

# REGELUNG DER AEROKINETISCHEN RINNE

L. KÓSA

Lehrstuhl für Chemische Maschinenkunde,  
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen 21 Januar 1983

Vorgelegt von Doz. Dr. A. Verba

## Summary

The constant lengthwise thickness of the material transported by airstream can be realized by co-ordinating the brakeplate at the end, and the gate at the front-part of the slide. The control of the airstream—i.e. alteration of the mass flow rate of transported material—can be carried out by changing either the mass on the brakeplate, or the opening of the gate, or the velocity of the operating air. Making use of the presented physical model the control can be followed by calculation, and the characteristic curves can be calculated. The calculated characteristic curves well approximate the measured points.

## Der Betrieb der Rinne

Die aerokinetische Rinne ist eine Einrichtung, die zur Förderung körniger Feststoffe dient und in der die zur Bewegung des transportierenden Stoffes erforderliche Kraft der Impuls der Treibluft liefert [1]. Die Treibluft drängt durch die Schrägspalte des Rinnenbodens zwischen den Stoffteilchen ein, verliert im Balde die horizontale Geschwindigkeit und schwenkend in die senkrechte Richtung fluidisiert im ganzen oder zum Teil den Stoff. Zur Betätigung der Rinne muß die Treibkraft an den Rinnenwänden und an dem Rinnenboden den auftretenden Reibungswiderstand überwältigen.

Die Rinne fördert das hineingesetzte Material mit kleiner Geschwindigkeit und in hoher Schichtendicke außerordentlich schonend und auf eine gehörig regelbare Weise, weshalb ihre Anwendung hauptsächlich in solchen Fällen gerechtfertigt ist, wo die Zerbrechung der Teilchen nicht erfolgen darf oder wo während der Förderung auch andere Operationen (wie z. B. Trocknung, Abkühlung, Erwärmung, Desinfizierung usw.) durchgeführt werden sollten.

Im Falle von größeren Förderlängen sollte die gleichmäßige Schichtendicke, d.h., da die Rinne horizontal liegt, die horizontale Materialoberfläche des transportierten Materials unbedingt gesichert werden. Dies kann man durch die Zusammenarbeit der am Ende der Rinne angeordneten Bremsklappe ( $F$ ) und des am Vorderteil derselben angebrachten Sperrtors ( $K$ ) erreichen (Abb. 1).

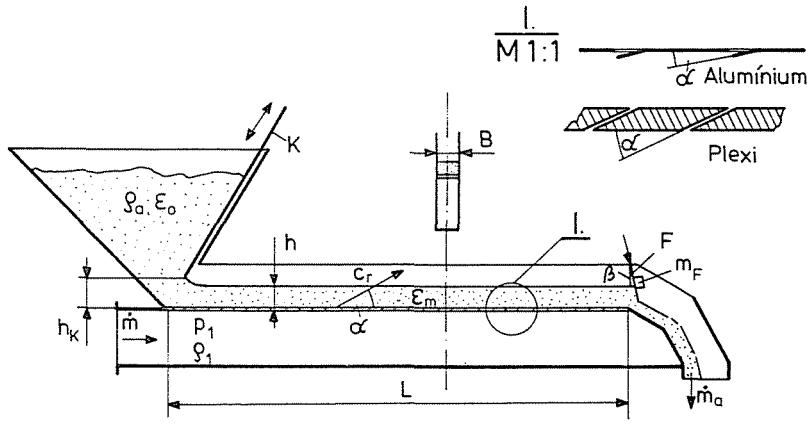


Abb. 1

### Messerfahrten

Die bisher vorgenommenen Versuche bestätigen, daß die Regelung der aerokineticen Rinne, d. h., die Änderung des Gutmassenstromes mit der Änderung der auf die Bremsklappe angewandten Masse ( $m_F$ ), der Öffnung des Sperrtors ( $h_K$ ) und der Geschwindigkeit der Betätigungsluft ( $c_r$ ) verwirklicht werden kann (Abb. 2).

