Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 123/124 (1944)

Heft: 5

Artikel: Ueber technische Staubabscheidung und ihre physikalischen Grundlagen

Autor: Schärer, Otto

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-53987

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

INHALT: Ueber technische Staubabscheidung und ihre physikalischen Grundlagen. — Vom Kurs «Sols et Fondations» der E. I. L. — Massenlagerung von Kartoffeln. — Mitteilungen: Französische Plattenbrücken aus Spannbeton. Hilfsstrom-Anlage für Flugzeuge. Schweizerische Vereinigung für Dokumentation. Rezepte für künstliches Meerwasser. Das Problem der einphasigen Belastung eines Drehstromnetzes und ihres statischen Ausgleichs. Persönliches. — Wettbewerbe: Schulhaus mit Turnhalle in Breitenbach. Basellandschaftliche Siedlungsbauten. Schulhaus mit Turnhalle «im Gut», Zürich 3. — Mitteilungen der Vereine.

Band 124 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 5

Ueber technische Staubabscheidung und ihre physikalischen Grundlagen

Von Ing. Dr. OTTO SCHÄRER, Schaffhausen

Zusammenfassung. Ausgehend von einer Uebersicht über die Schwebekörper in Luft und über das Bewegungsgesetz eines Staubteilchens in Luft werden die elektrischen und mechanischen Entstauber-Konstruktionen behandelt und dabei besonders die zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge besprochen. Einzelne industriell ausgeführte Beispiele werden gezeigt, wie Gross-Elektrofilter, Klein-Elektrofilter, Konditionierung der Atemluft, Schlauchfilter, Zyklone und rotierende Staubfänger.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die elektrische und die mechanische Staubabscheidung aus Luft oder anderen Gasen, die bereits in einer Sammelleitung strömen und die man entstauben muss, weil man sie so wie sie sind, nicht ins Innere oder Aeussere der Fabrikanlage ablassen kann. Nicht behandelt wird das Fassen des Staubes an seinen Quellen, die Untersuchung von Staub, die Nassreinigung durch eingespritztes Wasser, die Aerodynamik des Staubauswurfs aus Kaminen und die sehr wichtige hygienische Seite des Staubproblems. Im besonderen werden die physikalischen Grundlagen der beiden Systeme von Entstaubungsapparaten besprochen.

Als Staub bezeichnet man alle in Luft so fein verteilten festen oder flüssigen Körper, dass sie darin nicht nach dem Fallgesetz der Mechanik, d. h. mit konstanter Beschleunigung fallen, sondern mit konstanter und gewöhnlich kleiner Geschwindigkeit. Feiner Flüssigkeitsnebel, der in Luft schweben bleibt, fällt also ebenfalls unter den Begriff Staub, verhält sich auch mechanisch und elektrisch wie solcher. Dagegen fallen die mit konstanter Geschwindigkeit fallenden Schneeflocken, Flaumfedern usw. nicht unter den Begriff Staub, weil ihr Dispersitätsgrad nicht gross genug ist.

Der Unterschied im Verhalten von Staubteilchen und groben Körpern hat bekanntlich seinen Grund in der Luftreibung, denn diese nimmt mit abnehmender Körpergrösse proportional dem Quadrat des Kornradius ab, also weniger rasch als das Teilgewicht, das proportional der 3. Potenz abnimmt. Selbstverständlich macht auch das Staubteilchen keine Ausnahme vom Grundgesetz der Mechanik; anfangs fällt es beschleunigt. Sobald die mit zunehmender Geschwindigkeit wachsende Luftreibung und die Schwerkraft einander gleich werden, fällt die treibende Gesamtkraft dahin und von diesem Moment an fällt es mit konstanter Geschwindigkeit. Diese für das Staubteilchen charakteristische Geschwindigkeit sei bezeichnet als Grenzgeschwindigkeit für freien Fall. Die beschleunigte Anlaufstrecke eines Staubteilchens ist gewöhnlich so kurz, dass man sie kaum bemerkt.

Die Uebersichtstabelle Abb. 1[1]) zeigt, was alles in freier Luft schweben, d. h. mit sehr kleiner Grenzgeschwindigkeit fallen kann. Die Tabelle beginnt rechts mit der Korngrösse von 0,2 mm Durchmesser, die relativ grob, mit den Fingern noch gut fühlbar ist und nimmt nach links im logarithmischen Masstab ab bis zur unvorstellbaren Feinheit des Luftmoleküls ($3 \cdot 10^{-8}$ cm ∅). Zuoberst in der Tabelle stehen die Nebel- und Wolkenteilchen, Vulkanstaub, also der Staub der freien Atmosphäre, sowie die schon sehr feinen atmosphärischen Kerne, die man nur mit der Aitken-Kammer finden kann. Darunter stehen verschiedene Beispiele von künstlichem Staub, auch aller industrielle Staub. Als Anhaltspunkte in dieser Tabelle dienen der Pfeil α bei der Dicke des menschlichen Haares, d. h. bei 40 bis 60 μ Korndurchmesser, bis zu dem man ein Staubpulver noch trocken oder nass mit einem feinsten Bronzedrahtgeflecht absieben kann. Ein weiterer Anhaltspunkt ist der Pfeil β bei 6 μ Korndurchmesser; dies ist die Grenze der laboratoriumsmässigen Windsichtung. Was links davon ist, kann also auch im Luftstrom nicht mehr ausgeschieden, sondern muss nass, z. B. durch ein Sedimentierverfahren getrennt werden. Bei $^1/_2$ μ liegt die Wellenlänge des sichtbaren Lichts; Staubteilchen unter dieser Grösse können also im Mikroskop nicht mehr abgebildet, sondern nur noch im Dunkelfeld anhand der Beugungserscheinung festgestellt werden. Bemerkenswert in der Tabelle ist ferner der Tabakrauch, dessen gröbste Teile $^1/_{10}$ μ Durchmesser haben, und besonders interessiert natürlich die «Hauptmenge der Industriestaube». Das Unglück will es, dass dieser Doppelpfeil gerade in der Korngrösse 1 bis 5 μ liegt, die, wenn sie freien Quarz enthält (wie z. B. Giessereistaub), die Silikose verursacht. Schliesslich ist in der Tabelle unten die Skala der Ionen ersichtlich, d. h. der natürlich oder künstlich elektrisch aufgeladenen Luftteilchen, die sich nach links fortsetzen bis zum Kleinion hinab, das nur aus einigen Luft- und Wassermolekülen besteht und die Skala der Grenzgeschwindigkeit für die Dichte 1, d. h. für die Dichte des Wassers. Alles was links vom Pfeil β liegt, d. h. weniger als $^1/_{10}$ mm/s Grenzgeschwindigkeit, sieht man praktisch kaum mehr fallen.

