

DK 621.867.8:631.362:664.8.047

## Die Fließbettechnik bei der Aufbereitung landwirtschaftlicher Produkte

Von **Christian von Zabeltitz**, Braunschweig-Völkenrode

Die Fließbettechnik wird in vielen Gebieten der Aufbereitungstechnik mit gutem Erfolg eingesetzt und ist auch für die Aufbereitung landwirtschaftlicher Produkte vielseitig anwendbar. Für die Landtechnik wichtige Verfahren, wie Sortieren, Mischen, Beizen, Fördern, Trocknen, Kühlen und Rösten lassen sich mit Hilfe des Fließbettes durchführen, wobei das Fließbettverfahren oft Vorteile aufweist. In einer systematischen Zusammenstellung werden die Möglichkeiten im Bereich der Landtechnik einzusetzen. Einige Verfahren, wie z. B. das Beizen, sind bisher noch nicht zur Anwendung gekommen, lassen sich aber aufgrund der Erfahrungen aus anderen Gebieten der Aufbereitungstechnik übertragen.

Ein Fließbett, auch Wirbelschicht oder nach neuesten Vorschlägen Fluidatbett genannt [1], entsteht bei der Durchströmung eines gekörnten Haufwerkes mit Hilfe eines Mediums, welches sowohl flüssig als auch gasförmig sein kann. Dabei ist die Strömung stets entgegengesetzt zur Schwerkraft gerichtet. Beim Überschreiten einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit, der sogenannten Lockerungsgeschwindigkeit, geht die Ruheschicht, bei der der Druckverlust mit der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums bis dahin gestiegen ist, in den Fließbettzustand über, bei dem der Druckverlust bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit nahezu konstant bleibt und das spezifische Hohlraumvolumen sich vergrößert. **Bild 1** zeigt den charakteristischen Druckverlauf in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit bei der Durchströmung einer Schüttung aus Glaskugeln. Einem Fließbett lassen sich flüssigkeitsähnliche Eigenschaften zuordnen, d. h., die Oberfläche bleibt im Schwerfeld der Erde horizontal, und innerhalb des Fließbettes wirkt auf einen eingetauchten Körper eine Auftriebskraft.

Die erste großtechnische Anwendung des Fließbettes erfolgte durch *Winkler* [2], der das Fließbett in seinen Patenten für die Herstellung von Synthesegas beschreibt. In den vergangenen Jahren hat die Erforschung und Entwicklung der Fließbettechnik einen großen Umfang angenommen, und es sind zahlreiche verfahrenstechnische Anwendungsmöglichkeiten bekannt geworden, von denen einige auch bei der Aufbereitung landwirtschaftlicher Produkte von Interesse sind. Im folgenden sollen nun die für die Landtechnik in Frage kommenden Anwendungsgebiete der Fließbettechnik systematisch zusammengestellt und beschrieben werden.

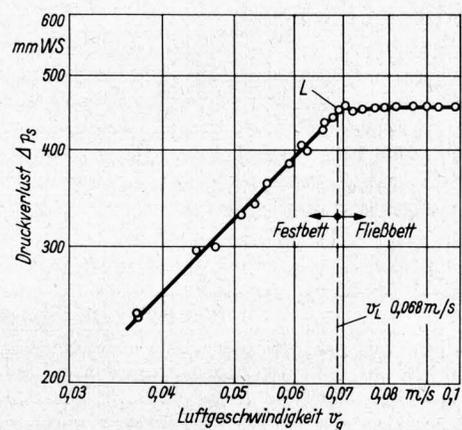
Die theoretischen Grundlagen der Fließbettechnik sind in zahlreichen zusammenfassenden Aufsätzen und Büchern veröffentlicht [3 bis 9], so daß hier auf eine theoretische Erörterung

*Dr.-Ing. Christian von Zabeltitz VDI ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.*

der Zusammenhänge verzichtet werden kann, soweit sie nicht zum unmittelbaren Verständnis der Einzelvorgänge notwendig ist.

Die technische Anwendung des Fließbettverfahrens läßt sich in zwei Hauptgruppen aufteilen [10]:

1. Verfahren mit physikalischen Wechselwirkungen und
2. Verfahren mit chemischen Reaktionen.



**Bild 1.** Charakteristischer Druckverlauf in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit beim Übergang zwischen Festbett und Fließbett.

Glaskugeln ( $d_t = 0,291$  mm;  $\rho_t = 2500$  kg/m<sup>3</sup>)  
L Lockerungspunkt  
 $v_L$  Lockerungsgeschwindigkeit

Für die Aufbereitung landwirtschaftlicher Produkte sind vor allem die Verfahren mit vorwiegend physikalischen Wechselwirkungen von Interesse, die in **Tafel 1** systematisch aufgliedert sind. Danach kann man zwischen Verfahren mit mechanischen Wechselwirkungen, Verfahren, bei denen der Wärmeübergang eine Rolle spielt, und Verfahren, bei denen der Wärme- und der Stoffaustausch entscheidend ist, unterscheiden. Zur ersten Gruppe gehören das Sortieren, Entgrannen, Mischen und Beizen sowie das Fördern und die Bunkerentleerung. Zur zweiten

**Tafel 1.** Systematik der Fließbetтанwendung bei der Aufbereitung landwirtschaftlicher Produkte. Zwischen den Gruppen sind Überlagerungen möglich.

Verfahren mit mechanischer Wirkung	Verfahren mit Wärmeübertragung	Verfahren mit Wärme- und Stoffübergang
Sortieren Entgrannen Mischen Beizen Fördern Bunkerentleerung	Erwärmen Kühlen	Trocknen Rösten Kühlen

Gruppe zählt das Erwärmen und Abkühlen, z. B. von Röstkaffee und Milchpulver. Zur dritten Gruppe gehört das Trocknen, Rösten und auch das Kühlen. Eine weitere Anwendung der Fließbetttechnik ist das Granulieren, z. B. von Düngemitteln, wobei sowohl mechanische als auch Wärme- und Stoffaustauschvorgänge wirksam sind. Bei verschiedenen Verfahren sind Überlagerungen zwischen den einzelnen Gruppen möglich. Beispielsweise spielen beim Rösten auch chemische Reaktionen eine Rolle.

### Sortiervorgänge im Fließbett

Unter Sortieren versteht man das Auftrennen körniger Stoffe nach physikalischen Merkmalen, wie z. B. Größe, Dichte, Masse [11]. Beim Fließbettsortierverfahren hat man es mit einem Sortieren nach Größe und Dichte zu tun. Dabei sind nach **Tafel 2** zwei Sortierverfahren zu unterscheiden:

1. In einem Fließbett tritt eine Sortierwirkung des fließbettbildenden Feststoffes ein, wenn dieser Feststoff Fraktionen verschiedener Korngröße oder Dichte enthält, **Bild 2**. Und zwar erfolgt eine Sortierung nach der Korngröße  $d_t$  bei konstanter Dichte des Feststoffes ( $\rho_t = \text{const}$ ) und eine Sortierung nach der Dichte bei konstanter Korngröße. Dabei sind Überlagerungen beider Vorgänge möglich. Die Sortierung nach der Dichte oder nach der Größe ist besonders in solchen Fließbetten ausgeprägt, bei denen keine oder nur geringe Blasenbildung auftritt. Dies ist der Fall bei Luftgeschwindigkeiten knapp oberhalb des Lockerungspunktes. Starke Blasenbildung, die in Gas-Feststoff-Fließbetten bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten auftritt, hat im Gegensatz zur Entmischung oder Sortierung eine Mischung des Fließbettfeststoffes zur Folge, die im Abschnitt über Mischvorgänge beschrieben wird.