Eine andere Messerfahrt besteht darin, daß das relative Zwischenraumvolumen des beförderten Materials, d. h., die Porosität, schon bei

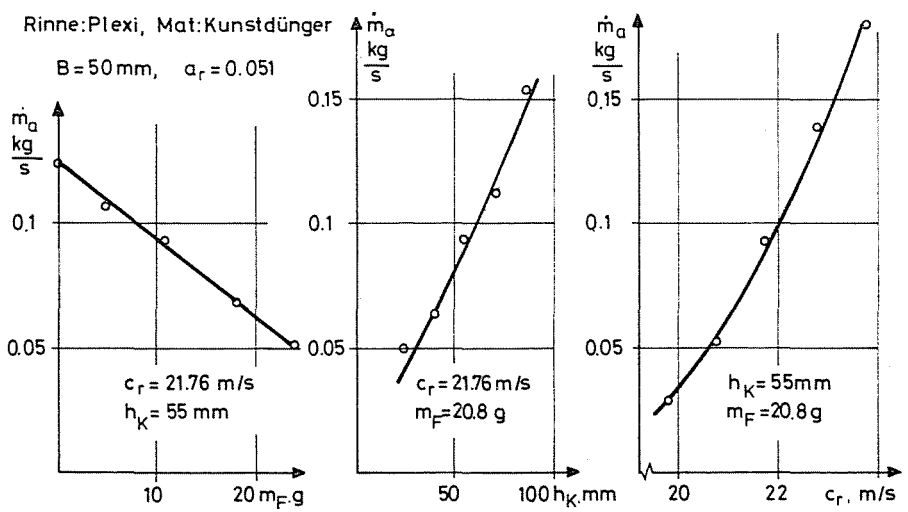


Abb. 2

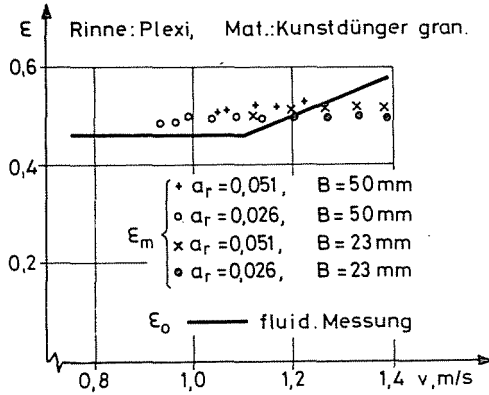


Abb. 3

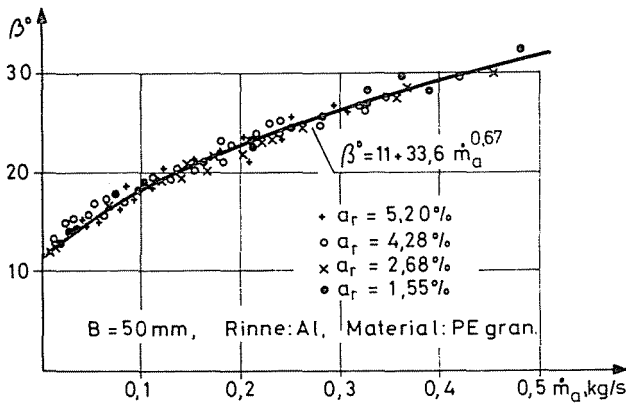


Abb. 4

Bewegung mit Mindestgeschwindigkeit höher, als, im Ruhestand ist (Abb. 3). Die Ursache dafür ist, daß im Laufe der Bewegung der Stoffmenge die Teilchen sich auch untereinander verschieben und in der Schicht eine gewisse Geschwindigkeitsverteilung auftritt. Die höchste Geschwindigkeit befindet sich in der Nähe des Bodens, in der Mitte der Rinne, und die Mindestgeschwindigkeit entwickelt sich an den Wänden, auf der Oberfläche des Materials. Die Messungen zeigen jedoch daß das Verhältnis der aus dem Massenstrom gerechneten Stoffgeschwindigkeit und der Größtgeschwindigkeit mit guter Näherung als konstant angenommen werden kann.