Wenn sich ein kugelförmig angenommenes Staubteilchen relativ zur Luft mit der Geschwindigkeit w bewegt, ist die Kraft K der Luftreibung darauf nach Stokes[2])

$$K = 6 \pi \mu \cdot a \cdot w$$

wobei a den Radius des Teilchens und μ den bekannten Koeffizienten der Luftreibung (Viskositätskoeffizienten) bedeutet. Wirkt auf das Staubteilchen eine mechanische Kraft, sei es die Schwerkraft G (oder wie in allen Zyklonen die Trägheitskraft), so erhält man durch Gleichsetzen der treibenden Kraft G mit der Reibung K die Grenzgeschwindigkeit w

$$w = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\varrho - \varrho_0) \cdot g}{\mu} \cdot a^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

wobei g die bekannte Erdbeschleunigung 981 cm/s², ϱ die Dichte des Staubmaterials und ϱ_0 die Dichte der Luft bedeuten. Weil G mit a^3 abnimmt, nimmt w mit a^2 ab. Der mechanische Entstauber arbeitet also, wie man zu sagen pflegt, selektiv; er scheidet die gröberen Teilchen wesentlich besser ab als die feinen. Gleichung (1) ist die einfache und bekannte Formel von Stokes. Sie gilt genau für Korngrössen von 1 bis etwa 40 bis 60 μ (je nach der Teilchendichte). Ueber 60 μ fallen die Teilchen etwas

[1]) Nach Forster, Diss. E. T. H. Zürich 1940.

[2]) Stokes, Cambr. Trans. 9, S (8), 1851 (Sc. Papers Bd. III, S. 1).

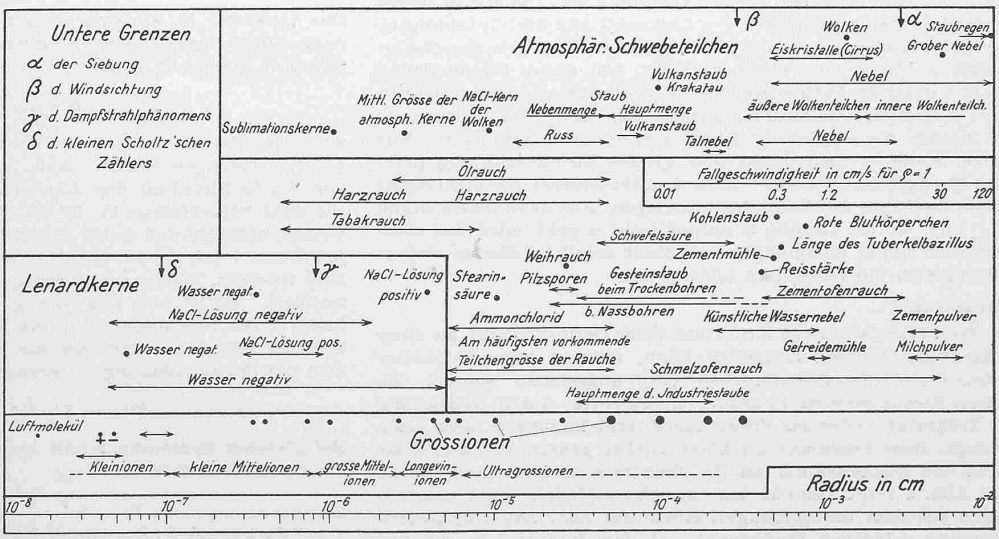


Abb. 1. Natürliche und künstliche Schwebeteilchen

langsamer als nach Stokes, weil die Formel die hydrodynamische Trägheitswirkung nicht berücksichtigt.

[Der Ausdruck für K wurde von Stokes aus den allgemeinen Stokes-Navier'schen Grundgleichungen für zähe Flüssigkeiten hergeleitet unter den zwei Voraussetzungen, dass die Trägheitswirkungen zu vernachlässigen sind und dass die innerste Luftschicht auf der Kugeloberfläche haftet. Da in grösserer Entfernung vom Kugelzentrum die Trägheitswirkungen merklich werden, ist augenscheinlich, dass für gröberen Staub (grössere Re-Zahlen) die Stokes'sche Formel nicht mehr gelten kann. Oseen gab zuerst eine Lösung der Grundgleichungen, worin die Trägheitswirkung in erster Näherung mitberücksichtigt war. Die Oseen'sche Formel ist heute nicht mehr aktuell; ihr Gültigkeitsbereich ist seinerzeit überschätzt worden. Eine Näherungslösung für einen grösseren Bereich, basierend auf der experimentellen Kurve K als Funktion von Re gab dann Frössling (Gerlands Beiträge zur Geophysik 51, 1937, S. 167). Einen Ausdruck in Anlehnung an die jetzige Hydrodynamik, die die Kraft auf einen umströmten Körper ausdrückt durch

$$K = c \cdot \text{Schattenfläche} \cdot \text{Staudruck}$$

$$= c \cdot 4\pi \cdot a^2 \cdot \frac{\gamma_0 \cdot w^2}{2 \cdot g} = \psi \cdot d^2 \frac{\gamma_0}{g} \cdot w^2$$

wobei $d = 2 \cdot a$ den Kugeldurchmesser und γ_0 das spez. Gewicht der Luft bedeuten, gab Widell (Z. VDI Bd. 80, 1936, S. 1497). Der Koeffizient ψ ist bekanntlich eine Funktion der Reynolds'schen Zahl $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$, wobei ν die kinematische Zähigkeit bezeichnet, $\nu = \frac{\mu}{\varrho_0}$. Nach Stokes wäre $\psi = \frac{3\pi}{Re}$ (gültig für $Re < 1$); nach Widell gilt $\psi = \frac{3\pi}{Re}(1 + 0{,}13 \cdot Re^{0{,}1})$ (gültig für $Re < 400$).]

Unter 1 μ fallen die Teilchen etwas schneller als nach Stokes, weil infolge der molekularen Struktur der Luft (Brown'sche Bewegung) an der Oberfläche der Staubkugel eine gewisse Gleitung stattfindet, während nach Stokes die innerste Luftschicht auf der Kugeloberfläche nicht gleitet. Diese Abweichungen von der Stokes'schen Formel sind jedenfalls genau berechenbar Für Ueberschlagsrechnungen genügt die Stokes'sche Formel praktisch für alle Staubteilchen.

