

Untersuchungen über die Klassierungsgenauigkeit bei Luftsiebung mittels aufsteigender Luftströmung

Von

Jun-ichi KOKADO*, Natsuo HATTA* und Ken-ichi NAKAYASU*

(Eingegangen am 30. Sept. 1969)

Die Klassierung des Rohmaterials ist bei der Beschickung von Hochöfen einer der wichtigsten Faktoren für deren Leistung. Es ist schwierig, kleine Körner mittels Netzsieben zu entfernen. Aus diesem Grund wurde das pneumatische Siebverfahren entwickelt. Bei der Luftsiebung macht man sich die Tatsache zunutze, daß die Schwebegeschwindigkeit der Körner je nach ihrer Größe unterschiedlich ist. D.h. die kleinen Körner werden nach oben geblasen, während die großen Körner nach unten sinken. Als Folge davon beeinflußt allerdings die Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte die Klassierungsgenauigkeit erheblich. Zugleich nimmt die Häufigkeit von Zusammenstößen zwischen den bewegten Körnern in der Luftströmung mit zunehmender Menge zu, und der Einfluß der Zusammenstöße auf die Klassierungsgenauigkeit kann keinesfalls vernachlässigt werden. In diesem Beitrag werden die Wirkung der Streuungserscheinungen und die der Zusammenstöße auf die Klassierungsgenauigkeit bei Verwendung eines Luftsiebes ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden.

- 1) Eine Klassierung der Körner nach ihrer Korngröße ist wegen der unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeit möglich, auch wenn die scheinbaren spezifischen Gewichte und die Luftwiderstandsbeiwerte in gewissem Grad eine Streuung aufweisen.
- 2) Die Streuungen beeinflussen die Klassierungsgenauigkeit besonders der Körner, deren Durchmesser dem Durchmesser \bar{D}_s der Schwebekörner nahe kommt, und sie haben bei Körnern mit einem Durchmesser kleiner als $\bar{D}_s/2$ fast keinen Einfluß auf die Klassierungsgenauigkeit.
- 3) Wenn die Korngrößenverteilung der in die aufsteigende Luftströmung eingeführten Körner zeitlich konstant ist, nimmt mit einer Zunahme der behandelten Menge der Luftmenge gegenüber das Eintreibverhältnis der nach oben geblasenen Körner jedes Maschenmaßes logarithmisch ab.

1. Einleitung

Beim Hochofenbetrieb spielt die Klassierung des Rohmaterials eine wichtige Rolle für die Hochofen-Leistung. Heute ist es bekannt, daß sich die Verminderung der durchschnittlichen Korngröße des Einsatzmaterials sehr günstig auf die Verbesserung der Leistung und Wirtschaftlichkeit von Hochöfen auswirkt, besonders auf die Erhöhung der Rohstahlerzeugung und Verminderung des Koksverbrauches.

* Institut für Bergbau- und Hüttenmaschinen

Andererseits ist zu erwarten, daß auch die Vermeidung der Zuführung kleiner Teilchen sich günstig auf die Hochofenleistung auswirkt. Allerdings ist der Grad der Erhöhung der Hochofenleistung für diesen Fall noch nicht geklärt. Nach Verlassen des Abkühlungssystems der Sinteranlage werden die Sinter-Körner von normalerweise 5 mm bis 25 mm, aus denen das Einsatzmaterial zu mehr als der Hälfte besteht, durch ein Netzsieb herausgesiebt. Vor Eintritt in den Hochofen beträgt der Anteil der Sinterteilchen von Korngrößen unter 5 mm etwa 3~10%. Davon ist ein Teil während des Siebens eingedrungen und ein anderer hat sich bei der Förderung zum Hochofen gebildet. Diese kleinen Teilchen müssen vor dem Hochofen so gut wie möglich entfernt werden, aber das ist mit einem Netzsieb sehr schwierig, weil die kleinen Teilchen nicht leicht durch die Maschen des Netzes fallen und außerdem neben dem Hochofen nicht genügend Platz für eine Siebanlage vorhanden ist. Unsere Forschung mit Luftsieben hatte den Zweck, für die Entfernung der kleinen Körner eine möglichst einfache und wirtschaftliche Methode zu finden. Weil nach dem Prinzip der Luftsiebung die Körner nach ihrer unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeit ausgesiebt werden, ist der Einfluß der Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und Luftwiderstandsbeiwerte der Körner auf die Klassierungsgenauigkeit sehr groß. Dazu ist der Einfluß der Zusammenstöße von den nach oben geblasenen und den nach unten sinkenden Körner in Betracht zu ziehen, da die Häufigkeit von Zusammenstößen mit der Erhöhung der Quantität in der Zeiteinheit zunimmt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Versuche über die Klassierungsgenauigkeit bei Verwendung eines Luftsiebes, sowie die unserer Analysen bezüglich der Einflüsse, einmal der Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte, und zum andern der Zusammenstöße der Körner, diskutiert.

2. Versuche

2.1 Versuchsverfahren und -anlage

Es ist typisch für ein Luftsieb, daß die Luft rechtwinklig oder in entgegengesetzter Richtung zur Bewegungsrichtung des Kornes strömt, das fast senkrecht fällt. Wir machten den Versuch, die Körner in die aufsteigende Luftströmung einzubringen und auszusieben: die Körner unter einer gewissen Größe wurden nach oben geblasen, die anderen Körner sanken nach unten. Wie Bild 1 zeigt, steigt die Luftströmung im Siebrohr durch den Lufttank auf, während zugleich das Versuchsmaterial seines eigenen Gewichts wegen auf dem Boden der Fließrinne abwärts fließt, und wenn es die Einführungsöffnung des Siebrohrs erreicht, auf die Luftströmung trifft. Die Gebläsedaten für den Versuch sind 22 kW, 20 m³/min

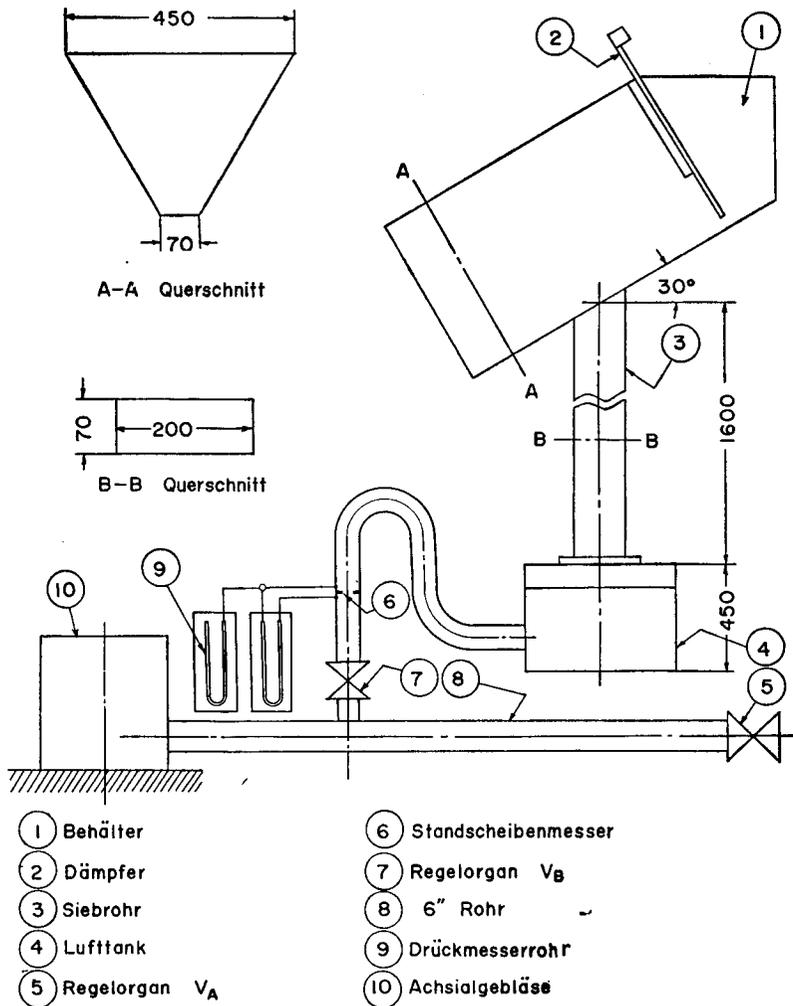


Bild 1. Versuchsanlage für die Aussiebung.

und 2000 mmAq. Die Luft wird vom Gebläse durch ein 6" Rohr über das Regelorgan V_B und den Standscheibenmesser in den Lufttank eingeführt. Wenn die Luft direkt in das Siebrohr einströmt, wird die Windverteilung im Rohr sehr unregelmäßig, deshalb wird die Strömung in das Rohr über den Lufttank geleitet. Das Siebrohr hat einen Schnitt von 7 cm \times 20 cm und eine Länge von 1,6 m. In den nun folgenden Versuchsergebnissen wird die Korngröße des Versuchsmaterials mittels der Maschenweite der Netzsiebe angegeben.