Eine weitere Messerfahrung ist, daß zwischen dem beförderten Gutmassestrom ( $\dot{m}_a$ ) und dem Winkelausschlag der Bremsklappe ( $\beta$ ) für eine gegebene Rinne eine eindeutige Funktionsabhängigkeit besteht (Abb. 4).

## Das physikalische Modell

Unter Berücksichtigung des vorangehenden kann das den Betrieb der aerokinetischen Rinne beschreibende physikalische Modell als eine homogene, mit einer Mittelgeschwindigkeit  $c_{ak}$  bewegliche Stoffmenge von einer Porosität  $\varepsilon = \varepsilon_m$  und von gleichmässiger Schichtendicke angenommen werden, worin durch die Schrägschlitze des Rinnenbodens die Betätigungsluft mit einer konstanten Geschwindigkeit ( $c_r$ ) strömt [2], und im Inneren derselben in jeder Richtung eine Spannung

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = (1 - \varepsilon_m) \rho_a g (h - y) \quad (1)$$

entsteht (Abb. 5).

Auf die in Bewegung befindliche Stoffsäule wirkt die Treibkraft [1]:

$$F_m = \dot{m}(c_{rx} - c_{ak}) \quad (2)$$

welche die auf den Seitenwänden entstehenden

$$2F_s = 2 \int_0^L \int_0^h \mu_z \sigma_z dy dx = \mu_z L (1 - \varepsilon_m) \rho_a g h^2 \quad (3)$$

bzw. auf dem Rinnenboden entstehenden

$$F_{s0} = \int_0^L \mu_y \lambda \sigma_{y0} B dx = \mu_y \lambda L B (1 - \varepsilon_m) \rho_a g h \quad (4)$$

Bremskräfte in Gleichgewicht bringen sollte. Beim gleichmäßigen Fortschritt der Stoffsäule ist die Gleichgewichtsgleichung

$$\begin{aligned} c_r a_r B L \rho \left[ c_r \cos \alpha - \frac{\dot{m}_a}{(1 - \varepsilon_m) \rho_a B h} \right] = \\ = L (1 - \varepsilon_m) \rho_a g (\mu_z h^2 + \mu_y \lambda B h) \end{aligned} \quad (5)$$

gültig.

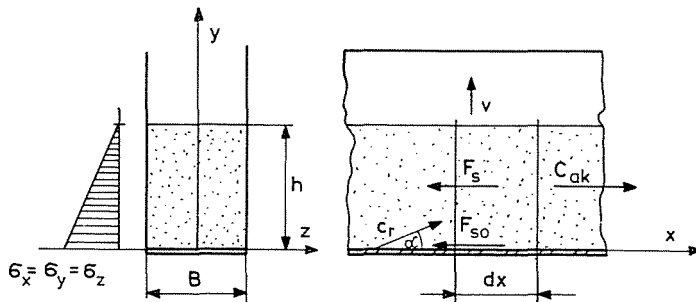


Abb. 5

Bei Kenntnis der Reibungskoeffizienten  $\mu_z$  und  $\mu_y$  sowie des Flächenkoeffizienten  $\lambda$  können aus Gleichung (5) die Charakteristiken  $\dot{m}_a = f(c_r; h; m_F)$  berechnet werden. Der Flächenkoeffizient ist der Quotient der durch das Material berührten Fläche und des ganzen Rinnenbodens.

### Versuche zur Ermittlung von $\mu_z$ und $\mu_y\lambda$

Zur Messung des Reibungskoeffizienten der Seitenwände wurde eine aus dem Seitenwandstoff gefertigte Reibungsplatte in die sich in Bewegung befindende Stoffsäule eingetaucht und mit Hilfe einer einfachen Waage die in der horizontalen Richtung darauf wirkende Kraft gewogen [3]. Um die auf der Eintrittskante entstandene, durch den Stoß hervorgerufene Kraft zu beseitigen wurden die Messungen auf Reibungsplatten von zweierlei Längen ( $l_1 = 150$  mm,  $l_2 = 50$  mm) durchgeführt, und als Reibungskraft wurde der Unterschied der auf beiden Platten gemessenen Kräfte angenommen. Es konnte festgestellt werden, daß die derart erhaltene Kraft, unabhängig von der Stoffgeschwindigkeit eine Funktion zweiten Grades der Eintauchungstiefe der Platte ist, d. h. der Reibungskoeffizient ist eine von der Materialgüte abhängige Konstante:

$$\mu_z = \frac{ah^2}{(l_1 - l_2)(1 - \varepsilon_m)\rho_a gh^2} \quad (6)$$

Zur Ermittlung des Produkts der im Ausdruck (4) der Bodenreibung befindlichen Koeffizienten  $\mu_y$  und  $\lambda$  wurde die Gleichgewichtsgleichung (5) benutzt. Die Auswertung der Förderungsversuche erhaltenen Werte von  $\mu_y\lambda$  ließen eine Abhängigkeit erkennen sowohl von der Stoffgeschwindigkeit als auch von der Luftgeschwindigkeit. Die Abhängigkeit von der Stoffgeschwindigkeit erklärt sich durch die Tatsache, daß beim Spalt sich die Teilchen unter der Einwirkung des Luftstrahles von hoher Geschwindigkeit von der Bodenplatte entfernen, sodann dahin zurückkehren und sich an den Boden anprallen. Die Einschlagstärke hängt von der Stoffgeschwindigkeit ab. Angenommen, daß sich die Änderung von  $\mu_y$  mit der Stoffgeschwindigkeit linear vollzieht läßt sich dieselbe in der Form

$$\mu_y = \mu_{y0} + \vartheta c_{ak} \quad (7)$$

aufschreiben, wobei  $\mu_{y0}$  der mit einem Rampenversuch ermittelbare Reibungskoeffizient zwischen der aufgeschlitzten Platte und dem körnigen Material, und  $\vartheta$  eine die Abhängigkeit charakterisierende Konstante ist.

Berechnet man die Werte des Flächenkoeffizienten  $\lambda$  unter Rücksichtnahme auf Gleichung (7) aus den Messergebnissen, so erhält man die

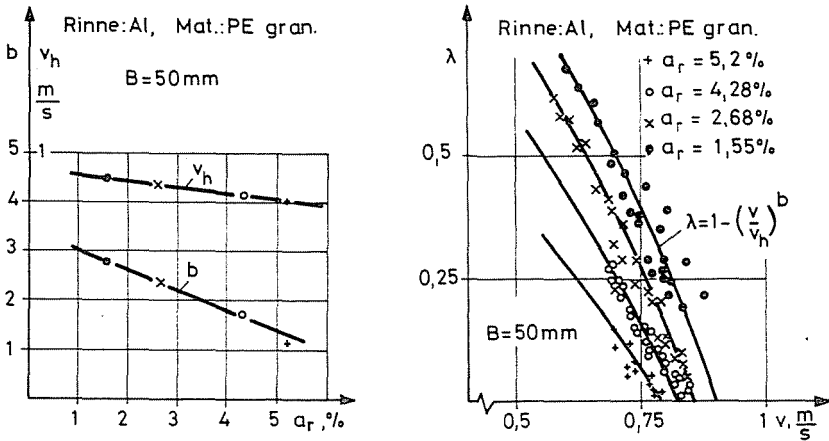


Abb. 6

Abhängigkeit gemäß Abb. 6, wo die Kurven mit Benutzung der Gleichung

$$\lambda = 1 - \left(\frac{v}{v_h}\right)^b \quad (8)$$

genähert werden konnten. Die Werte der in Gleichung (8) eingehenden Konstanten  $b$  und  $v_h$  hängen von dem relativen Spaltquerschnitt des Rinnenbodens ( $a_r$ ) ab. Die Gleichung zeigt, daß je kleiner die Spaltabstände sind, desto kleiner ist die Kontaktfläche zwischen dem Material und dem Rinnenboden d. h., es gibt eine Grenzgeschwindigkeit ( $v_h$ ) bei welcher das Material über dem Rinnenboden "schwebt"; infolgedessen entsteht keine Bodenreibung, und die Treibkraft hat nur den Wandreibungswiderstand zu bewältigen.

