

maßgebend, die eine im Vergleich zur Vergangenheit dämpfende Wirkung ausüben¹³⁾:

1. Die Zahl der Kleinbetriebe mit hohem Maschinenbestand je Flächeneinheit nimmt zügig ab.
2. Der Anteil der Nebenerwerbsbetriebe nimmt zu mit der vermutlichen Tendenz, in stärkerem Maße Lohnmaschinen in Anspruch zu nehmen.
3. In den kapitalkräftigen Vollerwerbsbetrieben nimmt die Tendenz zu überbetrieblicher Nutzung hoch spezialisierter Aggregate auch deshalb zu, weil unter den Investitionsalternativen der Bodenzukauf stärker als bisher mit der Eigenmechanisierung konkurriert.
4. In den kapitalschwachen, vorwiegend Grünlandbetrieben, wird das weitere Tempo der Mechanisierung stark durch die schlechte Einkommenslage begrenzt.

¹³⁾ Vgl. dazu die in wesentlichen Punkten ähnlichen Konsequenzen der Analyse von *Meinhold, Hollmann* und *Neander* [9].

Schrifttum

Bücher sind mit ● angegeben

- [1] ● *Cohen, K. J., and R. M. Cyert*: Theory of the firm: resource allocation in a market economy. Englewood Cliffs, N. J. 1965.
- [2] ● *Fleischhauer, E.*: Mögliche Verhaltensweisen der Nebenerwerbs- und Zuerwerbslandwirte beim Angebot. In: Das Marktangebot der Neben- und Zuerwerbslandwirte. Arb. d. DLG Bd. 120. Frankfurt/M. 1969. S. 22/36.
- [3] ● *Heidhues, T.*: Entwicklungsmöglichkeiten landwirtschaftlicher Betriebe unter verschiedenen Preisannahmen. Ber.üb. Landw. 181. Sonderheft. Hamburg, Berlin: Parey 1966.
- [4] ● *Heidhues, T.*: Dynamik der Anpassung in der Landwirtschaft. In: Landwirtschaftliche Marktforschung in Deutschland. München-Basel-Wien: Bayer. Landw. Verl. 1967.
- [5] *Heidhues, T.*: Voraussetzungen und Möglichkeiten einer Neuorientierung in der Agrarpolitik. Agrarwirtschaft Sonderheft 33. Hannover 1969. S. 5/35.
- [6] *Hochstein, H. J.*: Die Bestimmungsgründe der Nachfrage nach Ackerschleppern in der Bundesrepublik Deutschland. Agrarwirtschaft 18 (1969) H. 7, S. 217/28.
- [7] *Irwin, G. D.*: A comparative review of some firm growth models. Agric. Economics Res. 20 (1968) No. 3, S. 82/100.
- [8] KTBL-Taschenbuch für Arbeits- und Betriebswirtschaft. Daten für die Betriebskalkulation in der Landwirtschaft. Hiltrup 1969.
- [9] *Meinhold, K., P. Hollmann* und *E. Neander*: Die Nachfrage nach Landmaschinen im Strukturwandel der Landwirtschaft. Grundle. Landtechn. 18 (1968) Nr. 1, S. 1/10.
- [10] *Neander, E.*: Kritische Anmerkungen zu den Berichten der Bundesregierung über die Lage der Landwirtschaft. Agrarwirtschaft 18 (1969) H. 7, S. 209/16.
- [11] *Plate, R.*: Die Landwirtschaft in einer kapitalintensiven Wirtschaft. Landbauforsch. Völkenrode 10 (1960) H. 1, S. 4.
- [12] *Plate, R.,* und *E. Woermann* unter Mitarbeit von *D. Grupe*: Landwirtschaft im Strukturwandel der Volkswirtschaft. Agrarwirtschaft. Sonderheft 14. Hannover 1962.
- [13] ● *Schaefer-Kehnert, W.*: Die Kosten des Landmaschineneinsatzes. Ber. üb. Landtechn. H. 74, München-Wolfratshausen: Neureuter Verl. 1963.
- [14] *Schmitt, G.*: Von der Agrarstrukturpolitik zur Politik der integralen Landentwicklung. Beilage zu: Innere Kolonisation 17 (1968) H. 7.
- [15] *Uhlemann, P.*: Theorie und Ermittlung des Investitionsverhaltens im Agrarbereich. Agrarwirtschaft 18 (1969) H. 5, S. 149/61.
- [16] ● *Weinschenk, G.,* und *K. Meinhold*: Landwirtschaft im nächsten Jahrzehnt. Vorschläge zur künftigen Agrarpolitik in der Bundesrepublik Deutschland. Stuttgart-Degerloch: Seewald 1969.
- [17] ● *Werschnitzky, U., F. W. Fuß* und *L. Hofmann*: Nebenberufliche Landbewirtschaftung in sechs Gebieten der Bundesrepublik. I. Untersuchungsabschnitt. Ber. üb. Landw. 180. Sonderheft. Hamburg, Berlin: Parey 1965.
- [18] ● *Werschnitzky, U.,* und *E. Fleischhauer*: Nebenberufliche Landbewirtschaftung. Ber. üb. Landwirtsch. 184. Sonderheft. Hamburg, Berlin: Parey 1968.
- [19] ● *Willer, H.*: Technischer Fortschritt und Landwirtschaft. Formen und Messung des technischen Fortschritts. Hamburg, Berlin: Parey 1967.
- [20] Landwirtschaftl. Wandlungen im Arbeitskräftebestand und im Arbeitsaufwand der landwirtschaftlichen Betriebe von 1956/57 bis 1966/67. Wirtschaft u. Statistik (1968) S. 313.
- [21] Landwirtschaftl. Landarbeitskräfteerhebung für Juli 1968. Methode und Ergebnisse. Wirtschaft u. Statistik (1969) S. 433.

DK 613/614:631.362.3

Der Einsatz von Entstaubern in der Landtechnik

Physikalische Grundlagen der Staubabscheidung

Von **Hans-Jürgen Smigerski**, Braunschweig-Völkenrode¹⁾

Aus den Arbeiten des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

Die fortschreitende Technisierung unserer Umwelt hat in den letzten Jahrzehnten zu einer bedrohlichen Zunahme luftfremder Stoffe in der Atmosphäre geführt. Die Hauptursachen der Luftverschmutzung sind in der wachsenden Produktion staubförmiger Massengüter und in der teils unzureichenden oder ganz fehlenden Staubbekämpfung bei staubbildenden Arbeitsverfahren begründet. Während in der Grundstoff- und weiterverarbeitenden Industrie bereits beachtliche Erfolge bei der Verringerung der Staubemission erzielt wurden, sind die Möglichkeiten zur Schaffung lufthygienischer Arbeitsbedingungen in Bereichen mit nicht ständiger Staubgefährdung, wie z. B. in der Landwirtschaft, noch nicht voll genutzt. Bemühungen zur Luftreinhaltung sind hier nicht nur auf die Verringerung akuter Staubgefahren, sondern in Hinblick auf steigende Ansprüche an den Arbeitskomfort auch auf die Vermeidung von Staubbekämpfungen zu richten.

Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Smigerski ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institutes für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Inhalt

- 1 Einleitung
 - 1.1 Staubquellen und Staubprobleme in der Landtechnik
 - 1.2 Maßnahmen zur Staubbekämpfung
- 2 Physikalische Grundlagen der Entstaubung
 - 2.1 Beurteilung der Abscheidung
 - 2.2 Kräfte auf Staubteilchen in Gasen
 - 2.3 Abscheidewirkung und Berechnung von Entstaubern
 - 2.31 Schwerkraftentstauber
 - 2.32 Fliehkraftentstauber
 - 2.33 Elektroentstauber
 - 2.34 Filtrationsentstauber
 - 2.35 Waschentstauber
- 3 Fraktionsentstaubungsgradkurven verschiedener Entstauber
- 4 Wirtschaftlichkeit von Entstaubungsanlagen
- 5 Zusammenfassung
- 6 Schrifttum

¹⁾ Vorgetragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Braunschweig am 3. Oktober 1969.

1 Einleitung

Was ist Staub? Unter Staub als Schwebstoff versteht man die in einem Gas dispergierten Stoffe beliebiger Form, Struktur und Dichte [35]. Nach der Teilchengröße lassen sich die Stäube in drei Klassen einteilen:

- Grobstaub > 10 μm ,
- Feinstaub 10 bis 1 μm und
- Feinststaub < 1 μm .