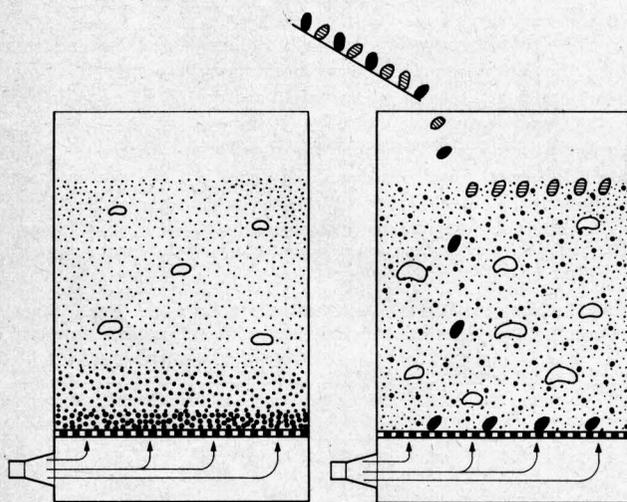
2. Die flüssigkeitsähnlichen Eigenschaften des Fließbettes lassen sich dazu benutzen, Körper, deren Durchmesser  $d_K$  um ein Vielfaches größer sind als die Korngröße  $d_t$  des fließbettbildenden Feststoffes, nach der Dichte zu trennen. Bei diesem Sortierprinzip, das in **Bild 3** schematisch dargestellt ist, wird also nicht der fließbettbildende Feststoff selbst sortiert, sondern das Fließbett dient als Trennmedium für die Sortierung von Körpern ver-

schiedener Dichte, die als Trennkörper von außen in das Fließbett eingebracht werden. Diejenigen Körper, deren Dichte größer ist als die mittlere Dichte des Fließbettes, sinken zu Boden und die spezifisch leichteren Körper schwimmen an der Oberfläche. Der Trennschnitt für diese Dichtesortierung wird bestimmt durch die Korngröße  $d_t$  und die Dichte  $\rho_t$  des fließbettbildenden Feststoffes sowie durch die Strömungsgeschwindigkeit des fluidisierenden Mediums [12]. Dieses Sortierverfahren ist vergleichbar mit der Schwimmaufbereitung, bei der z. B. in einer Suspension aus pulverförmigen Feststoffen und Flüssigkeit grobkörnige Schüttgüter verschiedener Dichte getrennt werden. Bei Verwendung von Luft als Strömungsmedium handelt es sich bei dieser Fließbettrennung um ein trockenes Sortierverfahren (trockene Schwimmaufbereitung), welches den Vorteil hat, daß kein Entfeuchtungs- oder Trocknungsprozeß nachgeschaltet werden muß. Eine Sortierung nach der Größe oder nach der Form ist wegen des nur geringen Einflusses dieser Merkmale auf den Trennvorgang nicht möglich [12].

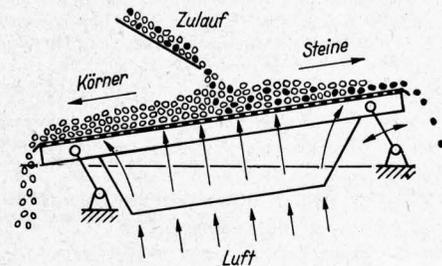
Für beide Sortierverfahren, auch in überlagerter Form, sind Apparaturen für verschiedene Anwendungsmöglichkeiten entwickelt worden. **Bild 4** und **5** zeigen zwei Geräte für die Getreidereinigung, die nach dem Prinzip des ersten Sortierverfahrens in Verbindung mit mechanischen Schwingungen arbeiten. Auf dem

**Tafel 2.** Sortierverfahren mit Hilfe des Fließbettes.

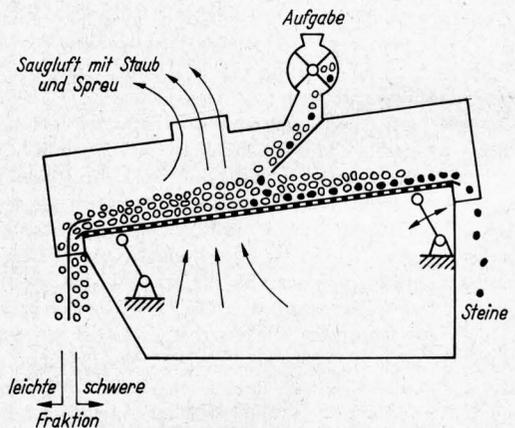
Sortierverfahren		Sortiermerkmal	Bedingung
1	Sortieren des fließbettbildenden Feststoffes (Bild 2)	Korngröße $d_t$	$\rho_t = \text{const}$
		Dichte $\rho_t$	$d_t = \text{const}$
2	Sortieren grobkörniger Feststoffe mit Hilfe des Fließbettes: trockene Schwimmaufbereitung (Bild 3)	Dichte $\rho_K$	$d_K \gg d_t$



**Bild 2 und 3.** Schematische Darstellung der Sortierung des fließbettbildenden Feststoffes (links) und der trockenen Schwimmaufbereitung im Fließbett (rechts).



**Bild 4.** Schema eines Steinauslesers für Getreide (System Forsberg).



**Bild 5.** Steinausleser für Getreide als Saugmodell.

Steinausleser, Bild 4, werden Steine und andere spezifisch schwerere Körper aus dem Getreide aussortiert [13; 14]. Vor allem gilt das für solche Körper, die im Trieb bei der Sortierung nach der Form nicht erfaßt werden. Der Steinausleser besteht aus einer in Längsrichtung geneigten Siebebene, welche in der dargestellten Weise in Schwingungen versetzt wird. Auf dem geneigten Siebboden wird eine 40 bis 60 mm starke Getreideschicht durch einen Luftstrom fluidisiert. Infolge der Fluidisierung fließt die kontinuierlich zulaufende Getreideschicht in Richtung

### Verwendete Formelzeichen

$d_t$	mm	Korngröße des fließbettbildenden Feststoffes
$d_K$	mm	Durchmesser der zu trennenden Körper
$\Delta p_s$	mm WS	Druckverlust des Fließbettes
$\Delta p_A$	mm WS	Druckverlust des Anströmbodens
$v_g$	m/s	Luftgeschwindigkeit
$v_L$	m/s	Lockerungsgeschwindigkeit (L Lockerungspunkt)
$\alpha$	kcal/m <sup>2</sup> h <sup>2</sup> °C	Wärmeübergangszahl
$\rho_t$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des fließbettbildenden Feststoffes
$\rho_K$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der zu trennenden Körper
$\rho_{st}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Steinen
$\rho_{K1}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Erdkluten

der Siebneigung über eine Ablaufkante ab. Die spezifisch schwereren Steine sinken im Getreidefließbett zu Boden und werden durch die Vibration auf dem rauhen Siebboden entgegen der Neigung nach oben gefördert. Die Siebneigung und Luftgeschwindigkeit sind stufenlos einstellbar.

