

Formelzeichen

D	[m]	Behälterdurchmesser
d	[m]	Rührerdurchmesser
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	Füllstand
h	[m]	Höhe der suspendierten Partikelschicht
n	[s ⁻¹]	Rührerdrehzahl
K	[-]	$P_{\text{rühr}}/P_{\text{sink}}$
$P_{\text{rühr}}$	[W]	Leistungseintrag des Rührers
P_{sink}	[W]	Sinkleistung
$P_{\text{umwältz}}$	[W]	Umwälzleistung
$V_{\text{Behälter}}$	[m ³]	Volumen der Suspension
w_u	[m/s]	Umfangsgeschw. des Rührers
w_s	[m/s]	Sinkgeschwindigkeit von Einzelteilchen
w_{ss}	[m/s]	Sinkgeschw. der Partikel im Schwarm
φ_v	[-]	Feststoffvolumenkonzentration
ρ_c	[kg/m ³]	Flüssigkeitsdichte
ρ_p	[kg/m ³]	Partikeldichte
η	[kg/(m s)]	Flüssigkeitsviskosität
Ne	[-]	Leistungsbeiwert des Rührers
Re_R	[-]	Rührer-Reynolds-Zahl ($n d^2 \rho_c / \eta$)
Re^*	[-]	Re^* -Zahl ($w_{ss} d \rho_c / \eta$)

Literatur

- [1] W.-D. Eienkel, *Chem. Ing. Tech.* **1995**, 67 (8), 1000.
- [2] M. Zlokarnik, *Chem. Eng. Sci.* **1998**, 53 (17), 3023.
- [3] W.-D. Eienkel, Beschreibung der fluiddynamischen Vorgänge beim Suspendieren im Rührwerk, *VDI-Forschungsheft 595*, VDI-Verlag, Düsseldorf **1979**.
- [4] P. Zehner, *Chem. Ing. Tech.* **1986**, 58 (10), 830, Synopse MS 1536/8, 34.
- [5] J. F. Richardson, W. N. Zaki, *Trans. Inst. Chem. Eng.* **1954**, 32, 35.
- [6] A. Mersmann, H. Noth, D. Ringer, R. Wunder, *Chem. Ing. Tech.* **1980**, 52 (3), 189.

Zerkleinerung durch interpartikuläre Beanspruchung mit hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten*

ANDREAS WEBER** UND HERMANN NIRSCHL

1 Problemstellung

Die im vorliegenden Beitrag vorgestellten Untersuchungen wurden an einem Zerkleinerungsapparat durchgeführt, in dem die Zerkleinerung durch Beanspruchungen hervorgerufen wird, die bei der Verzögerung eines Partikelpfropfens an einer Prallplatte auftreten. Die Belastung einer Partikelgruppe, d. h. interpartikuläre Beanspruchung, erfolgt mit hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Die als erste auf die Prallplatte treffenden Partikeln erfahren eine Prallbeanspruchung, die durch die Masse der darunter liegenden Schichten verstärkt wird.

Die hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten werden durch die pneumatische Beschleunigung eines Schüttguts in einem vertikal angebrachten Schussrohr erreicht. Am unteren Ende des Schussrohrs ist ein Magnetventil angebracht, das in regelmäßigen Abständen Druckluftstöße auslöst und dadurch Partikelpfropfen beschleunigt. Pulsar, der Name des Zerkleinerungsapparats, geht auf diese pulsierende Luftströmung zurück. Über dem Schussrohr ist in einem Abstand, der ungefähr der Pfropfenlänge entspricht, die Prallplatte angebracht.

