

Hochschule Anhalt

**Entwicklung von Drehrohrenbauten zur effektiven  
thermischen Verwertung von Klärschlamm**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 38410/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr. Fabian Herz

Mai 2024

# Arbeitspaket 1. Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Dynamik der Schüttgutbewegung

## 1.1 Definition des Querschnitts

Zur Beschreibung des transversalen Bewegungsverhaltens in Drehrohren mit Sektionaleinbauten wird ein mathematisches Modell entwickelt, welches die geometrischen Beziehungen und die Bilanzgleichungen im Querschnitt berücksichtigt. Zur Festlegung der geometrischen Kenngrößen wird der Querschnitt des Drehrohres in 8 Sektionen unterteilt. In Abbildung 1 ist dieser Querschnitt schematisch dargestellt, wobei das Schüttbett als rot gekennzeichnete Fläche vorliegt. Die Sektionen sind mit einem Winkel von  $\alpha = 45^\circ$  und dem Sektionalabschnitt  $B_1B_2C_2C_1$  aufgebaut und die Schüttung liegt gleichmäßig verteilt in den Sektionen vor. Der Mittelpunkt des Drehrohres bildet den Koordinatenursprung des kartesischen Koordinatensystems. Das Drehrohr rotiert im Uhrzeigersinn und die Drehung beginnt von der negativen horizontalen Halbachse mit dem Drehwinkel  $\delta = 0^\circ$ , wobei der Drehwinkel mit  $OC_1$  definiert ist und den vollen Umfang für eine Rotation um  $360^\circ$  folgt.

Es wird ausschließlich der Querschnitt des Drehrohres analysiert, so dass die Länge des Drehrohres nicht berücksichtigt wird und die Kontaktfläche als lineare Kontaktflächenlänge formuliert wird. Hierbei sind  $l_{SG}$  die freie Bettoberfläche zwischen Schüttbett und Gas,  $P_1$  die Kontaktlänge zwischen dem Partikelbett und  $B_1C_1$ ,  $W_i$  die Kontaktlänge zwischen dem Partikelbett und dem Innenkreis  $B_1B_2$ ,  $P_2$  die Kontaktlänge zwischen dem Partikelbett und  $B_2C_2$ , und  $W_o$  die Kontaktlänge zwischen dem Partikelbett und der Außenwand des Drehrohrofens  $C_1C_2$ .

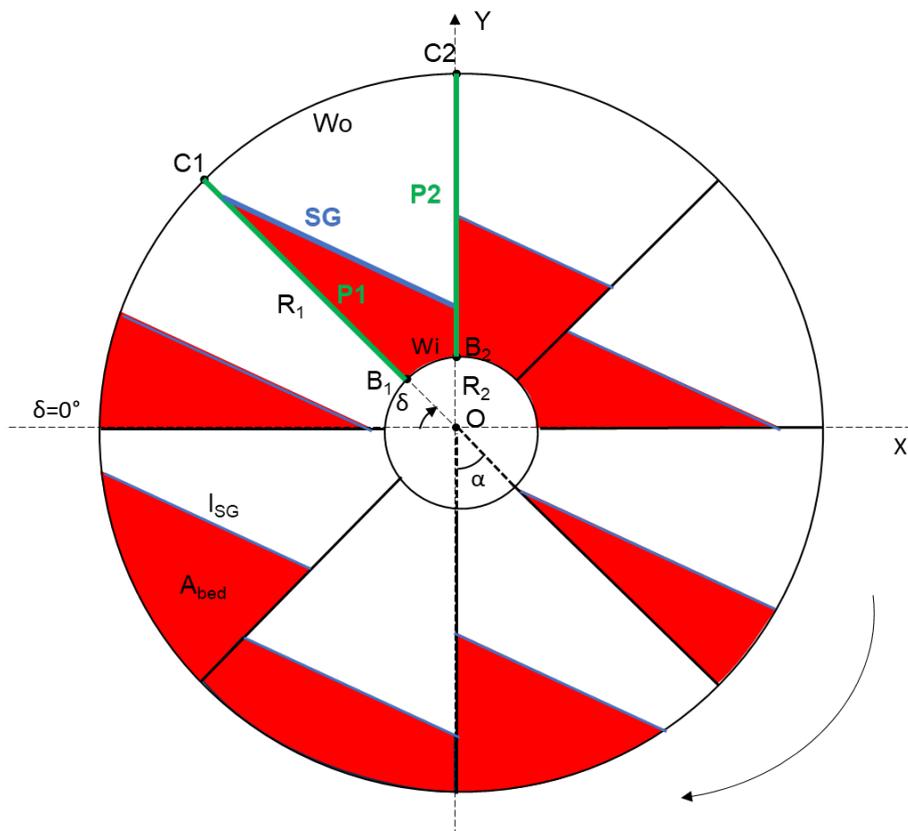


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Drehrohrofens mit Innensektionen im Querschnitt mit 2mm Kornschüttung und 30% Füllgrad.

## 1.2 Region 1 ( $\delta_{1,\min} < \delta_1 \leq \delta_{1,\max}$ ) ( $290 < \delta \leq 360^\circ$ and $0 < \delta \leq 4^\circ$ )

Eine vollständige Rotation des Drehrohres wird in 8 verschiedene Regionen unterteilt, wobei jede Region mit einem minimalen und maximalen Drehwinkel ( $\delta_{i,\min} < \delta_i \leq \delta_{i,\max}$ ) abgegrenzt wird. Dabei variieren die Werte von  $\delta_{i,\min}$  und  $\delta_{i,\max}$  in Abhängigkeit des Füllungsgrades und den Ofenabmessungen, so dass folglich die spezifische Parameterwerte für jeden Fall separat analysiert werden müssen. Die Region 1 ist schematisch und als der Screenshot einer realen Messung aus den Experimenten in Abbildung 2 dargestellt. In *Abbildung 2 (a)* wird nur ein Abschnitt des Drehrohrofens betrachtet. Die gleiche Region entspricht derjenigen, die in *Abbildung 2 (b)* mit roten Liniensegmenten eingeschlossen ist. Das Partikelbett, das als roter Teil DC1E gezeigt wird, besteht aus drei Oberflächen: dem Bogen DC<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>E und der freien Oberfläche DE, die in diesem Modell als  $I_{SG}$  bezeichnet wird. Im Experiment bestehen die Materialien aus 2 mm Glasperlen mit einem Füllungsgrad von 30 %.

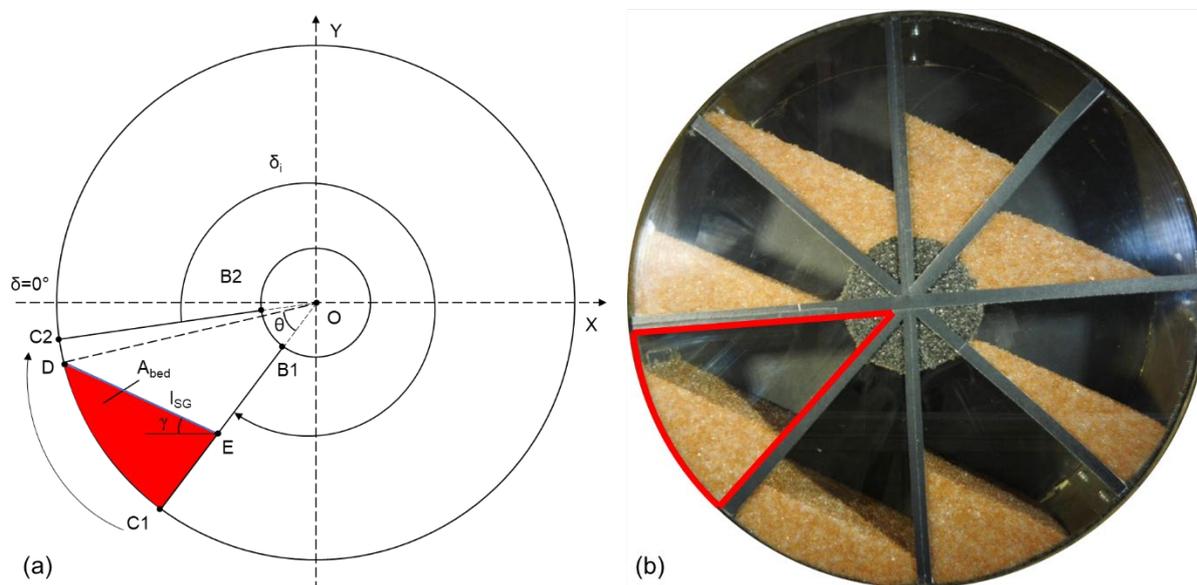


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 1 (a) und Screenshot der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle (b).

Der kinetische Schüttwinkel  $\gamma$  ist als der Winkel zwischen der freien Oberfläche des Partikelbetts und der Horizontalen definiert. Der Wert ist konstant und beträgt  $25^\circ$ . Für das Partikelbett in diesem Moment gilt, dass der Füllungsgrad und somit auch die Fläche des Bettes konstant ist, die durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$A_{section} = \frac{\alpha}{2} (R_1^2 - R_2^2), \quad A_{bed} = f A_{section} \quad (1)$$

Die Berechnung der freien Oberfläche und der Kontaktfläche zwischen dem Partikelbett und den Abschnittswänden wird über den Abstand zwischen den einzelnen Koordinaten der Punkte ermöglicht. Da der Punkt E immer auf der Linie B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> liegt, kann die Koordinate von E

bestimmt werden, wenn die unbekannte Länge OE als  $l$  festgelegt wird. Die Koordinate von E lautet:

$$E(x_1, y_1) , \quad (2)$$

$$x_1 = -l \cos(2\pi - \delta), y_1 = -l \sin(2\pi - \delta), (291^\circ \leq \delta \leq 360^\circ) \quad (3)$$

oder

$$x_1 = l \cos(\delta), y_1 = -l \sin(\delta), (0^\circ \leq \delta \leq 4^\circ). \quad (4)$$

Der Anstieg der Linie ED ist  $k = -\tan(\gamma)$ , und D ist der Schnittpunkt der Linie ED und des Kreises mit Radius  $R_1$ . Daher ergibt sich für die Linie ED:

$$y - y_1 = k(x - x_1). \quad (5)$$

Indem Gleichung 5 in die Kreisgleichung substituiert wird

$$x^2 + y^2 = R_1^2, \quad (6)$$

ergibt sich ein binäres Gleichungssystem in Bezug auf  $x$

$$Ax^2 + Bx + C = 0, \quad (7)$$

mit

$$A = 1 + k^2,$$

$$B = 2ky_1 - 2k^2x_1, \quad (8)$$

$$C = (kx_1 - y_1)^2 - R_1^2.$$

Als Lösung des Systems ergibt sich

$$x_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (9)$$

Es ist zu beachten, dass nur eine Lösung die korrekte Achse an diesem Punkt darstellt. Über die Position des Partikelbetts im Koordinatensystem, ergibt sich für  $x_2$  ein negativer Wert und der größte absolute Wert. Durch Substitution von  $x_2$  in die Gleichung der Linie ED, ergeben sich die Koordinaten des Punktes D( $x_2$ ,  $y_2$ ), wobei

$$y_2 = k(x_2 - x_1) + y_1. \quad (10)$$

Aus Abbildung 2 ist ersichtlich, dass die Fläche des Partikelbetts in diesem Moment durch Berechnung der Differenz zwischen der Fläche des Sektors  $OC_1D$  und der Fläche des Dreiecks ODE bestimmt wird. Der Zentralwinkel  $\theta$  des Sektors  $OC_1D$  beträgt

$$\cos \theta = \frac{\vec{OD} \cdot \vec{OE}}{|\vec{OD}| \cdot |\vec{OE}|}. \quad (11)$$