2.2 Streuung der Werte der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte des Versuchsmaterials

Die Koks- und Sinter-Körner sind in ihrer Form verschieden und außerdem

weist jedes Korn Hohlräume auf, sodaß die bei den Werten des scheinbaren spezifischen Gewichts und des Luftwiderstandsbeiwerts das Auftreten von Streuungen vorausgesetzt werden muß. Beim Koks wurden willkürlich 375 Körner von 2 mm bis 22 mm mit einem Gesamtgewicht von 0,557 kg entnommen und das scheinbare spezifische Gewicht wurde gemessen. Der durchschnittliche Wert $\bar{\gamma}_K$ hat sich als $0,94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ergeben und die Standardabweichung σ_{γ_K} war $0,96 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$. Nach Bild 2 zeigt die Streuung die Form einer Normalverteilung.

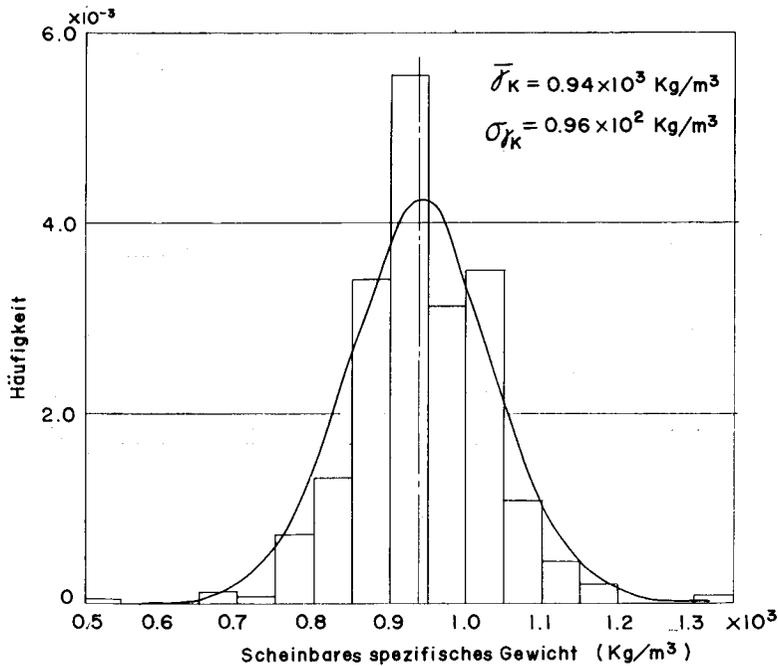


Bild 2. Verteilung der scheinbaren spezifischen Gewichte von Koks.

85,8% des Gesamtgewichts liegen innerhalb der Deviation von $\pm 15\%$ vom Durchschnittswert. Bild 3 zeigt, daß zwischen Korngröße und scheinbarem spezifischem Gewicht kaum eine Wechselbeziehung bestand. Die Netzsieve für den Versuch hatten Maschenweiten von 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 9 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm und 22 mm. Wir nannten den Durchmesser eines Kugelkörpers vom Gewicht und scheinbarem spezifischen Gewicht des betreffenden Kornes den reduzierten Kugeldurchmesser, und den Mittelwert zweier je nebeneinander liegender Maschenweiten den mittleren Durchmesser. Bild 4 zeigt einen Vergleich zwischen dem mittleren Durchmesser und dem Kugeldurchmesser jedes Kornes, dessen scheinbares spezifisches Gewicht gemessen wurde. Aus dem Bild ist zu ersehen, daß der mittlere Durchmesser und

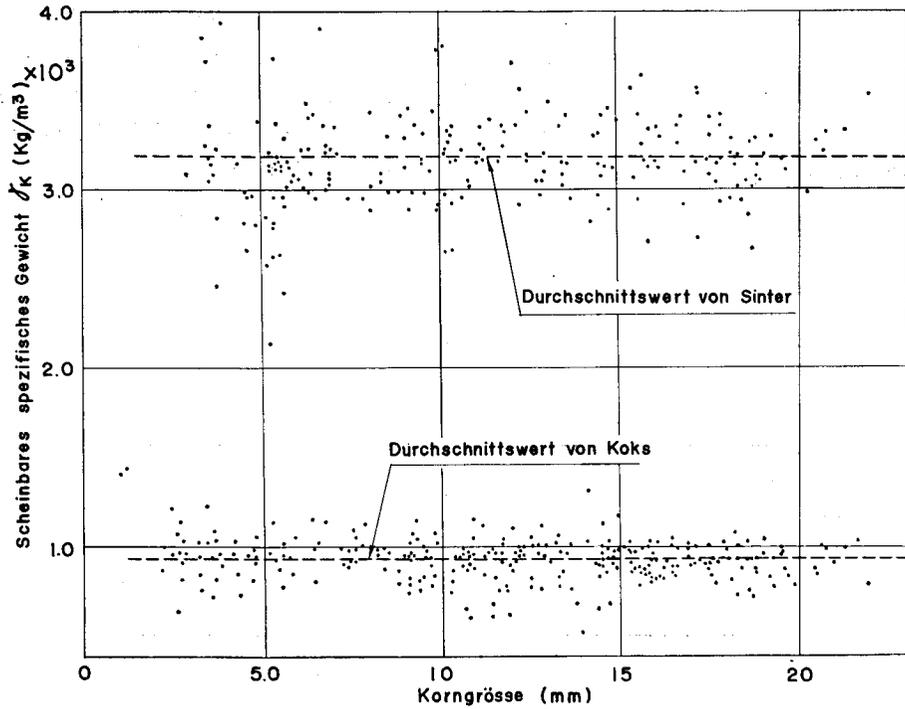


Bild 3. Beziehung zwischen scheinbarem spezifischem Gewicht und Korngröße.

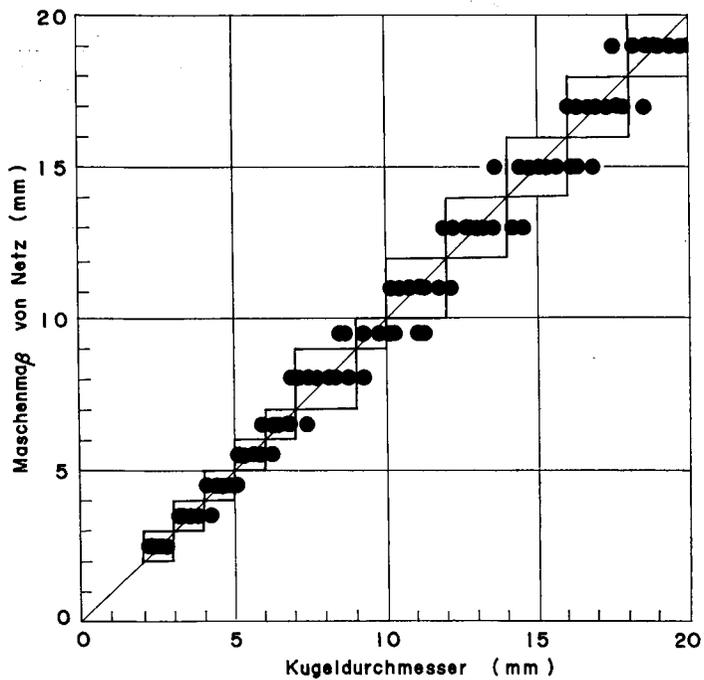


Bild 4. Beziehung zwischen mittlerem Durchmesser und Kugeldurchmesser.

der Kugeldurchmesser fast gleich waren. Beim Sinter wurden ebenfalls willkürlich 213 Körner von 3 mm bis 22 mm mit einem Gesamtgewicht von 0,801 kg entnommen und hiervon wurde das scheinbare spezifische Gewicht gemessen. Der durchschnittliche Wert $\bar{\gamma}_K$ hat sich als $3,18 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ergeben und die Standardabweichung σ_{γ_K} war $0,211 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Wie Bild 5 zeigt, hat die Streuung

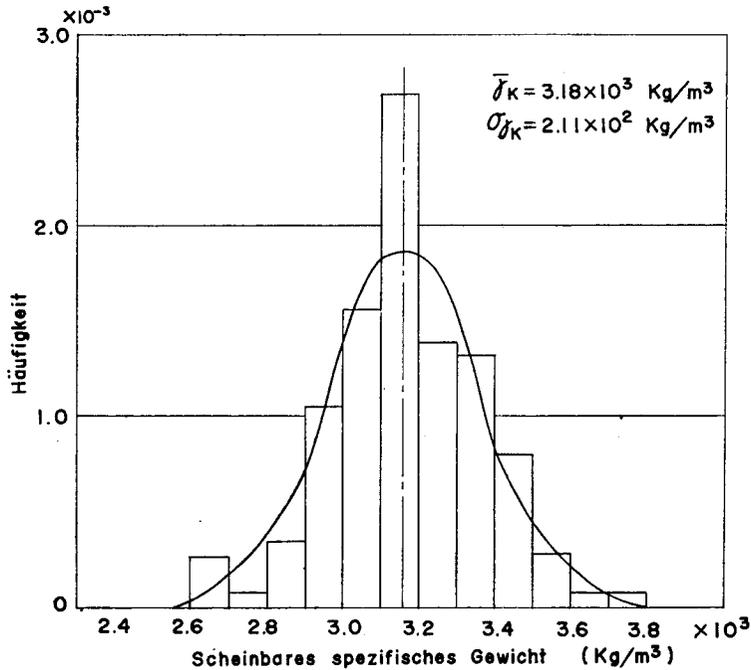


Bild 5. Verteilung der scheinbaren spezifischen Gewichte von Sinter.

