

## Verweilzeitverhalten von Abfällen in Drehrohrsystemen – Experimentelle Untersuchungen und mathematische Modellierung

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Gehrmann, Clausthal-Zellerfeld; Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, Clausthal-Zellerfeld; Prof. Dr. André Fontana, Brüssel; Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann, Weimar

### 1 Einleitung

Das Verhalten des Feststoffes, auch als Verweilzeitverhalten oder in Verbindung mit dem Apparat als Reaktorverhalten bezeichnet, hat einen wichtigen Einfluss auf den Verlauf des Umsatzes über der Reaktorlänge. Für die Optimierung des Gesamtprozesses sind deshalb das Verweilzeitverhalten und die Einflussgrößen zur Steuerung des Verweilzeitverhaltens von großer Bedeutung. Darüber hinaus bildet die Beschreibung des Verweilzeitverhaltens eine wichtige Grundlage für die mathematische Modellierung des Feststoffumsatzes. Bei Drehrohrsystemen sind im Zusammenhang mit dem Verweilzeitverhalten konstruktive Einflussgrößen, wie z.B. Drehrohrradius  $R$ , Drehrohlänge  $L$  und betriebliche Einflussgrößen, wie z.B. Massenstrom  $\dot{m}_F$ , Neigungswinkel  $\beta$ , Drehrohrgeschwindigkeit  $n$  von Bedeutung (**Abb. 1**).

Das Verweilzeitverhalten wird darüber hinaus durch den Einsatzstoff mit den jeweiligen

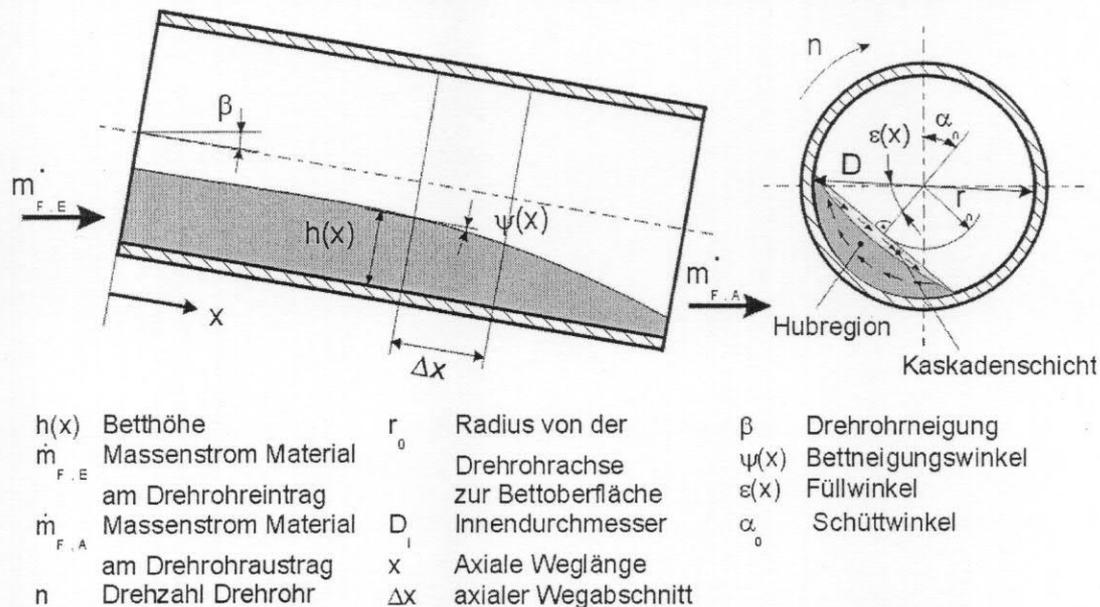


Abb. 1: Wesentliche Haupteinflussgrößen beim Feststofftransport

Eigenschaften, wie z.B. Zusammensetzung, Schüttdichte  $\rho_F$ , Schüttwinkel  $\alpha_0$ , Partikelgrößenverteilung, usw. beeinflusst. Allgemein wird das Verweilzeitverhalten bekanntlich durch die Verweilzeitverteilung  $E(\Theta)$  und, daraus abgeleitet, durch die mittlere

Verweilzeit  $\tau$  charakterisiert. Speziell in Drehrohren kann das Verweilzeitverhalten durch wegabhängige Größen wie z.B. die Füllhöhe  $h(x)$ , den Bettneigungswinkel  $\psi(x)$  und den Füllwinkel  $\varepsilon(x)$  beschrieben werden.