[Nachdem schon vor 30 Jahren Knudsen und Weber für sehr kleine Staubteilchen die Abweichung von der Stokes'schen Formel gefunden hatten, erfuhr das Fallgesetz eine eingehende Bearbeitung durch Millikan, Mattauch u. a. anlässlich der Bestimmung des elektrischen Elementarquantums (Uebersicht in Wasser: Physikal. Zeitschr. Bd. 34, 1933, S. 257; das Fallgesetz für Tabakrauch s. Mönch: Physikal. Zeitschr. Bd. 34, 1933, S. 77). Für alle Zwecke der Staubtechnik genügt die vereinfachte Formel von Cunningham mit nur einer Konstanten A:

$$\frac{w}{K} = \frac{1}{6\pi\mu a}\left(1 + A\frac{l}{a}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

wobei a wieder den Kugelradius, l die freie Weglänge der Luftmoleküle (bei 0° und 760 mm $= 0{,}06\,\mu$) und $A = 0{,}87$ bedeuten. Solange $a \gg l$, ist die Klammer auf der rechten Seite der Gleichung (2) $= 1$, d. h. es gilt die Lösung von Stokes.]

Ungünstig ist, dass mit feiner werdendem Staub die abscheidende mechanische Kraft quadratisch abnimmt, und man fragt sich unwillkürlich, ob es nicht ein günstigeres Verfahren gibt. Dieses liegt im elektrischen Verfahren vor. Die abscheidende Kraft ist da gleich Feldstärke $E \times$ Ladung Q, und weil die Ladung Q, wie später noch gezeigt wird, mit a^2 geht, läuft die Grenzgeschwindigkeit w hier mit a. Wenn man also von einem Staubteilchen von 10 μ unter im übrigen gleichen Verhältnissen zu einem solchen von 1 μ übergeht, so wird die mechanische Kraft darauf hundertmal kleiner, die elektrische Kraft aber nur zehnmal kleiner. Für feinen Staub — man denkt hier gerade an die silikosegefährliche Korngrösse 1 bis 5 μ — wird also theoretisch der elektrische Entstauber dem mechanischen überlegen. Für ganz feinen Staub ($a < 1\,\mu$), wo die Ladung Q proportional a geht, wird das elektrische w von a unabhängig und stellt somit in diesem Grenzfall zugleich die günstigste Lösung dar.

Elektrofilter

Weil die elektrische Kraft laut ihrer Definition nur an einer elektrischen Ladung angreifen kann, müssen bei elektrischer Entstaubung die Staubteilchen erst aufgeladen werden. Zu diesem Zweck werden in jedem Elektrofilter durch Ionisierung der Trägerluft (oder des Trägergases) erst Ladungen, also Ionen erzeugt, diese Ionen auf die Staubteilchen gesetzt und nun diese durch die Feldstärke E an die Niederschlagsplatten getrieben. Wie Abb. 2 zeigt, besteht das einfachste Modell eines Elektrofilters aus dem Ionenerzeuger, einem auf hohe negative Gleichspannung geladenen Sprühdraht mit dem Radius r in der Axe eines metallisch leitenden, geerdeten Zylinders mit dem Radius R,

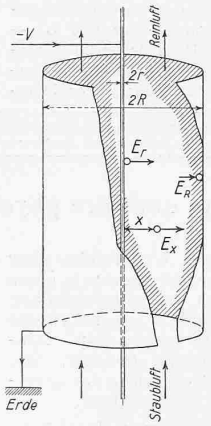


Abb. 2. Schema des Rohr-Elektrofilters

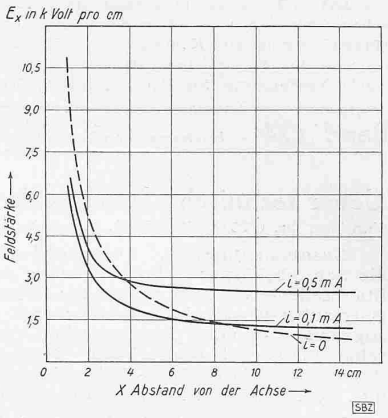


Abb. 3. Feldstärke im Rohrfilter als Funktion des Abstandes von der Axe

der Niederschlagselektrode. Die Staubluft tritt beispielsweise unten ein und oben als Reinluft wieder aus. Die Geschwindigkeit v der Luftströmung wird so gering gewählt, dass die Strömung eine laminare, d. h. mit glatten Stromlinien wäre, wenn nicht der elektrische Wind, der von zahlreichen diskreten Glimmpunkten auf dem Sprühdraht ausgeht, für eine turbulente Durchmischung der Staubluft sorgen würde.

Massgebend für die elektrischen Erscheinungen in einem solchen Zylinderkondensator sind die elektrischen Feldstärken E_r am Sprühdraht und E_R am Zylinder, jene für den Eintritt des Sprühens, d. h. des Ionisierungsprozesses, diese für die Staubabscheidung am Zylinder. Für die Berechnung von E sind im besonderen drei Fälle ins Auge zu fassen:

E ohne Sprühen, also rein elektrostatisches Feld, Strom $i = 0$, Luft ohne Staub,

E' mit Sprühen, $i > 0$, Luft ohne Staub,

E'' mit Sprühen, $i'' > 0$, Luft mit Staub.

Wird an den Sprühdraht eine wachsende Spannung V angelegt, so steigt die Feldstärke E_r bis zu dem Grenzwert E_r^0 linear mit der Spannung V an. Bei diesem Grenzwert, der laut Gleichung

$$E^0_r = 33{,}9 \cdot \varrho_0 + 10\sqrt{\frac{\varrho_0}{r}}$$

für Luft nur von deren Dichte ϱ_0 ($\varrho_0 = 1$ für 0° C und 760 mm), sowie vom Drahtradius r abhängt, stabilisiert sich das E_r und es erscheint mit weiter zunehmenden V der quadratisch zunehmende Sprühstrom i. Dem E^0_r entspricht die Anfangspannung V^0. Ist Staub in der Luft vorhanden, so verschiebt sich V^0 nach oben; die Erhöhung ist ungefähr proportional der durch den Staub zusätzlich hineingebrachten Raumladung.

Wie Abb. 3[3]) zeigt, nimmt E vom Sprühdraht an nach aussen ab (gestrichelte Kurve) und zwar umgekehrt proportional zum Axenabstand. Am Zylinder beträgt es

$$E_R = \frac{V}{R}\,\frac{1}{ln\frac{R}{r}}$$

Das Sprühfeld E'_r am Zylinder ist dagegen, wie sich durch Rechnung zeigen lässt, in erster Näherung nicht mehr vom Zylinderradius R abhängig, sondern von der Stromstärke i nach

$$E'_R = \sqrt{\frac{2\,i}{u}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

wo u den Beweglichkeitswert der negativen Luft-Ionen bedeutet ($= 1{,}75$ cm/s pro V/cm). Abb. 3 zeigt den genaueren Verlauf von E'_R in Funktion des Axenabstandes (ausgezogene Kurven für zwei verschiedene i). E' ist, wenigstens im äussern Teil des Feldes, konstant und dieser waagrechte Verlauf liegt umso höher, je grösser i ist. Wenn Staub hinzu kommt, so ändert sich das Bild insofern, als der waagrechte Kurvenast nach aussen linear ansteigt. Es ist also $E''_R > E'_R$ und deshalb auch das Linienintegral der Feldstärke, d. h. die Spannung zwischen Draht und Zylinder mit Staub, grösser als ohne Staub. Der Staub sucht also die Sprühentladung zu ersticken. Näherungsweise ist[4])

$$E''_R = E'_R\left(1 + \frac{p \cdot S \cdot R}{3}\right)$$

Bei gleicher Spannung erhält man einen kleineren Strom i'' und zwar im Verhältnis von

$$\frac{i''}{i} = 1 - \frac{p \cdot S \cdot R}{3}$$

[3]) Eucken-Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. I/4, S. 42 (Abschnitt von Ladenburg über elektr. Gasreinigung).