Befindet sich die Sortiervorrichtung in einem geschlossenen Gehäuse, Bild 5, so läßt sich die Schüttgutschicht auch mit Saugluft von oben fluidisieren. Das hat den Vorteil, daß sich sehr leichte Bestandteile, wie Staub, Spelzen und Blatteile, deren Schwebegeschwindigkeit sehr viel kleiner ist als die des zu sortierenden Schüttgutes, mit dem Luftstrom entfernen lassen. Außerdem kann am Auslauf noch ein Trennblech so angebracht werden, daß das auslaufende Gut in zwei Gewichtsfractionen sortiert wird.

Der Sortiertisch oder Gewichtsausleser [13; 14], Bild 6, hat die Aufgabe, Korngemische, die nur geringe Größenunterschiede aufweisen, nach der Dichte zu trennen. Die Arbeitsweise ist ähnlich wie beim Steinausleser. Auf einer schwingenden Siebfläche wird die an einer Ecke aufgegebene Kornschicht durch einen regelbaren Luftstrom fluidisiert. Die Siebfläche ist in zwei Ebenen so geneigt, daß vom Einlauf in Querrichtung zum Auslauf 1 eine Steigung besteht, während in Längsrichtung zum Auslauf 6 ein Gefälle herrscht. Die Schwingbewegung erfolgt in Querrichtung, so daß die spezifisch schwereren Teilchen nach oben wandern. Die oben schwimmenden leichten Teilchen fließen in Richtung des Gefälles ab. Der Auslauf 1 ist der Schwergutauslauf. Von hier bis zum Leichtgutauslauf 6 ist ein kontinuierlicher Übergang vorhanden. Die Luftgeschwindigkeit ist entsprechend der verschiedenen Fluidisierungsgeschwindigkeit verschiedener Korngrößen verstellbar. Der Sortiertisch wird bisher vor allem für die Getreidereinigung eingesetzt, wobei Mutterkorn, Spelzen, kleine Strohteile und tierische Verunreinigungen am Leichtgutauslauf abgehen. Weiterhin werden Bruchkorn und verschiedene Sorten einzeln absortiert. Weitere Anwendungsgebiete des Sortiertisches sind beispielsweise die Aussortierung von Unkrautsamen aus Getreide, das Trennen von Gerste und Weizen, von geschältem und ungeschältem Hafer und Reis und ferner die Sortierung von Feinsämereien, wie Gemüse- und Gras-

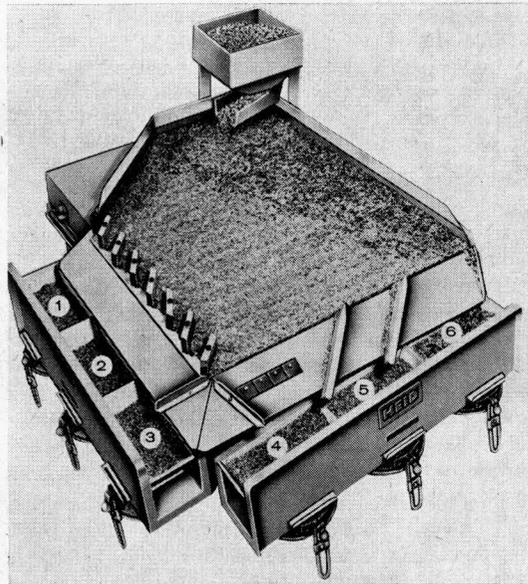


Bild 6. Sortiertisch oder Gewichtsausleser (System Heid).

- 1 Schwergutauslauf
- 6 Leichtgutauslauf

samen, wofür spezielle Geräte in kleinerer Ausführung entwickelt worden sind. Da auch Zuckerrübensamen und Hülsenfrüchte (reif und unreif) Unterschiede in der Dichte aufweisen, kann die Fließbettsortierung bei entsprechender Auslegung der Maschine auch hier ein weites Anwendungsgebiet finden. Vor allem bestehen bei der Siebsortierung von Zuckerrübensaatgut noch große Schwierigkeiten, da die Samenkörner während des Siebvorganges einem starken Abrieb unterliegen sind und sich dadurch die Korngröße ändert [15]. In diesem Fall wäre eine schonende Sortierung durch das Fließbett von großem Vorteil.

Eigene Versuche mit einem Getreidefließbett unter der Einwirkung mechanischer Schwingungen haben ergeben, daß eine Trennung des Getreides von Spreu, Ähren und Kurzstrohanteilen möglich ist, wenn die Betthöhe nicht größer als etwa 100 mm ist. Durch den Einfluß der mechanischen Schwingungen werden die Fließbetthomogenitäten, d. h. die Blasenbildung verringert und dadurch der Trenneffekt unterstützt und verbessert.

Eine weitere Möglichkeit, die Fließbettsortierung in mehreren Fraktionen durchzuführen, zeigt Bild 7. Diese zweistufige Sortieranlage wird mit gutem Erfolg in vielen Zweigen der Aufbereitungstechnik eingesetzt [16]. Das Schüttgut wird zentral auf

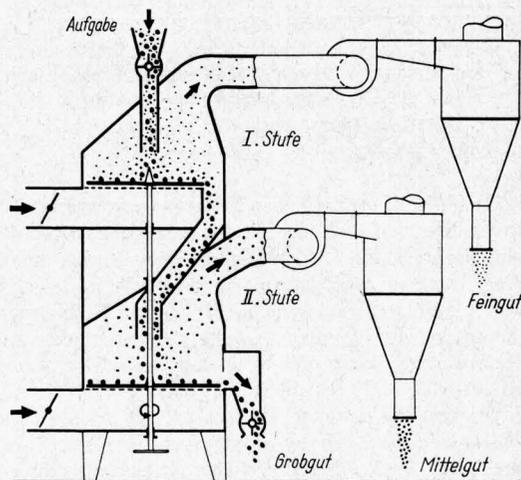


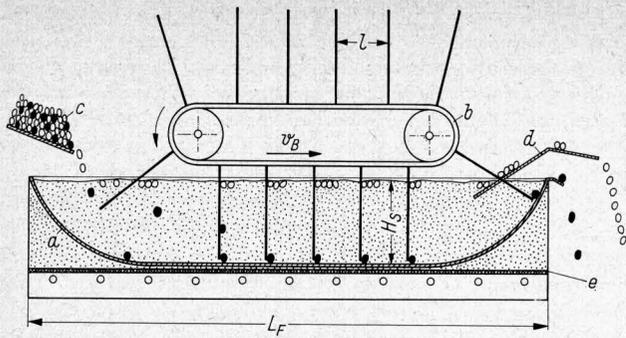
Bild 7. Zweistufiger Fließbettsortierer mit Rührwerk für schwer rieselfähige Güter (System Keller).

den porösen Anströmboden aufgegeben und dann durch einen Luftstrom von unten fluidisiert. Der Luftstrom trägt das Feingut pneumatisch aus, während das fluidisierte Grobgut durch einen Kanal in die nächste Stufe abfließt. Durch den Einbau eines Rührwerkes läßt sich das Sortierverfahren auch auf schwer rieselfähige Schüttgüter, wie z. B. Holzspäne, anwenden. Das zu sortierende Gut wird bei minimalem Abrieb sehr schonend behandelt, so daß dieses Verfahren in der landtechnischen Aufbereitung für die Sortierung von empfindlichen Saatgütern eingesetzt werden kann.