Für die experimentelle Untersuchung des Verweilzeitverhaltens in Heiss- und Kaltversuchen hat sich die Input-Step-Response-Methode /1/ mit unterschiedlichen Tracern /2, 3, 4/ in großem Umfang als geeignet erwiesen.

In der vorliegenden Arbeit ist das Verweilzeitverhalten von speziellen Abfällen, Plexiglasgranulat und BRAM, an einem Drehrohr im Pilotmaßstab in Kaltversuchen untersucht worden. Aus Kaltuntersuchungen können im Hinblick auf eine Modellierung des „heissen“ Prozesses erste prinzipielle Rückschlüsse auf das Verweilzeitverhalten des Feststoffes gezogen werden.

Das Verweilzeitverhalten ist darüber hinaus mit formal unterschiedlichen Modellansätzen, die die o.g. Geometrie-, Stoff- und Betriebsparameter berücksichtigen, berechnet worden.

Bei den Versuchen sind hier Variationen vom Massenstrom und Neigung vorgenommen worden. Die Vorgehensweise bei den Experimenten wird zunächst vorgestellt und anschließend werden die Ergebnisse mit ausgewählten Ansätzen aus dem Schrifttum verglichen und bewertet.

## 2 Vorgehensweise bei den Experimenten

Die Untersuchungen wurden an einem Pilotdrehrohr mit einem Innendurchmesser von 0,3 m und einer Länge von 5,1 m durchgeführt. Der Einsatzstoff wird über eine Förderschnecke dem Drehrohr zugeführt /5/. Zur Untersuchung des Verweilzeitverhaltens wurde dem stationären Feststoffmassenstrom ein Dirac-Impuls in Form einer bestimmten Menge mit Farbe markierten Feststoffteilchen (Tracer) über eine Förderschnecke zugegeben. Zum Zeitpunkt  $t_i$  wurde nach regelmäßigen Zeitintervallen  $\Delta t_i$  (gemessen ab Eintritt Tracer in das Drehrohr) am Drehrohraustrag eine Probe entnommen. Entsprechend der Einsatzstoffkorngröße erfolgte anschließend eine repräsentative Probenteilung. Schließlich wurde der Anteil markierter Feststoffteilchen ( $m_i$ ) an der Gesamtprobenmenge  $m_0$  durch Auszählen bestimmt. Die mittlere Verweilzeit kann dann berechnet werden zu:

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \cdot \frac{m_i}{m_0} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{m_0} \cdot \Delta t_i} \quad (1) \quad \text{bzw. als dimensionslose Verweilzeit } \Theta_i = \frac{t_i}{\tau} \quad (2), \text{ die für die weiter}$$

unten dargestellte Ermittlung der Bodensteinzahl ( $Bo$ ) benötigt wird. In den Untersuchungen wurden die in (**Tab. 1**) aufgeführten Parameter variiert.

Tab. 1: Parameter und Variationsbreite

Parameter	Variationsbreite			
	Plexiglasgranulat	BRAM	-	-
Einsatzstoff	Plexiglasgranulat	BRAM	-	-
Neigungswinkel [°]	0	0,65	1,3	1,95
Massenstrom [kg/h]	30	50	-	-

### 3 Modellansätze

Die Feststofftransportmodelle können ihrem Ansatz nach grob in Bilanzmodelle /z.B. 6/ und Maximum-Gradienten-Modelle bzw. abschnittsweise unterteilte Modelle unterschieden werden. Bilanzmodelle gehen in der Regel auf das Grundelement „Rührkessel“ (im folgenden als RK abgekürzt) zurück. Maximum-Gradienten-Modelle werden durch die Hintereinanderschaltung mehrerer RK-Elemente oder Zonen (Abschnitte) erhalten.

