

Schwebegeschwindigkeit

Hammer and Feather



Quelle: Youtube

Versuch 1

Hammer und Feder

Freier Fall

Ein fallender Körper wird durch die Gravitation gleichmäßig beschleunigt. Die Beschleunigung ist unabhängig von der Masse des Körpers. Dass schwere Körper schneller fallen als leichte, liegt nur am Luftwiderstand.

Die Erdbeschleunigung beträgt

$$g = 9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \quad \text{Erdbeschleunigung}$$

Es gelten die gleichen Gesetze wie bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung.

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \text{ (m)} \quad \text{Fallstrecke}$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \text{ (s)} \quad \text{Fallzeit}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad \text{Fallgeschwindigkeit}$$

$$v = g \cdot t \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad \text{Fallgeschwindigkeit}$$

Schwebegeschwindigkeit

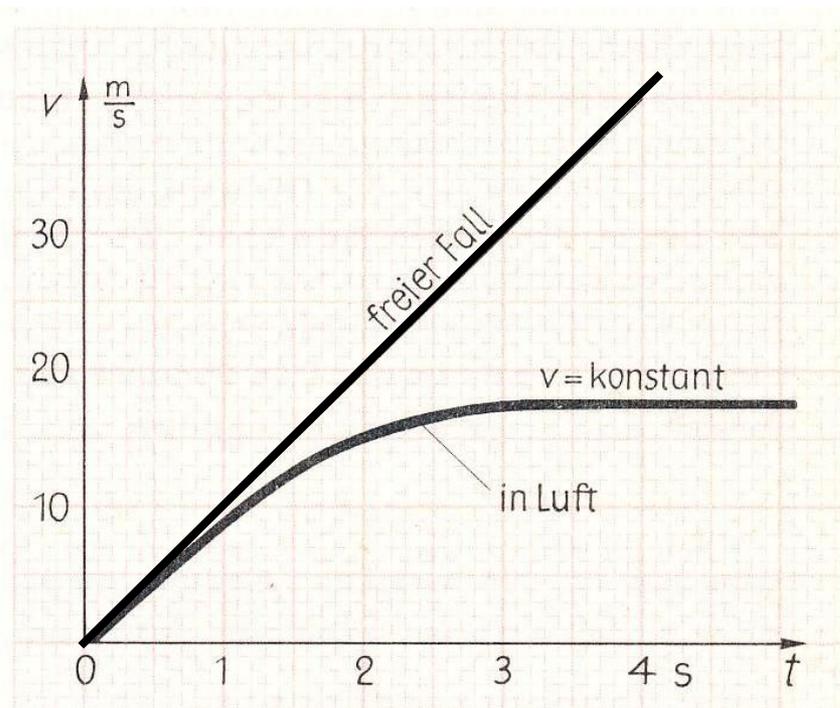
Die Schwebegeschwindigkeit ist ein Kennwert für das Bewegungsverhalten von Partikeln / Körpern in der Luft oder der Luftströmung.

Die Schwebegeschwindigkeit ist abhängig von der Form, Oberfläche, Größe und Gewicht des Körpers.

Im luftleeren Raum gibt es keine Schwebegeschwindigkeit. Auf dem Mond werden Gegenstände von der Gravitationskraft des Mondes nur angezogen und nicht durch Luft gebremst. Die Gravitationsbeschleunigung ist auf dem Mond kleiner als auf der Erde:

$$\text{Mond } b = 1,62 \text{ m/s}^2$$

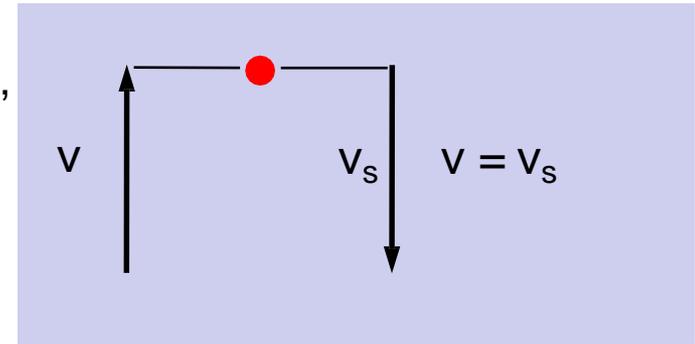
$$\text{Erde } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$



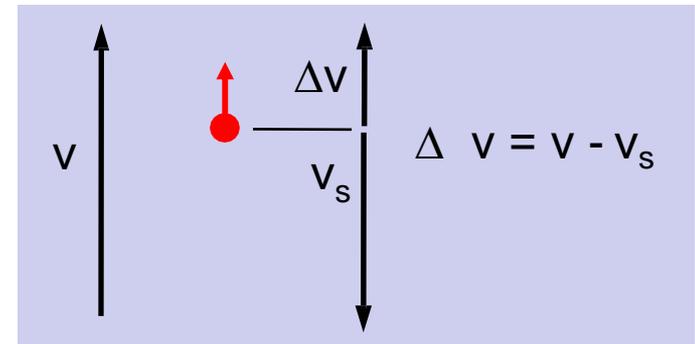
In der Luft fällt ein Körper nach einer Zeit mit konstanter Geschwindigkeit

Relativgeschwindigkeit am angeströmten Körper

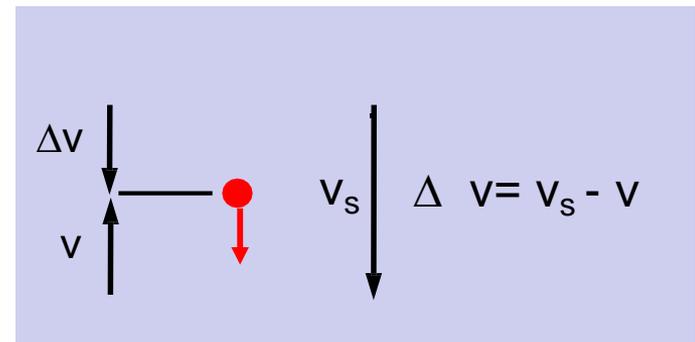
Besteht ein Gleichgewicht zwischen der Gewichtskraft von Partikel / Körper und der nach oben wirkenden Luftwiderstandskraft, so schwebt das Teilchen im Luftstrom, ohne seine Lage zu verändern. Die vertikale Strömungsgeschwindigkeit bei diesem Zustand wird als Schwebegeschwindigkeit v_s bezeichnet und entspricht der Endgeschwindigkeit v dieses Partikels im freien Fall.



