötigten Zeit kühlt die Schüttbettoberfläche jedoch ab, weshalb die aufgenommenen Messwerte rückwirkend korrigiert werden müssen. Dies geschieht anhand einer Abkühlungskurve eines sich an der Oberfläche befindlichen Partikels. Die Kurve wurde im Voraus durch eine Oberflächentemperaturmessung mittels Thermoelement aufgezeichnet. Das Partikel befand sich während der Messung mittig an der Oberfläche der Schüttung und wurde mit dem Heizstrahler erwärmt. Der Abkühlvorgang wurde hierbei aufgezeichnet. Aufgrund dieser Vorgehensweise wird zunächst die Schichttemperaturmessung, welche während des Betriebes durchgeführt werden kann, und anschließend die Oberflächentemperaturmessung durchgeführt.

Zur Vermessung der Schichttemperaturen werden die Messlanzen zunächst an der Messeinheit montiert und die mit den Thermoelementen verbundenen Konverter (ADAM Module) an den Messrechner angeschlossen (vgl. Abbildung 39). Außerdem wird der für die Steuerung der Messtraverse verwendete Arduino mit dem Messrechner verbunden und der entsprechende Fahrplan auf den Arduino geladen.

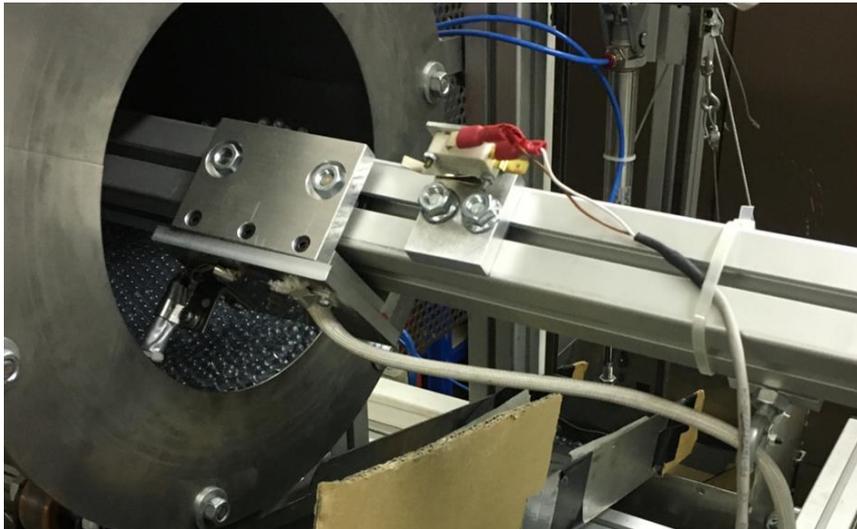


Abbildung 39: An der Messeinheit befestigte Messlanzen

Der Fahrplan ist für die Messlanzen immer derselbe und besitzt insgesamt 30 Positionen. Es werden für 10 z-Positionen jeweils drei φ -Positionen angefahren. Die z-Positionen erstrecken sich von 20 mm bis 1440 mm, wobei die Position $z=1440$ mm dem Beginn des beheizten Bereiches entspricht. Die φ -Positionen decken einen Bereich von -15° bis 70° ab. Die Verfahwege sind in φ - und z-Richtung konstant. Mit Hilfe des Endschalters auf der Traverse wird die minimale z-Position des Sensors entsprechend der minimalen z-Position des Fahrplans eingestellt. Anschließend wird die Software für die Messlanzensteuerung gestartet und über diese die Befehle zur Kalibrierung des Verfahweges und der Rotation gegeben. Nach Starten der Messreihe wird die Vermessung der Schichttemperaturen automatisiert durchgeführt. Für jede angefahrene Position werden für die entsprechenden Schichten fünf Einzelmessungen mit einem zeitlichen Abstand von jeweils einer Sekunde aufgezeichnet. Vor Beginn einer Messung an einer neuen Position wird zunächst sechs Sekunden gewartet, damit sich die Temperaturen der Sensoren den Temperaturen an der neuen Position anpassen können. Dies ist aufgrund der Trägheit des Messsystems erforderlich.

Für die anschließende Oberflächentemperaturmessung wird zunächst die Thermografiekamera mit dem Kabelaufroller auf der Messeinheit bzw. an der Traverse befestigt und mit dem Messrechner verbunden. Anschließend wird der zuvor berechnete Fahrplan auf den Arduino der Messtraverse geladen. Auch hier muss der Endschalter entsprechend der minimalen z-Position der Kamera angepasst werden. Darauf folgend wird die Steuerungssoftware der Thermografiekamera gestartet und eine Kalibrierung des Verfahweges und der Rotation durchgeführt. Da die

Vermessung im beheizten Bereich des Drehrohres beginnt und die Messeinheit eine gewisse Zeit benötigt, bis sie an der ersten Position angekommen ist, wird gleichzeitig zum Starten der Messreihe der Prüfstand gestoppt und der Heizstrahler entfernt. Die Vermessung der Schüttbetoberfläche erfolgt ebenfalls bis zum Beginn des beheizten Bereiches bei einer z-Position von 1440 mm. Je Position wird ein Bild aufgenommen und als Textdatei gespeichert. Die Kamera gibt hierbei die errechneten Temperaturwerte pro Pixel in Kelvin aus, welche in der gespeicherten Textdatei entsprechend zeilen- und spaltenweise angeordnet sind. Die Textdateien werden mit einem Zeitstempel versehen, sodass die zwischen den einzelnen Messungen vergangene Zeit im Nachhinein berechnet werden kann.

Bei der Oberflächentemperaturmessung der Partikel kommt es zwischen der Messung mit Thermoelementen und der Messung der Thermografiekamera zu einer erheblichen Messabweichung, die deutlich größer als die angegebene Messtoleranz der Kamera von ± 5 °C ist. Die Unterschiede der Messwerte lassen sich auch bei der Verwendung eines anderen, baugleichen Thermoelementes und der Verwendung der zuvor erwähnten FLIR E6 Kamera reproduzieren. Es wird angenommen, dass die mittels Thermoelement gemessene Temperatur aufgrund der deutlich geringeren Anzahl an Einflussparametern genauer ist und annähernd der tatsächlichen Oberflächentemperatur entspricht. Ein Grund für die Messabweichungen könnte sein, dass das detektierbare Wellenlängenspektrum der Kamera nicht an das Emissionsspektrum der Kalknatronglaspartikel angepasst ist. Um die mit der Thermografiekamera gemessenen Temperaturwerte an die der Thermoelemente anzupassen, wurde zuvor ein weiterer Versuch durchgeführt. Bei diesem Versuch wurde erneut eine mit einem Thermoelement bestückte Kugel in die Mitte des Schüttbettes im Einlassbereich des Drehrohres platziert. Das Schüttbett wurde erhitzt und der Abkühlungsvorgang anhand des Thermoelementes und der Thermografiekamera aufgezeichnet. Anhand der Messwerte der beiden Messverfahren werden die Temperaturwerte jedes Pixels nachträglich korrigiert. Für die Messwertaufnahme wird ein Emissionsgrad der Partikel von 0,92 und eine Umgebungstemperatur von 293,15 K festgelegt, da für diese Parameterkonfiguration die mit der Kamera gemessene Partikeltemperatur mit der gemessenen Thermoelementtemperatur bei Raumtemperatur übereinstimmt.

Der beschriebene Versuchsablauf wird unter anderem für die in Tabelle 4: Auflistung der durchgeführten Versuche aufgelisteten Parameterkonfigurationen durchgeführt.

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass der Stauscheibendurchmesser für keinen der Versuche variiert wurde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hauptsächlich das transversale Bewegungsverhalten des „Rolling Modes“ untersucht werden soll, da es für die praktische Anwendung die höchste Relevanz besitzt. Das Bewegungsverhalten ist hauptsächlich von der Froude-Zahl aber auch von dem Füllungsgrad des Drehrohres abhängig. Für die maximale Drehzahl von 7,5 U/min ist mit einem Stauscheibendurchmesser größer als 200 mm kein „Rolling Mode“ zu erzielen. Mit einem Durchmesser von 200 mm hingegen ist eine Mischform aus „Slumping“ und „Rolling“ erreichbar. Bei weiterer Verringerung des Stauscheibendurchmessers verändert sich die Bewegungsform zwar immer weiter in Richtung „Rolling“, jedoch steigt der Füllungsgrad so weit an, dass nicht ausreichend viele Partikel für den Betrieb des Prüfstandes vorhanden sind. Außerdem ist eine Vermessung des Schüttbettes aufgrund der Abmessungen der Messinstrumente nicht mehr möglich.

Tabelle 4: Auflistung der durchgeführten Versuche

Nr.	Neigungswinkel [°]	Drehzahl [U/min]	Durchsatz [g/s]	Innendurchmesser Stauscheibe [mm]	Heizleistung [W]
1	1	5	8	200	500
2	1	7,5	8	200	500
3	2	7	20	200	500
4	2	7	50	200	500
5	2	7	50	200	750

Da sich die durchgeführten Versuche untereinander im Wesentlichen nur durch die Änderung jeweils eines Parameters unterscheiden, soll im folgenden Kapitel der Einfluss der einzelnen Parametervariationen auf den Wärmeeintrag in das Schüttbett analysiert werden.

4.5 Versuchsdurchführung (FS2)

Auch wenn für alle experimentell ausgelegten Arbeitspakete die oben beschriebene Pilot-Drehrohranlage zum Einsatz kam, unterscheidet sich die Versuchsdurchführung maßgeblich, je nachdem in welcher Fahrweise gearbeitet wurde und welcher Prozess (Wärmeeintrag, Trocknung oder Reaktion) untersucht wurde.

4.5.1 Untersuchung des Wärmeeintrags im kontinuierlichen Betrieb (FS-2 AP1)

Für die Untersuchung des Wärmeeintrags kamen Glaskugeln, Quarzsand und Blähton zum Einsatz. Das benötigte Material wurde mit dem Hallenkran auf die Ebene des Zuförderers gebracht und das Rohr zur Befüllung des Ofens wurde angebracht. Der Neigungswinkel wurde justiert und am Bedienfeld wurde die Rotationsgeschwindigkeit eingestellt. Der leere Ofen wurde dann mit maximaler Heizrate auf die Heiztemperatur erwärmt und Kamera sowie Scheinwerfer wurden vor dem Auslauf des Rohres positioniert. Dann wurde zeitgleich die Zuförderung mit definiertem Massenstrom und die Mess- und Videoaufzeichnung gestartet. Abbildung 35 zeigt einen Blick in den Pilot-Drehrohrföfen während der Untersuchung des Wärmeeintrags bei der Verwendung von Glaskugeln als Versuchsmaterial.



Abbildung 40: Blick ins Innere des Pilot-Drehrohrföfens während kontinuierlicher Versuchsdurchführung

Von hinten gelangen die Glaskugeln durch ein angebrachtes Rohr (1) in den Drehrohrföfen, wo sie ein Schüttbett ausbilden (2). Am Strebenprofil (3) sind Stahllineale (4) sowie Präzisionsröhrchen (5) befestigt, durch welche Thermoelemente (6) gesteckt sind.

Je nach verwendetem Material sowie eingestellter Parameterkombination wurde eine unterschiedliche Zeit benötigt, bis sich eine stationäre Fahrweise eingestellt hatte. Hierbei muss sich sowohl ein stationäres Schüttbett ausgebildet haben als auch eine gleichmäßige Temperaturverteilung im gesamten Prozessraum vorherrschen. Tabelle 4 zeigt alle variierten Parameter für Arbeitspaket 1.

Tabelle 5: Parametervariation bei FS-2 AP1.

Parameter	
Versuchsmaterial	Glaskugeln / Quarzsand
Partikeldurchmesser d_p	0,2 / 0,7 / 2 / 4 mm
Dispersität	monodispers / bidispers / polydispers
Massenstrom des Materials \dot{M}	50 / 100 / 200 / 300 kg/h
Heiztemperatur T_{Heiz}	350 °C
Neigungswinkel β	0,5 / 1 / 2 / 3 / 4 °
Rotationsgeschwindigkeit n	0,5 / 1 / 2 / 3 / 4 / 5 rpm

4.5.2 Untersuchung der Trocknung von Blähton, transversal (FS-2 AP2)

Bei der Untersuchung der Trocknung von Blähton im Batch-Prozess, wurde das Material zunächst befeuchtet, siehe Abbildung 36. Dazu wurde der Blähton in eigens angefertigte Gitterbehälter mit einer Maschenweite von 0,5 mm gefüllt und in ein Wasserbecken gestellt. In diesem Wasserbad verblieb das Material für einige Stunden, bevor es aus dem Wasserbad entnommen und der Gitterbehälter mit dem Material so aufgestellt wurde, dass überschüssiges Wasser abtropfen konnte. Zusätzlich sollte das Material etwas antrocknen, damit nur wenig Wasser zwischen den Partikeln vorhanden ist.



Abbildung 41: Befeuchtung des Blähtons im Gitterbehälter; trockener Blähton (links), Blähton im Wasserbad (mitte) und abtropfender Blähton (rechts)

Aufgrund der vorherrschenden klimatischen Bedingungen dauerte dieser Prozess unterschiedlich lang und eine absolut einheitliche Grundfeuchte des Materials konnte nicht gewährleistet werden. Die Ausgangsfeuchte wurde jedoch gemessen sodass die Trocknungskurve normiert werden kann, worauf zu späterer Stelle noch genauer eingegangen wird.

Das auf diese Weise befeuchtete Material wurde dann entsprechend des vorgegebenen Füllungsgrades in den leeren, waagrecht ausgerichteten Pilotdrehrohrofen eingefüllt und der vordere Auslass wurde mit einer Gaze mit Maschenweite 0,4 mm verschlossen. Dies ermöglichte einen Luftstrom, sodass die Feuchte ausgetragen werden konnte, verhinderte jedoch das Herausfallen der Partikel. Die Hinterseite des Ofens hat eine Verengung bis auf einen Durchmesser von 15 cm, sodass von dort mit einem kleinen Behälter, der an einer langen Stange befestigt ist Proben aus der Mitte des Ofens entnommen werden konnten, siehe Abbildung 37.



Abbildung 42: Probenbehälter (oben) und Stange zur Probeentnahme (unten)

Nun wurden Drehzahl und Beheizung sowie die Messaufzeichnung gestartet. In einem Zeitintervall von 10 Minuten wurden wie beschrieben Proben aus dem Ofen entnommen und in dichte Probebehälter gefüllt. Auf diese Weise wurde das Material vollständig getrocknet und im Anschluss wurden die Proben mit einer Thermogravimetrie auf dessen Feuchtegehalt untersucht.

Folgende Parameter wurden innerhalb dieses Arbeitspakets untersucht, siehe Tabelle 5.

Tabelle 6: Parametervariation bei FS-2 AP2

Parameter	
Versuchsmaterial	Blähton
Partikeldurchmesser d_p	1-3 / 3-5 / 5-8 mm
Dispersität	Polydispers
Füllungsgrad f_D	5 / 10 / 15 / 20 %
Heiztemperatur T_{Heiz}	350 °C
Neigungswinkel β	0 °
Rotationsgeschwindigkeit n	1 / 2 / 3 / 4 / 5 rpm

4.5.3 Untersuchung der Zersetzung von Dolomit (FS-2 AP3)

Das Reaktionsverhalten des Dolomits wurde mit Hilfe eines Rohrofens analysiert, dessen prinzipieller Aufbau in Abbildung 38 dargestellt ist.

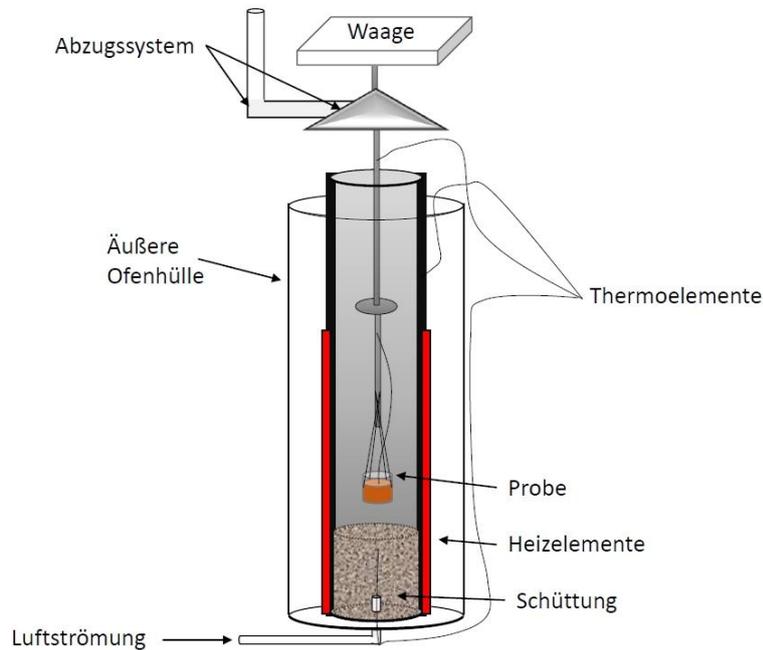


Abbildung 43: Rohrofen zur Analyse des Reaktionsverhaltens von Dolomit

Der Rohrofen besteht aus einem Metallrohr, welches eine Länge von 120 cm und einen inneren Durchmesser von 8 cm hat. Über elektrische Heizsegmente kann das Rohr von außen bis zu einer Temperatur von 1200 °C beheizt werden. Um Wärmeverluste nach außen zu minimieren befindet sich eine äußere Ofenhülle aus Dämmmaterial außerhalb der Heizsegmente. Von unten können Luft oder Gase in den Rohrofen eingeleitet werden, welches sich durch die Schüttung im unteren Teil homogen verteilt. Oberhalb des Ofens kann eine Feinwaage positioniert werden, an welche von unten die zu untersuchende Probe angehängt werden kann. Sensitive Thermoelemente des Typs K mit einem Durchmesser von 0,5 mm sind im Kern der Probe, an der Ofenwand und in der Gasströmung positioniert um die Temperaturen messen zu können. Oberhalb des Rohrofens stellt ein Abzug sicher, dass die Abluft nicht in die Versuchshalle strömt.

Vor Beginn des Versuchs wird zunächst die zu untersuchende Probe vorbereitet. Wurde ein großes Gesteinsstück untersucht, wurde in dieses ein dünnes Loch gebohrt, in welches ein Thermoelement zur Messung der Kerntemperatur geführt werden kann. Wurde eine Schüttung untersucht, wurde das Material in einen porösen Metallbehälter

gefüllt und ein Thermoelement mittig in die Schüttung geführt. Die so vorbereitete Probe wird dann an die Waage angehängt und mittig im Rohrofen positioniert, sodass die Probe keinen Kontakt mit den Wänden des Rohrofens hat. Die Waage wird nun genullt und die Heizrate und Heiztemperatur können eingestellt werden. Die Luft bzw. Gasströmung kann über eine Messstrecke eingestellt werden.

Die Messung der Temperaturen sowie des Masseverlusts wird über das Programm „DIAdem“ gestartet und die Messwerte werden alle 5 Sekunden abgespeichert. Nach abgeschlossenem Versuch wird die Beheizung ausgeschaltet und der Ofen kühlt sich ab, bevor die Probe entnommen werden kann.

4.5.4 Untersuchung der Trocknung mit axialem Transport (FS-2 AP4)

Bei der Trocknung des Blähtons während der axialen Schüttgutbewegung setzte sich die Versuchsdurchführung aus Aufgaben der Arbeitspakete 1 und 2 zusammen. Im Vorfeld des eigentlichen Versuchs wurde das Material auf dieselbe Weise befeuchtet, wie im Arbeitspaket 2. Nachfolgend wurde das Material jedoch nicht direkt in den Drehrohrofen gefüllt, sondern mit Hilfe des Hallenkrans auf die erhöhte Plattform befördert, auf welcher sich der Zuförderer befindet, siehe Abbildung 39.

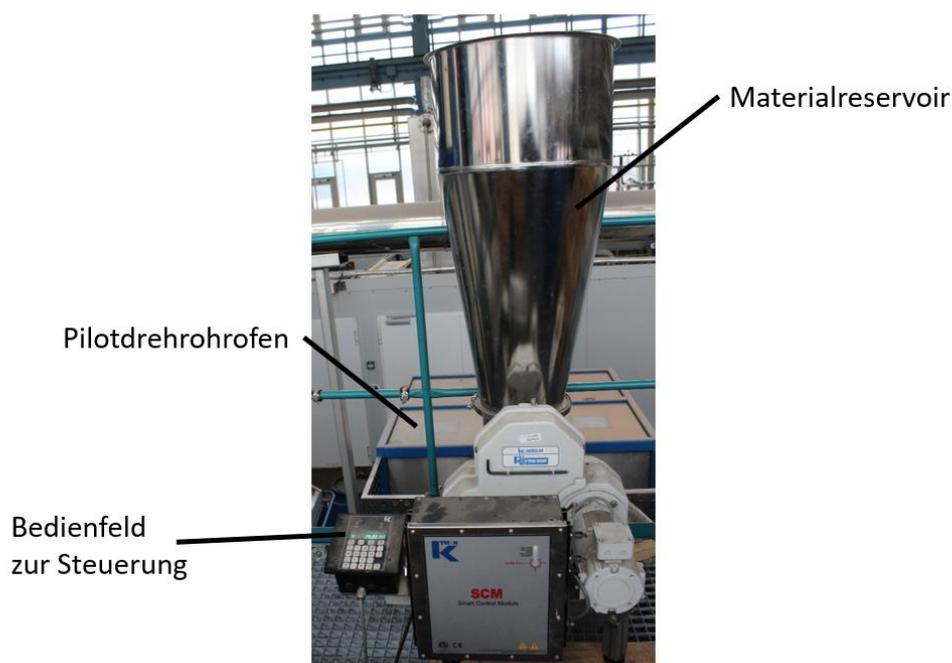


Abbildung 44: Zuförderer auf der Plattform oberhalb des Pilotdrehrohrofens

Die Beheizung des leeren, rotierenden Ofens sowie die Video- und Temperaturlaufzeichnung wurde analog zu Arbeitspaket 1 gestartet. Nach Erwärmung des Ofens wurde die Zuförderung mit konstantem Massenstrom gestartet, sodass es im Ofen zur Ausbildung eines Schüttbetts kam. Sobald eine stationäre Fahrweise (gleichbleibende Schüttbetthöhe und Temperaturen) im Drehrohr erreicht war, wurden nun wieder Materialproben aus der Schüttung mit Hilfe des Metallbehälters aufgefangen. Diesmal wurde das Material nicht nur an der mittleren axialen Position, sondern an allen fünf axialen Messpositionen entnommen.

Danach wurde der Versuch beendet indem die Zuförderung unterbrochen und die Beheizung ausgeschaltet wurde. Der Ofen wurde dann rotiert, bis das gesamte Material den Ofen verlassen hatte und der Ofen somit leergefahren war.

Tabelle 6 zeigt die verschiedenen Parameter für Arbeitspaket 4.

Tabelle 7: Parametervariation bei FS-2 AP4

Parameter	
Versuchsmaterial	Blähton
Partikeldurchmesser d_p	1-3 / 3-5 / 5-8 mm
Dispersität	Polydispers
Massenstrom des Materials \dot{M}	50 / 100 / 150 / 200 kg/h
Heiztemperatur T_{Heiz}	110 / 150 / 200 / 250 / 350 °C
Neigungswinkel β	0,5 / 1 / 1,5 / 2 / 2,5 °
Rotationsgeschwindigkeit n	1 / 2 / 3 / 4 / 5 rpm

4.5.5 Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Dolomit (FS-2 AP5)

Es wird dabei eine Drehrohrtrommel aus Edelstahl verwendet, die einen Durchmesser von $D_T = 0,5 \text{ m}$ und eine Länge von $L_T = 0,15 \text{ cm}$ hat. Sie stellt auf diese Weise ein Segment des Drehrohrofens dar. Die Achse der Drehrohrtrommel wird horizontal zum Boden ausgerichtet, so dass sich ein gleichmäßiges axiales Schüttbettprofil ausbildet. Die Trommel wird mit der Rückseite an einem Antrieb befestigt, welcher über einen Frequenzumrichter angetrieben werden kann. Die Vorderseite der Drehrohrtrommel wurde mit einer Glasscheibe verschlossen, sodass die transversale Materialbewegung von außen erkennbar ist. Eine Kamera wurde so aufgestellt, dass sie zentral auf die Mitte der Drehrohrtrommel ausgerichtet ist um das transversale Bewegungsverhalten aufzeichnen zu können. Zur Beleuchtung wurde ein weißes Lichtzelt um die Drehrohrtrommel aufgestellt. Dieses wurde von zwei dimmbaren Videoleuchten der Firma Menik beleuchtet um eine gleichmäßige, indirekte Beleuchtung zu gewährleisten, siehe Abbildung 40.



Abbildung 45: Apparativer Aufbau der Versuchsanlage zur Untersuchung der transversalen Bewegung

Während der Versuche wurde zunächst entsprechend des Füllungsgrads Material in die Trommel gefüllt, diese mit der Glasscheibe verschlossen und dann am Motor fixiert. Am Frequenzumrichter wurde nachfolgend die Rotationsgeschwindigkeit eingestellt. Die Videoaufzeichnung wurde dann für wenige Minuten durchgeführt. Über eine Verschießbare Öffnung am Mantel der Trommel konnte weiteres Material zugeführt werden um den Füllungsgrad schrittweise zu erhöhen ohne die Trommel vom Motor zu lösen. Auf diese Weise wurden die verschiedenen Partikelgrößenklassen von Glaskugeln, feuchtem und trockenem Blähton, sowie ursprünglicher und zersetzter Dolomit untersucht.

4.6 Versuchsauswertung (FS2)

4.6.1 Analyse der Schüttbetthöhe

Das sich ausbildende axiale Schüttbetthprofil ist abhängig vom verwendeten Material, der Geometrie des Drehrohrofens sowie der Fahrweise des Drehrohrofens. Da der Wärmeübergang an das thermisch zu behandelnde Schüttgut davon abhängt, wie viel Material sich im Querschnitt des Drehrohrofens befindet, ist die Kenntnis darüber von entscheidender Bedeutung um eine Bilanzierung der Wärmeströme durchführen zu können. Je nach eingestellten Parametern und Versuchsmaterialien benötigte die Ausbildung des Schüttbetts eine gewisse Zeit, bis dieses stationär war. Es wurden hauptsächlich die stationären Schüttbetthprofile dargestellt. Bei der Untersuchung der Verweilzeit wurden auch Versuche durchgeführt, in denen die Ausbildung der Schüttbetthöhen an den unterschiedlichen Positionen in Abhängigkeit der Zeit ermittelt wurde.

Dazu wurden jeweils die aufgezeichneten Videos ausgewertet. Mit dem Drehrohr mitrotierende Stahllineale, die sich an den fünf axialen Positionen befinden, tauchen während der Rotation in das Schüttbett ein und verlassen dieses wieder. Wenn sich das Stahllineal maximal tief im Schüttbett befindet, kann die Schüttbetthöhe direkt abgelesen bzw. mit Hilfe des Grafikprogramms ImageJ ermittelt werden, siehe Abbildung 41.



Abbildung 46: Schüttbetthöhenmessung durch Ablesen

Dazu konnte aus dem Video genau die Stelle bestimmt werden, an der die Stahllineale am tiefsten in das Schüttbett eingetaucht sind. Über das Ablesen der Millimeterzahl auf dem Stahllineal erhält man direkt die Schüttbetthöhe für alle fünf Positionen. Bei staubigen Materialien, oder wenn die Stahllineale verschmutzt waren und ein direktes Ablesen nicht möglich war, konnte über eine Messung der Länge des noch sichtbaren Teils des Stahllineals und vergleichen mit der maximal sichtbaren Länge die Schüttbetthöhe berechnet werden, siehe Abbildung 42.

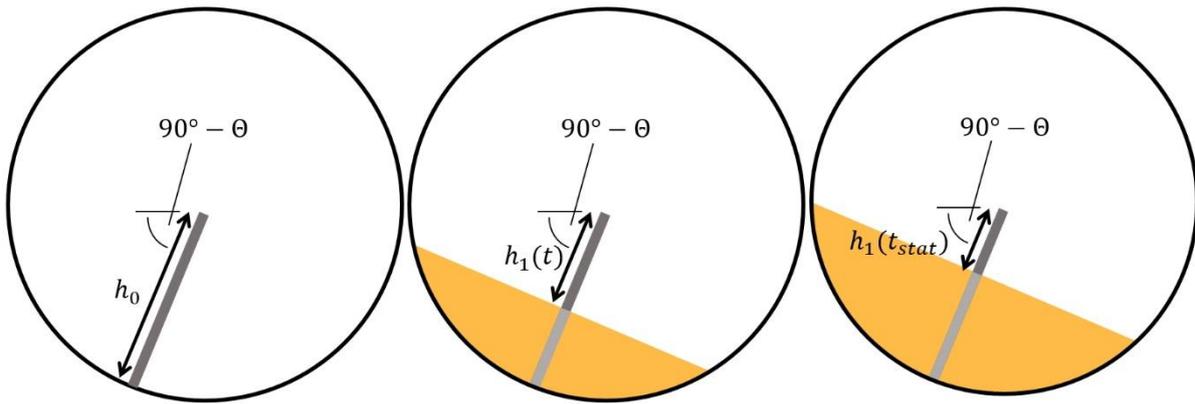


Abbildung 47: Schüttbetthöhenmessung mit Grafikprogramm

Dazu wird die Anzahl der Pixel des gesamten Stahllineals (siehe Abbildung 42, links) mit Hilfe von ImageJ gemessen und mit der tatsächlichen Länge des Stahllineals verknüpft. Misst man dann zu einem späteren Zeitpunkt (siehe Abbildung 42, Mitte) oder im stationären Zustand (siehe Abbildung 42, rechts) den noch sichtbaren Teil des Stahllineals, kann man die tatsächliche Länge und die Schüttbetthöhe berechnen. Man erhält zunächst die Schüttbetthöhe in Pixeln

$$H_{Bett} = H_0 - H_1 \quad (42)$$

aus der Gesamtlänge des Stahllineals H_0 in Pixeln und dem noch sichtbaren Teil des Stahllineals H_1 in Pixeln. Und kann dann über das Verhältnis der tatsächlichen Länge des Stahllineals h_0 zur gemessenen Länge des Stahllineals H_0 in Pixeln die tatsächliche Schüttbetthöhe

$$h_{Bett} = \frac{h_0}{H_0} H_{Bett} \quad (43)$$

aus der gemessenen Schüttbetthöhe in Pixeln ermitteln.

Als finale Berechnungsgleichung ergibt sich

$$h_{Bett} = h_0 \left(1 - \frac{H_1}{H_0} \right). \quad (44)$$

Diese Werte werden in einer .csv-Datei abgespeichert, welche nachfolgend von einer MatLab-Auswertoutine eingelesen wird.

Aus der ermittelten Schüttbetthöhe, kann nun der Füllungsgrad berechnet werden.

$$f_d = \frac{A_{Schüttung}}{A_{Querschnitt}} = \frac{\arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) - (r - h) \cdot \sqrt{2rh - h^2}}{\pi} \quad (45)$$

Über den Schüttwinkel und den Füllungsgrad ist die Lage des Schüttbetts eindeutig definiert, siehe Abbildung 43.

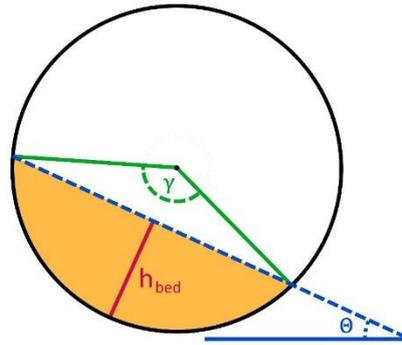


Abbildung 48: Schüttbetthöhe und dynamischer Schüttwinkel definieren eindeutig die Position der Schüttung im Drehrohr

Über die Kenntnis der Position im Schüttbett können anschließend die aufgezeichneten Temperaturen dem Schüttbett bzw. der Luft zugeordnet werden.

Schüttbetthöhenprofil

In Abbildung 44 sind die aus der Videoaufzeichnung ermittelten Schüttbetthöhen an den verschiedenen axialen Positionen dargestellt.

