

Vergleichende Untersuchungen an Schwerkraftwindsichtern

Von Josef Wessel, München

Bei der Aufbereitung und der weiteren Verarbeitung landwirtschaftlicher Erzeugnisse spielt die Windsichtung eine große Rolle. Es handelt sich um ein Verfahren, bei dem die Bestandteile eines körnigen Haufwerkes nach ihrer Schwebegeschwindigkeit geschieden werden. Als Beispiel sei der Vorreiniger für Mähdruschgetreide erwähnt. In vereinfachter Darstellung kann man hier von zwei Bestandteilen des Reinigungsgutes sprechen, von den Teilchen hoher Schwebegeschwindigkeit (Körner) und von den Teilchen geringer Schwebegeschwindigkeit (Spreu und andere Verunreinigungen). Von einer guten Reinigung wird gefordert, daß keine Spreu in den gesichteten Körnern enthalten ist. Umgekehrt sollen keine Körner in der abzuschheidenden Spreu verlorengehen. Mit anderen Worten: Die Reinigung soll trennscharf arbeiten. Tatsächlich besitzen sowohl Körner als auch Verunreinigungen ein ganzes Spektrum von Schwebegeschwindigkeiten. Zur Lösung grundlegender Fragen der Windsichtung ist dieses Material nicht geeignet; eine genauere Erfassung des Trennverhaltens bei der Windsichtung wird ermöglicht, wenn an Stelle dieses Haufwerkes mit sehr heterogenen Komponenten ein Haufwerk einheitlicher Beschaffenheit mit kontinuierlicher Korngrößenverteilung und entsprechend kontinuierlicher Schwebegeschwindigkeitsverteilung verwendet wird. Ein solches kontinuierliches Spektrum ergibt sich beispielsweise bei der Vermahlung spröder Stoffe. Ein besonderer Vorteil liegt in der relativ einfachen Ermittlung der Kornverteilung mittels Siebanalyse, die besonders bei Verwendung nahezu kubischer Kornform, wie beim vorliegenden Kalkstein, gute Reproduzierbarkeit bietet. Die genaue Methode der Versuchsauswertung ist weiter unten beschrieben.

Im grundsätzlichen knüpfen wir an die Arbeiten von Brenner, Blenk und Engel an. Brenner [1] ermittelte im Einzelkornversuch den Einfluß verschiedener Einflußgrößen auf die Streuung der Flugbahnen, welche als Maß der Trennschärfe verwendet wurden. Er wies auf die Problematik der Windsichtung von Getreidekörnern hin, welche in verschiedenen Anblasrichtungen unterschiedliche Querschnittsflächen und verschiedene Widerstandsziffern aufweisen. Bei genügender Verweilzeit der in der Sichtströmung tanzenden Körner ergibt sich die Möglichkeit einer Mittelwertbildung der Schwebegeschwindigkeit als Grundlage einer befriedigenden Klassierung von Getreidekörnern. Hier liegt der Sinn des von ihm 1930 entwickelten Steigwindsichters.

Erst der Darstellung von Blenk [2] verdanken wir die scharfe Herausschälung der alle beteiligten Einflußgrößen auf der Gutsseite koordinierenden Gleichfälligkeit als das entscheidende Kriterium der Windsichtung. Als Gleichfälligkeit bezeichnet man eine Gutseigenschaft von Partikeln, welche vor allem Korngröße, Kornform und Dichte zusammenfaßt. Zwei verschiedene Partikeln sind gleichfällig, wenn sie unter gleichen Bedingungen die gleiche Fallgeschwindigkeit erreichen bzw. die gleiche Schwebegeschwindigkeit aufweisen. Blenk gebührt weiterhin das Verdienst, die Saatgutsortierung im horizontalen Luftstrom wieder ins rechte Licht gesetzt zu haben [3; 4].

Wieder vergingen Jahre, bis Engel [5] die Verschiebung des Trennschnittes mit der sogenannten Luftbeladung untersuchte; dabei bedeutet die Luftbeladung die Feststoffkonzentration in der Sichtluft. Er fand eine kritische Beladung, bei deren Überschreiten ein Wandern der bis dahin als konstant angesehenen

Trennkorngröße in das Feingebiet beobachtet wird. Mit anderen Worten: Der Feingutanteil nimmt mit wachsender Teilchenkonzentration zugunsten des Grobgutanteiles rasch ab. Engel beschränkte sich hier auf die qualitative Feststellung, daß nach Überschreiten der kritischen Beladung die Trennschärfe rasch absinkt.

In der vorliegenden Arbeit wird die zahlenmäßig ermittelte Trennschärfe verschiedener Schwerkraftsichter unter besonderer Berücksichtigung hoher Luftbeladung verglichen. Bei der Windsichtung wird das zu scheidende Gemenge in ein strömendes, gasförmiges Medium, in unserem Falle Luft, geleitet, wobei zweierlei Kräfte wirken (**Bild 1 und 2**):

1. die von der Masse des Partikels abhängige Kraft P , die sich zusammensetzt aus der in Richtung des Gravitationsfeldes wirkenden Schwerkraft und der Massenträgheitskraft, die bei beschleunigter Bewegung auftritt, und
2. die vom Strömungswiderstand abhängige Kraft L , welche in Richtung des Strömungswiderstandes wirkt. Unter der vereinfachenden Voraussetzung von kugelförmigen Partikeln besteht nach Graßmann [6] folgende Abhängigkeit der Luftkraft L von der Korngröße d und der Relativgeschwindigkeit der Luft v_{rel} :

$$L \approx v_{rel} d \quad \text{im laminaren Gebiet}$$

$$L \approx v_{rel}^2 d^2 \quad \text{im turbulenten Gebiet}$$

der Umströmung.

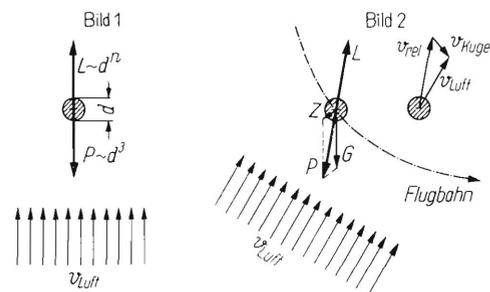


Bild 1 und 2. Gleichgewicht der Kräfte an der einzelnen Partikel des Sichtgutes im Luftstrom.

Die Massenkraft P ist proportional d^3 . Aus den Gleichgewichtsbedingungen der an den Partikeln angreifenden Kräfte, einschließlich der Massenträgheitskraft Z , resultieren für die Partikeln in Abhängigkeit von ihrer Größe verschiedene Bahnen, so daß die kleinen Korngrößen an einer anderen Stelle als die großen aus der Strömung abgezogen werden können. Der tech-

Verwendete Formelzeichen

P	auf das Einzelkorn wirkende Gesamtmassenkraft;
L	Strömungswiderstand des Einzelkorns;
Z	Fliehkraft auf das Einzelkorn, bei gekrümmter Flugbahn wirkend;
G	Schwerkraft;
v_{rel}	Anströmungsgeschwindigkeit des Einzelkorns;
v_{Kugel}	Absolutgeschwindigkeit der Kugel;
v_{Luft}	Absolutgeschwindigkeit der Luft;
v_L	mittlere Luftgeschwindigkeit in der Sichtzone;
v_0	Einschußgeschwindigkeit des Sichtgutes in die (Luftströmung) Sichtzone;
v_S	Endfallgeschwindigkeit (= Schwebegeschwindigkeit) des Trennkorns;
v_L/v_S	Geschwindigkeitskenngröße für Windsichter;
d	Korngröße in μm ;
d_T	Trennkorngröße in μm ;
κ	Trennschärfe (Steilheit der Verteilungszahlenkurve);
μ	Luftbeladung in kg/m^3 ;
σ	spezifische Querschnittsbelastung des Windsichters in $\text{kg/m}^2 \text{s}$.

nische Sichtvorgang ist gekennzeichnet durch die oft beträchtliche Beladung der Sichtluft mit dem zu scheidenden Gut, wobei die Forderung nach hoher Beladung der Sichtluft aus wirtschaftlichen Gründen erhoben wird. Der Bauaufwand für die Sichtanlage ist im wesentlichen von der Luftmenge abhängig, so daß ein Betrieb mit geringer spezifischer Luftmenge bzw. mit hoher spezifischer Luftbeladung erwünscht ist. Auch der Energiebedarf, also die laufenden Kosten für den Betrieb der Anlage, hängen von der Luftmenge ab. Voraussetzung ist natürlich, daß eine genügend hohe Trennschärfe erreicht wird.