die normale Verteilungsform wie bei Koks. 97,4% des Gesamtgewichts liegen innerhalb der Deviation von $\pm 15\%$ vom Durchschnittswert. Zwischen Korngröße und scheinbarem spezifischem Gewicht bestand, wie beim Koks, kaum eine Wechselbeziehung. Bei einer Schwebegeschwindigkeit von u_s m/sec, kann man den Luftwiderstandsbeiwert C des Versuchsmaterials mit der folgenden Gleichung berechnen:

$$C = \frac{4 \cdot g \cdot \gamma_K \cdot D_s}{3 \gamma_L u_s^2}$$

Dabei sind D_s = Durchmesser des Schwebekornes (m)
 γ_K = Scheinbares spezifisches Gewicht der Körner (kg/m^3)
 γ_L = Spezifisches Gewicht von Luft (kg/m^3)
 g = Schwerkraftbeschleunigung (m/sec^2)

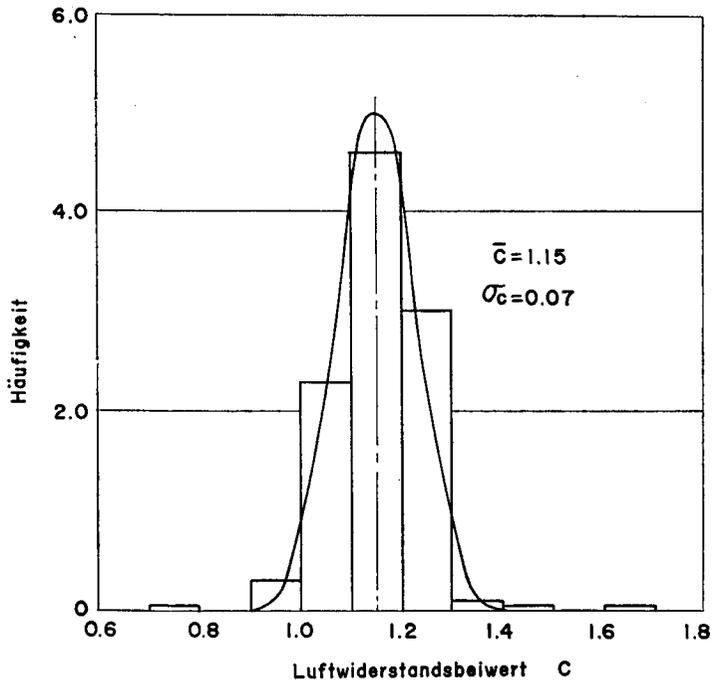


Bild 6. Verteilung der Luftwiderstandsbeiwerte von Koks-Körnern.

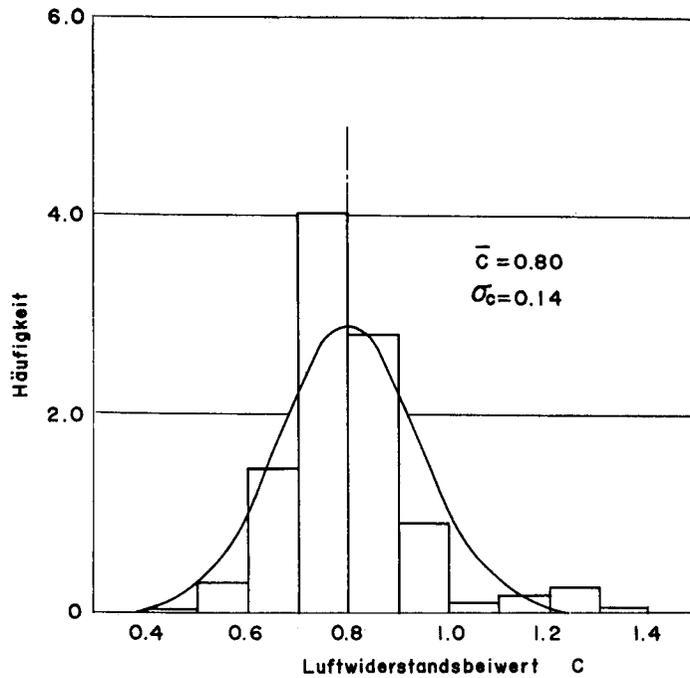


Bild 7. Verteilung der Luftwiderstandsbeiwerte von Sinter-Körnern.

Im allgemeinen ist der Wert des Luftwiderstandsbeiwerts eine Funktion der Reynoldsschen Zahl. Es ist bekannt¹⁾, daß bei einer Reynoldsschen Zahl über 10^3 der Luftwiderstandsbeiwert von Körnern mit unregelmäßiger Form, wie Koks und Sinter, konstant ist. Beim Koks wurde ein Luftwiderstandsbeiwert zwischen $5,0 \times 10^3$ und $2,0 \times 10^4$ gemessen. Aus dem Ergebnis fanden wir einen durchschnittlichen Wert von $\bar{C}=1,15$ und eine Standardabweichung σ_c von 0,07. Die Streuung nach Bild 6 sahen wir als Normalverteilung an. 98,6% des Gesamtgewichts lagen innerhalb der Deviation von $\pm 15\%$ vom Durchschnittswert. Beim Sinter wurde ein Luftwiderstandsbeiwert zwischen $3,6 \times 10^3$ und $4,0 \times 10^4$ gemessen. Aus dem Ergebnis fanden wir einen durchschnittlichen Wert von $\bar{C}=0,8$ und eine Standardabweichung σ_c von 0,14. Die Streuung nach Bild 7 sahen wir als Normalverteilung an. 61,0% des Gesamtgewichts lagen innerhalb der Deviation von $\pm 15\%$ vom Durchschnittswert.

2.3 Schwebegeschwindigkeit des Versuchsmaterials

Wie schon erwähnt, weisen die scheinbaren spezifischen Gewichte und die Luftwiderstandsbeiwerte von Koks und Sinter eine gewisse Streuung auf. Infolgedessen ist die Schwebegeschwindigkeit jedes Kornes nicht einheitlich, auch wenn die Körner von genau der gleichen Größe sind. Die durchschnittliche Schwebegesch-

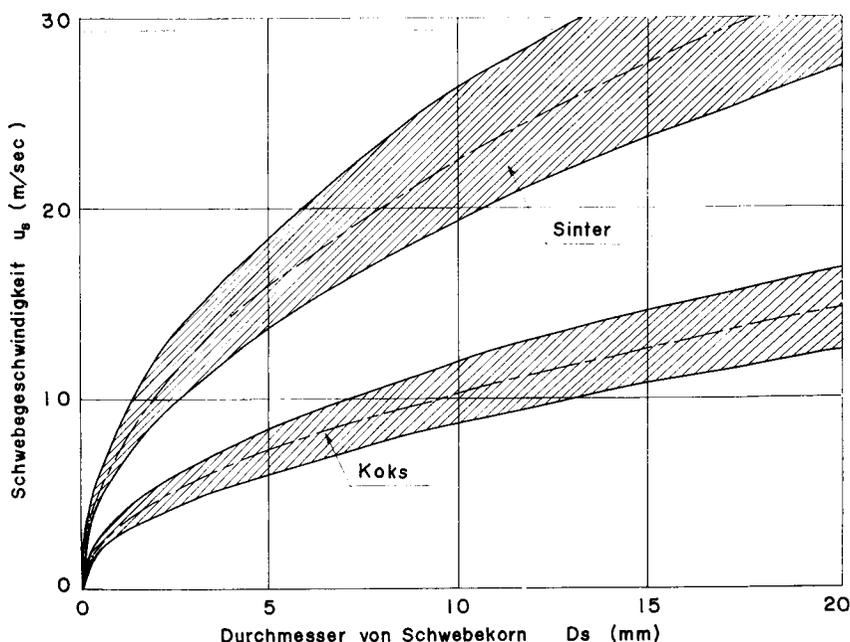


Bild 8. Beziehung zwischen Schwebegeschwindigkeit und Schwebekorngröße bei Koks und Sinter.

windigkeit u_s von Koks und Sinter wurde mit den Durchschnittswerten $\bar{\gamma}_K$ und \bar{C} errechnet. Das Ergebnis zeigt die strichpunktierte Linie von Bild 8. Und für einen Streubereich innerhalb der Deviation von $\pm 15\%$ der beiden Werte, liegt die Streuung der Schwebegeschwindigkeiten im Bereich der schrägen Linien. In unserem Fall wurde die Schwebegeschwindigkeit als $\tau_L = 1,02 \text{ kg/m}^3$ errechnet, denn wir hatten am Ausgang des Gebläses keinen Kühlapparat und die Lufttemperatur war mit 70°C relativ hoch.