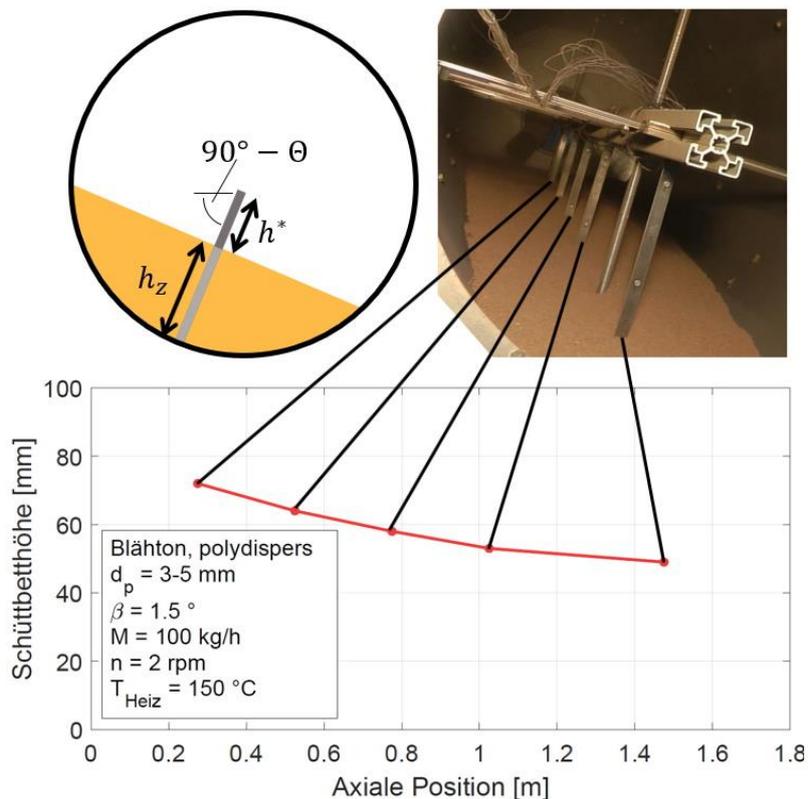


Abbildung 49: Exemplarisches Schüttbetthöhenprofil

Füllungsgradprofil

Häufig ist auch die Darstellung des Füllungsgrades über der axialen Länge vorteilhaft, siehe Abbildung 45, da dies leicht mit industriell relevanten Füllungsgradprofilen verglichen werden kann.

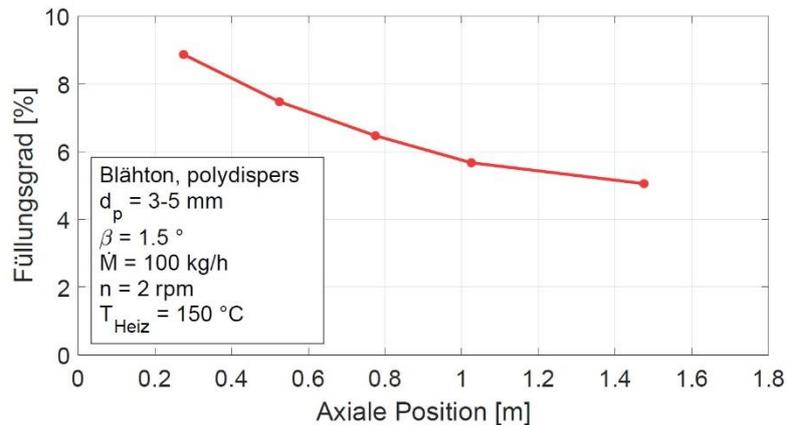


Abbildung 50: Exemplarisches Füllungsgradprofil

4.6.2 Analyse des Schüttwinkels

Die während der Versuche aufgezeichneten Videos wurden nachfolgend ausgewertet. Dazu wurden mit Hilfe des VLC-Players von jedem Video drei Schnappschüsse zu verschiedenen Versuchszeiten gemacht und als *.jpg Datei abgespeichert. Mit dem Grafikprogramm ImageJ konnte dann von jedem Bild der dynamische Schüttwinkel bestimmt werden, siehe Abbildung 46.

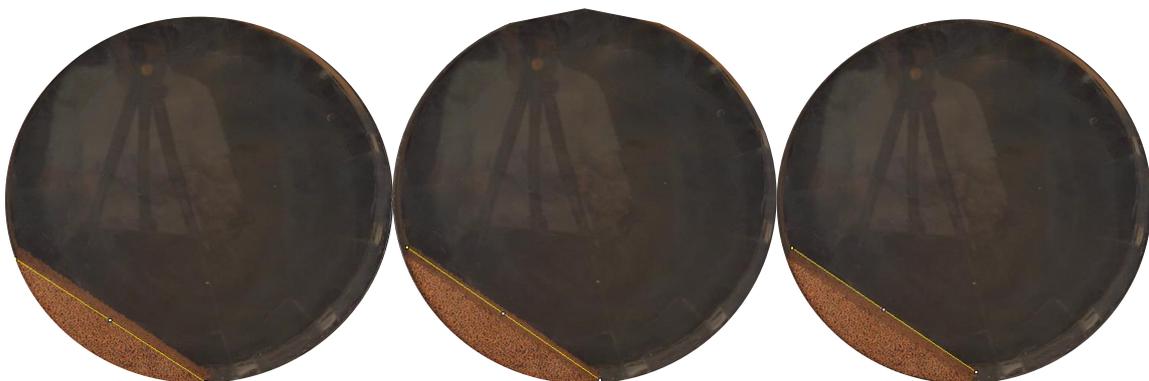


Abbildung 51: Messung des dynamischen Schüttwinkels mit Hilfe des Grafikprogramms ImageJ

Durch die Tiefe der Trommel ist eine Messung des Schüttwinkels vorn an der Glasscheibe (Abbildung 46, links), in der Mitte der Schüttung (Abbildung 46, Mitte) und hinten an der Trommelwand (Abbildung 46, rechts) möglich.

4.6.3 Analyse der Temperaturverteilung

Die Temperaturen werden mit Hilfe eines dafür entwickelten Programms abgespeichert. Dieses erstellt eine *.txt-Datei, die aus mehreren Spalten und Zeilen besteht, siehe Abbildung 47.

Datei	Bearbeiten	Format	Ansicht	?																													
0.30	115.3	42.81	25.4	97.8	125.1	122.2	119.3	115.3	279.6	172.0	148.6	...																					
0.68	119.5	43.20	25.4	97.8	123.2	121.2	120.2	115.3	277.6	168.1	146.6	...																					
1.05	123.7	43.58	25.4	97.8	120.2	118.3	119.3	117.3	276.6	167.2	144.7	...																					
1.43	128.0	43.96	25.4	96.8	118.3	115.3	118.3	118.3	276.6	163.2	142.7	...																					
1.81	132.2	44.34	25.4	96.8	115.3	113.4	117.3	121.2	276.6	162.3	140.8	...																					
2.19	136.4	44.72	25.4	96.8	115.3	111.4	115.3	120.2	275.7	161.3	136.9	...																					
2.57	140.7	45.10	25.4	97.8	113.4	109.5	114.4	119.3	275.7	159.3	132.9	...																					
2.95	144.9	45.48	25.4	96.8	110.5	108.5	112.4	118.3	275.7	156.4	130.0	...																					
3.33	149.1	45.86	25.4	97.8	107.5	106.5	110.5	116.3	274.7	154.4	126.1	...																					
3.71	153.4	46.25	25.4	97.8	105.6	105.6	109.5	117.3	273.7	152.5	124.1	...																					
4.09	157.6	46.63	25.4	97.8	104.6	104.6	109.5	119.3	272.7	150.5	122.2	...																					
4.47	161.8	47.01	25.4	96.8	101.7	103.6	107.5	119.3	271.7	148.6	120.2	...																					
.																					
.																					
.																					

Abbildung 52: Aufbau der .txt-Datei zur Speicherung der Messwerte.

Die erste Spalte beinhaltet die Versuchszeit in s, die bei Versuchsbeginn mit 0 startet und sich dann zeilenweise um 0,38 s erhöht. Dies entspricht dem Zeitintervall, nach welchem die Temperaturen jeweils erfasst werden. In der zweiten Spalte wird ein Zeitstempel aufgezeichnet, der während der Rotation des Drehrohrs hochzählt, bis der Sensor den Magnet an der 3-Uhr Position passiert und der Timer auf null zurückgesetzt wird. Aus der Timerzeit wird dann automatisch der Umfangswinkel φ ermittelt, der in der dritten Spalte gespeichert wird. Das Koordinatensystem ist dabei so definiert, dass sich 0° an der 9-Uhr-Position befindet, wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, vgl. Abbildung 25. Spalte 4 beinhaltet die Temperatur in der Messbox, weshalb die Temperatur zu Beginn des Versuchs als Umgebungstemperatur herangezogen werden kann. Ab Spalte 4 bis Spalte 35 sind die gemessenen Temperaturen der 31 verwendeten Thermoelemente aufgezeichnet. Die Zuordnung der Thermoelemente, kann Abbildung 48 entnommen werden.

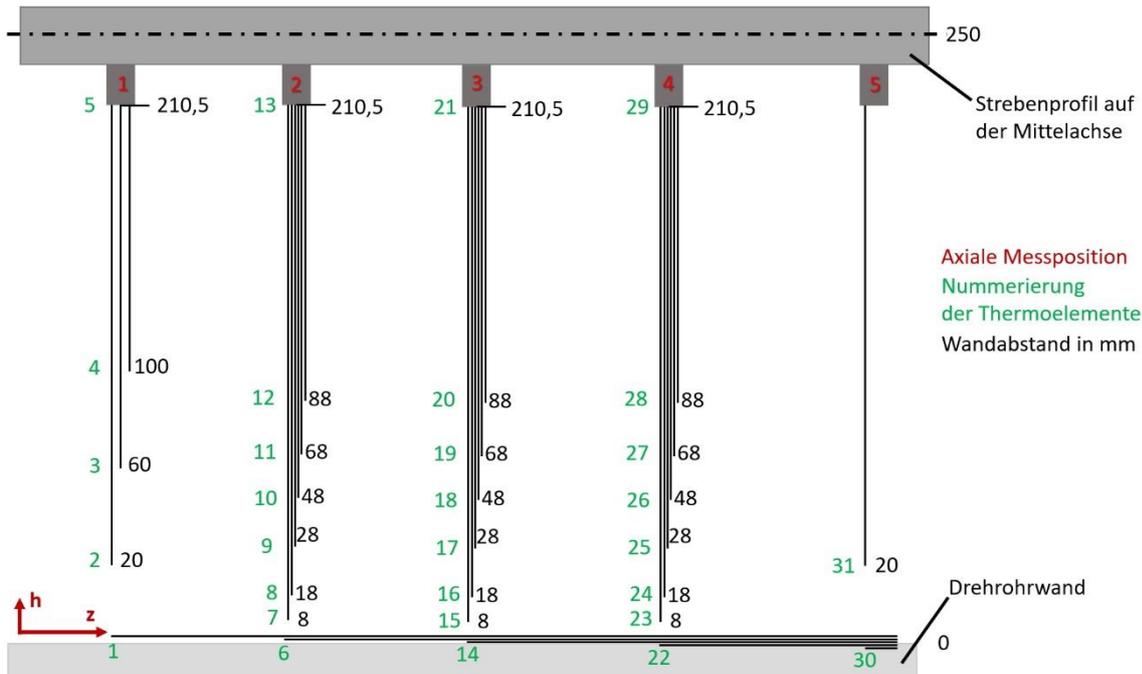


Abbildung 53: Anordnung der Thermoelemente und zugehörige Wandabstände im Längsschnitt

Dargestellt ist das Strebenprofil, an welchem Präzisionsröhrchen mit unterschiedlicher Länge befestigt sind. Über diese Röhrchen werden die Thermoelemente zu unterschiedlichen Wandabständen geführt. Außerdem sind die Thermoelemente 1, 6, 14, 22 und 30 an der Wandoberfläche im Ofen befestigt.

Mit Hilfe von MatLab wurde eine automatisierte Auswerteroutine entwickelt, die die *.txt-Datei einliest und alle Daten in einer Matrix abspeichert. Über gezieltes Zugreifen auf die verschiedenen Spalten können Temperaturprofile erstellt werden.

Essenziell für die Darstellung der Temperaturprofile ist außerdem die Zuordnung der gemessenen Temperaturen; je nachdem, ob es sich um eine Gas-, Wand- oder Schüttbetttemperatur handelt. Dazu werden die Temperaturen entsprechend deren Position im Drehrohr und der gemessenen Schüttbetthöhe eingeteilt und es werden aus diesen Temperaturen mittlere Werte für Gas-, Schüttbett und Wandtemperaturen für jede Umdrehung berechnet.

Transversales Temperaturprofil

Das transversale Temperaturprofil kann während der Aufheizung, Trocknung bzw. Zersetzung zu einem bestimmten Zeitpunkt erstellt werden. Dabei werden alle 5 axialen Positionen separat während einer vollen Umdrehung des Drehrohrs betrachtet. Es wird also die Temperatur über dem Umfangswinkel φ dargestellt. Zusätzlich wird die im vorherigen Schritt ermittelte Schüttbetthöhe angegeben, damit ersichtlich ist,

welche Thermoelemente während der Rotation in das Schüttbett eintauchen und welche Thermoelemente kontinuierlich die Gastemperatur messen.

Axiales Temperaturprofil

Im axialen Temperaturprofil sollen Wand-, Schüttbett- und Gastemperaturen zu einem Zeitpunkt über der axialen Position im Drehrohr aufgetragen werden. Diese Darstellung eignet sich vor allem für die kontinuierlichen Versuche, bei denen das Material mit Umgebungstemperatur aufgegeben wird und von den heißen Wandflächen erwärmt wird. In diesen Fällen wurde zusätzlich die Eintritts- und Austrittstemperatur des Materials gemessen, in MatLab eingelesen und weiterverarbeitet.

Hierbei berechnet MatLab zunächst, ob die jeweils aufgezeichnete Temperatur eine Gas- oder eine Schüttbetttemperatur ist, indem Schüttbetthöhe sowie dynamischer Schüttwinkel verwendet werden um zu prüfen, ob der zugehörige Umfangswinkel bei entsprechendem Wandabstand des Thermoelements innerhalb des Schüttbetts liegt, oder nicht, siehe Abbildung 49.

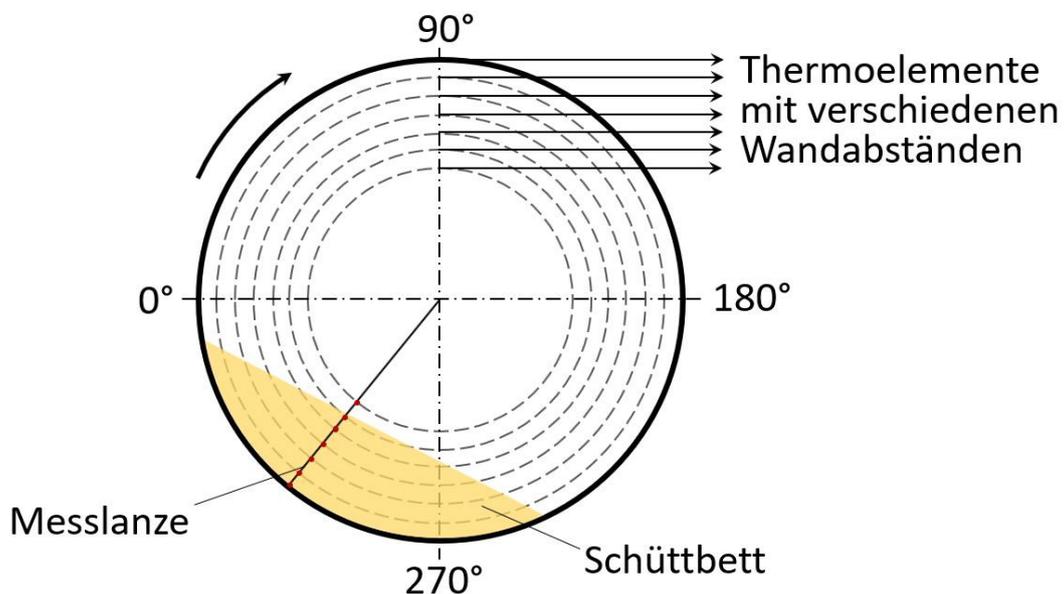


Abbildung 54: Anordnung der Thermoelemente und zugehörige Wandabstände im Querschnitt

Für jede axiale Position wird dann eine mittlere Luft- sowie Schüttbetttemperatur berechnet und über der Länge z des Drehrohrs dargestellt.

Zeitliches Temperaturprofil

Im zeitlichen Temperaturprofil soll die Temperaturänderung von Wand, Schüttbett und Gas mit der Versuchszeit verdeutlicht werden. Dies ist vor allem für Versuche sinnvoll, die im Batch-Betrieb durchgeführt wurden. Es ist außerdem vorteilhaft, Temperaturprofile von Versuchen mit feuchtem und trockenem Material zu vergleichen um den Einfluss des Trocknungsprozesses einschätzen zu können. Hierbei wird immer der an der mittleren Drehrohrposition ermittelte Temperaturverlauf dargestellt.

Wie zuvor für das axiale Temperaturprofil, werden analog mittlere Temperaturen von Gas und Schüttbett ermittelt. Aus allen Temperaturwerten, die während einer Umdrehung aufgezeichnet wurden, werden Durchschnittstemperaturen berechnet. Pro Umdrehung erhält man daher jeweils einen Temperaturwert für Gas und Schüttung. Somit die Anzahl der Temperaturwerte pro Minute abhängig davon, bei welcher Rotationsgeschwindigkeit der Versuch durchgeführt wurde.

Die erhaltenen Messpunkte wurden nachfolgen mit einer Funktionsanpassung geglättet und über der Versuchszeit dargestellt.

4.6.4 Analyse des Trocknungsfortschritts

Während der Versuche zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens, wurden Proben aus der Schüttung entnommen. Bei den Versuchen im Batch Betrieb wurden die Proben jeweils nach einem zeitlich festgelegten Intervall entnommen. Bei den kontinuierlichen Versuchen wurden die Proben an den fünf axialen Positionen aus dem Drehrohr entnommen. Eine Probe umfasste dabei immer mehrere Partikel mit einem Gesamtgewicht von 5 bis 10 g. Diese Proben wurden in luftdichten Behältern aufbewahrt und anschließend wurde mit dem Gerät TGA 701 LECO der Feuchtegehalt bestimmt, indem die Proben gleichmäßig erwärmt und der Masseverlust gemessen wurde.

Die daraus ermittelten Daten wurden wieder als *.csv-Datei abgespeichert und nachfolgend von der MatLab-Auswerteroutine eingelesen und als Vektor abgespeichert.

Da nicht sichergestellt werden konnte, dass die Ausgangsfeuchte bei allen Versuchen immer gleich war, wurde eine normierte Feuchte mit

$$\bar{X} = 100 - \left(\frac{X - X_0}{X_0} \right) \cdot 100 \quad (46)$$

ermittelt, um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Trocknungskurven zu ermöglichen. Hierbei beträgt die normierte Feuchte zu Beginn des Versuchs immer

100%, was bedeutet, dass das Material maximal befeuchtet war. Mit Fortschreiten der Zeit (Batch-Versuch) bzw. mit dem weiteren Transport im Drehrohr (kontinuierlicher Versuch) nimmt die normierte Feuchte dann bis maximal 0% ab, was bedeutet, dass keine Feuchte mehr in der Probe messbar war.

Abbildung 50 (oben) stellt den Verlauf des Feuchtegehalts über der axialen Position bei der kontinuierlichen Trocknung von Blähton dar. In Abbildung 50 (mitte) wurde der normierte Feuchtegehalt berechnet und dargestellt.

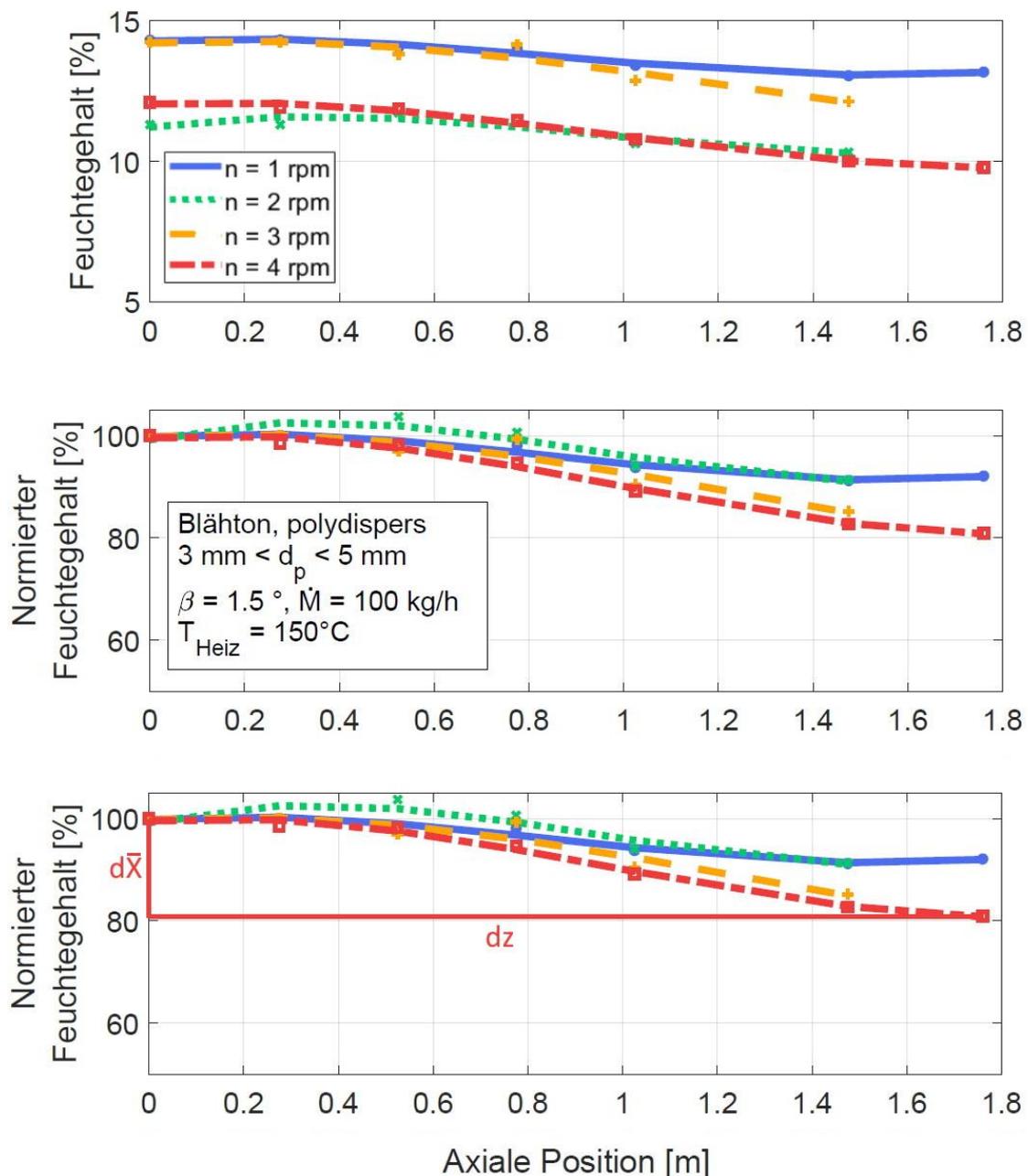


Abbildung 55: Exemplarischer Verlauf des Feuchtegehalts (oben), des normierten Feuchtegehalts (mitte) und Ermittlung der Trocknungsrate (unten) bei kontinuierlicher Trocknung

Aus dem Verlauf des normierten Feuchtegehalts kann die Trocknungsrate berechnet werden. Im kontinuierlichen Betrieb wurde der Trocknungsfortschritt über der Gesamtlänge des Ofens verglichen. Dazu wurde die Differenz zwischen Endfeuchte und Anfangsfeuchte ins Verhältnis zur Länge des Drehrohrs gesetzt.

$$d\bar{X} = \frac{d\bar{X}}{dz} = \left| \frac{\bar{X}_{end} - \bar{X}_0}{z_{end} - z_0} \right| \quad (47)$$

Für die Batch-Versuche wurde der Verlauf des Feuchtegehalts sowie des normierten Feuchtegehalts analog erstellt, siehe Abbildung 51 oben und mitte. Der Verlauf des Feuchtegehalts wurde nachfolgend mittels eines Polynoms approximiert und dieses Polynom dann nach der Zeit abgeleitet, siehe Abbildung 51 unten.

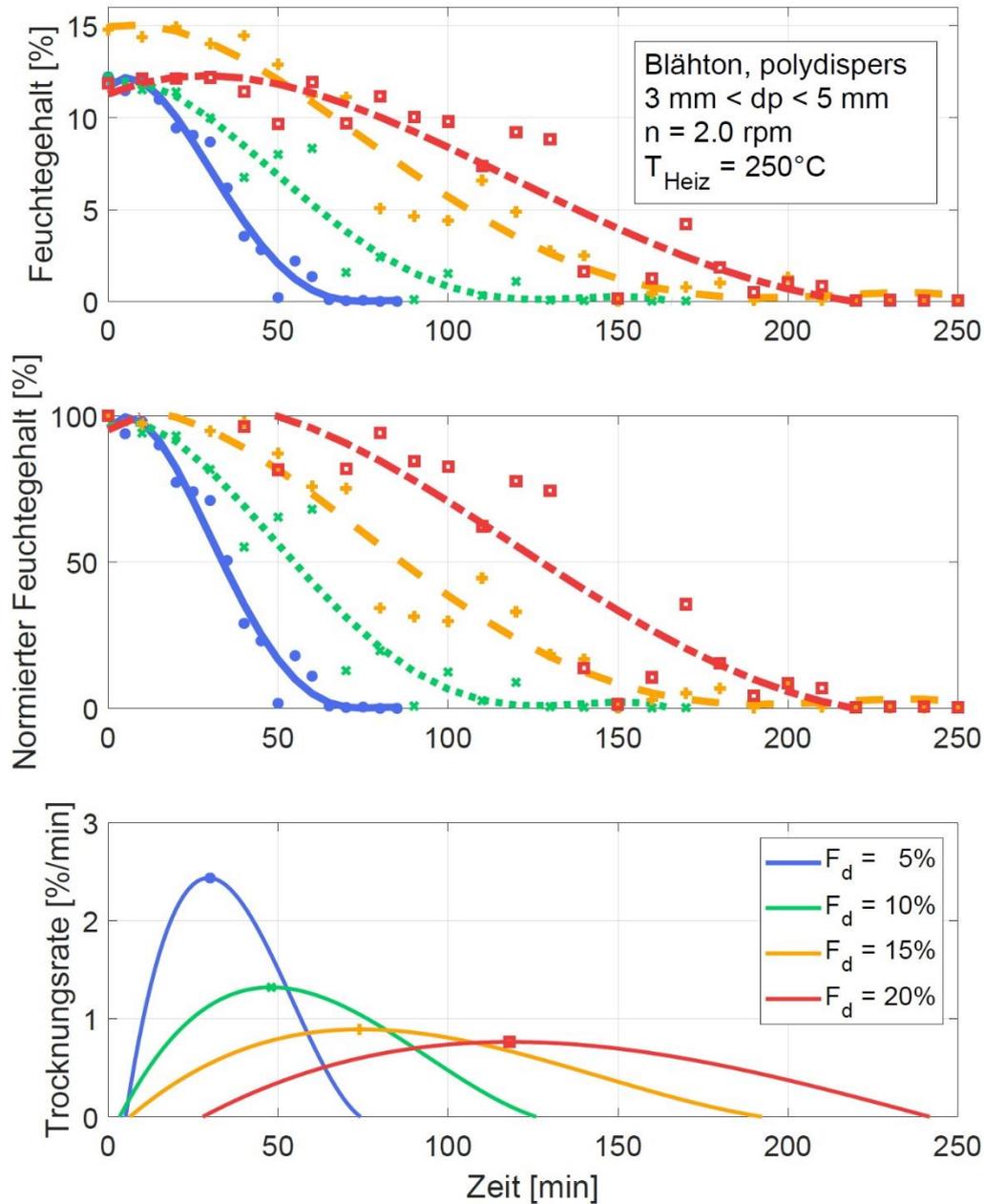


Abbildung 56: Exemplarischer Verlauf des Feuchtegehalts (oben), des normierten Feuchtegehalts (mitte) und Ermittlung der Trocknungsrate (unten) bei Trocknung in Batch-Fahrweise

Von der dadurch erhaltenen Trocknungsrate wird nachfolgend der Maximalwert bestimmt.

$$d\bar{X}_{t,max} = \max\left(\left|\frac{d\bar{X}}{dt}\right|\right). \quad (48)$$

Die maximale Trocknungsrate wurde als Zielgröße festgelegt und für den Vergleich der verschiedenen Versuche verwendet.

4.6.5 Analyse des Reaktionsfortschritts

Zur Analyse des Versuchs im Rohrofen, werden die Versuchsdaten Zeit, Ofentemperatur, Kerntemperatur und Masseverlust verwendet, welche mit dem Programm „DIAdem“ aufgezeichnet wurden.

Abbildung 52 stellt die gemessene Ofenwand- und Kerntemperaturen sowie den Massenverlust der Probe während des Versuchs dar.

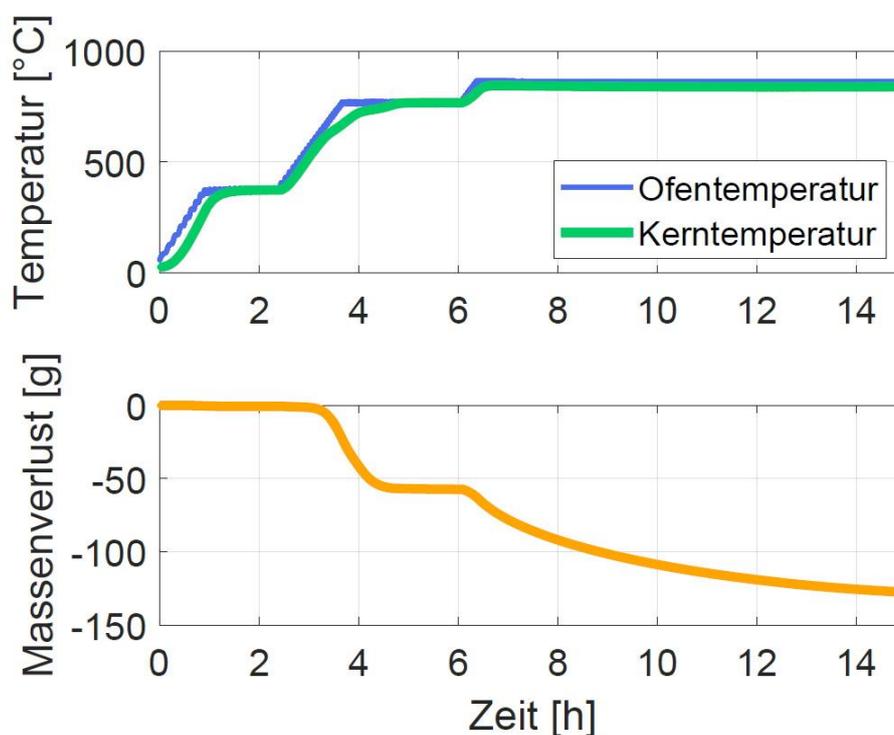


Abbildung 57: Exemplarischer Temperaturverlauf und Massenverlust während der Zersetzung von Dolomit

Alle Experimente wurden in drei Phasen durchgeführt. Zu Beginn jeder Phase wurde die Probe weiter beheizt und dann jeweils bei einer konstanten Temperatur gehalten. Zu Beginn des Versuchs wurde der Ofen mit maximaler Heizrate erwärmt. Der Kern der Probe erwärmt sich mit einer geringen Verzögerung mit gleichem Temperaturanstieg wie die Ofenwand. Der erste Haltepunkt wurde bei ca. 350 °C gewählt. Bei dieser Temperatur ist sichergestellt, dass sämtliche Feuchtigkeit der Probe ausgetrieben wurde. Betrachtet man den Masseverlust der Probe, so ist erkennbar, dass die Probe bereits zu Beginn des Versuchs fast vollkommen trocken war.