Als Anwendung der Sortierung nach dem Prinzip der trockenen Schwimmaufbereitung, Bild 3, bietet sich die Trennung von Kartoffeln, Steinen und Kluten bei der Kartoffelernte an. Eine großtechnische Anwendung fand die Fließbettsortierung schon 1950 in England beim Chanceverfahren [17] für die Sortierung von Kohlen und Steinen in einem konischen Sand-Luft-Fließbett. Für die Trennung von Steinen und Kartoffeln führte Zimovov [18] Laborversuche durch und Batel [11] weist darauf hin, daß der Trennschnitt durch Veränderung der Fließbettdichte variiert werden kann. In einer zusammenfassenden Arbeit [12] werden die physikalischen Zusammenhänge und Abhängigkeiten für die Sortierung von Körpern verschiedener Dichte in einem Fließbett behandelt. Für die Trennung von Kartoffeln, deren Dichte im Mittel  $\rho_K = 1100 \text{ kg/m}^3$  beträgt, von Steinen ( $\rho_{St} = 2600 \text{ kg/m}^3$ ) und Erdkluten ( $\rho_{Kl} = 1700 \text{ bis } 2000 \text{ kg/m}^3$ ) kann ein Sandfließbett verwendet werden, dessen mittlere Dichte im aufgewirbelten Zustand bei  $1400 \text{ kg/m}^3$  liegt, wenn der Sand eine Feststoffdichte von  $2600 \text{ kg/m}^3$  und eine mittlere Korngröße von  $0,4 \text{ bis } 0,5 \text{ mm}$  hat. Inwieweit bei der Ernte auf trockenem Sandboden dieser selbst für den Betrieb des Fließbettes verwendet werden kann und inwieweit die Einflüsse der Feuchtigkeit eine Rolle spielen, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Bild 8 zeigt eine der möglichen Ausführungsformen für eine kontinuierliche Trennanlage [12]. Die Aufgabe der Trennkörper erfolgt auf der einen Längsseite. Die spezifisch schwereren Körper sinken zu Boden und werden genau wie die an der Oberfläche schwimmenden leichten Körper durch das Zinkenband mitgenommen. Beide Fraktionen werden am Ende des Fließbettes dann getrennt ausgetragen.

Eine weitere, noch zu untersuchende Verwendung des Fließbettes in Verbindung mit einer Rührwelle ist der Entgrannungs-



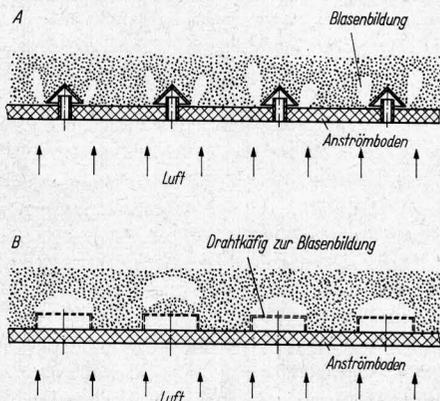
**Bild 8.** Schema einer kontinuierlichen Fließbettsortieranlage für die Trennung von Körpern verschiedener Dichte nach dem Prinzip der trockenen Schwimmaufbereitung.

- |                              |                |
|------------------------------|----------------|
| a siebförmiges Führungsblech | d Trennblech   |
| b Zinkenband                 | e Anströmboden |
| c Aufgabe                    |                |

vorgang. In einem herkömmlichen Entgranner werden die Grannen durch Schlag und Reibung von den Körnern gelöst und dann abgeseibt. Dabei sind Verluste durch Körnerbruch kaum zu vermeiden. In einem muldenförmigen Fließbett, in das an einer horizontalen Rührwelle angebrachte Rühr- und Reibkörper eintauchen, werden die Grannen bei entsprechender rauher Ausbildung der Wandung durch die Rühr- und Reibwirkung von den Körnern getrennt und zerkleinert. Bei einer geschlossenen Einrichtung werden die Grannen gleichzeitig mit der Abluft nach dem Prinzip der Entstaubung ausgetragen. Der Durchlauf des Getreides kann kontinuierlich erfolgen, wenn am Ende eine Austragsvorrichtung auf der Welle angebracht wird. Durch die Fluidisierung und das Rühren erhält man eine intensive Durchmischung des Getreides, so daß jedes Korn schnell an die Wandung und damit in den Bereich der Reibwirkung gelangt. Die erforderliche Rührerleistung nimmt in einem Fließbett mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit sehr stark ab [19] und ist sehr viel geringer, als in einem nichtfluidisierten Feststoff. Der Druckverlust nimmt in einem gerührten Fließbett ebenfalls ab, wodurch die Gesamtleistung für den Betrieb des Fließbettes sinkt.

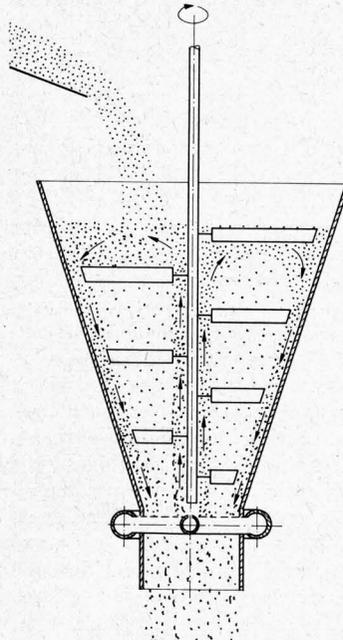
### Mischvorgänge in Fließbetten

Beim Sortieren des fluidisierten gekörnten Feststoffes liegt ein Vorgang des Entmischens vor. Unter besonderen Umständen ist es möglich, das Gegenteil, nämlich einen Mischvorgang im Fließbett hervorzurufen. Mischanlagen werden benötigt in der Futtermitteltechnik, beim Mischen von Sämereien und unter Zugabe von Staub oder Flüssigkeiten beim Beizen von Getreide. Für den Sortiervorgang wird ein homogenes Fließbett mit möglichst geringer Blasenbildung verlangt. Beim Mischvorgang dagegen wird ein inhomogenes Fließbett gewünscht. Nach Rowe und Sutherland [20] gilt qualitativ der Satz: Feststoffmischungen in Gas-Feststoff-Fließbetten werden in erster Linie durch Blasenbildungen hervorgerufen. Die Zahl und Größe der Blasen und damit der Mischeffekt steigt mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und Korngröße an [3]. Außerdem kann die Blasenbildung durch die Ausbildung des Anströmbodens stark beeinflusst