Die Flächen des Sektors  $OC_1D$  und des Dreiecks ODE betragen

$$A_{OC_1D} = \frac{1}{2} R_1^2 \theta \quad (12)$$

und

$$A_{ODE} = \frac{1}{2} |\vec{OD}| \cdot |\vec{OE}| \cdot \sin \theta. \quad (13)$$

Daher ist die Fläche des Partikelbetts

$$A_{DC_1E} = A_{OC_1D} - A_{ODE}. \quad (14)$$

Der Wert von  $l$  im Fall von  $A_{DC_1E} = A_{bed}$  wird iterativ ermittelt. Mit den Werten für die Länge  $l$  ergeben sich die Kontaktflächen mit

$$w_o = DC_1 = \theta R_1, \quad w_i = 0, \quad P_1 = R_1 - |\overrightarrow{OE}| \quad (15)$$

$$l_{SG} = DE = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (16)$$

### 1.3 Region 2 ( $\delta_{2,\min} < \delta_2 \leq \delta_{2,\max}$ ) ( $4 < \delta_2 \leq 23^\circ$ )

Die Regionen 2 und 3 werden kombiniert und als Übergangsregion bezeichnet, in der das Partikelbett gleichzeitig mit der inneren Zylinderwand und der äußeren Wand in Kontakt steht, wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 gezeigt. In Abbildung 3(a) ist ein Schema der Region 2 dargestellt. Das Partikelbett bildet ein unregelmäßiges Viereck, das aus zwei geraden Linien DE und C<sub>1</sub>B<sub>1</sub> sowie zwei Bögen C<sub>1</sub>D und B<sub>1</sub>E besteht. Die Radien der Bögen C<sub>1</sub>D und B<sub>1</sub>E sind jeweils R<sub>1</sub> und R<sub>2</sub>, mit dem Zentrum O. Die Fläche des Partikelbetts, wie die der Region 1, ist konstant und kann mithilfe von Gleichung 1 berechnet werden.

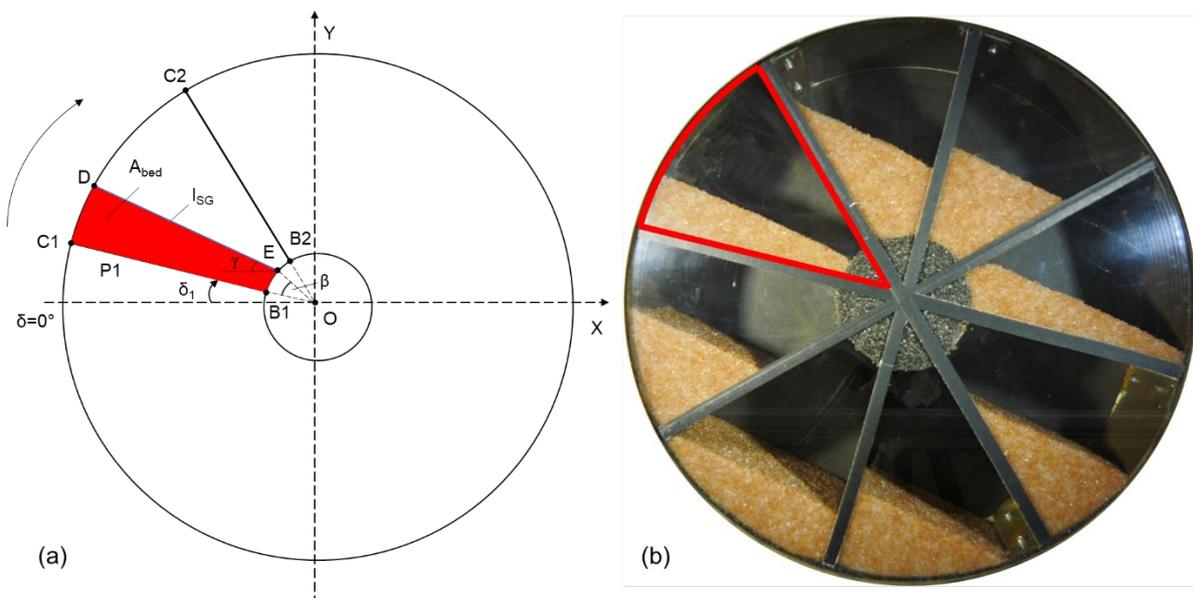


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 2 (a) und Screenshot der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle (b).

In diesem Fall gilt  $P_1 = R_1 - R_2$ ,  $P_2 = 0$ . Die unbekanntenen Oberflächenlängen sind der Bogen DC<sub>1</sub>, EB<sub>1</sub> und die freie Oberflächenlänge ED. Die Methode zur Bestimmung dieser Längen ist analog zu Region 1. Die Koordinaten der Schnittpunkte werden durch Gleichungen ermittelt, wodurch die entsprechenden Längen der Liniensegmente oder Bögen bestimmt werden können. Diese Methode ist auch auf andere Regionen in diesem Modell anwendbar. B<sub>1</sub> und C<sub>1</sub> variieren über den Umfangswinkel δ mit

$$B_1(-R_2 \cos \delta, R_2 \sin \delta) \quad \text{und} \quad C_1(-R_1 \cos \delta, R_1 \sin \delta), \quad (17)$$

Da E ein Punkt auf dem Kreis mit dem Radius  $R_2$  ist, ist die Koordinate von E, wenn der unbekannte Winkel  $\angle EOB_1$  als  $\beta$  festgelegt ist,

$$E(x_1, y_1), \quad (18)$$

$$x_1 = -R_2 \cos(\delta + \beta), y_1 = R_2 \sin(\delta + \beta), \quad (19)$$

wobei  $\beta \leq \alpha$ .

Der Anstieg der Linie ED ist ebenfalls  $k = -\tan(\gamma)$ , und D ist der Schnittpunkt der Linie ED und des Kreises mit Radius  $R_1$ . Daher lautet die Funktion der Linie ED wie in Gleichung 5 dargestellt. Wenn man die Gleichung der Linie ED in die Gleichung des Kreises in Gleichung 6 einsetzt, erhält man die Gleichungen 7 und 8, und die Lösungen dieser Gleichungen sind in Gleichung 9 angegeben.

Es ist zu beachten, dass nur eine Lösung die korrekte Achse an diesem Punkt darstellt. Über die Position des Partikelbetts im Koordinatensystem ergibt sich für  $x_2$  ein negativer Wert bei einem Winkel von  $\beta + \delta < 90^\circ$ . Setzt man  $x_2$  in die Gleichung der Linie ED ein, erhält man die Koordinaten des Punktes  $D(x_2, y_2)$ , wobei

$$y_2 = k(x_2 - x_1) + y_1. \quad (20)$$

In diesem Fall können die Koordinaten der vier Punkte  $C_1$   $B_1$   $E$   $D$  berechnet werden. Der nächste Schritt besteht darin, den Flächeninhalt des unregelmäßigen Vierecks zu bestimmen. Hierfür werden zunächst die vier Punkte mit geraden Linien verbunden, um ein Viereck  $DC_1B_1E$  und den Flächeninhalt  $A_1$  zu erhalten

$$A_1 = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right|. \quad (21)$$

Die Fläche des Vierecks ergibt sich aus den Flächen des Segments  $DC_1$  und des Segments  $EB_1$  mit

$$A_{DC_1} = \frac{1}{2} R_1^2 (\theta - \sin \theta). \quad (22)$$

$$A_{EB_1} = \frac{1}{2} R_2^2 (\theta - \sin \theta). \quad (23)$$

wobei  $\theta$  der zentrale Winkel des Bogens  $DC_1$  ist, der sich aus den Koordinaten wie folgt ableiten lässt

$$\cos \theta = \frac{\overrightarrow{OD} \cdot \overrightarrow{OC_1}}{|\overrightarrow{OD}| \cdot |\overrightarrow{OC_1}|}. \quad (24)$$

Die Fläche des unregelmäßigen Vierecks  $EDC_1B_1$  beträgt also

$$A_{EDC_1B_1} = A_1 + A_{DC_1} - A_{EB_1}. \quad (25)$$

Der Wert von  $\beta$  im Fall von  $A_{EDC_1B_1} = A_{bed}$  wird iterativ bestimmt. Nach der Lösung für die Werte der Winkel  $\theta$ ,  $\beta$  ergeben sich die Kontaktflächen

$$w_o = DC_1 = \theta R_1, w_i = EB_1 = \beta R_2, \quad (26)$$

$$l_{SG} = DE = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (27)$$

#### 1.4 Region 3 ( $\delta_{3,\min} < \delta_3 \leq \delta_{3,\max}$ ) ( $23^\circ < \delta \leq 44^\circ$ )

Ein weiterer Teil der transienten Partikelbewegung ist Region 3, die den Winkel  $\delta$  größer als  $23^\circ$  und kleiner oder gleich  $44^\circ$  umfasst. In Abbildung 4 ist das Schema des Partikelbettzustands und der entsprechende experimentelle Screenshot aufgezeigt. Hierbei bildet das Partikelbett ein unregelmäßiges Fünfeck, das aus den Liniensegmenten  $C_1B_1$ ,  $B_2E$  und  $DE$  sowie den Bögen  $B_1B_2$  und  $C_1D$  besteht. Der transiente Zustand endet, wenn  $C_1D$  gleich null ist. Daher ist in Region 3 P1 ein konstanter Wert, der R1-R2 beträgt.  $W_i$  ist ebenfalls ein konstanter Wert, mit

$$w_i = \alpha R_2. \quad (28)$$

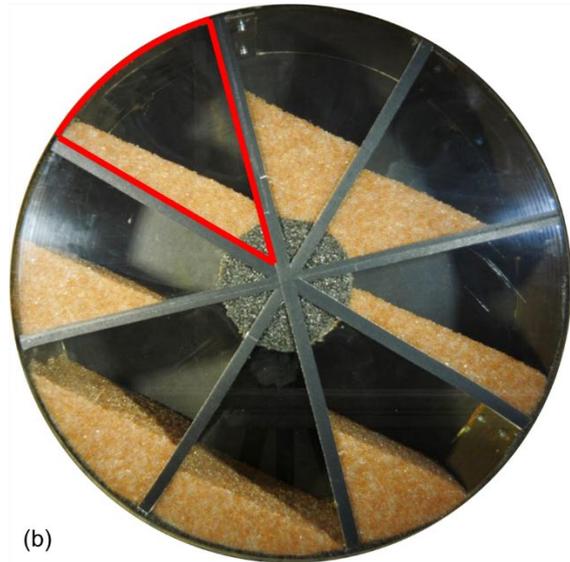
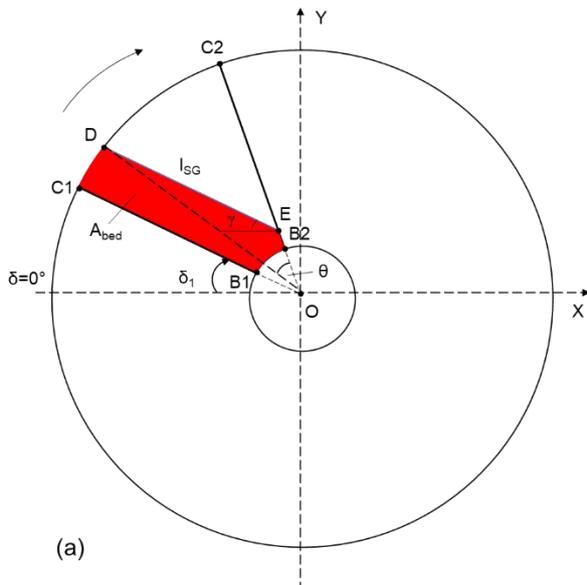


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 3 (a) und Screenshot der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle (b).