Es folgt die zweite Phase des Versuchs, die unter reinen CO₂-Bedingungen durchgeführt wird und bei dem der Ofen mit maximaler Heizrate auf eine Temperatur von ca. 750 ° erwärmt und dann bei dieser Temperatur gehalten wird. Wieder folgt die

Kerntemperatur der Probe während der Aufheizung zunächst dem Verlauf der Ofenwand, steigt jedoch dann bei Erreichen von 750 °C einen Haltepunkt. Bei dieser Temperatur findet die erste Reaktion des Dolomits statt und das Magnesiumcarbonat wird zersetzt. Dies ist auch am Massenverlust der Probe zu erkennen. Da kein Sauerstoff vorhanden ist, ist sichergestellt, dass ausschließlich Magnesiumcarbonat und kein Calciumcarbonat aus der Probe zersetzt wird. Dieses kann erst in der dritten Phase des Versuchs, welche wieder mit Luft durchgeführt wird, reagieren. Bei einer Temperatur von ca. 850 °C findet hier die Zersetzung des Calciumcarbonats statt, was wieder durch einen deutlichen Massenverlust erkennbar ist.

Der Anteil von Magnesiumcarbonat bzw. Calciumcarbonat in der Ausgangsprobe kann aus den Massenverlusten m_{Verl} über die Gleichungen

$$m_{MgCO_3} = \frac{m_{Verl} \cdot \tilde{M}_{MgCO_3}}{\tilde{M}_{CO_2}} \quad (49)$$

und

$$m_{CaCO_3} = \frac{m_{Verl} \cdot \tilde{M}_{CaCO_3}}{\tilde{M}_{CO_2}} \quad (50)$$

mit Hilfe der molaren Massen \tilde{M} berechnet werden.

Da in der vorliegenden Arbeit das Augenmerk auf die erste Reaktion des Kalksteins gelegt wird, wird auch nur die Zersetzung des Magnesiumcarbonats für die weitere Auswertung berücksichtigt.

Indem der zeitabhängige Massenverlust abgeleitet wird,

$$A = \frac{dm}{dt} \quad (51)$$

erhält man den Umsatz A, siehe Abbildung 53.

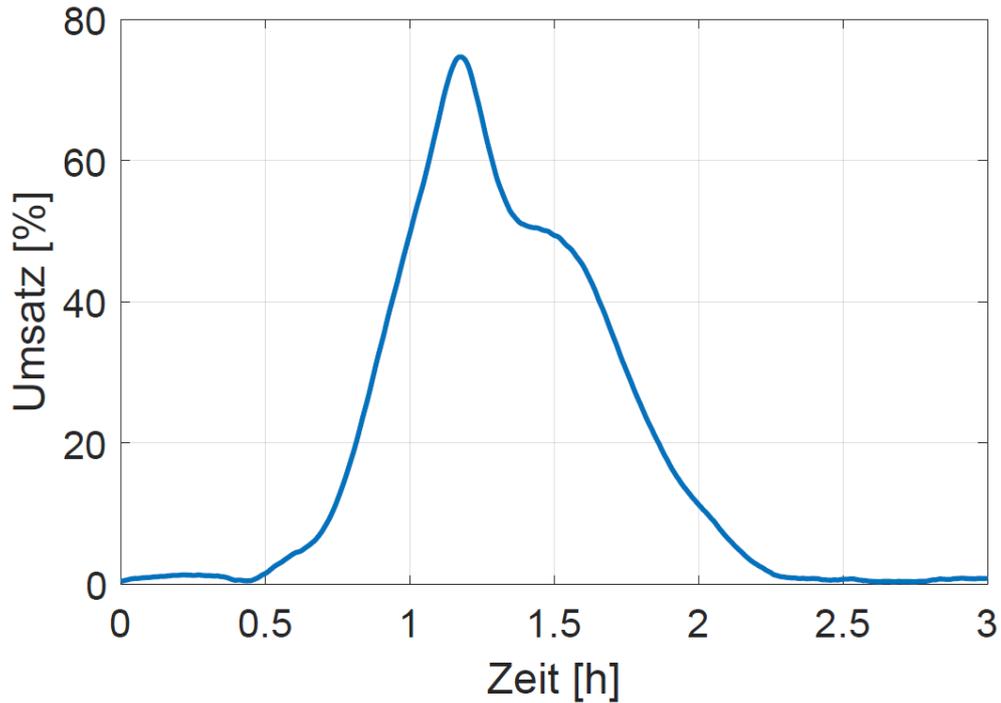


Abbildung 58: Zeitabhängiger Umsatz während der Zersetzung des Magnesiumcarbonats

Hier ist nur der Umsatz während der Zersetzung des Magnesiumcarbonats gezeigt. Die vorher stattfindende Trocknung bzw. die nachfolgend ablaufende Reaktion des Calciumcarbonats werden nicht berücksichtigt. Zu Beginn ist der Umsatz gering, dann steigt dieser steil an und erreicht bei ca. 1,2 Stunden sein Maximum, bevor er wieder sinkt.

Die komplette erste Reaktion läuft innerhalb einer Zeit von ca. 2 Stunden ab.

5 Ergebnisse

5.1 Untersuchung des axialen Schüttguttransports im Kaltzustand (FS-1 AP1)

Verweilzeit

Für die Ermittlung der Verweilzeitverteilung wurden nachfolgende Versuchsreihen untersucht. Dabei wurden zum einen die Drehrohrfrequenz sowie der Massenstrom variiert.

Versuchsreihe Nr.	Durchmesser Grundschüttung	Frequenz Drehrohr	Frequenz Dosierschnecke	Durchmesser Tracerpartikel	Anzahl Tracerpartikel
1	7mm	30 Hz	50 Hz	3mm, 5mm, 7mm	Je 50
2	7mm	50 Hz	30 Hz	3mm, 5mm, 7mm	Je 50
3	7mm	50 Hz	50 Hz	3mm, 5mm, 7mm	Je 50
4	7mm	50 Hz	70 Hz	3mm, 5mm, 7mm	Je 50
5	7mm	70 Hz	50 Hz	3mm, 5mm, 7mm	Je 50

Steigt die Drehzahl des Drehrohrs, so werden die Partikel an der Rohrwand zusammen mit dem Schüttbett höher angehoben, als bei niedrigen Drehrohrdrehzahlen (größerer Schüttwinkel). Auch wenn die Haftreibung dieselbe bleibt, erhöht sich die Zentrifugalkraft im Rohr bei erhöhten Drehzahlen. Je höher die Umlaufgeschwindigkeit des Drehrohrs ist, desto höher wird die Schüttbettgeschwindigkeit. Fallen die Tracerpartikel zurück ins Schüttbett, legen Sie aufgrund des größeren Schüttwinkels bei höheren Drehzahlen, in transversaler Richtung eine größere axiale Strecke zurück und weisen geringere Verweilzeiten auf.

Wird die Drehzahl der Dosierschnecke erhöht, so steigt der Massenstrom des Schüttbettes. Der höhere Durchsatz drückt das Schüttbett schneller nach vorne, sodass die Partikel schneller austreten können und wiederum die Verweilzeiten verkürzt werden.

Bei unterschiedlich großen Partikeln besteht der Unterschied darin, dass die Zeitspanne, in denen die Kugel aus dem Drehrohr austreten, sich verlängert, je kleiner die Partikel werden. Je höher der Durchmesser-Unterschied zwischen Schüttgut und

Tracerpartikel, desto stärker ist der Segregationseffekt ausgeprägt. Die kleineren Partikel, fallen in passende Hohlräume des Schüttgutes und werden nicht so hoch angehoben, wie die Partikel der Grundsüttung. Somit bewegen die kleineren Partikel sich hauptsächlich im inneren des Schüttgutes und legen bei einer Umwälzung weniger Strecke zurück. Der Segregationseffekt welcher so sichtbar wird führt somit zu verlängerten Verweilzeiten bei kleinen Partikeln.

In den nachfolgenden Diagrammen sind alle Verweilzeitmessungen aller Partikel-Größen nochmals dargestellt. So können jeweils alle Messreihen für die einzelnen Partikeldurchmesser miteinander verglichen werden. Dargestellt sind jeweils die gemittelten Werte für jede Reihe.

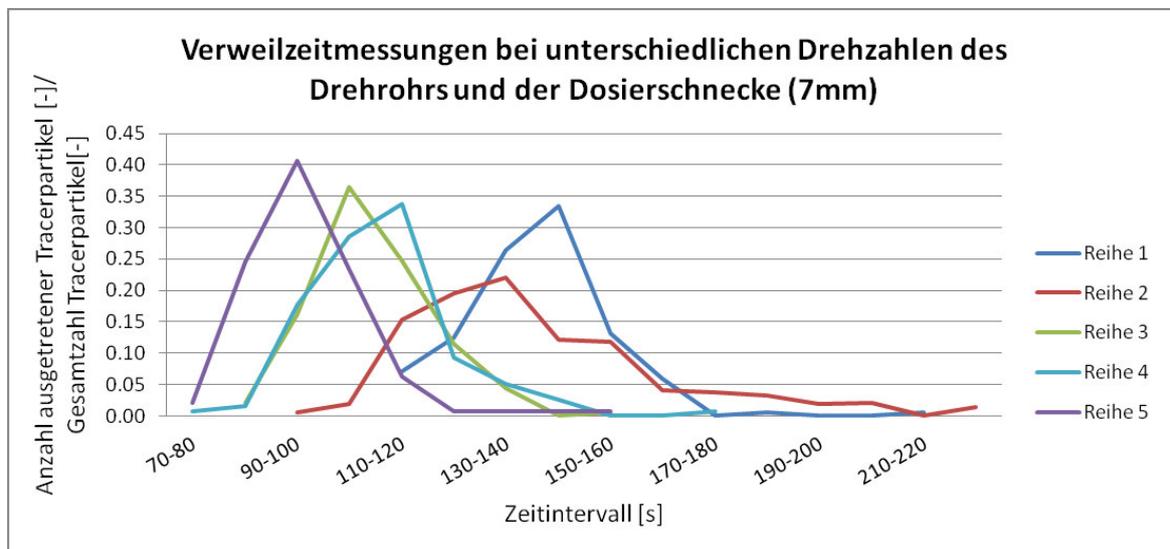


Abbildung 59: Verweilzeitmessung bei unterschiedlichen Drehzahlen von Drehrohr und Dosierschnecke (7mm)

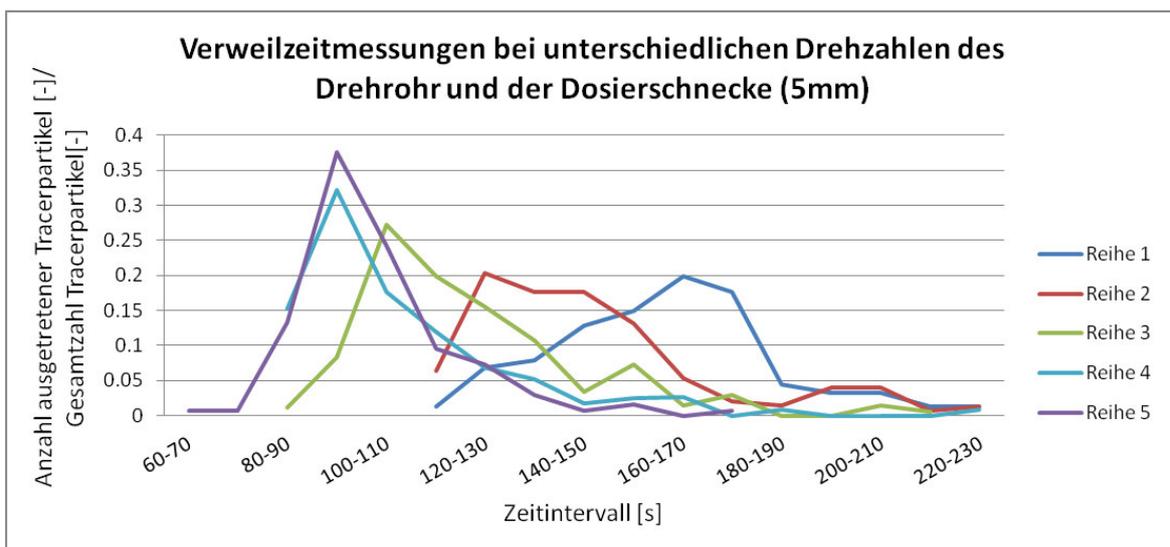


Abbildung 60: Verweilzeitmessung bei unterschiedlichen Drehzahlen von Drehrohr und Dosierschnecke (5mm)

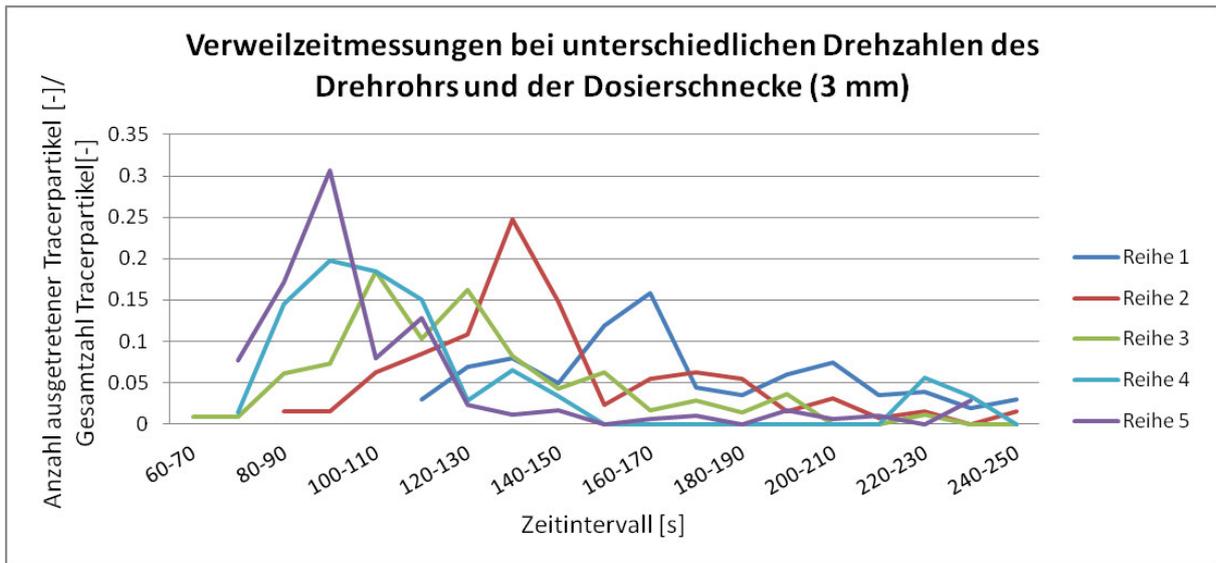


Abbildung 61: Verweilzeitmessung bei unterschiedlichen Drehzahlen von Drehrohr und Dosierschnecke (3mm)

In der folgenden Darstellung sind die Verweilzeitmessungen der unterschiedlichen Partikel-Größen zu Reihe abgebildet.

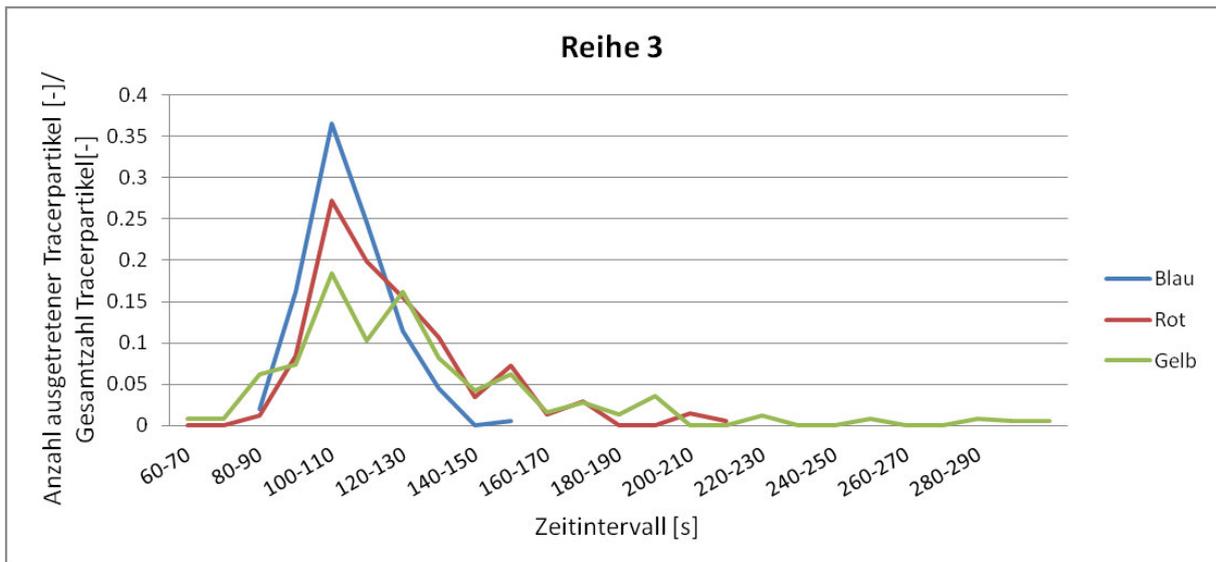


Abbildung 62: Verweilzeitmessung der Reihe 3 für die drei Tracerpartikelgrößen

Es ist sehr gut zu erkennen, dass die meisten Partikel aller Größen ungefähr im selben Zeitintervall (100-130) das Drehrohr verlassen. Das heißt die Partikel-Größe hat kaum Einfluss auf das Maximum der Kurve, sondern eher darauf wie flach diese ausfällt, sprich die Auswirkung wird sich bei der Berechnung der mittleren Verweilzeiten bemerkbar machen. Je kleiner die Partikel werden, desto niedriger fallen die Maxima aus und die Partikel fallen über einen längeren Zeitraum aus dem Drehrohr.

Die 7 mm Partikel weisen die kürzesten mittleren Verweilzeiten auf, darauf folgen die 5 mm und dann die 3 mm Partikel. Zwischen den Kurven sind gleichmäßige Abstände erkennbar.

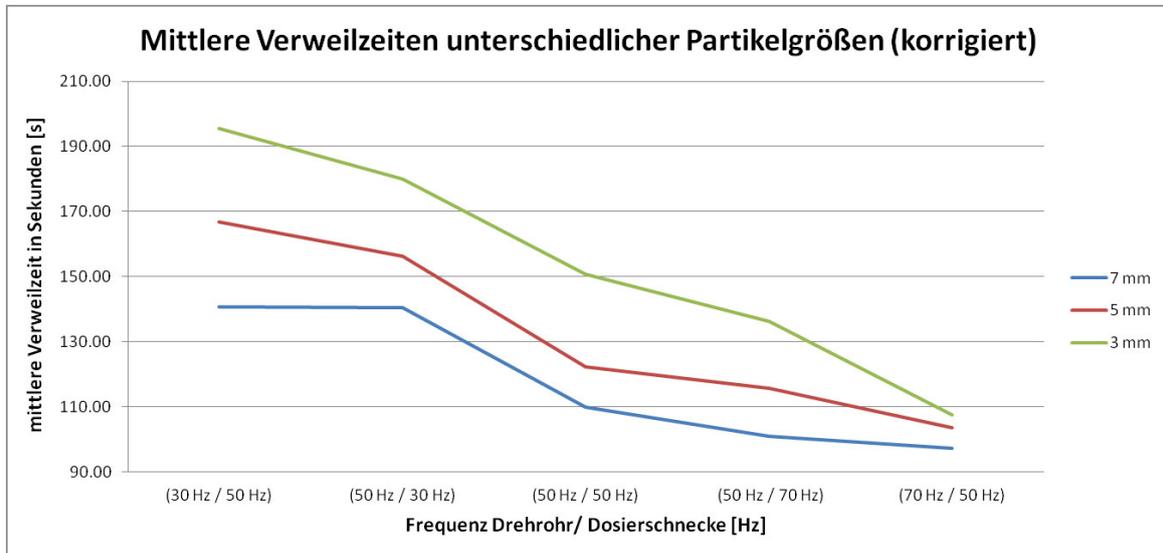


Abbildung 63: Mittlere Verweilzeiten unterschiedlicher Partikelgrößen

Oberflächengeschwindigkeit

Für die Messung der Oberflächengeschwindigkeit ist beispielhaft die gemittelte gerundete Geschwindigkeit in y-Richtung dargestellt (vgl. Abbildung 64). In Versuchsreihe V1 wird das Drehrohr mit einer Steigung von 1° und einer Frequenz von 10 Hz betrieben.

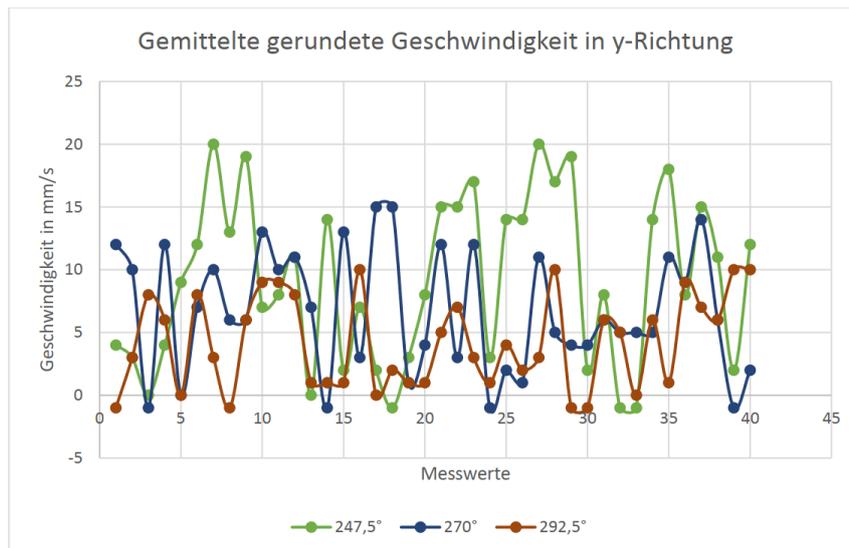


Abbildung 64: Gemittelte und gerundete Geschwindigkeit in Y-Richtung

Es wird deutlich, dass im oberen Bereich der Schüttung bei $292,5^\circ$ im Mittel niedrige Geschwindigkeiten herrschen. Die Geschwindigkeiten liegen zwischen 0 und 10 mm/s. Hier beginnt die Beschleunigungsphase der Kugeln, gut erkennbar ist die Steigerung

der Geschwindigkeiten bei 270° . Hier steigt die Geschwindigkeit bis 15 mm/s , und bei $247,5^\circ$ bis 20 mm/s . Neben den Peaks gibt es auch immer wieder Phasen in denen die Geschwindigkeit nahe 0 liegt, also vermutlich keine Kugeln in Bewegung sind. Bei der geringen Drehzahl des Drehrohres ist diese Umstand auch nicht anders zu erwarten.

Zur Visualisierung werden die Daten der Geschwindigkeitsprofile in Matlab eingelesen und dargestellt. In Abbildung 65 ist das Geschwindigkeitsprofil in y-Richtung für V1 gezeigt. Abgebildet ist ein schräg im Raum liegender halber Zylinder, dessen 8×40 -Flächen entsprechend der Geschwindigkeiten in y-Richtung eingefärbt sind. Wie bereits festgestellt wurde, liegen die Geschwindigkeiten zwischen 0 und 20 mm/s . Es wird auch hier deutlich, dass bei $292,5^\circ$ die niedrigsten Geschwindigkeiten herrschen. Die höchsten Geschwindigkeiten befinden sich im mittleren Bereich des Schüttbetts.

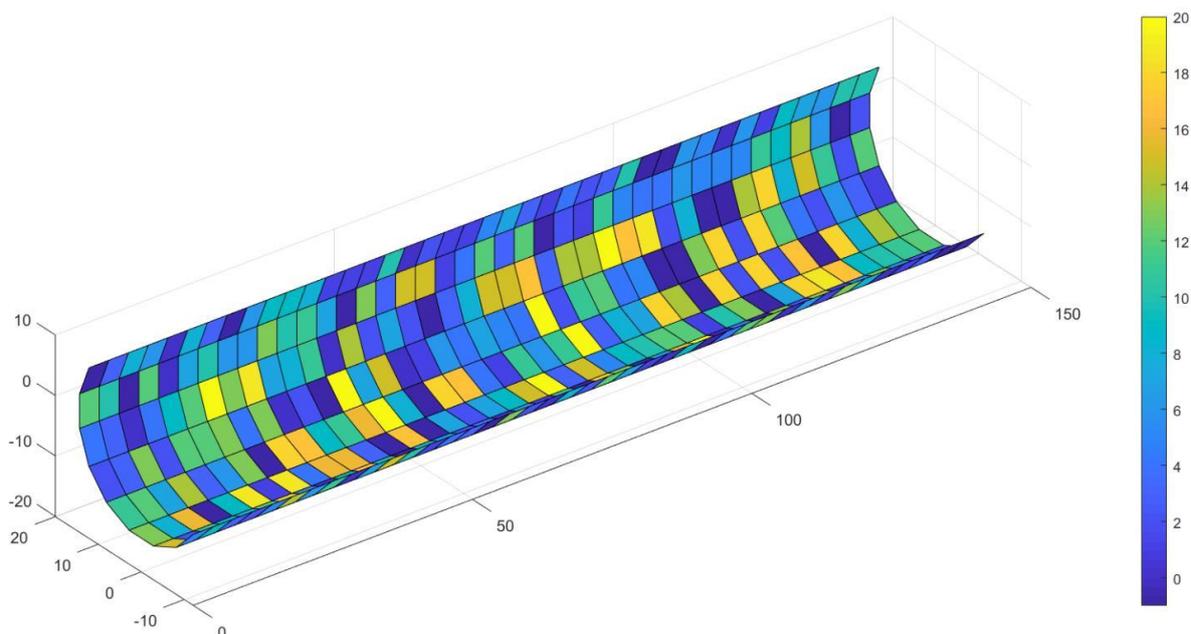


Abbildung 65: Exemplarisches Ergebnis des Geschwindigkeitsprofils in Y-Richtung

Schüttbetthöhe

Die ermittelten Höhenprofile können zum Vergleich mit den Simulationsdaten in die Visualisierungssoftware Paraview eingelesen und übereinandergelegt werden (vgl. Abbildung 66). Das in der Abbildung erkennbare Profil ist in einem um 1° geneigten Drehrohr mit einem Massenstrom von 40 g/s und einer Drehzahl von 2 U/min aufgenommen worden. Das Bild zeigt einen homogenen Verlauf der Schüttbetthöhe. Die vereinzelt Lücken können über eine Verbesserung der Auswertung weiter reduziert werden.

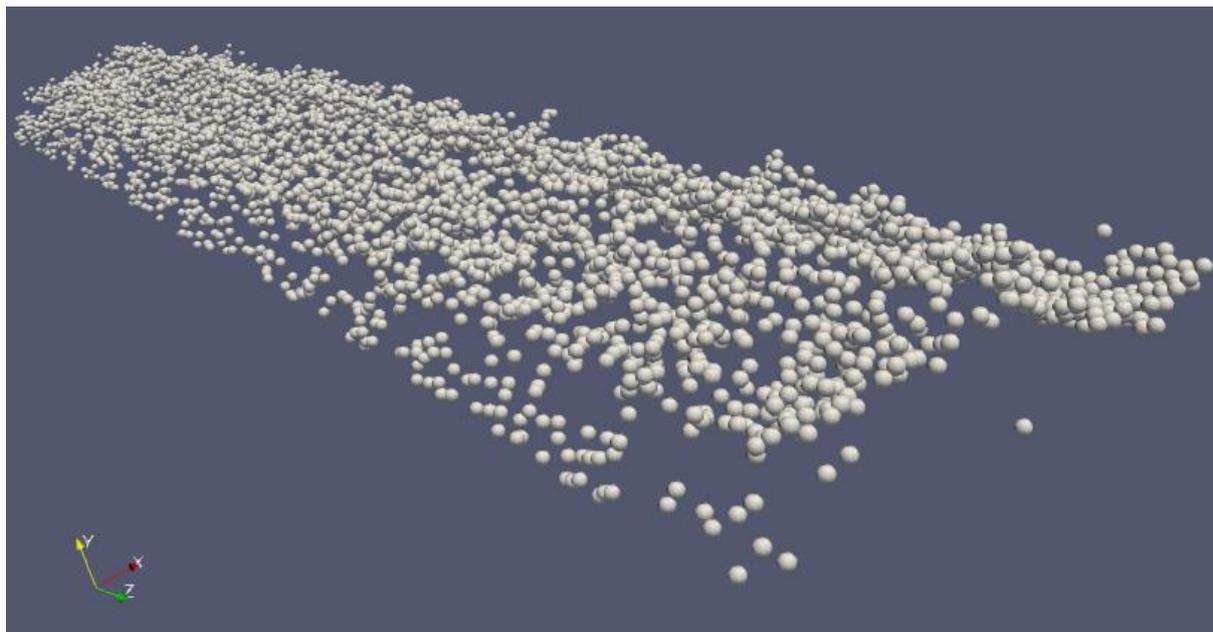


Abbildung 66: Exemplarische Schüttbetthöhe einer im Drehrohr erfassten Schüttung

Für die Auswertung und den Vergleich mit den Simulationen muss das Drehrohr diskretisiert werden in axialer und in Umfangsrichtung diskretisiert werden. Die Schüttbetthöhen werden zum Mittelpunkt des Rohres hin gemessen. Der Vergleich folgt im nächsten Kapitel

5.2 Simulation des axialen Schüttguttransports im Kaltzustand (FS-1 AP2)

Die Simulationen zum ersten Arbeitspaket werden unterschiedlich aufgebaut. Aufgrund der Länge des Drehrohres und der damit sehr hohen Anzahl an Partikeln (vgl. Abbildung 67), kann das System nicht für alle Simulationen im Ganzen berechnet werden.

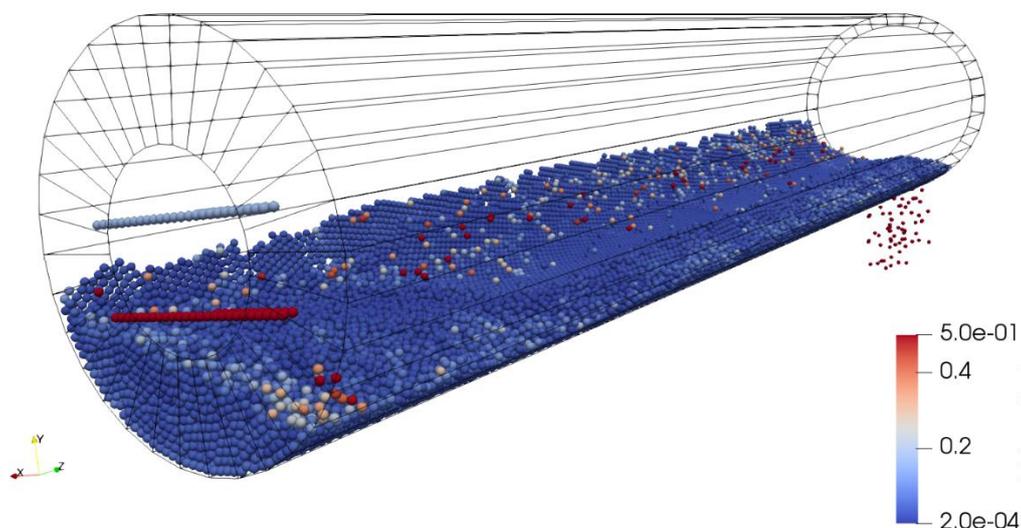


Abbildung 67: Drehrohrsimulation des gesamten Drehrohres

Deshalb wurden im DEM Code sogenannte Portale implementiert. Diese erlauben es ein Segment des Drehrohres zu simulieren (vgl. Abbildung 68).