#### 3.1 Bilanzmodelle

Modelle z. B. nach dem Grundelement Rührkessel (globale Modelle oder Black-Box-Modelle) gehen nicht im Detail auf den Feststofftransport in dem Reaktor ein, sondern geben die charakteristischen Kennwerte wie die mittlere Verweilzeit oder axiale Dispersion insgesamt aus geometrischen und apparatetechnischen Überlegungen und/oder aus Versuchsergebnissen gewonnenen Beziehungen an. Die Grundgleichung zur Ermittlung einer globalen mittleren Verweilzeit für Drehrohrsysteme kann in Anlehnung an einschlägige

Ansätze aus dem Schrifttum /7/ wie folgt definiert werden: 
$$\tau = \frac{k_1 \cdot L \cdot f_1(\alpha_0)}{n \cdot D_i \cdot f_2(\beta)} \quad (3).$$

Für einen konstanten Massenstrom ist die Verweilzeit  $\tau$  dem Durchmesser  $D_i$  und der Drehzahl  $n$  umgekehrt proportional und der Länge  $L$  direkt proportional. Darüber hinaus werden in dem Ansatz der Einfluss des Schüttwinkels  $\alpha_0$  und der Drehrohrneigung  $\beta$  berücksichtigt. Beispielhaft sei in diesem Zusammenhang auf Arbeiten von Saeman /7/ verwiesen. Für Saeman ergeben sich nach Gleichung (3) folgende Parameter:  $k_1=0,318$ ;  $f_1(\alpha_0) = \sin \alpha_0$ ,  $f_2(\beta) = \beta$ . Die Gleichung gilt für kleine Füllgrade  $\phi$ , z.B. kleiner 15 bis 20 %.

#### 3.2 Maximum-Gradienten-Modelle

Für die getrennte Beschreibung des Trocknungs-, Entgasungs- und Brennverhaltens usw. ist die Kenntnis des Verweilzeitverhaltens über der Länge wichtig. Das führt zu einer

entsprechenden Modellverfeinerung entweder durch die Berücksichtigung geometrischer Einzelheiten oder aber durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Rührkessелеlemente.

Eine Verfeinerung der Beschreibung des Feststofftransportes wurde mittels geometrischer Beschreibung der Verhältnisse in der Schüttung z.B. von Saeman durch die Einführung eines Bettneigungswinkels  $\psi(x)$  (Abb. 1), der den Winkel zwischen Drehrohrachse und Bett-

oberfläche beschreibt, vorgenommen:  $\tan \psi = \frac{dh}{dx} = -R \cdot \sin \varepsilon \cdot \frac{d\varepsilon}{dx}$  (4).

Mit Hilfe der Arbeiten von Hogg, Shoji und Austin /8/ kann Gleichung (4) in eine dimensionslose Form überführt werden:

$$E = \left( \frac{M \cdot x}{R} \right) = \int_{\varepsilon(x=0)}^{\varepsilon(x)} \frac{M^2 \cdot \sin \varepsilon \cdot d\varepsilon}{\sin^3 \varepsilon - \left[ \sin^6 \varepsilon - M^2 \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot C}{M} \cdot \sin^3 \varepsilon \right) \right]^{0,5}} \quad (5),$$

mit  $M = \left( \frac{2 \cdot \dot{m}_F}{K} \right)$  (6) und  $C = \left( \frac{\tan \beta}{\cos \alpha_0} \right)$  (7) sowie  $K = 2/3 \cdot B \cdot \rho_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R^3 \cdot \cot \alpha_0$  (8).

Die Gleichungen (5) bis (8) gelten, ähnlich wie bei Saeman, nur für geringe Füllgrade. Der in dieser Gleichung befindliche Materialfaktor B ist ein experimentell zu ermittelnder dimensionsloser Stoffparameter, der physikalisch das Verhältnis der Verweilzeit eines Partikels auf der Oberfläche (Abb. 1) zur Gesamtverweilzeit für einen Zyklus beschreibt. Für Hausmüll ist für B z.B. ein Wert von 0,51 ermittelt worden /8/.