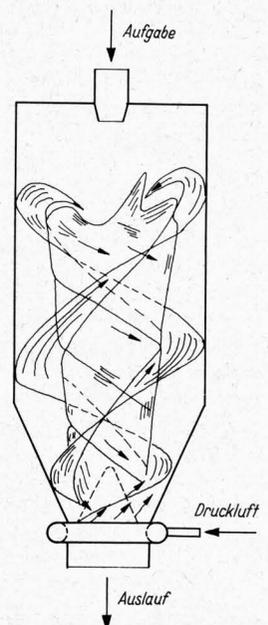


**Bild 9.** Beispiele für blasenbildende Einbauten am Fließbettboden.

werden. Hiby [21] hat nachgewiesen, daß die Blasenbildung mit steigendem Druckverlust des Anströmbodens geringer wird. Oberhalb eines kritischen Druckverlustes, der in der Nähe des Lockerungspunktes bei  $\Delta p_s / \Delta p_A = 0,3$  liegt, hat die Blasenbildung ein Minimum. Dabei ist  $\Delta p_s$  der Druckverlust des Fließbettes und  $\Delta p_A$  der Druckverlust des Anströmbodens. Der Druckverlust von Anströmböden für Mischanlagen muß also unterhalb des kritischen Druckverlustes liegen. Die Inhomogenität läßt sich außerdem durch blasenbildende Einbauten im Anströmboden verstärken, wie sie schematisch in **Bild 9** gezeigt sind. Entweder werden im Anströmboden Öffnungen gelassen, die dachförmig abgedeckt werden (A), oder auf dem Anströmboden werden feststofffreie Hohlräume beispielsweise aus Siebgewebe aufgesetzt, die als Keimzellen für die Blasenbildung zu betrachten sind (B).



**Bild 10.** Mischvorgang im konischen Fließbett nach Leva [19].



**Bild 11.** Mischung im Fließbett mit diskontinuierlichen Luftstößen (System Grün).

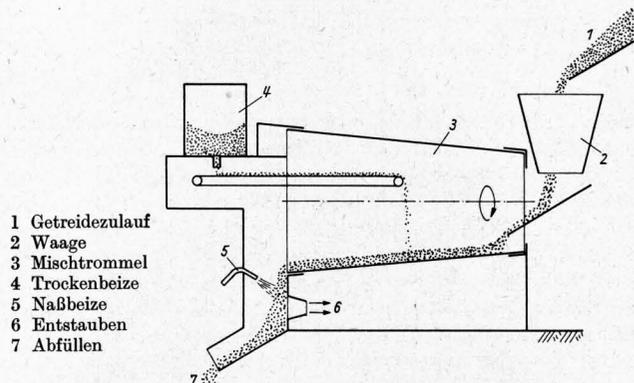
Der Feststoffumlauf im Fließbett und somit der Mischeffekt kann durch Rühren sehr verbessert werden [19], wobei der Anstellwinkel der Rührerblätter eine wichtige Rolle spielt. Bei Verwendung eines konischen Fließbettes kann ein kontinuierlicher Mischvorgang durchgeführt werden, wie dies in **Bild 10** schematisch gezeigt ist. Durch die Rührerwirkung erfolgt in der eingezeichneten Weise eine zusätzliche Umlaufbewegung des Feststoffes, wodurch die Verweilzeit des Schüttgutes im Fließbett und dadurch die Mischwirkung verbessert wird. Das Fließbett wird erzeugt durch die aus dem Rohrkreuz austretende Luft. Ein Teil des Feststoffes fließt frei nach unten aus dem konischen Behälter ab und wird oben am Einlauf durch Frischgut ersetzt.

In neuerer Zeit ist ein diskontinuierlich arbeitendes Mischverfahren entwickelt, welches bei geringer Verweilzeit des Mischgutes im Mischraum eine sehr hohe Mischgüte liefert [22]. In **Bild 11** wird versucht, den Mischvorgang schematisch darzustellen. In den Mischbehälter wird durch ringförmige Düsen Luft in kurzen Stößen von etwa 1 s Dauer mit hoher Geschwindigkeit eingeblasen. Dadurch wird das körnige Mischgut stark fluidisiert und an der Außenwand des Behälters wendelförmig nach oben gefördert. Im Zentrum sinkt das Gut wieder zu Boden. Mit diesem Verfahren wird auch bei großen Dichteunterschieden der Mischgüter eine gute Mischgüte erreicht.

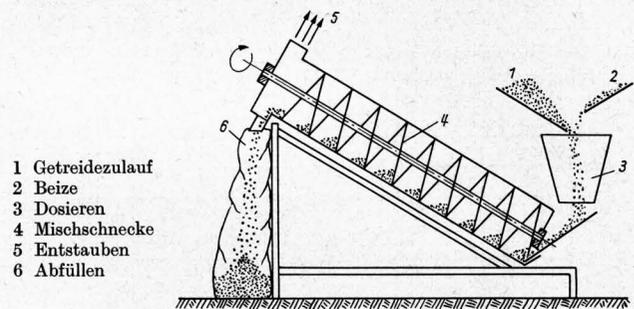
In einem weiteren Fließbettmischverfahren wird der Mischvorgang dadurch hervorgerufen, daß das Fließbett in verschiedenen Abschnitten durch den Anströmboden verschieden stark fluidisiert wird [23]. Ein kleiner am Silorand gelegener Teil der Bodenfläche wird stark belüftet, während durch den Rest des Bodens nur so viel Luft geblasen wird, daß der darüber liegende

Teil des Schüttgutes im Bereich des Lockerungspunktes fluidisiert wird. Durch die unterschiedliche Fluidisierung bildet sich eine Umlaufbewegung des Gutes und eine Scherströmung aus und bewirkt eine gute Durchmischung.

Das Beizen von Getreidesaatgut dient zur Abtötung von pilzförmigen Schädlingen vor dem Drillen. Man unterscheidet in der heutigen Beiztechnik vor allem die Trocken- und Naßbeize. Bei der Trockenbeize müssen pulverförmige Giftstoffe dem Getreide in richtiger Dosierung von 2 bis 3 g je kg Getreide beigegeben und in einem gründlichen Durchmischungsprozeß möglichst gleichmäßig auf die Körneroberfläche verteilt und in diese eingerieben werden. Bei der Naßbeize erfolgt dasselbe mit Flüssigkeit, wobei die Zugabemenge der Beizlösung 30 cm<sup>3</sup> je kg Getreide beträgt. Die Schwierigkeit besteht bei beiden Verfahren in der gleichmäßigen Verteilung der Zusatzstoffe. Bisher wird der Beizvorgang in Mischtrommeln oder Mischschnecken durchgeführt, wobei das Getreide auf einer Durchlaufwaage gewogen und das Beizmittel kontinuierlich durch eine Dosiervorrichtung beigegeben wird, **Bild 12 und 13**.