### Das Gleichgewicht der Bremsklappe

Die horizontale Materialoberfläche kann der Erfahrung gemäß derart gesichert werden, daß nach der entsprechenden Öffnung des Sperrtors die Bremsklappe mit einer Masse  $m_F$  belastet sein soll bis sich die horizontale Oberfläche ausbildet. Nun wird zwischen der Schichtdicke des beförderten Materials und der mittleren Geschwindigkeit der Stoffsäule durch auf das Momentgleichgewicht der Bremsklappe aufgeschriebene Gleichung eine Abhängigkeit bestimmt (Abb. 7).

Das Moment der Bremsklappe und der darauf gesetzten Masse um den Drehpunkt ist:

$$M_m = m_0 g s_0 \sin \beta + m_F g (s_2 \sin \beta + k \cos \beta). \quad (9)$$

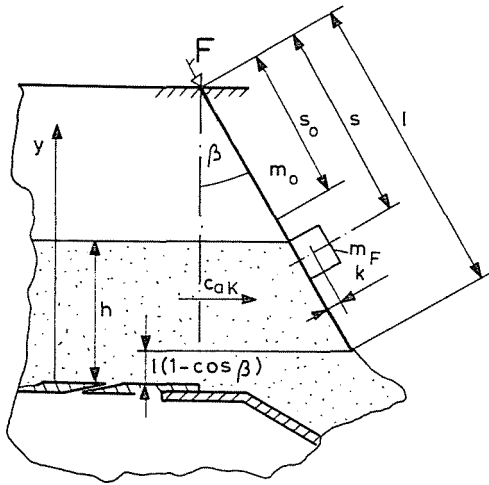


Abb. 7

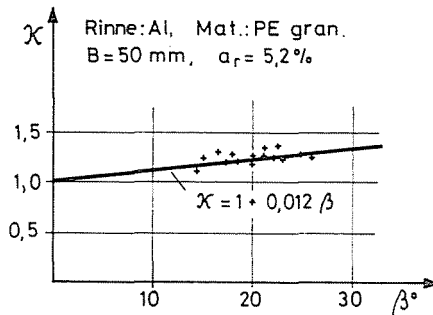


Abb. 8

und das aus dem Druck und dem Impuls des zur Bremsklappe ankommenden Materials um den Drehpunkt entstehende Moment ist:

$$M_{\sigma} + M_i = \int_{l(1-\cos\beta)}^h B\sigma_x(l-y) dy + \int_{l(1-\cos\beta)}^h Bc_{ak}^2(1-\varepsilon_m)\rho_a(l-y) dy \quad (10)$$

Die Auswertung der bisher durchgeführten Messungen weist darauf hin, daß das derart aufgeschriebene Gleichgewicht sich nur bei kleinen Winkelausschlägen  $\beta$  erfüllt, mit Zunahme des Winkels  $\beta$  wird die Anwendung eines zunehmenden Korrekturfaktors erforderlich (Abb. 8)

$$M_{\sigma} + M_i = \kappa M_m \quad (11)$$

wobei

$$\kappa = 1 + \kappa_0 \beta \quad (12)$$

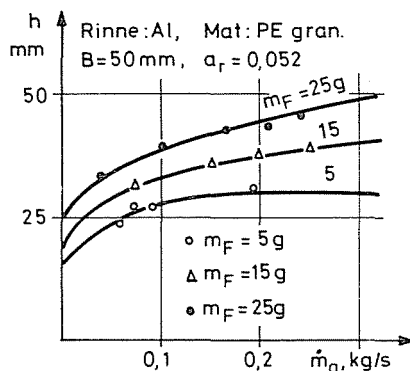


Abb. 9

Das läßt sich dadurch erklären, daß für die größeren Winkelausschläge aufgestellte Gleichung  $M_\sigma + M_i$  weder die bei der Bremsklappe eintreffende Neigung der Stoffsäulenoberfläche noch die Tatsache, daß sich durch den bei der Bremsklappe freigelassenen Spalt die unteren Teilchen von größerer Geschwindigkeit entfernen, ohne an die Bremsklappe anzustoßen, in Rücksicht nimmt.