Die grundsätzlich andere Möglichkeit der Hintereinanderschaltung von RK-Elementen führt zu einem Modell, bei dem die Anzahl der RK-Elemente  $n_{RK}$  aus der Verweilzeitverteilung  $E(\Theta_i)$  über die Standardabweichung  $\sigma_\Theta$  und die Bo-Zahl ermittelt werden /1/:

$$E(\Theta_i) = \sqrt{(4 \cdot \pi)^{-1} \cdot Bo} \cdot \exp[-0,25 \cdot (1 - \Theta_i)^2 \cdot Bo] = \frac{m_i}{\sum_i m_i} \cdot \tau \quad (9),$$

$$\sigma_\Theta^2 = \frac{2}{Bo} \quad \text{für } Bo > 100 \quad (10) \quad \text{und} \quad n_{RK} = 0,5 \cdot Bo \quad \text{für } Bo > 50 \quad (11).$$

#### 4 Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung untergliedert sich in die Abschnitte experimentelle Ergebnisse aus den Untersuchungen mit Granulat und BRAM sowie in die Vorstellung der Ergebnisse aus den Berechnungen der mittleren Verweilzeit für ausgewählte Versuche. In **Tab. 2** sind die gemessenen Verweilzeiten sowie der aus der Verweilzeit abgeleitete mittlere Füllgrad mit den jeweiligen Betriebsparametern dargestellt. Weiterhin sind für ausgewählte Betriebseinstellungen die berechneten Verweilzeiten angeführt.

Bei allen Versuchen wurde erwartungsgemäß mit Zunahme der Neigung eine Verkürzung der Verweilzeit ermittelt.

Für mittlere Füllgrade über ca. 20 % ergibt sich bei konstanter Neigung und Drehzahl eine deutliche Abhängigkeit der Verweilzeit vom Massenstrom (vgl. V1 und V5, Tab. 2). Bei nahezu gleichbleibendem Füllgrad nimmt die Verweilzeit bei abnehmendem Massenstrom entsprechend zu. Der Grad der Zunahme der Verweilzeit verringert sich entsprechend mit

Tab. 2: Experimentell ermittelte Verweilzeit und Berechnungen

Versuchsnummer	Stoffparameter	Geometrieparameter	Betriebsparameter			Messgrößen		Berechnete Verweilzeit $\tau$ nach Saeman [min] (Gl. 3)	Berechnete Verweilzeit nach Austin Gl. (5-8)	
			$\beta$ [°]	n [u/min]	$m_m$ [kg/h]	$\tau$ [min]	mittlerer Füllgrad $\phi$ [%]		$\tau$ [min]	Faktor B [-]
<b>Granulat</b>	statischer Schüttwinkel: 35°, Schüttdichte: 700 kg/m <sup>3</sup> ; äquivalenter Partikeldurchmesser: 1,3 mm	Drehrohrlänge: 5,1 m, Drehrohrdurchmesser: 0,3 m	$\beta$ [°]	n [u/min]	$m_m$ [kg/h]	$\tau$ [min]	mittlerer Füllgrad $\phi$ [%]			
V1			0	3	47	94	29	-	94	0,768
V2			-0,65	3	46	71	21	-	-	-
V3			-1,3	3	50	50	16	-	-	-
V4			-1,95	3	48	40	13	30	41	0,5644
V5			0	3	28	125	23	-	126	0,577
V6			-0,65	3	29	79	15	-	-	-
V7			-1,3	3	30	56	11	-	-	-
V8			-1,95	3	30	42	8	30	41	0,506
<b>BRAM</b>	statischer Schüttwinkel: 65°, Schüttdichte: 460 kg/m <sup>3</sup> ; äquivalenter Partikeldurchmesser: 9,2 mm	Drehrohrlänge: 5,1 m, Drehrohrdurchmesser: 0,3 m	$\beta$ [°]	n [u/min]	$m_m$ [kg/h]	$\tau$ [min]	mittlerer Füllgrad $\phi$ [%]	-	-	-
V9			0	3	48	75	36	-	74	3,103
V10			-0,65	3	47	66	31	-	-	-
V11			-1,3	3	42	44	19	-	-	-
V12			-1,95	3	48	35	17	46	33	1,308
V13			0	3	29	92	27	-	93	2,44
V14			-0,65	3	29	73	21	-	-	-
V15			-1,3	3	29	52	15	-	-	-
V16			-1,95	3	31	41	13	46	43	1,074

steigender Neigung.