Nach theoretischen Überlegungen [1] sollte die Zerkleinerung aufgrund der Verzögerung an der Prallplatte hauptsächlich im mittigen oberen Bereich des Partikelpfropfens stattfinden. Die Partikeln am Pfropfenrand werden radial nach außen beschleunigt. Der Druck aufgrund der Verzögerung der mittleren und unteren Pfropfenteile ist für die Zerkleinerung von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund ist das Auftreffen eines möglichst kompakten Partikelpfropfens auf die Prallplatte, d. h. eine geringe axiale Aufweitung aufgrund der Permeation von Treibluft durch den Pfropfen während der Beschleunigung und eine geringe radiale Aufweitung nach dem Verlassen des Schussrohrs, wünschenswert.

Im regulären Betrieb verbleibt das beanspruchte Grobgut im Apparategehäuse und gelangt erneut in das Schussrohr. Das beanspruchte Feingut wird mit dem Druckluftstrom und ggf. einer Absaugung in Richtung Klassierer aus dem Gehäuse ausgetragen. Vom Klassierer abgewiesenes Gut wird in den Pulsar zurückgefördert und erneut beansprucht.

* Vortrag anlässlich der GVC-Fachausschusssitzung „Zerkleinern“, 29./30. März 2004 in Braunschweig.

** Dipl.-Ing. A. WEBER (andreas.weber@mvm.uka.de), Prof. Dr.-Ing. H. NIRSCHL, Institut für MVM, Universität Karlsruhe (TH), D-76128 Karlsruhe, Germany.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsapparatur

Der eingesetzten Zerkleinerungsapparat ist von der Firma PULSAR GMBH MICRONIZING SYSTEMS, Aalen-Essingen, vorgestellt worden [2]. Die wichtigsten Teile der Versuchsapparatur sind das Schussrohr mit Druckluft- und Einfüllstutzen sowie die Prallplatte (s. Abb. 1). Nach dem Befüllen des Schussrohrs wird der Einfüllstutzen mit einem Stopfen verschlossen, um ein seitliches Verpuffen der Treibluft zu verhindern. Das Haufwerk wird durch einen Druckluftstoß beschleunigt, der über ein Magnetventil am Druckluftstutzen aufgesteuert wird. Der auf diese Weise entstandene Partikelpfropfen wird an der Prallplatte, die an die Unterseite des Gehäusedeckels geschraubt ist, verzögert. Dabei werden die Partikel durch eine Kombination von Prallbeanspruchung und interpartikulärer Beanspruchung zerkleinert. Zur Vermeidung eines Überdrucks im Gehäuse wurde der Ausgang zum Klassierer mit einem Filtertuch verschlossen, das einen relativ schnellen Druckausgleich mit der Umgebung gewährleistet. Nach drei Schussversuchen hatte sich durch die Füllung von Toträumen im Gehäuse und Anhaftungen von Feingut an der Gehäuseinnenwand ein Gleichgewicht eingestellt. Es wurden nur Versuche zur Auswertung herangezogen, bei denen sich bereits das Gleichgewicht eingestellt hatte. Die Partikelgrößenverteilungen vor und nach der Belastung werden mittels Trockensiebungen bestimmt.

2.2 Bestimmung der Schussrohraustrittsgeschwindigkeit

Das Zerkleinerungsergebnis hängt entscheidend von der massenbezogenen Energie ab, die für die Zerkleinerung zur Verfügung steht. Im Pulsar bestimmt die massenbezogene kinetische Energie $E_{kin,M}$ des Partikelpfropfens beim Aufprall auf der Prallplatte die Zerkleinerungswirkung maßgeblich. Die Untersuchung des Verhaltens des Partikelpfropfens nach dem Austritt aus dem Schussrohr und die Annäherung an die Prallplatte stellt eine große messtechnische Herausforderung dar. Um Anhaltspunkte bezüglich der zurzeit nicht messbaren Prallgeschwindigkeit v_{prall} zu erhalten, wurde die Geschwindigkeit des Partikelpfropfens beim Austritt aus dem Schussrohr gemessen. Zu diesem Zweck wurden am oberen Ende des Schussrohrs im Abstand $s_{ls} = 40\text{ mm}$ zwei Laserlichtschranken angebracht (s. Abb. 1). Die Änderung der relativen Lichtintensität I/I_{max} beim Durchtritt des Partikelpfropfens durch die Lichtschranken wurde mit einem Oszilloskop aufgezeichnet (s. Abb. 2). Die zeitliche Verzögerung zwischen den beiden Intensitätskurven entspricht der Verweilzeit Δt des Partikelpfropfens zwischen den Lichtschranken. Die Rohraustrittsgeschwindigkeit des Partikelpfropfens lässt sich folgendermaßen berechnen¹⁾:

Abbildung 1. Schematische Darstellung der Versuchsapparatur.