Ähnlich wie bei den Lösungen für Region 1 und Region 2 ergeben sich aus den Koordinaten jedes Punktes die Längen der jeweiligen Kontaktflächen. In Region 3 wird die Fläche des Partikelbetts durch Subtraktion der Fläche des Abschnitts  $EC_2D$  von Abschnitt  $B_1B_2C_2C_1$  berechnet. Die Länge von  $OE$  wird als  $l$  festgelegt, und die Koordinate von  $E$  ist

$$E(x_1, y_1) , \quad (29)$$

$$x_1 = -l \cos(\delta + \alpha) , y_1 = l \sin(\delta + \alpha) , (23^\circ < \delta \leq 44^\circ). \quad (30)$$

Die Funktion der Linie  $ED$  ist in Gleichung 5 dargestellt. Durch die Verwendung der Gleichungen 6, 7 und 8 ergibt sich  $x$  aus Gleichung 9. Die Lösung für  $x_2$  sollte den negativen Wert annehmen, da sich der Punkt  $D(x_2, y_2)$  im zweiten Quadranten befindet.  $y_2$  wird aus Gleichung 10 abgeleitet.

Die Fläche des Sektors  $OC_2D$  beträgt somit

$$A_{OC_2D} = \frac{1}{2} R_1^2 \theta , \quad (31)$$

und

$$\cos \theta = \frac{\overrightarrow{OD} \cdot \overrightarrow{OC_2}}{|\overrightarrow{OD}| \cdot |\overrightarrow{OC_2}|} \quad (32)$$

Durch geometrische Beziehungen wird die Fläche von  $EC_2D$  wie folgt bestimmt

$$A_{EC_2D} = A_{OC_2D} - A_{DOE}, \quad (33)$$

wobei die Dreiecksfläche DOE nach Gleichung 13 berechnet wird. Und die Fläche des Partikelbetts beträgt

$$A_{B_1B_2EDC_1} = A_{B_1B_2C_1C_2} - A_{EC_2D}. \quad (34)$$

Der Wert von  $l$  wird iterativ mit  $A_{B_1B_2EDC_1} = A_{bed}$  ermittelt. Schließlich sind die restlichen Kontaktflächen

$$w_o = DC_1 = (\alpha - \theta)R_1, P_2 = l - R_2, \quad (35)$$

$$l_{SG} = DE = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (36)$$

### 1.5 Region 4 ( $\delta_{4,\min} < \delta_4 \leq \delta_{4,\max}$ ) ( $44^\circ < \delta \leq 137^\circ$ )

Der Bereich der Region 4 liegt dort, wo  $\delta$  größer als  $44^\circ$  und kleiner oder gleich  $137^\circ$  ist. Innerhalb dieses Bereichs steht das Partikelbett in Kontakt mit  $C_1B_1$  und  $B_2C_2$ . Daher wird ein unregelmäßiges Viereck durch die 3 Liniensegmente DE,  $DB_1$ ,  $EB_2$  und den Bogen  $B_1B_2$  gebildet, wie im roten Bereich der Abbildung 5(a) gezeigt. Analog zu den Lösungen für die oben genannten Regionen ist die Länge von OE gleich  $l$  angenommen. In dieser Region wird die Fläche des Partikelbetts durch Berechnung der Differenz zwischen der Fläche des Dreiecks OED und dem Sektor  $OB_1B_2$  ermittelt werden. Die Koordinate des E ist

$$E(x_1, y_1), \quad (37)$$

$$x_1 = l \cos(\pi - \delta - \alpha), y_1 = l \sin(\pi - \delta - \alpha), (45^\circ < \delta \leq 137^\circ) \quad (38)$$

oder

$$x_1 = -l \cos(\delta + \alpha), y_1 = l \sin(\delta + \alpha), (44^\circ < \delta \leq 45^\circ) \quad (39)$$

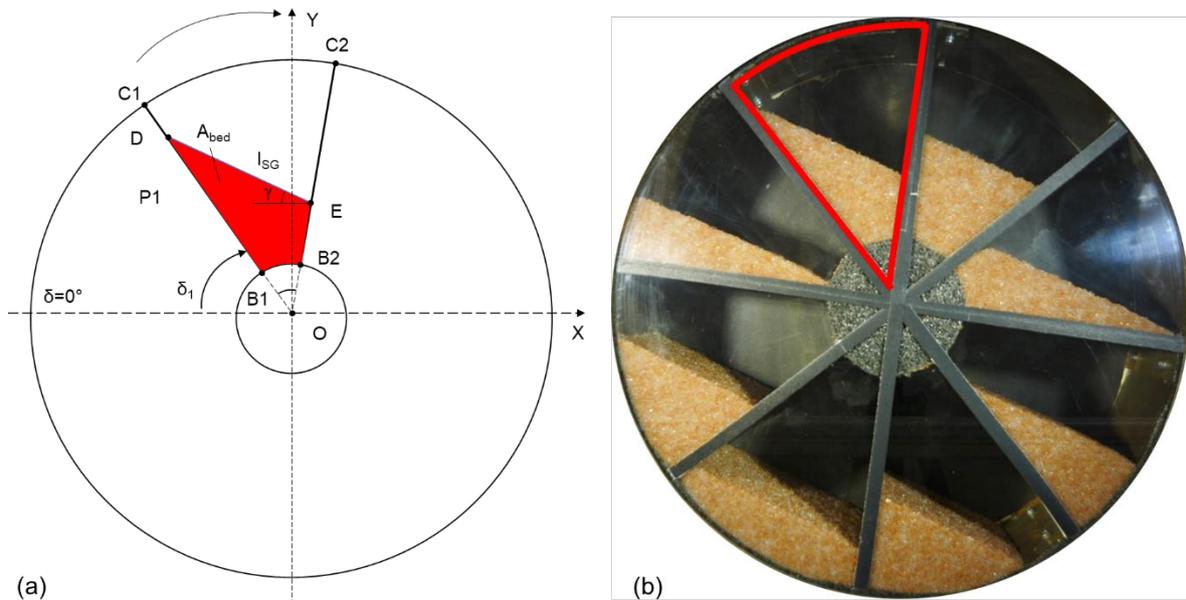


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 4 (a) und Screenshot der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle (b).

Die Funktion der Linie ED wird ebenfalls aus Gleichung 5 bestimmt. In diesem Fall erscheint Punkt D nicht mehr auf dem Kreis, sondern bewegt sich entlang der Geraden OC<sub>1</sub>. Es ist daher erforderlich, die Gleichung der Geraden OC<sub>1</sub> zu bestimmen. Durch Lösen des Gleichungssystems werden die Koordinaten des Punktes D(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>) ermittelt:

$$y_2 = k_{OC_1} x_2, \quad (40)$$

$$k_{OC_1} = -\tan \delta, (44^\circ < \delta < 90^\circ) \quad (41)$$

oder

$$k_{OC_1} = \tan(\pi - \delta), (90^\circ < \delta \leq 137^\circ) \quad (42)$$

Sofern  $\delta = 90^\circ$ , wird die Fläche des Partikelbetts wie folgt berechnet:

$$A_{B_1B_2ED} = A_{ODE} - A_{OB_1B_2}. \quad (43)$$

und

$$A_{ODE} = \frac{1}{2} |\overrightarrow{OD}| \cdot |\overrightarrow{OE}| \cdot \sin \alpha, \quad (44)$$

$$A_{OB_1B_2} = \frac{1}{2} R_2^2 \alpha. \quad (45)$$

Die Länge  $l$  wird iterativ bestimmt. Mit den Koordinaten jedes Punktes ergeben sich die endgültigen Längen aller Kontaktflächen mit

$$w_o = 0, \quad w_i = \alpha R_1, \quad P_2 = l - R_2, \quad P_1 = |\overrightarrow{OD}| - R_1 \quad (46)$$

und

$$l_{SG} = DE = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (47)$$

### 1.6 Region 5 ( $\delta_{5,\min} < \delta_5 \leq \delta_{5,\max}$ ) ( $137^\circ < \delta \leq 162^\circ$ ) und ( $\delta_{6,\min} < \delta_6 \leq \delta_{6,\max}$ ) Region 6 ( $163^\circ < \delta \leq 178^\circ$ )

Die Regionen 5 und 6 sind ebenfalls Übergangsregionen. In Abbildung 6 und 7 sind jeweils das Schema und ein exemplarischer Screenshot aus dem Experiment der Region 5 und 6 dargestellt. Durch die Fotoanalyse kann beobachtet werden, dass die Partikelbettverteilung in Region 5 der in Region 3 ähnelt – lediglich spiegelverkehrt. Ebenso ähnelt die Partikelbettverteilung in Region 6 der in Region 2. Daher können die Kontaktflächen des Partikelbetts mit der Innenwand des Drehrohrofens und der freien Oberfläche in diesen beiden Regionen jeweils analog zu den Regionen 3 und 2 berechnet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich das Partikelbett auf der rechten Hälfte der x-Achse befindet, sodass die horizontalen Koordinaten aller Punkte positiv sind.

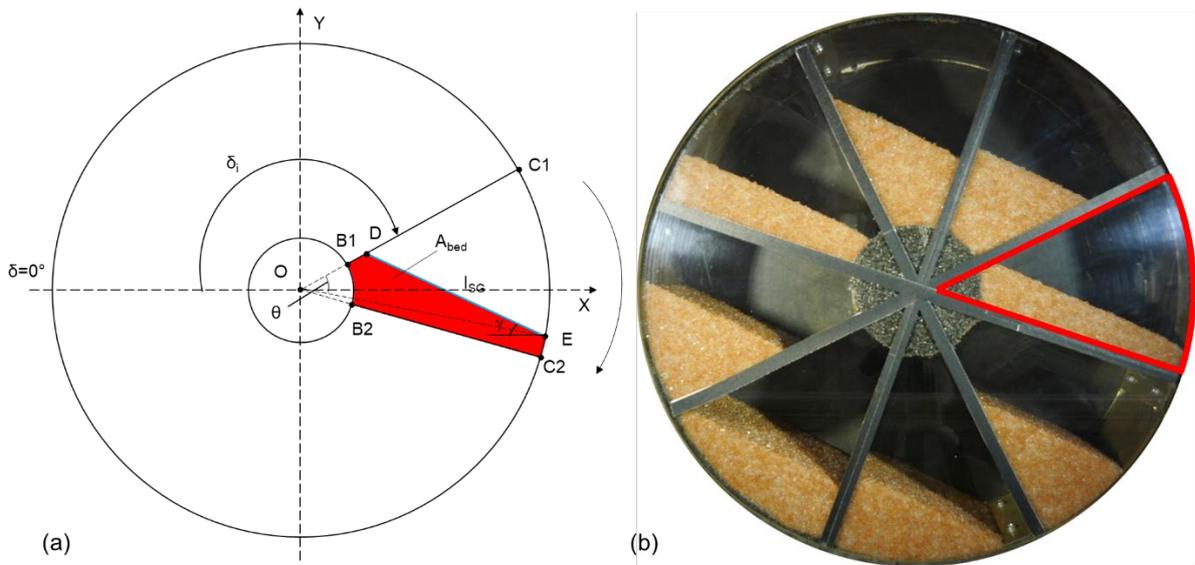


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 5 (a) und Screenshot der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle (b).