Angenommen, daß die auf die Bremsklappe gesetzte Masse  $m_F$  von einem konstanten Wert ist, können aus der korrigierten Gleichung des Bremsklappengleichgewichts die sich in einer gegebenen Rinne ausbildenden, koordinierten Werte  $\dot{m}_a - h$  berechnet werden (Abb. 9).

### Kennlinien der aerokinetischen Rinne

Als Kennlinie der aerokinetischen Rinne kann die Funktion Gutmassenstrom-Luftspaltgeschwindigkeit  $\dot{m}_a = f(c_r)$  in Vorschlag gebracht werden mit Bevorzugung der Linien  $h = \text{konst.}$ ,  $m_F = \text{konst.}$  und  $j = \text{konst.}$

Die Berechnung der Kurven  $h = \text{konst.}$  kann mit Hilfe der Gleichgewichtsgleichung (5) durchgeführt werden. Durch Zusammenziehung der Konstanten erhält man:

$$\dot{m}_a = \frac{k_1 c_r^2 + k_2 h^2 + k_3 h + k_4 h c_r^b}{k_5 \frac{c_r}{h} + k_6 + k_7 c_r^b} \quad (13)$$

Die Kurven  $m_F = \text{konst.}$  können auch von der Gleichgewichtsgleichung abgeleitet werden, jedoch, in diesem Fall sollte man zu den vom Bremsklappengleichgewicht berechneten assoziierten  $\dot{m}_a - h$  Werten (Abb. 9) koordinierte  $c_r$  aus der Abhängigkeit (13) ermitteln.



Die Linien  $j = \text{konst.}$  dienen die Auswahl des wirtschaftlichen Betriebspunktes zu ermöglichen. Die Definition des Gütegrades  $j$  heißt; der geförderte Gewichtsstrom multipliziert mit der Förderlänge pro einheitliche Nutzleistung des Ventilators d. h.,

$$j = \frac{\dot{m}_a g L}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_a g}{p_1 c_r a_r B} \quad (14)$$

In dieser Abhängigkeit bedeutet  $p_1$  den Luftdruck unter der Spaltplatte, der aus dem Leerlaufwiderstand der Platte und dem Widerstand der sich auf der Platte bewegenden Materialschicht zusammengesetzt ist:

$$p_1 = \left( 1 + \zeta_r + \frac{f}{d_r} \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} h a_r^2 \right) \frac{\rho_1}{2} c_r^2 \quad (15)$$

$f$  bedeutet den Kármánschen „Rohrreibungskoeffizienten“ [4] der mit Hilfe der Abhängigkeit

$$f = f_0 + \frac{f_1}{Re} \quad (16)$$

annähernd ermittelt werden kann, wobei sich die Werte von  $f_0$  und  $f_1$  von den in der Fachliteratur (z. B. in [5]) befindlichen Werten infolge dem schiefen und an diskreten Stellen stattfindenden Einblasen unterscheiden.

Mit Benutzung der Gleichung (15) werden die Punkte der Kennlinien  $j = \text{konst.}$  als die Schnittpunkte der aus der Abhängigkeit

$$\dot{m}_a = j \left( 1 + \zeta_r + \frac{f}{d_r} \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} h a_r^2 \right) \frac{B a_r \rho}{2g} c_r^3 \quad (17)$$

gerechneten Kurven und der Kennlinien  $h = \text{konst.}$  erhalten.

Abb. 10 stellt eine derartig ermittelte Reihe von Kennlinien dar, wo außer den berechneten Kurven auch die im Laufe der Messungen erhaltenen Ergebnisse aufgetragen wurden. Daneben wurde auch die zur Stoffgeschwindigkeit  $c_{ak} = 0,3$  m/s koordinierte Grenzlinie, als eine rationelle Anwendungsgrenze der Rinne angegeben. Unseren Erfahrungen gemäß, ähnelt bei einer Stoffgeschwindigkeit  $c_{ak} > 0,3$  m/s das Förderschema dem der pneumatischen Dünnstromförderung und zeigt nicht mehr eine von der Rinne zu erwartende schonende Art der Förderung.