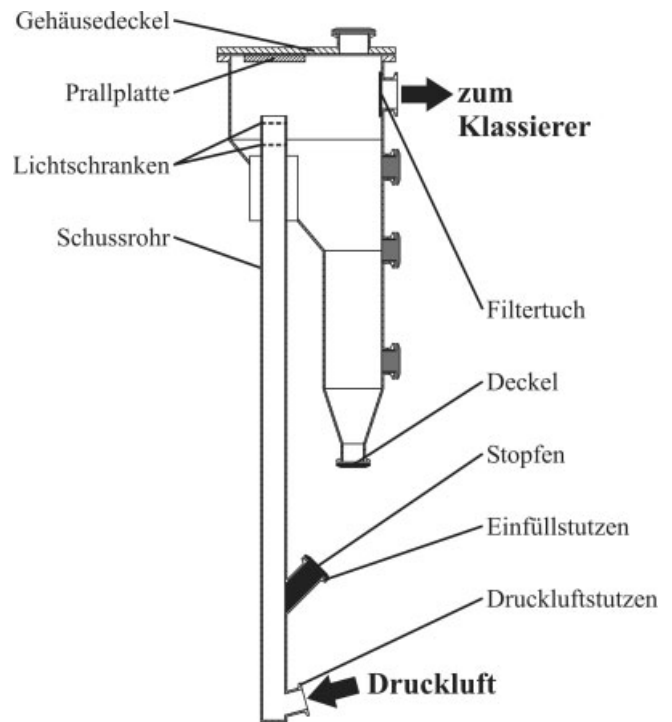
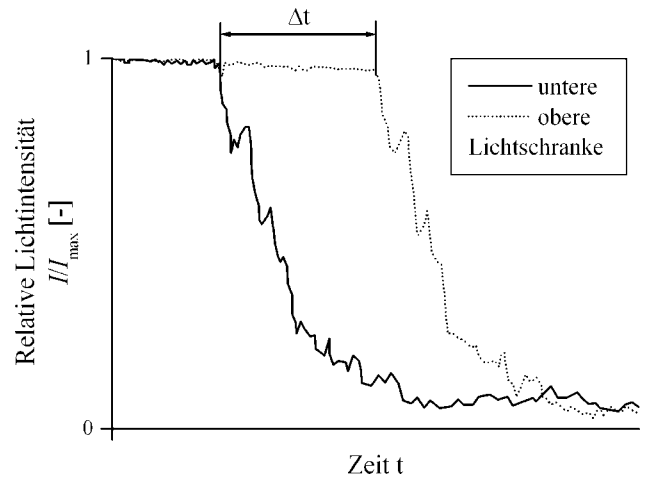


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Intensitätsverläufe der beiden Lichtschranken beim Passieren des Partikelpfropfens.



$$v_{mess} = \frac{s_{ls}}{\Delta t} \tag{1}$$

Für die massenbezogene kinetische Energie ergibt sich:

$$E_{kin,M} = \frac{E_M}{M_s} = \frac{1}{2} v_{mess}^2 \tag{2}$$

Für eine Abschätzung der Rohraustrittsgeschwindigkeit [2] erweisen sich folgende Annahmen als hilfreich:

- keine Umlagerungen im Partikelpfropfen,
- keine axiale Aufweitung des Partikelpfropfens während der Beschleunigung,
- keine radiale Aufweitung des Partikelpfropfens nach dem Austritt aus dem Schussrohr,
- kein Einströmen von Treibluft in den Partikelpfropfen,

1) Eine Zusammenstellung der Formelzeichen befindet sich am Schluss des Beitrags.