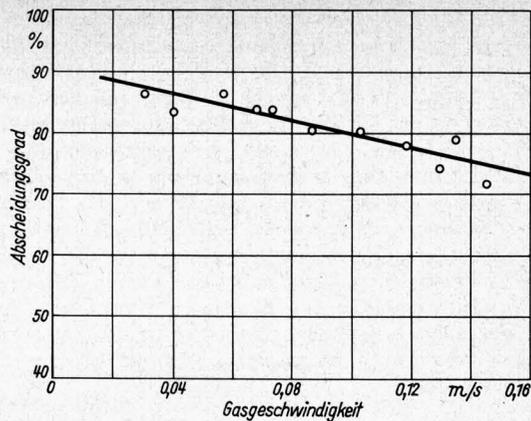
**Bild 12.** Beizanlage für Getreidesaatgut mit Mischtrommel.



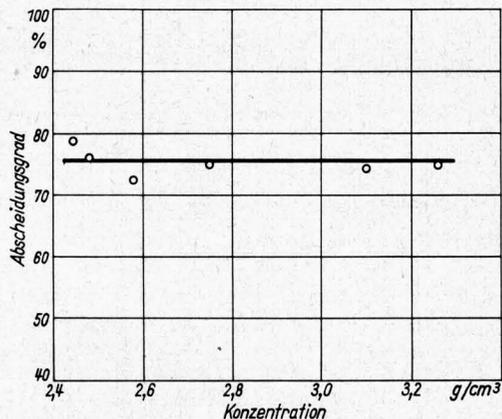
**Bild 13.** Beizanlage für Getreidesaatgut mit Mischschnecke.

Es gibt Verfahren, bei denen in einem Fließbett Stäube oder Flüssigkeitsnebel aus Gasen abgeschieden werden, d. h. in Verbindung mit einem Mischprozeß (inhomogenes Fließbett) läßt sich das Beizverfahren in einfacher Weise auch im Fließbett durchführen. Das Beizmittel wird in Pulver- oder Nebelform dem fluidisierenden Luftstrom beigegeben und im Fließbett mit dem aufgewirbelten Getreide in Verbindung gebracht. Als Anströmboden muß dabei ein Sieb verwendet werden, welches das Durchfallen des Getreides nach unten verhindert, aber keine vorzeitige Abscheidung des Staubes oder des Nebels bewirkt. Nach Scott [24] ist der Abscheidungsgrad von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig, **Bild 14**, aber unabhängig von der Konzentration bei Eintritt in das Fließbett, **Bild 15**. Die fallende Tendenz der prozentualen Abscheidung mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit steht zwar der entsprechenden Tendenz des Mischeffektes entgegen. Dieser kann aber durch ein Rührwerk verbessert werden. Die Konstanz des Abscheidungsgrades bei verschiedener Konzentration ist für eine Vorherbestimmung der erforderlichen Beizmittel und für eine genaue Dosierung sehr günstig. Die zur Fluidisierung notwendige Luftmenge kann auch im geschlossenen Kreislauf geführt werden. Damit wird verhindert, daß Giftstoffe nach außen dringen.

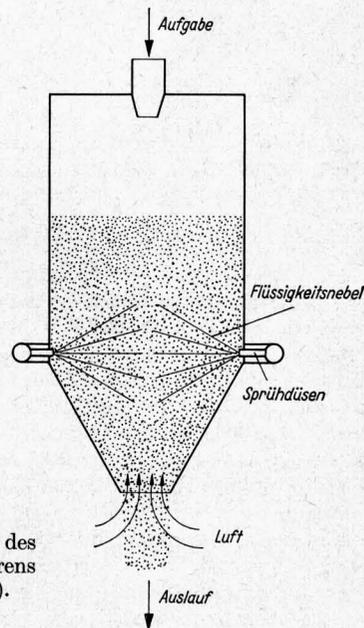
In einem Sprühmischverfahren, **Bild 16**, wird durch seitlich am Mischbehälter angebrachte Düsen Flüssigkeitsnebel in das



**Bild 14.** Der Abscheidungsgrad von Flüssigkeitsnebel im Fließbett in Abhängigkeit von der Fluidisierungsgeschwindigkeit.



**Bild 15.** Der Abscheidungsgrad von Flüssigkeitsnebel im Fließbett in Abhängigkeit von der Konzentration des Nebels im fluidisierenden Luftstrom.



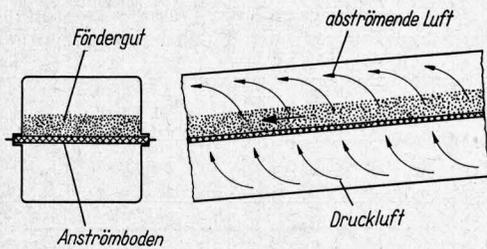
**Bild 16.** Schema des Sprühmischverfahrens (System Grün).

Fließbett eingedüst und mit dem körnigen Schüttgut intensiv vermischt [22]. Dieser Sprühmischer kann auch kontinuierlich arbeiten und als Beizapparat verwendet werden.

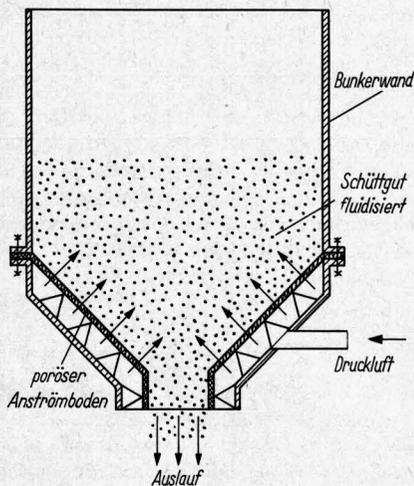
### Die Fließbettförderung und Entleerung

Als Ergänzung der Anwendungen, die auf reinen mechanischen Wechselwirkungen im Fließbett beruhen, sei die Fließbettförderung genannt, obwohl diese nicht unmittelbar in den Bereich der Aufbereitungstechnik gehört. Dieses Verfahren eignet sich

zur Förderung von feinkörnigen Feststoffen über längere Strecken bei geringem Energiebedarf und ohne wesentlichen Verschleiß der Förderorgane. Im Vergleich mit der mechanischen Förderung mittels Gurtförderern sind sowohl die Anlage als auch die Betriebskosten bei der Fließbettförderung geringer. Der Leistungsbedarf ist bei beiden Förderarten etwa gleich groß [25]. Die Fließbettförderung kann normalerweise nur in einer leicht abwärts geneigten Ebene erfolgen. **Bild 17** zeigt das Prinzip der Fließbettförderung, die an anderer Stelle ausführlich beschrieben ist [26; 27]. Es sind Berechnungsverfahren für die Auslegung solcher Fließbettförderanlagen entwickelt worden [26], die eine gute Vorausbestimmung der Kennwerte ermöglichen. Durch einige konstruktive Besonderheiten ist es möglich, eine waagerechte oder schräg aufwärts gerichtete Fließbettförderung durchzuführen [26; 28].