1.1 Staubquellen und Staubprobleme in der Landtechnik

Staubförmige Verunreinigungen sind stets in wechselnder Zahl und Größe in der atmosphärischen Luft vorhanden. Diese sogenannten Schwebstoffe setzen sich aus natürlichen und technischen Stäuben zusammen.

Naturbedingte Stäube sind:

1. organische Stäube (Blütenstaub, Pilzsporen, Samen, Viren),
2. anorganische Stäube (geologischer Staub).

Zu den technisch bedingten Stäuben gehören:

1. Verarbeitungs- und Bearbeitungsstäube (staubförmige Maschengüter, Vermahlungs- und Abriebstaub),
2. Feuerungsstäube (Flugstaub).

In Bild 1 sind einige häufig vorkommende Stäube natürlicher und technischer Herkunft, zusammen mit den zumeist angewandten Entstaubungsverfahren, aufgeführt.

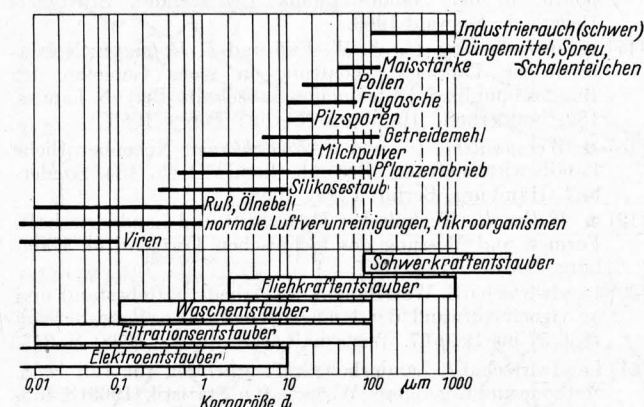


Bild 1. Korngrößenbereiche häufig vorkommender Stäube mit den wichtigsten Entstaubungsverfahren.

Luftverunreinigungen bedeuten eine ständige Gefahr für Lebewesen und technische Anlagen. Besonders luftansaugende Maschinen wie Kompressoren und Verbrennungsmotoren unterliegen erhöhtem Verschleiß, wenn in der Ansaugluft abrasive Stäube enthalten sind. Ebenso können Funktionsstörungen an Maschinen durch behinderte Wärmeabfuhr infolge Staubaufsatzes auftreten. Nicht zuletzt sei auf die Gefahr von Staubexplosionen, besonders in der Müllereitechnik, hingewiesen. Die schädliche Wirkung von Staub auf den Menschen liegt hauptsächlich in der Erkrankung der Haut, der Speise- und Atmungswege, wobei die Staublung die gefürchtetste Krankheit ist.

Das Staubrisiko in der Landwirtschaft ist durch den hohen Mechanisierungsgrad und die Verwendung chemischer Stäube- und Sprühmittel in den letzten Jahren ständig gestiegen. Während der Nachweis von Erkrankungen in der Landwirtschaft wegen der sehr stark wechselnden Staubverhältnisse und Expositionszeiten der betroffenen Personen nur statistisch geführt werden kann, sind Erkrankungen einzelner Personen eingehender untersucht worden.

Als spezifische Erkrankungen in der Landwirtschaft durch Schimmelpilze, Bakterien und Quarzstaub sind Fälle von Farmer-, Getreide- und Hanfstaublunge sowie Bronchitis und andere Lungenschädigungen bekanntgeworden [1; 6; 8; 12; 15; 23; 24; 26; 32; 33]. Auch wenn eine Beeinträchtigung der Gesundheit nicht in jedem Fall nachzuweisen ist, können Luftverunreinigungen in der Atemluft das Wohlbefinden und die Arbeitsleistung herabsetzen.

Die größten Staubprobleme in der Landwirtschaft bestehen bei der Vorbereitung des Bodens und der Ernte verschiedener

landwirtschaftlicher Produkte. Beim Anbau von Mais und Zuckerrüben sind z. B. Staubkonzentrationen bis zu 80 mg/m³ im Atembereich gemessen worden [14]. Beim Mähdrusch kann mit ähnlichen Verhältnissen gerechnet werden. Da der Staub in der Landwirtschaft bis zu 60% mineralischen Ursprungs ist und bis zu 20% Quarz enthält [14], ist eine Staubgefährdung vorhanden. Als unbedenklich gelten Werte, die unter den sogenannten MAK-Werten liegen (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration bei täglich achtstündiger Exposition). Für Stäube mit Gehalten an freier Kieselsäure (Quarz) von 10 bis 70%, wie sie z. B. bei den meisten Bodenarbeiten vorliegen, beträgt der MAK-Wert nur 2 mg/m³ [16]. Getreidestaub mit etwa 6 bis 8% Quarzanteil [22] ist bis zu Konzentrationen von 4 mg/m³ unbedenklich. Da die gemessenen Staubkonzentrationen von 80 mg/m³ erheblich die MAK-Werte überschreiten, ist eine Verringerung der Staubbelastung hierbei unerlässlich.

Weitere Staubrisiken, die sich leichter verringern lassen, bestehen bei der Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte. Die wichtigsten Staubquellen sind hier die Grundverfahren wie Sortieren, Klassieren, Mischen, Zerkleinern, Fördern und Trocknen.

Verwendete Formelzeichen

a	Konstante der Korngrößenverteilung
c_w	Widerstandsbeiwert
d	Durchmesser eines kugelförmigen Teilchens, Korngröße
d_F	Faserdurchmesser
d_K	Kapillardurchmesser
d_T	Tropfendurchmesser
d_t	Trennkorn (Korngröße, die zu 50% abgeschieden wird)
e_F	Breite des von einer Faser gereinigten Gasstromes
e_T	Durchmesser des von einem Tropfen gereinigten Gasstromes
g	Schwerkbeschleunigung
i	spezifischer Sprühstrom
l_F	Dicke der Filterschicht
l_K	Länge der Kapillaren
Δp	Druckverlust eines Entstaubers
r	Radius
r_a	Außenradius eines Zyklons
r_i	Tauchrohrradius, Radius der fiktiven Trennfläche eines Zyklons
s	Sprühabstand
t	Aufladungszeit im Sprühfeld
t_0	Zeitkonstante der Aufladung
v	Anströmgeschwindigkeit
v_d	auf Stirnfläche eines Zyklons bezogene Gasgeschwindigkeit
v_r	radiale Gasgeschwindigkeit
v_D	Aufprallgeschwindigkeit
v_L	mittlere Gasgeschwindigkeit in einem Abscheider
v_K	Gasgeschwindigkeit in den Kapillaren
w	Geschwindigkeit eines Staubeilchens
w_r	radiale Wanderungsgeschwindigkeit eines Staubeilchens
w_t	Tangentialgeschwindigkeit eines Staubeilchens
w_K	effektive Wanderungsgeschwindigkeit
w_R	Relativgeschwindigkeit der Feststoffteilchen in den Gasblasen
A	Auftriebskraft
C	Zyklonkonstante
D	Durchmesser der Gasblasen
E	elektrische Feldstärke im Abscheider
F	elektrostatische Feldkraft
G	Gewichtskraft
H	Abscheiderhöhe
K_T	Kontaktleistung (Energie/Gasvolumen)
L	Abscheiderlänge
M_{ab}	abgeschiedene Staubmasse
M_{Rein}	im Reingas verbliebene Staubmasse
M_{Roh}	mit dem Rohgas zugeführte Staubmasse
Q	Ladung eines Staubeilchens
R_{ab}	Rückstandssummenkurve des abgeschiedenen Staubes
R_{Rein}	Rückstandssummenkurve des Reingasstaubes
R_{Roh}	Rückstandssummenkurve des Rohgasstaubes
Re	Reynoldszahl
T	Trägheitskraft
U	Spannung zwischen zwei Elektroden
W	aerodynamische Widerstandskraft
Z	Zentrifugalkraft
ϵ	Dielektrizitätskonstante des Staubes
ϵ_F	Entstaubungsgrad einer Einzelfaser
ϵ_T	Entstaubungsgrad eines Wassertropfens
η_{ges}	Gesamtentstaubungsgrad
$\eta_F(d)$	Fraktionsentstaubungsgrad
η_L	dynamische Zähigkeit des Gases
η_W	dynamische Zähigkeit der Flüssigkeit
κ	Konstante der Korngrößenverteilung
ξ	Apparatekonstante eines Wäschers
q_F	Faserdichte
ρ_K	Dichte der Staubeilchen
ρ_L	Dichte des Gases
ρ_P	Packungsdichte des Filtermaterials

1.2 Maßnahmen zur Staubbekämpfung

Die Staubbekämpfung besteht hauptsächlich aus zwei Maßnahmen:

1. Verringerung der Emission (Staubausswurf) durch hermetischen Abschluß der Staubquelle,
2. Verringerung der Immission (Staubeinwirkung) durch Reinigung der atmosphärischen Luft am Verwendungsort.