Ist die Strömungsgeschwindigkeit v größer als die Schwebegeschwindigkeit v_s des Partikels, so wird er nach oben ausgetragen. Dies geschieht mit der Differenzgeschwindigkeit $\Delta v = v - v_s$.



Ist die Schwebegeschwindigkeit v_s des Partikels größer als die erzeugte Strömungsgeschwindigkeit v so bewegt er sich mit der Differenzgeschwindigkeit $\Delta v = v_s - v$ nach unten.



Grundlegende Arbeiten von Wissenschaftlern

Die grundlegenden Arbeiten leisteten hierzu

Gesetze des freien Falls

Galileo Galilei

1564 -1642



Gravitationsgesetze

Isaac Newton

1643 – 1727



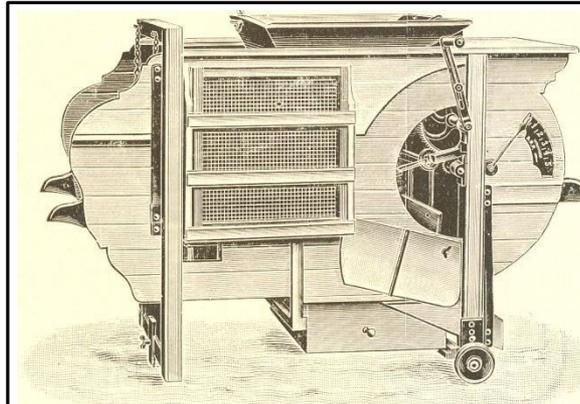
Schwebegeschwindigkeiten in der Landtechnik

In der Landtechnik ist die Schwebegeschwindigkeit von Bedeutung bei

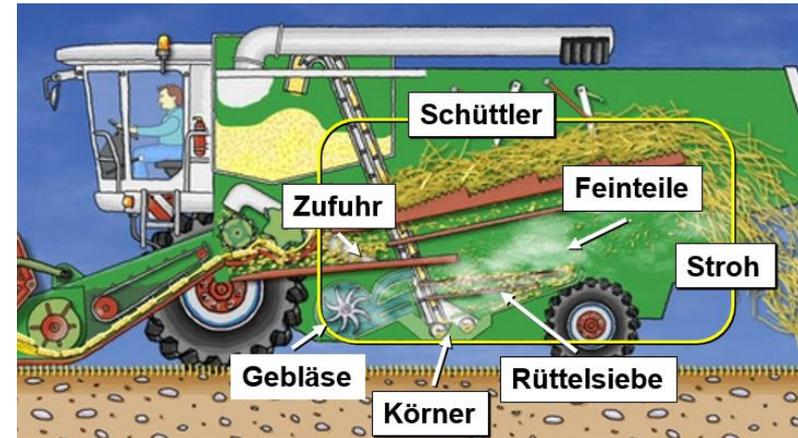
- der Trennung von Korn, Spreu und Verschmutzungen in Mähdreschern
- der Reinigung von Getreide in Reinigungsanlagen bei der Annahme in Mühlen
- der pneumatischen Förderung von Getreide, Saatgut und Dünger in Speicheranlagen oder mobilen Maschinen wie Sämaschinen und Pneumatikdüngerstreuern.
- (Winderosion)



Worfeln



Windfege



Getreidereinigung
Mähdrescher

Pneumatische Förderung des Saatguts in der Sämaschine



Kräfte am fallenden Körper

Die **Fallgeschwindigkeit im luftleeren Raum** ist unabhängig von Masse und Größe eines Körpers, beides taucht in den Gleichungen nicht auf (siehe Folie 4). Bei der Bewegung in der Luftmasse ändern sich die Verhältnisse. Tatsächlich wirken auf den fallenden Körper der Luftwiderstand, der Auftrieb und die Newtonsche Reibung. Es gilt die Gleichung

$$F_G = F_W + F_A + F_R$$

/ / | |
Gewichts- Luft - Newtonsche
kraft des wider - Reibung
Körper stand

Auftrieb

In dem betrachteten Wirkungsbereich sind Auftrieb und Newtonsche Reibung vernachlässigbar

$$F_A \Rightarrow 0 \quad F_R \Rightarrow 0$$

Der Luftwiderstand berechnet sich aus dem Staudruck $p = \frac{\rho}{2} v^2$ multipliziert mit der angeströmten Fläche und einem Luftwiderstandsbeiwert.

Kräfte am fallenden Körper

somit ergibt sich

$$F_W = c_W \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Luftwiderstand

$$F_G = m \cdot g$$

Gewichtskraft

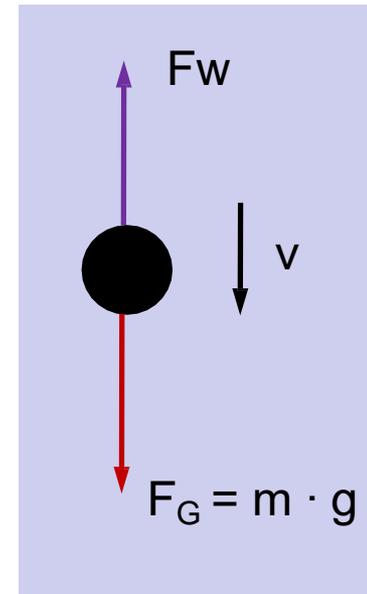
$$F_G = F_W$$

c_w : Luftwiderstandsbeiwert des angeströmten Körpers

A : projizierte Fläche des angeströmten Körpers

v : Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und umströmender Luft

ρ : Dichte der Luft

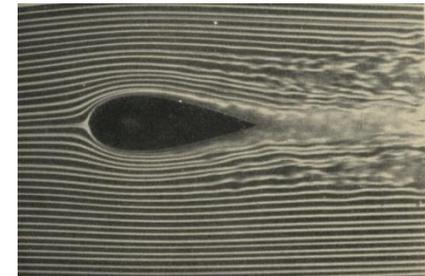
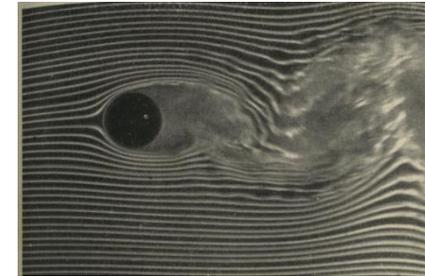