- keine Reibung zwischen Partikelfropfen und Schussrohrwand,
- konstanter Druck p der Treibluft während des Beschleunigungsvorgangs, d. h. unendlich großes Druckluftreservoir,
- Vernachlässigung des Volumens des Druckluftstutzens.

Solange sich ein durch obige Annahmen idealisierter Partikelfropfen im Schussrohr befindet, wird er weiter beschleunigt. Zur Beschleunigung des Pfropfens auf v_{\max} beim Austritt aus dem Schussrohr wird eine Luftsäule benötigt, die dem Innenvolumen des Schussrohrs entspricht. Die in der Luftsäule gespeicherte Energie wird in kinetische Energie des Partikelfropfens umgewandelt, die entsprechende Energiebilanz lautet bei Vernachlässigung der potentiellen Energie:

$$\frac{1}{2} \rho \delta_0 l \frac{\pi}{4} D^2 v_{\max}^2 = (p - p_0) L \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3)$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich die maximale Rohraustrittsgeschwindigkeit zu:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2(p-p_0)L}{\rho \delta_0 l}} \quad (4)$$

Bei Einsetzen der Apparatedaten und einem Vordruck von $p = 7,5$ bar ergibt sich eine maximale Rohraustrittsgeschwindigkeit von ca. $v_{\max} = 80$ m s⁻¹.

2.3 Versuche an einer hydraulischen Presse

Für vergleichende energetische Betrachtungen wurden Experimente an einer hydraulischen Presse durchgeführt. Das Versuchsmaterial wurde in eine Matrize gefüllt und mit einem Pressstempel belastet. In der hydraulischen Presse erfolgt die Zerkleinerung aufgrund reiner Gutbettbeanspruchung, d. h. die äußeren Belastungen werden über mehrere Kontaktstellen auf verschiedene Nachbarpartikeln übertragen. Eine stabile und dehnungsarme Konstruktion der Pressapparatur vorausgesetzt, steht die gesamte durch den Pressstempel übertragene Energie zur Zerkleinerung zur Verfügung. Unter der Pressbelastung wird das Gutbett um den Weg s_p komprimiert. Die zur weiteren Verdichtung des Haufwerks nötige Presskraft F_p nimmt mit dem Kompressionsweg s_p exponentiell zu. Eine Integration der Presskraft-Kompressionsweg-Kurven ermöglicht die Bestimmung der in das Gutbett eingetragenen Energie. Eine Division durch die in die Matrize eingefüllte Feststoffmasse M_s liefert die massenbezogene Pressenergie:

$$E_{p,M} = \frac{1}{M_s} \int_0^{s_{\max}} F_p ds_p \quad (5)$$

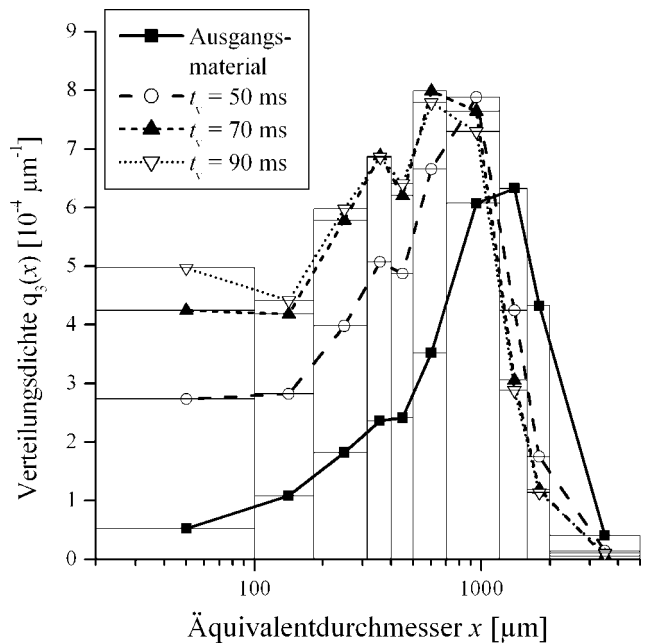
Bei den Versuchen wurde die Presskraft um kleine Beträge gesteigert. Die aufgewendete Pressenergie ergibt sich durch die Aufsummierung der Produkte aus den Pressenergien $F_{p,i}$ und den Änderungen des Kompressionswegs $\Delta s_{p,i}$:

$$E_{p,M} = \frac{1}{M_s} \sum_i F_{p,i} \Delta s_{p,i} \quad (6)$$

2.4 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial kam sprödebrüchige Glasschmelze zum Einsatz, die in der Medizintechnik als Füllstoff verwendet wird. Die Sprödigkeit wird durch Spannungen im Material hervorgerufen, die sich beim Erstarungsprozess der Glasschmelze nach dem Schmelzofen aufbauen. Die Dichte des Versuchsprodukts beträgt ca. $\rho = 3110$ kg m⁻³, der Feststoffvolumenanteil einer Schüttung liegt bei ca. $\delta_0 = 52$ %. Das Versuchsprodukt ist aus Partikeln sehr unterschiedlicher Morphologie zusammengesetzt. Kantige, unregelmäßig geformte Teilchen kommen ebenso vor wie annähernd kugelförmige ‚Kerne‘ geplatzter Partikeln. Die Massendichteverteilung $q_3(x)$ des Ausgangsmaterials (s. Abb. 3) zeigt ein Maximum in einem Partikelgrößenbereich von $x = 1 - 2$ mm sowie ein schwach ausgeprägtes sekundäres Maximum bei einem Äquivalentdurchmesser von ca. $x = 400$ μ m.

Abbildung 3.
Massendichteverteilungen $q_3(x)$: Vordruck $p = 7,5$ bar, Variation der Magnetventilöffnungszeit t_v .



3 Ergebnisse

3.1 Zerkleinerungsergebnis

Ein Ziel der Zerkleinerung ist die Verschiebung der Partikelgrößenverteilung zu kleineren Partikelgrößen, d. h. eine Erhöhung des Feingutanteils. Die Effektivität der Zerkleinerung hängt unter anderem von der massenbezogenen Energie E_M ab, die für die Zerkleinerung zur Verfügung steht. Bei der hier durchgeführten Untersuchung von Einzelschüssen können am Zerkleinerungsapparat Pulsar folgende drei Betriebsparameter variiert werden: Die Öffnungszeit des Magnetventils t_v , der Vordruck der Treibluft p und das Volumen des Schüttguts $V_{\text{füll}}$, das in das Schussrohr eingefüllt wird.

Durch eine Verlängerung der Ventilöffnungszeit t_v erhöht sich die in den Pulsar eingetragene Energie, was eine bessere Zerkleinerungswirkung zur Folge hat. Es entsteht mehr Feingut (s. Abb. 3). Der gleiche Effekt tritt auch

bei den anderen untersuchten Vordrücken auf, ist aber bei niedrigen Vordrücken weniger ausgeprägt.

Bei allen im Pulsar durchgeführten Zerkleinerungsversuchen ergab sich bei einer Partikelgröße von ca. $x = 400 \mu\text{m}$ ein ausgeprägtes sekundäres Minimum, dass, wenn auch deutlich schwächer, schon beim Ausgangsmaterial auftrat (s. Abb. 3).

Die Erhöhung des Vordrucks p wirkt sich bei konstantem Füllvolumen $V_{\text{füll}}$ und konstanter Ventilöffnungszeit t_v positiv auf die Zerkleinerung aus, allerdings steigt dabei der Energieverbrauch. Außerdem verstärkt sich die Tendenz, dass die Treibluft während des Beschleunigungsvorgangs in bzw. durch den Partikelpfropfen strömt und diesen axial auflockert, was die Effektivität der Zerkleinerung vermindert.