Mit dem Begriff der Windsichtung verbindet sich meist das Bild des Abwägevorganges von Partikeln verschiedener Fallgeschwindigkeit im aufsteigenden Luftstrom (Bild 1). Dieses Bild muß für den technischen Sichtvorgang, der durch große Mengenströme gekennzeichnet ist, korrigiert werden. Aus Bild 3 ist zu ersehen, wie sich das in der Sichtzone eingebrachte, zu scheidende Haufwerk unter dem Einfluß der Luft- und Massenkraft in einen Feingutstrom und einen Grobgutstrom aufspaltet. Dabei ergeben sich nach der Kontinuitätsgleichung für große Gutsvolumina, die in die räumlich begrenzte Sichtzone eingeschleust werden, auch beträchtliche Eintrittsgeschwindigkeiten, die auf den Sichtvorgang einen erheblichen Einfluß ausüben. Damit rückt die Aufgabestelle in den Brennpunkt des ganzen Scheideprozesses. Voraussetzung für einen einwandfreien Scheideprozeß mittels Windsichtung bei hoher Luftbeladung ist

1. Auflösung des Gutes und
2. eindeutige Ordnung der Teilchenbahnen gemäß ihrer Korngröße (Aufspaltung der Gutsströme).

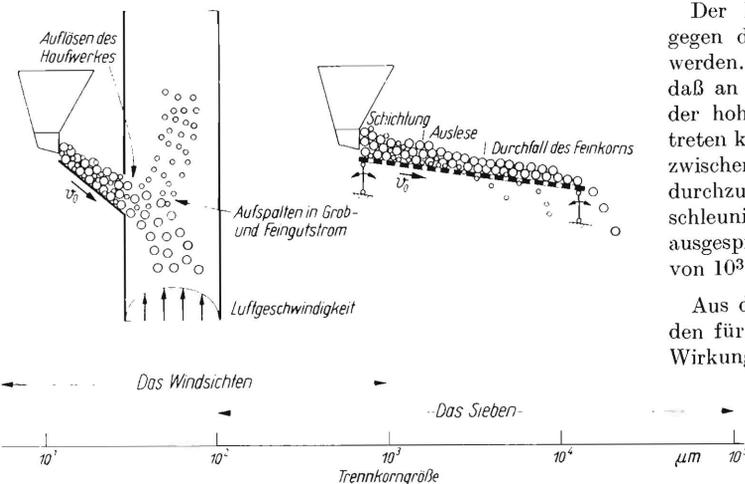


Bild 3. Gegenüberstellung der beiden Klassierverfahren Sichten und Sieben.

Die Auflösung des Gutes besagt, daß beim Eintritt in die Sichtzone die einzelnen Partikeln getrennt voneinander in die Sichtströmung eingebracht werden, nachdem vorher oft ein dichtgelagertes Haufwerk vorliegt. Für die Güte der Auflösung sind

einmal die Gestaltung der Abwurfstelle, dann die Geschwindigkeitsverhältnisse und schließlich auch noch Guteigenschaften maßgebend. In erster Annäherung kann der Böschungswinkel der ruhenden Schüttung als Maß für die Auflösbarkeit des Gutes dienen. Die eindeutige Ordnung der Teilchenbahnen setzt gleichförmige Strömungsverhältnisse quer zur Bewegungsebene der Teilchenbahnen voraus. Außerdem muß die Geschwindigkeit und Richtung der Teilchen an der Aufgabestelle gleich sein. All diese Forderungen werden in Wirklichkeit nur unvollkommen erfüllt. Im Bild 3 ist das Windsichten dem Sieben als einem ergänzenden Klassierverfahren in einer Schemaskizze gegenübergestellt. Links sehen wir das Windsichten, das durch die beiden Schritte „Auflösen des Haufwerkes“ und „Aufspalten der Gutströme“ (Ordnen der Teilchenbahnen) gekennzeichnet ist. Wesentlich für das Windsichten ist die kurze Verweilzeit der Partikeln in der Sichtzone, die sich aus der relativ hohen Bahngeschwindigkeit ergibt. Auf der rechten Seite in Bild 3 ist das Sieben durch seine drei Verfahrensschritte „Schichten des Haufwerkes“, „Auswählen der Sieböffnung durch das Feinkorn“ und „Durchfallen des Feinkorns durch die Sieböffnung“ gekennzeichnet.

Die Fortbewegungsgeschwindigkeit auf dem Sieb liegt 1 bis 2 Zehnerpotenzen unter der Bahngeschwindigkeit beim Sichten. Wesentlich ist dabei der Auswahlprozeß der Sieböffnungen in seiner dauernden Wiederholung. Aus Bild 3 ist noch grob schematisch das Anwendungsgebiet der beiden Verfahren bei körnigen Haufwerk ersichtlich: Im Feinbereich wird gesichtet und im Grobbereich wird gesiebt, wobei eine Überschneidung beider Verfahren im mittleren Bereich bekannt ist.

Der Begriff der Schwerkraftwindsichtung soll noch kurz gegen die Alternative der Fliehkraftwindsichtung abgegrenzt werden. Aus Bild 3 wird bereits am Steigsichter deutlich, daß an den Partikeln bei der Umlenkung, in Verbindung mit der hohen Bahngeschwindigkeit, hohe Beschleunigungen auftreten können, so daß es zweckmäßig erscheint, die Abgrenzung zwischen Schwerkraft- und Fliehkraftsichtern nicht zu streng durchzuführen. Danach soll für Schwerkraftsichter ein Beschleunigungsbereich von 10^0 bis 10^1 g gelten, während die ausgesprochenen Fliehkraftwindsichter Beschleunigungswerte von 10^3 bis 10^4 g, bezogen auf das Trennkorn, aufweisen.

Aus der Fülle der verschiedenen Schwerkraftsichter [7] wurden für die Untersuchungen drei ausgewählt, die sich in ihrer Wirkungsweise stark voneinander unterscheiden:

1. der Steigsichter (funktionsgemäß als Abwägesichter zu bezeichnen),
2. der Horizontalsichter (Ablenksichter) und
3. der Schrägsichter (Gegenstrom-Umlenksichter).

Diese drei Typen sind durch die Geschwindigkeitskenngröße v_L/v_S gekennzeichnet. Diese Größe ist die auf die Endfallgeschwindigkeit des Trennkorns bezogene mittlere Luftgeschwindigkeit in der Sichtzone. Sie gibt einen Hinweis darüber, welche Beschleunigungen am Trennkorn wirken, ob wir uns dem Bereich der Fliehkraftsichter nähern oder ob wir

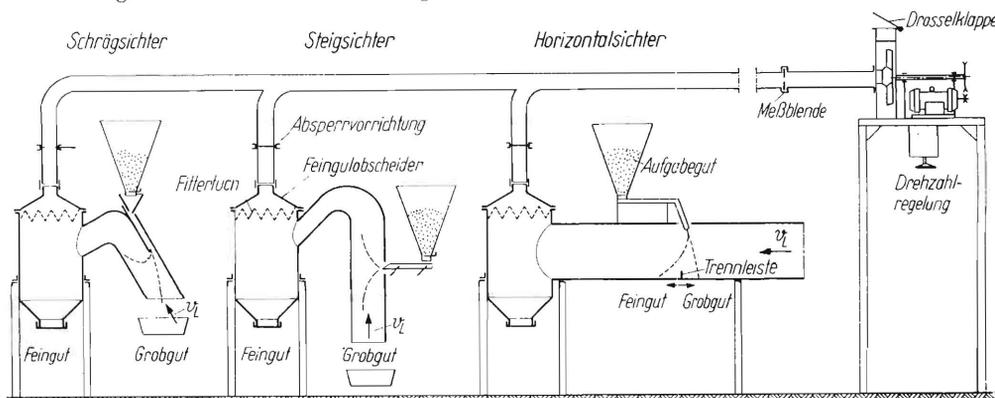


Bild 4. Versuchsanlage zum Vergleich verschiedener Schwerkraftsichter.

uns (bei geringen v_L/v_S -Werten) mehr im Bereich der Schwerkraftsichter befinden. Der Steigsichter wird unter Voraussetzung einer rechteckigen Geschwindigkeitsverteilung ein $v_L/v_S = 1$ aufweisen, während der Horizontalsichter für seine Ablenkung nur einen geringeren v_L/v_S -Wert erfordert. Beim Umlenksichter liegen die v_L/v_S -Werte normalerweise über 1. Zwischen diesen drei Grundtypen sind alle möglichen Kreuzungen denkbar.