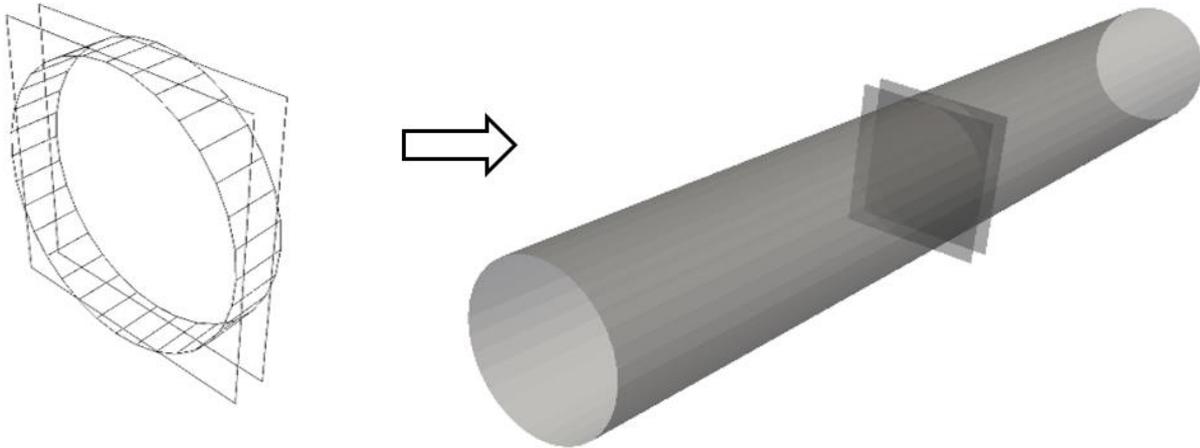


Abbildung 68: Drehrohrsegment

Dabei werden die Seiten an die jeweils andere Seite des Segments gespiegelt. Durch Aneinanderreihung der Segmente kann ein beliebig langes Drehrohr simuliert werden. Die Veränderung des Füllungsgrads über der Drehrohrlänge wird dabei vernachlässigt.

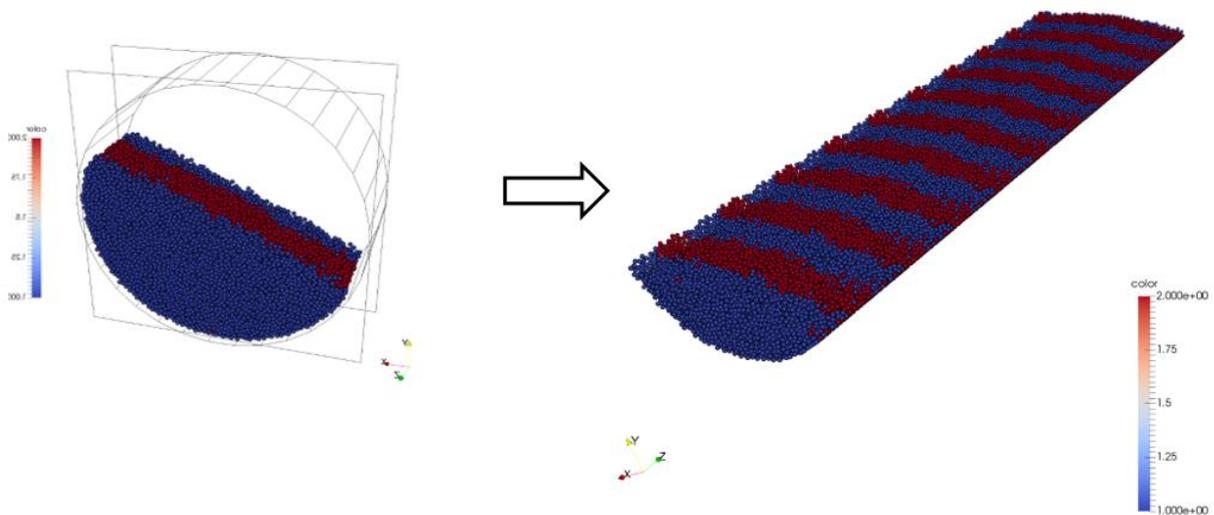


Abbildung 69: Drehrohr zusammengesetzt aus mehreren Segmenten

Für die Verweilzeitverteilung können bei der Simulation die Tracerpartikel einfach über ihre ID (numerische Kennzeichnung) nachverfolgt werden. Dies erlaubt außerdem eine genaue Bestimmung der Bahnkurve der einzelnen Partikel.

Bei der Untersuchung der Verweilzeitverteilung in Abbildung 70, fällt zunächst auf, dass die ersten Partikel sowohl in der Simulation als auch im Experiment nach ca. 130 Sekunden aus dem Drehrohr austreten. Das Zeitintervall in dem die Partikel austreten ist bei der Simulation aber wesentlich kleiner. Das liegt zum einen an der recht groben

Diskretisierung des Drehrohres in 32 Flächen. Durch eine Vervierfachung kann der Effekt deutlich reduziert werden. Außerdem weist das Drehrohr im Experiment mehrere Schweißnähte auf, welche die axiale Förderung des Schüttgutes beeinflussen.

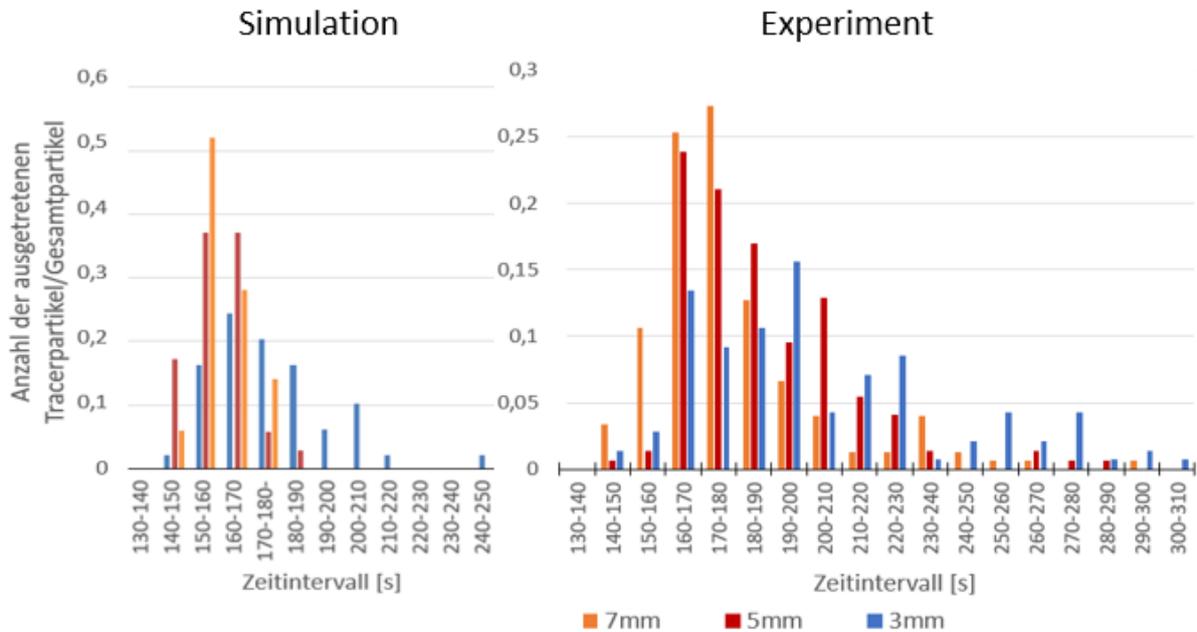


Abbildung 70: Verweilzeitverteilung zwischen Simulation und Experiment

Im Detail können die Simulationen in dem Tool „Paraview“ weiter betrachtet und analysiert werden. Abbildung 71 zeigt Ausschnitte aus der Verweilzeitanalyse.

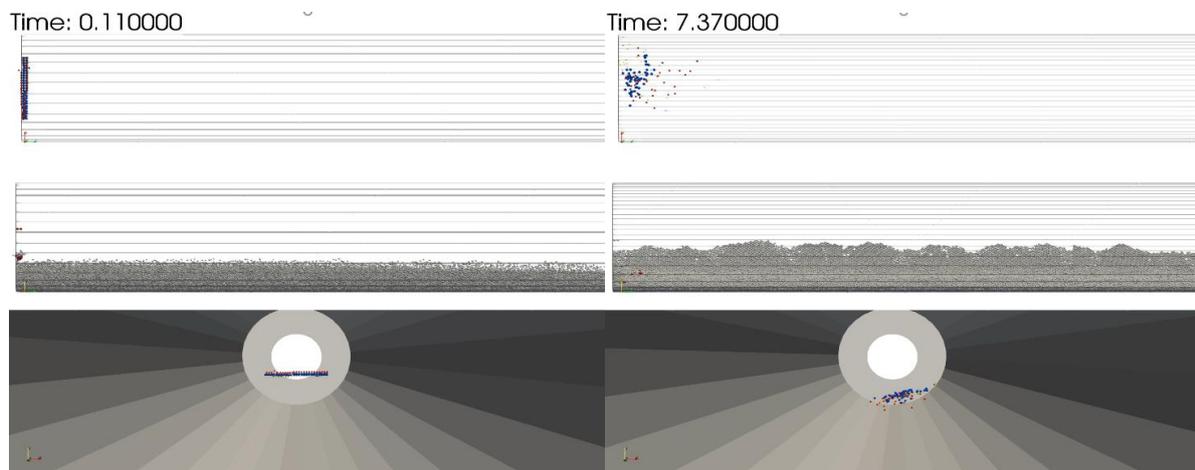


Abbildung 71: Exemplarische Partikelverweilzeitanalyse

5.3 Untersuchung zum axialen Schüttguttransport mit gekoppeltem Wärmeeintrag über die freie Bettoberfläche (FS-1 AP3)

Im Folgenden wird zunächst auf die Aufbereitung der aufgenommenen Rohdaten eingegangen. Wie zuvor beschrieben müssen die mit der Thermografiekamera

aufgenommenen Einzelbilder des Schüttbettes zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Des Weiteren sollen die Messwerte jedes Pixels aufgrund der zuvor beschriebenen Abkühlung der Schüttbettoberfläche und der großen Messwertabweichungen zwischen den Thermoelementmessungen und den Thermografiemessungen korrigiert werden. Diese Aufbereitung geschieht durch ein weiteres MATLAB-Skript. Auch hier wird auf die Beschreibung der genauen programmier-technischen Umsetzung verzichtet.

Die als Textdatei gespeicherten Temperaturbilder werden eingelesen und in der Reihenfolge des Aufnahmezeitpunktes sortiert. Für das Zusammenfügen der Bilder wird ein leeres Bild erzeugt, das nach und nach mit den korrigierten Temperaturwerten der entsprechenden Einzelbilder gefüllt wird. Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden die aufgenommenen Messwerte anhand eines Vergleiches zwischen Thermografiemessung und Thermoelementmessung korrigiert. In Abbildung 54 ist die Messwertabweichung ΔT zwischen beiden Messmethoden über der mittels Thermografie gemessenen Temperatur abgebildet.

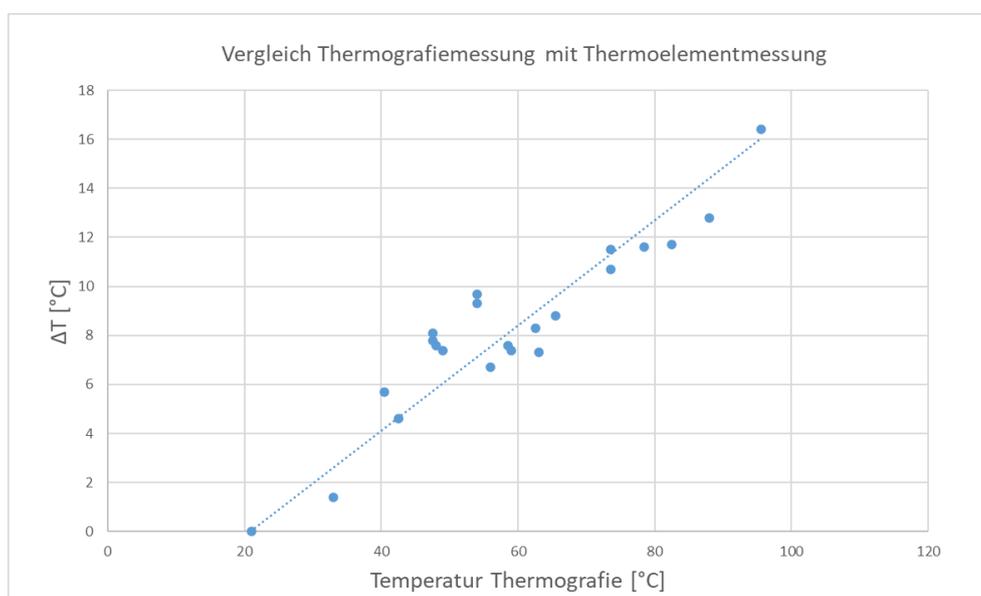


Abbildung 72: Messwertabweichung in Abhängigkeit der gemessenen Temperatur

Der Verlauf der Temperaturdifferenz steigt näherungsweise linear mit der gemessenen Thermografietemperatur, wobei auch deutliche Ausreißer zu erkennen sind. Für die Korrektur der Messwerte wird der Verlauf anhand der dargestellten linearen Ausgleichsgeraden approximiert. Hiermit kann für jeden Messwert das entsprechende ΔT berechnet und der Messwert korrigiert werden. Da die Thermoelementtemperatur als annähernd tatsächliche Oberflächentemperatur angesehen wird, entsprechen die

Temperaturwerte nach der Korrektur ebenfalls näherungsweise der tatsächlichen Oberflächentemperatur.

Die anschließende Rückrechnung der Partikelabkühlung wird mit Hilfe des in Abbildung 55 dargestellten Temperaturverlaufes eines sich an der Schüttbettoberfläche befindlichen Partikels durchgeführt.

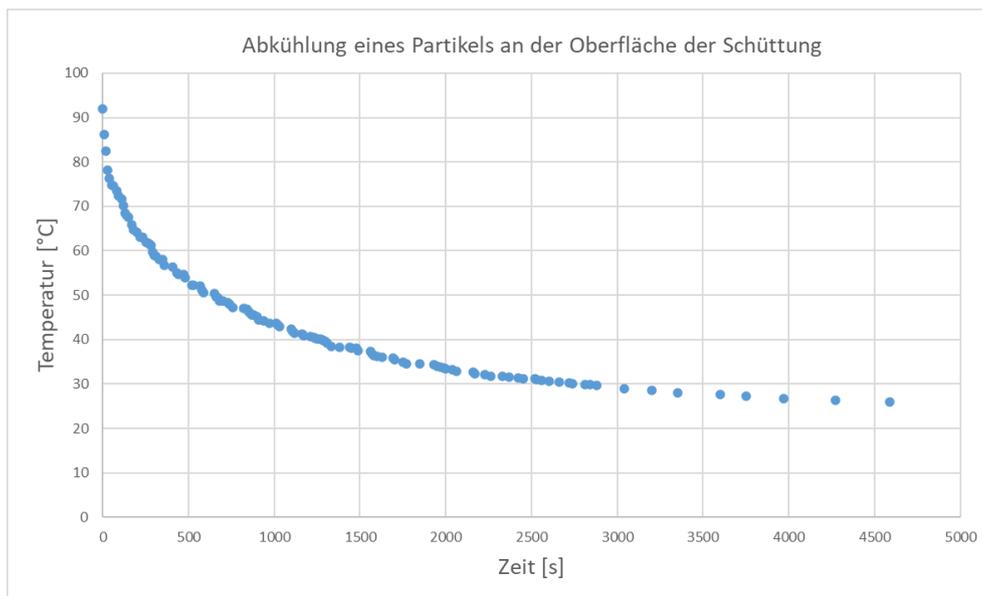


Abbildung 73: Temperaturverlauf eines abkühlenden Partikels

Um den entsprechenden Temperaturwert zum Zeitpunkt der Prüfstandabschaltung zu erhalten, wird zunächst anhand des Zeitstempels, der für jedes Bild gespeichert wird, die zwischen Abschaltzeitpunkt und Messzeitpunkt vergangene Zeit berechnet. Anschließend wird der zum gemessenen Temperaturwert zugehörige Zeitwert auf der horizontalen Achse bestimmt. Von diesem Wert wird die zwischen Abschaltzeitpunkt und Messzeitpunkt vergangene Zeit subtrahiert. Hieraus ergibt sich ein neuer Zeitwert, für den der Temperaturwert auf der vertikalen Achse bestimmt wird. Diese Temperatur stellt näherungsweise die zum Abschaltzeitpunkt vorliegende Partikeltemperatur dar. Die Visualisierung der einzelnen Messwerte der Schichttemperaturmessungen ist wenig anschaulich, weshalb diese hauptsächlich für die spätere Validierung von Simulationsergebnissen verwendet werden sollen. Die gemessenen Temperaturwerte können unkorrigiert verwendet werden, jedoch wird angenommen, dass ein ausreichend langer und intensiver Wärmeaustausch zwischen Sensor und Schüttbettschicht stattfindet. Des Weiteren wird der gemessene Temperaturwert als Mittelwert aus der zwischen den Partikeln herrschenden Lufttemperatur und der Partikeloberflächentemperatur interpretiert. Für jede z-Position wird ein Plot der einzelnen

Messpunkte erstellt. Abbildung 56 zeigt exemplarisch die Darstellung für eine z-Position von 1440 mm für Versuch 1 (vgl. Tabelle 4-3).

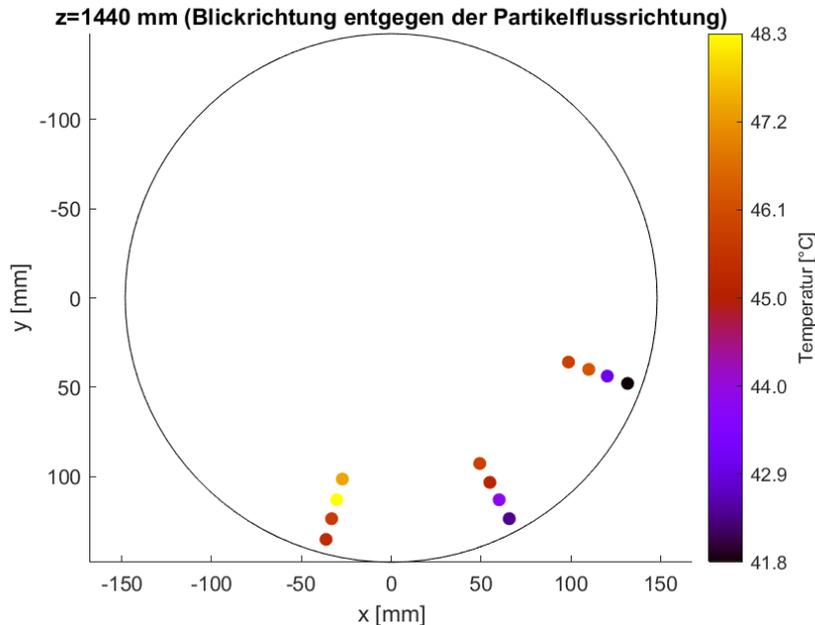


Abbildung 74: Plot der Schichttemperaturen für z=1440 mm

Die Messpunkte sind mit Blickrichtung auf den Drehrohrauslass entgegen der Partikelflussrichtung zu deuten. Die Messpunkttemperaturen sind anhand der Farbskala ablesbar.

Im Folgenden werden die zusammengesetzten und korrigierten Thermografiebilder der einzelnen Versuche miteinander verglichen, um die Abhängigkeiten zwischen den Betriebsparametern und den resultierenden Temperaturverteilungen des Schüttbettes zu untersuchen. Anhand der Versuche 1 und 2 wird zunächst die Drehzahlabhängigkeit der Temperaturverteilung analysiert. Abbildung 57 zeigt die Temperaturverteilungen der Schüttbettoberflächen für Versuch 1 auf der linken und für Versuch 2 auf der rechten Seite. Die horizontale Achse entspricht jeweils der φ -Koordinate und die vertikale Achse der z-Koordinate. Die Farbdarstellung verdeutlicht die anhand der Skala ablesbaren Temperaturwerte, welche für beide Versuche nicht identisch ist, da sich die Temperaturen unterscheiden und qualitative Unterschiede zwischen beiden Versuchen festgehalten werden sollen.

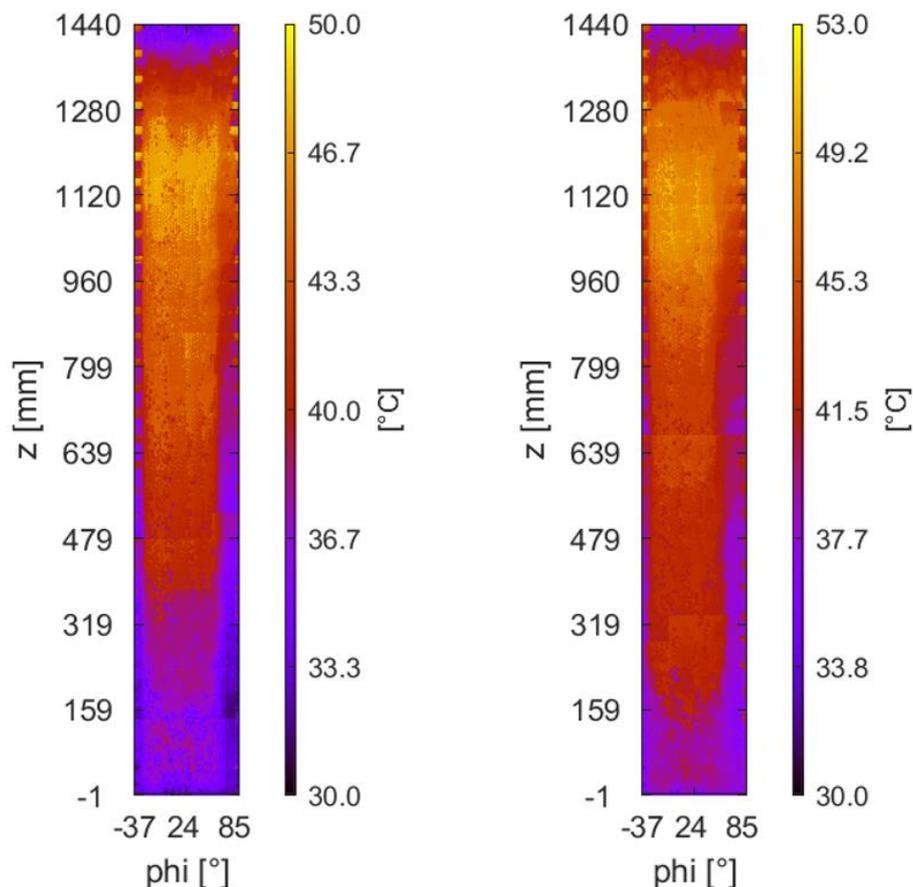


Abbildung 75: Temperaturverteilungen für Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts)

Da die Einzelbilder wie beschrieben nicht nahtlos aneinanderpassen, können sich Abweichungen hinsichtlich der dargestellten Skala und der tatsächlichen Position im Drehrohr ergeben. Im oberen Bereich ist entsprechend der Koordinaten der Drehrohrenlass und im unteren Bereich der Drehrohrauslass zu sehen. Wie zuvor beschrieben, sind die Messwerte bis zu einer z-Position von 1440 mm, welcher dem Beginn des beheizten Bereiches entspricht, dargestellt. Der beheizte Bereich endet bei einer z-Position von ca. 1170 mm. Die Versuche unterscheiden sich lediglich durch die Drehrohdrehzahl, die bei Versuch 1 5 U/min und bei Versuch 2 7,5 U/min beträgt. Die übrigen Parameter sind Tabelle 4-3 zu entnehmen. Durch die beschriebene Messwertkorrektur und die generelle Messungenauigkeit der Thermografiekamera von $\pm 5\text{ °C}$ (FLIR Systems Inc. 2016), sind vergleichsweise große Messunsicherheiten hinsichtlich der absoluten Temperaturwerte zu erwarten. Aus diesem Grund werden Aussagen hauptsächlich anhand der qualitativen Temperaturverteilungen der Schüttbettoberfläche getroffen.

Zunächst wird die Temperaturverteilung von Versuch 1 genauer beschrieben. Im Einlassbereich sind deutlich die einfließenden, kühlen Partikel zu erkennen. Die

Oberflächentemperatur des Schüttbettes nimmt von $z=1440$ mm bis etwa $z=1150$ mm kontinuierlich zu und besitzt an dieser Position, welche dem Ende des beheizten Bereiches entspricht, eine sehr einheitliche Verteilung. Nach dieser Position nimmt die Homogenität der Temperaturverteilung wieder ab und das Schüttbett kühlt bis zum Drehrohrauslass kontinuierlich ab. Für alle Versuche ist im rechten äußeren Bereich das Schüttbett kühler als in der Mitte. Da hier das Schüttbett deutlich niedriger ist und die Partikel entsprechend schneller auskühlen, ist die Rückrechnung der Abkühlung für diese Bereiche unzureichend. Daher erscheinen die Randbereiche kühler, was jedoch nicht zwingend der Realität entspricht. Des Weiteren ist bei allen Versuchen im linken und rechten Bereich zu erkennen, dass ein Stück der Drehrohrinnenwand aufgenommen wurde. Aufgrund der glatten Oberfläche der Wand wird ein Teil der Wärmestrahlung der aufgeheizten Traverse reflektiert, die in den Bildern als „rechteckige“ Temperaturerhöhung erkennbar ist. Somit ist diese Temperaturerhöhung nicht real vorhanden, sondern nur durch Störstrahlung begründet. Dieses Phänomen tritt bei jedem Randbild auf, weshalb es sich in dem zusammengesetzten Bild mehrfach wiederholt. Der Wärmeeintrag in Versuch 1 scheint aufgrund der kontinuierlichen Aufheizung und Abkühlung der Schüttbettoberfläche sehr homogen und gleichmäßig zu sein. Aufgrund des geringen Neigungswinkels von 1° verbleiben die Partikel vergleichsweise lange im Drehrohr und gelangen in der beheizten Zone häufig an die Oberfläche, an welcher sie durch die Wärmestrahlung erhitzt werden. Aufgrund der großen Verweilzeit kann zwischen den Partikeln ein großer Wärmeaustausch durch Wärmeleitung stattfinden, wodurch auch Partikel, die nicht unmittelbar an die Oberfläche gelangen, erwärmt werden.

Die Steigerung der Drehzahl um $2,5$ U/min führt bei Versuch 2 zwar zu einer gesteigerten Durchmischung des Schüttbettes, jedoch auch zu einer Verringerung der Verweilzeit der Partikel. Da die Umgebungstemperatur bei Versuch 2 deutlich höher liegt als bei Versuch 1, sind die Partikeltemperaturen nicht direkt miteinander vergleichbar. Prinzipiell müssten die Temperaturen von Versuch 2 aufgrund der geringeren Verweilzeit und der damit geringeren Wärmeübergangszeit grundlegend niedriger sein. Bis zu einer z -Position von 1150 mm besteht im Vergleich zu Versuch 1 ein sehr ähnlicher Verlauf, jedoch ist die Temperaturverteilung der Oberfläche weniger einheitlich. Dies verdeutlicht, dass durch die verringerte Verweilzeit ein verringerter Wärmeaustausch zwischen den Partikeln durch Wärmeleitung stattfindet und sich die Partikeltemperaturen demnach nicht im selben Maße angleichen können

wie bei Versuch 1. Dieser Effekt scheint im Vergleich zum Effekt der verbesserten Schüttbettdurchmischung, welche für eine homogene Temperaturverteilung förderlich ist, zu überwiegen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Schüttbettoberfläche des Versuches 1 bereits kurz nach Verlassen des beheizten Bereiches auskühlt, die Oberflächentemperaturverteilung in Versuch 2 jedoch für längere Zeit konstant bleibt. Dies verdeutlicht den schnelleren axialen Transport der Partikel durch die Erhöhung der Drehzahl, da die Partikel innerhalb der Abkühlzeit einen größeren Weg zurücklegen. Ab einer Position von $z=1000$ mm kühlt das Schüttbett kontinuierlich aus, wobei bei ca. $z=320$ mm ein erneuter Anstieg der Oberflächentemperatur zu verzeichnen ist. Dies spricht für eine inhomogene Temperaturverteilung innerhalb des Schüttbettes. Jedoch kann dies auch durch die automatisch ausgelöste Shutter-Funktion der Kamera hervorgerufen werden, da hierbei eine Neukalibrierung durchgeführt wird.

Die Steigerung der Drehrohdrehzahl bewirkt demnach zwar eine verbesserte Schüttbettdurchmischung, jedoch ergibt sich durch die verkürzte Verweilzeit der Partikel eine weniger homogene Temperaturverteilung.

Die Untersuchung der Neigungswinkelabhängigkeit wird anhand des Vergleiches zwischen Versuch 2 und 3 durchgeführt. Die entsprechenden Temperaturverteilungen sind in Abbildung 58 dargestellt. Der Neigungswinkel von Versuch 3 ist im Vergleich zu Versuch 2 um 1° größer und entspricht demnach 2° . Zwar unterscheiden sich auch die Drehzahl und der Massenstrom leicht, jedoch wird dies für den Vergleich vernachlässigt. Die Temperaturskalen sind nicht identisch, da sich die absoluten Temperaturen beider Versuche deutlich unterscheiden. Auch die Achsen für die z - und φ -Positionen unterscheiden sich aufgrund des veränderten Fahrplans.

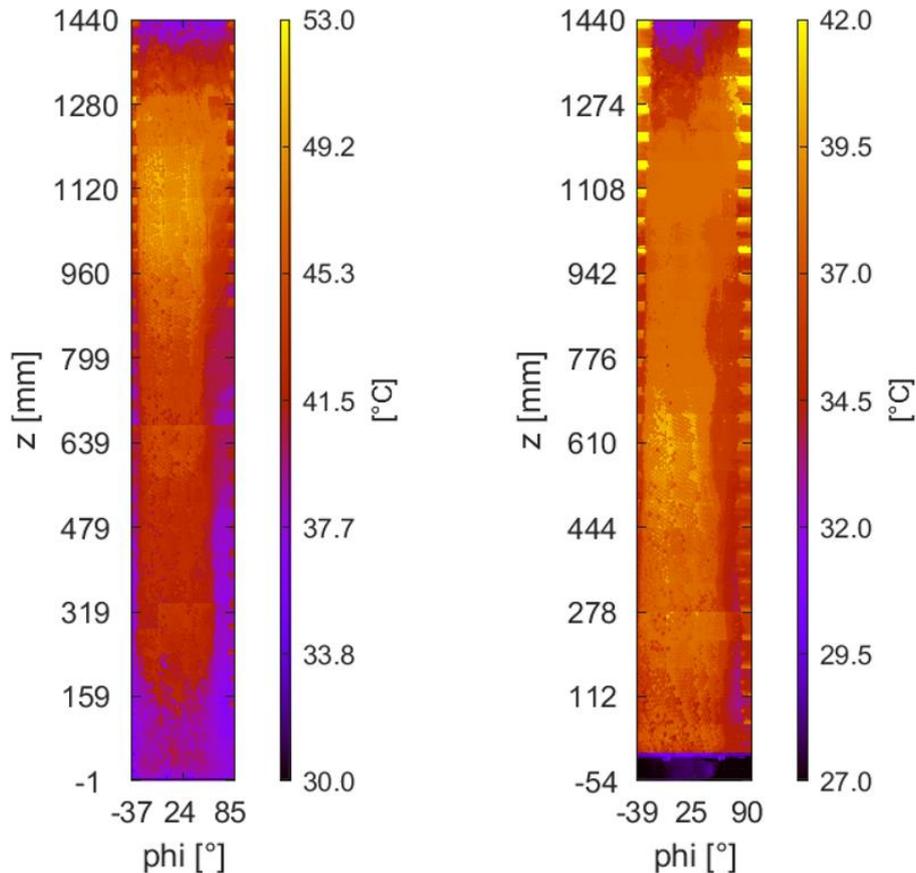


Abbildung 76: Temperaturverteilungen für Versuch 2 (links) und Versuch 3 (rechts)

Der größere Neigungswinkel führt zu einem gesteigerten Axialtransport der Partikel und somit zu einer Verringerung der Verweilzeit. Im Vergleich zur Drehzahlsteigerung bedeutet dies jedoch, dass die Partikel für den gleichen axialen Weg seltener an die Schüttbetoberfläche gelangen. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle Partikel gleichermaßen an die Oberfläche gelangen und gleichmäßig erwärmt werden sinkt somit. Die durch die verringerte Verweilzeit bedingte generelle Temperaturabsenkung ist hier deutlich erkennbar. Bei der Oberflächentemperaturverteilung des Versuchs 3 sind bereits im Bereich von $z=1275$ mm deutliche Inhomogenitäten zwischen linkem und rechtem Teil des Schüttbettes zu erkennen. Ab einer Position von $z=1250$ mm bleibt die Oberflächentemperatur bis zu einer Position von $z=1170$ mm nahezu konstant, obwohl dies dem beheizten Bereich des Drehrohres entspricht. Demnach gelangen fortlaufend kühlere Schichten an die Oberfläche, die erwärmt werden, da ansonsten eine kontinuierliche Temperatursteigerung auftreten würde. Jedoch kann dieser Eindruck auch durch die beschriebene ungenauen z-Achsen Positionierung der Einzelbilder entstehen. Im Vergleich zu Versuch 2 bleibt die Schüttbetoberflächentemperatur ab einer Position von $z=1170$ mm zunächst nahezu

konstant, beginnt jedoch ab einer Position von $z=700$ mm wieder zu steigen. Dies ist ein Indiz für eine Inhomogenität der Schüttbetttemperatur, da hier im Vergleich zu den übrigen Partikeln deutlich wärmere Partikel an die Oberfläche gelangen.