Die gleichen Auswirkungen hat die Wahl eines zu geringen Füllvolumens $V_{\text{füll}}$. Aus diesem Grund muss im regulären Betrieb dem Rieselverhalten der Produktschüttung verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Für eine energetisch effiziente Mahlung im Pulsar muss die Befüllung des Schussrohrs bis zu einem Mindestfüllvolumen vor dem nächsten Druckluftstoß gewährleistet sein. Tendenziell verschlechtert sich das Zerkleinerungsergebnis mit steigendem Füllvolumen $V_{\text{füll}}$, weil mit einer konstanten Energie eine größere Masse beschleunigt werden muss und somit die massenbezogene Energie E_M sinkt.

3.2 Schussrohraustrittsgeschwindigkeit

Der Verlauf der Lichtintensitäten ist bis auf die zeitliche Verschiebung um Δt sehr ähnlich (s. Abb. 2). In der obersten Schicht des Partikelpfropfens treten demnach zwischen den beiden Lichtschranken keine nennenswerten Umlagerungen auf. In Tab. 1 sind für zwei Vordrücke p und jeweils drei Ventilöffnungszeiten t_v die mittels der beiden Lichtschranken gemessenen Rohraustrittsgeschwindigkeiten v_{mess} den gemäß Gl. (4) berechneten maximalen Rohraustrittsgeschwindigkeiten v_{max} gegenübergestellt. Der Quotient $v_{\text{mess}}/v_{\text{max}}$ beträgt für die gewählten Betriebsparameter ca. 80 %. Die niedrigere gemessene Rohraustrittsgeschwindigkeit lässt sich durch die bei der Herleitung von v_{max} vernachlässigten Effekte (s. Abschnitt 2.2) erklären. Für v_{mess} sind Mittelwerte aus mehreren Experimenten angegeben. Sie beschreiben lediglich die Geschwindigkeiten der oberen

Tabelle 1. Vergleich von gemessener (v_{mess}) und berechneter (v_{max}) Geschwindigkeit des Partikelpfropfens beim Austritt aus dem Schussrohr, Variation der Betriebsparameter Vordruck p und Magnetventilöffnungszeit t_v .

p [bar]	t_v [ms]	v_{mess} [m s^{-1}]	v_{max} [m s^{-1}]	$v_{\text{mess}}/v_{\text{max}}$ [-]
5,0	50	50 ± 5	63	80%
5,0	70	49 ± 5	63	78%
5,0	90	49 ± 11	63	78%
7,5	50	73	80	91%
7,5	70	66 ± 2	80	82%
7,5	90	63 ± 5	80	78%

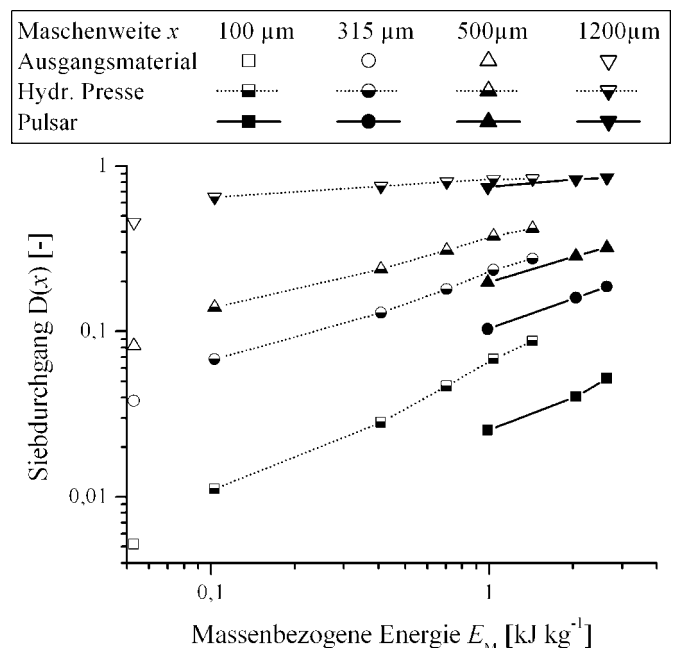
Teilchen des Partikelpfropfens beim Durchtritt durch die Lichtschranken, eine etwaige axiale Pfropfenaufweitung während des Beschleunigungsvorgangs wird nicht berücksichtigt. Die eigentliche Prallgeschwindigkeit v_{imp} liegt aufgrund des sich ausbildenden Staudrucks niedriger, bedarf allerdings weiterer Untersuchungen.