Die Versuchsanlage

Die Versuchsanlage ist in **Bild 4** schematisch dargestellt. Die drei Sichter sind jeweils mit dem zugehörigen Feingutabscheider über eine gemeinsame Meßstrecke mit dem Gebläse verbunden. Die gewünschte Luftmenge wird durch Drehzahl- und Drosselregelung eingestellt. Von der an sich naheliegenden Verwendung von Zyklonen zur Feingutabscheidung wurde ab-

Als Versuchsmaterial diente Kalksteingranulat, welches bei 4500 U/min auf einer Laborstiftmühle gemahlen wurde. Der Körnungsaufbau des Rohgutes und der angefallenen Produkte wird mittels Siebanalyse festgestellt. Hierbei findet im Bereich von 2000 bis 200 μm ein elektromagnetisches Vibrationsanalysensieb, im Bereich von 200 bis 40 μm ein Luftstrahlsieb Anwendung.

Bestimmung der Trennschärfe

Zum rechten Verständnis der Ergebnisse der Untersuchungen sollen kurz die Kriterien der Scheidung besprochen werden. **Bild 8** zeigt eine angenommene Kornverteilung, die durch die

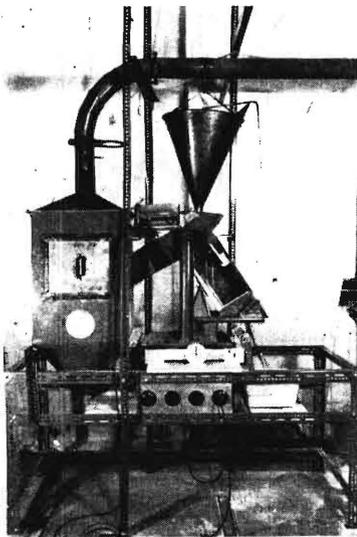


Bild 7. Schrägsichter.

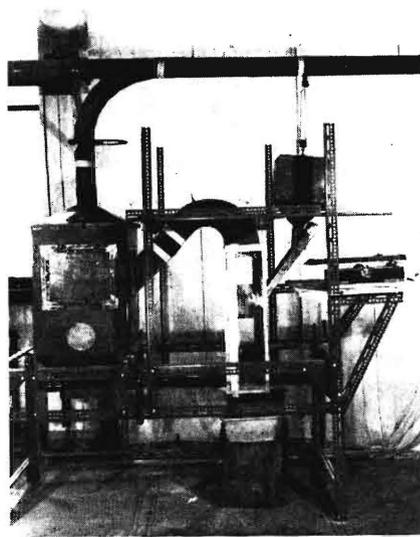


Bild 6. Steigsichter.

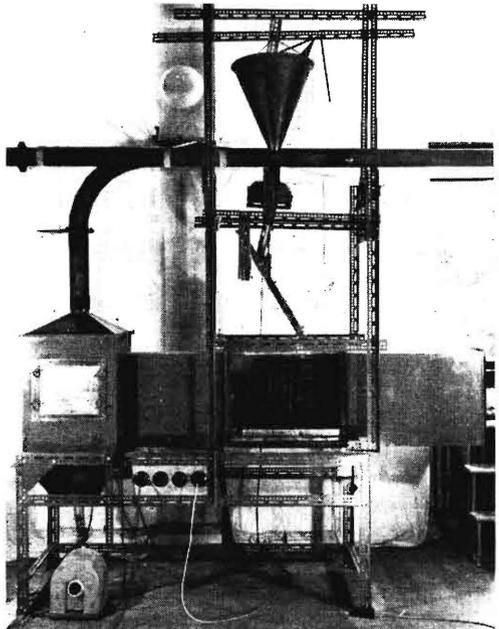


Bild 5. Horizontalsichter.

gesehen, da bei den relativ geringen Luftmengen die Abscheidekammern, in Verbindung mit eingebauten Filtern, eine bessere Wiedergewinnung des anfallenden Feingutes für die Auswertung ermöglichen.

Der Horizontalsichter (**Bild 5**) besteht aus einem horizontalen Kanal rechteckigen Querschnitts, der am rückwärtigen Ende im Feingutabscheider mündet. Das Gut wird über eine Dosiervorrichtung aus einem Bunker abgezogen und über eine vibrierende Rutsche durch einen Schlitz in der Decke des Kanals aufgegeben. Der Neigungswinkel der Rutsche kann gegenüber dem Kanal verstellt werden. Auf dem Boden des Kanals liegt ein herausziehbares Blech, auf dem eine Schneide angeordnet ist, welche das Grobgut vom Feingut trennt. Durch Verschieben dieser Trennzunge relativ zur Aufgabestelle kann das Trennkorn ohne Änderung der Luftgeschwindigkeit variiert werden.

Der Steigsichter (**Bild 6**) besteht aus einem rechteckigen Schacht variablen Querschnittsverhältnisses, der über einem Krümmer mit dem Feingutabscheider verbunden ist. Verschiedene Aufgabevorrichtungen werden verwendet: einmal eine Schwingrinne mit Wuchtmassenantrieb, die mit einem Gefälle von 10° das Sichtgut durch einen Schlitz seitlich in den Sichter einspeist; bei anderen Versuchen wurde die Schwingrinne durch eine unter 60° zur Waagerechten geneigte Rutsche ersetzt. Auch hier wurde das Sichtgut aus einem Bunker über eine Dosiervorrichtung abgezogen.

Der Schrägsichter (**Bild 7**) besteht aus einem rechteckigen, geneigten Kanal, an dessen Oberseite eine Aufgaberrutsche angeordnet ist. Die Sichtluft tritt unten in den Sichter ein und wird oben, zusammen mit dem Feingut, über einen Krümmer abgezogen. Dabei wird das Feingut an der Aufgabestelle stark abgelenkt, während das Grobgut in gestreckter Wurfbahn im Gegenstrom zur Sichtluft aus dem unteren Kanalende ausfällt.

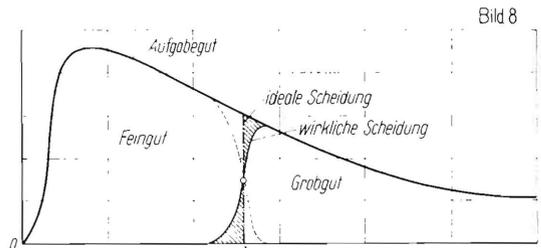


Bild 8

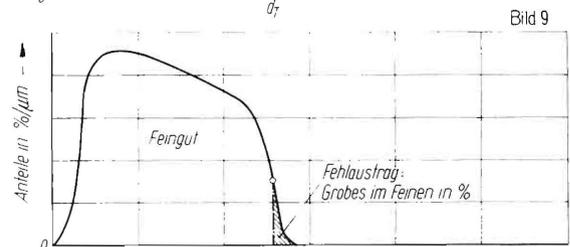


Bild 9

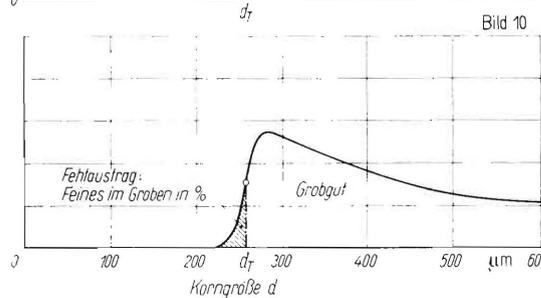


Bild 10

Bilder 8 bis 10. Der ideale und der wirkliche Scheidevorgang, dargestellt an einer angenommenen Kornverteilung.