Kräfte am fallenden Körper

Luftwiderstandsbeiwerte

c_w - Werte

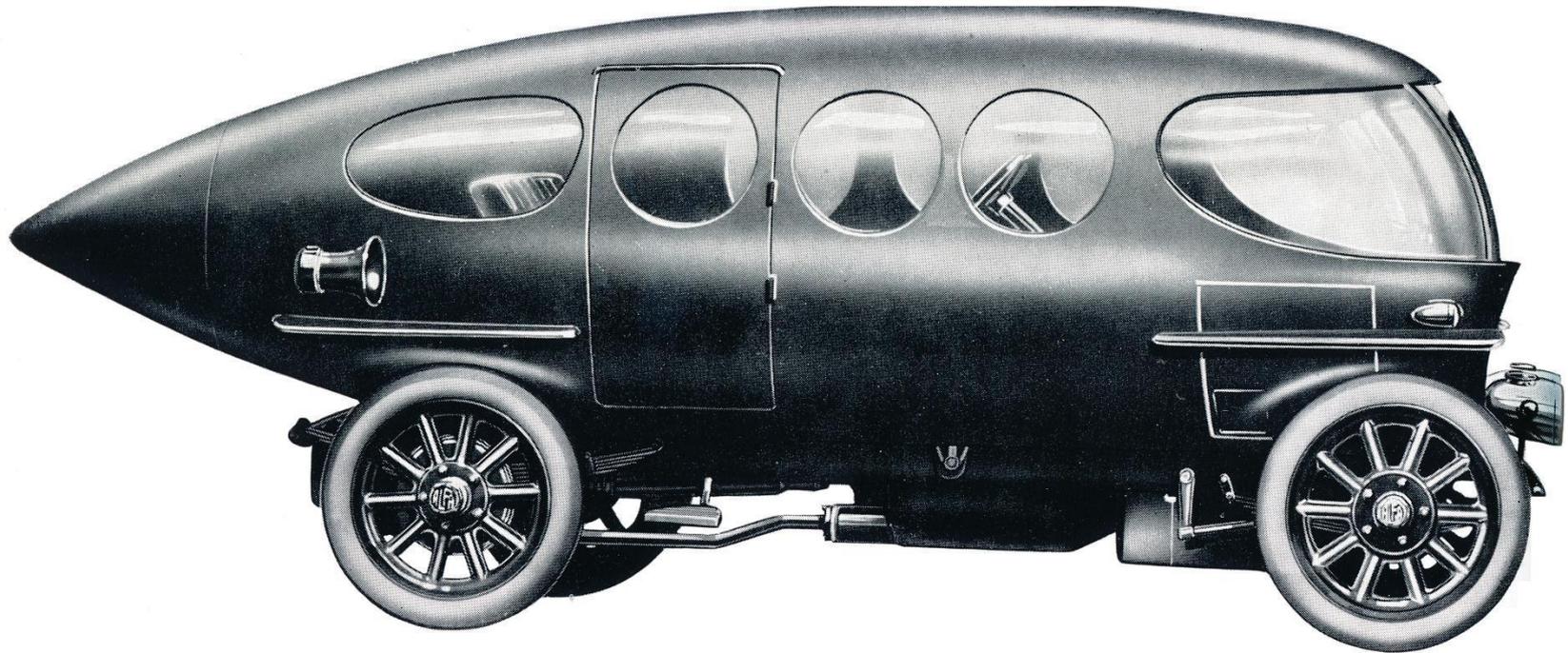
Wert	Form
1,33	Halbkugelschale, konkave Seite
1,1	runde Scheibe
0,8	LKW
0,78	stehender Mensch
0,7	Motorrad
0,55	Moderner LKW, Sattelzug
0,45	Kugel ($Re < 1,7 \cdot 10^5$)
0,18	Kugel ($Re < 4,1 \cdot 10^5$)
0,34	Halbkugelschale, konvexe Seite
0,3	PKW
0,08	Tragflügel beim Flugzeug
0,05	Wassertropfen
0,03	Pinguin, Hai



Der c_w – Wert ist abhängig von Form und Oberflächenbeschaffenheit des Partikels / Körpers

Auf den Körper wirkt dann der Luftwiderstand, welcher quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt.

Stromlinienförmiges Automobil



Alfa Romeo in Stromlinie 1913, 30 PS (Geschwindigkeit unbekannt).