Gemäß der Abschätzung von v_{max} ändert sich v_{mess} und damit die kinetische Energie bei einer Änderung der Ventilöffnungszeit t_v kaum. Trotzdem liefert eine längere Ventilöffnungszeit ein deutlich besseres Zerkleinerungsergebnis. Eine mögliche Erklärung ist eine größere Kompaktheit bzw. geringere axiale Aufweitung des Partikelpfropfens aufgrund der länger nachströmenden Druckluft. Die mittlere Geschwindigkeit des Pfropfens ist demzufolge bei längeren Ventilöffnungszeiten größer, obwohl v_{mess} der obersten Partikelschicht nahezu gleich bleibt.

3.3 Vergleich mit reiner Gutbettbeanspruchung

Der Siebdurchgang $D(x)$ bei einer festen Siebmaschenweite nimmt mit der aufgewendeten massenbezogenen Energie E_M zu. Dies gilt sowohl für die Versuche am Pulsar als auch für Experimente an der hydraulischen Presse (s. Abb. 4). Für die im Pulsar untersuchten Geschwindigkeiten ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Siebdurchgang $D(x)$ und massenbezogener kinetischer Energie $E_{\text{kin},M}$. Die kinetischen Energien der Pulsar-Versuche wurden dabei auf die aus dem Gehäuse entnommenen Feststoffmassen M_s bezogen, d. h. der Produktrückstand im Schussrohr blieb unberücksichtigt. Im Vergleich zur reinen Gutbettbeanspruchung muss zur Erreichung eines bestimmten Durchgangs im Pulsar etwa die vierfache massenbezogene kinetische Energie $E_{\text{kin},M}$ aufgebracht werden.

Abbildung 4. Energetischer Vergleich zwischen Pulsar und hydraulischer Presse.



4 Schlussfolgerung

Der Zerkleinerungsapparat Pulsar eignet sich zur Zerkleinerung sprödebrüchiger Glasschmelze. Erwartungsgemäß begünstigt eine Erhöhung der aufgewendeten massenbezogenen Energie, d. h. die Erhöhung von Magnetventilöffnungszeit oder der Vordruck bzw. die Verringerung des Füllvolumens, die Zerkleinerung. Bei konstantem Vordruck und konstantem Füllvolumen hat die Verlängerung der Ventilöffnungszeit keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit, mit der der Partikelpfropfen aus dem Schussrohr austritt. Trotz der gleichen kinetischen Energie der obersten Partikelschicht verbessert eine lange Ventilöffnungszeit das Zerkleinerungsergebnis. Dies deutet auf einen kompakteren Partikelpfropfen hin und bestätigt die theoretischen Vorbetrachtungen, nach denen die Verzögerung der unteren Pfropfenschichten und der Aufprall eines möglichst kompakten Pfropfens entscheidend für die Zerkleinerung sind.

Die gemessenen Rohraustrittsgeschwindigkeiten betragen für die gewählten Betriebsparameter ca. 80 % der theoretisch hergeleiteten maximalen Rohraustrittsgeschwindigkeiten. Verglichen mit der reinen Gutbettbeanspruchung in einer hydraulischen Presse muss im Pulsar für die gleiche Zerkleinerungswirkung ca. die vierfache massenbezogene (kinetische) Energie E_M aufgebracht werden.