2.4 Anfangsgeschwindigkeit des Versuchsmaterials an der Einführungsöffnung des Siebrohrs

Das Versuchsmaterial gleitet auf dem Boden einer Fließrinne mit einem Neigungswinkel von 30° , wie Bild 1 zeigt, wobei wegen seines eigenen Gewichts die Bewegungsgeschwindigkeit allmählich zunimmt. Die Einführungsöffnung des Siebrohrs befindet sich in einem Abstand von ungefähr 0,6 m von dem Behälter. Je ein Koks-Korn wurde auf eine Ebene aus gleichem Material wie das des Versuchssapparats gelegt und der ruhende Reibungsbeiwert zwischen Korn und Unterlage wurde unter langsamer Erhöhung des Neigungswinkels gemessen. Daraus hat sich ein ruhender Reibungsbeiwert von $0,46 \sim 0,58$ ergeben. Daher wurde der dynamische Reibungsbeiwert als etwa 0,4 angenommen und demzufolge die senkrechte Anfangsgeschwindigkeit v_0 an der Einführungsöffnung des Siebrohrs als $0,67 \text{ m/sec}$ bestimmt. v_0 wurde dann noch durch andere Verfahren gemessen, um festzustellen, ob der Wert exakt war. Wenn das Siebrohr aus dem Versuchssapparat herausgenommen wurde und ein Korn auf dem Boden der Fließrinne abwärts glitt, landete es im freien Fall auf einem bestimmten Punkt. Wir konnten dann v_0 aus der Fallhöhe und der Horizontalentfernung errechnen. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 , die durch dieses Verfahren ermittelt wurde, wies fast denselben Wert wie oben auf. Den gleichen Wert für v_0 erhielten wir auch bei Sinter-Körnern. Weiter versuchten wir, ob die Bedingungen in der Fließrinne, in der die Körner liefen, je nach der Menge variierten, d.h. ob sich v_0 mit einer Vergrößerung oder Verkleinerung der eingeführten Kornmenge änderte. Es hat sich aber ergeben, daß sich v_0 kaum ändert.

2.5 Versuchsergebnisse

Koks und Sinter als Versuchsmaterial wurden im voraus mit Netzsieben, wie in 2.2 erwähnt, ausgesiebt. Die daraus resultierenden Korngrößenverteilungen zeigen Bild 9 für Koks und Bild 10 für Sinter. Der Versuch mit der Luftsiebung von Koks-Körnern, deren Korngrößenverteilung aus Bild 9 ersichtlich ist, ist mit dem Versuchssapparat von Bild 1 bei durchschnittlichen Luftströmungsgesch-

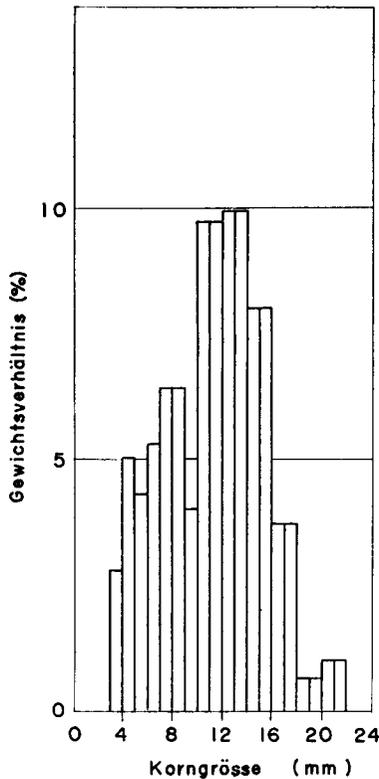


Bild 9. Korngrößenverteilung von Koks-Körnern.

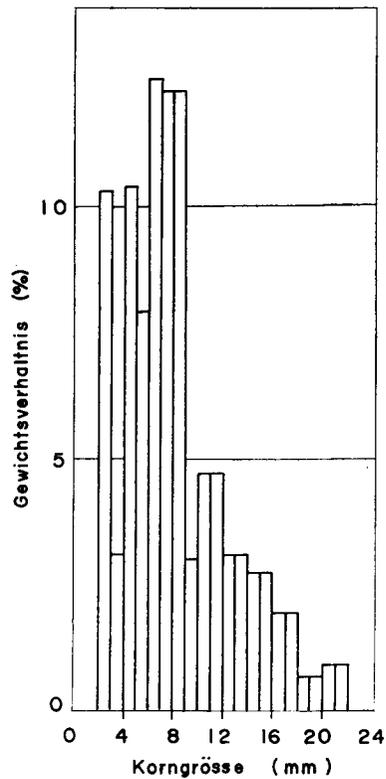
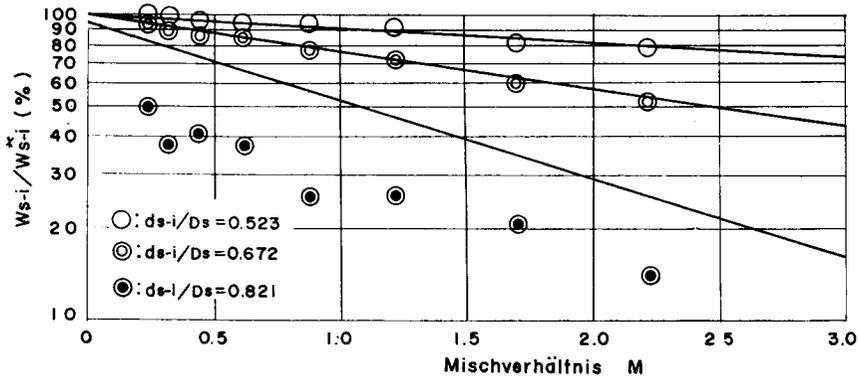
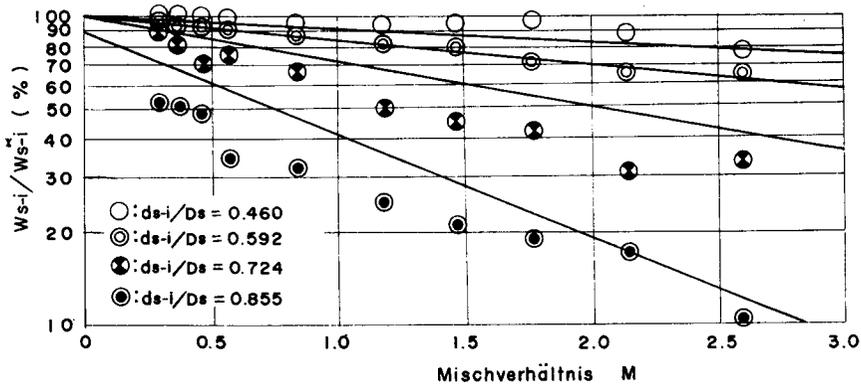


Bild 10. Korngrößenverteilung von Sinter-Körnern.

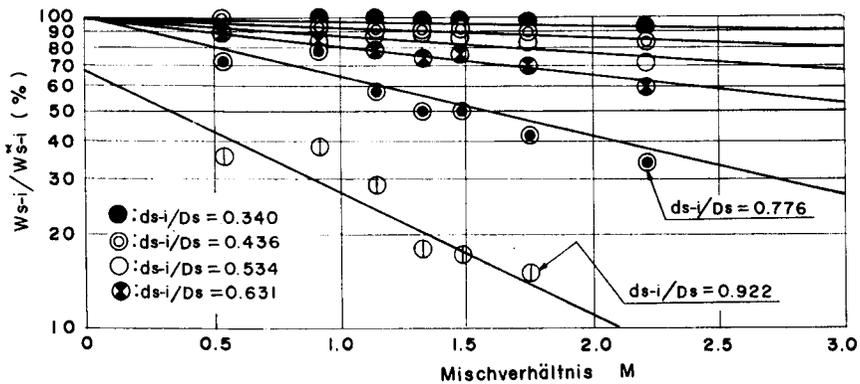
windigkeiten von 8,5 m/sec, 9,0 m/sec und 10,5 m/sec gemacht worden. Wir bezeichneten die gesamte Menge der nach oben geblasenen Körner, die innerhalb eines bestimmten mittleren Durchmessers lagen, mit W_{s-i}^* , und die Menge der Körner, die tatsächlich nach oben geblasen wurde, mit W_{s-i} . Und wir nannten das Verhältnis W_{s-i}/W_{s-i}^* das Eintreibverhältnis jedes Maschenmaßes. Bei einer Kornmenge von a ton/h und einer zugeführten Luftmenge von b ton/h, nannten wir dieses Verhältnis $M=a/b$ das Mischverhältnis. Für Koks wird das Versuchsergebnis der Luftsiebung in Bild 11 (a), (b) und (c) mit halblogarithmischer Koordinate gezeigt, wobei auf der Ordinate das Eintreibverhältnis W_{s-i}/W_{s-i}^* , auf der Abszisse das Mischverhältnis M aufgetragen ist, Parameter d_{s-i}/D_s . Hierbei stellt d_{s-i} den mittleren Durchmesser der nach oben geblasenen Körner jedes Maschenmaßes, und D_s den Durchmesser eines Schwebekornes dar. Wir gewannen ein gutes Eintreibverhältnis für Körner kleiner als der halbe Durchmesser der Schwebekörner. Mit zunehmendem Durchmesser der nach oben geblasenen Körner nahm das Eintreibverhältnis stark ab, eine Aussiebung der Körner mit