In vielen Fällen ist aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen eine Verhinderung der Emission nicht möglich. Dann sind Maßnahmen zur Immissionsbekämpfung zu treffen. Hierzu gehören:

1. Absaughauben,
2. Frischluftduschen,
3. belüftete Schutzkabinen.

Der Einsatz obiger Einrichtungen richtet sich nach dem Staubproblem. Während bei den staubbildenden Verarbeitungsverfahren wie Sortieren, Klassieren, Fördern usw. Absaughauben Abhilfe schaffen können, **Bild 2**, ist in Fällen von gelegentlicher Staubexposition der Einsatz von Frischluftduschen zur Entstaubung des Atemluftbereiches ausreichend. In Sonderfällen können Frischluftduschen die Wirkung von Absaughauben unterstützen. Bei nicht ortsfesten Arbeitsmaschinen wie Schlepper und Mährescher kann staubfreie Atemluft durch Verwendung von Schutzkabinen für den Fahrer sichergestellt werden, **Bild 3**. Als Entstauber für die Reinigung der Atemluft in einer Schutzkabine sind Filtrationsentstauber am besten geeignet, da mit ihnen alle in der Landtechnik auftretenden Stäube zwischen 0,01 und 1000 μm wirksam abgeschieden werden können. Zur Entlastung, bzw. zur Erhöhung der Standzeit des Filtrationsentstaubers empfiehlt es sich, die größeren Staubteilchen, etwa oberhalb 10 μm , in einem Vorabscheider zurückzuhalten. Wegen des einfachen Aufbaus und der hohen Betriebssicherheit kann hierfür z. B. ein Fliehkraftentstauber verwendet werden.

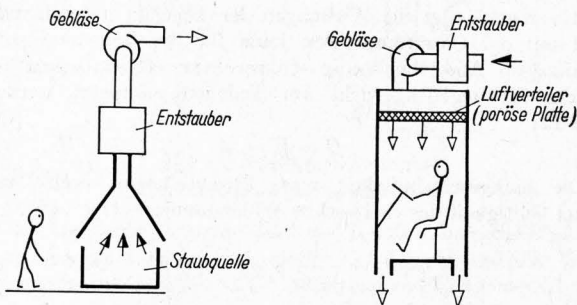


Bild 2. (links) Absauganlage für stäubende Arbeitsverfahren.

Bild 3. (rechts) Belüftete Schutzkabine für Arbeiten in stark staubhaltiger Luft.

Zur Verringerung des Verschleißes von Verbrennungsmotoren und Luftkompressoren werden ebenfalls Entstauber verwendet. Für geringe und mittlere Staubbelastungen haben sich Fliehkraft-, Filtrations- und Waschentstauber bewährt, **Bild 4 und 5**. Wegen der stark schwankenden Luftdurchsätze in Ansaugluftentstaubern werden hier Entstauberkombinationen verwendet, die in der Gesamtwirkung weitgehend unabhängig von der Gasgeschwindigkeit sind. Während in der Entstaubungsanordnung

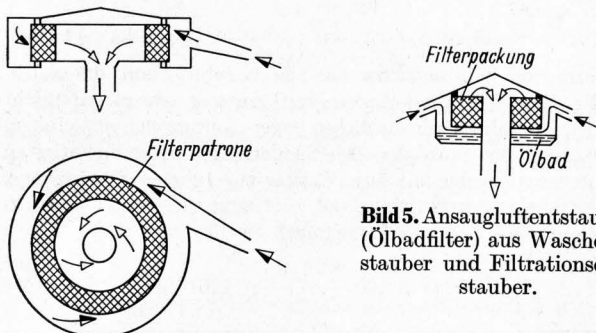


Bild 5. Ansaugluftentstauber (Ölbadfilter) aus Waschentstauber und Filtrationsentstauber.

Bild 4. Ansaugluftentstauber aus Fliehkraftentstauber (tangentialer Einlauf) und Filtrationsentstauber (Filterpatrone).

nach **Bild 4** bei hohen Gasgeschwindigkeiten größere Staubteilchen schon durch die Fliehkraftwirkung ausgeschleudert werden, sorgt der Filtrationseinsatz auch bei kleineren Gasgeschwindigkeiten für eine zuverlässige Abscheidung aller Korngrößen des Staubes. In der Anordnung nach **Bild 5** dient der Waschentstauber als Vorabscheider für die größeren Staubteilchen, während der Filtrationsentstauber hauptsächlich zur Abscheidung der feineren Staubteilchen und der aufgewirbelten Öltröpfchen dient. Bei sehr hohen Staubbelastungen, wie sie auf Baustellen oder bei Feldarbeiten auf trockenen Böden vorkommen, sind auch Entstauber mit kontinuierlichem Staubaustrag in Gebrauch.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für Entstauber in der Landtechnik sind pneumatische Förderanlagen, bei denen zum Austrag des körnigen Feststoffes bevorzugt Fliehkraft- und Filtrationsentstauber eingesetzt werden, **Bild 6**. Zur Abscheidung gröberer Fördergüter, wie z. B. Getreidekörner, verwendet man überwiegend Fliehkraftentstauber. Sind jedoch feinere Stäube bzw. feinkörnige Beimengungen mit abzuscheiden, so werden hierfür Filtrationsentstauber als Nachentstauber erfolgreich eingesetzt.

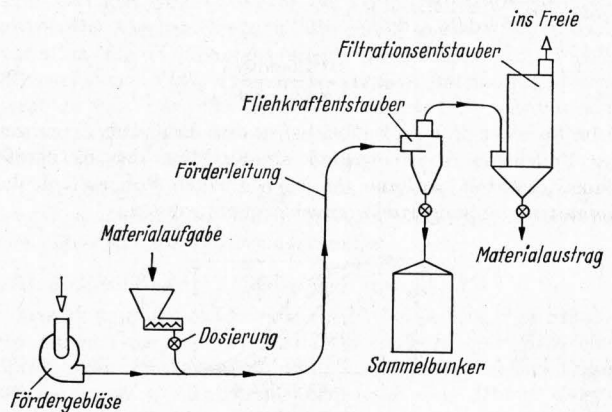


Bild 6. Fliehkraft- und Filtrationsentstauber bei der pneumatischen Förderung zum Austragen von groben und feinkörnigen Stoffen.

Bei der Auslegung von Entstaubungsanlagen ist besonderes Augenmerk auf folgende Punkte zu richten:

1. Staubart (physikalische Eigenschaften),
2. Staubkonzentration,
3. Korngrößenverteilung des Staubes,
4. Zustandsgrößen des Trärgases,
5. gewünschter Reinheitsgrad (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration).

Da bei den hier angeführten Maßnahmen zur Verringerung des Staubgehaltes der Luft Entstaubungsapparate erforderlich sind, sollen hier die wichtigsten Entstaubungsverfahren kurz behandelt werden.

2 Physikalische Grundlagen der Entstaubung

2.1 Beurteilung der Abscheidung

Eine vollständige Abscheidung aller Feststoffe aus einem Gas ist technisch nicht möglich. Daher muß bei jedem Entstaubungsvorgang mit einem bestimmten Wirkungsgrad gerechnet werden. Mit Gesamtentstaubungsgrad wird das Verhältnis der im Entstauber abgeschiedenen Staubmenge zu der mit dem Rohgas zugeführten Staubmenge bezeichnet, vgl. **Bild 7**:

$$\eta_{\text{ges}} = 100 \frac{M_{\text{ab}}}{M_{\text{Roh}}} = 100 \frac{M_{\text{Roh}} - M_{\text{Rein}}}{M_{\text{Roh}}} [\%]^2 \quad (1)$$

Für die Abscheidung von Stäuben nicht einheitlicher Korngröße³⁾ (polydispenser Stäube), wie sie am häufigsten auftreten,

²⁾ siehe Tafel „Verwendete Formelzeichen“.