Demnach resultiert eine Steigerung des Neigungswinkels durch den deutlich höheren Axialtransport der Partikel in einer weniger homogenen Temperaturverteilung des Schüttbettes. Dies ist einerseits auf den geringeren Wärmeaustausch der Partikel untereinander durch Verkürzung der Verweilzeit zurückzuführen. Andererseits wird dies durch die ungleichmäßigere direkte Erwärmung der Partikel bedingt, die daraus resultiert, dass die Partikel bei Durchlaufen des Drehrohres weniger häufig an die Oberfläche gelangen.

Anhand des Vergleiches von Versuch 3 und 4 soll der Einfluss der Durchsatzsteigerung analysiert werden. Im Vergleich zu Versuch 3 ist der Massenstrom um 30 g/s höher und beträgt somit 50 g/s. Die übrigen Versuchsparameter sind identisch. Da sich die grundlegenden Temperaturen kaum unterscheiden, besitzen die Abbildungen die gleichen Temperaturskalen.

5.4 Simulation des axialen Schüttguttransportes mit gekoppeltem Wärmeeintrag in das Schüttbett (FS-1 AP4)

5.4.1 Simulation einer ruhenden Partikelschüttung

Wie zuvor beschrieben soll der in Kapitel 4.4.2 durchgeführte Versuch zur Aufheizung einer ruhenden Partikelschüttung simuliert werden. Aufgrund der geringeren Partikelanzahl und der damit verbundenen geringeren Rechenzeit wird in dieser Arbeit der Versuch zur Oberflächentemperaturmessung nachgebildet. Für die fluidseitige Berechnung wird die Software „ANSYS Fluent 17.2“ und für die feststoffseitige Berechnung der lehrstuhleigene DEM-Code verwendet. Die Koppelung geschieht anhand des blocked-off-Ansatzes.

Für Wärmeübertragungsfälle wird hier neben den zuvor beschriebenen mechanischen Modellen auch ein thermodynamisches Modell aktiviert, welches den Wärmeübergang zwischen dem Fluid und den Partikeln sowie zwischen den Partikeln untereinander berechnet. Des Weiteren können hier Reaktionsmodelle für chemische Umsetzungen implementiert werden.

Zunächst wird für den Vergleich mit einem Aufheizversuch, die Berechnungsdomäne für den in Abbildung 77 abgebildeten Behälter erzeugt. Zur Realisierung der Partikelschüttung wird zunächst eine separate, ungekoppelte DEM-Berechnung

durchgeführt, in welcher der Versuchsbehälter sukzessive mit Kugeln befüllt wird. Die so modellierte Kugelschüttung ist in Abbildung 77 dargestellt. Sie entspricht näherungsweise der Schüttung aus dem Vorversuch.

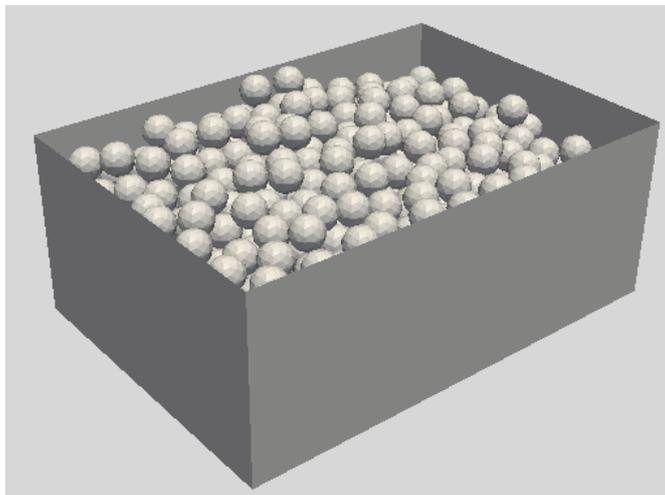


Abbildung 77: Modellierte Kugelschüttung

In einer entsprechenden Textdatei wird außerdem die Diskretisierung der einzelnen Partikel definiert, welche in diesem Fall in einer Finite-Volumendiskretisierung mit etwa 600 Tetraederelementen resultiert. Anhand dieser Diskretisierung wird die zeitlich und räumlich aufgelöste Temperaturverteilung der Partikel aufgrund der Wärmestrahlung berechnet.

Da sich der Heizstrahler in einem Abstand von 20 mm zur Behälteroberkante befindet, muss das Berechnungsgebiet im Vergleich zu den Behälterabmessungen um entsprechend 20 mm größer sein. Die Abmessungen des CFD-Gitters betragen somit 100x70x60 mm, wobei das Gasvolumen in ca. 200 000 Hexaederzellen unterteilt ist. Für nachfolgende Berechnungen muss das CFD-Gitter aufgrund der Approximation der Kugelformen deutlich verfeinert werden. In Abbildung 78 ist das verwendete CFD-Gitter skizziert.

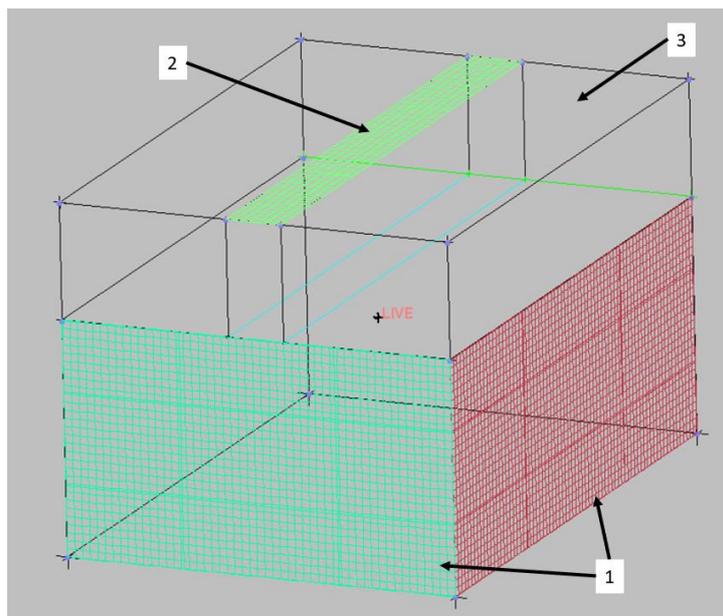


Abbildung 78: Für die Simulation verwendetes CFD-Gitter

Die mit Position 1 gekennzeichneten unteren Flächen stellen hierbei die Behälterwände dar und sind als adiabat angenommen. Position 2 stellt die 10 mm breite Querschnittsfläche des Strahlers dar, welche mit einer Temperatur von 1675 K und einem Emissionsgrad von 0,23 modelliert wird. Der Temperaturwert resultiert aus einer Abschätzung der Heizfadentemperatur für einen Teillastzustand von 750 W Einzelstrahlerleistung. Die Abschätzung geschieht mithilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes. Der Emissionsgrad von 0,23 entspricht dem für Wolfram nach Herstellerangaben. Die sich oberhalb des Behälters befindlichen Flächen (Position 3) sind auf eine konstante Temperatur von 295 K festgelegt und sollen die Umgebung abbilden. Die Berechnung des Wärmestrahlungsüberganges geschieht durch die Diskreten-Ordinaten-Methode (DOM), welche den raumwinkelabhängigen Strahlungsintensitätsverlauf abbildet.

Nach der Initialisierung des Simulationsmodelles wird das Strahlungsfeld zunächst ohne Kopplung berechnet. Anschließend werden die ersten Kopplungsschritte manuell ausgeführt. Anhand der in der DEM bestimmten Porosität können die von den Partikeln belegten CFD-Zellen im Querschnitt des Behälters identifiziert werden (vgl. Abbildung 79). Die Zahlenwerte definieren hierbei, ob die Zellen vollständig, teilweise oder gar nicht von Partikeln belegt sind.

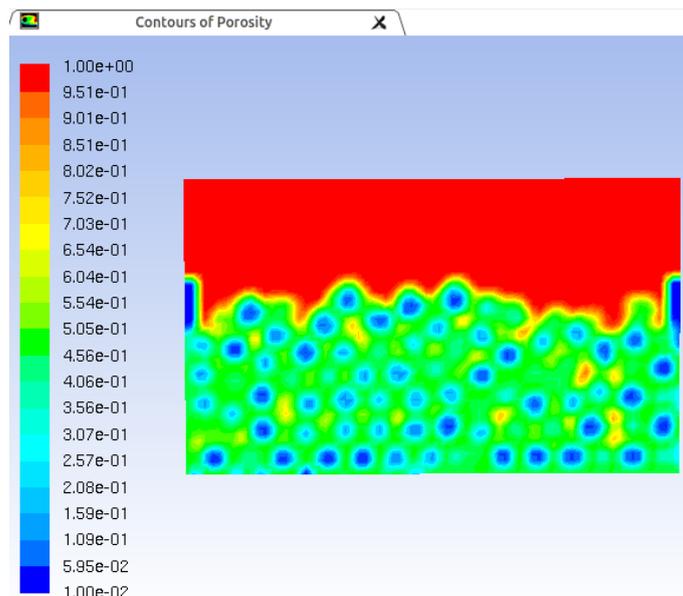


Abbildung 79: Durch Partikel belegte CFD-Zellen im Querschnitt des Behälters

Des Weiteren ist das gekoppelte Strahlungsfeld im Querschnitt des Behälters in Abbildung 80 dargestellt. Hier sind deutlich die Konturen der Partikel erkennbar. In den vollständig von Partikeln belegten Zellen wird der Quellterm des Strahlungstransportes so gesetzt, dass dieser dort, also im Inneren der Partikel, zu null wird.

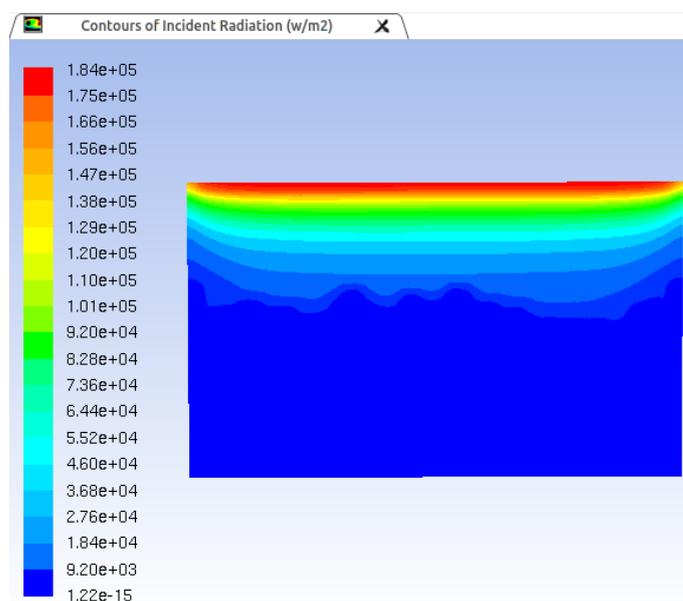


Abbildung 80: Strahlungsintensität im Querschnitt des Behälters

Abbildung 81 zeigt die Größe „Surface Radiation“, welche einer auf die Partikel auftreffenden, umgerechneten Strahlungsintensität entspricht. Die Intensität ist bei den sich in der Mitte befindlichen Partikeln am höchsten und bei den zum Strahler abgewandten Partikelflächen am geringsten. Zudem ist die Intensität bei den weiter außen befindlichen Partikeln geringer. Da der Strahler symmetrisch positioniert ist und

die Strahlungsintensität mit flacher werdendem Raumwinkel abnimmt, ist die auftreffende Strahlungsintensitätsverteilung somit realistisch.

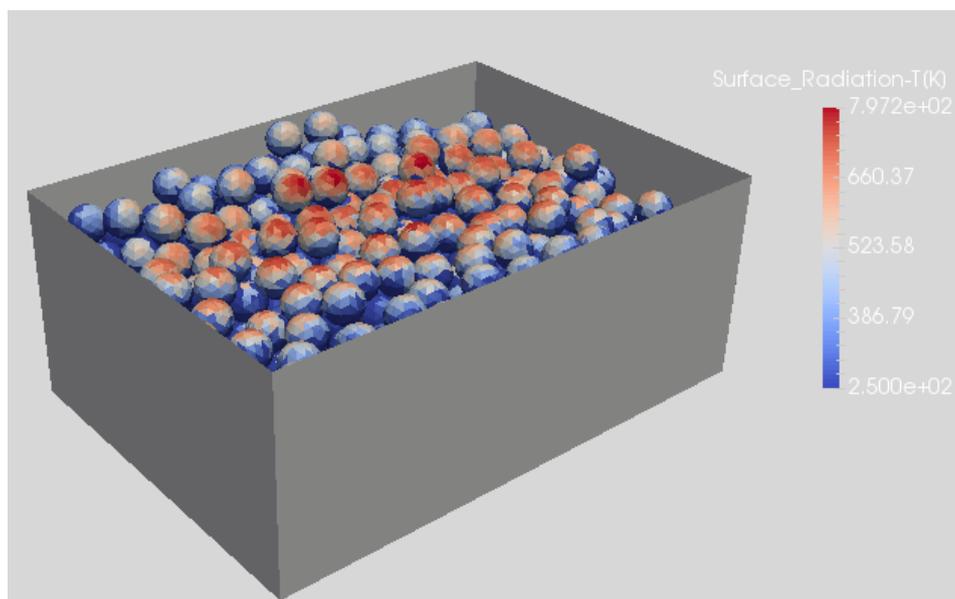


Abbildung 81: Auf die Partikel auftreffende „Surface Radiation“

Aus den Strahlungsintensitäten können somit die Temperaturänderungen der Partikel berechnet werden.

5.5 Simulation der Schüttgutreaktion von Blähton und Magnesit ohne Axialen Transport (FS-1 AP5)

Die Entwässerung und Entsäuerung magnesiumhaltiger Mineralien wird, in Anlehnung an den entsprechenden Vorgang beim Calciumcarbonat, ebenfalls als Calcinierung bezeichnet. Entsäuerungstemperatur und –geschwindigkeit von Magnesit hängen zudem stark von der Korngröße und Porosität des konkreten Rohmaterials ab.

Die theoretische Beschreibung des Zersetzungsvorgangs erfolgt in Anlehnung an die Vorgänge bei der Kalksteinentsäuerung und unterscheidet zwischen einem dichten Kern aus Magnesiumcarbonat, von einer Schale porösen Magnesiumoxids umgeben ist.

In Abbildung 82 wird dies skizziert.

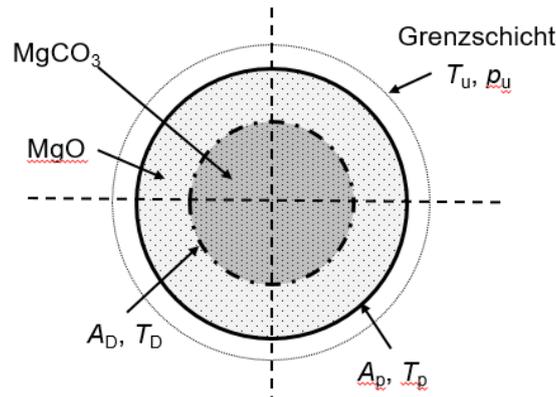


Abbildung 82: Kern-Schale Modell zur Beschreibung der Calcinierung

Auf der Skizze aufbauend wird ein Calcinierungsmodell entwickelt, das die Calcinierungsrate U_c in Abhängigkeit der radial aufgelösten geschwindigkeitsbestimmenden Parameter beschreibt. Die Umsatzrate der Calcinierung hängt hauptsächlich von der CO_2 -Konzentration des in den Poren vorhandenen Gases c_{CO_2} und von der Temperatur T ab. Im Gegensatz zum einfachen Kern-Schale Modell wird eine radial aufgelöste Partikeltemperatur aus dem Temperaturprofilmodell übergeben. Zur Berechnung der CO_2 -Konzentration werden die Stofftransportgleichungen der beteiligten Spezies gelöst. Hierbei wird sowohl der Stofftransport in den Poren durch Diffusion (Konzentrationsgradienten) als auch der Stofftransport über Advektion (Druckausgleich) berücksichtigt.

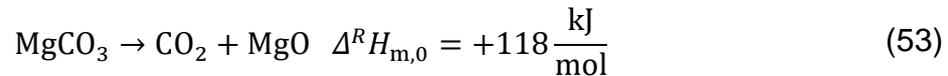
In einem Initialzustand 0 liegt ein kugelförmiges Partikel aus Magnesiumcarbonat vor ($U_c = 0$). Mit voranschreitender Calcinierung U_c schrumpft der Kern aus Magnesiumcarbonat kugelsymmetrisch und hinterlässt eine Schale aus Magnesiumoxid. Dabei ändert sich das Volumen der Kugel nicht, sondern nur die Massenanteile Y_i der Feststoffspezies verändern sich. Die Reaktionsfront D trennt den Kern aus unreaktiertem Magnesiumcarbonat von der Schale. Nach vollständiger Calcinierung besteht das Partikel aus reinem MgO ($U_c = 1$). Der Calcinierungsgrad des Partikels

$$U_c = \frac{m_{\text{MgCO}_3, \text{umgesetzt}}(t)}{m_{\text{MgCO}_3, 0}} = \frac{m_{\text{MgCO}_3, 0} - m_{\text{MgCO}_3}(t)}{m_{\text{MgCO}_3, 0} - m_{\text{MgCO}_3, \infty}} \quad (52)$$

ist definiert als das Verhältnis der zum Zeitpunkt t umgesetzten Masse an Magnesiumcarbonat zur Masse im Initialzustand 0 des Partikels p .

Das Magnesit Einzelpartikelmodell ist an das bereits bestehende Modell der Calcinierung von Kalkstein angelehnt (B. Krause 2015). Da es sich bei der Magnesit-

Entsäuerung um eine endotherme Reaktion handelt, muss zur Reaktionsdurchführung die Reaktionsenthalpie hinzugefügt werden. Diese beträgt unter Standardbedingungen von 25 °C +118 kJ/mol_{MgO}.



Bei der Temperatur T_D zersetzt sich das MgCO_3 an der Reaktionsfront in CO_2 und MgO nur dann, wenn der Gleichgewichts-Partialdruck

$$p_{\text{eq,CO}_2}(T_D) = 1,74 \cdot 10^{12} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta^R H_m}{R_m \cdot T_D}\right) [\text{Pa}] \quad (54)$$

kleiner ist als der lokale CO_2 Partialdruck,

$$p_{\text{CO}_2} = X_{\text{CO}_2} \cdot p_u \quad (55)$$

der mit der CO_2 Konzentration auch über das ideale Gasgesetz zusammenhängt.

$$c_{\text{CO}_2,\text{eq}} = \frac{p_{\text{CO}_2,\text{eq}}}{R_m \cdot T} \quad (56)$$

Gebildeter CO_2 -Massenstrom aus der Reaktion

Die Reaktionskonstante k_{MgCO_3} für die Calcinierungsreaktion kann aus dem erweiterten Arrhenius-Ansatz hergeleitet werden.

$$k_{\text{MgCO}_3}(T_D) = k_0 \cdot T_D^b \exp\left(-\frac{E_a}{R_m T_D}\right) \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right] \quad (57)$$

Die Koeffizienten lassen sich nach (Specht E., Kainer H. und Jeschar R. 1986) als $E_a = 55000 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$, $k_0 = 0,07459 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $b = 0$ bestimmen.

Damit ist er aus der Reaktionsfront A_D entstammende CO_2 Massenstrom

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = A_D(t) \cdot k_{\text{MgCO}_3} \cdot (p_{\text{CO}_2,\text{eq}} - p_{\text{CO}_2,D}) \cdot \frac{1}{R_{\text{CO}_2} \cdot T_D} \quad (58)$$

abhängig von der Differenz des Gleichgewichtspartialdrucks und dem an der Reaktionsfront vorzufindenden CO_2 -Partialdruck. Liegt die Temperatur T_D an der Reaktionsfront unterhalb der für die Zersetzungsreaktion erforderliche Zersetzungstemperatur würde die Rückreaktion der Re-Carbonisierung ablaufen.

Energiebilanz des Kerns

Um den obigen CO_2 Massenstrom zu initiieren, muss von außen ein Wärmestrom \dot{Q}_R aufgebracht werden.

$$\dot{Q}_R = m_{\text{MgCO}_3} \cdot c_{p,\text{MgCO}_3} \cdot \frac{dT_D}{dt} - \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot [\Delta^R h_{\text{CO}_2} + c_{p,\text{CO}_2} \cdot (T_P - T_D)] \quad (59)$$

Führen die lokalen Bedingungen dazu, dass $p_{\text{CO}_2,\text{eq}} < p_{\text{CO}_2,\text{D}}$ wird, dann muss der zugeführte Wärmestrom die Reaktionsenthalpie für die Reaktion aufwenden.

Wärmeleitung durch die Schale:

Der für die Calcinierung benötigte Wärmestrom wird durch Wärmeleitung an die Reaktionsfront geleitet. Mit Hilfe des Fourierschen Wärmeleitungsgesetzes $\dot{Q} = \lambda \cdot \vec{n} \cdot \text{grad } T \cdot A$ folgt für eine Kugel:

$$\dot{Q}_{\text{Leit}} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\frac{1}{r_D} - \frac{1}{r_p}} \cdot (T_p - T_D(t)) \cdot 4\pi. \quad (60)$$

Der effektive Wärmeleitungskoeffizient für die Schale errechnet sich aus den Massenanteilen und die Wärmeleitungskoeffizienten für deren Reinstoffe

$$\lambda_{\text{eff}} = Y_{\text{MgO}} \lambda_{\text{MgO}} + Y_{\text{CO}_2} \lambda_{\text{CO}_2} \quad (61)$$

Hierfür gilt:

$$Y_{\text{MgO}} + Y_{\text{CO}_2} = 1$$

$$Y_i = \frac{m_i}{m_p} \quad (62)$$

Die effektive Wärmeleitfähigkeit der porösen Schale λ_{eff} ist kleiner als die des dichten Kerns (λ_{CaCO_3}), wodurch Wärme von der Reaktionsfront zum Kern deutlich schneller geleitet werden kann als durch die Schale. Damit kann auf eine Bilanzierung der Wärmeleitung des Kerns verzichtet werden und es wird angenommen, dass im Kern keine Wärme in radialer Richtung transportiert wird und ein isothermes Temperaturprofil in radialer Richtung vorherrscht.

Wärmeübergang Gas auf Schale:

Der Wärmestrom von der Grenzschicht zur Umgebung des Partikels p ist unabhängig von seiner Geometrie definiert als:

$$\dot{Q}_{\text{Konv}} = \alpha \cdot (T_u - T_p) \cdot A_p \quad (63)$$

Für eine Kugeloberfläche gilt: $A_p = 4\pi \cdot r_p^2$

Aus dem Nusselt-Ansatz folgt für den Wärmeübergangskoeffizient α eines kugelsymmetrischen Partikels

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{\text{Gas}}}{d_p} \quad (64)$$

Die Nusselt-Zahl für sphärische Einzelpartikel kann nach (V. Gnielinski 1978) berechnet werden und ist abhängig von den thermodynamischen und strömungsmechanischen Größen der Umgebung.

Energiebilanz der Schale

Der konvektive Wärmestrom \dot{Q}_{Konv} erwärmt die äußere Schale. Durch Wärmeleitung wird ein Teil des zugeführten Wärmestroms an den Kern weitergeleitet. Aus der Energiebilanz der Schale folgt eine Temperaturerhöhung der Schale dem nachfolgenden Ansatz:

$$m_p (Y_{\text{CO}_2} \cdot c_{p,\text{CO}_2} + Y_{\text{MgO}} \cdot c_{p,\text{MgO}}) \cdot \frac{dT_p}{dt} = \dot{Q}_{\text{Konv}} - \dot{Q}_{\text{Leit}} - \dot{Q}_{\text{R}} \quad (65)$$

Die Masse der Magnesiumoxidschale ist proportional zur dritten Potenz des Reaktionsfrontradius r_D

$$m_{\text{MgO}} = \rho_{\text{MgO}} \cdot V = \rho_{\text{MgO}} \cdot \frac{4}{3} \pi (r_p^3 - r_D^3). \quad (66)$$

In der Bilanzierung wird die Erwärmung des austretenden CO_2 -Massenstroms berücksichtigt.

Diffusiver CO_2 -Transport durch die poröse Schicht

Der an der Reaktionsfront gebildete CO_2 Massenstrom wird durch die poröse Schale an die Umgebung geleitet. Dies lässt sich mit der nachfolgenden Gleichung beschreiben:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \left(\frac{D_{\text{CO}_2, \text{MgO}}^{\text{eff}}}{1 - \frac{p_{\text{CO}_2}(r)}{p_u}} \right) \cdot \frac{dp_{\text{CO}_2}}{dr} \cdot \frac{1}{R_{\text{CO}_2} \cdot T_{m,P}} \cdot A(r) \quad (67)$$

Durch die CO_2 -Quelle an der Reaktionsfront entsteht ein negativer Druckgradient in radialer Richtung, wodurch neben dem diffusiven Stofftransport durch die poröse Schale auch ein advektiver Strom einhergeht. Dieser kann mit dem Gesetz von Darcy gelöst werden, da die hierin getroffenen Annahmen einer inkompressiblen laminaren Strömung durch die Porosität der Schale gegeben sind.

Weiterhin enthalten ist der Stefanstrom. Dieser tritt bei einseitig gerichteter Diffusion auf. Für die restlichen Gaskomponenten der Umgebung (ausgenommen das CO_2) besteht ein Konzentrationsgradient zur Partikeloberfläche, wodurch ein diffusiver

Stoffstrom zum Partikel induziert wird. Der dichte Kern wirkt dabei wie eine semipermeable Membran. Aus Kontinuitätsgründen muss ein betragsmäßig gleicher Massenstrom (Stefanstrom) das Partikel verlassen.

Der effektiv in einer porösen Schicht zu überwindende Diffusionswiderstand setzt sich zusammen aus dem molaren Diffusionskoeffizienten und dem Knudsen-Diffusionskoeffizienten. Nach der Methode von (Fuller et al. 1969) wird der molare Diffusionskoeffizient für CO₂ abgeschätzt.

$$D_{\text{CO}_2, \text{MgO}}^{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_{\text{MgO}}}{\tau^2} \left(\frac{1}{D_{\text{mol}, \text{CO}_2}} + \frac{1}{D_{\text{Kn}, \text{CO}_2}} \right)^{-1} \quad (68)$$

Stoffübergang an die Strömung

Der Stoffübergang des CO₂ von der Partikeloberfläche durch die Gasphasen-Grenzschicht wird vom Stoffübergangskoeffizienten

$$\beta_{\text{CO}_2} = Sh \frac{D_{\text{CO}_2, i}}{d_p} \quad (69)$$

bestimmt. Die Sherwood Zahl lässt sich analog zur Nusselt Zahl bestimmen und hängt ebenfalls vom Strömungszustand ab.

Der von der Partikeloberfläche auf die Grenzschicht übertragene CO₂ Massenstrom lässt sich damit durch die nachfolgende Gleichung berechnen:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \beta \cdot \left(\frac{p_{\text{CO}_2, u}}{R_m \cdot T_u} - \frac{p_{\text{CO}_2, p}}{R_m \cdot T_p} \right) \cdot A_p \quad (70)$$

Massenbilanz im Partikel

Um das Gleichungssystem zu schließen wird neben der Energie- auch noch eine Massenbilanz benötigt.

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \rho_{\text{CO}_2} 4\pi r_D^2 \frac{d(r_D)}{dt} \quad (71)$$

Diese beschreibt den CO₂-Transport in Abhängigkeit der Calcinierungsgeschwindigkeit.

Abbildung 83 zeigt die Magnesitcalciniierung am Einzelpartikel. Hierbei verringert sich der Massenanteil von MgCO₃ mit steigender Temperatur und fortschreitender Zeit. Nachdem das gesamte MgCO₃ in MgO und CO₂ umgesetzt wurde, diffundiert das CO₂ mit der Zeit aus dem Partikel.

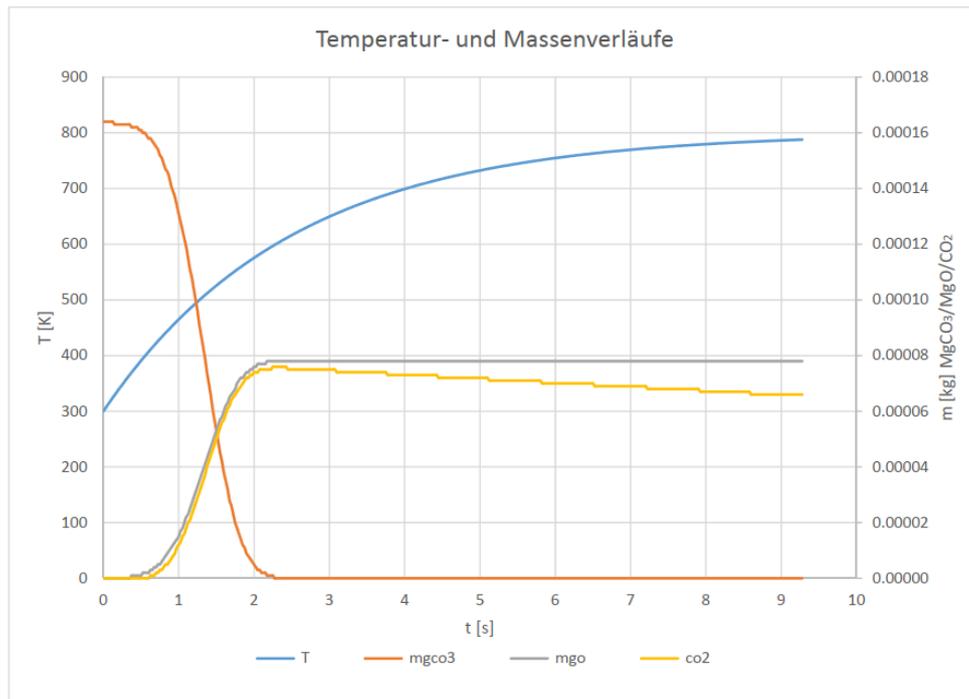


Abbildung 83: Magnesitkalzinierung in Abhängigkeit der Temperatur

5.6 Simulation des axialen Schüttguttransports mit Kopplung von Wärmeeintrag und Schüttgutreaktion (FS-1 AP6)

Die ursprünglich vorgesehene vollständige Kopplung von Wärmeeintrag und Schüttgutreaktion wurde, da in FS2 anstelle von Magnesit nur Dolomit verwendet werden konnte und damit also auch keine experimentellen Vergleichsdaten zur Verfügung standen, nicht realisiert. Für die Reaktionsbeschreibung von Dolomit, welches in einem zweigeteilten Prozess kalziniert, sind weiterführende Überlegungen und Modifikationen nötig.