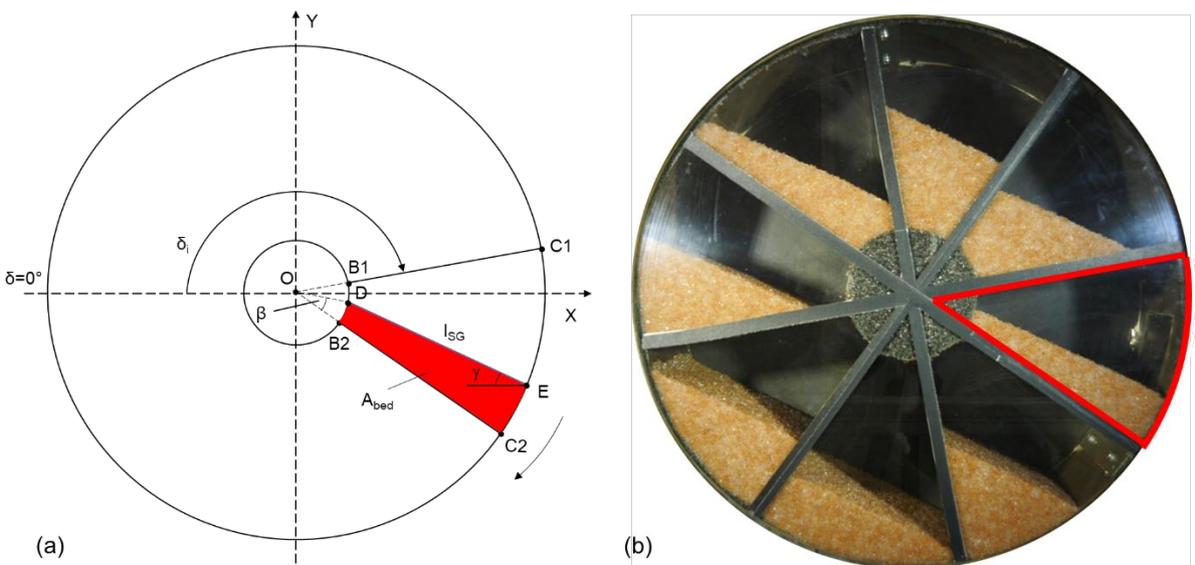


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 6 (a) und Screenshot der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle (b).

### 1.7 Region 7 ( $\delta_{7,min} < \delta_7 \leq \delta_{7,max}$ ) ( $178^\circ < \delta \leq 254^\circ$ )

Abbildung 8 zeigt das Schema und den experimentellen Screenshot der Partikelbettverteilung in Region 7. Im Vergleich zu Abbildung 2 kann festgestellt werden, dass die Form des Partikelbetts und dessen Kontaktzustand mit der Innenwand des Ofens denen in Region 1 analog sind. Daher kann die Berechnungsmethode für Region 1 verwendet werden, um die Kontaktfläche und die Fläche der freien Oberfläche in diesem Fall zu berechnen.

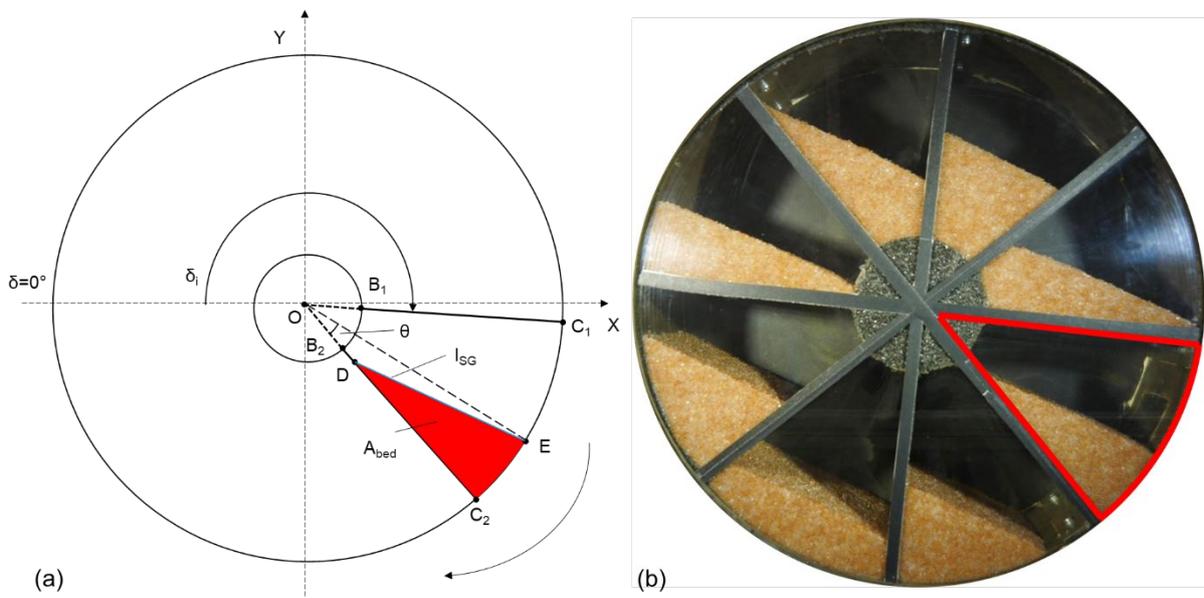


Abbildung 8 Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 7 und Bildschirmfoto der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle.

### 1.8 Region 8 ( $\delta_{8,min} < \delta_8 \leq \delta_{8,max}$ ) ( $254^\circ < \delta \leq 290^\circ$ )

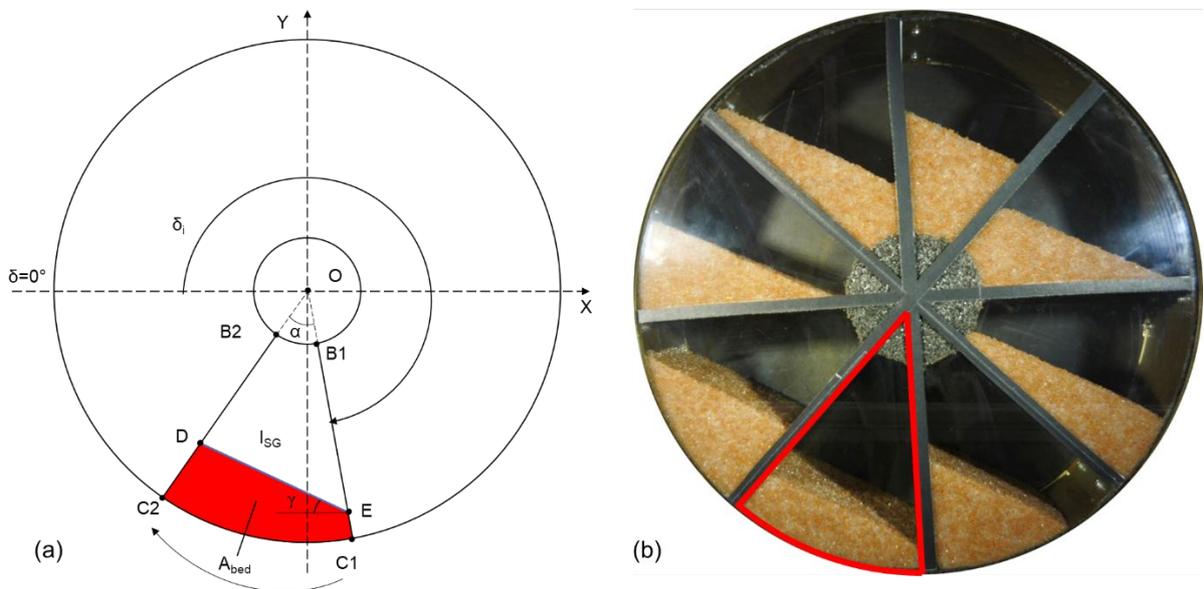


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Partikelbetts in Region 8 (a) und Screenshot der Versuchsergebnisse an der entsprechenden Stelle (b).

Abbildung 9 zeigt ebenfalls ein Schema und einen experimentellen Screenshot der Partikelbettverteilung in Region 8. Im Vergleich zu Abbildung 5 kann festgestellt werden, dass sich die Form des Partikelbetts und dessen Kontaktzustand mit der Innenwand des Ofens zwar von denen in Region 4 unterscheiden, die Analyse jedoch zeigt, dass die Methode zur Berechnung der Fläche des Dreiecks ODE in dieser Region der in Region 4 analog angewendet werden kann. Durch Berechnung der Differenz zwischen der Fläche des gesamten Sektors OC2C1 und des Dreiecks ODE können die Fläche des Partikelbetts und die Koordinaten jedes Punktes ermittelt werden. Daher kann die Berechnungsmethode für Region 4 verwendet werden, um die Kontaktfläche und die Fläche der freien Oberfläche in diesem Fall zu berechnen.

## Arbeitspaket 2: Umbau der vorhandenen Versuchsanlage und Inbetriebnahme der Anlage

Um die Güte des Modells zu quantifizieren, wird eine Versuchsanlage (Batch-Drehrohranlage) konzipiert und aufgebaut, an der experimentelle Untersuchungen mit einer breiten Parametervariation durchgeführt werden können. Die Drehrohre besitzen dabei Durchmesser von 300 mm und 500 mm und als Parameter werden die Anzahl an Sektionen, die radiale Verteilung der Sektionen, die Drehzahl der Rohre, der Füllungsgrad des Rohres, die Partikeldichte, die Partikelgröße sowie die Partikelform variiert. Dabei soll der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die transversale Bewegungscharakteristik und die effektive Wärmeübertragungsfläche aufgezeigt werden. Ein Entwurf der Versuchsanlage kann Abbildung 10 entnommen werden.

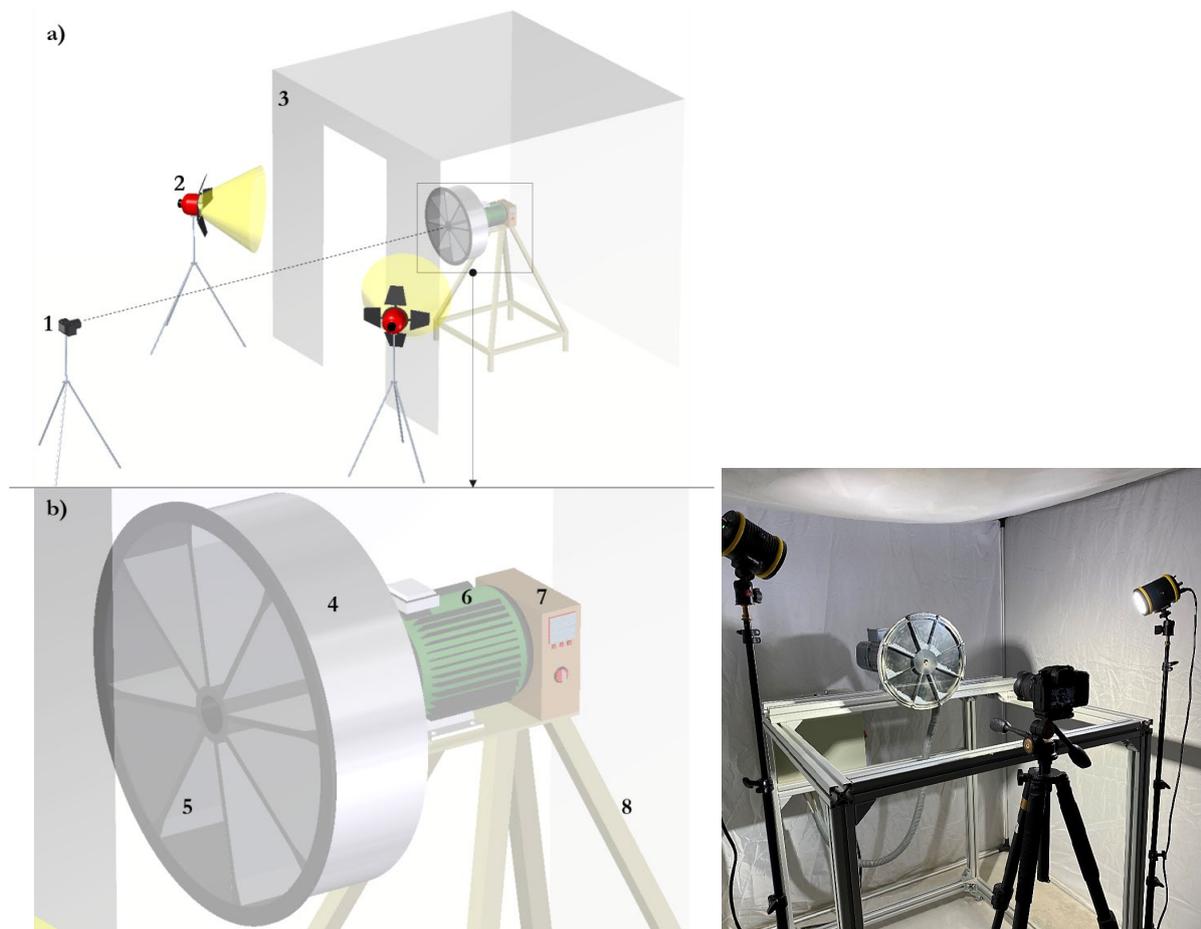


Abbildung 7: Apparativer Aufbau der Versuchsanlage a) Gesamtübersicht, b) Detailansicht des Drehrohres. Darin dargestellt: (1: Kamera mit Stativ 2: Videoleuchte mit Stativ 3: Lichtzelt 4: Drehrohr 5: Sektionaleinbauten 6: Elektromotor 7: Frequenzumrichter 8: Gestell)