³⁾ Zum Begriff der Korngröße sei erwähnt, daß bei Entstaubungsvorgängen der Korngrößenkennwert sowohl als Längenabmessung (Äquivalentdurchmesser eines kugelförmig gedachten Teilchens gleicher Sinkgeschwindigkeit) als auch als Geschwindigkeitsangabe (Sinkgeschwindigkeit in Luft oder Wasser) sinnvoll sein kann. Wegen der Anschaulichkeit soll hier der Längenangabe der Vorzug gegeben werden.

wird zweckmäßigerweise für jede Korngrößenklasse (Fraktion) der Entstaubungsgrad gesondert definiert. Dieser Fraktions- oder Stufenentstaubungsgrad gibt an, wieviel Prozent einer zur Abscheidung aufgegebenen Staubmenge nach oben und unten begrenzter Korngröße abgeschieden wird. Der Fraktionsentstaubungsgrad läßt sich heute noch nicht vorausberechnen. Die Bestimmung des Fraktionsentstaubungsgrades erfolgt daher experimentell.

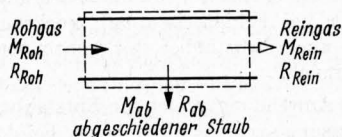


Bild 7. Staubbilanz eines Abscheiders.

Sind von den drei Staubzuständen vor, im und hinter dem Entstauber, Bild 8, mindestens zwei Korngrößenverteilungskurven bekannt, so läßt sich der Fraktionsentstaubungsgrad wie folgt berechnen [13]:

$$\eta_F(d) = \eta_{ges} \left(\frac{dR_{ab}/dd}{dR_{Roh}/dd} \right)_d = 100 - (100 - \eta_{ges}) \left(\frac{dR_{Rein}/dd}{dR_{Roh}/dd} \right)_d \quad (2).$$

Ist für einen Entstauber bei konstanten Betriebsbedingungen der Fraktionsentstaubungsgrad als Funktion der Korngröße einmal ermittelt, so kann für jeden anderen Rohgasstaub der Gesamtentstaubungsgrad vorausberechnet werden.

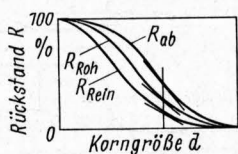


Bild 8. Rückstandssummenkurven von Rohgas-, Reingas- und abgeschiedenem Staub.

Der theoretische Gesamtentstaubungsgrad ergibt sich aus der Gesamtheit der einzelnen, unterschiedlich hoch abgeschiedenen Staubfraktionen zu

$$\eta_{ges} = (1/100) \int_{R=0}^{R=100} \eta_F(d) dR_{Roh} [\%] \quad (3).$$

Für einige Abscheider ist es möglich, ein theoretisches Trenn- oder Grenzkorn vorauszuberechnen. Mit diesem Trennkorn, welches die Korngröße desjenigen Staubteilchens angibt, das mit gleicher Wahrscheinlichkeit abgeschieden wird oder mit dem Reingasstrom entweicht, kann ebenfalls der theoretische Gesamtentstaubungsgrad angegeben werden. Liegt die Rückstandssummenkurve des Rohgasstaubes als Funktion der Korngröße vor, so entspricht der theoretische Gesamtentstaubungsgrad gerade dem prozentualen Rückstand oberhalb der Trennkorngröße, Bild 9.

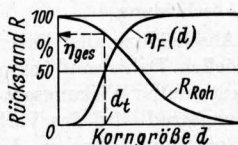


Bild 9. Ermittlung des theoretischen Gesamtentstaubungsgrades aus der theoretischen Trennkorngröße und der Rückstandssummenkurve des Rohgasstaubes.

2.2 Kräfte auf Staubteilchen in Gasen

Die Wirkung eines Entstaubungsvorganges beruht darauf, daß auf die im Gas dispergierten Staubteilchen Kräfte einwirken, die einen Bewegungsvorgang relativ zum Trägergas auslösen.

Die wichtigsten Trennkräfte auf Feststoffteilchen sind, Bild 10:

1. Schwerkraft,
2. Trägheitskraft,
3. Elektrostatische Kraft.

Der Trennung entgegen wirken:

1. Aerodynamische Widerstandskraft,
2. Auftriebskraft.

Den Kräften zwischen Gas und Feststoff können, je nach den Oberflächeneigenschaften des Staubes, weitere Kraftwirkungen zwischen den Staubteilchen überlagert sein (Agglomeration).

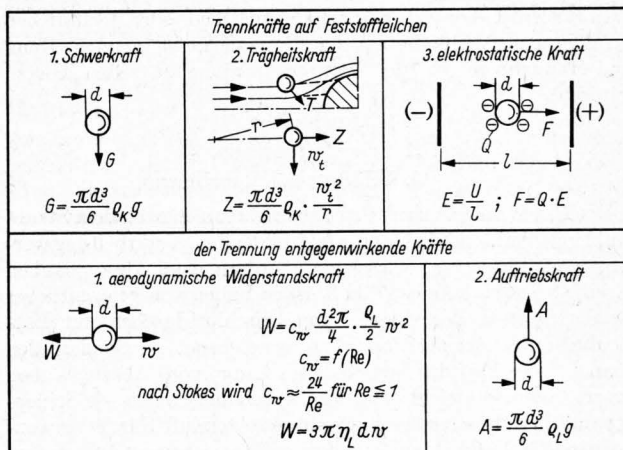


Bild 10. Kräfte auf Feststoffteilchen in Gasen.

2.3 Abscheidewirkung und Berechnung von Entstaubern

2.3.1 Schwerkraftentstauber

Schwerkraftentstauber oder Absetzkammern sind die einfachsten und ältesten Entstauber, Bild 11. Ihre Wirkung beruht darauf, daß die in einem Gasstrom enthaltenen Feststoffteilchen im Erdschwerefeld aussedimentieren. Setzt man eine laminare Durchströmung des Gases durch die Absetzkammern voraus und vernachlässigt die Wirkungen der Teilchen untereinander und mit der Gasströmung, so kann für die Berechnung der stationären Absetzbewegung senkrecht zur Gasströmung folgendes Kräftegleichgewicht am Teilchen angesetzt werden, Bild 12:

$$G = W + A \quad (4).$$

Die Sinkgeschwindigkeit eines Staubteilchens ergibt sich unter Gültigkeit des Stokesschen Widerstandsgesetzes⁴⁾ zu

$$w_K(d) = \frac{1}{18 \eta_L} g (\rho_K - \rho_L) d^2 \quad (5).$$

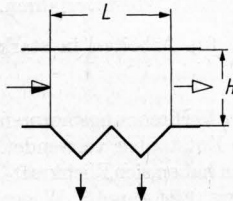


Bild 11. Schwerkraftentstauber (Absetzkammer).

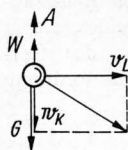


Bild 12. Kräfte an einem aussedimentierenden Feststoffteilchen im Erdschwerefeld.

Betrachtet man zunächst nur eine Staubfraktion, die gleichmäßig über dem Einlaufquerschnitt verteilt ist, so entspricht der Entstaubungsgrad für diesen engen Korngrößenbereich dem Verhältnis der auf der Abscheiderlänge aussedimentierten Staubmenge zu der mit dem Rohgas zugeführten Staubmenge. Der Fraktionsentstaubungsgrad bestimmt sich unter Berücksichtigung der Kammerabmessungen hierfür zu

$$\eta_F(d) = 100 \frac{L w_K(d)}{H v_L} \leq 100 [\%] \quad (6).$$

⁴⁾ Zur genauen Berechnung der Absetzbewegung ist mit dem experimentell ermittelten Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynolds-Zahl zu rechnen, für den zahlreiche Näherungsgleichungen existieren [18].