[4]) Pauthenier: Rev. Gén. de l'Electr. XLV, 1939, S. 589.

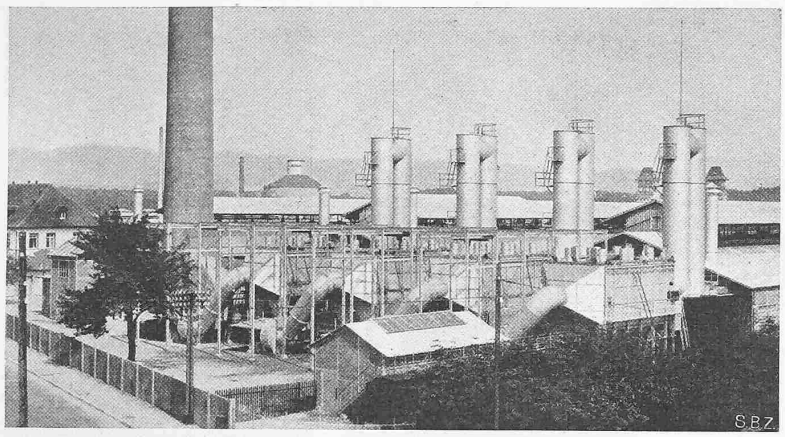


Abb. 4. Grossanlage für die Reinigung der Abgase von Aluminium-Elektrolyse-Oefen mit Elektrofiltern

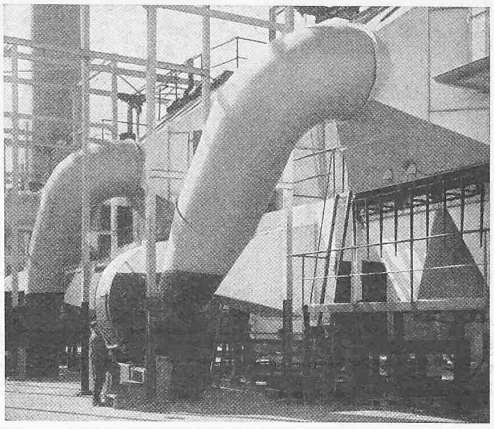


Abb. 5. Einzelansicht

wobei S die totale Stauboberfläche pro cm³ und p einen Polarisationsfaktor bedeutet, der mit der bekannten Dielektrizitätskonstanten ε des Staubmaterials wie folgt zusammenhängt

$$p = 1 + 2\,\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}$$

Fragen wir nach der Aufladung der Staubteilchen im Ionenstrom des Zylinderkondensators, so kann diese auf zweierlei Art geschehen. Bei ganz kleinen Teilchen, z. B $< 1\,\mu$, reicht schon die thermische Molekularbewegung der Luftionen aus, um sie mit den noch ungeladenen oder erst teilweise geladenen Teilchen in Berührung zu bringen. Für alle grösseren Staubteilchen, also bei allem praktisch sichtbaren Staub, spielt die Aufladung durch Brown'sche Bewegung eine relativ geringe Rolle. Die Aufladung geschieht dann hauptsächlich, und zwar auf viel höhere Staubladungen, durch Auftreiben der Ionen mittels der Feldstärke E'' auf die Staubkörner. Es lässt sich rechnerisch und experimentell zeigen, dass die Grenzladung Q, die ein Staubkorn vom Radius a am Ort der Feldstärke E'' erreichen kann,

$$Q = p \cdot E'' \cdot a^2$$

beträgt, wobei p wieder den schon genannten Polarisationsfaktor bedeutet. Für metallischen Staub ($\varepsilon = \infty$) ist also $p = 3$. Praktisch heisst das, dass z. B. bei einem Staubkorn von $10\,\mu$ Durchmesser die Grenzladung Q viele 10 000 elekrische Elementarquanten (Elektronen) betragen kann.

Das technische Streben nach möglichst hohen E und Q findet seine Grenze darin, dass die Sprühentladung instabil wird und als Funke Kurzschluss macht zwischen Draht und Zylinder. Die betrieblich zulässige Spannung wird von Fall zu Fall derart eingestellt, dass solche Kurzschlüsse, die natürlich automatisch abgeschaltet werden müssen, nicht zu häufig auftreten.

Ferner ist zu sagen, dass man praktisch nur noch selten ein zylindrisches Feld anwendet, wobei das Gas axial durch ein Rohr hindurchströmt. Meist lässt man das Gas zwischen parallelen, ebenen Flächen strömen, die als Niederschlagsplatten ausgebildet sind. In der Mitte zwischen je zwei Platten liegt dann eine gerade Reihe Sprühdrähte. Ausser dem Abstand Draht-Platte ist der Abstand von Draht zu Draht wichtig; denn wenn die Drähte einander zu nahe sind, stören sie sich gegenseitig am Sprühen, und wenn sie zu grosse Abstände haben, erhält man für ein gegebenes Feldvolumen nicht genügend Sprühstrom. Im übrigen sind die grundlegenden Erscheinungen im Plattenfilter die selben wie im einfachen Rohrfilter.

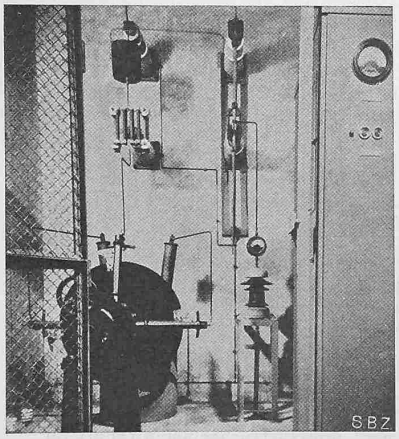


Abb. 6. Blick in eine Hochspannungs-Gleichrichter-Kabine

Auch der Verlauf der Staubabscheidung über die Filterlänge l, also vom Staubeintritt mit der Anfangs-Staubkonzentration n_a bis zum Reinluftaustritt mit der Endkonzentration n_e lässt sich ausrechnen, und zwar geht das Verhältnis der abgeschiedenen Staubmenge $n_a - n_e$ zur Anfangsmenge n_a, also der Wirkungsgrad der Staubabscheidung, nach

$$\eta = \frac{n_a - n_e}{n_a} = 1 - e^{-\frac{2\,w_R \cdot l}{R \cdot v}}$$

Massgebend für die Güte der Entstaubung über eine Filterlänge l ist also, abgesehen von den geometrischen und elektrischen Daten der Filterkonstruktion, den Eigenschaften der Staubluft und des Staubes (R, l und w_R) hauptsächlich die Luftgeschwindigkeit v oder, wenn nur in der Länge l und Geschwindigkeit v verschiedene Filter zu vergleichen sind, die Verweilzeit $\frac{l}{v}$ im Filter.