d_T Trennkorngröße

Trennkorngröße d_T in einen Grobgutanteil und in einen Feingutanteil zerlegt wird. Aus **Bild 9 und 10** ist der Verlauf der wirklichen Scheidung, bei der sich Grobgut und Feingut in einem bestimmten Kornbereich überschneiden, zu ersehen. Es kann zweckmäßig sein, die Häufigkeitsverteilung in der Darstellung durch die entsprechende Summenrückstandskurve zu ersetzen, wie dies auch in **Bild 11** an einem Formblatt der Versuchsauswertung ersichtlich ist. Während die Fehlaustragsmengen in **Bild 9 und 10** als Flächen kenntlich waren, sind sie in diesem Bild als Strecken abzugreifen. Zwischen die Summenrückstands-

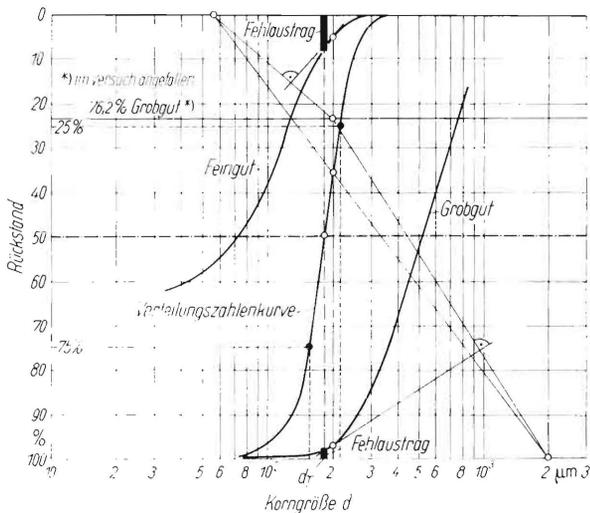


Bild 11. Der Scheidevorgang, gekennzeichnet durch die Summenrückstandskurven der beiden Produkte Feingut und Grobgut (Formblatt der Versuchsauswertung).

kurve des Feingutes und diejenige des Grobgutes ist nach einem graphischen Verfahren von Eder [8] die Verteilungszahlenkurve (sog. Trompkurve) hineinkonstruiert. Diese charakterisiert die Trennschärfe, indem sie angibt, wie die beiden Produkte Grobgut und Feingut sich überschneiden, oder anders ausgedrückt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Kornstufe ins

Grobgut [9] kommt. Auf einfachste Weise kann die Trennschärfe durch den sogenannten α -Wert ausgedrückt werden, der die Steilheit der Verteilungszahlenkurve im Bereich zwischen 25 und 75% wiedergibt. Bei idealer Scheidung entartet die an sich S-förmige Verteilungszahlenkurve zu einer senkrechten Geraden; der α -Wert erreicht hier 1. Bei industriellen Scheideproblemen genügt oft der α -Wert nicht. Vielmehr interessiert beispielsweise bei einer Entstaubungsaufgabe, wieviel Prozent Feingut in dem Endprodukt verblieben sind, während der Grobkorngehalt im Feingut weniger von Belang ist. Umgekehrt lautet die Forderung bei Sichtvorgängen im Feinstkorngebiet oft: es muß ein möglichst spritzkornfreies Endprodukt erzielt werden. Hier interessiert in erster Linie der Fehlaustrag der Grobkörner im Feingut. Die auf die betreffenden Produkte bezogenen Fehlausträge, nämlich das Grobkorn im Feingut und das Feinkorn im Grobgut, werden im Trennschnitt (Trennkorngröße d_T) oben und unten an den Körnungslinien abgegriffen. Sie sind als schwarze Säulen in **Bild 11** ersichtlich und bilden ebenfalls ein Maß für die Trennschärfe.

Die Kornscheide bzw. die Trennkorngröße d_T ist bei diesem Verfahren definiert als die Korngröße, welche mit 50%iger Wahrscheinlichkeit ins Grob- oder ins Feingut gelangt. Sie wird also an der Verteilungszahlenkurve bei 50% abgegriffen.

Nach Erkenntnissen von Engel [5] ist die Größe des Trennkornes unter Umständen von der Gutsbeladung oder, wie Engel es dargestellt hat, von der Feingutbeladung der Sichtluft abhängig. Wir müssen also bei den nachfolgenden Vergleichen der Sichter drei Kriterien im Auge behalten:

1. α -Wert (Steilheit der Trompkurve),
2. Höhe der Fehlausträge (als ergänzende Angabe über die Trennschärfe) und
3. Lage und Konstanz der Trennkorngröße.

Diese Daten werden zweckmäßigerweise auf die Luftbeladung bezogen, welche ein Maß für die aufgewendete Energie und damit für die Wirtschaftlichkeit der Windsichtung darstellt. Als weiterer Bezugspunkt kann die spezifische Sichtzonenbelastung in $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ herangezogen werden. Dies ist ein Maß für den benötigten Raumbedarf des Sichters.

Versuchsergebnisse

Bei der Betrachtung der Ergebnisse¹⁾ sind aus den vielen Versuchsreihen diejenigen ausgewählt worden, bei welchen die einzelnen Sichter günstige Resultate erbrachten, um so die verschiedenen Typen am deutlichsten zu charakterisieren.

Der **Steigsichter**, in vielfältigen Formen bekannt, ist der am weitesten verbreitete Schwerkraftsichter. In den vorliegenden Versuchen wurde bisher lediglich der senkrechte, rechteckige Schacht unter Variation des Breitenverhältnisses, der Luftgeschwindigkeit und der Aufgabebedingungen untersucht. Aus **Bild 12 und 13** sind die Trennergebnisse bei Aufgabe durch eine schräge Rutsche, die unter 60° geneigt ist, ersichtlich. Durch Verschieben des Aufgabebunkers auf der Rutsche wurde die Einschubgeschwindigkeit variiert. Aus **Bild 12** ist zu entnehmen, daß eine Steigerung der Einschubgeschwindigkeit von 1 auf 1,9 m/s das Trennergebnis kaum beeinflusst. Dagegen bringt die Steigerung auf 2,4 m/s eine merkliche Verbesserung. Sowohl der Verlauf der Trennschärfe-Kennlinie mit ihrem starken Abfall im höheren Beladungsbereich als auch der parabelförmige Verlauf der Kennlinien des Fehlaustrages im Feingut in **Bild 13** sind für den Steigsichter charakteristisch. Desgleichen auch der schwach S-förmige Verlauf des Fehlaustrages im Grobgut.

Dies geht auch aus **Bild 14 und 15** hervor. Diesmal wurde der Sichtkanal mit einer Schwingrinne unter 10° Neigung beschickt, wobei die Einschubgeschwindigkeit v_0 wesentlich niedriger (bei etwa 0,1 m/s) lag. Als Parameter ist diesmal die Breite des Sichtkanals gewählt worden. Auch in **Bild 15** ist wieder die parabelförmige Ausbildung der Feingutkennlinien

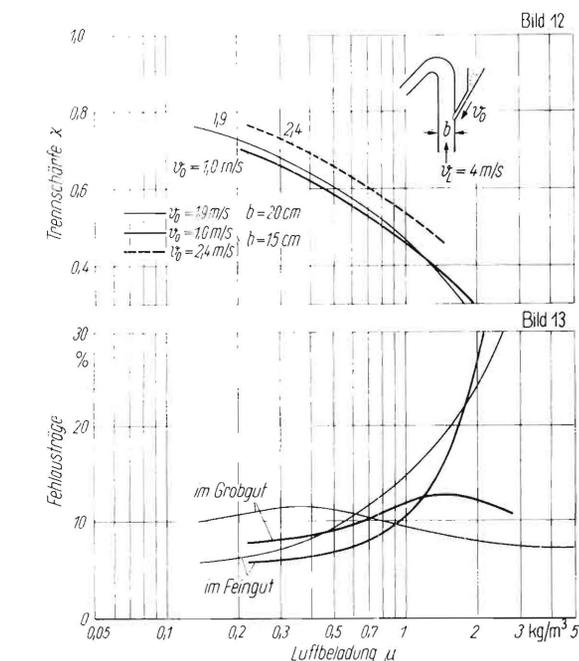


Bild 12 und 13. Versuche mit Steigsichtern: Trennschärfe und Fehlausträge in Abhängigkeit von der Luftbeladung bei verschiedener Einschubgeschwindigkeit v_0 . Das Gut wurde durch eine unter 60° zur Horizontalen geneigten Rutsche aufgegeben.