Schlechter c_w -Wert, kleine angeströmte Fläche



Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit

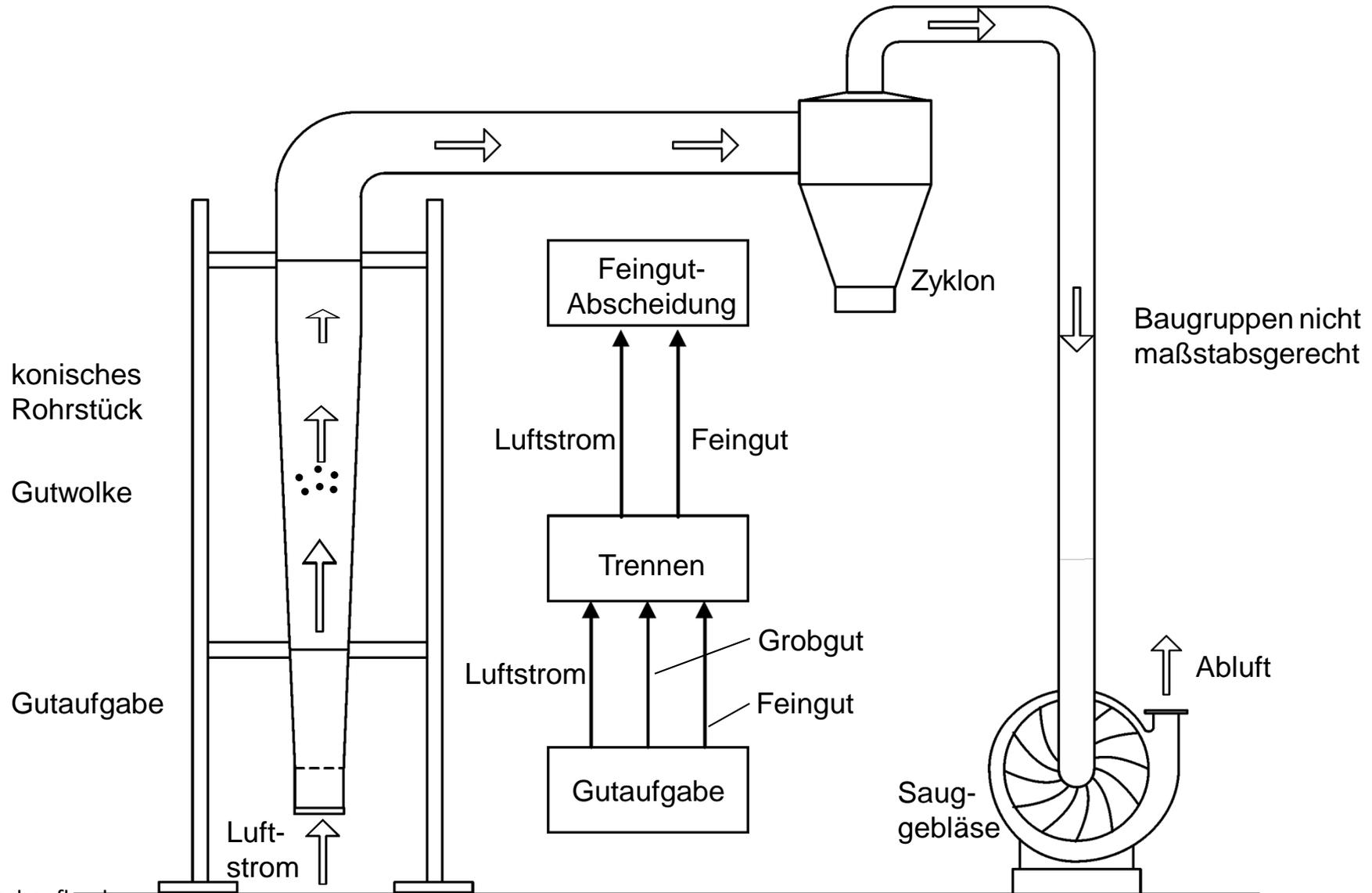
Die Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit von landwirtschaftlichen Partikeln ist mit einer pneumatischen Saugförderanlage möglich.

In eine vertikale Förderrohrleitung wird ein konisch erweitertes Rohrstück (Sichterrohr) aus durchsichtigen Material eingebaut. Durch den im konusförmigen Bereich ansteigenden Rohrquerschnitt verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung proportional zum Querschnitt (Kontinuitätsgleichung).

Ein Gebläse sorgt für den erforderlichen Unterdruck. Je nach örtlichen Durchmesser dieses Konus treten unterschiedliche Luftgeschwindigkeit auf. Von einem bestimmten Durchmesser an nach oben nimmt die Luftgeschwindigkeit aus Kontinuitätsgründen so weit ab, dass keine Förderung mehr gewährleistet ist. Wenn die Materialprobe von unten angesaugt wird, bleiben die Partikel idealerweise an einer bestimmten Stelle im Konus hängen.

Das Problem ist: die landwirtschaftlichen Partikel / Körper sind nicht gleichförmig und verändern ständig die Lage während der Bewegung im Luftstrom, d.h. :
Luftwiderstandsbeiwert und angeströmte Fläche verändern sich ständig. Es lässt sich deshalb kein Einzelwert darstellen. Zur Ermittlung einer mittleren Schwebegeschwindigkeit wird deshalb die Luftgeschwindigkeit in der Anlage schrittweise erhöht. Bei jedem Schritt wird eine bestimmte Menge der Partikel abgesaugt, die sich im Zyklon sammelt. Die abgesaugten Einzelmengen werden gewogen. Der Versuch wird dazu unterbrochen.. Man erhält dann eine Summenhäufigkeit, bei der sich eine mittlere Schwebegeschwindigkeit ablesen lässt.