Die Modellierung der Erdgasflamme des Drehrohrs ist nachfolgend aufgezeigt und würde so als Grundlage für Simulationen der Dolomit-Kalziniierung genutzt werden.

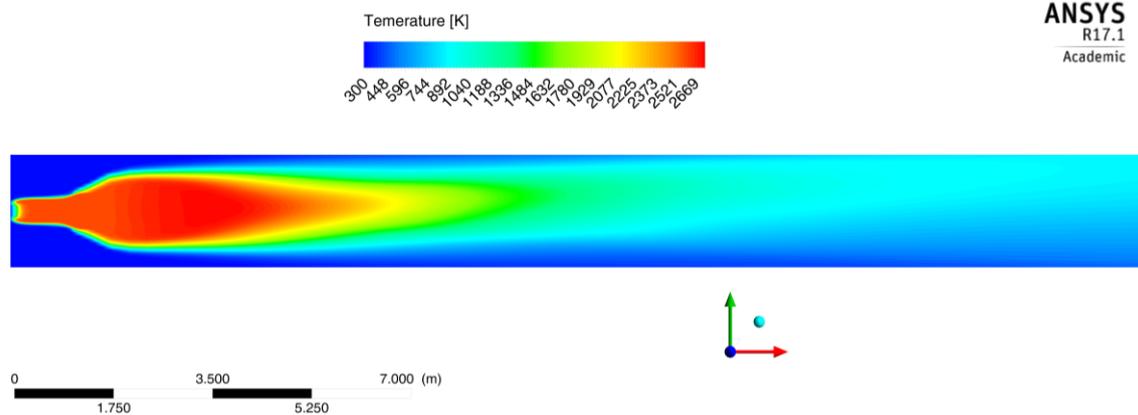


Abbildung 84: Modellierung einer Erdgasflamme

5.7 Untersuchung des Wärmeeintrags im kontinuierlichen Betrieb (FS-2 AP1)

5.7.1 Transversales Temperaturprofil

Abbildung 85 zeigt exemplarisch ein transversales Temperaturprofil für den Fall einer Trocknung bei kontinuierlichem Betrieb im stationären Zustand.

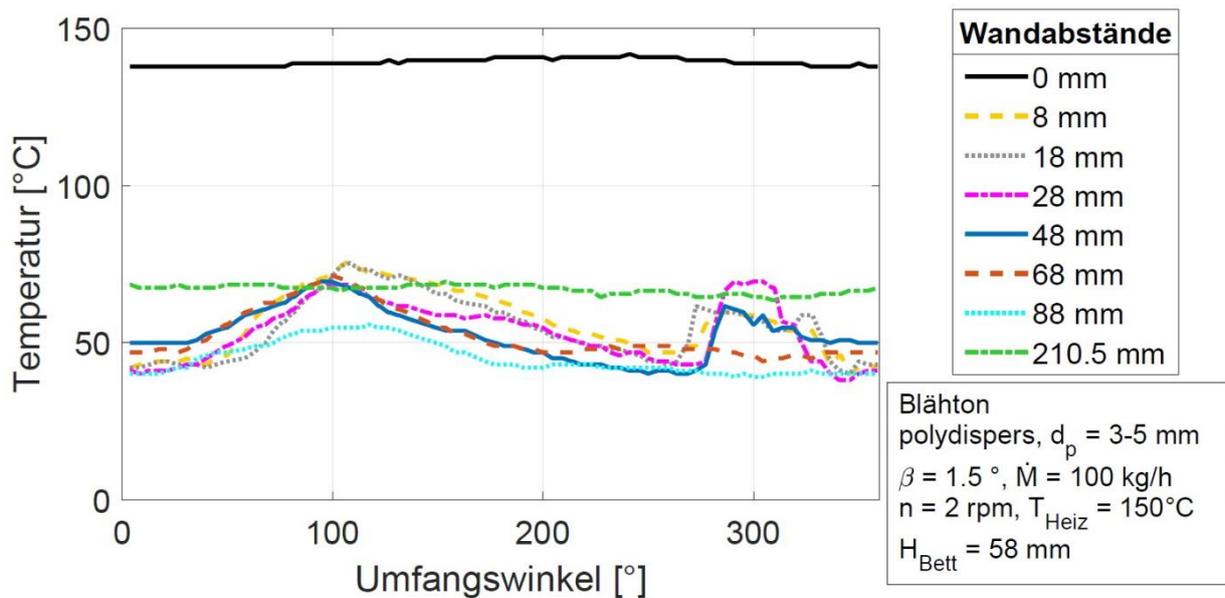


Abbildung 85: Exemplarisches transversales Temperaturprofil an mittlerer Ofenposition

Da die Beheizung des Drehrohrs indirekt, also von außen erfolgt, ist die Wandtemperatur stets am höchsten. Die Wärme wird von der Wand an die Schüttung und die Luft übertragen. Während das Thermoelement, welches sehr mittig im Ofen rotiert eine nahezu gleichbleibende Temperatur misst, schwanken die Temperaturen der anderen Thermoelemente innerhalb der Gasphase stärker. Bei einem Umfangswinkel von ca. 270° beginnen die Thermoelemente nacheinander, je nach Wandabstand, in die Schüttung einzutauchen. Dies ist durch ein sprunghaftes Ansteigen der Temperatur zu erkennen. Für das vorliegende Experiment wurde eine

Schüttbetthöhe von 58 mm ermittelt. Auch im Temperaturprofil steigen nur die Temperaturen der Thermoelemente an, die einen geringeren Wandabstand als 58 mm haben. Die Thermoelemente, die nicht in die Schüttung eintauchen messen während der gesamten Umdrehung die Lufttemperatur.

5.7.2 Axiales Temperaturprofil

In Abbildung 86 ist exemplarisch für die kontinuierliche Trocknung von Blähton ein axiales Temperaturprofil dargestellt.

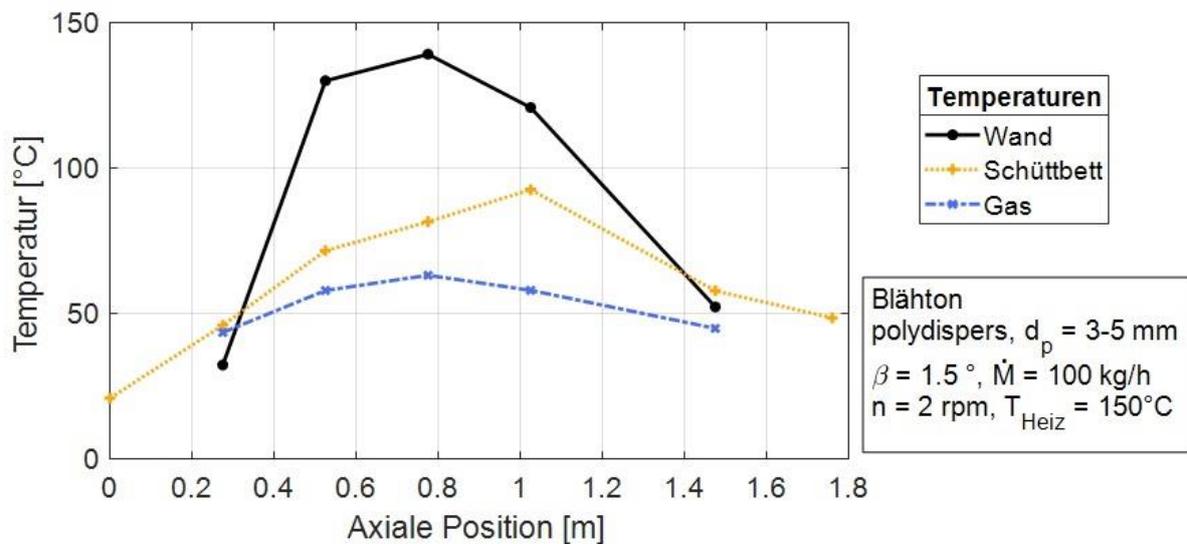


Abbildung 86: Exemplarisches axiales Temperaturprofil

Der mittlere Bereich des Ofens wird von außen beheizt, daher sind an diesen Positionen die Wandtemperaturen am höchsten. An den Stirnseitenflächen geht Wärme an die Umgebung über, die Wandtemperatur ist an den äußeren Positionen deutlich geringer. Der feuchte Blähton wird mit Umgebungstemperatur über den Zuförderer aufgegeben und erwärmt sich während des axialen Transports im Drehrohr. Dabei ist zu erkennen, dass der Temperaturanstieg zunächst steiler ist und später etwas abflacht. Die für den Wärmeübergang maßgebliche Triebkraft ist die Temperaturdifferenz zwischen der Wand und der Schüttung, welche sich mit zunehmender Verweilzeit des Materials im Drehrohr verringert. Außerhalb des beheizten Bereichs kühlt sich der Blähton wieder ab. Auch die Lufttemperatur ist im beheizten Bereich deutlich höher als in der Nähe des Ein- bzw. Auslasses.

5.8 Untersuchung der Trocknung von Blähton, transversal (im Batch Versuch) (FS-2 AP2)

5.8.1 Zeitliches Temperaturprofil

Dies ist in Abbildung 87 beispielhaft für die thermische Behandlung von trockenem (durchgezogene Linie) und feuchtem Blähton (gestrichelte Linie) im Batch-Betrieb dargestellt.

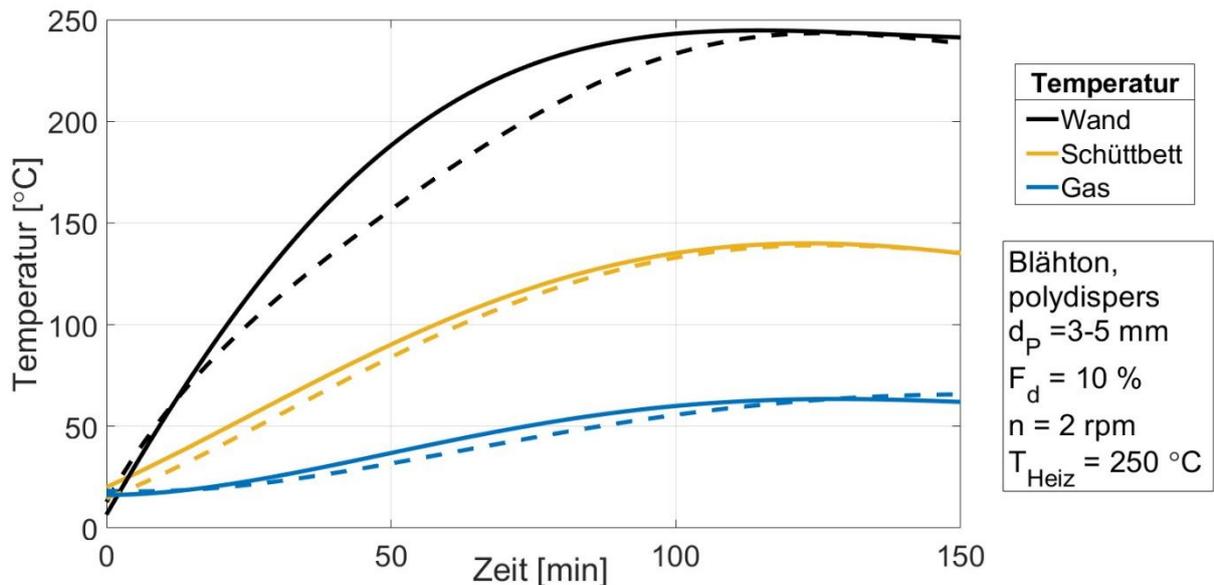


Abbildung 87: Exemplarisches axiales Temperaturprofil für trockenen Blähton (durchgezogene Linie) und feuchtem Blähton (gestrichelte Linie)

Zunächst steigt die Wandtemperatur an, da die Beheizung indirekt erfolgt. Die Temperatur der Schüttung steigt schneller an, als die der Luft. Bei der Beheizung des feuchten Materials ist der Temperaturanstieg von Wand, Schüttung und Gas deutlich langsamer als im Fall des trockenen Materials, da ein Teil der zugeführten Wärme für die Verdampfung des Wassers aufgewendet wird.

5.8.2 Einfluss des Füllungsgrades auf die Trocknungsrate

Abbildung 88 stellt die maximale Trocknungsrate für verschiedene Partikelgrößenklassen in Abhängigkeit des Füllungsgrades dar.

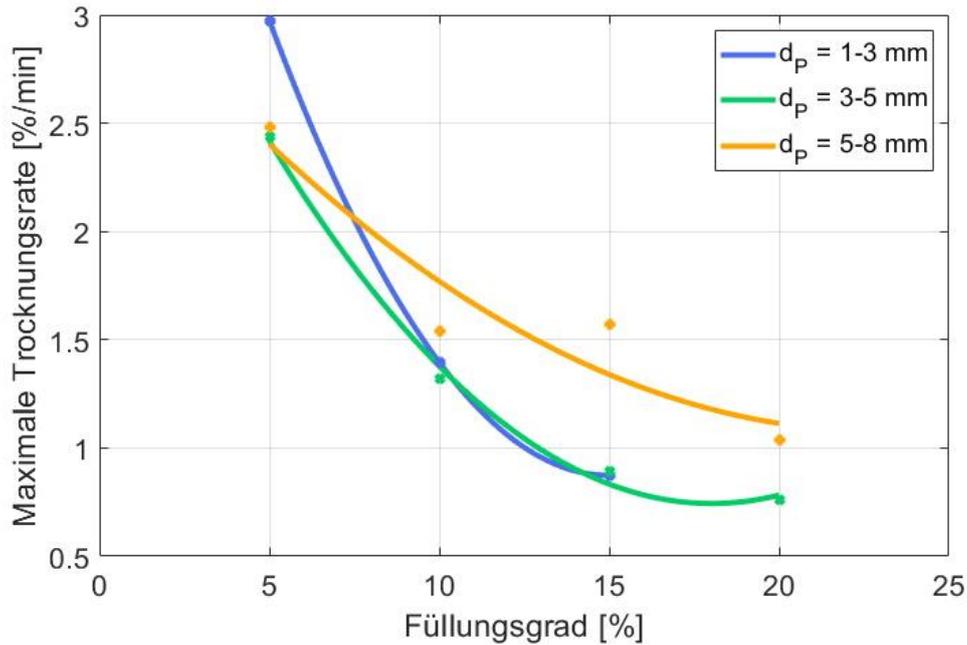


Abbildung 88: Maximale Trocknungsrate unterschiedlicher Partikelgrößen in Abhängigkeit des Füllungsgrades

Bei geringerem Füllungsgrad findet die Trocknung des Materials schneller statt. Da bei gleichbleibender Heizleistung weniger Material getrocknet und somit weniger Energie zur Verdampfung des Wassers verwendet werden muss, kann die Trocknung schneller ablaufen. Bei kleinen Partikelgrößen ist dieser Effekt stärker ausgeprägt, mit steigender Partikelgröße nimmt der Einfluss des Füllungsgrades ab. Da bei größeren Partikeln das Wasser zunächst vom Inneren des Partikels nach Außen transportiert werden muss, limitiert dieser Mechanismus die Geschwindigkeit der gesamten Trocknung.

Der Einfluss der Drehzahl auf die maximale Trocknungsrate für unterschiedliche Partikelgrößen ist in Abbildung 89 dargestellt.

5.8.3 Einfluss der Drehzahl auf die Trocknungsrate

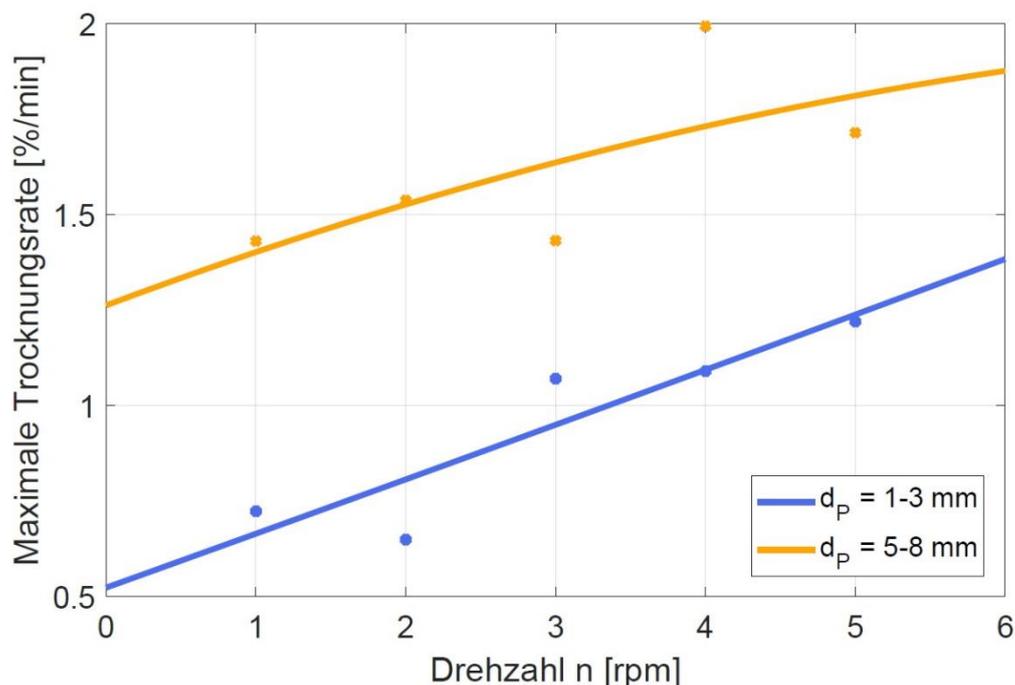


Abbildung 89: Maximale Trocknungsrate unterschiedlicher Partikelgrößen in Abhängigkeit der Drehzahl

Mit steigender Drehzahl erhöht sich die maximale Trocknungsrate. Die Trocknung findet hauptsächlich über die freie Bettoberfläche statt, wo das Wasser konvektiv in das Gas übergeht. Bei geringen Drehzahlen bleibt das feuchte Material lange an der Wand des Drehrohrs bzw. verbleibt in der Mitte des Schüttbetts. Dies führt dazu, dass die Wärme zunächst tief in die Schüttung eindringen muss, bevor der Kern erwärmt wird. Die Durchmischung wird mit steigender Drehzahl erhöht, was dazu führt, dass das Schüttbett einheitlicher trocknen und insgesamt schneller trocknen kann. Der Einfluss der Drehzahl ist bei beiden untersuchten Partikelgrößenklassen gleich stark ausgeprägt, jedoch liegt die maximale Trocknungsrate von größeren Partikeln insgesamt höher. Insgesamt wurde festgestellt, die Fraktion von 5-8 mm auch während der Befeuchtung mehr Wasser aufnehmen konnte, als die kleineren Partikel mit einem Durchmesser von 1-3 mm.

5.9 Untersuchung der Dolomitzersetzung (FS-2 AP3)

5.9.1 Einfluss der Dolomitsorte auf die Zersetzung

Während der Untersuchung der Zersetzung im Rohrofen wurden zwei verschiedene Dolomitsorten verwendet.

Die Versuche wurden unter gleichen Bedingungen und mit gleichen Parametern durchgeführt. Nach der Trocknung der Proben wird der Rohrofen mit einer Aufheizrate

von 5 K/min auf 750 °C geheizt. Von unten strömt ein CO₂-Volumenstrom von 1 m³/h durch den Rohrofen (vgl. Abbildung 90).

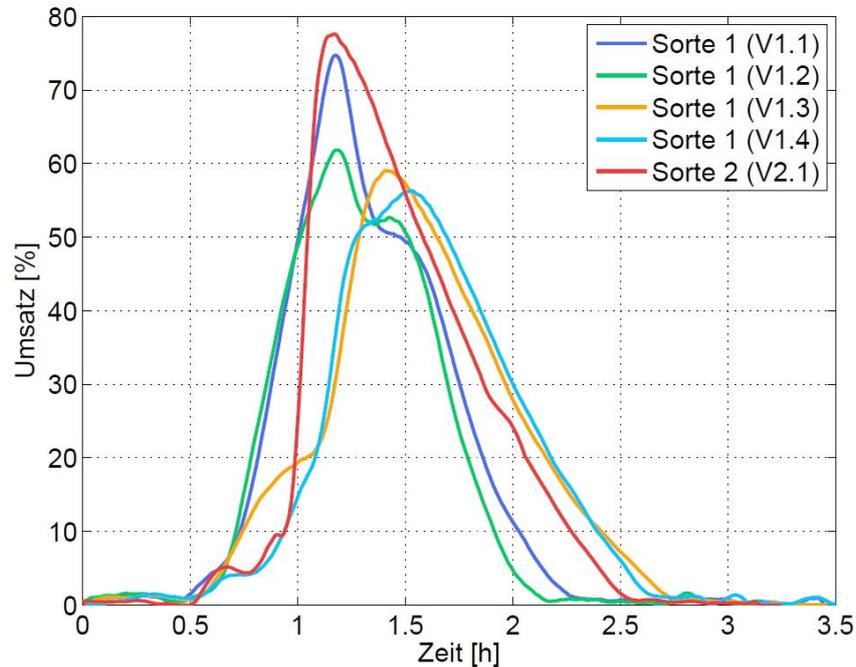


Abbildung 90: Einfluss der Dolomitsorte auf den Umsatz

Der Verlauf der Umsätze ist für alle gezeigten Experimente relativ ähnlich. Bei ca. einer halben Stunde beginnt die erste Reaktion und der Umsatz steigt stark an. Nach Erreichen des maximalen Umsatzes bei ca. 1 bzw. 1,5 Stunden sinkt der Umsatz wieder ab und nach 3 Stunden ist die erste Reaktion vollständig abgeschlossen.

Es zeigt sich, dass die Unterschiede im Verlauf des Umsatzes zwischen den beiden Dolomitsorten nicht größer ist, als die Schwankungen innerhalb einer Dolomitsorte.

5.9.2 Einfluss der Partikelgröße auf die Zersetzung

Abbildung 91 zeigt den Einfluss der Partikelgröße auf die Zersetzung.

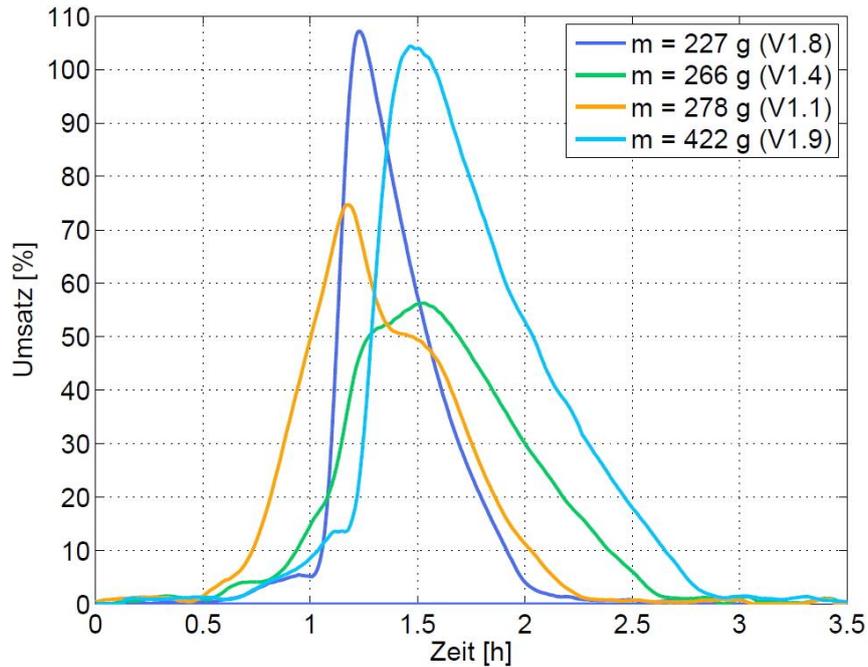


Abbildung 91: Einfluss der Partikelgröße auf den Umsatz

Es wurden vier Versuche mit unterschiedlich großen Dolomitstücken durchgeführt, die jeweils vor dem Versuch gewogen wurden. Ein direkter Einfluss der Probengröße auf den Umsatz zeigt sich nicht.

5.9.3 Einfluss der Temperatur auf die Zersetzung

Der Effekt der Temperatur auf die Zersetzung von Dolomit ist in Abbildung 92 gezeigt.

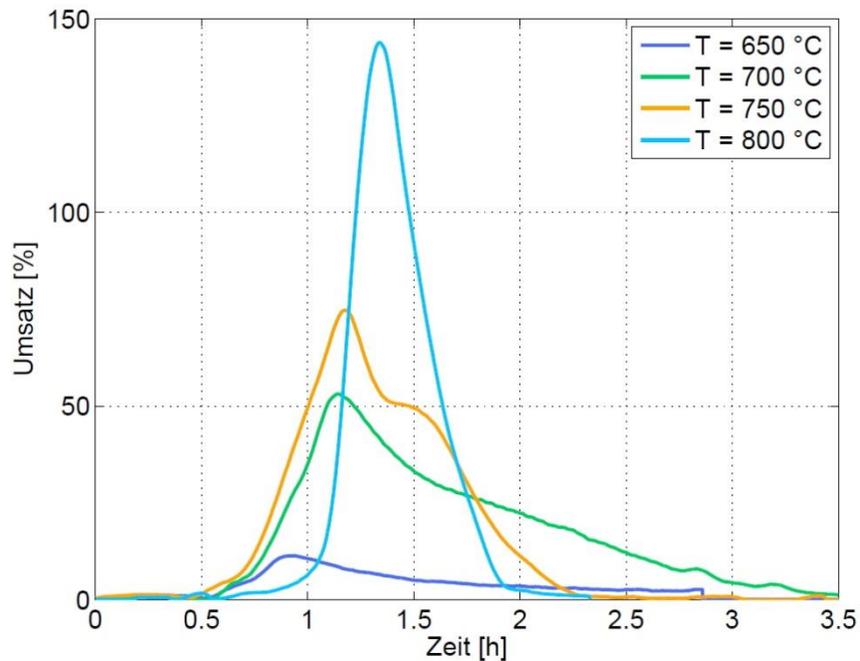


Abbildung 92: Einfluss der Temperatur auf den Umsatz

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperatur direkten Einfluss auf dem Umsatz hat. Bei geringen Temperaturen beginnt die Zersetzung zur selben Zeit, wie bei höheren Temperaturen, die Umsätze steigen jedoch deutlich langsamer an und erreichen eher ihr Maximum. Die Zersetzung dauert außerdem wesentlich länger als im Fall von hohen Temperaturen. Insgesamt kann bei geringen Temperaturen auch nicht der komplette Anteil des Magnesiumcarbonats ausreagieren.

Die Temperatur hat einen sehr großen Einfluss auf die Reaktion des Dolomits und ist daher essenzielle Regelgröße zur Steuerung des Prozesses.

5.10 Untersuchung der Trocknung mit axialem Transport (FS-2 AP4)

5.10.1 Einfluss des Massenstroms auf die Trocknungsrate

Wie in Kapitel 0 erläutert, wurde die Trocknungsrate für die unterschiedlichen Versuche bestimmt um den Einfluss der variierten Parameter sichtbar zu machen.

Abbildung 93 zeigt die Abhängigkeit der Trocknungsrate vom Massenstrom.

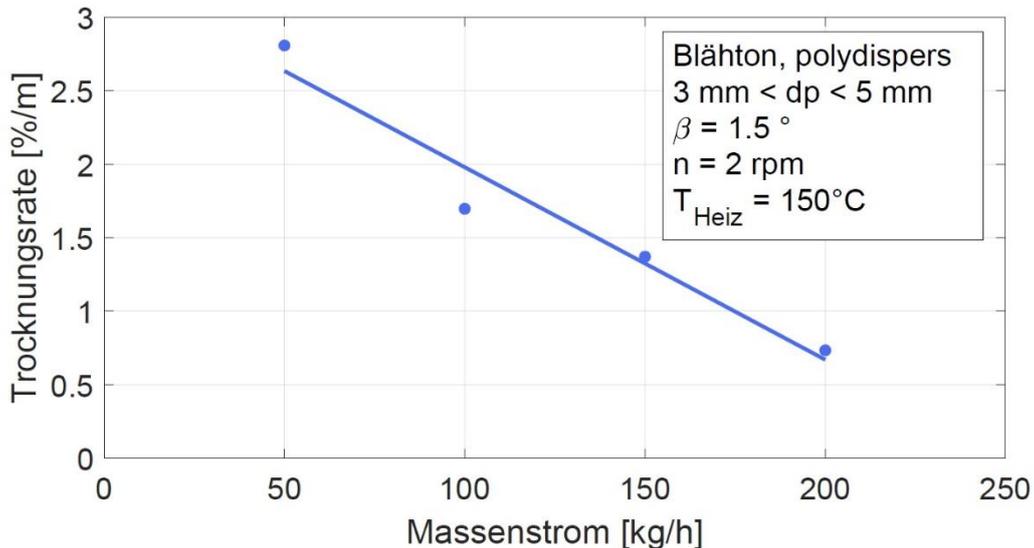


Abbildung 93: Maximale Trocknungsrate in Abhängigkeit des Massenstroms im kontinuierlichen Versuch

Bei geringen Massenströmen befindet sich insgesamt weniger Material im Drehrohr, das Schüttbetthöhenprofil ist insgesamt niedriger. Dies führt dazu, dass bei geringen Massenströmen die Trocknungsrate höher ist. Mit steigenden Massenströmen nimmt die Trocknungsrate ab.

Da in der Industrie der Massenstrom eine vorgegebene Größe ist, muss die Auslegung des Drehrohrs (Länge und Durchmesser) entsprechend geplant werden.

5.10.2 Einfluss der Drehzahl auf die Trocknungsrate

Der Einfluss der Drehzahl auf die Trocknungsrate ist in Abbildung 94 dargestellt.

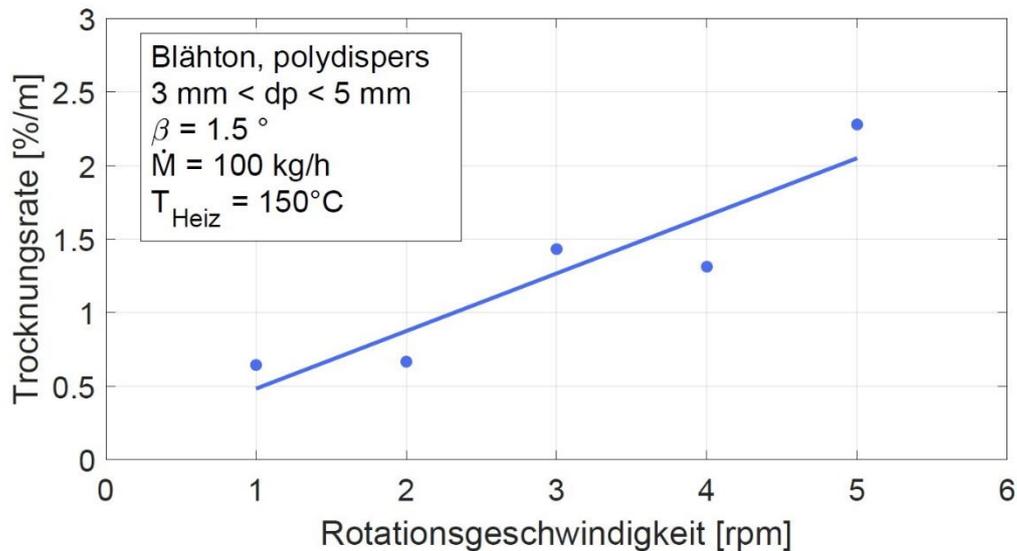


Abbildung 94: Maximale Trocknungsrate in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit im kontinuierlichen Versuch

Bei geringen Drehzahlen ist die Trocknungsrate gering. Mit steigender Drehzahl verbessert sich die Trocknung. Die Drehzahl beeinflusst direkt das transversale Bewegungsverhalten des zu behandelten Materials. Mit steigender Drehzahl wird die Durchmischung des Materials erhöht, die Temperaturunterschiede innerhalb des Schüttbetts sind geringer, es wird also eine einheitlichere thermische Behandlung erreicht. Außerdem kommen die Partikel häufiger an die Oberfläche und haben dann Kontakt mit der Luftphase. Während des Kontakts mit der Luftphase kann der Stoffübergang des Wassers von der Schüttung an die Luft optimal stattfinden.