Das Versuchs-Drehrohr wird dabei horizontal gelagert, im Batch-Verfahren betrieben und über einen an der rückwärtigen Stirnseite installierten Drehstrommotor angetrieben. Auf der vorderen Stirnseite ist eine Glasscheibe installiert, um die Sichtbarkeit der Partikel zu gewährleisten. Die Bewegungen werden dabei mit einer ultrahochauflösenden Systemkamera aufgezeichnet (Typ Lumix GH5), um separate Partikeltrajektorien erfassen zu können. Die

Messdaten werden anschließend digital ausgewertet. Da bisher bekannte Bildanalysen zumeist ein rechen- und zeitintensives Potential bilden, wurde eine automatisierte Auswerteroutine entwickelt, um eine optimale Analysemethodik zu gewährleisten. Aus den Videoaufzeichnungen erfolgt ein Export in einzelne Bilddateien, welche grafisch ausgewertet wurden. Als Tool für die manuelle grafische Auswertung wurde die Software ImageJ verwendet. Die Verläufe der Phasengrenzflächen wurden eruiert. Außerdem wurde der Umfang der Phasengrenzflächen bestimmt.

## Arbeitspaket 3-5: Analyse des Einflusses der Betriebsparameter und der Apparateparameter auf das Bewegungsverhalten der Schüttung. Validierung des mathematischen Modells mit den experimentellen Messungen und Sensitivitätsanalyse der Einflussparameter.

### 3.1 Validierung der Simulationsergebnisse

Bevor die experimentellen Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen verglichen werden, ist es wichtig zu überprüfen, ob die Annahmen im zweiten Teil dieses Berichts korrekt sind, insbesondere ob der kinetische Schüttwinkel  $\gamma$  konstant ist. Der kinetische Schüttwinkel ist in Abhängigkeit von der Umfangsposition in Abbildung 11 dargestellt. Die dabei eingestellten experimentellen Parameter sind eine Drehzahl  $n = 1$  rpm, der Füllungsgrad  $f = 30\%$  und das Versuchsmaterial sind sphärische Glaskugeln mit einem Partikeldurchmesser von  $d_p = 2$  mm. Die Fehlerbalken in der Abbildung repräsentieren eine Standardabweichung von 1,0. Es ist ersichtlich, dass  $\gamma = 25^\circ$  mit einer Genauigkeit von 10% beträgt. Daher kann gefolgert werden, dass die Annahme bezüglich des kinetischen Böschungswinkels  $\gamma$  im Modell korrekt ist.

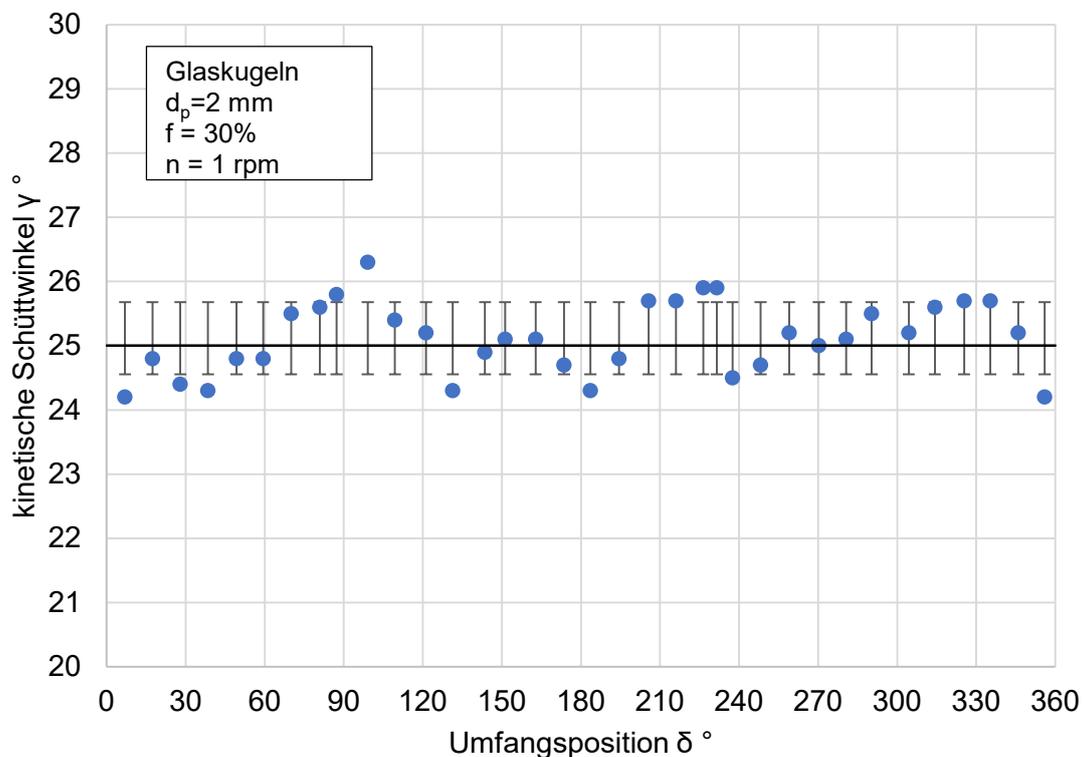


Abbildung 8: Der kinetische Schüttwinkel in Abhängigkeit des Umfangswinkels

Abbildung 12 zeigt den Verlauf der Kontaktfläche zwischen dem Partikelbett und der Innenwand des Drehrohrofens über einen vollständigen Rotationszyklus ( $\delta = 0 \dots 360^\circ$ ). Die in der Abbildung dargestellten Parameter sind die Drehzahl  $n = 1$  rpm, der Füllungsgrad  $f = 30\%$  und das Versuchsmaterial mit Glaskugeln  $d_p = 2$  mm. In der Abbildung werden die Simulationsergebnisse durch Volllinien und die entsprechenden experimentellen Daten durch Punktwerte dargestellt.

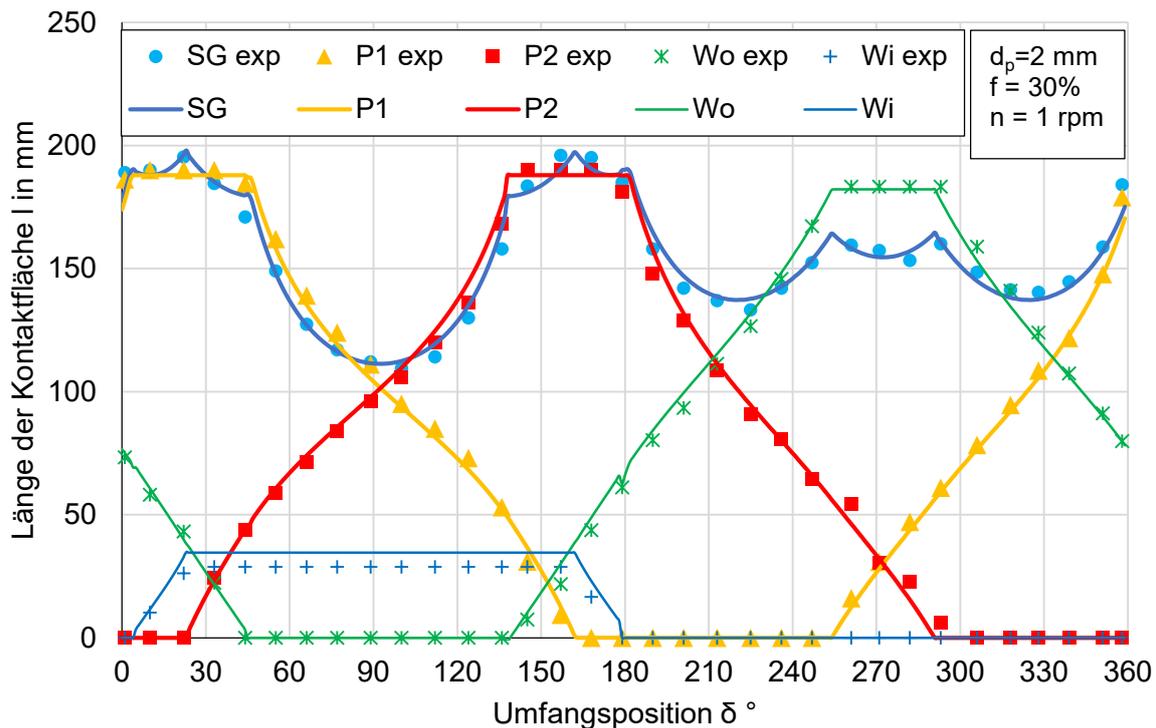


Abbildung 9: Die Kontaktflächen in Abhängigkeit der Umfangsposition  $\delta$

In Abbildung 12 kann beobachtet werden, dass, abgesehen von der Länge der freien Oberfläche, die anderen vier Kontaktflächen – P1, P2, Wo und Wi – eine klare Periodizität aufweisen. Zum Beispiel behält P1 seinen Maximalwert von etwa  $0^\circ$  bis ungefähr  $50^\circ$ . Danach nimmt er ab und erreicht seinen Minimalwert von 0 um  $160^\circ$ , behält diesen Minimalwert bis etwa  $250^\circ$ , was ungefähr dem Doppelten des Bereichs seines Maximalwerts entspricht. Danach steigt er wieder an und erreicht seinen Maximalwert nahe  $360^\circ$ , womit ein vollständiger Zyklus abgeschlossen ist. Aus dem zyklischen Muster ist ersichtlich, dass die Raten des An- und Absteigens ungefähr gleich sind. Ein ähnliches Muster ist bei P2 zu beobachten. Wo und Wi folgen ebenfalls einem ähnlichen zyklischen Muster, jedoch mit signifikanten Unterschieden. Aufgrund des Durchmesserunterschieds zwischen den inneren und äußeren Wänden des Ofens ist der Maximalwert von Wo offensichtlich größer als der von Wi, und der Bereich, in dem Wo seinen Maximalwert beibehält, ist schmaler. Insbesondere für P1 liegt dieser Bereich zwischen  $250^\circ$  und  $290^\circ$ , und für P2 zwischen  $20^\circ$  und  $160^\circ$ .

Die Variation der Länge der freien Oberfläche ist schwierig mit einem einzigen vollständigen Zyklus zu beschreiben. Basierend auf der Analyse im zweiten Abschnitt und den in Abbildung 12 gezeigten Kurven kann sie in zwei Teile unterteilt werden:  $0-180^\circ$  und  $180-360^\circ$ , was jeweils den oberen und unteren Hälften der y-Achse in Abbildung 1 entspricht.

Im ersten Teil steigt die Länge der freien Oberfläche kontinuierlich von  $0^\circ$  an und erreicht ihren Maximalwert in der Übergangsbewegungsregion (Region 3). Danach nimmt sie kontinuierlich ab und erreicht ihren Minimalwert bei  $90^\circ$ , was auch das Minimum für den gesamten Zyklus darstellt. Anschließend steigt sie wieder an und erreicht ein weiteres Maximum in der zweiten

Übergangsbewegungsregion (Region 5), bevor sie wieder zu sinken beginnt. In diesem ersten Teil ist die Wertkurve symmetrisch, mit dem Symmetriezentrum bei  $\delta$  gleich  $90^\circ$ .