Versuchsstand zur Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit



_ Versuch 2 **Trennung im konischen Rohr**

Messwerte zur Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit

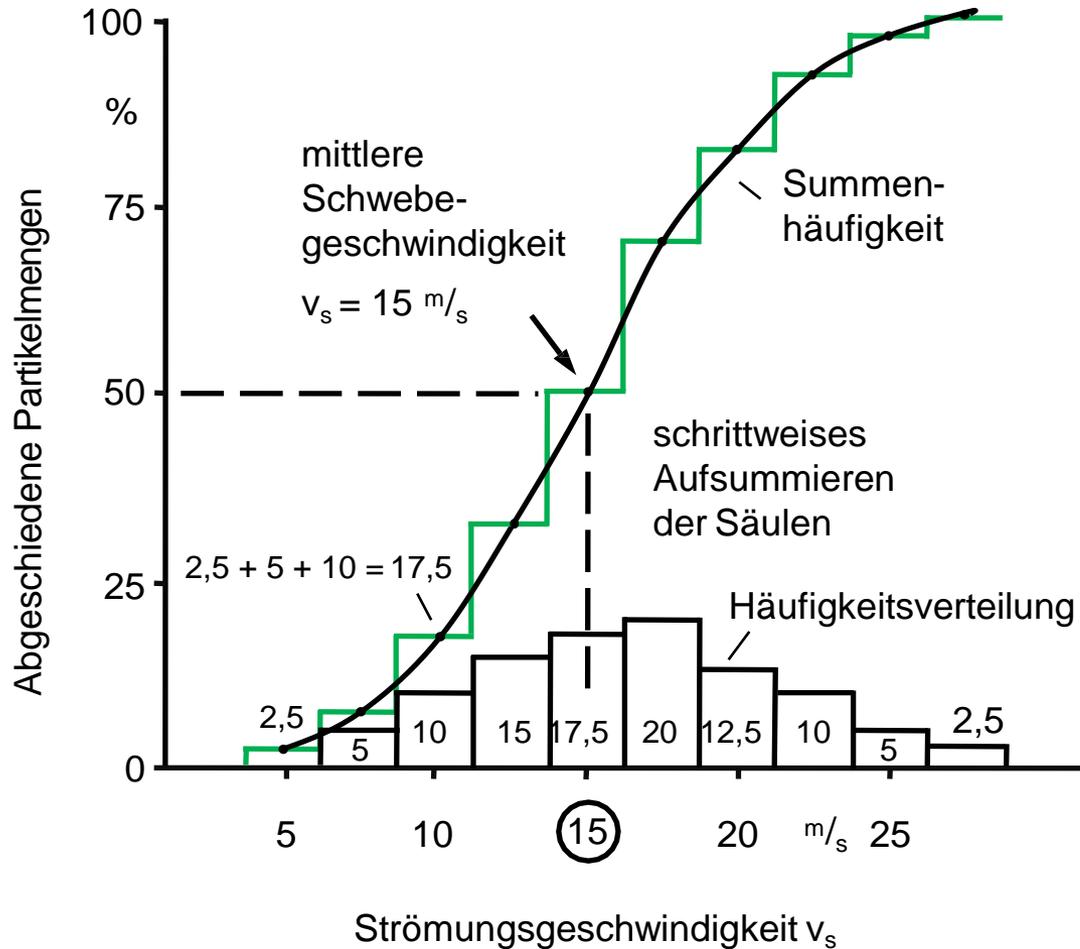
mittlere Strömungs - geschwindigkeiten	$\frac{m}{s}$	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5
abgeschiedene Massen	%										

Messwerte zur Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit

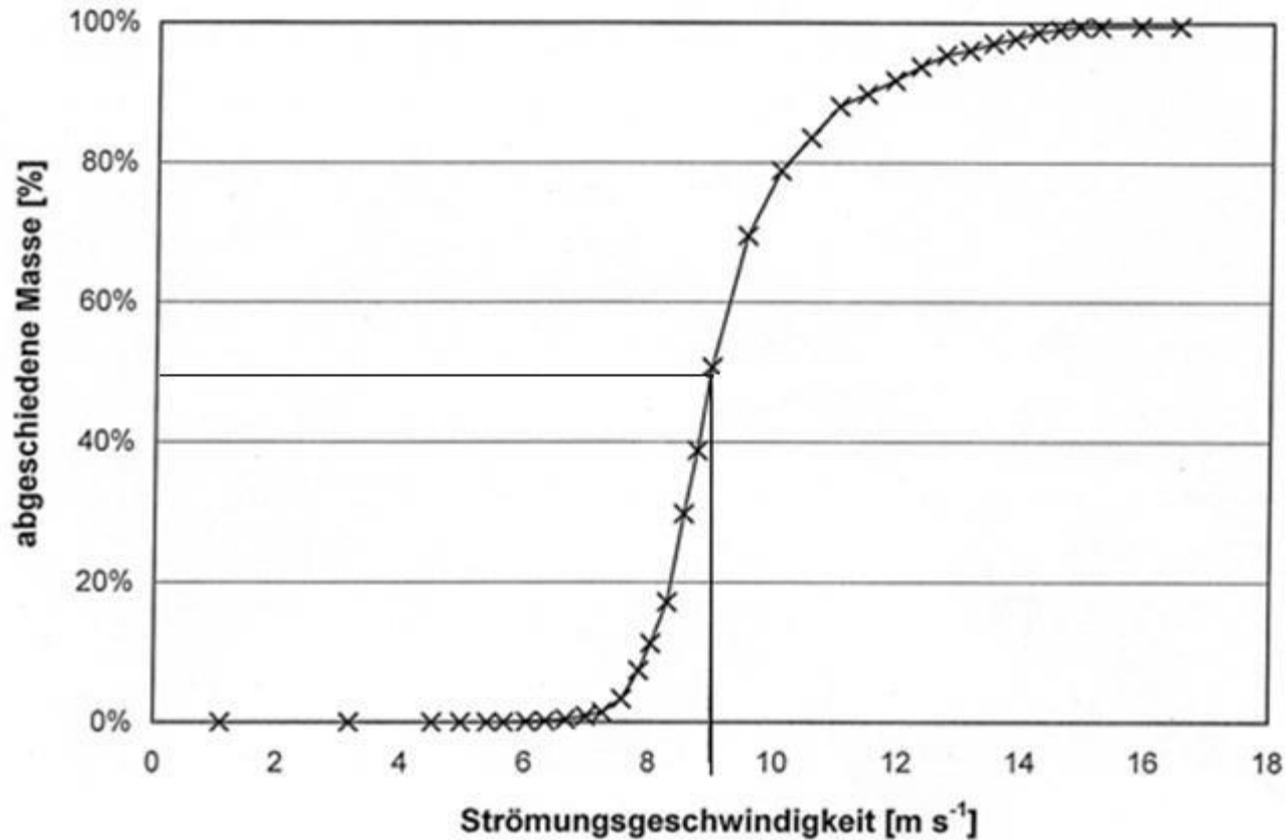
mittlere Strömungs - geschwindigkeiten	$\frac{m}{s}$	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5
abgeschiedene Massen	%	2,5	5	10	15	17,5	20	12,5	10	5	2,5