Als zusätzlicher Effekt, reduziert sich die Schüttbetthöhe mit steigender Rotationsgeschwindigkeit. Die Verweilzeit der Partikel im Drehrohr sinkt, dafür befindet sich jedoch weniger Material im Querschnitt des Drehrohrs, was die Trocknungsrate positiv beeinflusst.

Da eine erhöhte Drehzahl auch mit einem erhöhten energetischen Aufwand verbunden ist, muss hier in jedem Fall die wirtschaftlich günstigste Fahrweise ermittelt werden.

5.10.3 Einfluss des Neigungswinkels auf die Trocknungsrate

In Abbildung 95 ist die Trocknungsrate in Abhängigkeit des Neigungswinkels dargestellt.

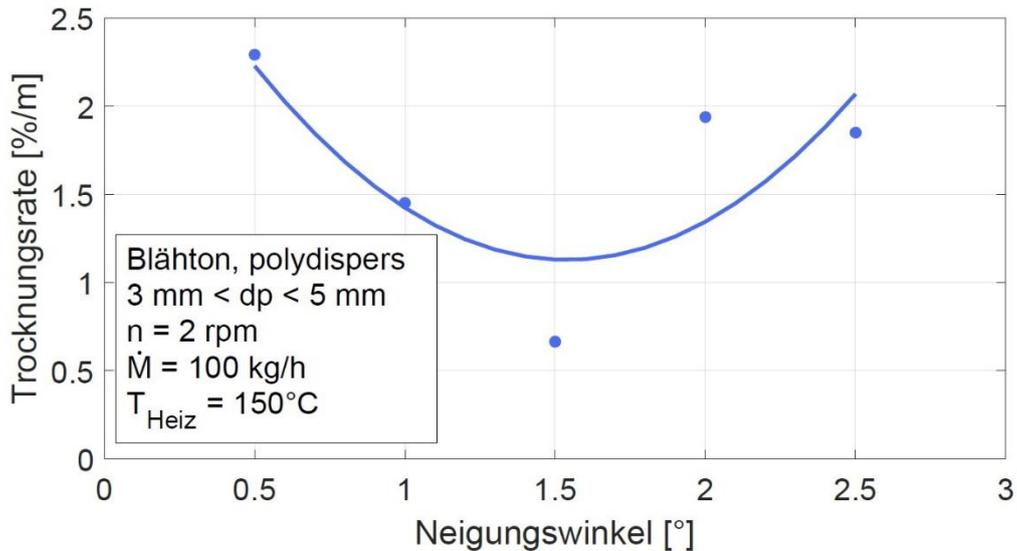


Abbildung 95: Maximale Trocknungsrate in Abhängigkeit des Neigungswinkels im kontinuierlichen Versuch

Bei Erhöhung des Neigungswinkels wird hauptsächlich die axiale Bewegung des Materials beeinflusst. Mit steigendem Neigungswinkel des Rohres bewegt sich das Material schneller durch das Drehrohr, was dazu führt, dass das Material kürzer thermisch behandelt wird. Dies beeinflusst die Trocknungsrate negativ. Als weiterer Effekt sinkt jedoch auch die Schüttbetthöhe, weshalb sich weniger Material im Querschnitt befindet. Die Trocknungsrate steigt aufgrund dieses Effekts. Betrachtet man den ermittelten Verlauf der Trocknungsrate, so ist erkennbar, dass die Trocknungsrate zunächst bis zu einem Neigungswinkel von 1,5 ° absinkt und dann wieder größer wird. Eine mögliche Erklärung wäre, dass bei kleinen Neigungswinkeln der Effekt der sinkenden Verweilzeit einen höheren Einfluss hat. Bei Neigungswinkeln über 1,5 ° dann jedoch der Effekt der sich verringernden Schüttbetthöhe größer ist.

5.11 Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Dolomit (FS-2 AP5)

Nachfolgend sind die Ergebnisse für die Schüttwinkel der untersuchten Materialien Blähton und Dolomit dargestellt.

Tabelle 8: Dynamische Schüttwinkel von trockenem Blähton in Abhängigkeit von Partikelgröße, Füllungsgrad und Rotationsgeschwindigkeit

d_p [mm]	f_D [%]	n [rpm]	θ [°]
1-3 mm	5	1	33,3
		2	34,6
		3	34,0
		4	34,2
		5	33,7
	10	1	33,7
		2	34,0
		3	34,1
		4	34,1
		5	33,8
	15	1	34,2
		2	34,2
		3	34,7
		4	34,3
		5	33,8
	20	1	39,6
		2	34,4
		3	34,5
		4	34,8
		5	33,9
3-5 mm	5	1	32,7
		2	32,7
		3	33,5
		4	32,8
		5	32,0
	10	1	32,5
		2	33,3
		3	32,8
		4	33,0
		5	33,2
	15	1	31,6
		2	32,4
		3	32,6
		4	32,7
		5	32,9
	20	1	32,5
		2	33,2
		3	32,5
		4	33,4
		5	33,7

d_p [mm]	f_D [%]	n [rpm]	θ [°]
5-8 mm	5	1	29,5
		2	39,2
		3	29,7
		4	27,9
		5	29,9
	10	1	31,2
		2	32,5
		3	32,1
		4	31,4
		5	31,4
	15	1	33,0
		2	32,0
		3	31,8
		4	32,1
		5	32,5
	20	1	32,5
		2	33,0
		3	31,3
		4	32,3
		5	33,0

Tabelle 9: Dynamische Schüttwinkel von feuchtem Blähton in Abhängigkeit von Partikelgröße, Füllungsgrad und Rotationsgeschwindigkeit

d_p [mm]	f_D [%]	n [rpm]	θ [°]
1-3 mm	5	1	37,5
		2	37,7
		3	37,0
		4	37,5
		5	37,5
	10	1	38,0
		2	38,5
		3	37,6
		4	36,0
		5	36,5
	15	1	37,5
		2	37,7
		3	37,2
		4	37,3
		5	37,3
	20	1	37,6
		2	38,8
		3	37,1
		4	37,2
		5	38,2

d_p [mm]	f_D [%]	n [rpm]	θ [°]
3-5 mm	5	1	38,6
		2	38,6
		3	35,8
		4	41,9
		5	38,8
	10	1	38,6
		2	38,3
		3	38,1
		4	38,8
		5	39,1
	15	1	38,1
		2	41,7
		3	40,1
		4	39,0
		5	39,0
	20	1	38,1
		2	38,7
		3	39,2
		4	38,8
		5	39,5
5-8 mm	5	1	31,0
		2	34,0
		3	30,0
		4	30,5
		5	30,2
	10	1	31,9
		2	32,3
		3	32,3
		4	32,2
		5	32,6
	15	1	31,7
		2	32,8
		3	32,7
		4	32,3
		5	32,0
	20	1	32,7
		2	33,0
		3	33,0
		4	32,4
		5	33,2

Abbildung 96 zeigt die Änderung des Schüttwinkels je nachdem ob feuchtes oder trockenes Material verwendet wird.

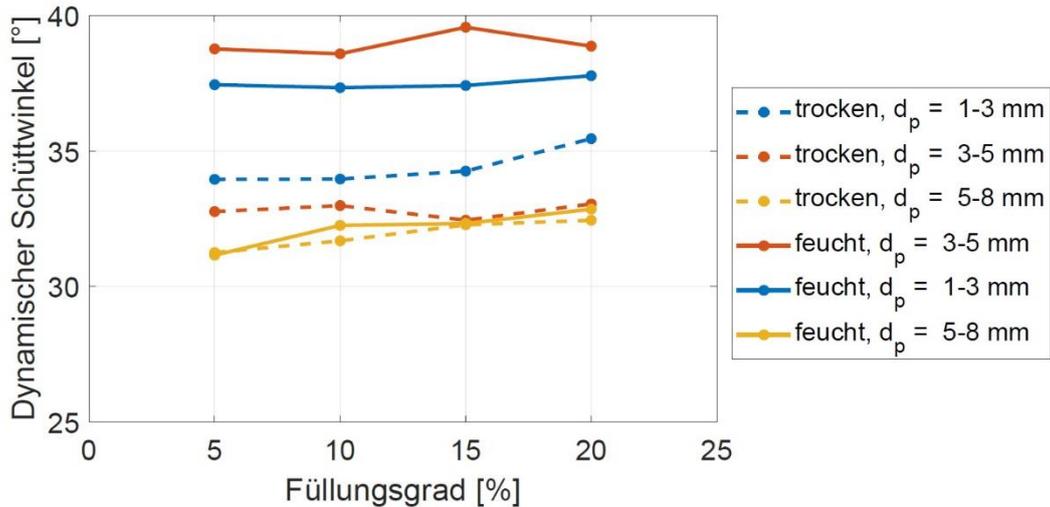


Abbildung 96: Dynamischer Schüttwinkel von feuchtem und trockenem Blähton

Insgesamt schwanken alle gemessenen Schüttwinkel zwischen 32 ° und 40 °. Dabei weist das feuchte Material prinzipiell höhere Winkel auf, als das trockene. Tendenziell sinkt der dynamische Schüttwinkel mit steigender Partikelgröße. Der Einfluss von Füllungsgrad sowie Drehzahl ist minimal, weshalb in der weiteren Auswertung mit mittleren Füllwinkeln gearbeitet wurde, siehe Tabelle 9.

Tabelle 10: Dynamische Schüttwinkel von feuchtem bzw. trockenem Blähton in Abhängigkeit der Partikelgröße

	d _p [mm]	θ [°]
trocken	1-3 mm	34,4
	3-5 mm	32,8
	5-8 mm	31,9
feucht	1-3 mm	37,5
	3-5 mm	38,9
	5-8 mm	32,1

Tabelle 11: Dynamische Schüttwinkel von unreaktiertem Dolomit in Abhängigkeit von Partikelgröße, Füllungsgrad und Rotationsgeschwindigkeit

d_p [mm]	f_D [%]	n [rpm]	θ [°]
1-5 mm	5	1	39,4
		2	37,7
		3	37,5
		4	37,8
		5	37,1
	10	1	40,9
		2	40,8
		3	37,9
		4	37,0
		5	36,7
	15	1	40,0
		2	38,1
		3	37,8
		4	37,8
		5	38,1
	20	1	40,3
		2	38,2
		3	38,0
		4	38,6
		5	37,8
5-8 mm	5	1	39,0
		2	38,3
		3	37,9
		4	36,9
		5	36,5
	10	1	39,5
		2	36,8
		3	37,3
		4	36,8
		5	36,5
	15	1	38,7
		2	36,9
		3	36,6
		4	37,5
		5	36,5
	20	1	39,8
		2	37,7
		3	37,3
		4	37,0
		5	36,9

d_p [mm]	f_D [%]	n [rpm]	θ [°]
8-10 mm	5	1	38,4
		2	38,4
		3	38,1
		4	36,3
		5	36,0
	10	1	39,0
		2	37,8
		3	38,2
		4	37,1
		5	36,8
	15	1	38,6
		2	38,7
		3	38,3
		4	37,9
		5	37,7
	20	1	38,9
		2	38,2
		3	37,7
		4	37,6
		5	37,9

Abbildung 97 zeigt die gemessenen Schüttwinkel für Dolomit.

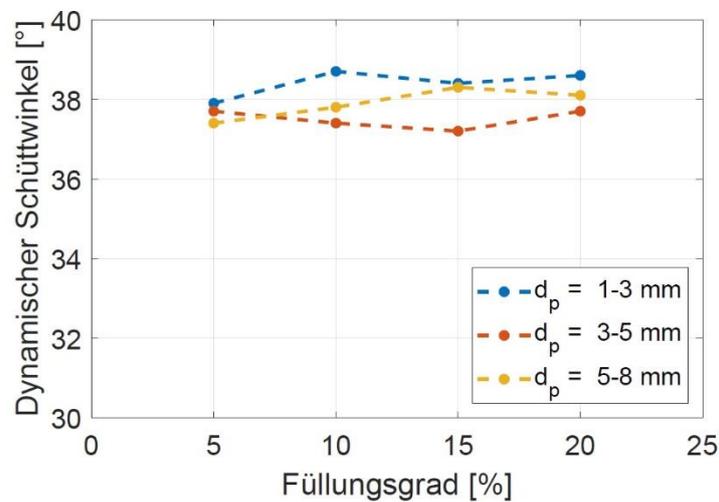


Abbildung 97: Dynamischer Schüttwinkel von Dolomit

Insgesamt schwanken alle gemessenen Schüttwinkel nur minimal zwischen 37 ° und 39 °. Der Füllungsgrad und die Partikelgröße haben keinen signifikanten Effekt auf die Schüttwinkel. Für alle weiteren Berechnungen wurde daher mit einem Winkel von 38 ° gerechnet. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Reaktion des Dolomits keinen Einfluss auf das Bewegungsverhalten hat.

6 Mathematisches Segregationsmodell (FS2-AP6)

6.1 Modellentwicklung

Mit Hilfe des von (Saeman 1951) entwickelten Modells zur Verweilzeit von Partikelschüttungen in Drehrohren, kann die Verweilzeitverteilung von monodispersen Schüttungen berechnet werden. Dazu lässt sich die Geometrie der Schüttung im Drehrohr mit Hilfe von Abbildung 98 beschreiben.

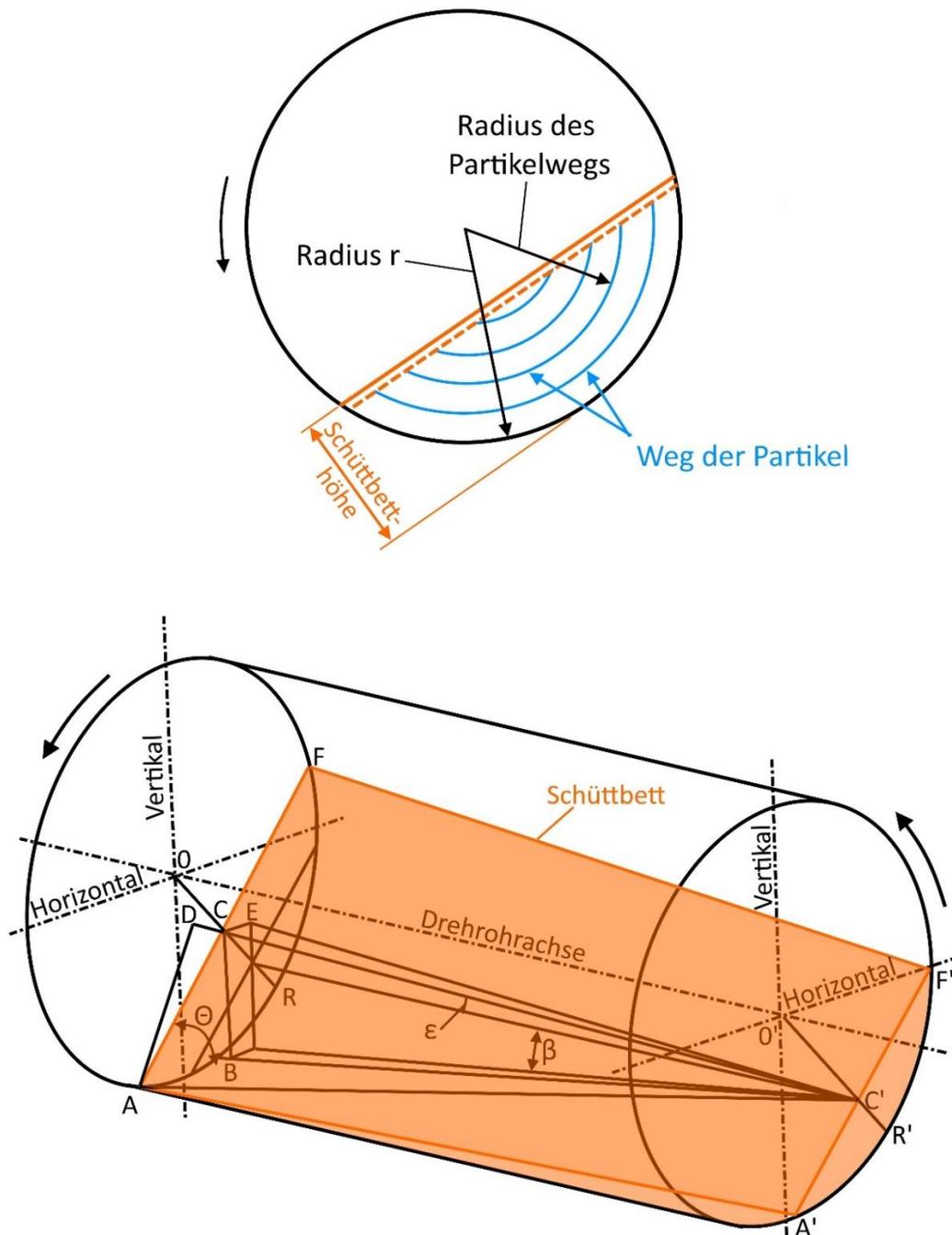


Abbildung 98: Geometrien des Schüttbetts innerhalb eines Drehrohrsegments nach (Saeman 1951).

Der Weg, den die Partikel innerhalb der Schüttung während der Rotation zurücklegen ist abhängig von der radialen Position der Partikel, siehe Abbildung 73, oben.

Saeman leitete eine Gleichung zur Berechnung der Schüttgutgeschwindigkeit nach

$$dv = 2\pi nr \left(\frac{\beta + \psi \cos \theta}{\sin \theta} \right) \left(\sqrt{r^2 - r_0^2} \right) dr \quad (72)$$

her und konnte darüber auch den durchschnittlichen Volumentransport nach

$$\dot{V} = \frac{4\pi n}{3} \left(\frac{\beta + \psi \cos \theta}{\sin \theta} \right) (R^2 - r_0^2)^{3/2} \quad (73)$$

bestimmen. Hierbei sind die n die Drehzahl, β der Neigungswinkel des Drehrohres, ψ der Winkel zwischen der Oberfläche des Schüttbetts und der Drehrohrachse, θ der dynamische Schüttwinkel und r der Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Querschnittsfläche und jedem Punkt der Oberfläche des Schüttbetts.

Wird eine bidisperse Schüttung untersucht, so wird sich aufgrund von Dichte und Größenunterschieden eine Ring-Kern-Struktur ausbilden. Dabei schwimmen größere, leichtere Partikel (I) auf den kleineren, schwereren Partikeln (II) auf und ordnen sich aufgrund der Rotation am Rand der Schüttung an, während sich das kleinere, schwerere Material im Kern der Schüttung sammelt, siehe Abbildung 99.

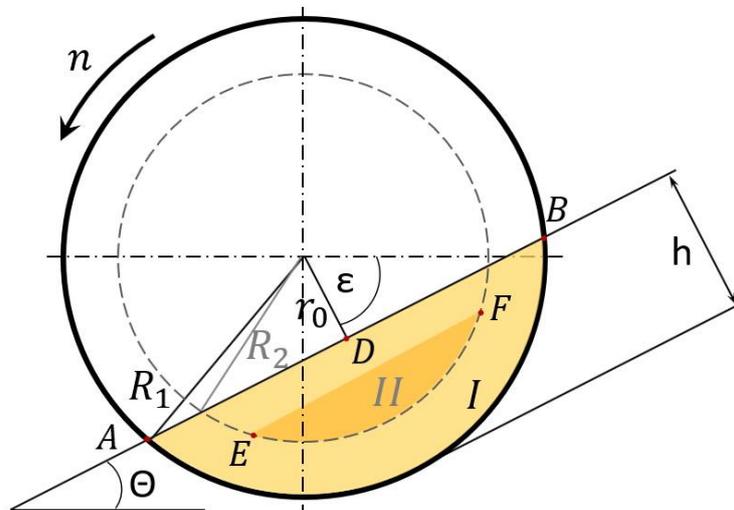


Abbildung 99: Querschnitt eines Drehrohres mit bidispersem Schüttbett.

Betrachtet man das Drehrohr im Querschnitt, setzt sich die gesamte Fläche des Schüttbetts A_0 aus der Fläche der grobkörnigen Fraktion A_1 sowie der des feinkörnigen Materials A_2 zusammen.

$$A_0 = A_1 + A_2 \quad (74)$$

Hierbei kann die Gesamtfläche mit über den Füllungsgrad f_d und dem Radius R berechnet werden.

$$A_0 = f_d \cdot \pi \cdot R^2 \quad (75)$$

Unter Beibehaltung der Flächeninhalte können die Flächen auch entsprechend Abbildung 100 dargestellt werden.

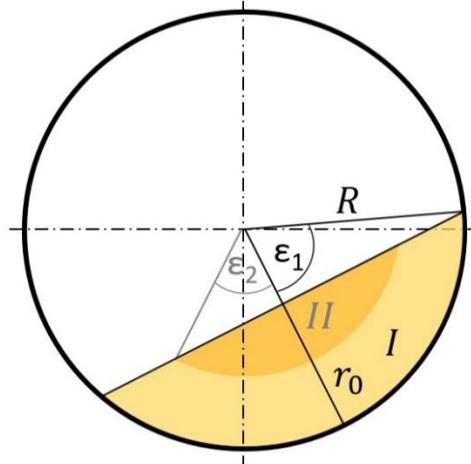


Abbildung 100: Geänderte Darstellung der Flächen beim bidispersen Schüttbett.

Werden für das bidisperse System nun die Randbedingungen entsprechend auf $r = R_1'$ und $r = R_2'$ geändert, entwickeln sich aus Gleichung (24) die Volumina für beide Fraktionen entsprechend

$$\dot{V}_1 = \frac{4\pi n}{3} \left(\frac{\beta + \psi \cos \theta}{\sin \theta} \right) \left[(R_1'^2 - r_0^2)^{3/2} - (R_2'^2 - r_0^2)^{3/2} \right] \quad (76)$$

und

$$\dot{V}_2 = \frac{4\pi n}{3} \left(\frac{\beta + \psi \cos \theta}{\sin \theta} \right) \left[(R_2'^2 - r_0^2)^{3/2} \right] \quad (77)$$

Für die Fläche der kleinen Partikel kann

$$A_2 = A_2' = \varepsilon_2 R_2'^2 - l_2 r_0 \quad (78)$$

hergeleitet werden und entsprechend Gleichung (26) ergibt sich

$$A_1 = A_0 - A_2, \quad (79)$$

Die Geschwindigkeit u der kleinen bzw. großen Partikel kann über den Volumenstrom \dot{V} innerhalb der Querschnittsfläche A berechnet werden, sodass sich

$$u_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1}, \quad (80)$$

und

$$u_2 = \frac{\dot{V}_2}{A_2}. \quad (81)$$

ergibt.

Somit können die lokalen Geschwindigkeiten innerhalb der Längensegmente verwendet werden um die Transport- bzw. Verweilzeiten zu berechnen.

Dies wurde von Jie (Jie 2020) in das ursprünglich von Herz (Herz 2012) entwickelte mathematische Prozessmodell implementiert.

6.2 Simulation eines monodispersen Systems

Mit Hilfe dieses Modells wurde beispielhaft ein monodisperses Partikelsystem modelliert und die Ergebnisse sollen nachfolgend mit einer Simulation eines bidispersen Systems verglichen werden.

Dafür wurde die Kalzination von Quarzsand in einem direkt befeuerten Drehrohr als Beispielprozess ausgewählt. Die prinzipiellen Abmaße des Drehrohrofens sind in Abbildung 101 dargestellt.

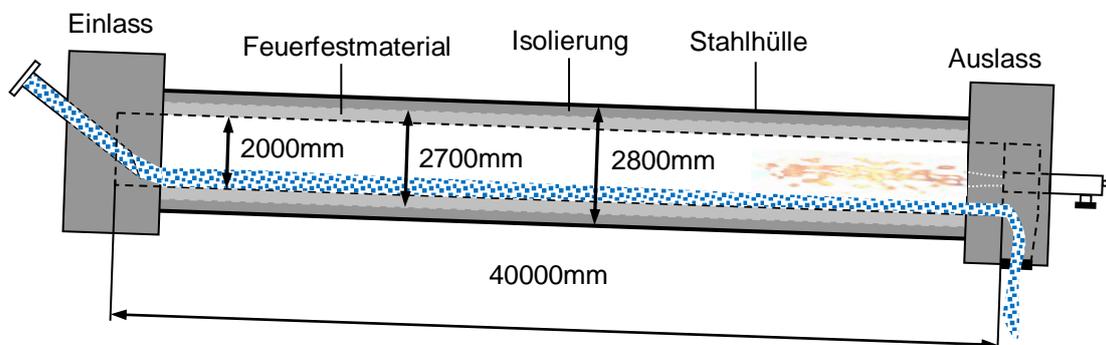


Abbildung 101: Schematische Darstellung des für die Simulation verwendeten Drehrohrofens.

Die gewählten Auslegungs- sowie Prozess- und Materialparameter sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 12: Für die Simulation festgelegte Parameter

Parameter	Symbol	Wert
Länge des Ofens	L	40 m
Innerer Durchmesser des Ofens	D	2 m
Länge zu Durchmesser Verhältnis	L/D	20
Dicke des Feuerfestmaterials	s_{SW}	0,4 m
Durchmesser der äußeren Stahlwand	D_{Out}	2,8 m
Drehzahl	n	1 rpm
Neigungswinkel des Drehrohrs	β	1 °
Durchsatz	\dot{M}	5 t/h
Durchmesser des Quarzsandes	$d_{p,Quarzsand}$	0,2 mm

Um die gewünschte Produktqualität erreichen zu können soll das Material 15 Minuten bei einer Temperatur von $T_{ref} = 1250 \text{ °C}$ verweilen. Der Brenner, der am Auslass des

Drehrohrs positioniert ist hat eine Leistung von $P = 2,3 \text{ MW}$ und eine Flammenlänge von $l_{\text{Flame}} = 10 \text{ m}$.

Auf dieser Grundlage wurden die Temperaturprofile vom Gas, der inneren Wandoberfläche, dem Schüttbett und der äußeren Wandoberfläche, siehe Abbildung 102 a), sowie der Verlauf der Schüttbetthöhe, siehe Abbildung 102 (b) simuliert.

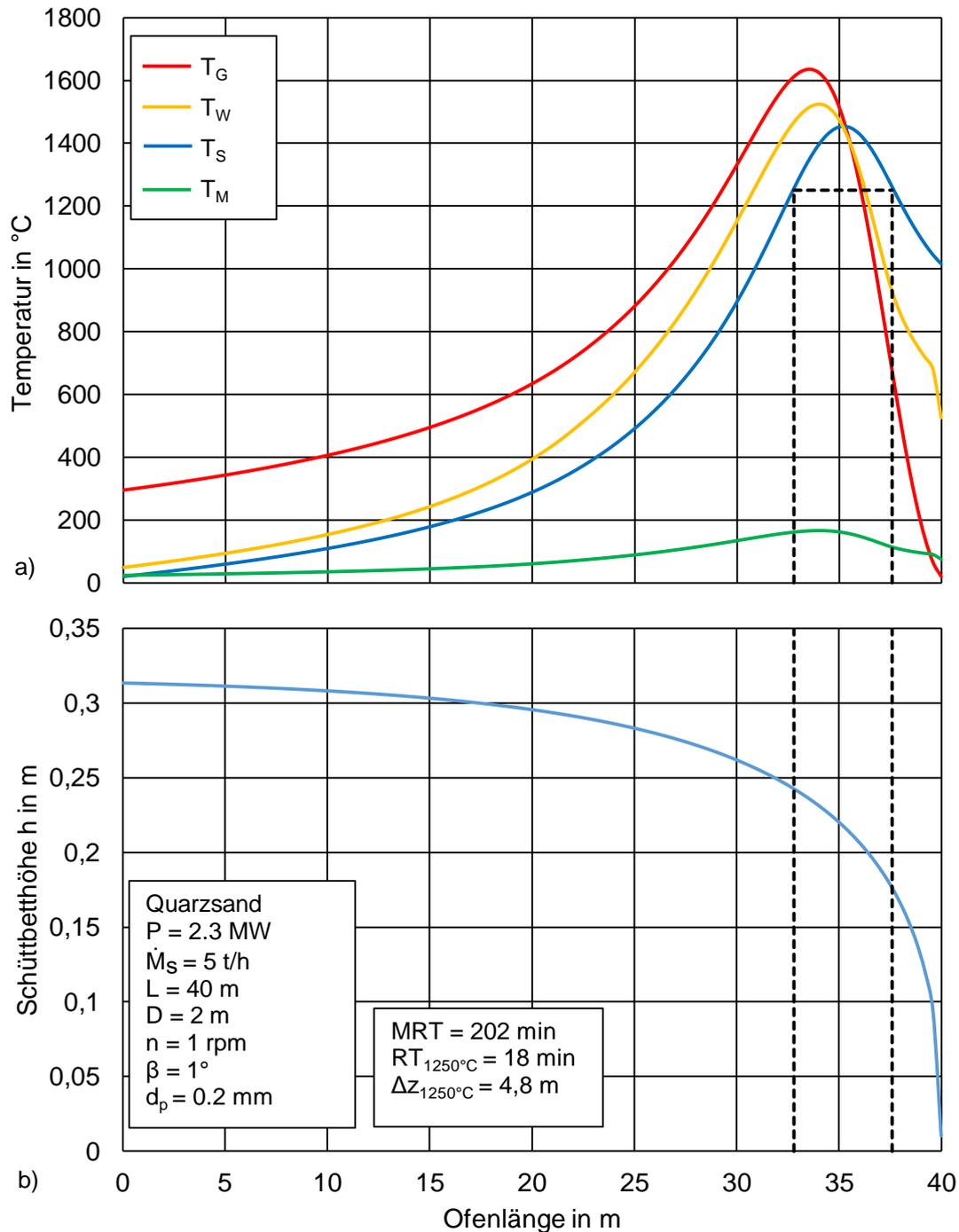


Abbildung 102: Simulierte Temperaturprofile (a) und Schüttbetthöhe (b) im Drehrohrfen während einer Kalzination.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Schüttbetthöhe innerhalb der ersten Hälfte des Drehrohrs fast gar nicht ändert, während sie dann im zweiten Teil immer stärker abzufallen beginnt.

Das Ausgangsmaterial wurde mit Umgebungstemperatur (20 °C) in das Drehrohr aufgegeben. Mit dem Transport im Drehrohr erwärmt sich die Schüttung zunächst langsam und später schneller und erreicht bei einer Ofenlänge von 35 m eine maximale Temperatur von $T_{s,max} = 1450 \text{ °C}$. Die mittlere Verweilzeit entspricht der Zeit, die das Material vom Einlass zum Auslass benötigt und beträgt ca. $MRT \ 200 \text{ min}$. Die vorausgesetzte Mindesttemperatur für eine erfolgreiche Kalzination wird für eine Zeit von $RT_{1250\text{°C}} = 18 \text{ min}$ gehalten, in welcher das Material eine Strecke von $\Delta z_{1250\text{°C}} = 4,8 \text{ m}$ im Ofen zurücklegt. Die Anforderungen an den Prozess sind daher erfüllt.

Analog zur Schüttbetttemperatur steigt auch die Wandtemperatur vom Einlass aus an, liegt dabei insgesamt etwas höher und erreicht ihren Höhepunkt etwas eher als das Schüttbett. Die Flamme befindet sich innerhalb der letzten 10 m des Drehrohrofens und führt aufgrund der Strahlung dazu, dass die Temperaturen im Bereich vor der Flamme am höchsten sind. Die Gastemperatur liegt vom Einlass, bis zur maximalen Temperatur des Schüttbetts am höchsten und fällt dann bis zum Auslass stark ab. Aufgrund des Feuerfestmaterials sowie der Isolierung liegt die Temperatur der Stahlwand während des gesamten Prozesses deutlich unterhalb von 200 °C, auch innerhalb des Bereichs, in welchem sich die Flamme befindet.

6.3 Simulation eines bidispersen Systems

Indem das Modell erweitert wurde, sodass auch die Segregationseffekte bidisperser Systeme berücksichtigt werden können, wurde der Prozess der Kalzination von Quarzsand mit einem bidispersen Material simuliert.