(a) $u_s = 8.5$ m/sec



(b) $u_s = 9.0$ m/sec



(c) $u_s = 10.5$ m/s

Bild 11. Versuchsergebnisse bei Aussiebung von Koks.

einem Durchmesser, der dem der Schwebekörner nahe kam, war ziemlich schwierig. Und das Eintreibverhältnis der nach oben geblasenen Körner, die zum gleichen Maschenmaß gehörten, fiel mit einer Verschiebung des Mischverhältnisses M zugunsten der zugeführten Menge logarithmisch ab. Deshalb muß man bei einer Luftsiebung entweder ein Mischverhältnis mit geringer Kornmenge im Verhältnis zur Luftmenge wählen, oder öfter als zweimal aussieben. Außerdem haben wir Versuche mit einer Luftsiebung der Sinter-Körner, deren Korngrößenverteilung in Bild 10 gezeigt wird, bei durchschnittlichen Luftströmungsgeschwindigkeiten von 16,4 m/sec und 17,8 m/sec gemacht. Wie man aus Bild 12(a) und (b) ersieht, ist der Zusammenhang zwischen dem Eintreibverhältnis W_{s-i}/W_{s-i}^* und dem Mischverhältnis M derselbe wie bei Luftsiebung von Koks.

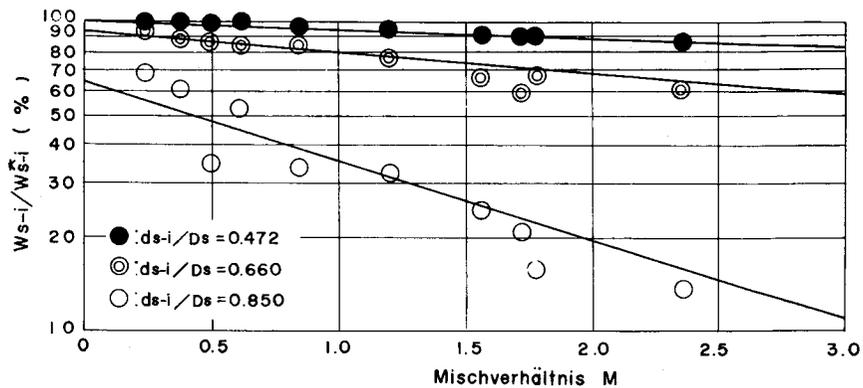
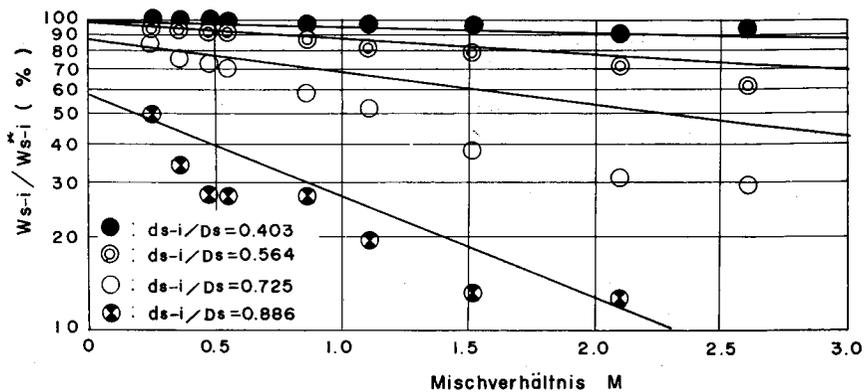
(a) $U_s = 16.4$ m/sec(b) $U_s = 17.8$ m/sec

Bild 12. Versuchsergebnisse bei Aussiebung von Sinter.

3. Analyse der Klassierungsgenauigkeit

Der Wirkungsgrad der Luftsiebung wurde analysiert, damit der Zusammenhang zwischen den Faktoren, die die Klassierungsgenauigkeit beeinflussen, klar herauskam. Beim Luftsieben muß man zuerst den Grad der Beeinflussung der Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und Luftwiderstandsbeiwerte auf die Klassierungsgenauigkeit in Betracht ziehen. Nun nehmen wir den Durchmesser D_s der Schwebekörner als Standardmaß für die Korngröße. Und wir bezeichnen die Maschenweite in der Reihenfolge angefangen mit der kleinsten, mit $D_{s-n}, D_{s-(n-1)}, \dots, D_{s-1}, D_s, D_{s+1}, \dots, D_{s+m+1}$, und die mittleren Durchmesser mit $d_{s-n}, d_{s-(n-1)}, \dots, d_{s-1}, d_{s+1}, \dots, d_{s+m}$. Und wir bezeichnen das Gewicht pro Korn, das diesen mittleren Durchmesser aufweist, mit $G_{s-n}, G_{s-(n-1)}, \dots, G_{s-1}, G_{s+1}, \dots, G_{s+m}$, und die Anzahl der in der Zeiteinheit eingeführten Körner mit $N_{s-n}, N_{s-(n-1)}, \dots, N_{s-1}, N_{s+1}, \dots, N_{s+m}$. Daher ist die Menge W_{s-i}^* der in der Zeiteinheit zugeführten Körner $G_{s-i} N_{s-i}$. Im allgemeinen ist der Durchmesser D_s des Schwebekornes eine Funktion der Luftströmungsgeschwindigkeit u_s , des scheinbaren spezifischen Gewichts γ_K und des Luftwiderstandsbeiwerts C . Er ergibt sich die folgende Gleichung:

$$D_s = K \cdot u_s^2 \frac{C}{\gamma_K}$$

Dabei ist $K=3\tau_L/4g=\text{konst.}$

Im Fall einer Streuung von γ_K und C wie bei Koks und Sinter, ist der Durchmesser D_s unbestimmt trotz gleicher Luftströmungsgeschwindigkeit. Wenn γ_K und C von einander unabhängig sind, die durchschnittlichen Werte von γ_K und C mit $\bar{\gamma}_K$ und \bar{C} bezeichnet werden, dann bekommt man den Erwartungswert \bar{D}_s und die Standardabweichung σ_D von D_s wie folgt²⁾:

$$\bar{D}_s = K u_s^2 \frac{\bar{C}}{\bar{\gamma}_K} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_D &= \left[\left(\frac{\partial D_s}{\partial C} \right)^2 \sigma_C^2 + \left(\frac{\partial D_s}{\partial \gamma_K} \right)^2 \sigma_{\gamma_K}^2 \right]^{1/2}_{\gamma_K=\bar{\gamma}_K, C=\bar{C}} \\ &= \left[\left(K \cdot u_s^2 \frac{1}{\bar{\gamma}_K} \right)^2 \sigma_C^2 + \left(-K u_s^2 \frac{\bar{C}}{\bar{\gamma}_K^2} \right)^2 \sigma_{\gamma_K}^2 \right]^{1/2} \\ &= \bar{D}_s \left[\left(\frac{\sigma_C}{\bar{C}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\gamma_K}}{\bar{\gamma}_K} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2) \end{aligned}$$

Da wir die Verteilung von D_s für annäherungsweise normal halten³⁾, ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(D_s)$ nach folgender Gleichung:

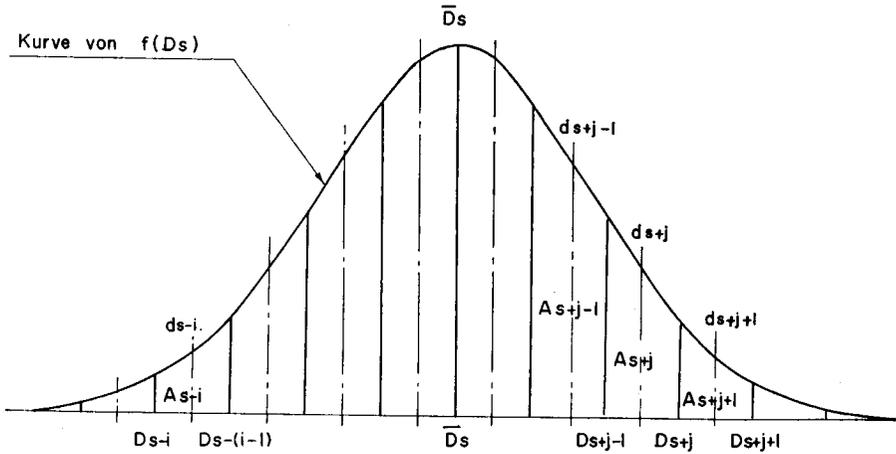


Bild 13. Verteilung der Durchmesser der Schwebekörner.