Für einen polydispersen Rohgasstaub folgt unter Einsetzen von Gl. (6) in Gl. (3) der Gesamtentstaubungsgrad zu

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{Lg(\varrho_K - \varrho_L)}{18 \eta_L H v_L} \int_{R=0}^{R=100} d^2 dR_{\text{Roh}} [\%] \quad (7)$$

In der Praxis wird der theoretisch berechnete Entstaubungsgrad im allgemeinen nicht erreicht [28]. Gewisse Verbesserungen lassen sich durch Einbauten, wie Zwischenböden und Umlenkleche erreichen. Wegen des unwirtschaftlichen Raumbedarfs (Kammerlängen von 15 bis 30 m) und der schlechten Abscheidewirkung werden Absetzkammern kaum noch verwendet.

2.32 Fliehkraftentstauber

Zur Erhöhung der Relativgeschwindigkeit zwischen Staubteilchen und Gas nutzt man in Fliehkraftentstaubern, hauptsächlich in sogenannten Zyklonen, die Zentrifugalbeschleunigungen in einer umlaufenden Gasströmung aus. Zur Drallerzeugung dienen meist Leitschaukeln oder tangentialer Zuführung des Rohgasstromes in einen rotationssymmetrischen Abscheideraum. Nach der Gasführung spricht man hier von Axial- und Tangentialzyklonen, **Bild 13**. In Fliehkraftentstaubern bewegen sich die Staubteilchen entgegen der nach innen abfließenden Gasströmung (Wirbelsenke) in Richtung auf die Zyklonaußenwandungen und gelangen von dort in den Staubsammelraum.

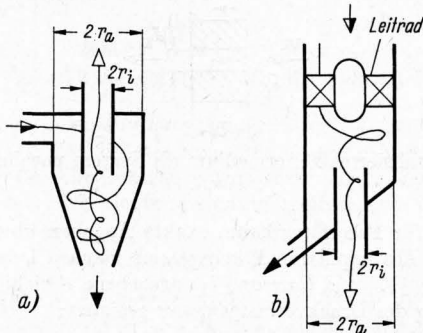


Bild 13. Fliehkraftentstauber.
a) Tangentialzyklon b) Axialzyklon

Die Abscheidengeschwindigkeit der Teilchen, bzw. die effektive Wanderungsgeschwindigkeit, ergibt sich aus der radialen Wanderungsgeschwindigkeit unter Abzug der radialen Gasgeschwindigkeit zu

$$w_K(d) = \frac{1}{18 \eta_L} \frac{w_t^2}{r} (\varrho_K - \varrho_L) d^2 - v_r \quad (8)$$

Für die Berechnung des theoretischen Trennkornes, welches auf einer gedachten Zylinderfläche vom Radius des Tauchrohres r_i kreist, wird folgendes Kräftegleichgewicht am Teilchen angesetzt [2], vgl. **Bild 14**:

$$Z = A + W \quad (9)$$

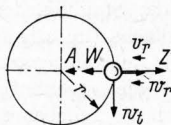


Bild 14. Kräftegleichgewicht am trennkritischen Teilchen in radialer Richtung.

Bei den in Fliehkraftentstaubern abgeschiedenen Korngrößen liegt die Reynolds-Zahl im allgemeinen unter eins, so daß das Stokes'sche Widerstandsgesetz angewandt werden kann. Aus Gl. (9) ergibt sich das theoretische Trennkorn zu

$$d_t = \sqrt{\frac{18 \eta_L v_r r_i}{(\varrho_K - \varrho_L) w_t^2}} \quad (10)$$

Mit der Annahme, daß die radiale Gasgeschwindigkeit v_r und die Tangentialgeschwindigkeit des Staubteilchens w_t der auf die Stirnfläche des Zyklons bezogenen axialen Gasgeschwindigkeit v_a proportional ist, vereinfacht sich Gl. (10) zu

$$d_t = \sqrt{C \frac{\eta_L r_i}{(\varrho_K - \varrho_L) v_a}} \quad (11)$$

Die Größe C kann als Apparatekonstante aufgefaßt werden und ist für jeden Zyklontyp experimentell zu bestimmen. Da die Dichte des Gases im allgemeinen um einige Zehnerpotenzen kleiner ist als die Dichte des Feststoffes, kann ohne merklichen Fehler ϱ_L in Gl. (11) vernachlässigt werden.

Das in der Praxis erreichte Trennkorn liegt häufig noch unter dem theoretischen Wert nach Gl. (11), was unter anderem auf folgende, in der Theorie nicht berücksichtigte Faktoren zurückzuführen ist:

1. Die Staubteilchen werden nicht als diskrete Einzelteilchen abgeschieden, sondern in Form mehr oder weniger großer Agglomerate [31].
2. Bei höheren Rohgasstaubkonzentrationen kommt es im Abscheider zur Bildung von Gutballen [4], die einen geringeren Widerstandsbeiwert je Teilchen haben als einzeln fliegende Staubteilchen [13]. Hierdurch erhöht sich die radiale Wanderungsgeschwindigkeit.

Fliehkraftentstauber sind wegen ihres einfachen Aufbaues und ihrer geringen Störanfälligkeit in allen Industriezweigen vertreten. Die Abscheideleistung läßt sich in weiten Grenzen durch Variation der Zyklonabmessungen beeinflussen. In Hochleistungszyklonen kleiner Bauart lassen sich Trennkorngrößen bis herab zu $2 \mu\text{m}$ verwirklichen. Bei besonders hohen Anforderungen an die Abscheidung werden große Rohgasmengen auf mehrere Kleinzyklone, sogenannte Multizyklone, aufgeteilt.

Zyklone werden mit Gasgeschwindigkeiten im Einlaufquerschnitt von etwa 8 bis 15 m/s betrieben, wobei der Druckverlust nicht über 100 mm WS betragen sollte.

2.33 Elektroentstauber (Elektrofilter)

Das Prinzip der elektrostatischen Abscheidung von Stäuben aus einem Gasstrom beruht darauf, daß die mit Hilfe einer Sprüh- oder Spitzenentladung (Korona) aufgeladenen Staubteilchen in einem elektrischen Feld unter dem Einfluß elektrostatischer Feldkräfte aus dem Gasstrom heraus transportiert werden. In den meisten Fällen ist das Sprühfeld mit dem elektrostatischen Feld identisch, **Bild 15**. Zum Betrieb von Elektroentstaubern verwendet man überwiegend gleichgerichtete Hochspannungen von 20 bis 70 kV. Der negative Pol der Gleichspannung liegt meistens an den Sprühelektroden, während die geerdeten Niederschlagslektroden positiv gepolt sind.

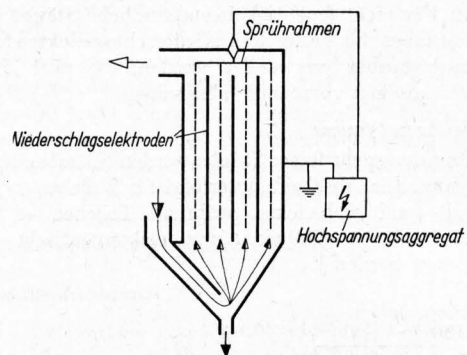


Bild 15. Elektroentstauber (Plattenelektroentstauber).

Die Abscheidengeschwindigkeit der Staubteilchen ist hier die Wanderungsgeschwindigkeit quer zum Gasstrom. Sie ergibt sich aus den am Staubteilchen im elektrischen Feld angreifenden Kräften, vgl. **Bild 16**:

$$F = W + A \quad (12)$$

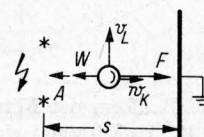


Bild 16. Kräfte an einem geladenen Feststoffteilchen im elektrischen Feld (hier Korona-Feld).

Unter Vernachlässigung der Auftriebskraft folgt daraus die theoretische Wanderungsgeschwindigkeit eines Teilchens zu

$$w_K(d) = \frac{E Q}{3 \pi \eta_L d} \quad (13).$$

Mit der Annahme, daß die Aufladung der Staubteilchen im Koronafeld durch Ionenbombardement erfolgt [20] und daß die Feldstärke in einem Koronafeld der Wurzel des angelegten Sprühstromes proportional ist [34], kann Gl. (13) geschrieben werden

$$w_K(d) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \frac{E^2 d}{4 \pi \eta_L} \frac{t}{t + t_0} \sim \frac{E^2 d}{\eta_L} \sim \frac{i d}{\eta_L} \quad (14).$$

Der Gesamtentstaubungsgrad eines Elektroentstaubers kann unter vereinfachenden Annahmen über den Abscheidvorgang nach der von *Deutsch* [10] angegebenen Gleichung berechnet werden:

$$\eta_{ges} = 100 \left(1 - e^{-\frac{w_K(d) L}{v_L s}} \right) [\%] \quad (15).$$

Nach Gl. (15) steigt der Entstaubungsgrad mit der theoretischen Wanderungsgeschwindigkeit und der Entstauberlänge an, während eine Vergrößerung der Gasgeschwindigkeit und des Sprühabstandes eine Verschlechterung der Abscheidung herbeiführt. Für die elektrostatische Abscheidung eignen sich besonders Stäube mit spezifischen Widerständen von 10^4 bis $2 \cdot 10^{10}$ Ohm cm [27].