Im zweiten Teil ( $180-360^\circ$ ) durchläuft die Kurve der freien Oberflächenlänge ebenfalls eine periodische Reihe von Abnahmen und Zunahmen. Diese Kurve ist symmetrisch zur vertikalen Linie bei  $\delta$  gleich  $270^\circ$ .

In Abbildung 13 ist der Vergleich zwischen allen experimentellen Daten und den entsprechenden Simulationsergebnissen sowie die  $R^2$ -Werte für jede Kontaktfläche gegeben. Mit Ausnahme der freien Oberfläche, die einen  $R^2$ -Wert von 0,97 aufweist, liegen die  $R^2$ -Werte für die anderen vier Kontaktflächen alle bei 0,99. Infolge der hohen Übereinstimmung zwischen den experimentellen Daten und den Simulationsergebnissen, wird das Modell als hinreichend genau eingestuft.

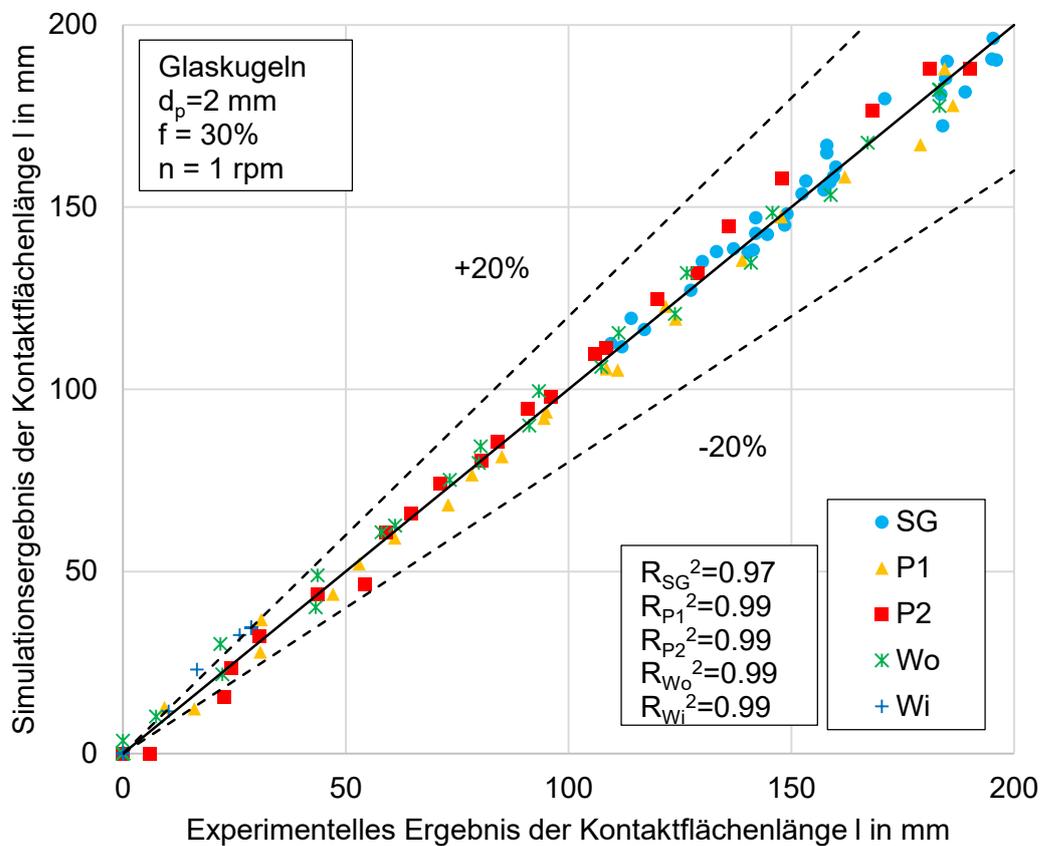


Abbildung 10: Der Vergleich zwischen den Versuchs- und Simulationsergebnissen der Kontaktflächenlänge  $l$

### 3.2 Definition der Wärmeübertragungsflächen

Für die in dem nachfolgenden Projekt relevanten Wärmeübertragungsanalyse und die Prozessmodellierung im Drehrohr sind die wesentlichen Kontaktflächen zu definieren. Je nach Prozessführung bestehen hierzu folgende Varianten:

- a) Die Temperaturen der beiden Sektionalplatten sind gleich, jedoch different zu den Wandtemperaturen, so dass sich die Kontaktfläche Solid-Wand-1 aus  $P1+P2$  und Solid-Wand-2 aus  $W_i+W_o$  ergibt.
- b) Die Temperaturen der Sektionalplatten sind gleich der Temperaturen der inneren und äußeren Wand des Ofens, so dass sich die Kontaktfläche Solid-Wand aus  $P1+P2+W_i+W_o$  ergibt.

In beiden Fällen bleibt die Bettoberfläche Solid-Gas als weitere Kontaktfläche für den Wärmeübergang stets erhalten.

Für die Variante (a) sind die Kontaktflächenverläufe über den Umfang in Abbildung 14 dargestellt. Diese Abbildung kann den Punkt verwenden, an dem der Winkel  $\delta = 180^\circ$  beträgt, als Grenze, wobei die linke Seite das Partikelbett in der oberen Hälfte des Drehrohrofens darstellt und die rechte Seite die untere Hälfte. Es ist ersichtlich, dass in der oberen Hälfte die kombinierte Fläche von  $P1+P2$  während des gesamten Zyklus am höchsten ist und zwei identische und symmetrische Spitzen aufweist, mit der Symmetrieachse bei  $\delta$  gleich  $90^\circ$ . Innerhalb dieses Zyklus erlebt die kombinierte Fläche, die mit den inneren Wänden in Kontakt steht, zuerst eine stabile Phase in Region 2, steigt dann schnell auf ihren Maximalwert in Region 3. In Region 4 erfolgt eine Abnahme, gefolgt von einem Anstieg, wobei der Maximalwert erneut erreicht wird. Anschließend nimmt sie in Region 5 schnell ab und bleibt in Region 6 stabil. In der unteren Hälfte nimmt die kombinierte Fläche von  $P1$  und  $P2$  in Region 7 weiter ab, bis sie den Minimalwert für den gesamten Zyklus erreicht. In Region 8 endet der Abwärtstrend und es gibt einige Schwankungen. Schließlich steigt sie in Region 1 kontinuierlich an und vervollständigt somit einen Zyklus. Im Gegensatz dazu zeigt die kombinierte Fläche, von  $W_o+W_i$  im Vergleich mit den Kurven in Abbildung 12, dass, obwohl es einige Variationen gibt, der Maximalwert und sein Bereich unverändert bleiben. Der allgemeine Verlauf der Kurve ist ziemlich klar, besonders im unteren Bereich des Drehrohrofens ( $180^\circ - 360^\circ$ ), wo er vollständig mit der Kurve von  $W_o$  übereinstimmt. Dies liegt daran, dass in diesen Bereichen das Partikelbett nicht mit der Innenwand des Drehrohrofens in Kontakt kommt. Zusätzlich entspricht in der oberen Hälfte des Drehrohrofens der Minimalwert der Kurve dem Maximalwert von  $W_i$ . In den Regionen 2 und 6 gibt es zwei relativ stabile Bereiche, was den größten Unterschied zu Abbildung 12 darstellt.

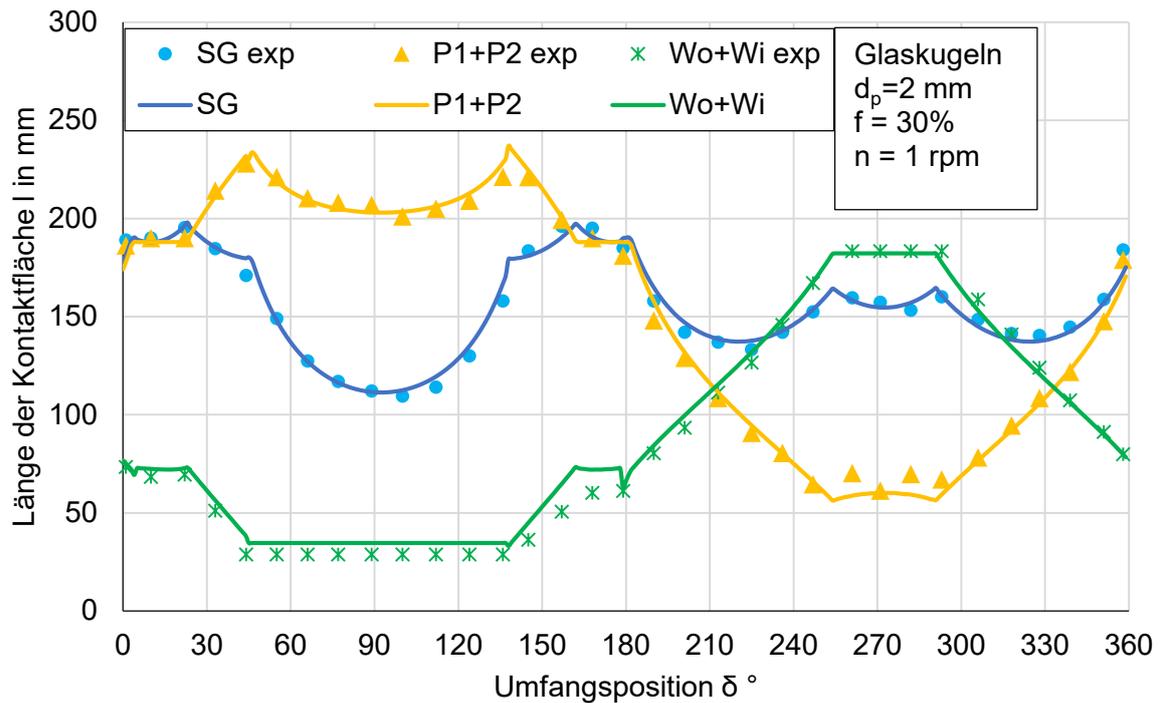


Abbildung 11: Die Länge der Kontaktfläche in Abhängigkeit der Umfangsposition  $\delta$

Für die Variante (b) sind die Ergebnisse in Abbildung 15 dargestellt. In diesem Szenario ist die gesamte Kontaktfläche zwischen dem Partikelbett und dem Drehofen immer größer als die Fläche der freien Oberfläche. Daher bleibt die Wärmeleitung der dominierende Wärmetransfermechanismus. Darüber hinaus ist aus der Kurve ersichtlich, dass die gesamte Kontaktfläche in der oberen Hälfte des Drehrohrofens größer ist als in der unteren Hälfte.