[Die Herleitung dieser Gleichung erfolgt unter der Annahme, dass die Staubkonzentration über jeden Querschnitt konstant ist (Durchwirbelung durch den elektrischen Wind) und dass die Abwanderung des Staubes aus jedem Querschnitt lediglich an seinem Umfang ($2\pi R$) mit der konstanten radikalen Geschwindigkeit w_R erfolgt. Die Abnahme nach dem Exponentialgesetz besagt, wie in allen ähnlichen Fällen (Lichtabsorption, radioaktiver Zerfall, Amplituden der gedämpften Schwingung, Ausgleichströme bei elektrischen Schaltvorgängen), dass sie in jedem Querschnitt der darin noch vorhandenen Konzentration proportional ist oder, was dasselbe ist, dass die prozentuale Abnahme in jedem Querschnitt über die Filterlänge konstant ist.]

Die Wirkungsgradkurve $y = 1 - e - x$ verläuft, verglichen mit andern bekannten Kurven, die von 0 asymptotisch nach 1, d. h. nach 100 % hinaufstreben, bekanntlich gerade am ungünstigsten. Mit zunehmendem x, d. h. mit zunehmender Filterlänge oder zunehmender Verweilzeit, kommt sie am langsamsten an 1 hinauf und dies macht verständlich, warum es dem Techniker so viel Mühe bereitet, bei der Entstaubung die letzten Prozente oder Promille herauszuholen.

Es erübrigt sich, hier eine Reihe ausgeführter Konstruktionen von Elektrofiltern zu zeigen; solche laufen zu Tausenden auf der ganzen Welt. Meist sind sie installiert in den industriellen Anlagen, wo die grössten Mengen Staub oder staubhaltigen Abgases laufend entstehen, wie in Zementwerken, Hüttenwerken, chemischen Fabriken, Kohlenstaubfeuerungen, usw. Ein Elektrofilter kann für Abgase der verschiedensten Zusammensetzung, Drücke und für Temperaturen bis 450° gebraucht werden, d. h. bis zur Grenze der Haltbarkeit einer eisernen Konstruktion. Hier sei auf die Gleichungen (1) und (3) verwiesen. Die Ionenbeweglichkeit u nimmt fast bei allen Gasen linear mit der absoluten Temperatur zu, also E'_R entsprechend ab. Weil ausserdem die Viskosität μ des Gases mit steigender Temperatur zunimmt, so nimmt aus beiden Gründen die Auswanderungsgeschwindigkeit w_R an der Niederschlagsplatte stark ab.

Um die Leistungsfähigkeit des elektrischen Verfahrens zu zeigen, genügt der Hinweis auf einige Extremfälle, wie die ganz grosse und kleine Anlage.

Als Beispiel für *Grossanlagen* seien die Hochofengasreinigungen erwähnt mit einer Leistung pro Anlage von 35 und mehr Nm³/s [5]). Das Gas tritt mit beispielsweise 200° C in einen Vorkühler, wo Wasser eingespritzt wird, dann in ein erstes Elektrofilter, das trocken, also über dem Taupunkt des Gases arbeitet und wo schon über 90 % des anfänglich einige gr/m³ betragenden Staubgehaltes abgeschieden werden. Dann folgt der Zwischen-Kühler (ein Hordenwäscher) und das Gas tritt jetzt gesättigt in das zweite Elektrofilter, wo durch Berieselung der Elektroden von oben der abgesetzte Staub abgewaschen wird. Beim

[5]) Rabe: Stahl und Eisen 61, 1941, S. 1079; Erbauer Lurgi, Frankfurt a.M.

Austritt hat das Gas noch rd. 60° und einen Staubgehalt von unter 10 mg/m³, ist also geeignet als Maschinengas. Durch die Doppelreinigung sind total über 99 % des Staubes ausgeschieden worden. Da solche Anlagen gross und teuer sind, hat man mit Erfolg versucht, den ersten Kühler und das erste Filter wegzulassen und dafür den zweiten Kühler und das Nassfilter weiter ausgestaltet. Damit gewinnt man zwar keinen trockenen Staub mehr, aber die Anlage ist bei ungefähr gleicher Reinigung stark verbilligt.

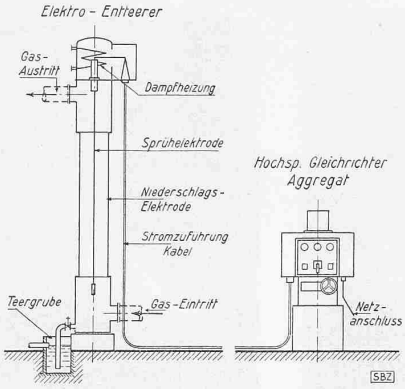


Abb. 7. Schema eines Elektroentteerers

Abb. 4 und 5 zeigen eine Grossanlage für einen anderen Fall der kombinierten Gasbehandlung, nämlich für die Reinigung des Abgases von Aluminium-Elektrolyse-Oefen, wie sie von der Aluminium-Industrie A.-G. Chippis (Wallis), in mehreren Anlagen für je rd. 40 Nm³/s gebaut worden sind[6]). Das Abgas enthält aggressive Gase wie Fluor und schweflige Säure, dann feste Fluoride, Tonerde und Russ als Staub und endlich noch Teerdämpfe. Es muss in den den Elektrofiltern vorgeschalteten Kühltürmen nicht nur gekühlt, sondern chemisch behandelt werden. Zur Einspritzung nimmt man nicht Wasser, sondern Sodalösung, die das Fluor bindet. Der feste Staub und der Teer werden sodann im Trocken-Elektrofilter zu über 90 % abgeschieden und anschliessend wird in den Nasswäschern, die zwischen den Filtern zu ebener Erde liegen (darüber die Kranbahnen) der letzte Rest von Fluor, Schwefel und Teer ausgewaschen. Erschwerend wirkt das verschiedene Verhalten von Staub und Teer im Elektrofilter. Während der Staubniederschlag in der ersten Hälfte des Filters pulvrig ist und leicht abgeschüttelt werden kann, wird er gegen das Filterende klebrig und an den letzten Platten klebt er wie schwarze Schmiere. Grossanlagen dieser Art erhalten den hochgespannten Gleichstrom durch sogenannte offene, d. h. innerhalb einer Kabine aufgestellte Hochspannungsgleichrichter-Anlagen. Abb. 6 zeigt das Innere einer solchen Kabine, worin links der durch Synchronmotor angetriebene Scheibengleichrichter, dahinter der Oeltransformator, rechts davon der Kabelendverschluss zu sehen sind.