Stäube mit spezifischen Widerständen unter 10^4 Ohm cm lassen sich nur abscheiden, wenn die durch zu schnelle Entladung an den Niederschlags Elektroden verlorengegangene Haftung durch Flüssigkeitshaftung ersetzt wird (Naßelektroentstauber). Dagegen neigen Stäube mit spezifischen Widerständen über $2 \cdot 10^{10}$ Ohm cm zum sogenannten Rücksprühen und können z. B. durch Herabsetzung des spezifischen Widerstandes durch Wasserbenetzung bzw. SO_3 -Anlagerung [9] oder durch Anwendung pulsierender Gleichspannungen [21; 36] zufriedenstellend abgeschieden werden.

Wegen der geringen Gasgeschwindigkeiten, die meist zwischen 1,5 und 2,5 m/s liegen, treten im Elektroentstauber nur geringe Druckverluste von etwa 2 bis 5 mm WS auf. Je nach Bauart sind mit Elektroentstaubern Gesamtentstaubungsgrade bis zu 99,9% erreichbar.

Die Anwendung von Elektroentstaubern in der Nahrungsmittelindustrie ist jedoch wegen der Gefahr von Staubexplosionen durch elektrische Überschläge im Sprühfeld stark eingeschränkt. Für nicht feuchtigkeitsempfindliche Stäube können Elektroentstauber mit berieselten Niederschlags Elektroden (sog. Naßelektroentstauber) verwendet werden, die noch Teilchen von etwa $0,5 \mu\text{m}$ fast vollständig abscheiden.

2.34 Filtrationsentstauber

Zur Abtrennung sehr feiner Stäube werden Filtrationsentstauber verwendet. Die Abscheidung erfolgt für Teilchen $> 0,5 \mu\text{m}$ durch Prall- und Siebeffekte, während Teilchen $< 0,5 \mu\text{m}$ hauptsächlich durch Diffusion und elektrostatische Kräfte zurückgehalten werden.

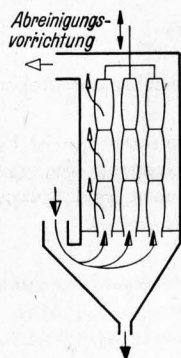


Bild 17. Filtrationsentstauber (Schlauchfilter).

Eine weit verbreitete Bauform der Filtrationsentstauber ist das Schlauchfilter, **Bild 17**. Als Filtermaterial werden organische, anorganische sowie metallische Fasern eingesetzt. Für die Abscheidung durch Trägheitswirkungen kann der Entstaubungs-

grad einer Einzelfaser bei vollständiger Haftung nach *Landt* [19] angegeben werden, vgl. **Bild 18**:

$$\varepsilon_F = \varepsilon_F / d_F \quad (16).$$

Der Gesamtentstaubungsgrad eines ganzen Faserfilters ergibt sich dann zu

$$\eta_{ges} = 100 \left(1 - e^{-\frac{4 \varepsilon_{FP}}{\pi d_F \varepsilon_F}} \right) [\%] \quad (17).$$

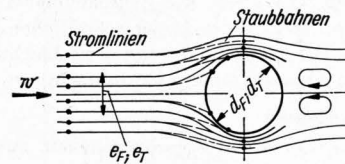


Bild 18. Abscheidung von Staubteilchen durch Massenträgheitskräfte an einer Faser bzw. Kugel.

Der für den Betrieb von Faserfiltern wichtige Druckverlust kann berechnet werden, wenn man annimmt, daß die Faserschicht aus parallelen Kapillaren besteht, **Bild 19**. Nach *Hagen-Poiseuille* ergibt sich hierfür der Druckverlust zu

$$\Delta p = \frac{32 \eta_L v_K l_K}{d_K^2} \quad (18).$$

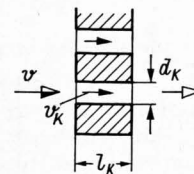


Bild 19. Idealisiertes Filtermedium als System paralleler Kapillaren.

Da sich für Faserfilter kaum exakte Angaben über die Zahl und Größe des kapillaren Porensystems machen lassen, ist die von *Kozeny* [17] und *Carman* [7] angegebene Gleichung für die Berechnung des Druckverlustes besser geeignet:

$$\Delta p = \frac{\text{const}}{g} \frac{\eta_L}{\varrho_L} \frac{v_F l_F}{d_F^2} \frac{(\varrho_P / \varrho_F)^2}{(1 - \varrho_P / \varrho_F)^3} [\text{mm WS}] \quad (19).$$

Die Filterflächenbelastung von Filtrationsentstaubern liegt etwa bei 1 bis $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$. Bei Gasgeschwindigkeiten über 2,5 m/s besteht die Gefahr des Abreißen von bereits anfiltrierten Staubteilchen. Um den Druckverlust in wirtschaftlichen Grenzen zu halten, müssen Faserfilter periodisch abgereinigt werden. Hierzu sind Klopf- oder Blaseinrichtungen erforderlich, die jedoch die Lebensdauer der Filtervliese stark herabsetzen.

Mit Faserfiltern lassen sich Gesamtentstaubungsgrade bis zu 99,9% erreichen, wobei Staubteilchen von $0,5 \mu\text{m}$ nahezu vollständig abgeschieden werden.

2.35 Waschentstauber

Der Abscheidvorgang in Wäschern wird hauptsächlich dadurch bestimmt, daß die Staubteilchen mit einer möglichst großen Flüssigkeitsoberfläche (im allgemeinen Wasser) in Berührung kommen. Durch Anlagerung von Wasser an die Stauboberflächen und durch die gegenseitige Haftung benetzter Staubteilchen erhöht sich die Teilchenmasse, so daß die Staubteilchen leicht aus dem Gasstrom ausgetragen werden können. Voraussetzung für die Naßabscheidung ist eine ausreichende Benetzbarkeit des Staubes. Bei der einfachsten Bauform eines Waschentstaubers strömt das Rohgas durch einen Flüssigkeitsschleier, wobei die Feststoffteilchen von den Flüssigkeitströpfchen eingefangen und mit dem Schlamm abgeführt werden.

Zur besseren Durchmischung von Rohgas und Waschflüssigkeit werden auch Venturi-Düsen verwendet, bei denen an der engsten Stelle die Flüssigkeit eingedüst wird, **Bild 20 a**. In einem nachgeschalteten Fliehkraftentstauber wird das Gas von seinen Feststoffen befreit.

Eine weitere Bauart sind die dynamischen Gaswäscher. In diesen Entstaubern prallt das Rohgas mit hoher Geschwindigkeit auf eine geschlossene Wasseroberfläche und reißt dabei

Wassertröpfchen mit. Auf dem weiteren Weg durch die Umlenkungen werden die Staubteilchen benetzt und anschließend in den Wasserbehälter ausgeschleudert, **Bild 20 b**.

Nimmt man an, daß Wassertröpfchen in einen bewegten Rohgasstrom eingespritzt werden, so kann man nach *Barth* [3] den Entstaubungsgrad eines Wassertropfens (analog zur Einzelfaser, Bild 18) berechnen:

$$\epsilon_T = e_T/d_T \quad (20).$$

Aus aerodynamischen Betrachtungen ergibt sich, daß die Abscheidewirkung eines Tropfens um so besser wird, je größer die Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Staubteilchen und je kleiner der Tropfendurchmesser ist. Feinere Staubteilchen lassen sich schlechter abscheiden, da sie nur schwer die Grenzschicht des Wassertropfens durchdringen.