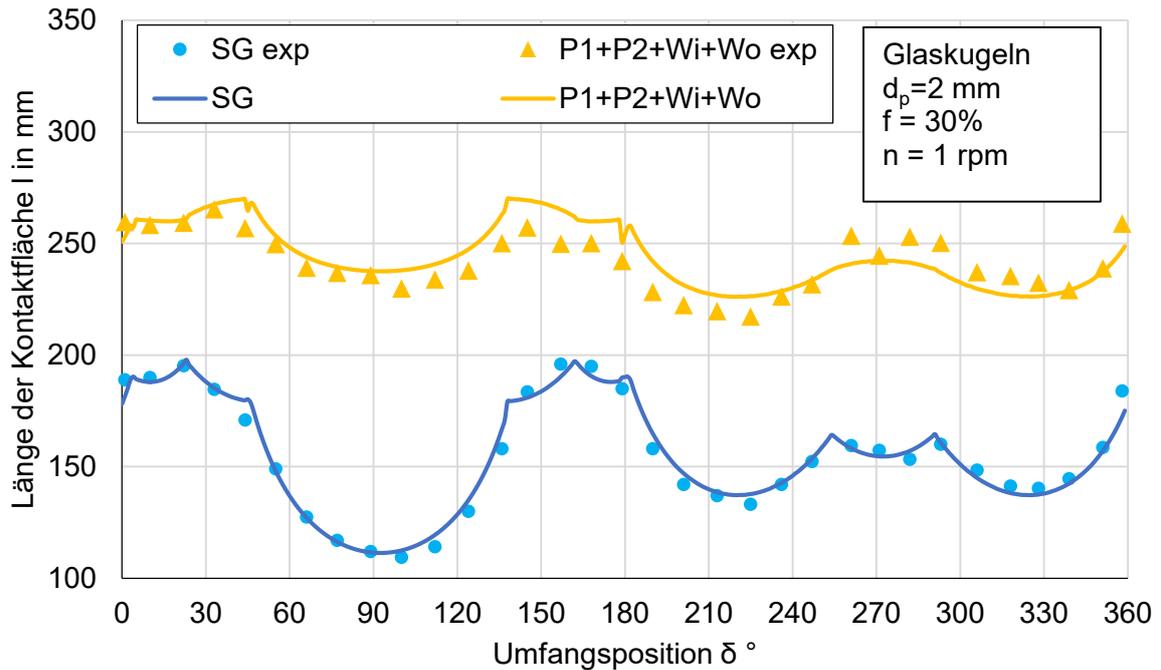


Abbildung 12: Die Länge der Kontaktfläche in Abhängigkeit der Umfangsposition  $\delta$

### 3.3 Einfluss der Drehzahl

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Drehzahl des Drehrohrofens auf die Wärmeübertragungskontaktflächen untersucht. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Drehzahl nur minimale Auswirkungen auf die Kontaktfläche des Partikelbetts hat. Wenn die Kontaktfläche einer einzelnen Oberfläche aus Abbildung 12 gemittelt wird, variieren diese Mittelwerte nicht mit Änderungen der Drehzahl. Daher wird ein neuer Parameter benötigt, um die Beziehung zwischen Drehzahl und Kontaktfläche zu beschreiben. Die mittlere Kontaktflächenrate  $\dot{l}$ , als durchschnittliche Kontaktfläche, in Relation zu der Zeit, die das Drehrohr für eine vollständige Umdrehung benötigt, wird neu eingeführt:

$$\dot{l} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{\delta=0}^{360} l_{\delta, surface}}{60/n}. \quad (48)$$

Dabei ist der Zähler die durchschnittliche Kontaktfläche für jede erforderliche Fläche und  $n$  die Drehzahl (rpm). Der Einfluss zwischen Oberflächengeschwindigkeit und Drehzahl ist in Abbildung 16 dargestellt

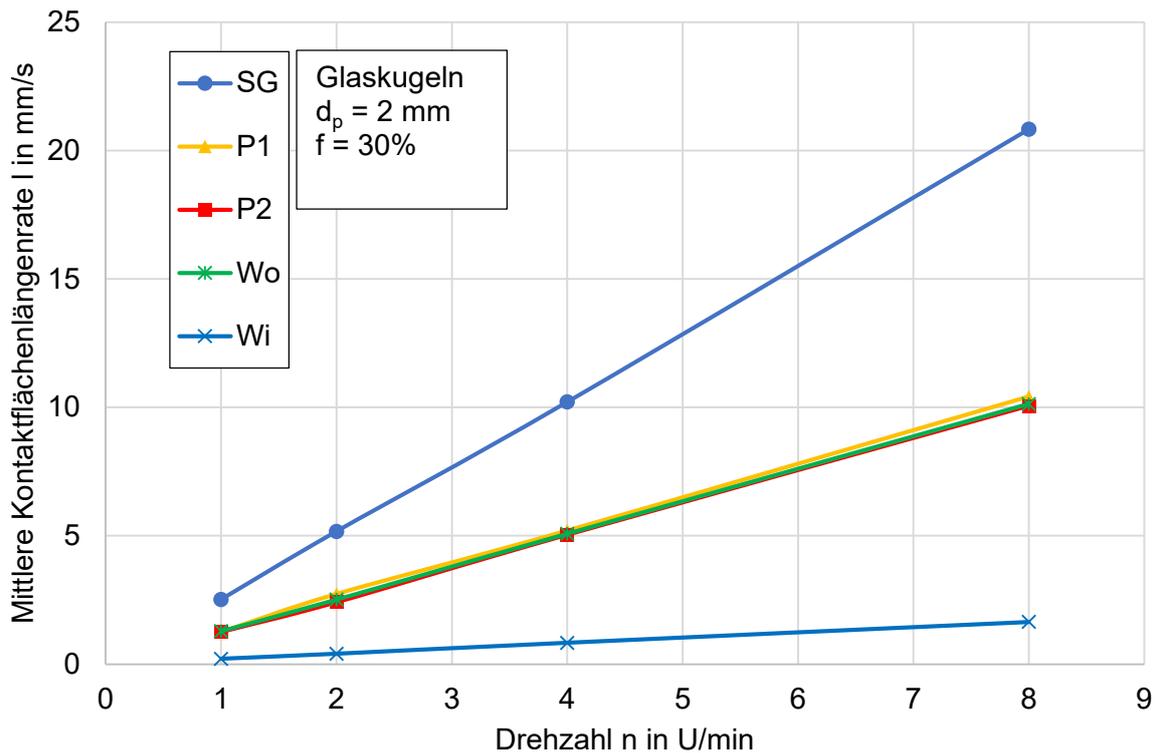


Abbildung 13: Der Einfluss der Drehzahl auf die mittlere Kontaktflächenlänge

Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Drehgeschwindigkeit die durchschnittliche Kontaktflächenrate aller Typen ansteigt. Unter ihnen zeigt Wi den geringsten Anstieg, während die freie Oberfläche den größten Anstieg verzeichnet. Bemerkenswert ist, dass die Durchschnittswerte der Kontaktflächen für P1, P2 und Wo sehr nah beieinander liegen und das gleiche Veränderungsmuster mit zunehmender Drehgeschwindigkeit aufweisen. Dies zeigt, dass innerhalb dieser Struktur bei einem einzelnen Sektor die Erhöhung der Drehgeschwindigkeit die Kontaktfläche zwischen dem Partikelbett und den Innenwänden der Kammer des Drehrohrofens innerhalb desselben Zeitraums vergrößert.

Beim Vergleich der Daten der freien Oberfläche mit jeder anderen einzelnen Oberfläche kann beobachtet werden, dass ihr Wert sich mit zunehmender Drehgeschwindigkeit viel signifikanter ändert als bei jeder anderen Oberfläche. Daher wird bei hohen Drehgeschwindigkeiten die konvektive Wärmeübertragung an der freien Oberfläche ein sehr wichtiger Teil des Wärmeübertragungsprozesses.

Zur weiteren Analyse der Daten wird dieselbe Annahme der Temperaturverteilung der Kontaktflächen im Ofeninneren wie in Abbildung 14 verwendet, wobei angenommen wird, dass P1 und P2 die gleiche Temperatur haben und Wo und Wi die gleiche Temperatur haben. Unter diesen Bedingungen wird die Gleichung 48 angewendet, um die durchschnittliche Kontaktflächenrate für die kombinierten Kontaktflächen zu bestimmen. Die Beziehung zwischen dieser Rate und der Drehgeschwindigkeit ist in Abbildung 17 dargestellt.

Es kann beobachtet werden, dass die mittlere Kontaktflächenrate für P1+P2 identisch mit der der freien Oberfläche ist und beide mit zunehmender Drehgeschwindigkeit im gleichen Maße ansteigen. Im Gegensatz dazu zeigt der Vergleich der Ergebnisse für Wo+Wi, dass mit zunehmender Drehgeschwindigkeit der anfangs kleine Unterschied bei 1 U/min bei höheren

Geschwindigkeiten deutlich größer wird. Daher kann geschlossen werden, dass bei der Kontaktwärmeübertragung die Wärmeübertragung, die die beiden Platten (P1+P2) betrifft, eindeutig dominiert.

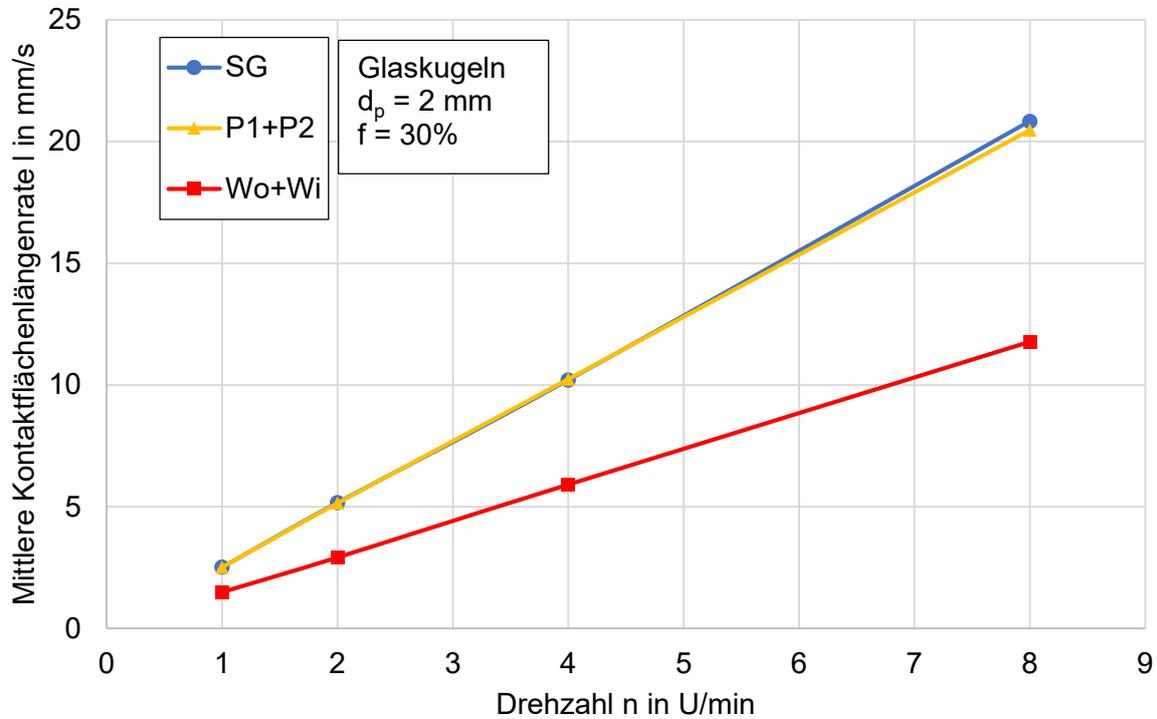


Abbildung 14: Der Einfluss der Drehzahl auf die mittlere Kontaktflächenlänge.

Ähnlich wie bei einer anderen Temperaturverteilungsannahme, wie in Abbildung 15 gezeigt, ist die Beziehung zwischen dem Wert von P1+P2+Wi+Wo und der Drehzahl in Abbildung 18 dargestellt. Aus dieser Abbildung lässt sich ableiten, dass die Kontaktwärmeübertragung in diesem Szenario die dominierende Form der Wärmeübertragung ist. Zudem wird mit zunehmender Drehgeschwindigkeit der Unterschied zwischen der Kontaktwärmeübertragung und der Wärmeübertragung an der freien Oberfläche ebenfalls größer. Daher spielt in diesem Fall bei höheren Drehgeschwindigkeiten die Wärmeleitung eine zunehmend bedeutendere Rolle.