Luftgeschwindigkeit $v_T = 4 \text{ m/s}$
Einschubgeschwindigkeit $v_0 = 1,0; 1,9; 2,4 \text{ m/s}$

¹⁾ Die vorliegenden Ergebnisse beruhen im wesentlichen auf experimentellen Arbeiten, die von Klaus Maehle, Sigbert Fuchs und Walter Vogel durchgeführt und ausgewertet wurden; diesen sei für ihre freundliche Mitarbeit besonders gedankt.

und die Überschneidung mit den S-förmigen Grobgutkennlinien zu erkennen. Es zeigt sich ferner, daß die Breite von 8 cm in Verbindung mit der Luftgeschwindigkeit von 4 m/s und der Einschubgeschwindigkeit von 0,1 m/s sowohl die α -Kennlinie als auch die Fehlgutkennlinien einen optimalen Verlauf aufweisen. Bei einer Luftbeladung von 0,2 kg/m³ wird eine sehr hohe Trennschärfe von $\alpha = 0,84$ erzielt. Diese gute Trennschärfe besteht bis 0,5 kg/m³, fällt dann aber mit zunehmender Luftbeladung stark ab. GleichermäÙen ist in Bild 15 die entsprechende Feingutlinie mit dem geringsten Fehlaustrag verbunden, während der Fehlaustrag im Grobgut bei der höheren Beladung etwas ungünstiger ist.

Weiter läÙt sich aus dieser Darstellung entnehmen, daß eine Verminderung der Luftgeschwindigkeit von 4 auf 2,9 m/s das Trennergebnis stark beeinträchtigt. Der Grund wird hier in der schlechteren Auflösung infolge der geringen Relativgeschwindigkeit an der Aufgabestelle zu suchen sein.

Eine Variation der Trennkorngröße, die beim Steigsichter im wesentlichen mit der Veränderung der Luftgeschwindigkeit durchgeführt wird, ist zumindest nach unten durch verschlechterte Auflösebedingungen begrenzt. Im Bild 16, das mit den anderen Diagrammen zusammen betrachtet werden sollte, ist die Veränderung der Trennkorngröße für die eben besprochenen Versuche in Abhängigkeit von der Luftbeladung aufgezeichnet. Zum Vergleich ist auch ein Versuch der oben besprochenen Arbeit von Engel eingestrichelt, der den Knickpunkt als kritischen Punkt der Luftbeladung bezeichnet hat. Während bei Engel die Trennkorngröße bis zum kritischen Punkt konstant ist, um dann stark abzufallen, beobachten wir in diesem Diagramm auch im unterkritischen Bereich schon einen stetigen Abfall. Es ist aufschlußreich, daß der Knick im d_T -Diagramm genau bei der Beladung auftritt, bei der die Feingutfehlausträge einen steilen Anstieg zeigen. Hier ist also eine solche Teilchenkonzentration in der Sichtzone erreicht, daß die gezielte Aufspaltung in Grob- und Feingut bzw. die geordnete Auseinanderfächerung der Bahnen wesentlich erschwert wird. Der Betrieb eines Sichters im überkritischen Bereich hat als Folge einmal hohe Fehlausträge und zweitens eine stark ausgebildete Abhängigkeit der Trennkorngröße von der Beladung. Aus dem Bild ist ferner zu ersehen, daß der kritische Punkt mit wachsender Luftgeschwindigkeit in der Sichtzone sich in den Bereich größerer Beladung verschiebt, eine Tatsache, die bereits von Engel beobachtet wurde.

Der untersuchte **Horizontalsichter** ist im Gegensatz zu den beiden anderen Sichtern, im Hinblick auf genügende Ablenke- wege, mit etwa dreifacher Kanaltiefe ausgeführt worden. Um mit den vorhandenen Aufgabevorrichtungen bei den großen Querschnitten noch hohe Luftbeladungen erzielen zu können, dürften nur niedrige Luftgeschwindigkeiten angewendet werden. Es zeigte sich dann später, daß diese Betriebsweise beim Horizontalsichter sehr günstige Ergebnisse erbringt. Das Ablenkverfahren erfordert keine großen Luftgeschwindigkeiten, und die für die Gutsauflösung erforderliche Relativgeschwindigkeit an den Partikeln wird durch entsprechende Wahl der Einschubgeschwindigkeit sichergestellt. Im Gegensatz zum Steigsichter ergibt sich die Trennkorngröße hier nicht zwangsläufig, sondern durch Abteilung des Bodens durch eine Schneide in ein Grob- und in ein Feingebiet. Um eine optimale Trennkorngröße zu erzielen, muß die Schneide an der Stelle angeordnet werden, an der die Kornbahnen am meisten divergieren. Die rechnerische Lösung dieses Problems unter vereinfachenden Annahmen ist von Müller und Wessel untersucht worden [10]. Der Ort der optimalen Trennschärfe kann zuweilen optisch ermittelt werden. Bei dem vorliegenden Horizontalsichter haben wir — genau genommen — keine reine Gleichfälligkeitsscheidung, vielmehr eine Kombination von Prallscheidung auf der vibrierenden Aufgaberinne und von Gleichfälligkeitstrennung. Die groben Körner prallen auf der schwingenden Rinne mehrfach auf und werden mit größerer Geschwindigkeit abgeworfen als die Feingutkörner, deren Flugbahn stark gekrümmt ist. Aus Bild 17 ist zu entnehmen, wie mit Verschiebung der Trennzunge in die Minusrichtung, also entgegengesetzt der Strömungsrichtung,

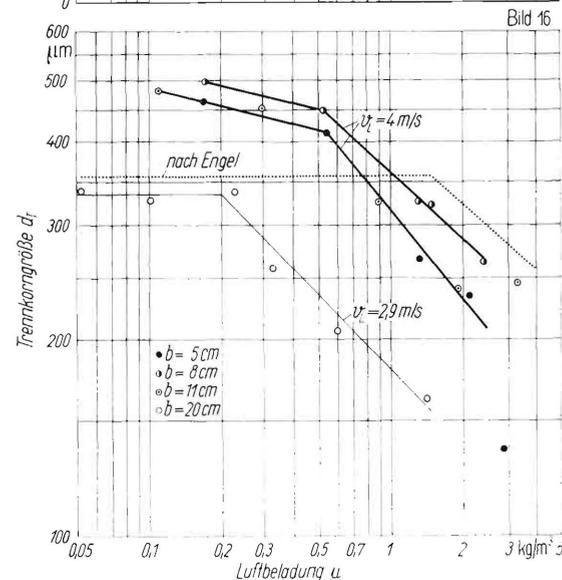
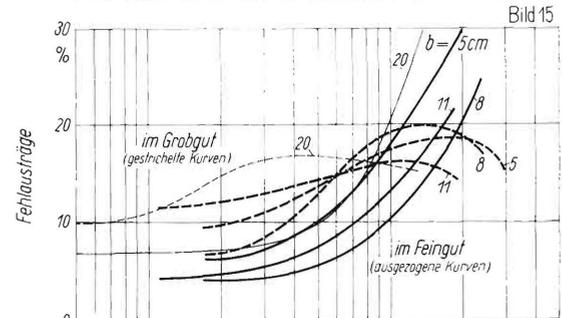
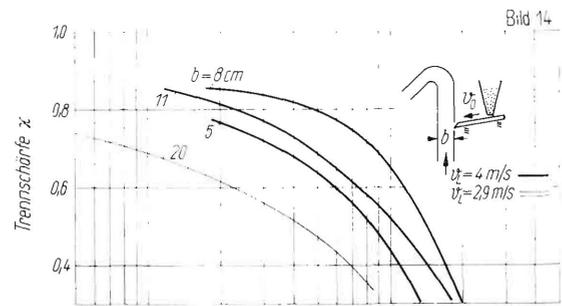


Bild 14 und 15. Versuche mit Steigsichter: Trennschärfe und Fehlausträge in Abhängigkeit von der Luftbeladung bei Variation der Schachtbreite.