Schwebegeschwindigkeit

Graphische Ermittlung der Schwebegeschwindigkeit

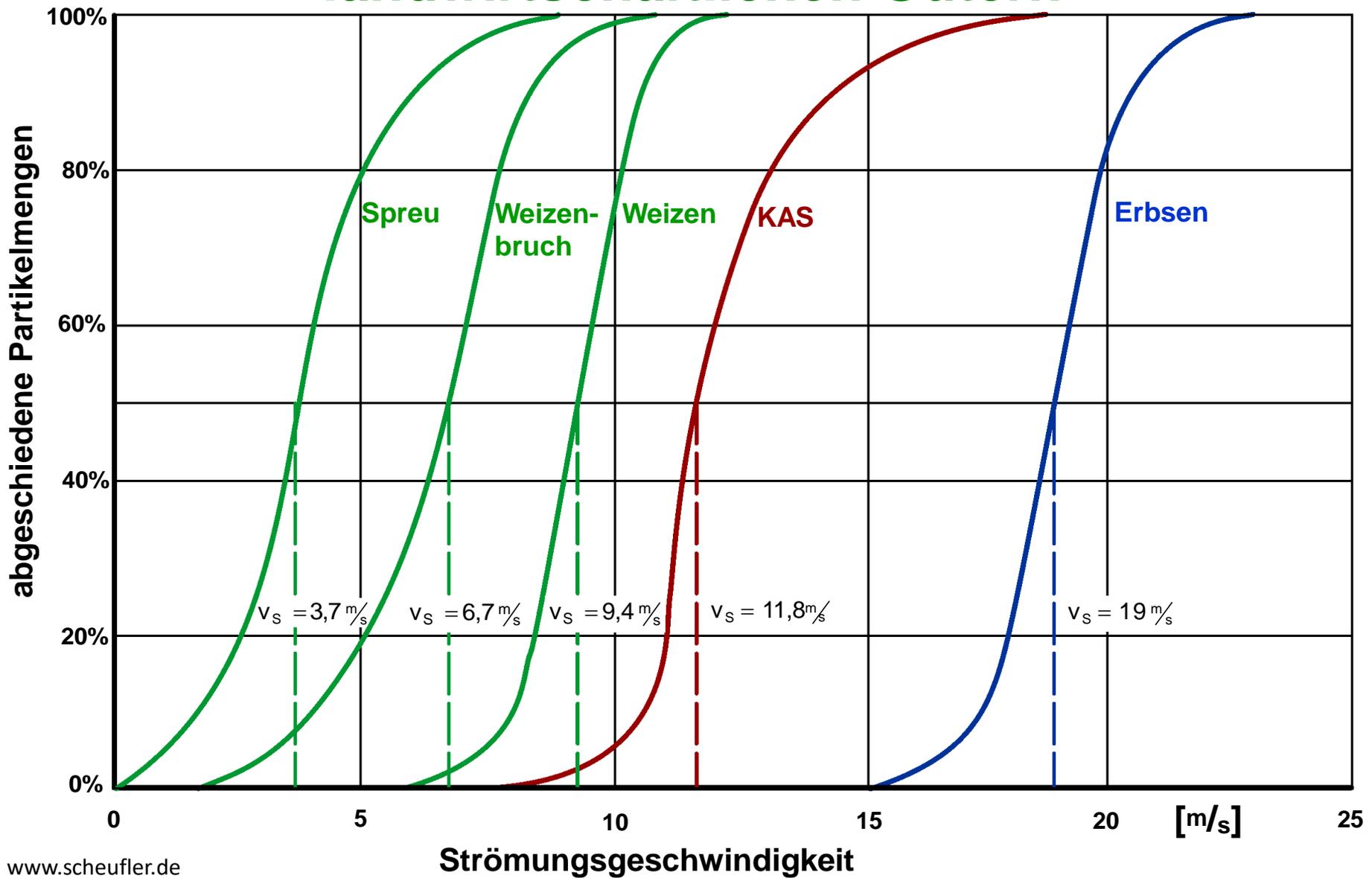


Schwebegeschwindigkeit



$$F_W = m \cdot g = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

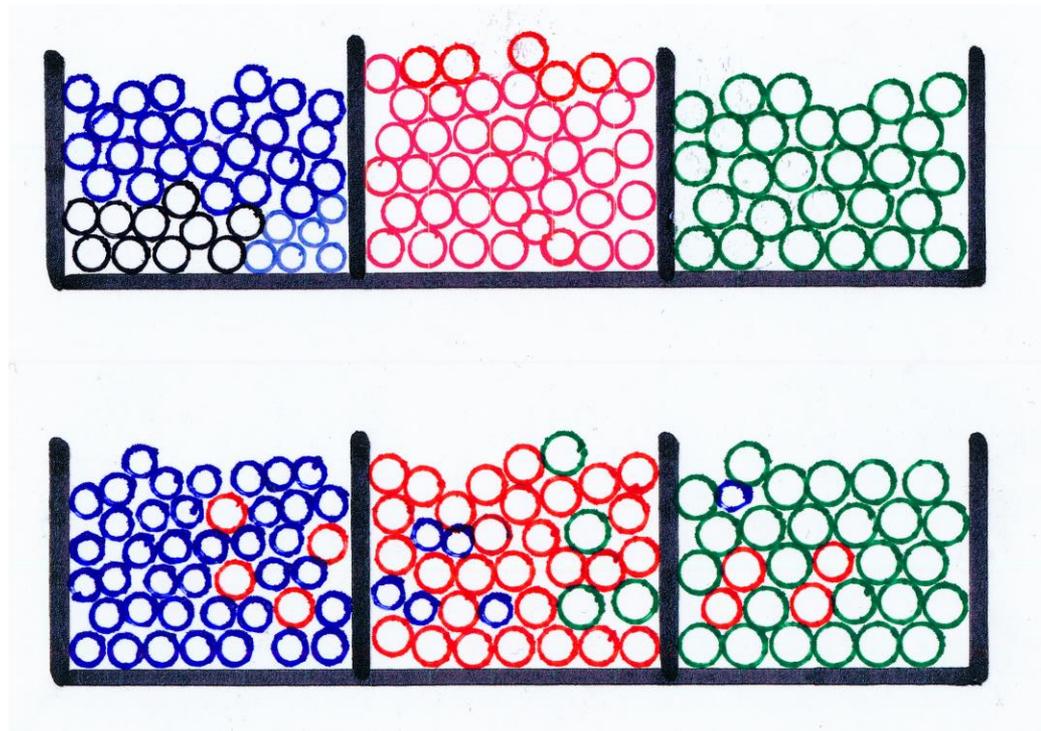
Schwebegeschwindigkeiten von landwirtschaftlichen Gütern



Trennschärfe

Um eine gute Reinigung mit Hilfe des Luftstroms durchzuführen, muss eine gute Trennschärfe erzielt werden.