**Bild 17.** Schematische Darstellung der Fließbettförderung.



**Bild 18.** Bunkerentleerung durch Fluidisierung des Schüttgutes.

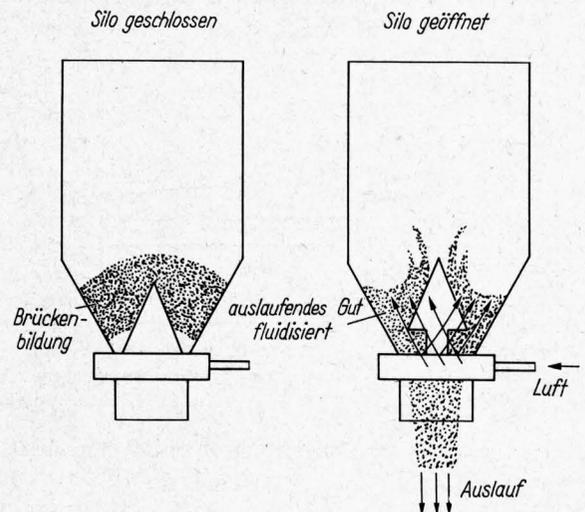
In den Bereich der Fließbettförderung fällt auch die Fluidisierung von Schüttgütern als Hilfsmittel bei der Bunkerentleerung und bei der Entleerung von flachen Sieb- und Trockenböden [29]. Die Böden oder bei Bunkern die trichterförmigen Auslaufwände werden aus porösem Material hergestellt. Beim Entleeren wird das körnige Material durch Fluidisierung fließfähig gemacht, wodurch ein leichter Auslauf gewährleistet ist, **Bild 18**. Neuerdings hat man poröse Kunststoffe entwickelt, die als Anströmböden für Fließbetten gut geeignet sind [30]. Bei einem speziellen Siloauslauf, **Bild 19**, sind rund um einen Auslaufkegel ringförmig Düsen angeordnet, durch die das Schüttgut mit Hilfe von Luftstößen fluidisiert wird. Dadurch werden Brückenbildungen vermieden oder vorhandene Brücken bei schwer fließenden Stoffen zerstört.

### Thermische Fließbettverfahren

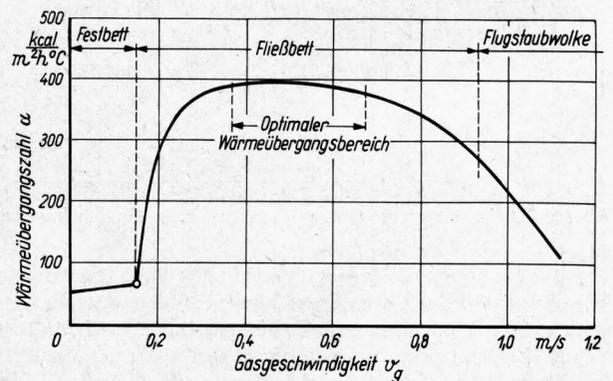
Das Trocknen körniger Schüttgüter nimmt in der landtechnischen Aufbereitung einen breiten Raum ein, wobei eine große Anzahl verschiedener Trocknertypen in der landwirtschaftlichen Trocknung eingesetzt werden [31]. Auch das Fließbettverfahren bietet die Möglichkeit, die Trocknung rieselfähiger Güter durchzuführen. Der Wärmeübergang zwischen Wärmetauschern und Feststoffteilchen steigt im Bereich des Fließbettes stark an, **Bild 20**, und hat bei 2- bis 3facher Lockerungsgeschwindigkeit ein

Optimum [32]. Dieser hohe Geschwindigkeitswert ist gleichzeitig günstig für eine gute Durchmischung. Bei gleichem Luftdurchsatz sind die Wärme- und Stoffübergangszahlen zwischen Warmluft und Feststoff im Fließbett etwas geringer als im Festbett. Da man im Fließbett aber mit höheren Luftdurchsätzen arbeitet, wird dieser Nachteil ausgeglichen.

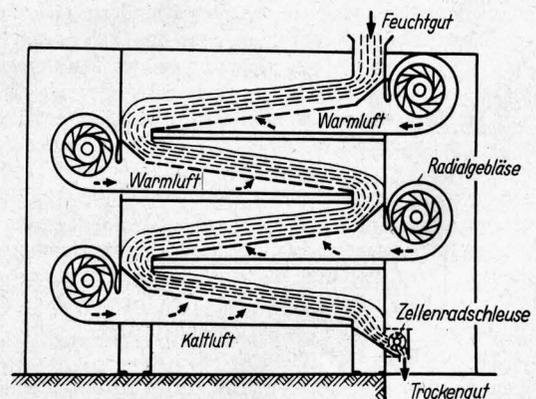
**Bild 21** zeigt als Beispiel einen Fließbettgetreidetrockner, bei dem das fluidisierte Gut selbsttätig durch den Trockenraum läuft. Eine neuere Trocknerbauart, in der sowohl die Kontaktheizung als auch der direkte Wärmeübergang zwischen der fluidisierenden Warmluft und dem Feststoff ausgenutzt wird, zeigt **Bild 22**. Das Feuchtgut wird pneumatisch tangential in den Trockenraum gefördert und sinkt in dem brodelnden Fließbett spiralförmig an der beheizten Wand zu Boden, wobei es durch Wasserabgabe spezifisch leichter wird. Dadurch wird der Gesamtdruckverlust des brodelnden Fließbettes vermindert. Durch den



**Bild 19.** Bunkerentleerung und Zerstörung von Brückenbildungen durch stoßweise Fluidisierung (System Grün).



**Bild 20.** Wärmeübergang zwischen Wärmetauschern und Feststoff in durchströmten Schüttgütern [32].



**Bild 21.** Fließbett-Durchlaufrockner.

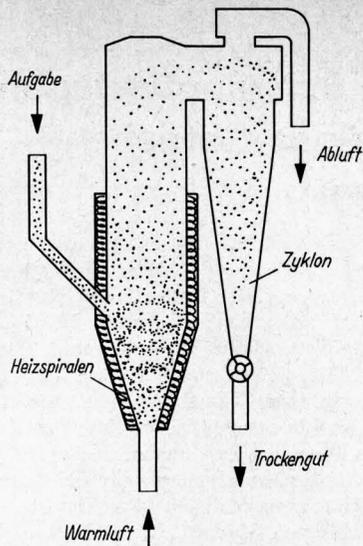


Bild 22. Sprudelzyklon-Trockner (System Schilde).

fluidisierenden Warmluftstrom wird der Trocknungsprozeß fortgesetzt und gleichzeitig trockene Feinanteile nach oben ausgetragen und im Zyklon abgeschieden. Noch nicht trockene größere Teile fallen in das Fließbett zurück und werden erst ausgetragen, wenn ihre Schwebegeschwindigkeit kleiner ist als die Gasgeschwindigkeit im Trockenraum oberhalb des Fließbettes. Grobe Teilchen haben eine längere Verweilzeit im Trockenraum, wodurch bei verschiedenen Korngrößen ein relativ gleichmäßiger Restfeuchtegrad erreicht wird. Diese Trocknerbauart ist auch zum Kühlen von körnigen Schüttgütern geeignet.