Für mittlere Füllgrade kleiner 20 % zeigt die Verweilzeit dagegen keine nennenswerte Abhängigkeit vom Massenstrom (Versuche V3 und V7 bzw. V4 und V8). Wie die Ergebnisse zeigen, ergeben sich für Plexiglas und BRAM grundsätzlich ähnliche Abhängigkeiten. Aufgrund der geringeren Schüttdichte  $\rho_F$  von BRAM mit 460 kg/m<sup>3</sup> im Vergleich zu Plexiglas

mit  $700 \text{ kg/m}^3$ , aber vergleichbaren konstanten Massenströmen, nimmt der Füllgrad  $\phi$  bei BRAM entsprechend zu (z.B. V1 Plexiglas,  $\phi = 29\%$  und V9 BRAM,  $\phi = 36\%$ ).

Ein Vergleich mit den berechneten Verweilzeiten aus den Bilanzmodellen (hier: Modellansatz Saeman Gleichung (3)) zeigt bei Füllgraden  $< 20\%$  eine Abweichung von den Messwerten von  $25\%$  bei Plexiglasgranulat und von  $31\%$  bei BRAM. Gemäß der Gleichung (3) geht der Massenstrom nicht in die Verweilzeitberechnungen ein, so dass für beide Massenströme die gleiche Verweilzeit errechnet wird. Für eine Neigung von  $0^\circ$  kann diese Formel nicht angewendet werden. Mit Hilfe dieser recht einfachen Gleichung (3) kann für den von Saeman angegebenen Geltungsbereich („kleine Füllgrade“) eine erste Näherung für die mittlere Verweilzeit gegeben werden.

Der Ansatz nach Austin et al. aus den Maximum-Gradienten-Modellen gibt die prinzipielle Abhängigkeit der mittleren Verweilzeit von den Betriebsparametern wieder, berücksichtigt jedoch nicht, dass bei Füllgraden kleiner  $20\%$  der Einfluss des Massenstromes auf die Verweilzeit abnimmt. Die Berechnungen zum Materialfaktor B wurden für jeden Messwert vorgenommen. Die Abweichungen zu den Messwerten liegen beim Granulat und bei BRAM zwischen  $0$  und  $6\%$  vom Messwert und sind damit vergleichsweise gering. B hängt demnach nicht allein von Materialeigenschaften sondern auch vom Massenstrom bzw. vom Füllgrad ab. Für Plexiglas erkennt man jedoch im Vergleich zu BRAM nur eine geringe Abhängigkeit vom Füllgrad. Bei Plexiglas liegt B zwischen  $0,506$  und  $0,768$ , bei BRAM hingegen zwischen  $1,074$  und  $3,103$ . Der Materialfaktor  $B > 1$  bei BRAM kann möglicherweise auf die Zerkleinerung während des Transportprozesses im Drehrohr zurückgeführt werden. Die Zerkleinerung führt zu einer Änderung des Schüttwinkels und der Schüttdichte, die einen Einfluss auf den Füllgrad haben.