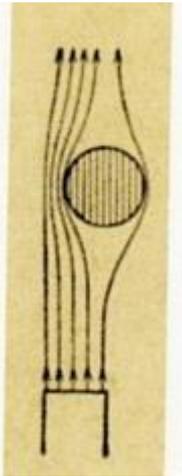
Unter Trennschärfe versteht man die Güte der Trennung eines Partikelkollektivs in einzelne Fraktionen. Eine ideale Scheidung mit 100% Trennschärfe liegt vor, wenn nach dem Trennvorgang sämtliche Partikel einer Merkmalsklasse in einer Fraktion liegen. Diese ideale Scheidung ist jedoch bei keinem technischen Verfahren der Sichtung erreichbar.



Versuch 3

Berechnung des c_w -Wertes

Tischtennisball
im Luftstrom



gemessene Werte

Masse Tischtennisball

$$m = \quad \text{g}$$

Radius Tischtennisball

$$r = \quad \text{cm}$$

Schwebegeschwindigkeit

$$v_s = \quad \text{m/s}$$

Berechnen

$$c_w =$$

bekannte Werte

Dichte der Luft

$$\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

Erdbeschleunigung

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Berechnung des c_w -Wertes

Die mittlere Schwebegeschwindigkeit v_s eines Düngers wurde messtechnisch ermittelt, ebenso die Reindichte und der mittlere Korndurchmesser mit Hilfe der Siebanalyse.

$$v_s = 8,9 \text{ m/s}$$

$$d_s = 3,73 \text{ mm}$$

$$= 0,00373 \text{ m}$$

$$\rho_R = 1,23 \text{ g/cm}^3 = 1230 \text{ kg/m}^3$$

Dichte der Düngerkörner

$$\rho_L = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

Dichte der Luft

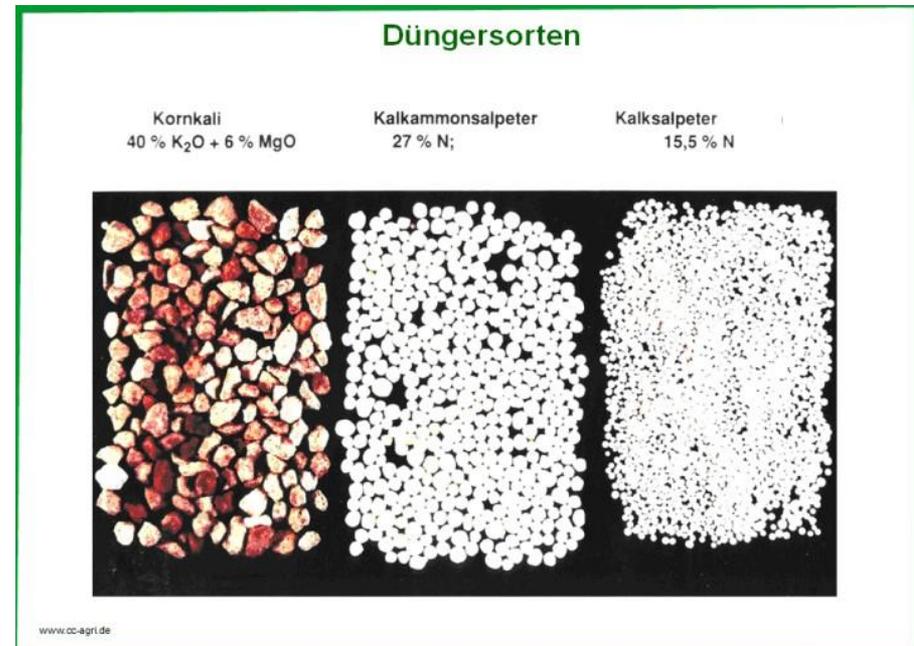
Die Gleichung

$$F_G = F_W$$

$$m \cdot g = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} v_s^2$$

aufgelöst nach

$$c_w = m \cdot g \cdot \frac{2}{\rho_L} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{v_s^2}$$



Berechnung des c_w -Wertes

Mit der vereinfachten Annahme, es handelt sich um einen kugelförmigen Körper

$$m = \rho_R \cdot V = \rho_R \cdot \pi \frac{4}{3} \frac{d_s^3}{8} = \rho_R \cdot \pi \frac{d_s^3}{6} \quad V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$A = \pi \frac{d_s^2}{4}$$

ergibt sich die Gleichung

$$c_W = \rho_R \cdot \pi \frac{d_s^3}{6} \cdot g \cdot \frac{2}{\rho_L} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_s^2} \cdot \frac{1}{v_s^2}$$

$$c_W = \frac{\rho_R}{\rho_L} \cdot g \cdot \frac{d_s^3 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 4}{6 \cdot \pi \cdot d_s^2} \cdot \frac{1}{v_s^2} = \frac{\rho_R}{\rho_L} \cdot g \cdot \frac{1}{v_s^2} \cdot d_s \cdot \frac{4}{3}$$

$$c_W = \frac{1230}{1,29} \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{8,9^2} \cdot 0,00373 \cdot \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}} = 1 \right]$$