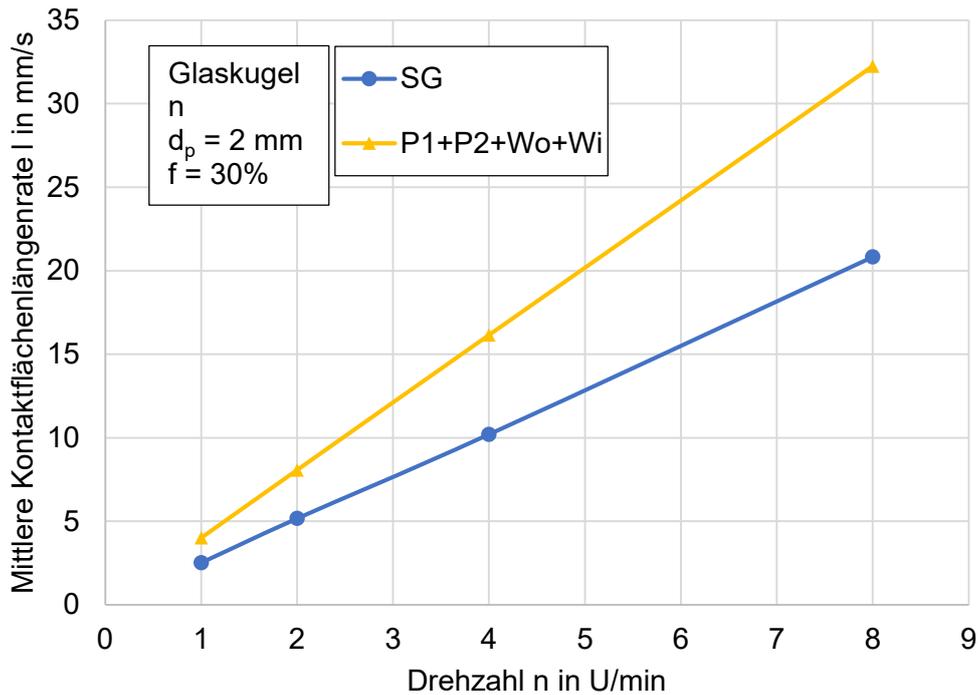


Abbildung 15: Der Einfluss der Drehzahl auf die mittlere Kontaktflächenlänge

### 3.4 Der Einfluss des Füllgrades

Um den Einfluss des Füllgrades auf die Kontaktfläche zwischen dem Partikelbett und den Ofensektoren aufzuzeigen, wird analog zu Kapitel 3.3 der Vergleich mit der mittleren Kontaktflächenlängenrate durchgeführt.

In Abbildung 19 ist die Beziehung zwischen der Kontaktflächenlängenrate und dem Füllgrad für jede Kontaktfläche bei konstanter Drehzahl dargestellt, sodass die Längenrate die tatsächliche Kontaktflächenlänge darstellt. Dabei zeigt sich, dass mit zunehmendem Füllgrad die Länge aller Kontaktflächen, außer  $W_i$ , zunimmt. Der Anstieg ist jedoch relativ gleichmäßig, und die Unterschiede zwischen ihnen sind gering. Bei den drei Kontaktflächen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $W_o$  nimmt der Unterschied in ihren Mittelwerten mit zunehmendem Füllgrad ab und bei einem Füllgrad von 30 % geht er gegen 0. Beim Vergleich mit der Kurve der freien Oberfläche wird deutlich, dass in allen Fällen die durchschnittliche Kontaktlänge der freien Oberfläche signifikant größer ist, als die der anderen vier Flächen.

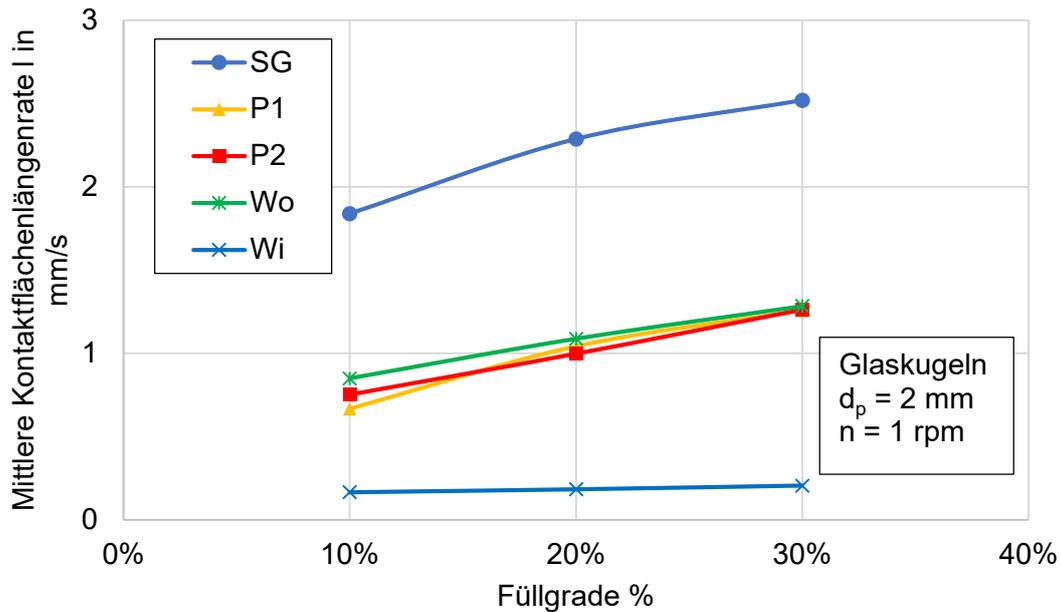


Abbildung 16: Der Einfluss des Füllgrades auf die mittlere Kontaktflächenlängenrate.

Für die Variante (a) ist der Einfluss des Füllungsgrades auf die mittlere Kontaktflächenlängenrate in Abbildung 20 dargestellt. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass bei einem Füllgrad von 10 % die freie Oberfläche die größte Länge aufweist, gefolgt von P1+P2, und die kleinste Länge hat Wo+Wi. Mit zunehmendem Füllgrad auf 30 % nehmen zwar die Längen aller drei Flächen zu, aber die Kontaktflächenlänge von P1+P2 wächst am schnellsten und erreicht die gleiche Größe wie die freie Oberfläche.

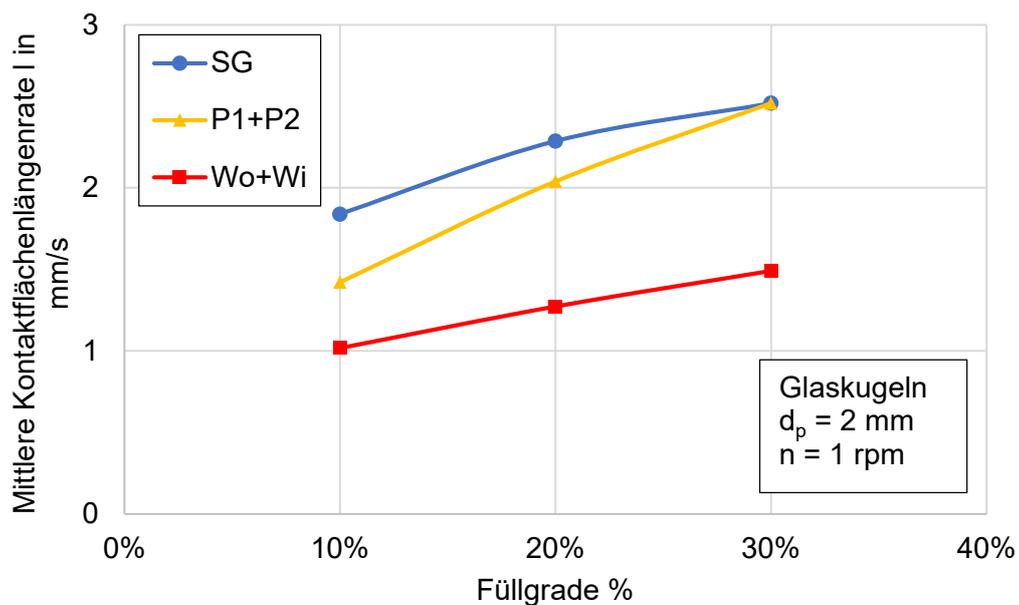


Abbildung 17: Der Einfluss des Füllgrades auf die mittlere Kontaktflächenlängenrate.

Für die Variante (b) wird der Einfluss des Füllungsgrades in Abbildung 21 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass unabhängig davon, ob der Füllgrad 10 % oder 30 % beträgt, die Länge der Kontaktwärmeübertragungsfläche immer größer ist als die der freien Oberfläche. Darüber hinaus wächst dieser Unterschied mit zunehmendem Füllgrad weiter. Folglich ist davon auszugehen, dass der Kontaktwärmeübergang mit steigendem Füllungsgrad der dominierende Wärmeübertragungsmechanismus im Prozess sein wird.

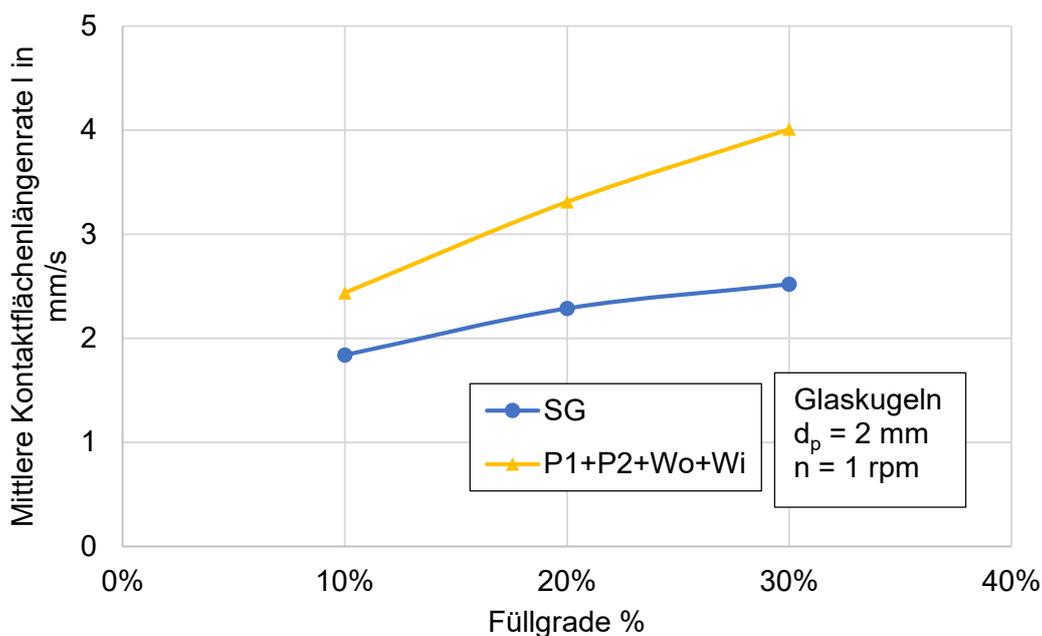


Abbildung 18 Der Einfluss des Füllgrades auf die mittlere Kontaktflächenlängenrate.

### 3.5 Schlussfolgerung

Es wurde ein mathematisches Modell für das transversale Bewegungsverhalten von Schüttungen in Drehrohren mit Sektionaleinbauten entwickelt. Dieses Modell wurde um umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Batch-Drehrohren ergänzt. Der Vergleich zwischen den Simulations- und Versuchsergebnissen zeigt eine hinreichend genaue Übereinstimmung, so dass das Modell als validiert eingestuft werden kann. Es ist damit erstmalig möglich die für die Wärmeübertragung maßgeblichen Kontaktflächen in Drehrohren mit Sektionaleinbauten zu berechnen. Insbesondere der Einfluss der Betriebs- und Dimensionierungsparameter kann hierbei berücksichtigt werden.

Die Basis die für die weitere Fortführung des Projektes (Phase 2: Einstufiger Prozess mit Kreislaufführung) ist damit gegeben.