Mit nahezu gleichem experimentellem Aufwand, jedoch deutlich weniger komplizierten mathematischen Beschreibungen stellt sich der Modellansatz der Hintereinanderschaltung von RK-Elementen dar. Für die ermittelten Verweilzeitverteilungen wird eine Gaußverteilung zugrundegelegt. Das ist für geringe Abweichungen vom Kolbenströmerverhalten, wie es i.d.R. bei Drehrohrsystemen auftritt, zulässig. Aus dem Abstand zwischen den Wendepunkten der Kurve lässt sich die Bo-Zahl bestimmen. Nähert man das Verweilzeitverhalten durch eine Hintereinanderschaltung von mehreren RK-Elementen an, so gilt für  $Bo > 50$  als erste Abschätzung Gleichung (11). Berechnet man nun aus der Varianz die entsprechenden Bo-Zahlen (Gleichung (10) bzw. die RK-Anzahl, so kann das Verweilzeitverhalten von Plexiglas für Versuch V7 mit  $74$ , das von BRAM für Versuch V15 mit  $49$  RK-Elementen angenähert werden. Die Bo-Zahl bzw. die Anzahl der Rührkessel gibt den Grad der Rückvermischung im Reaktor an. BRAM- Partikel sind relativ spröde und

brechen verhältnismäßig leicht durch mechanische Beanspruchung (Rotation Drehrohr). Daher kann die im Vergleich zu Plexiglasgranulat hohe Rückvermischung durch den Anteil zerkleinerter Partikel, die länger im Drehrohr verweilen als große Partikel, erklärt werden. Eine ähnliche Beobachtung wurde von Zengler bei der Untersuchung des Einflusses von Mehrkornschüttungen auf die Verweilzeit gemacht /9/.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die hier beispielhaft aufgeführten Bilanz- und Maximum-Gradienten-Modelle von Saeman bzw. Austin für die untersuchten Einsatzstoffe Plexiglasgranulat und BRAM und für Füllungsgrade  $< 20\%$  das Verweilzeitverhalten mit guter Genauigkeit beschreiben. Sie geben allerdings über der Reaktorlänge usw. keinen Aufschluss über das Reaktorverhalten. Der vergleichsweise aufwendige Modellansatz von Austin benötigt zusätzlich experimentelle Daten (die Kenntnis des Materialfaktors B). Diese Daten sind nur aus Verweilzeituntersuchungen zu gewinnen. Damit ist jedoch auch eine Darstellung der Verweilzeitverteilung und die Anwendung des Modells der Hintereinanderschaltung von RK-Elementen möglich. Weiterführende Arbeiten zielen darauf hin, einerseits Kennzahlen und Abhängigkeiten des Materialfaktors vom Feststofftransport zu ermitteln, andererseits eine Darstellung der Bo-Zahl von Haupteinflussgrößen beim Feststofftransport zu berechnen.

## 5 Literatur

---

- /1/ Levenspiel O.: Chemical Reaction Engineering, 3<sup>rd</sup> edition 1999
- /2/ Biollaz, S.; Beckmann, M.; Davidovic, M.; Jentsch, T.: Improvement of municipal solid waste bottom ash quality by process integrated measures at grate systems, Proc. INFUB 2000, Porto, Portugal, 11 - 14 April 2000
- /3/ Beckmann, M.; Scholz, R.: Residence Time Behaviour of Solid Material at Grate Systems; Proc. INFUB 2000, Porto, Portugal, 11 - 14 April 2000
- /4/ Kolar, Z.; Thyn, J.; Martens, W.; Boelens, G.; Korving, A.: The Measurement of Gas Residence Time Distribution in a Pressurized Fluidized-bed Combustor using Ar as Radiotracer, Appl. Radiat. Isot. Vol. 38 No. 2, pp. 117-122, 1987.
- /5/ Gehrman, H.-J.; Fontana, A.; Jung, C. G.; Beckmann, M.: Municipal Waste Pyrolysis – Comparison of Laboratory and Pilot Scale Results; IChemE 2001, Brüssel
- /6/ Himmelblau, D. M.: Process Analysis and Simulation: Deterministic Systems, 1968
- /7/ W. C. Saeman: Passage of solids through rotary kilns - factors affecting time of passage Chem. Eng. Progr. 47, p. 508-514, 1951
- /8/ R. Hogg, K. Shoji, L.G. Austin: Axial Transport of Dry Powders in Horizontal Rotating Cylinders; Powder Technology, 9 (1974) p. 99- 106
- /9/ Zengler, R.: Modellversuche über den Materialtransport in Drehrohröfen Dissertation an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen an der TU Clausthal 1974