Aus der in Abb. 10 dargestellten Kennlinie kann die zur Einstellung des erforderlichen Gutmassenstroms auf die Bremsklappe wirkende Masse und die Spaltgeschwindigkeit der Betätigungsluft entnommen werden. Stellt man das Sperrtor so daß es die horizontale Lage der Materialoberfläche sichert, so gestaltet sich eine aus der Kennlinie entnehmbare Schichtendicke. Wie zu

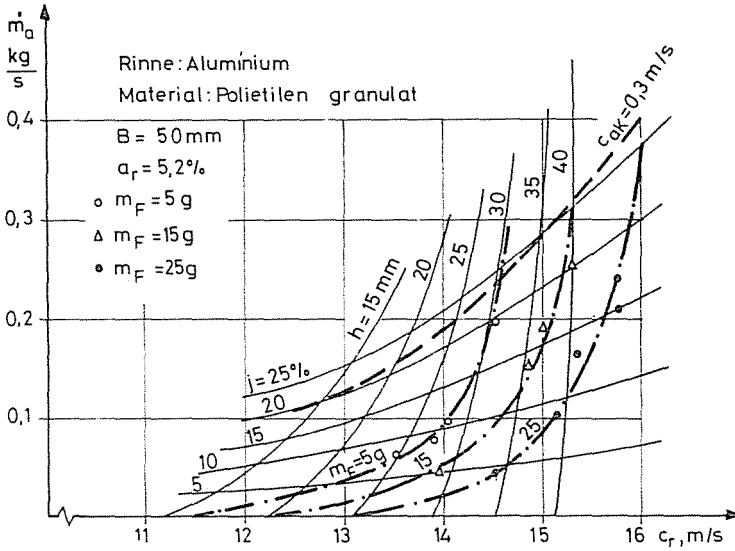


Abb. 10

sehen ist, kann man die Aufgabe an mehreren Betriebspunkten lösen. Von den Arbeitspunkten kann auf Grund des Gütegrades oder auf Grund der sich entwickelnden Stoffgeschwindigkeit, die durch die im Laufe der Förderung durchzuführende Operation definiert wird, gewählt werden.

**Bezeichnung**

$a$	$\frac{N}{m^2}$	Konstante
$a_r = \frac{A_r}{BL}$	—	relative Spaltoberfläche
$A_r$	$m^2$	Gesamtspaltoberfläche
$A_s$	$m^2$	Kontaktfläche des Materials und des Rinnenbodens
$b$	—	Konstante
$B$	m	Breite der Rinne
$c_{ak} = \frac{\dot{m}_a}{(1-\epsilon_m)\rho_a Bh}$	$\frac{m}{s}$	Mittelgeschwindigkeit des Materials
$c_r = \frac{\dot{m}}{\rho_0 A_r}$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit der aus den Spalten herausströmenden Luft
$d_r$	m	Reduzierter Durchmesser des Teilchens
$f$	—	Auf die Stoffmengenkanäle bezüglicher "Rohrreibungskoeffizient"
$f_0 f_1$	—	Konstante
$F_m$	N	Treibkraft