Luftgeschwindigkeit $v_L = 4$ m/s (dick ausgezogene Kurven);
Luftgeschwindigkeit $v_L = 2,9$ m/s (dünn ausgezogene Kurven).
Die Einschubgeschwindigkeit des Sichtgutes beträgt 0,1 m/s.
Schwinggrinnenaufgabe

Bild 16. Versuche mit Steigsichter: Trennkorngröße d_T der Versuchsreihen in Bild 14 und 15 in Abhängigkeit von der Luftbeladung. Zum Vergleich ist eine Versuchsreihe aus der Arbeit Engel [5] punktiert eingezeichnet.

bei etwa $x = -4$ cm eine sehr gute Trennschärfe mit entsprechend geringen Fehlausträgen in Bild 18 erreicht wird. Ein weiterer Versuchspunkt mit noch größerer Verschlebung wurde nicht mehr aufgezeichnet, doch sind hier die Trennwerte schon wieder schlechter. In Anbetracht der hohen Beladung von $\mu = 0,6$ kg/m³ ist der erzielte α -Wert von beinahe 0,8 sehr günstig. Dabei sind die Luftgeschwindigkeit von 1 m/s und der Einschubwinkel von 60° als günstige Einstellwerte ermittelt worden. Bereits eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit auf 1,5 m/s verschlechtert das Trennergebnis wesentlich. Der Grund dürfte in der erhöhten Turbulenz bei der größeren Re-Zahl zu suchen sein.

Aus Bild 19 ist das günstige Belastungsverhalten des Horizontalsichters in bezug auf Trennschärfe und auch in bezug auf die Konstanz der Trennkorngröße zu entnehmen. Die Kennlinie

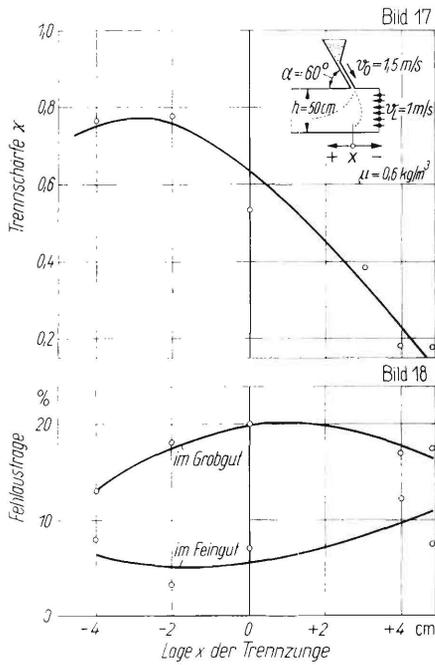
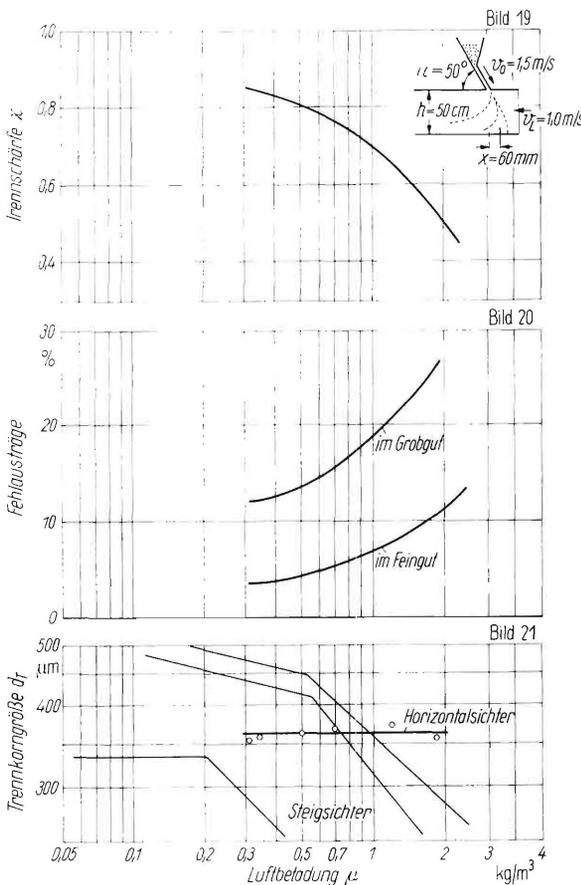


Bild 17 und 18. Versuche mit Horizontalsichter: Trennschärfe und Fehlausträge bei Verschiebung der Trennzunge um die Strecke x relativ zur Aufgabestelle.

Einschußgeschwindigkeit $v_0 = 1,5$ m/s
mittlere Luftgeschwindigkeit $v_L = 1,0$ m/s
Kanalhöhe $h = 500$ mm
Luftbeladung $\mu = 0,6$ kg/m³



Bilder 19 bis 21. Versuche mit Horizontalsichter: Trennschärfe, Fehlausträge und Trennkorngröße in Abhängigkeit von der Luftbeladung.

Einschußgeschwindigkeit $v_0 = 1,5$ m/s
mittlere Luftgeschwindigkeit $v_L = 1,0$ m/s
Kanalhöhe $h = 500$ mm

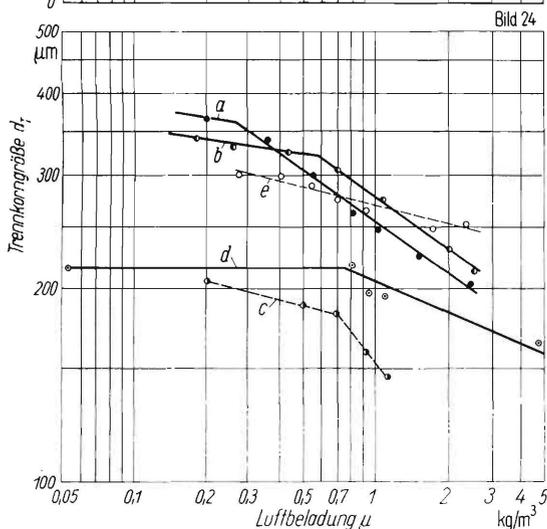
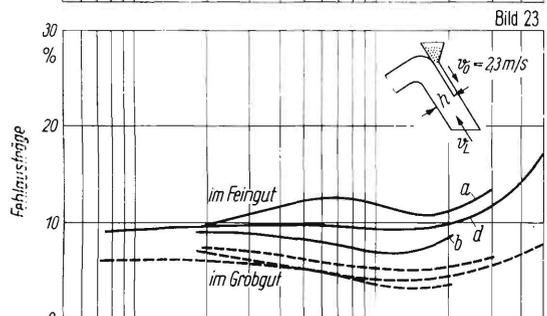
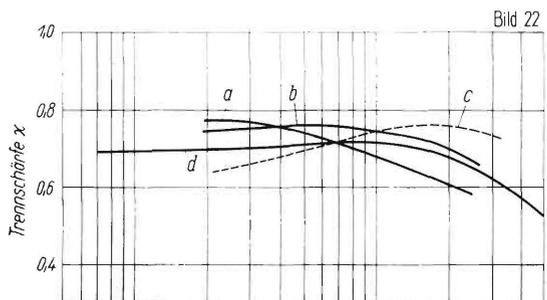
der Trennschärfe unterschreitet erst bei einer Luftbeladung von $0,5$ kg/m³ den Wert $\alpha = 0,8$. In **Bild 20** zeigt die Kennlinie der Feingutfehlausträge den vom Steigsichter her bekannten parabelförmigen Verlauf, steigt aber flacher an. Die Grobgutfehlausträge sind relativ groß und haben einen ähnlichen Verlauf. Eine Überraschung bietet die Kennlinie der Trennkorngröße in **Bild 21**: die Trennkorngröße ist nahezu unabhängig von der Beladung. Zum Vergleich sind die entsprechenden Kennlinien des Steigsichters dünn eingezeichnet. Diese schöne Eigenschaft gilt aber nur für die in den Bildern 19 bis 21 vorliegende Zuordnung der Einflußgrößen v_L , v_0 , a und h . Die guten Eigenschaften des Ablensichters erklären sich aus der ungehinderten Auffächerung der Teilchenbahnen auch bei höherer Gutskonzentration. Bei der technischen Anwendung ist die vorliegende Ausführung mit Ausstragsvorrichtungen für Fein- und Grobgut auszustatten. Ferner muß beachtet werden, daß die Möglichkeit, das Trennkorn durch Verschieben der Trennzunge zu variieren, wegen der erforderlichen Trennschärfe begrenzt ist.