Mit gutem Erfolg wird das Fließbettverfahren beim Rösten von Kaffee, Erdnüssen oder Kakao angewendet, Bild 23. Das Röstgut wird in einem konischen Fließbett im freien Heißgasstrom von über 300°C fluidisiert und dabei sehr gleichmäßig geröstet [33]. Die bei der Röstung abgesprengten Häutchen werden nach oben ausgetragen. Nach Beendigung der Röstzeit von 2 bis 3 Minuten wird der Heißgasstrom abgestellt, und das geröstete Gut fällt nach unten in einen zweiten Fließbettbehälter, in dem es durch Kühlluft fluidisiert und in 2 bis 3 Minuten auf Raumtemperatur abgekühlt wird. Ein Nachrösten ist dadurch ausgeschlossen.

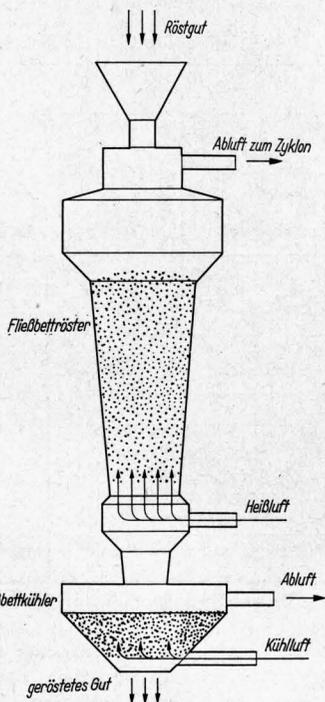


Bild 23. Fließbett-Röst- und Kühl-anlage (System Lurgi).

### Zusammenfassung

Die vorstehende Zusammenstellung zeigt anhand einiger Beispiele, daß das Fließbettverfahren für verschiedene Prozesse der Aufbereitungstechnik anwendbar ist, von denen einige auch für die Landtechnik von Interesse sind. Die für die Landtechnik wichtigen Verfahren Sortieren, Mischen, Fördern, Trocknen, Beizen, Kühlen und Rösten lassen sich bei verschiedenen körnigen Schüttgütern im Fließbett durchführen, wobei das Fließbettverfahren oft Vorteile aufweist, bisher aber in der Aufbereitung landwirtschaftlicher Produkte nur wenig bekannt ist.

### Schrifttum

- [1] Reuter, H.: Wirbelschicht, Fließbett, Fluidatbett. Bemerkungen zur Nomenklatur. Chemiker-Ztg./Chem. Apparatur **89** (1965) Nr. 8, S. 274/76.
- [2] Winkler, F.: A. P. 1687 118 (1928).
- [3] Brötz, W.: Grundlagen der Wirbelschichtverfahren. Chem.-Ing.-Techn. **24** (1952) Nr. 2, S. 60/80.
- [4] Othmer, D. F.: Fluidization. New York: Reinhold Publishing Co. 1956.
- [5] Leva, M.: Fluidization. New York: McGraw Hill Book Co. 1959.
- [6] Zenz, A. F., und D. F. Othmer: Fluidization and fluid-particle systems. New York: Reinhold Publishing Co. 1960.
- [7] Schytil, F.: Wirbelschichttechnik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1961.
- [8] Beranek, I., D. Sokol und G. Winterstein: Wirbelschichttechnik. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1964.
- [9] Ciborowsky: Fluidycaja. Warschau 1957.
- [10] Reuter, H.: Stand der technischen Anwendung fluidisierter Feststoffe. Chemiker-Ztg./Chem. Apparatur **89** (1965) Nr. 8, S. 276/82.
- [11] Batel, W.: Über das Sortieren körniger Stoffe. Grundl. Landtechn. Heft 12 (1960) S. 18/24.
- [12] Zabeltitz, Chr. v.: Über die Trennung von Körpern verschiedener Dichte in einem Fließbett. Diss. TH Braunschweig 1966. Fortschritt-Berichte VDI-Z. Reihe 14, Nr. 3, Aug. 1966.
- [13] Kürzel, H.-J.: Der Trockensteinausleser und Sortiertisch Forsberg. Mühle **97** (1960) Nr. 33, S. 427/28.
- [14] Prospekt: Firma MIAG, Braunschweig, u. Firma Heid, Wien.
- [15] Zabeltitz, Chr. v.: Einfluß von Siebart und Siebbewegung auf den Siebgütegrad und den Abrieb des Siebgutes (Zuckerrübensamen). Grundl. Landtechn. Heft 18 (1963) S. 35/41.
- [16] Ide, H.: Schwebesichter in der Spanplattenindustrie. Holz **17** (1964) Nr. 11, S. 27/36.
- [17] Colliery Engineering. **27** (1950) S. 348/57.
- [18] Zinovev, J.: Die Trennung von Kartoffeln, Erdkluten und Steinen. Vestnik sel'koc. nauki (1959) Nr. 11, S. 81/89, russ.
- [19] Leva, M.: Pressure drop and power requirements in a stirred fluidized bed. Amer. Inst. of Chem. Engrs. J. **6** (1960) Nr. 12, S. 688/92.
- [20] Rowe, P. N., und K. S. Sutherland: Solids mixing studies in gas fluidized beds. Trans. Instn. Chem. Engrs. **39** (1961) S. 188/94 und **42** (1964) S. T 55/T 63.
- [21] Hiby, J. W.: Untersuchungen über den kritischen Mindestdruckverlust des Anströmbodens bei Fluidalbetten. Chem.-Ing.-Techn. **36** (1964) Nr. 3, S. 228/29.
- [22] Teichmann, E.: Aufbereiten mit Druckluft. VDI-Nachrichten **19** (1965) Nr. 36, S. 6.
- [23] Scherstromverfahren beschleunigt Mischen im Silo. VDI-Nachrichten **20** (1966) Nr. 28, S. 4.
- [24] Scott, D. S., und D. A. Guthrie: Removal of a mist in a fluidized bed. Amer. J. Chem. Engng. (1959) H. 10, S. 200/03.
- [25] Mohrs, E.: Pneumatische Förderanlagen im Vergleich mit mechanischen Fördermitteln. Zement-Kalk-Gips (1962) Nr. 4, S. 166/70.
- [26] Keunecke, K.: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße. VDI-Forsch. heft Nr. 509, Düsseldorf 1965.
- [27] Segler, G., und K. Keunecke: Untersuchungen an Fließbettförderinnen für Getreide, Sämereien und landwirtschaftliche Futtermittel. Landt. Forsch. **15** (1965) H. 4, S. 130/36.
- [28] Isler, W.: Die horizontal und schräg aufwärts fördernde pneumatische Rinne. Zement-Kalk-Gips (1960) Nr. 10, S. 482/86.
- [29] Forced-air emptying of fluted-bottomed grain bins. Farm Mechanization **16** (1964) Nr. 179, S. 49/50.
- [30] Elßner, L.: Auflockerungsböden aus porösen Sinterwerkstoffen. Aufbereitungstechn. **6** (1965) H. 7, S. 422/23.
- [31] Lützenberger, F.: Systematik der Trockner für rieselfähiges Gut. Grundl. Landtechn. Heft 16 (1962) S. 40/52.
- [32] Ernst, R.: Der Mechanismus des Wärmeüberganges an Wärmetauschern in Fließbetten. Chem.-Ing.-Techn. **31** (1959) S. 166/73.
- [33] Wirbelröstung von Kaffee und Nahrungsmitteln. Lurgi Handbuch 1960.