$F_s$	N	An der Wand entstehende Reibungskraft
$F_{s0}$	N	An dem Boden entstehende Reibungskraft
$g$	$\frac{m}{s^2}$	Schwerkraftbeschleunigung
$h$	m	Schichtendicke
$h_K$	m	Sperrtoröffnung
$j$	—	Gütegrad
$k$	m	Armlänge
$k_1 = \rho_1 B a_r \cos \alpha$	$\frac{kg}{m^2}$	Konstante
$k_2 = -\mu_z \rho_a g (1 - \varepsilon_m)$	$\frac{kg}{m^2 s^2}$	Konstante
$k_3 = B k_2$	$\frac{kg}{m s^2}$	Konstante
$k_4 = -k_3 \left( \frac{a_r}{v_h} \right)^b$	$\frac{kg s^{b-2}}{m^{b+1}}$	Konstante
$k_5 = \frac{\rho_1 a_r}{\rho_a (1 - \varepsilon_m)}$	—	Konstante
$k_6 = \vartheta g$	$\frac{1}{s}$	Konstante
$k_7 = -k_6 \left( \frac{a_r}{v_h} \right)^b$	$\frac{s^{b-1}}{m^b}$	Konstante
$l_1; l_2$	m	Länge der Reibungsplatte
$L$	m	Rinnenlänge
$m_0$	kg	Masse der Bremsplatte
$m_F$	kg	Auf der Bremsplatte gesetzte Masse
$\dot{m}$	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom der Treibluft
$\dot{m}_a$	$\frac{kg}{s}$	Der beförderte Gutmassenstrom
$M_i$	Nm	Das Impulsmoment des Materials auf die Bremsplatte
$M_m$	Nm	Das Moment der auf der Bremsplatte gesetzten Masse
$M_\sigma$	Nm	Moment des Stoffdrucks auf die Bremsplatte
$p_1$	Pa	Druck der Treibflut unter der Spaltplatte
$Re = \frac{v d_r}{1,5(1 - \varepsilon_m) \nu}$	—	Auf den Stoffmengenkanal bezügliche Reynoldsche Zahl
$s_0$	m	Abstand zwischen dem Bremsplattenschwerpunkt und dem Drehpunkt
$s$	m	Abstand zwischen der Masse $m_F$ und dem Drehpunkt
$v = \frac{\dot{m}}{\rho_0 B L} = a_r c_r$	$\frac{m}{s}$	Luftgeschwindigkeit in Bezug auf den Leerquerschnitt der Rinne

$v_h$	$\frac{m}{s}$	Grenzeschwindigkeit
$x, y, z$	m	Koordinaten
$\alpha$	Grad	Neigungswinkel des Spalten zur Waagerechte
$\beta$	Grad	Ausschlagswinkel der Bremsplatte von der Lotrechten
$\varepsilon_0$	—	Ruhestandporosität
$\varepsilon_m$	—	Bewegungsporosität
$\zeta_r = \frac{2\Delta p_{1-0}}{\rho_0 c_r^2} - 1$	—	Verlustkoeffizient des Spaltes
$K = \frac{M_\sigma + M_i}{M_m}$	—	Verhältniszahl
$K_0$	—	Konstante
$\lambda = \frac{A_s}{BL}$	—	Flächenkoeffizient
$\mu_y, \mu_{y0}$	—	Bodenreibungskoeffizient
$\mu_z$	—	Wandreibungskoeffizient
$\nu$	$\frac{m^2}{s}$	Kinetische Viskosität der Luft
$\rho_0$	$\frac{kg}{m^3}$	Luftdichte am Schichtunterteil
$\rho_1$	$\frac{kg}{m^3}$	Luftdichte unter der Spaltplatte
$\rho_a$	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte des Fördergutes
$\sigma = (1 - \varepsilon_m)\rho_a g(h - y)$	Pa	Die im Inneren des Materials stattfindende Spannung
$\sigma_{y0} = (1 - \varepsilon_m)\rho_a g h$	Pa	Auf dem Boden zufallender Druck aus dem Gewicht des Fördergutes
$\vartheta$	$\frac{s}{m}$	Konstante

## Literatur

1. KÓSA L., VERBA A., TALLIÁN A.: Berechnung der Treibkraft in aerokinetischer Rinne. Vorträge der zweiten Konferenz über pneumatischen Transport. Pécs, 1978.
2. TALLIÁN A.: Hydraulische Bemessung eines Verteilkanals dicht angeordneter Abzweigungen. Inauguraldissertation, Bp. 1982.
3. KÓSA L.: Messung der Wandreibung in fließenden, fluidisierten körnigen Feststoffe. Vorträge des dritten Kolloquiums über Strömungsmessungen, Miskolc, 1980.
4. MICHELL, S. J.: Fluid and Particle Mechanics. Oxford, Pergamon Press, 1970.
5. KEUNEKE, K.: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße. VDI Forschungsheft, 509.

Dr Levente KÓSA H-1521 Budapest