Zum Schluß sollen die Ergebnisse des **Schrägsichters** betrachtet werden. Dieser wurde vom Verfasser aus der Gegenstrom-Kaskade [11] entwickelt. Aus der Erkenntnis, daß bei richtiger Dimensionierung bereits die Einzelstufe gute Sichterergebnisse erbringt, der bei Bedarf dann weitere Stufen nachgeschaltet werden können, entstand der vorliegende Einstufensichter. Es wurden die Gesichtspunkte der Auflösung und der Ordnung der Teilchenbahnen berücksichtigt, wobei die Gegenstromanordnung in Verbindung mit der relativ hohen Einschußgeschwindigkeit $v_0 = 2,3$ m/s und mit einer gewissen Vorsortierung der groben und feinen Körner auf der schrägen Rutsche gute Scheideergebnisse bei hohen Beladungen erwarten lassen. Wie aus **Bild 22 und 23** ersichtlich, wird diese Erwartung auch erfüllt. An dieser Stelle sei der Gegenstromsichter zur Getreidereinigung von *Segler* [12] erwähnt, der bei entsprechend großen Kanalabmessungen mit der hohen Einschußgeschwindigkeit von $8,5$ m/s arbeitet. In **Bild 22 und 23** sind verschiedene Kanalhöhen im gleichen Geschwindigkeitsbereich der Sichtluft eingetragen. Die α -Kennlinien verlaufen alle sehr flach, ebenfalls die Fehlgutkennlinien für Fein- und Grobgut. Es ist typisch für den Schrägsichter, daß die Feingutfehlausträge über den Grobgutkennlinien verlaufen. Diese weisen auch bis zu den höchsten Beladungen sehr niedrige Werte auf; ein Umstand, der mit der guten Spülung der Grobgutpartikeln im Gegenstrom zusammenhängt. Im niedrigen Beladungsbereich erreicht die Trennschärfe nicht ganz die Bestwerte des Steigsichters und des Horizontalsichters.

Der merkwürdige Verlauf der Fehlgutkennlinien, welche beide (fein und grob) ausgerechnet im Gebiet höherer Beladung ein Minimum aufweisen, ist folgendermaßen zu erklären: Im Aufprallbereich der Körner auf dem Sichterboden bildet sich eine Art Wirbelschicht, die bei geringen Gutmengen heftige Schwankungsbewegungen nach oben und unten ausführt. Erst mit steigender Aufgabemenge ist eine Dämpfung der Bewegung der Wirbelschicht zu beobachten, welche sich dann in einer verminderten Fehlaustragsmenge im Grob- und im Feingut ausdrückt. Besonders durch Grobgutkörner, welche aufwärts in den Feingutaustrag mitgerissen werden, entsteht ein Trennfehler. Das Grobkorn wird im Gegenstrom gut gespült und vom Feinkorn befreit, so daß dieses immer wieder die Chance bekommt, nach oben, also richtig, ausgetragen zu werden. Daher ist das Grobgut sauberer als das Feingut. Während beim Steigsichter die Regelung des Trennschnittes im wesentlichen durch die Luftgeschwindigkeit erfolgt, kann beim Schrägsichter zusätzlich zu dieser Maßnahme die Kanalhöhe geändert werden. Dabei ist eine wesentliche Verschlechterung des Trennergebnisses nicht zu erwarten. Wir haben durch Ändern der Kanalhöhe die Trennkorngröße in einem Bereich von etwa 400 μ m bis auf etwa 80 μ m durchvariiert. Im letzten Fall befinden wir uns bereits im Bereich der Fliehkraftsichtung mit entsprechend hohen v_L/v_0 -Werten, da die Feingutteilchen infolge der geringen Kanalhöhe sehr scharf umgelenkt werden. Die Trennkorngröße kann für den Fall der geringeren Luftbeladung für diese Ausführung des Sichters nach einer Faustformel berechnet werden:

$$d_T = k h v_L$$

Hierbei bedeutet d_T die Größe des Trennkorns in μm , k eine Konstante, h die Höhe des Sichtkanals in cm und v_L die mittlere Luftgeschwindigkeit in m/s.



Bilder 22 bis 24. Versuche mit Schrägsichter: Trennschärfe, Fehlausträge und Trennkorngröße in Abhängigkeit von der Luftbelastung mit der Kanalhöhe h als Parameter.

- Kurve a: $h = 15,7$ cm $v_L = 5,2$ m/s
- Kurve b: $h = 9,7$ cm $v_L = 6,0$ m/s
- Kurve c: $h = 9,7$ cm $v_L = 3,4$ m/s
- Kurve d: $h = 5,0$ cm $v_L = 6,4$ m/s
- Kurve e: $h = 2,5$ cm $v_L = 16,3$ m/s

Wenn man in Bild 22 die Trennschärfe nicht über der Luftbelastung, sondern über der Aufgabemenge A in kg/h aufträgt, fallen die Optima der x -Kennlinien ungefähr zusammen. Bei gleichbleibender Einschußgeschwindigkeit und Kanalbreite ist die Aufgabemenge proportional der Schichthöhe des Materials an der Aufgabestelle. Hieraus ist zu ersehen, daß unabhängig von der Kanalhöhe und von der Luftgeschwindigkeit eine für die Auflösung und Aufspaltung der Teilchenbahnen optimale Schichthöhe existiert. Ferner ist bemerkenswert, daß im Laufe der vorliegenden Versuchsreihen eine Verbesserung der x -Kennlinie durch Senken der Sichtluftgeschwindigkeit von 6 auf 3,4 m/s erreicht wird. Wahrscheinlich liegt die Begründung zumindest teilweise in der verminderten Turbulenz der Kanalströmung. Auf Grund der relativ hohen Einschußgeschwindigkeit ist beim vorliegenden Gegenstromverfahren durch Senkung der Sichtluftgeschwindigkeit keine Beeinträchtigung der Auflösung zu be-

fürchten. Die Kennlinien für die Trennkorngröße in Bild 24 haben einen ähnlichen Verlauf wie beim Steigsichter. Bemerkenswerterweise wird der erstrebte flache Verlauf bei einem Sichter mit geringer Kanalhöhe und mit hoher Luftgeschwindigkeit — also mit einem hohen v_L/v_S -Wert — erreicht. Dagegen zeigt die Kennlinie, welche bei niedriger Luftgeschwindigkeit erzielt wurde und den eben erwähnten hohen x -Werten entspricht, einen sehr steilen Abfall, wie das in der Linie c zum Ausdruck kommt.

Vergleich der untersuchten Sichter

In Bild 25 und 26 sind abschließend die drei Sichter in ihren besten Ergebnissen einander gegenübergestellt. Der Steigsichter erreicht einen Bestwert der Trennschärfe von $x = 0,84$, dieser sinkt dann aber bei einer Luftbelastung von $0,5 \text{ kg/m}^3$ auf den Wert $x = 0,8$ ab. Die Kennlinie des Horizontalsichters verläuft etwas flacher. Hier fällt vor allem auch der flachere Verlauf der Kennlinie des Feingutgehaltstrages in Bild 26 auf. Bemerkenswert ist der Schrägsichter, dessen „Arbeitsgebiet“ eigentlich erst bei einer Luftbelastung von 1 kg/m^3 beginnt, um bis 3 kg/m^3 und darüber hinaus zu reichen. Der an sich ungünstige Verlauf der Feingutfehllinien, der beim Schrägsichter über derjenigen des Grobgutes liegt, unterscheidet die betreffenden Kennlinien der anderen Sichter bereits bei einer Luftbelastung von $0,8$ bzw. 1 kg/m^3 .