Vorteile bietet der Pulsar bei temperaturempfindlichen Produkten (z. B. Gewürze), da das Mahlgut schnell aus dem Beanspruchungsraum entfernt wird. Zusätzlich führt die Entspannung der Druckluft zu einer Temperaturabsenkung im Schussrohr, die der auftretenden Reibungswärme entgegenwirkt. Die Zerkleinerung von elastisch-viskosen Produkten wie auch Composit-Materialien im Gutbett ist aufgrund der hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten denkbar, bedarf jedoch weiterer Untersuchungen. Auch an erhöhte Anforderungen bezüglich der Abrasion lässt sich der Pulsar anpassen. Der Beanspruchungsraum beinhaltet keine bewegten Bauteile, die Auskleidung des Gehäuses mit einer Schutzschicht ist einfach zu realisieren. Nach einigen Schüssen bildet sich in der Mitte der Prallplatte ein Feingutkegel des Versuchsmaterials. Die nachfolgenden Partikelpfropfen treffen nicht mehr auf die Prallplatte auf, sondern werden auf dem Feingutkegel quasi autogen zerkleinert. Der kritische Punkt beim Abrasionsschutz im Pulsar ist das Schussrohr. Dieses muss durch eine geeignete Werkstoffauswahl an besondere Reinheitsanforderungen (z. B. in der Medizintechnik) angepasst werden.

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) „Otto von Guericke“ für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit. Die Autoren danken ferner der Firma PULSAR GMBH MICRONIZING SYSTEMS für den zur Verfügung gestellten Zerkleinerungsapparat Pulsar.

Eingegangen am 16. August 2004 [CIT 7034]

Formelzeichen

D	[m]	Schussrohrinnendurchmesser
$D(x)$	[-]	Siebdurchgang
$E_{kin,M}$	[J kg ⁻¹]	massenbezogene kinetische Energie des Partikelpfropfens
$E_{p,M}$	[J kg ⁻¹]	massenbezogene Pressenergie
E_M	[J kg ⁻¹]	massenbezogene Energie
F_p	[N]	Presskraft
I/I_{max}	[-]	relative Intensität der Laserlichtschranken
l	[m]	Pfropfenlänge
L	[m]	Schussrohrlänge
M_s	[kg]	Feststoffmasse
p	[Pa]	Vordruck
p_0	[Pa]	Umgebungsdruck
$q_3(x)$	[m ⁻¹]	Massendichteverteilung
s_p	[m]	Kompressionsweg
s_{is}	[m]	Abstand der Lichtschranken
t_v	[s]	Magnetventilöffnungszeit
Δt	[s]	Verweilzeit des Partikelpfropfens zwischen den Lichtschranken
x	[m]	Partikelgröße, hier Äquivalentdurchmesser bzw. Siebmaschenweite
v_{prall}	[m s ⁻¹]	Aufprallgeschwindigkeit des Partikelpfropfens auf die Prallplatte
v_{mess}	[m s ⁻¹]	gemessene Geschwindigkeit des Partikelpfropfens beim Austritt aus dem Schussrohr
v_{max}	[m s ⁻¹]	berechnete maximale Geschwindigkeit des Partikelpfropfens beim Austritt aus dem Schussrohr
$V_{füll}$	[m ³]	Füllvolumen
δ_0	[-]	Feststoffvolumenanteil im Haufwerk bzw. Partikelpfropfen
ρ	[kg m ⁻³]	Dichte

Literatur

- [1] K. Schönert, Anmerkungen zum Pulsar-System, *Persönliche Mitteilung*, Mai 2003.
- [2] R. M. Schüßler, G. Hefle, Pulsar – For the Pulverisation and Grinding of Hard Materials, *10th Europ. Symp. on Comminution*, Heidelberg, 2.-5. September 2002.