Als Beispiel für *Kleinanlagen* zeigt Abb. 7 das Schema eines Entteerers für Leuchtgas, wie sie in den letzten zwei Jahren in vielen schweizerischen Gaswerken aufgestellt worden sind. Für eine gute Teerabscheidung muss man durch Senken der Temperatur erst möglichst viel Teer kondensieren und was dann kondensiert ist, wird ungeachtet der hohen Feinheit der Teernebel-Tröpfchen auf elektrischem Wege sicher entfernt. Die Erfahrung zeigt, dass bei 20° C der Teer im Leuchtgas schon weit über 99 % kondensiert ist, sodass die verbleibenden Spuren keine Rolle mehr spielen. Natürlich ist das Gas bei dieser Arbeitstemperatur mit Wasserdampf gesättigt, was für die elektrische Wirkung vorteilhaft ist (Einfluss auf u). Im übrigen werden Wassernebel genau wie Teernebel quantitativ abgeschieden.

Wie aus Abb. 7 ersichtlich, besteht auch der Elektro-Entteerer aus zwei Teilen, dem Hochspannungserzeuger rechts und dem eigentlichen Filter links, die zusammen durch das armierte Hochspannungskabel (50 bis 70 kV) verbunden sind. Der Teer muss, wie das bei normal arbeitenden Gaswerken und Kokereien zutrifft, von solcher Viskosität sein, dass er bei der angewendeten Arbeitstemperatur von den Niederschlagsflächen vollständig abfliesst. Die gekapselte Hochspannungszentrale besteht aus Oeltransformator (unten), Synchronmotor (oben) und rotierendem Gleichrichter. Seitlich am Gleichrichtergehäuse ist die Schalttafel angebracht. Abb. 8 zeigt eine gekapselte Hochspannungszentrale und Abb. 9 einen ausgeführten Gaswerk-Entteerer. Die Abscheidungswirkung solcher Anlagen liegt über 99,5 %.

Andere Kleinanlagen sind die aus Amerika stammenden Luftreinigungen für medizinische Zwecke, also eine Art Konditionierung der Atemluft, die ausser der Regelung von Temperatur und Feuchtigkeit die Feinreinigung von fremden Partikeln auf elektrischem Wege und die Herstellung eines günstigsten Ionisationszustandes der Luft umfasst. Da solche Filter mit niedrigeren Spannungen arbeiten als die vorerwähnten Industriefilter und ausserdem eine besondere Feldkonstruktion besitzen,

[6]) Elektrofilter von der Oski A.-G. in Zürich.

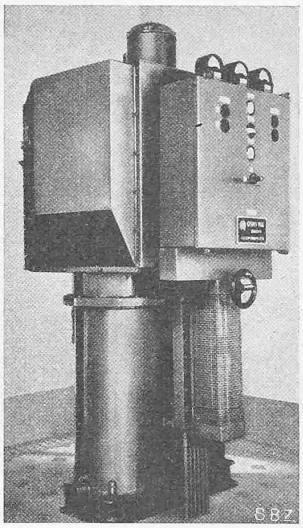


Abb. 8. Gekapselte Hochspannungsgruppe für Elektro-Entteerer

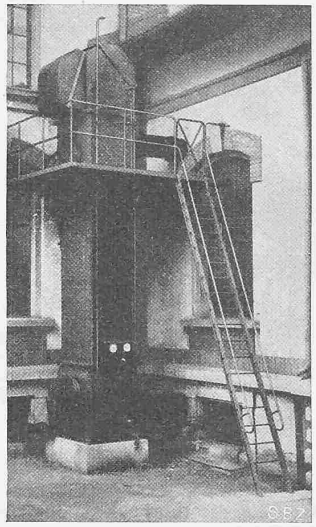


Abb. 9. Elektro-Entteerer in einem Gaswerk

besteht keine Gefahr, dass die Hochspannungskorona schädliche Mengen von Stickoxyd erzeugen kann. Abb. 10 zeigt ein solches Filter der Westinghouse Electr. Co. und der Pangborn Corp. für Luftströmung von unten nach oben, sehr kompakt zusammengebaut mit dem Hochspannungs-Erzeuger rechts; dieser ist mit Glühkathoden-Gleichrichterröhren, Transformer und Kapazitäten ausgerüstet.

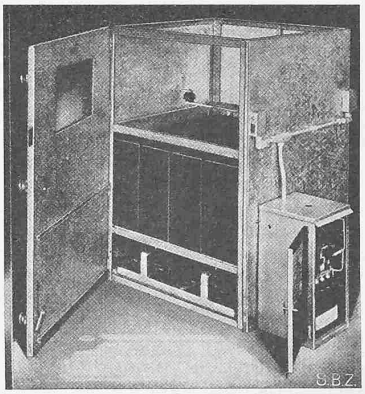


Abb. 10. Luftreiniger für medizin. Zwecke

Abb. 11 zeigt die Wirkungsweise eines dem vorigen ähnlichen Filters der American Air Filter Inc. in Louisville (Kent.), das ausser dem elektrischen Feld noch eine Staubabscheidung durch selbstreinigende, ölbenetzte Prallflächen hat. Die dunkle Kreisfläche links zeigt die Verunreinigungen der Atemluft vor dem Filter, also das, was wir dauernd einatmen. Dabei ist zu beachten, dass rd. 90 % dieses «Schmutzes» unter 1 μ, d. h. unter der Sichtbarkeitsgrenze liegen. Die Fläche in der Mitte zeigt den schon etwas geringeren Staubgehalt unter alleiniger Tätigkeit der Prallflächen, die Fläche rechts (sauber) den praktisch auf 0 gesunkenen Staubgehalt nach Anlegen der Hochspannung.

Diese Luftfilter entfernen bei richtiger Bemessung ohne schädliche Nebenwirkung alle in der Luft vorhandenen mikroskopischen und submikroskopischen Schwebekörper, also vom sichtbaren Staub und Zigarrenrauch über die Bazillen bis zu den in der Tabelle gezeigten grossen und mittleren Ionen und Aitken-Kernen. Bis zu welchem Prozentsatz im gegebenen Fall die Aitken-Kerne abgeschieden werden, ist allerdings nicht bekannt; die medizinische Wirksamkeit oder Unwirksamkeit der Aitken-Kerne ist noch umstritten. Anderseits besteht wohl kein Zweifel, dass z. B. der Krankheitsverlauf von Heufieber oder von gewissen Arten Asthma durch solche Elektrofilter günstig beeinflusst werden kann.