Dafür wurden die gleichen Parameter festgelegt, wie im vorher untersuchten Fall des monodispersen Materials. Das Ausgangsmaterial soll jetzt jedoch aus zwei Fraktionen mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern ($d_{p,1} = 0,4 \text{ mm}$, $d_{p,2} = 0,2 \text{ mm}$) bestehen, die gemischt, im Verhältnis 1:1 in den Ofen aufgegeben werden. In Abbildung 103 sind die unterschiedlichen simulierten Temperaturen für das mono- und bidisperse System gegenübergestellt.

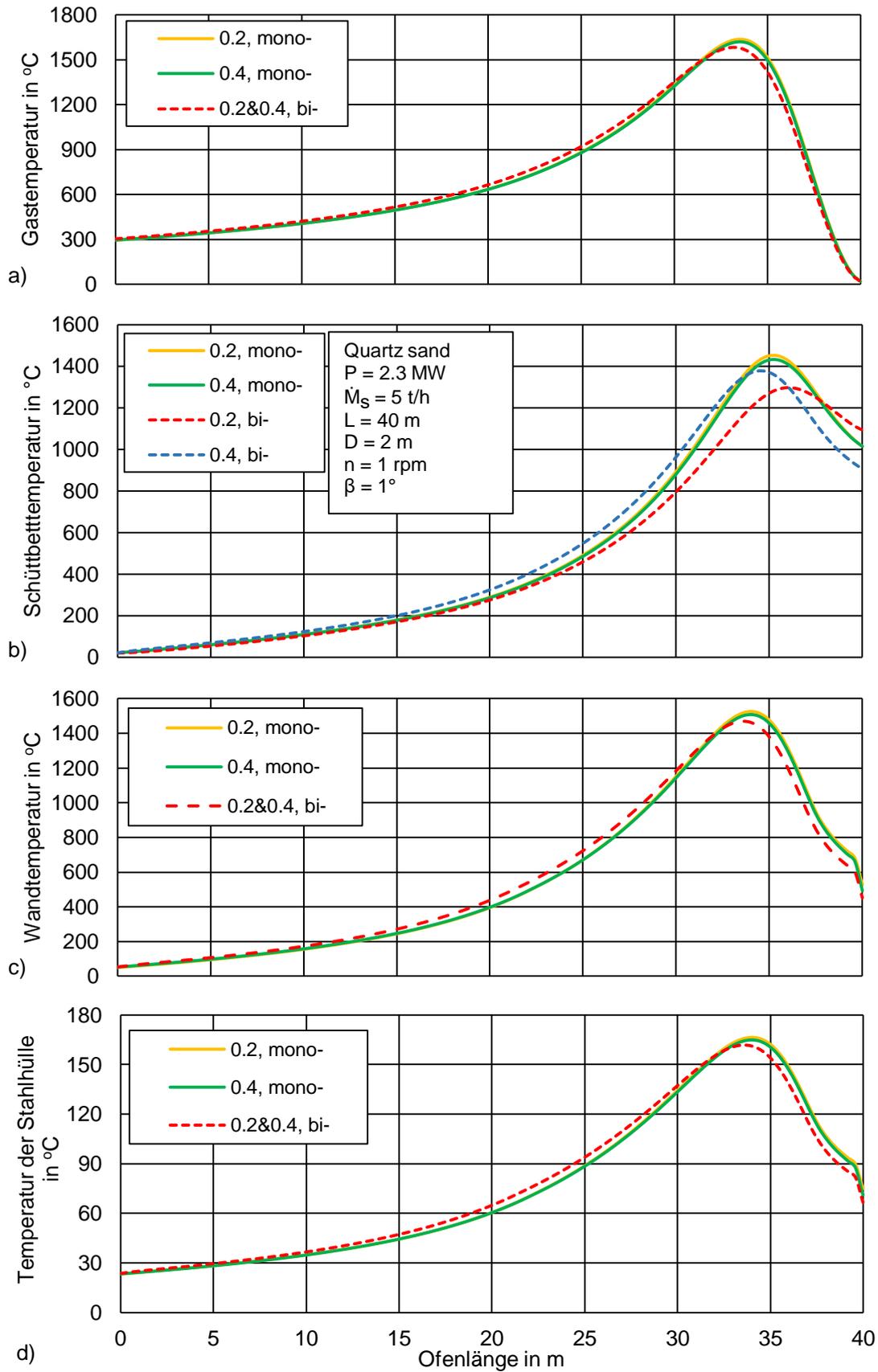


Abbildung 103: Vergleich der Temperaturverläufe im mono- bzw. bidispersen System.

Die Temperaturen von Gas, Wand und äußerer Stahlhülle weisen zwischen den monodispersen und dem bidispersen System fast gar keine Unterschiede auf. Alle Temperaturkurven liegen sehr eng beieinander.

Betrachtet man jedoch die Temperaturen des Schüttbetts, so sind signifikante Unterschiede zwischen beiden Systemen erkennbar. Bei den monodispersen Systemen ist der Temperaturverlauf fast völlig gleich, im bidispersen System ist der Verlauf der Temperaturverläufe der beiden Fraktionen jedoch deutlich verändert. Die großen Partikel erwärmen sich im bidispersen System etwas schneller und erfüllen das vorgegebene Kriterium, indem sie $RT_{1250^{\circ}\text{C},bi-0,4\text{mm}} = 15.5 \text{ min}$ eine Temperatur von über $T_{ref} = 1250^{\circ}\text{C}$ erreichen. Die kleinen Partikel erwärmen sich im bidispersen System jedoch deutlich langsamer und werden nur $RT_{1250^{\circ}\text{C},bi-0,4\text{mm}} = 9 \text{ min}$ bei einer Temperatur oberhalb von $T_{ref} = 1250^{\circ}\text{C}$ behandelt. Die an den Prozess gestellten Anforderungen werden daher nicht erfüllt.

Dies zeigt deutlich, dass eine Berücksichtigung des Segregationseffektes und der damit veränderten Verweilzeitverteilung des bidispersen Systems notwendig ist um Anlagen optimal auslegen und einstellen zu können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsprojektes, war die Erstellung eines makroskopischen Modells zur Beschreibung des axialen Schüttguttransports mit gekoppeltem Wärmetransport und Reaktionskinetik im polydispersen Schüttbett von Drehrohren. Dafür wurden erstmalig experimentelle Untersuchungen zum axialen Transportverhalten durchgeführt, die den Wärmeeintrag sowie die chemischen Reaktionen berücksichtigen. Diese dienten als Datenbasis für die Analyse und Simulation mit DEM. Auf diese Weise konnten partikeldiskrete Vorgänge innerhalb der Schüttung erfasst werden, die eine makroskopische Modellierung möglich machten.

Zunächst wurde der axiale Schüttguttransport im Kaltzustand experimentell untersucht. Dabei wurden sowohl die Verweilzeitverteilung, Schüttbetthöhen sowie die Oberflächengeschwindigkeiten des Schüttbetts ausführlich untersucht. Diese Ergebnisse waren Grundlage einer Überprüfung des mechanischen Verhaltens der nachfolgenden Simulationen. Hier wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und numerischen Untersuchungen erzielt, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der gewählte DEM-Ansatz zuverlässige Ergebnisse erzielt.

Zeitgleich wurden an der zweiten Forschungsstelle Experimente zur Kopplung des Wärmeeintrags mit dem axialen Transport durchgeführt. Als Ergebnisse wurden axiale, transversale und zeitlich aufgelöste Temperaturverläufe bestimmt. Der Wärmeeintrag erfolgte hier indirekt, über eine beheizte Außenwand. Im Gegensatz dazu untersuchte Forschungsstelle 1 den Wärmetransport für den Fall eines Eintrags über die freie Oberfläche. Die Ergebnisse beider experimenteller Untersuchungen wurden durch Forschungsstelle 1 mit Hilfe von Simulationen abgebildet um eine detailliertere Einsicht in die Wärmeleitvorgänge im Schüttbett zu erhalten.

Nachfolgend wurden ein Trocknungsprozess bzw. eine Reaktion (Kalzinierung) experimentell mit dem Axialtransport gekoppelt. Als Ergebnisse wurden Trocknungsraten bzw. Zersetzungsraten ermittelt und als Datenbasis für die Simulationen verwendet.

Zusätzlich zu den thermischen Betrachtungen wurden die dynamischen Schüttwinkel aller verwendeten Materialien sowie die Bewegungsart in einer transversalen Analyse sowie alle weiteren für die Simulation relevanten Materialeigenschaften bestimmt.

Abschließend wurden die gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage für die Entwicklung des mathematischen Segregationsmodells verwendet. Dieses wurde zunächst für den Fall eines monodispersen Modells erstellt und dann für ein bidisperses System erweitert. In diesem sind die Effekte der auftretenden Entmischung berücksichtigt, weshalb sich hinsichtlich der tatsächlichen Verweilzeit im Drehrohr relevante Unterschiede feststellen lassen. Dies wurde an einem industriellen Beispiel anschaulich gezeigt.

Zukünftig können die Ergebnisse als Grundlage zur zielgerichteten Auslegung von Drehrohren verwendet werden und es kann eine optimierte Betriebsweise realisiert werden.

8 Literaturverzeichnis

B. Brosch (2012): Erweiterung der Diskreten Elemente Methode zur Simulation bewegter und reagierender Feststoffschüttungen mit der Anwendung auf Rostfeuerungs-systeme. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. LEAT.

B. Krause, B. Liedmann, J. Wiese, S. Wirtz, V. Scherer (2015): Coupled three dimensional DEM-CFD simulation of a lime shaft kiln - Calcination, particle movement and gas phase flow field -. In: *Chemical Engineering Science* (134), S. 834–849.

Bensmann, Sven (2010): Zu Misch-und Transportprozessen granularer Medien in kontinuierlich betriebenen Drehrohren: Verlag Dr. Hut.

Boateng, Akwasi A. (2015): Rotary kilns: transport phenomena and transport processes: Butterworth-Heinemann.

BOATENG, A. A.; Barr, P. V. (1996a): A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39 (10), S. 2131–2147. DOI: 10.1016/0017-9310(95)00272-3.

BOATENG, A. A.; Barr, P. V. (1996b): Modelling of particle mixing and segregation in the transverse plane of a rotary kiln. In: *Chemical Engineering Science* 51 (17), S. 4167–4181.

D. Höhner (2014): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Einfluss von Partikelgeometrie auf das mechanische Verhalten von Schüttgütern mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. LEAT.

Dhanjal, S. K.; Barr, P. V.; Watkinson, A. P. (2004): The rotary kiln: An investigation of bed heat transfer in the transverse plane. In: *Metallurgical and Materials Transactions B* 35 (6), S. 1059–1070.

Dury, Christian M.; Ristow, Gerald H. (1999): Competition of mixing and segregation in rotating cylinders. In: *Physics of Fluids* 11 (6), S. 1387–1394. DOI: 10.1063/1.870003.

- E. Simsek (2010): Mischung und Segregation auf Rostsystemen: Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. LEAT.
- FLIR Systems Inc. (2016): FLIR Lepton with Radiometry Datasheet.
- Fuller, Edward N.; Ensley, Keith; Giddings, J. Calvin (1969): Diffusion of halogenated hydrocarbons in helium. The effect of structure on collision cross sections. In: *J. Phys. Chem.* 73 (11), S. 3679–3685. DOI: 10.1021/j100845a020.
- Gonzalez, Omar Guerra (2009): Untersuchungen zum Misch- und Transportverhalten von Schüttgütern in Drehrohren: Verlag Dr. Hut.
- H. Kruggel-Emden (2007): Analysis and Improvement of the Time-Driven Discrete Element Method. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. LEAT.
- H. Kruggel-Emden, E. Simsek, S. Rickelt, S. Wirtz und V. Scherer (2007): Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method. In: *Powder Technology* (171), S. 157–173.
- Hallak, Bassem (2019): Simulation und Analyse des Kalkbrennens in Normalen-, GGR- und Koksschachtöfen. Magdeburg.
- Henein, H.; Brimacombe, J. K.; Watkinson, A. P. (1983): Experimental Study of Transverse Bed Motion in Rotary Kilns. In: *Metallurgical Transactions B*, S. 191–205.
- Henein, H.; Brimacombe, J. K.; Watkinson, A. P. (1985): An experimental study of segregation in rotary kilns. In: *MTB* 16 (4), S. 763–774. DOI: 10.1007/BF02667512.
- Henein, M.; Brimacombe, J. K.; Watkinson, A. P.: The modeling of transverse solids motion in rotary kilns.
- Herz, F. (2012): Entwicklung eines mathematischen Modells zur Simulation thermischer Prozesse in Drehrohröfen. Doktorarbeit.
- Herz, Fabian; Mitov, Iliyan; Specht, Eckehard; Stanev, Rayko (2012): Experimental study of the contact heat transfer coefficient between the covered wall and solid bed in rotary drums. In: *Chemical Engineering Science* 82, S. 312–318. DOI: 10.1016/j.ces.2012.07.042.
- J. Ai, J. F. Chen, J. M. Rotter und J. Y. Ooi (2011): Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. In: *Powder Technology* (206), S. 269–282.

- J. Schäfer, S. Dippel und D. E. Wolf (1996): Force schemes in simulations of granular materials. In: *Journal dePhysique* (6), S. 5–20.
- Jie, Haozhi (2020): Axial Transport Behavior and Thermal Treatment of Polydisperse Materials in Direct Heated Rotary Kilns. Magdeburg.
- Kneule, Friedrich (1975): Das Trocknen: Sauerländer.
- Komossa, H.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Herz, F.; Specht, E. (2014): Transversal bed motion in rotating drums using spherical particles: Comparison of experiments with DEM simulations. In: *Powder Technology* 264, S. 96–104. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.05.021.
- Komossa, H.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Herz, F.; Specht, E. (2015): Heat transfer in indirect heated rotary drums filled with monodisperse spheres: Comparison of experiments with DEM simulations. In: *Powder Technology* 286, S. 722–731.
- Krischer, O. (1978): u. W. Kast: Trocknungstechnik. Bd. 1: Berlin: Springer-Verl.
- Lehmberg, J.; Hehl, M.; Schügerl, K. (1977): Transverse mixing and heat transfer in horizontal rotary drum reactors. In: *Powder Technology* 18 (2), S. 149–163. DOI: 10.1016/0032-5910(77)80004-1.
- Li, S.-Q.; Ma, L.-B.; Wan, W.; Yao, Q. (2005): A Mathematical Model of Heat Transfer in a Rotary Kiln Thermo-Reactor. In: *Chem. Eng. Technol.* 28 (12), S. 1480–1489. DOI: 10.1002/ceat.200500241.
- Liu, Xiao Yan; Specht, E.; Gonzalez, O. Guerra; Walzel, P. (2006): Analytical solution for the rolling-mode granular motion in rotary kilns. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 45 (6), S. 515–521. DOI: 10.1016/j.cep.2005.10.009.
- Lorenz Messtechnik GmbH (2020): Datenblatt Zug- und Druckkraftsensor K-25.
- Mellmann, J. (2001): The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior. In: *Powder Technology* 118 (3), S. 251–270. DOI: 10.1016/S0032-5910(00)00402-2.
- Mollekopf, N.; Martin, H. (1982): Zur Theorie des Wärmeübergangs an bewegte Kugelschüttungen bei kurzfristigem Kontakt. In: *vt-verfahrenstechnik* 16, S. 701–706.

- Nafsun, A. I.; Herz, F.; Specht, E.; Komossa, H.; Wirtz, S.; Scherer, V. (2015): EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL BED MIXING IN ROTARY DRUMS. Conference Paper. In: *11th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*.
- Nafsun, A. I.; Herz, F.; Specht, E.; Scherer, V.; Wirtz, S. (2014): THE CONTACT HEAT TRANSFER IN ROTARY KILNS AND THE EFFECT OF MATERIAL PROPERTIES. Conference Paper. In: *10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*.
- Nafsun, Ainaa Izyan; Herz, Fabian; Specht, Eckehard; Scherer, Viktor; Wirtz, Siegmund (2016): Heat Transfer Experiments in a Rotary Drum for a Variety of Granular Materials. In: *Experimental Heat Transfer* 29 (4), S. 520–535. DOI: 10.1080/08916152.2015.1036180.
- Nityanand, N.; Manley, B.; Henein, H. (1986): An analysis of radial segregation for different sized spherical solids in rotary cylinders. In: *MTB* 17 (2), S. 247–257. DOI: 10.1007/BF02655071.
- Saeman, W. C. (1951): Passage of solids through rotary kilns-factors affecting time of passage. In: *Chemical Engineering Progress* 47 (10), S. 508–514.
- Schlünder, Ernst Ulrich (1971): Wärmeübergang an bewegte Kugelschüttungen bei kurzfristigem Kontakt. In: *Chemie Ingenieur Technik* 43 (11), S. 651–654. DOI: 10.1002/cite.330431103.
- Schlünder, E-U; Mollekopf, N. (1984): Vacuum contact drying of free flowing mechanically agitated particulate material. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 18 (2), S. 93–111.
- Specht, Eckehard (2014): Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik: Grundlagen| Berechnungen| Prozesse: Vulkan Verlag.
- Specht E., Kainer H., und Jeschar R. (1986): Die Reaktions-, Porendiffusions- und Wärmeleitkoeffizienten verschiedener Magnesite und ihr Einfluss auf die Zersetzungszeit. In: *Radex Rundschau* (vol. 4), S. 248–268.
- Tscheng, S. H.; Watkinson, A. P. (1979): Convective heat transfer in a rotary kiln. In: *Can. J. Chem. Eng.* 57 (4), S. 433–443. DOI: 10.1002/cjce.5450570405.

V. Gnielinski (1978): Gleichungen zur Berechnung des Wärme- und Stoffaustausches in durchströmten ruhenden Kugelschüttungen bei mittleren und großen Pecletzahlen. In: *Verfahrenstechnik* vol. 12 (6), S. 361–371.

9 Verwendung der Zuwendung

Gesamtübersicht:

Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

- LEAT – 28 Personalmonate
- OVGU - 28 Personalmonate

Ausgaben für Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

- LEAT - Keine Ausgaben
- OVGU – Keine Ausgaben

Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C. des Finanzierungsplans)

- LEAT – Keine Ausgaben
- OVGU – 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.

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

Beheizte Drehrohre zur thermischen Behandlung in der Grundstoffindustrie finden einen breiten, branchenübergreifenden Einsatz. Viele deutsche Hersteller solcher, oft speziell zugeschnittener Anlagen, insbesondere die in Entwicklung und Auslegung eingebundenen Ingenieurbüros, sind dem Feld der KMU's zuzurechnen. Durch die sehr ausführliche und umfassende Dokumentation der theoretischen und experimentellen Projektergebnisse in diesem Bericht, ergibt sich für alle mit Drehrohröfen arbeitenden Unternehmen und Einrichtungen ein breiter Fundus neuer Informationen. Damit stehen die Grundlagen zur Entwicklung neuartiger Produkte und Anwendungen zur Verfügung, was der Qualität der Produkte, der Flexibilität der Anlagen und der Effizienz des Energie- und Stoffeinsatzes zu Gute kommt.

Die Arbeiten haben nicht nur die Komplexität der Vorgänge aufgezeigt, sondern auch viele Wissensdefizite hinsichtlich der messtechnisch und theoretisch schwer zu erfassenden Vorgängen in Drehrohröfenprozessen behoben.

Es wurde gezeigt, dass die Modelle zur Simulation bewegter reagierender Schüttungen in Drehrohren es erlauben, numerische Auslegungskriterien zu entwickeln und entsprechend Geometrieoptimierungen vorzunehmen. Dabei gestattet die neue Entwicklung einer mit DEM gekoppelten „Discrete Ordinates Method“ eine realistischere Beschreibung des Strahlungswärmetransports zur Schüttgutoberfläche. Die Berücksichtigung von Segregationseffekten und die damit veränderte Verweilzeitverteilung von bidispersen Systemen wird von dem neuen makroskopischen Modell berücksichtigt und sind notwendig um Anlagen optimal auslegen und einstellen zu können. Die DEM gestattet dabei einen umfassenden Einblick in die Detailvorgänge innerhalb des Schüttbettes und die Bestimmung partikel aufgelöster Zustandsdaten.

11 Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahmen

Information der Unternehmen im PA

10.05.2017	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Bochum (Kick-Off) 1 PA
06.09.2017	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Frankfurt 2. PA
23.11.2017	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Weimar 3 PA
13.02.2019	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Aachen 4 PA
03.09.2019	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Frankfurt 5 PA
vsl. 2021	Abschlusspräsentation für den Projektbegleitenden Ausschuss über ZOOM

Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PA

05.09.2018	Weiterleitung der Zwischenberichte und der letzten Präsentationen an KREYENBORG GmbH & Co. KG
05.09.2018	Aufnahme der Firma Cremer Thermoprozessanlagen GmbH in den PA

Publikation der Projektergebnisse im Internet

2020	Bereitstellung der Zwischenberichte und des Abschlussberichts auf der DVV- und Lehrstuhlhomepage des LEAT
------	---

Wissenschaftliche Publikationen / Dissertationen, in Fachzeitschriften oder sonstigen Veröffentlichungen

2018	Meitzner, C., Jie, H., Herz, F. (2018). <i>Axial Solid Transport in Rotary Kilns – Influence of Operational Parameters</i> . 9th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids, London, United Kingdom. (<i>Full Conference Paper</i>)
2018	Meitzner, C., Herz, F. (2018). <i>Untersuchung des Wärmeeintrags in die Schüttung von Drehrohren</i> . Nachwuchswissenschaftlerkonferenz, Köthen, Germany. (<i>Conference Abstract</i>)
2019	Meitzner, C., Specht, E., Herz, F. (2019). <i>Untersuchung des Trocknungsverhaltens in Drehrohren</i> . ProcessNet Jahrestreffen der Dechema, Essen, Germany. (<i>Conference Abstract</i>)
2019	Meitzner, C., Herz, F., Specht, E., Wirtz, S., Berndt, A., Scherer, V. (2019). <i>Influence of Axial Transport on the Temperature Distribution in Rotary Kilns</i> . 4th Thermal and Fluids Engineering Conference, Las Vegas, NV, USA. (<i>Conference Abstract</i>)
2020	Seidenbecher, J., Herz, F., Meitzner, C., Specht, E., Wirtz, S., Scherer, V. Liu, X. (2021) <i>Temperature analysis in flighted rotary drums and the influence of operating parameters</i> . Chemical Engineering Science, Volume 229
vsl. 2021	Dissertation zum Thema: "Interaktion von Wärmeeintrag, Trocknung und Reaktion in Drehrohren" von Claudia Meitzner

Individuelle Umsetzung in Unternehmen

fortlaufend	Im Rahmen von Beratertätigkeiten für Unternehmen: Anpassungen der entwickelten Theorie und Tools an spezifische Bedingungen
-------------	---

Vorträge

Arbeitskreise der Forschungsgemeinschaft

09.11.2017	Vorstellung von Projektergebnissen bei der DVV-Jahreshauptversammlung in Essen
15.11.2018	Vorstellung von Projektergebnissen bei der DVV-Jahreshauptversammlung in Beckum
14.11.2019	Vorstellung von Projektergebnissen bei der DVV-Jahreshauptversammlung (Poster)
vsl. 2021	Abschlusspräsentation bei der DVV-JHV

in anderen Fach- und Branchenverbänden und auf Fachtagungen

5./6.06.2018	Nachwuchswissenschaftlerkonferenz an der Hochschule Köthen, Abstract und Präsentation von FS2 mit dem Thema: Untersuchung des Wärmeeintrags in die Schüttung von Drehrohren.
11.09.2018	Konferenzbeitrag auf der "9th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids" in London, UK. Vortrag mit dem Thema: „Axial Solid Transport in Rotary Kilns – Influence of Operational Parameters“.
19.03.2019	Beitrag auf dem "Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Mischvorgänge, Trocknungstechnik und Wärme- und Stoffübertragung" der DECHEMA in Essen

Einbeziehung von Multiplikatoren

06.09.2017	Vorstellung von Projektergebnissen bei der FOGI-Sitzung in Frankfurt
15.02.2018	Vorstellung von Projektergebnissen bei der FOGI-Sitzung in Freiberg
29.08.2018	Vorstellung von Zwischenbericht und Präsentation bei der FOGI-Sitzung in Frankfurt,
14.02.2019	Vorstellung von Projektergebnissen bei der FOGI-Sitzung in Aachen
04.09.2019	Vorstellung von Projektergebnissen bei der FOGI-Sitzung in Frankfurt
Feb. 2021	Abschlusspräsentation bei der FOGI-Sitzung

Beratung und Weiterbildung in Unternehmen

2021	Workshops und Seminare unter derzeitigen Bedingungen nicht durchführbar
------	---

Personaltransfer

fortlaufend	Liste aller Abschlussarbeiten im Kapitel 13.3, durch die Abschlussarbeiten wurden die Studenten für diesen spezifischen Industriebereich qualifiziert
-------------	---

12 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Verschiedene Maßnahmen wurde schon während der Projektlaufzeit durchgeführt.

Zum einen wurden sowohl bei der DVV als auch bei der FOGI regelmäßig Vorträge zu den Projektergebnissen gehalten und diese anschließend mit den Teilnehmern diskutiert. Durch den kontinuierlichen Austausch wurde das Projekt maßgeblich durch die Industrie beeinflusst.

Zum anderen wurden durch die Veröffentlichungen bereits Teile der Projektergebnisse der Forschung zur Verfügung gestellt.

Durch die Corona-Pandemie werden die Treffen der Forschungsvereinigungen auf absehbare Zeit online durchgeführt. Bereits die Präsentation der Projektergebnisse bei der letzten FOGI Sitzung hat online stattgefunden. Die Abschlusspräsentationen werden ebenfalls online durchgeführt.

Im Augenblick können Workshops und Seminare wegen der derzeitigen Planungsunsicherheit nicht durchgeführt werden.

13 Publikationen, Vorträge und Abschlussarbeiten aus dem Projekt

13.1 Publikationen

- 2018 Meitzner, C., Jie, H., Herz, F. (2018). *Axial Solid Transport in Rotary Kilns – Influence of Operational Parameters*. 9th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids, London, United Kingdom. (*Full Conference Paper*)
- 2018 Meitzner, C., Herz, F. (2018). *Untersuchung des Wärmeeintrags in die Schüttung von Drehrohren*. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz, Köthen, Germany. (*Conference Abstract*)
- 2019 Meitzner, C., Specht, E., Herz, F. (2019). *Untersuchung des Trocknungsverhaltens in Drehrohren*. ProcessNet Jahrestreffen der Dechema, Essen, Germany. (*Conference Abstract*)
- 2019 Meitzner, C., Herz, F., Specht, E., Wirtz, S., Berndt, A., Scherer, V. (2019). *Influence of Axial Transport on the Temperature Distribution in Rotary Kilns*. 4th Thermal and Fluids Engineering Conference, Las Vegas, NV, USA. (*Conference Abstract*)
- 2020 Seidenbecher, J., Herz, F., Meitzner, C., Specht, E., Wirtz, S., Scherer, V. Liu, X. (2021) *Temperature analysis in flighted rotary drums and the influence of operating parameters*. Chemical Engineering Science, Volume 229

13.2 Vorträge

- 15.02.2018 Beitrag zur Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V. in Freiberg. Vortrag von Fischer mit dem Thema: „Interaktion von Axialtransport, Wärmeeintrag und Reaktion in Drehrohren“.
- 05.06.2018 Beitrag von Claudia Meitzner auf der „Nachwuchswissenschaftlerkonferenz“ in Köthen, Deutschland. Vortrag mit dem Thema: „Untersuchung des Wärmeeintrags in die Schüttung von Drehrohren“.

- 29.08.2018 Beitrag zur Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V. in Frankfurt. Vortrag von Claudia Meitzner mit dem Thema: „Interaktion von Axialtransport, Wärmeeintrag und Reaktion in Drehrohren“.
- 11.09.2018 Konferenzbeitrag von Claudia Meitzner auf der “9th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids” in London, UK. Vortrag mit dem Thema: „Axial Solid Transport in Rotary Kilns – Influence of Operational Parameters“.
- 14.02.2019 Beitrag zur Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V. in Aachen. Vortrag von Maik Scharnowski mit dem Thema: „Interaktion von Axialtransport, Wärmeeintrag und Reaktion in Drehrohren“.
- 19.03.2019 Beitrag auf dem “Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Mischvorgänge, Trocknungstechnik und Wärme- und Stoffübertragung” der DECHEMA in Essen, Deutschland. Präsentation von Claudia Meitzner zum Thema: „Untersuchung des Trocknungsverhaltens in Drehrohren“.
- 04.09.2019 Beitrag zur Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V. in Frankfurt. Vortrag von Claudia Meitzner mit dem Thema: „Interaktion von Axialtransport, Wärmeeintrag und Reaktion in Drehrohren“.
- 02.09.2020 Beitrag zur Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V. per Web-Veranstaltung. Vortrag von Claudia Meitzner mit dem Thema: „Interaktion von Axialtransport, Wärmeeintrag und Reaktion in Drehrohren“.
- vsl. Feb 2021 Abschlusspräsentation bei der Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V.

13.3 Abschlussarbeiten

- 2017 Christoph Blank, Bachelorarbeit: „Konstruktion und Inbetriebnahme einer beweglichen Messeinrichtung zur Schütthöhen- und Geschwindigkeitsbestimmung“ [FS1]
- 2018 Sara Koc, Masterarbeit: „Optimierung und Durchführung von Verweilzeitmessungen in einem Rückförnden Drehrohr“ [FS1]
- 2018 Gülsüm Kuzu, Bachelorarbeit: „Experimentelle Charakterisierung und numerische Simulation des mechanischen Verhaltens von Glaskugeln“ [FS1]
- 2018 Lucas Justin Ahls, Bachelorarbeit: „Experimentelle und numerische Untersuchung zum Axialtransport in Batch-Drehrohren“ [FS1]
- 2018 Siegfried Neumann, Semesterarbeit: „Programmierung, Inbetriebnahme und Auswertung eines Drehtellerversuchsstandes zur Bestimmung der Rollreibung von Partikeln“ [FS1]
- 2018 Fasih Haider, Masterarbeit: „Influence of the material properties on the interaction of axial bulk transport, heat transfer and drying in indirectly heated rotary drums“ [FS2]
- 2018 Shuang Zhang, Masterarbeit: „Influence of the operating parameters on the interaction of axial bulk transport, heat transfer and drying in indirectly heated rotary drums“ [FS2]
- 2018 Florian Kirchhof, Bachelorarbeit: „Experimentelle Untersuchung des Trocknungsverhaltens granularer Materialien in Drehrohren“ [FS2]
- 2018 Leve Krieger, Bachelorarbeit: „Experimentelle Untersuchung des Bewegungs- und Reaktionsverhaltens von Kalkstein“ [FS2]
- 2019 Benjamin Brandenstein, Masterarbeit: „Konstruktion und Inbetriebnahme einer automatisierten Mess- und Sortierungsapparatur zur Bestimmung der Verweilzeit in einem Drehrohr“ [FS1]
- 2019 Bilal Mehdi, Masterarbeit: „Analysis of the drying process in indirectly heated rotary kilns“ [FS2]
- 2019 Merve Akkiceli, Bachelorarbeit: „Messung der Partikelgeschwindigkeit an der Schüttoberfläche in einem Drehrohr“ [FS1]

- 2019 Yashib Yousaf Kamran Saroia, Masterarbeit: „Drying of granular materials in indirectly heated rotary kilns“ [FS2]
- 2020 Dominique Eulerling, Projektarbeit: „Messung der Schüttbetthöhe in einem Drehrohr“ [FS1]
- 2020 Marco Schlag, Masterarbeit: „Numerische und experimentelle Untersuchung der Wärmeübertragung in einem Drehrohr“ [FS1]
- 2020 Muhammad Danyal, Masterarbeit: „Developing an Automatic Analysis Routine with MatLab to investigate the Drying Process in a Pilot Rotary Kiln“ [FS2]
- 2020 Kranthi Krishna Vepati, Masterarbeit: „Experimental Analysis of Expanded Clay to Investigate the Drying Process“ [FS2]
- 2020 Uppala Sai V B N Murthy, Masterarbeit: „Analysis of the drying process in indirectly heated rotary kilns“ [FS2]
- 2020 Paula Thielecke, Bachelorarbeit: „Experimentelle Untersuchung des Bewegungs- und Reaktionsverhaltens von Dolomit“ [FS2]