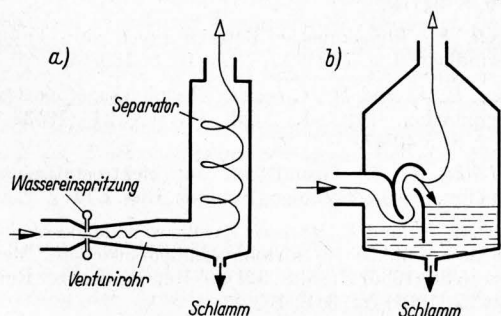


Bild 20. Waschentstauber.

a) Venturi-Wäscher b) Dynamischer Waschentstauber

Da bei der Naßentstaubung keine theoretisch fundierte Vorusberechnung des Entstaubungsgrades möglich ist, ist man auf empirische Gleichungen angewiesen. Nach *Semrau* [25] berechnet sich der Gesamtentstaubungsgrad von Waschentstaubern zu

$$\eta_{\text{ges}} = 100 (1 - e^{-a K_T^x}) [\%] \quad (21).$$

Die für die Abscheidung maßgebliche Größe ist die Kontaktleistung K_T , die nötig ist, um die Staubteilchen mit der Waschflüssigkeit zu vermischen.

Solbach [29] hat die Abscheidung von Staubteilchen beim Einblasen eines Rohgasstromes in eine Flüssigkeit untersucht, **Bild 21**. Die Abscheidewirkung läßt sich danach durch das Trennkorn, das gerade zu 50% abgeschieden wird, charakterisieren:

$$d_t = \frac{3,6}{v_D} \sqrt{\frac{\eta_w D w_R}{\rho_K}} \quad (22).$$

Wendet man Gl. (22) auf einen bestimmten Wäschertyp an, so vereinfacht sich der Ausdruck für das Trennkorn zu

$$d_t = \xi \frac{10^{-6}}{\Delta p^{0,25}} [\text{m}] \quad (23).$$

Mit einfachen Wäschern lassen sich Trennkorngrößen bis herab zu 1 μm , mit dem Venturi-Wäscher sogar bis 0,5 μm erreichen. Das Hauptanwendungsgebiet der Wäscher schließt an die Fliehkraftentstauber an und erstreckt sich bis in den Bereich der Filtrations- und Elektroentstauber.

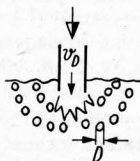


Bild 21. Einblasen eines Rohgasstromes in ein Flüssigkeitsbad.

3 Fraktionsentstaubungsgradkurven verschiedener Entstauber

Um die Leistungsfähigkeit der einzelnen Entstaubungsverfahren vergleichen zu können, sind in **Bild 22** die Fraktionsentstaubungsgradkurven einiger Entstauber zusammengestellt. Aus der Darstellung ist zu entnehmen, daß die höchsten Ent-

staubungsgrade von Naßelektroentstaubern (1) und Faserfiltern (2 bis 4) erreicht werden.

Raschringfilter (5) gehören zu den filtrierenden Entstaubern und haben etwa die gleiche Abscheidewirkung wie Faserfilter. Der Naßentstauber (7) liegt mit seinem Fraktionsentstaubungsgrad im Bereich der Trockenelektroentstauber (6; 8).

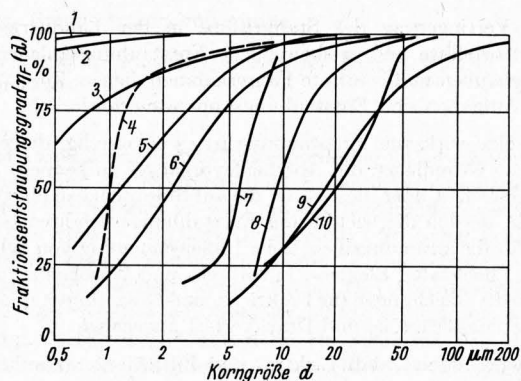


Bild 22. Fraktionsentstaubungsgrade verschiedener Entstauber.

Elektroentstauber	1 Naßelektroentstauber
	6, 8 Trockenelektroentstauber
Filtrationsentstauber	2, 3, 4 Faserfilter
	5 Raschringfilter 10 mm \varnothing
Waschentstauber	7 Naßentstauber (Koksturm)
Fliehkraftentstauber	9, 10 Großzyklon

Für die Abscheidung größerer Stäube sind Großzyklone (9; 10) von einigen Metern Durchmesser gut geeignet, da sie noch Trennkorngrößen bis herab zu 20 μm erreichen.

4 Wirtschaftlichkeit von Entstaubern

Die Wirtschaftlichkeit eines Entstaubungsverfahrens kann nicht von vornherein angegeben werden, da hierzu alle Voraussetzungen, die zum Betrieb einer Anlage führen, mit berücksichtigt werden müssen. Eine Entstaubungsanlage kann zur Rückgewinnung wertvoller Stäube die Wirtschaftlichkeit eines Herstellungsverfahrens erhöhen, während die gleiche Anlage zur Reinigung der Abluft von weniger wertvollen Stäuben keinen Gewinn für den Betreiber bringt.

Zur Bewertung der einzelnen Entstaubungsverfahren sind daher die Kosten zur Entstaubung einer bestimmten Gasmenge besser geeignet. *Solbach* [30] gibt für verschiedene Entstauber die Gesamtkosten, die sich aus Anschaffungs-, Betriebs- und Unterhaltungskosten zusammensetzen, für das je Stunde gereinigte Gasvolumen an. Aus der Aufstellung, **Bild 23**, geht z. B. hervor, daß die in der Anschaffung relativ billigen Filtrationsentstauber (Schlauchfilter) durch hohe Wartungskosten nach etwa 2½ Jahren höhere Gesamtkosten verursachen als Elektroentstauber. Die Fliehkraftentstauber sind mit relativ geringen Kosten angegeben, so daß immer zu prüfen ist, ob diese Entstauber die gestellten Anforderungen erfüllen können.

5 Zusammenfassung

Die in der atmosphärischen Luft vorhandenen Verunreinigungen setzen sich aus natürlichen und technischen Stäuben zu-

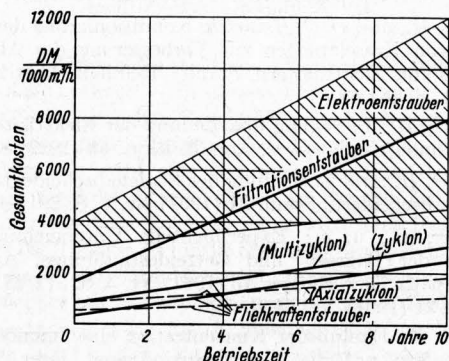


Bild 23. Gesamtkosten verschiedener Entstauber.

sammen. Zur Abwendung von Schäden an Lebewesen und Maschinen müssen gefährliche Stäube aus der Luft entfernt werden. Im Bereich der Landtechnik ergeben sich Staubprobleme bei der Bearbeitung des Bodens, beim Streuen und Sprühen von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln, bei der mechanisierten Ernte landwirtschaftlicher Massengüter sowie bei deren Weiterverarbeitung.

Zur Verringerung des Staubrisikos in der Landwirtschaft können ortsfeste und ortsbewegliche Entstaubungsanlagen wie Absaughauben und belüftete Fahrerinnen dienen. Zur Lösung dieser Aufgaben sind Entstaubungsapparate erforderlich.

Für eine wirksame Entstaubung ist es notwendig, die physikalischen Grundlagen des Abscheidvorganges zu kennen. Nach einer Übersicht über die Kräfte, die auf Staubteilchen einwirken können, werden die wichtigsten Entstaubungsverfahren behandelt. Für die strömungstechnische Dimensionierung von Schwerkraft-, Fliehkraft-, Elektro-, Filtrations- und Waschentstaubern werden die Gleichungen für Fraktions- und Gesamtentstaubungsgrad, Trennkorngröße und Druckverlust angegeben.

Es wird gezeigt, daß Elektro- und Filtrationsentstauber die beste Abscheidwirkung haben. Waschentstauber können ebenfalls die Entstaubungsgrade von Elektroentstaubern erreichen. Für die Grobentstaubung wird bevorzugt der Fliehkraftentstauber eingesetzt. Mit den genannten Entstaubern können Staubteilchen bis herab zu 0,5 µm noch wirksam abgeschieden werden. Zur Beurteilung der Entstaubungskosten sind die Anschaffungs- und Wartungskosten verschiedener Entstauber für das je Stunde gereinigte Gasvolumen über der Betriebszeit angegeben.