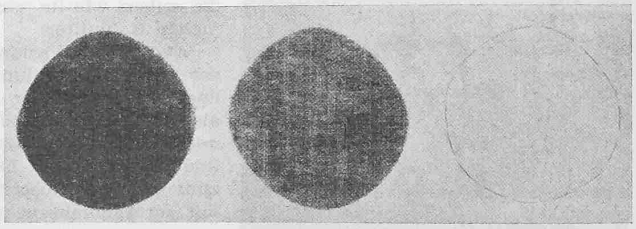


Abb. 11. Filterwirkung. Links: Schwebeteilchen der Atemluft vor dem Filter; Mitte: nach Durchgang durch ölbenetzte Prallflächen ohne Hochspannung im elektr. Feld · rechts wie Mitte jedoch mit Hochspannung

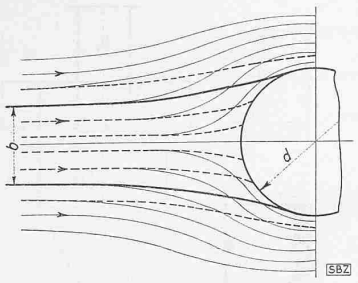


Abb. 12. Staubausscheidung bei Strömung um einen Kreiszylinder

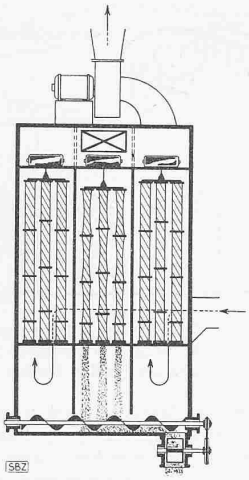


Abb. 13 (rechts). Schema eines automatisch abklopfenden Schlauchfilters

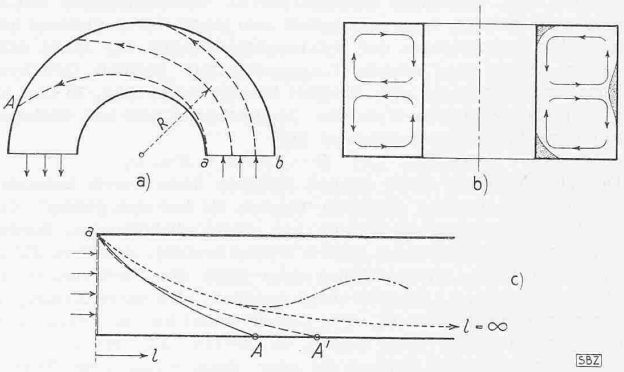


Abb. 14. a) Staubausscheidung in einer laminaren, um 180° gekrümmten Kanalströmung, b) Schema des Doppelwirbels in derselben Kanalströmung wie a, c) Staubausscheidung durch Schwerkraft in laminarer und turbulenter, gerader Kanalströmung

Mechanische Staubfänger

Fast sämtliche mechanischen Staubfänger, heissen sie nun Zyklone, Schlauchfilter, Prallflächen oder Schleudertrommeln, beruhen auf der Trägheitskraft, meist der Zentrifugalkraft. Nur die reinen Siebe, die aber kaum je angewendet worden sind, und die früher in Hüttenwerken oft vorhandenen Flugstaubkammern beruhen nicht auf der Trägheitskraft; diese nützten die Schwerkraft aus. Solche Kammern sind heute in jeder Hinsicht, technisch und hygienisch, überholt. Es ist leicht einzusehen, dass die Trägheitskraft auf ein Staubteilchen sehr viel grösser gemacht werden kann, als die Schwerkraft auf das selbe Teilchen. Bekanntlich ist die Zentrifugalkraft Z beim Laufen auf einem Kreis mit dem Radius r und mit der Winkelgeschwindigkeit ω

$$Z = m\,\omega^2 \cdot r$$

und die Schwerkraft auf die selbe Teilchenmasse $G = m \cdot g$. Verlangt man, dass die Zentrifugalkraft auf z. B. $r = 25$ cm hundertmal grösser wird als die Schwerkraft, so ergibt sich aus

$$\frac{Z}{G} = \frac{m\,\omega^2 \cdot r}{m \cdot g} = 100 \qquad n = \frac{60 \cdot \omega}{2\,\pi} = 600 \text{ U/min}$$

oder 16 m/s Umfangsgeschwindigkeit. Das ist, technisch gesehen, eine leicht zu erreichende Drehung.

Die Zentrifugalkraft wirkt sich hauptsächlich in zwei Formen aus, nämlich als staubausscheidende Kraft vor einem Hindernis, wie es die Fasern eines Stoffilters sind, oder als ausschleudernde Kraft einer Kreisbewegung, wie bei den bekannten Zyklonen. Die Staubausscheidung in den Stoffiltern beruht auf zwei Vorgängen: einmal können die feinen Kanäle zwischen den Fasern des Stoffes enger sein als die auszuscheidende Staubkörnung. In diesem sozusagen trivialen Fall wirkt der Stoff einfach als Sieb. Für allen Staub, der feiner ist als die Siebmaschen, tritt eine Ausscheidung auf nach dem Schema der Abb. 12, d. h. das Staubkorn wird durch die Trägheitskraft auf der Wollfaser, die in diesem Fall als kreisrund angenommen ist, niedergeschlagen[7]). Da die Strömung in so feinen Kanälen stets laminar ist, verlaufen die Stromlinien so, wie sie dünn ausgezogen sind. An der Krümmung dieser Linien tritt durch die Trägheitskraft die Auswanderung des Staubes gegen die Wollfaser ein mit dem Erfolg, dass aller Staub innerhalb der stark ausgezogenen Grenzbahnen, also innerhalb eines Streifens von der Breite b, auf der Faser niedergeschlagen wird. b ändert sich mit der Feinheit des Staubes. Neben der Siebwirkung hat also jeder Wollstoff für eine bestimmte Staubfeinheit einen Entstaubungsgrad durch «Prallwirkung». Andere Luftfilter, die die Prallwirkung benützen, sind Filterfüllungen aus Raschigringen oder andern Füllkörpern.

Wie bekannt, eignen sich Luftfilter mit Stoffschläuchen in sehr vielen Fällen, sofern es sich nicht um feinsten Staub (unter 10 μ) und sehr hohe Abscheidungsgrade handelt und solange die Staubluft nicht heiss oder mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Manchmal wirkt die Veränderlichkeit der Stoffschläuche, die mit der Zeit an Wirksamkeit abnehmen, störend. Charakteristisch für ein Stoffilter laut Abb. 13 ist die Unterteilung in mehrere Kammern, die der Reihe nach vom Druck entlastet und kräftig abgeklopft werden müssen (mittlere Kammer in Abb. 13), was von Hand oder vollautomatisch geschehen kann. Der Druckverlust in einem staubbeladenen Schlauch beträgt leicht das Mehrfache gegenüber dem Druckverlust im staubfreien Schlauch, woraus die Wichtigkeit einer regelmässigen Abklopfung des gewöhnlich fest haftenden Staubes folgt. Eine neueste Konstruktion solcher Schlauchfilter spült die abklopfende Kammer jeweilen noch im Gegenstrom mit Reinluft durch.