$$f(D_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_D} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_D^2}(\bar{D}_s - D_s)^2\right\} \quad (3)$$

Bei einem Verlauf von $f(D_s)$ gemäß der Kurve von Bild 13 und einer Unterteilung des Gesamtbereichs der Durchmesser der Schwebekörner in Abschnitte, bezeichnen wir die Wahrscheinlichkeitswerte für die Körner von mittlerem Durchmesser innerhalb eines jeden Abschnitts im Schwebезustand mit $A_{s-n}, A_{s-(n-1)}, \dots, A_{s+j}, \dots$ und A_{s+m} . Angenommen, daß die Schwebekörner schließlich nach unten sinken, wird die Eintreibmenge $\Phi[d_{s-i}]$ der Körner mit mittlerem Durchmesser d_{s-i} , ohne Zusammenstöße zwischen den Körnern, in der folgenden Gleichung gezeigt,

$$\Phi[d_{s-i}] = W_{s-i}^* \sum_{j=-(i-1)}^{\infty} A_{s+j} = W_{s-i}^* \int_{D_{s-(i-1)}}^{\infty} f(D_s) dD_s = W_{s-i}^* \varphi_{s-(i-1)} \quad (4)$$

Dabei ist $\varphi_{s-(i-1)} = \int_{D_{s-(i-1)}}^{\infty} f(D_s) dD_s$.

Die Gleichung gibt die Eintreibmenge der nach oben geblasenen Körner nur im Hinblick auf die Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte an. Bei einer kleinen Quantität kann man die Eintreibmenge aus der Gleichung (4) errechnen. Aber auch der Einfluß der Zusammenstöße zwischen den nach oben geblasenen und nach unten sinkenden Körnern muß in Betracht gezogen werden, da die Häufigkeit dieser Zusammenstöße, mit Zunahme der Quantität, ansteigt. Es wird angenommen, daß die Korngrößenverteilung beim Einsatz der Körner in das Siebrohr zeitlich konstant ist. Die zeitlichen Einsatzintervalle für die Körner eines jeden Abschnitts werden mit $\Delta t_{s-n}, \Delta t_{s-(n-1)}, \dots, \Delta t_{s+m}$ bezeichnet. Die Körner werden dem Siebrohr mit einer bestimmten

Anfangsgeschwindigkeit zugeführt und sinken gegen die Luftströmung nach unten. Aber die Geschwindigkeit der Körner mit einem Durchmesser kleiner als der der Schwebekörner wird bald zu null, ihre Bewegungsrichtung ändert sich, d.h. sie werden wieder nach oben geblasen. Wir nennen die Zeit, die die nach oben geblasenen Körner brauchen, um wieder die Einführungsöffnung des Siebrohrs zu erreichen, die Aufstiegszeit. $\tau_{s-n}, \tau_{s-(n-1)}, \dots, \tau_{s-1}$ zeigen die Aufstiegszeit für die nach oben geblasenen Körner mit den einzelnen mittleren Durchmessern. Die Körner stoßen während der Aufstiegszeit mit den nach unten sinkenden Körnern mit einem Durchmesser größer als der der Schwebekörner zusammen, deshalb verschlechtert sich die Klassierungsgenauigkeit. Die Häufigkeit der Zusammenstöße steht in einem bestimmten Verhältnis zur Aufstiegszeit. Wenn ein nach oben geblasenes Korn ein nach unten sinkendes Korn auch nur berührt, wird das als Zusammenstoß angesehen. Man kann die Querschnittsfläche S_{ij} des Zusammenstoßbereichs nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$S_{ij} = \frac{\pi}{4} (d_{s+j} + d_{s-i})^2$$

Dabei bedeuten d_{s+j} und d_{s-i} den Durchmesser des nach unten sinkenden bzw. des nach oben geblasenen Kornes. Die Wahrscheinlichkeit p'_{ij} , daß zwischen einem nach oben geblasenen Korn mit d_{s-i} und einem nach unten sinkenden mit d_{s+j} kein Zusammenstoß erfolgt, ist:

$$p'_{ij} = 1 - \frac{S_{ij}}{F} \quad (5)$$

Dabei ist F die Querschnittsfläche des Siebrohrs. Wenn F groß genug ist im Vergleich zu S_{ij} ($F \gg S_{ij}$), kann man aus Gl. (5) annähernd die folgende Gleichung ableiten:

$$p'_{ij} = 1 - \frac{S_{ij}}{F} \doteq \exp \left\{ -\frac{S_{ij}}{F} \right\} \quad (6)$$

$S_{ij}/F < 0,1$ genügt Gl. (6).

Die Aufstiegszeit für ein Korn mit d_{s-i} ist, wie oben erwähnt, τ_{s-i} , und die Anzahl der nach unten sinkenden Körner mit d_{s+j} , denen das nach oben geblasene Korn in dieser Zeit τ_{s-i} begegnet, ist $\tau_{s-i}/\Delta t_{s+j}$. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit p_{ij} , daß ein Korn mit d_{s-i} ohne Zusammenstoß mit einem d_{s+j} -Korn hinaufgeblasen wird, wie folgt:

$$p_{ij} = \left(1 - \frac{S_{ij}}{F} \right)^{\tau_{s-i}/\Delta t_{s+j}} \doteq \exp \left\{ -\frac{S_{ij}}{F} \frac{\tau_{s-i}}{\Delta t_{s+j}} \right\} \quad (7)$$

Bisher wurden die Zusammenstöße in einem System von Körnern mit Durchmessern von d_{s-i} und d_{s+j} diskutiert. Für die nach oben geblasenen Körner besteht jedoch die Wahrscheinlichkeit P_i , daß sie in dieser Zeit mit allen nach unten sinkenden Körnern mit d_{s+1} , d_{s+2} , \dots , d_{s+m} zusammenstoßen. Deshalb kann man das Eintreibverhältnis für die nach oben geblasenen Körner von mittlerem Durchmesser d_{s-i} mit der folgenden Gleichung (8) berechnen:

$$P_i = \prod_{j=1}^m p_{ij} = \prod_{j=1}^m \left(1 - \frac{S_{tj}}{F}\right)^{\tau_{s-i}/\Delta t_{s+j}} \doteq \exp \left\{ -\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{tj}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-i} \right\} \quad (8)$$

und das Verhältnis zwischen der Einsatzmenge W_{s-i}^* der Körner mit mittlerem Durchmesser d_{s-i} in der Zeiteinheit und der Eintreibmenge W_{s-i} der tatsächlich hinaufgeblasenen Körner ist gleich P_i wie folgt:

$$P_i = W_{s-i} / W_{s-i}^*$$

Aus Gl. (8) kann man die folgende Gleichung (9) ableiten:

$$\frac{W_{s-t}}{W_{s-t}^*} = \exp \left\{ -\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{tj}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-i} \right\} \quad (9)$$

Je mehr sich der Durchmesser des nach oben geblasenen Kornes dem eines Schwebekornes nähert, desto größer werden die Werte S_{ij} und τ_{s-i} , weshalb das Eintreibverhältnis dieses Kornes abnimmt. Aus alledem ergibt sich, daß das analytische Ergebnis dem Versuchsergebnis, wie schon oben gezeigt, fast gleich war. Die Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte der Körner und die Zusammenstoßhäufigkeit zwischen den Körnern haben unabhängig von einander Einfluß auf das Eintreibverhältnis. Daher kann man aus Gl. (4) und Gl. (9) folgende Gleichung (10) ableiten.

$$\frac{W_{s-t}}{W_{s-t}^*} = \varphi_{s-(i-1)} \exp \left\{ -\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{vj}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-i} \right\} \quad (10)$$

Im allgemeinen wird die Eintreibmenge der nach oben geblasenen Körner mit den einzelnen mittleren Durchmessern dargestellt wie folgt:

$$\left. \begin{aligned} W_{s-n} &= \varphi_{s-(n-1)} W_{s-n}^* \exp \left\{ -\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{nj}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-n} \right\} \\ W_{s-(n-1)} &= \varphi_{s-(n-2)} W_{s-(n-1)}^* \exp \left\{ -\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{(n-1)j}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-(n-1)} \right\} \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ W_{s-1} &= \varphi_{s-0} W_{s-1}^* \exp \left\{ -\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{1j}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-1} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Bei einem Mischverhältnis, das so klein ist, daß zwischen den Körnern untereinander fast kein Zusammenstoß erfolgt, nähert sich die Eintreibmenge der nach oben geblasenen Körner dem Wert $\Phi[d_{s-i}]$ aus Gl. (4). Andererseits, wenn das Mischverhältnis so groß wird, daß die Zusammenstöße die Klassierungsgenauigkeit beeinflussen, fällt die Eintreibmenge logarithmisch ab.