6 Schrifttum

Bücher sind mit ● gekennzeichnet

- [1] Antweiler, H.: Erkrankungen nach Inhalation organischer Stäube. Zbl. Arbeitsmed. Arbeitsschutz **16** (1966) H. 11, S. 321/25. Ref. in: Staub - Reinhalt. Luft **27** (1967) Nr. 4, S. 207.
- [2] Barth, W.: Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern aufgrund neuerer Untersuchungen. Brennstoff, Wärme, Kraft **8** (1956) H. 1, S. 1/9.
- [3] Barth, W.: Grundlegende Untersuchungen über die Reinigungsleistung von Wassertropfen. Staub **19** (1959) Nr. 5, S. 175/80.
- [4] Barth, W.: Physikalische und wirtschaftliche Probleme des Transportes von Festteilchen in Flüssigkeiten und Gasen. Chemie-Ing.-Techn. **32** (1960) Nr. 3, S. 164/71.
- [5] Barth, W.: Zur Problematik der Staubabscheider. Arch. Wärmewirtschaft **14** (1933) S. 267/69.
- [6] Botke, H., und W. Günther: Über einen Fall von Farmerlunge mit besonderer Berücksichtigung der spirographisch nachgewiesenen Spätschäden. Arbeitsmedizin **3** (1965) Nr. 3/4, S. 53/55.
- [7] Carman: Siehe ● St. Brunauer: Die Adsorption von Gasen und Dämpfen. Bd. I. Princeton 1945. S. 303ff.
- [8] Cowan, D. W., H. J. Thompson u. a.: Bronchial asthma associated with air pollutants from the grain industry (Bronchialasthma durch Luftverunreinigungen in der Getreideindustrie). J. Air Pollution Control Assoc. **13** (1963) Nr. 11, S. 546/52. Ref. in: Staub **24** (1964) Nr. 9, S. 383.
- [9] Darby, K., und D. O. Heinrich: Konditionierung der Rauchgase von Kesselanlagen zur Verbesserung des Abscheidungsgrades von Elektrofiltern. Staub - Reinhalt. Luft **26** (1966) Nr. 11, S. 464/68.
- [10] Deutsch, H.: Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator. Ann. d. Phys. **68** (1922) S. 335/44.
- [11] Gessner, H.: Die Ermittlung des Stufenabscheidungsgrades von Staubabscheidern. Staub **21** (1961) Nr. 7, S. 291/94.
- [12] Güthert, H., u. a.: Experimentelle Untersuchungen zur Frage der Bagasse- und Getreidestaublung. Arch. Gewerbepath. Gewerbehyg. **18** (1961) Nr. 5, S. 511/23. Ref. in: Staub **21** (1961) Nr. 12, S. 552.
- [13] Johne, R.: Einfluß der Konzentration einer monodispersen Suspension auf die Sinkgeschwindigkeit ihrer Teilchen. Chemie-Ing.-Techn. **38** (1966) H. 4, S. 428/30.
- [14] Juck, A., und L. Ulrich: Der Staub in der Landwirtschaft und das Staubrisiko für die Gesundheit. Arch. Gewerbepath. Gewerbehyg. **23** (1967) H. 3, S. 202/208. Ref. in: Staub - Reinhalt. Luft **27** (1967) Nr. 10, S. 465.
- [15] Karpowa, M. I., und S. A. Stepanow: Experimentelle Versuche zur Feststellung der Schädlichkeit von Getreidestaub. Gigijena i Sanitarija Moskau **28** (1963) Nr. 7, S. 28/32. Ref. in: Staub **24** (1964) Nr. 6, S. 237.
- [16] Kettner, H.: Neue MAK (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) in der Sowjetunion. Staub **20** (1960) Nr. 10, S. 369/70.
- [17] Kozeny: Siehe ● Eucken-Jakob: Der Chemie-Ingenieur. Bd. 1. Leipzig 1933. 2. Kap. XI „Filtration“.
- [18] Kürten, H., J. Raasch und H. Rumpf: Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfeld konstanter Geschwindigkeit. Chemie-Ing.-Techn. **38** (1966) H. 9, S. 941/48.
- [19] Landt, E.: Physikalische Betrachtungen zum Faserfilter. Gesundheits-Ing. **77** (1956) Nr. 9/10, S. 139/45.
- [20] Lowe, H. J., and D. H. Lucas: The physics of electrostatic precipitation. Brit. J. Appl. Physics **24** (1953) Supp. Nr. 2, S. S 40/47.
- [21] ● Lüthi, J. E.: Grundlagen zur elektrostatischen Abscheidung von hochohmigen Stäuben. Diss. ETH Zürich 1967.
- [22] Martini, P., und L. Massari: La silicosi nelle piccole imprese molitorie (Silikose in kleinen Mühlenbetrieben). Med. del Lavoro **56** (1965) Nr. 5, S. 321/30. Ref. in: Staub - Reinhalt. Luft **27** (1967) Nr. 3, S. 163.
- [23] Maier, A., A. Batzenschläger u. a.: Le poumon de fermier (Die Farmerlunge). Arch. Maladies profess. Méd. Travail Sécurité Soc. **28** (1967) Nr. 12, S. 833/49. Ref. in: Staub - Reinhalt. Luft **28** (1968) Nr. 4, S. 176.
- [24] Merlo, G., und A. Monteverde: Photo-Endoskopie der Bronchien bei Asbestose, Byssinose, Farmerlunge und Hanfstaublunge. Med. del Lavoro **54** (1963) Nr. 11, S. 737/41. Ref. in: Staub **24** (1964) Nr. 12, S. 549.
- [25] Semrau, K.: Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiet der Naßentstauber. Staub **22** (1962) Nr. 5, S. 184/88.
- [26] Sera, Y., J. Konisuike und T. Sano: Ein Autopsiefall einer Staublungenerkrankung durch organischen Staub (Weihrauchstößchen-Lunge). J. Sci. Labour **40** (1964) Nr. 11, S. 547/55. Ref. in: Staub **25** (1965) Nr. 4, S. 173.
- [27] Simm, W.: Die elektrischen Eigenschaften des Staubes im Hinblick auf die Abscheidung im Elektrofilter. Staub **22** (1962) Nr. 11, S. 463/66.
- [28] Solbach, W.: Schwer- und Fliehkraftabscheidung. In: BETH-Handbuch Staubtechnik. Lübeck: Selbstverlag BETH GmbH. 1964.
- [29] Solbach, W.: Einige Ergebnisse theoretischer und praktischer Untersuchungen an Naßabscheidern. Staub **25** (1965) Nr. 11, S. 490/93.
- [30] Solbach, W.: Über die Gas- und Staubbewegung in Drallabscheidern. Staub **21** (1961) Nr. 9, S. 413/16.
- [31] Solbach, W.: Zur Frage der Vorausberechenbarkeit von Gesamtabscheidungsgraden mechanischer Entstauber. Staub **20** (1960) Nr. 4, S. 113/17.
- [32] Stoffer, A. R.: Lungenschädigungen durch feste und flüssige organische Substanzen. Pathologia et Microbiol. (Basel) **24** (1961) S. 107/39.
- [33] Troisi, F. M.: Sul rischio pneumoconiotico da polveri di cereali in scaricatori portuali (Über die Staublungengefahr durch Getreidestaub bei Verladearbeiten in Häfen). Rass. med. ind. **28** (1959) Nr. 2, S. 89/102. Ref. in: Staub **20** (1960) Nr. 3, S. 98.
- [34] Troost, N.: A new approach to the theory and operation of electrostatic precipitators for use on pulverized-fuel-fired boilers. Proceedings Inst. Electr. Engrs. **101** (1954) S. 369/89.
- [35] VDI-Richtlinie 2104: Begriffsbestimmungen, Reinhaltung der Luft. Düsseldorf: September 1966.
- [36] Winterhager, P. C.: Untersuchung des Rücksprühens an Modell-Elektrofiltern unter besonderer Berücksichtigung der mit dem Rücksprühen verbundenen, kurzzeitigen Stromimpulse. Forsch.-ber. Land Nordrhein-Westfalen Heft 1684. Köln und Opladen: Westdeutscher Verl. 1966. Ref. in: Staub - Reinhalt. Luft **27** (1967) Nr. 3, S. 156.