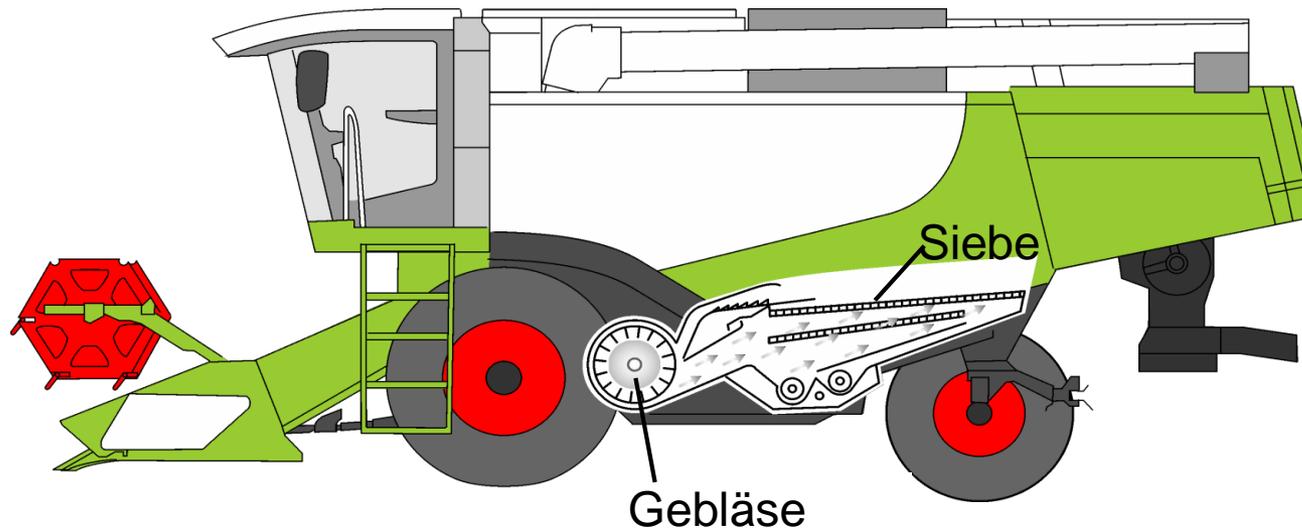
$$c_W = 0,59$$

Vergleich zur Kugel

$$c_W = 0,45$$

Reinigungssystem des Mähdreschers

In dem Reinigungssystem des Mähdreschers sind unterschiedliche Trennverfahren im Einsatz. Es sollen Körner von fremden Bestandteilen - Spreu, Grannen, Kurzstroh, Unkrautteilchen und leichten „toten Körnern“ - gereinigt werden. Die Reinigung besteht aus einem kombinierten Sieb-Druckwind-System. Das Dreschgut fällt durch verstellbare Siebe nach unten. Größere Bestandteile, wie Strohreste, werden ausgesiebt und nach draußen befördert. Der in der Stärke einstellbare Luftstrom bläst zwischen den Sieben hindurch. Kleinere und leichte Fremdbestandteile werden erfasst und gelangen ebenfalls zurück auf das Feld. Die übriggebliebenen Körner werden durch einen Elevator in den Korntank befördert.



Reinigungssystem des Mähdreschers

Dem Diagramm Schwebegeschwindigkeiten ist zu entnehmen, dass die mittleren Schwebegeschwindigkeiten von Weizenspreu und Weizenbruch im Bereich von $v_s = 3 \text{ m/s} - 7 \text{ m/s}$. Die Weizenkörner selbst liegen in einem mittleren Bereich von $v_s = 9 \text{ m/s} - 11 \text{ m/s}$

Es muss im Falle einer senkrecht gerichteten Strömung danach eine Luftströmung mit $v = 8 \text{ m/s}$ eingestellt werden, damit die Weizenkörner durch die Siebe fallen und Weizenspreu und Weizenbruch ausgeblasen werden. Da es sich hier um eine schräg gerichtete Luftströmung handelt, müssen speziell auf diesen Fall ausgerichtete experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, um die richtige Strömungsgeschwindigkeit zu ermitteln.

In Abhängigkeit von Gutfeuchte und Sorte verschieben sich die Grenzen.

Pneumatische Förderung

Bei der pneumatischen Förderung von Schüttgütern muss die Luftströmung deutlich höher sein als die Schwebegeschwindigkeit, um ein Verstopfen der Anlage zu vermeiden.

Richtwert $v/v_s = 2,5$ beispielsweise für Weizen $v_s = 9 \text{ m/s}$ erfordert $v = 23 \text{ m/s}$

Bei der horizontalen Förderung sollte möglichst ein verwirbelter Luftstrom vorliegen, damit es nicht zu Ablagemengen im Förderrohr kommt.

Hohe Luftgeschwindigkeiten garantieren zwar einen einwandfreien Transport, haben aber erhebliche Nachteile zur Folge:

Der durch das Fördergut hervorgerufene Verschleiß an der Rohrleitung ist wesentlich größer.

Es können sich erhebliche Kornbeschädigungen am Fördergut einstellen.

Es ist ein unnötiger hoher Leistungsbedarf des Gebläses zur Erzeugung des Luftstrom erforderlich.

Antriebsleistung für das Gebläse

Aus der Strömungslehre ist bekannt, dass sich die Antriebsleistung P eines Gebläses bei reiner Luftförderung zusammensetzt aus dem Produkt des Volumenstromes Q der Luft und dem gesamten aufzubringenden Druck dividiert durch den Wirkungsgrad η

$$P = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta}$$

Der Volumenstrom lässt sich wiederum ausdrücken als Produkt von Rohrquerschnitt A und Luftgeschwindigkeit v , d.h.

$$Q = A \cdot v$$

Die Energiegleichung von Bernoulli besagt, dass die Druckverluste im Rohr bei turbulenter Strömung proportional dem Quadrat der Luftgeschwindigkeit sind d.h.

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Antriebsleistung für das Gebläse

Danach ergibt sich, dass die Antriebsleistung proportional der Luftgeschwindigkeit in der dritten Potenz ist.

$$P = A \cdot v \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \frac{1}{\eta}$$

$$P = A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot v^3$$

$$P \sim v^3$$

Eine zu große Luftgeschwindigkeit im Rohr erfordert also einen beträchtlichen Leistungsmehraufwand, d.h.: wenn man die Luftgeschwindigkeit verdoppelt (2-fach), dann steigt die Antriebsleistung um den 8 - fachen Wert.