Wenn die Körner mit solch einem Luftsieb ausgesiebt werden, muß das Siebrohr eine bestimmte Länge l aufweisen. Die Körner mit einem Durchmesser d_{s-i} werden mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_0 in das Siebrohr eingeführt, doch nimmt ihre fallgeschwindigkeit bald ab und wird zu null. Der senkrechte Abstand zwischen den beiden Punkten, dem Einsatzzpunkt und dem Punkt, an dem die Geschwindigkeit des Kornes mit d_{s-i} schließlich zu null wird, wird mit l_{s-i} bezeichnet. In diesem Fall muß der Ungleichung

$$l > l_{s-i}$$

genügt werden.

Wenn der senkrechte Abstand zwischen dem Einsatzzpunkt und dem Punkt, an dem das Korn mit dem Durchmesser \bar{D}_s im Schwebestand verharret, mit l_s bezeichnet wird, muß das Siebrohr im allgemeinen eine Länge aufweisen, daß sie der folgenden Ungleichung genügt:

$$l \geq l_s$$

Das Siebrohr in unserem Versuch hatte eine Länge von 1,6 m, damit war die Ungleichung befriedigt.

4. Erörterung

Wenn die Luftströmungsgeschwindigkeit u_s und die Korngrößenverteilung der ausgesiebten Körner konstant sind, ist der Wert von $\sum_{j=1}^m (S_{ij}/\Delta t_{s+j})$ dem Mischverhältnis M proportional. Der Logarithmus der beiden Seiten von Gleichung (10) führt zu Gleichung (12), wie folgt:

$$\begin{aligned} \log \frac{W_{s-i}}{W_{s-i}^*} &= \log \varphi_{s-(i-1)} - \frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m S_{ij}/\Delta t_{s+j} \right) \tau_{s-i} \\ &= \log \varphi_{s-(i-1)} - k \frac{1}{F} M \tau_{s-i} \end{aligned} \quad (12)$$

wobei k die Proportionalitätskonstante darstellt.

Das rechte erste Glied dieser Gleichung kann man aus der Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte bestimmen, das zweite Glied aus der Zusammenstoßhäufigkeit zwischen den auf- und absteigenden

Körnern. Folglich bedeutet eine Erhöhung des Mischverhältnisses M , daß das Eintreibverhältnis W_{s-i}/W_{s-i}^* logarithmisch abfällt, und man bekommt also dasselbe Ergebnis wie beim obigen Versuch. Der Wert von $\varphi_{s-(i-1)}$ ist, wie oben erwähnt, eine Funktion der Standardabweichung σ_D . Aus den oben angeführten Versuchen seien die Ergebnisse herausgegriffen, die wir bei einer Luftströmungsgeschwindigkeit von 10,5 m/sec für Koks-Körner und 17,8 m/sec für Sinter-Körner bekommen haben. Wenn wir bei dieser Luftströmungsgeschwindigkeit den Wert für σ_D nach Gl. (2) berechnen, bekommen wir für Koks 0,641 und für Sinter 1,090. Die Kurven $f(D_s)$ für Koks und Sinter werden in Bild 14 bzw. 15 gezeigt. Wie man daraus ersieht, übt die Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte der Körner, deren Durchmesser dem Durchmesser \bar{D}_s der Schwebekörner nahe kommt, auf die Klassierungsgenauigkeit einen auffallenden Einfluß aus, sie hat aber auf das Eintreibverhältnis der aufsteigenden Körner, bei Koks von Korngrößen unter 9 mm und bei Sinter unter 4 mm, fast keinen Einfluß. Die in Bild 11(a), (b), (c) und 12(a), (b) gezeigten Versuchsergebnisse lassen dasselbe erkennen.

Nun soll der Einfluß, den die Aufstiegszeit τ_{s-i} der nach oben geblasenen Körner auf das Eintreibverhältnis W_{s-i}/W_{s-i}^* hat, untersucht werden. Das Eintreibverhältnis der aufsteigenden Körner mit einem Durchmesser, der beträchtlich kleiner als der Durchmesser \bar{D}_s der Schwebekörner ist, z.B. das Eintreibverhältnis von Körnern mit einem Durchmesser kleiner als $\bar{D}_s/2$, ist sehr gut, da die Aufstiegszeit τ_{s-i} dieser Körner ziemlich kurz ist und die Zusammenstoßhäufigkeit

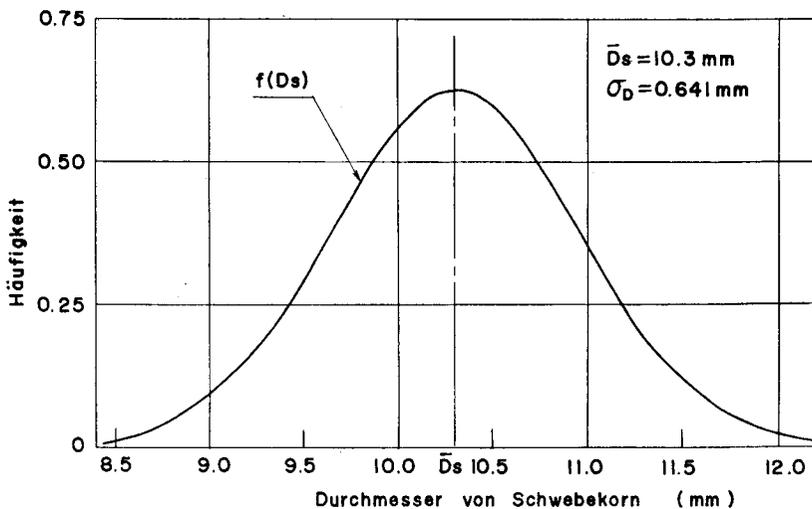


Bild 14. Verteilung der Durchmesser der Schwebekörner bei Koks.
($U_s = 10,5$ m/sec, $\bar{D}_s = 10,3$ mm)

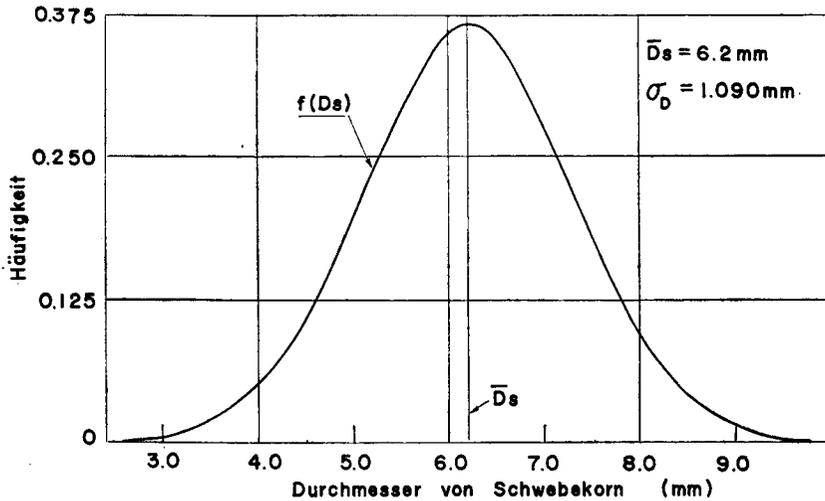


Bild 15. Verteilung der Durchmesser der Schwebekörner bei Sinter.
($U_s=17,8$ m/sec, $\bar{D}_s=6,2$ mm)

mit den absteigenden Körnern gering. Und wenn die Korngrößenverteilung der ausgesiebten Körner und die in das Siebrohr eingeführte Menge in der Zeiteinheit konstant sind, ist das Eintreibverhältnis $W_{s,-i}/W_{i,-i}^*$ desto besser, je größer die Luftströmungsgeschwindigkeit ist. Wie man daraus auch ersieht, ist der Einfluß der Aufstiegszeit $\tau_{s,-i}$ auf das Eintreibverhältnis sehr groß. Aber es ist schwierig $\tau_{s,-i}$ zu messen, da die Bewegung der Körner im Rohr kompliziert ist. Nach unserer obigen Analyse, gehören die eingetriebenen Körner, die tatsächlich im Rohr aufsteigen, zu der Korn-Gruppe, die durch keinen Zusammenstoß mit absteigenden Körnern beeinträchtigt worden ist. Dabei kann man die Bewegung der tatsächlich aufsteigenden und eingetriebenen Körner als Bewegung eines einzelnen Kornes ansehen und die Aufstiegszeit $\tau_{s,-i}$ ziemlich leicht berechnen.⁴⁾ Ein Beispiel eines Berechnungsergebnisses für Koks bei einer Luftströmungsgeschwindigkeit von 9,0 m/sec ist in Bild 16 gegeben. Es zeigt den Zusammenhang zwischen Ort und Zeit für das nach oben geblasene Korn im Siebrohr, wobei auf der Ordinate der Ort, auf der Abszisse die Zeit aufgetragen ist. Folglich muß man die Aufstiegszeit $\tau_{s,-i}$ des Kornes, wie z.B. in besagtem Bild dargestellt, von dem Augenblick ab berechnen, in dem die Bewegungsgeschwindigkeit zu null geworden ist. Hier ist die Berechnung für eine Anfangsgeschwindigkeit v_0 von 0,67 m/sec durchgeführt, wie schon in 2.4 erwähnt. Man nimmt den für die Bewegung des einzelnen Kornes erhaltenen Wert $\tau_{s,-i}$ und berechnet daraus nach Gl. (11) das Eintreibverhältnis des nach oben geblasenen Kornes, und vergleicht bei einem Mischverhältnis $M=1,0$, für Koks nach Tabelle 1 und für Sinter nach Tabelle 2 mit dem experi-