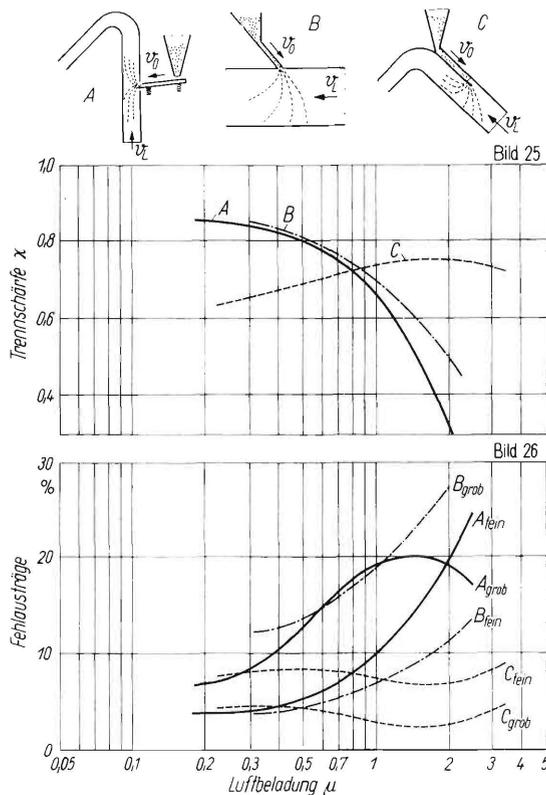


Bild 25 und 26. Vergleich der Trennschärfe und der Fehlausträge von Steig-, Horizontal- und Schrägsichter.

Eine zahlenmäßige Gegenüberstellung wichtiger Eigenschaften der drei Sichter ist schließlich aus **Tafel I** zu ersehen. In bezug auf die höchste Trennschärfe sind Steigsichter und Horizontalsichter dem Schrägsichter überlegen. Die Überlegenheit des Schrägsichters kommt erst bei hoher Beladung zum Ausdruck. Die spezifische Querschnittsbelastung der Sichtzone als reziproker Maßstab für die Baugröße liegt beim Schrägsichter etwa fünf mal so hoch wie beim Steigsichter, der wiederum höhere Werte aufweist als der Horizontalsichter mit seiner niedrigen Luftgeschwindigkeit. Die Konstanz der Trennkorngröße ist beim Steigsichter im überkritischen Gebiet sehr

Tafel 1. Gegenüberstellung wichtiger Eigenschaften von Steig-, Horizontal- und Schrägsichter.

	Steigsichter	Horizontalsichter	Schrägsichter						
Trennschärfenoptimum z_{\max} für eine Luftbelastung μ kg/m^3	0,85 0,1	0,82 0,5	0,76 1,5						
Belastungsverhalten: Luftbelastung μ für brauchbare Werte $z = 0,6$ kg/m^3	bis 0,5	bis 1,2	bis 3,0						
spez. Querschnittsbelastung σ $\text{kg/m}^2 \text{ s}$	3 bis 6	1,2	10 bis 30						
Konstanz der Trennkorngröße $d_T = f(\mu)$	starker Abfall bei Überlastung	gut	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>v_L/v_S</td> <td>Abfall</td> </tr> <tr> <td>klein</td> <td>stark</td> </tr> <tr> <td>groß</td> <td>gering</td> </tr> </table>	v_L/v_S	Abfall	klein	stark	groß	gering
v_L/v_S	Abfall								
klein	stark								
groß	gering								
Regelung der Trennkorngröße d_T	durch v_L	1. durch v_L (begrenzt) 2. durch Verschieben der Trennzunge	1. durch v_L 2. durch Änderung der Kanalhöhe						
Geschwindigkeitskenngröße v_L/v_S	2	0,5	3 bis 30						

schlecht. Ein flacher Verlauf wird beim Schrägsichter bei Einstellung mit hohen v_L/v_S -Werten erreicht. Bei entsprechender Auslegung der wichtigsten Einflußgrößen kann beim Horizontalsichter die erwünschte Konstanz der Trennkorngröße gut erreicht werden. Die Möglichkeit, die Trennkorngröße zu regeln, ist beim Steigsichter nur in einem begrenzten Bereich mit Hilfe der Luftgeschwindigkeit möglich. Dabei ist die Grenze nach unten durch die beeinträchtigte Auflösung bei niedriger Luftgeschwindigkeit gegeben. Der Horizontalsichter kann hinsichtlich der Trennkorngröße einmal durch Verschieben der Trennzunge und zum zweiten durch Änderung der Luftgeschwindigkeit geregelt werden. Auch hier sind beide Maßnahmen nur in beschränktem Umfang anwendbar, da die Trennschärfe dabei rasch abfällt. Die weiteste Regelmöglichkeit besitzt der Schrägsichter, dessen

Trennkorngröße durch Änderung der Luftgeschwindigkeit und der Kanalhöhe in weiten Grenzen ohne Gefährdung der Trennschärfe verstellt werden kann. Das letzte Vergleichsmerkmal, nämlich die Geschwindigkeitskenngröße v_L/v_S in der untersten Zeile, wurde aus den Versuchswerten errechnet. Überraschenderweise erhält der Steigsichter nicht den Wert $v_L/v_S = 1$, sondern 2. Dies ist eine Bestätigung der eingangs angegebenen Hypothese, daß auch beim Steigsichter die Vorstellung des Abwägprozesses nicht zutrifft, sondern daß auch hier Umlenkbeschleunigungen für den Scheidevorgang und damit für die Lage des Trennschnittes verantwortlich sind. Der niedrigste Wert von 0,5 für den Horizontalsichter und die hohen Werte von 3 bis 30 für den Schrägsichter entsprechen den Vorstellungen, die man sich auf Grund der beobachteten Teilchenbahnen macht.

Schrifttum

- [1] Brenner, G. W.: Beiträge zur Kenntnis des Sortiervorganges bei der Sichtung von Saatgetreide durch Windströme. RKTL-Schriften Heft 2. Berlin: Beuth-Verlag 1928.
- [2] Blenk, H.: Über die Sortierung durch Luftkräfte. Abh. Braunschweig. Wiss. Ges. I (1949) Nr. 1, S. 76/82.
- [3] Blenk, H.: Die Sortierung von Saatgut mit besonders gleichmäßigem Querwind. Grundlagen d. Landtechn. Heft 2. Düsseldorf: VDI-Verlag 1951. S. 5/12.
- [4] Blenk, H., u. H. Trienes: Weitere Untersuchungen zur Saattgutsortierung in horizontalem und vertikalem Wind. Grundlagen d. Landtechn. Heft 2. Düsseldorf: VDI-Verlag 1951. S. 17/25.
- [5] Engl, Otto: Untersuchungen zur Tragfähigkeit der Luft bei der Windsichtung. Diss. T. H. Aachen 1957.
- [6] Graßmann, P.: Physikalische Grundlagen der Chemie-Ingenieur-Technik. Bd. 1. Aarau, Frankfurt/M.: Sauerländer 1961. S. 484.
- [7] Wessel, J.: Schwerkraftwindsichter. Aufbereitungstechn. **3** (1963) H. 5, S. 222/30.
- [8] Eder, Th.: Probleme der Trennschärfe. Aufbereitungstechn. **1** (1961) S. 140.
- [9] Mayer, F. W.: Probleme der Erfolgsermittlung bei Trennvorgängen an körnigem Massengut. Chem.-Ing.-Techn. **32** (1960) S. 155/63.
- [10] Müller, K., u. J. Wessel: Berechnung von Teilchenbahnen im Windsichter mit dem elektronischen Analogrechner. Aufbereitungstechn. **3** (1963) H. 6, S. 235/42.
- [11] Wessel, J.: DP 1090497.
- [12] Segler, G.: Neues Verfahren zum Fördern, Entstauben, Entkäfern und Belüften von Getreide. Fördertechnik und Frachtverkehr (1935) S. 178/80.