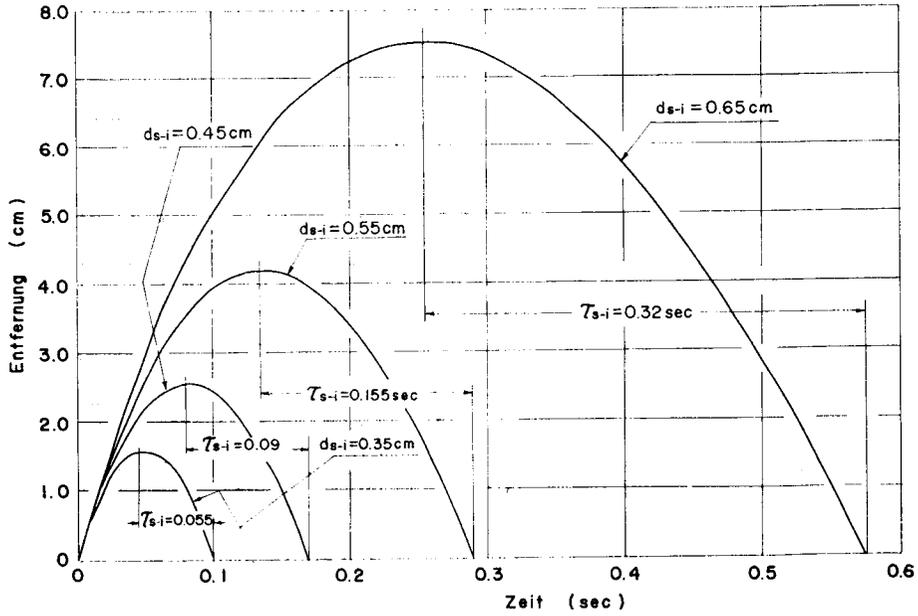


Bild 16. Beziehung zwischen Zeit und zurückgelegter Wegstrecke für Koks im Siebrohr.

Tabelle 1. Vergleich der errechneten Werte für W_{s-i}/W_{s-i}^* der nach oben geblasenen Körner jedes Machenmaßes mit den experimentellen Werten für Koks ($M=1,0$).

u_s m/s	\bar{D}_s mm	$D_{s-i} \sim D_{s-(i-1)}$ mm	τ_{s-i} sec	$\frac{1}{F} \sum S_{ij}$	$\frac{1}{F} \left(\sum \frac{S_{ij}}{dt_{s+j}} \right) \tau_{s-i}$	errechneten W_{s-i}/W_{s-i}^* %	experimen- tellen W_{s-i}/W_{s-i}^* %
8.5	6.7	3~4	0.065	1.87	0.109	90.2	90
		4~5	0.120	2.14	0.257	77.3	76
		5~6	0.245	2.41	0.590	52.6	27
9.0	7.6	3~4	0.055	1.63	0.090	91.5	92
		4~5	0.090	1.86	0.168	84.5	84
		5~6	0.155	2.11	0.327	72.2	60
		6~7	0.320	2.36	0.755	42.2	30
10.5	10.3	3~4	0.030	1.30	0.039	96.4	96
		4~5	0.050	1.46	0.073	93.0	93
		5~6	0.070	1.64	0.115	89.1	88
		6~7	0.105	1.81	0.190	82.6	81
		7~9	0.200	2.10	0.420	64.4	65
		9~10	0.370	2.42	0.895	27.7	27

Tabelle 2. Vergleich der errechneten mit den experimentellen Werten für Sinter ($M=1,0$).

u_s m/s	\bar{D}_s mm	$D_{s-i} \sim D_{s-(i-1)}$ mm	τ_{s-i} sec	$\frac{1}{F} \sum \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}}$	$\frac{1}{F} \left(\sum \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-i}$	errechneten W_{s-i}/W_{s-i}^* %	experimentellen W_{s-i}/W_{s-i}^* %
16.4	5.3	2~3	0.060	1.14	0.068	93.4	93
		3~4	0.125	1.37	0.172	77.6	78
		4~5	0.365	1.62	0.591	34.7	35
17.8	6.2	2~3	0.045	0.97	0.044	95.8	96
		3~4	0.095	1.16	0.110	87.6	85
		4~5	0.170	1.35	0.230	68.2	56
		5~6	0.480	1.57	0.753	27.1	23

mentellen Werten. Wie daraus ersichtlich ist, stimmen die errechneten und experimentellen Werte verhältnismäßig gut überein. Aber das Eintreibverhältnis einer Gruppe von aufsteigenden Körnern mit einem Durchmesser, der dem der Schwebekörner nahe kommt, liegt im allgemeinen unter dem errechneten Wert, es wird vermutet, daß die tatsächliche Aufstiegszeit dieser Körnergruppen länger ist, als der für die Korneinheit berechnete Wert.

5. Zusammenfassung

Bei der Luftsiebung einer gleichen Art von Körnern haben die Streuung der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte und die Zusammenstöße zwischen den auf- und absteigenden Körnern, Einfluß auf die Klassierungsgenauigkeit. Um den Grad des Einflusses festzustellen, sind Versuche mit Koks und Sinter als Versuchsmaterial durchgeführt worden, und zugleich erfolgte eine analytische Untersuchung.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Eine Klassierung von Körnern nach ihrer Korngröße mittels eines pneumatischen Siebes ist wegen der unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeiten möglich, auch wenn die scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte in gewissem Grad eine Struung aufweisen.
2. Die Streuungen der scheinbaren spezifischen Gewichte und der Luftwiderstandsbeiwerte beeinflussen die Klassierungsgenauigkeit besonders der Körner, deren Durchmesser dem Durchmesser \bar{D}_s der Schwebekörner nahe kommt, und sie haben bei Körnern mit einem Durchmesser kleiner als $\bar{D}_s/2$ fast keinen Einfluß auf die Klassierungsgenauigkeit.
3. Wenn die Korngrößenverteilung der ins Rohr eingeführten Körner konstant ist, nimmt mit einer Zunahme der behandelten Kornmenge der Luftmenge gegenüber das Eintreibverhältnis für jedes Maschenmaß logarithmisch ab. Der

Grad der Abnahme kann durch die Querschnittsfläche F und $\sum_{j=1}^m (S_{ij}/4t_{s+j}) \tau_{s-i}$ bestimmt werden.

4. Unser Versuchsergebnis hat gezeigt, daß das Eintreibverhältnis von Körnern mit einem Durchmesser kleiner als $D_s/2$ sehr gut ist.
5. Zwischen der Menge der nach oben geblasenen Körner mit einem Durchmesser kleiner als D_s , und dem Eintreibverhältnis besteht fast kein Zusammenhang.
6. Bei einer Berechnung des Eintreibverhältnisses W_{s-i}/W_{s-i}^* aus Gl. (11) kann man bei Körnern mit verhältnismäßig kleinem Durchmesser die Aufstiegszeit τ_{s-i} berechnen, als handelte es sich um die Bewegung eines einzelnen Kornes, aber bei größer werdendem Durchmesser, wenn dieser sich dem Durchmesser D_s nähert, muß man auch die Zusammenstöße zwischen den Körnern berücksichtigen.

Schrifttum

- 1) E. Mikumo and J. Kokado: THIS MEMOIRS, **19**, 53 (1953)
- 2) Y. Kondo and W. Funasaka: Gijutsusha no tameno Tokeiteki Hoho (Statistic Method for Engineer) Kyoritsu-Shuppan, 41~42 (1967)
- 3) J. Kokado, N. Hatta, K. Nakayasu and T. Hirai: Suiyokwai-Shi **16**, 546~549 (1968)
- 4) J. Kokado, N. Hatta, K. Nakayasu and T. Hirai: Suiyokwai-Shi **16**, 546~549 (1968)