Der andere Fall, d. h. die Kreisströmung eines *Zyklons* mit dem mittleren Radius R sollte sich auf den ersten Blick so darstellen lassen, wie Abb. 14a zeigt. Aller Staub auf dem Eintrittsquerschnitt a—b und besonders auch der anfangs am ungünstigsten, d. h. bei a an der Zykloninnenwand gelegene, wandert unter dem Einfluss der Zentrifugalkraft nach aussen ab, sodass spätestens bis zum Punkt A der ganze Luftstrom entstaubt wäre (einheitliche Staubkörnung vorausgesetzt). Die Bahnkurven der Staubteilchen lassen sich für jede angenommene Geschwindigkeitsverteilung über den Strömungsquerschnitt graphisch integrieren, und man sollte meinen, damit wäre das Problem gelöst. Der Versuch zeigt aber, dass dem nicht so ist und zwar einmal, weil jede technisch brauchbare Strömung in einem solchen Kreiskanal stark turbulent ist, und weil zudem infolge der Wandreibung sich sekundäre, störende Strömungen über die angenommene Kreisströmung überlagern (Abb. 14b).

In Abb. 14c wird angenommen, der Kreiskanal sei der Einfachheit halber in einen geraden Kanal gestreckt und statt der radialen Zentrifugalkraft wirke die überall gleichgerichtete Schwerkraft nach unten. Wenn die Bahn des am ungünstigsten, d. h. in der Ecke links oben gelegenen Staubteilchens betrachtet wird, endet diese nach der Weglänge l bei laminarer Strömung in einem bestimmten Punkt A, d. h. der ganze Staubluftkanal ist im Querschnitt A entstaubt (einheitliche Staubkörnung vorausgesetzt), bei einer andern Geschwindigkeitsverteilung in A'. Die Turbulenz hat das Bestreben, in jedem Querschnitt die dort noch nicht abgesetzten Staubteilchen wieder gleichmässig über die ganze Kanalhöhe zu verteilen, und es lässt sich leicht zeigen, dass sich für eine bestimmte Weglänge l der Staubluft ein Entstaubungsgrad

$$\eta = \frac{n_a - n_e}{n_a} = 1 - e^{-c \cdot l}$$

ergibt, also wieder die gleiche ungünstige Exponentialkurve, wie bei der elektrischen Entstaubung, trotzdem jetzt die Ursache der Mischbewegung eine rein hydrodynamische ist. Diese Kurve (kurz gestrichelt) kommt für endliches l überhaupt nie auf 0, d. h. man kann die Staubluft so oft im Kreis herumführen als man will, man kommt nie auf 100 % Reinigung. Hier beginnen die Schwierigkeiten der mechanischen Entstaubung, und wenn man noch die Wirkungen der Sekundärströmungen hinzunimmt, kommt es noch viel schlimmer, denn unter diesen Umständen kann der bereits abgesetzte Staub in gewissen Teilen des Strömungskanals wieder aufgewirbelt werden. Die sogenannte Entstaubungsbahn in Abb. 14c steigt nach Durchlaufen eines Minimums wieder an (strichpunktiert gezeichnet) und wird also ganz unbrauchbar.

Abb. 15[8]) zeigt die merkwürdige Ungleichheit der Staubverteilung, die eintritt, wenn ein anfänglich gleichmässiger Strom von Staubluft einen halben Kreisbogen (180°) durchlaufen hat, und es liegt auf der Hand, dass bei Durchlaufen eines grösseren, z. B. eines vollen Kreisbogens, wie das in jedem Zyklon der Fall ist, die Verhältnisse ganz schwierig werden und nur durch das Experiment zu klären sind. Meist spricht man von einem sekundären Doppelwirbel in der Form, wie ihn die Abb. 14b zeigt. In der Mitte des Kreiskanals wird der Staub wohl, wie es sein muss, ausser durch die Hauptströmung auch durch den sekundären Doppelwirbel nach aussen getrieben. An den beiden Bodenflächen aber wird er relativ nach innen getrieben.

[7]) *Sell:* Forschungsheft VDI Nr. 347, 1931, S. 5.

[8]) *Wellmann:* Feuerungstechnik 26, 1938, S. 137.

Bei den vielerorts durchgeführten Versuchsreihen hat es sich bald gezeigt, dass es möglich sein muss, durch passend ausgesuchte Verhältnisse der Zyklonabmessungen für nicht allzu feinen Staub gute Abscheidungsgrade mit kleinen Druckverlusten zu erreichen. Als Beispiel hierfür zeigt Abb. 16 die Angaben des ter Linden-Patentes. Man schreibt hier vor, basierend auf dem Austrittsdurchmesser D_2:

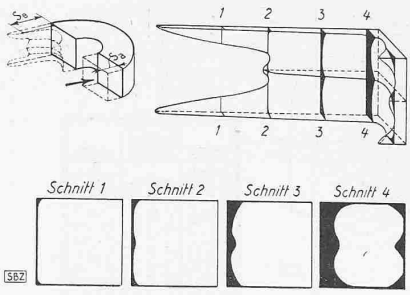
$$D_1 = 2{,}5 \cdot D_2; \quad H = 2{,}5 \cdot D_2; \quad S = D_2$$

Der Druckverlust eines solchen Zyklons kann durch besondere Massnahmen niedrig gehalten werden. Es hat sich gezeigt, dass die Hauptströmung im Zyklon aus einem absteigenden äussern und einem aufsteigenden innern Wirbel besteht. Als Trennfläche für diese beiden Wirbel kann man etwa die Fortsetzung der Mantelfläche des Austrittsrohres ansehen, also einen Kreiszylinder vom Durchmesser D_2. Der Druckverlust hat im wesentlichen die Energie dieser zwei Wirbel zu liefern (abgesehen von den Reibungsverlusten) und es ist klar, dass, wenn diese Energie durch einen Leitapparat zurückgewonnen werden kann, damit eine fühlbare Erniedrigung des Druckverlustes zu erzielen ist (10 bis 30 %). Dies ist möglich entweder durch einen Satz von schraubenartigen Leitflügeln im Austrittsrohr oder vor dem Eintritt in das Austrittsrohr, wodurch der innere Wirbel wieder in eine Parallelströmung im Austrittsrohr zurückgeführt wird. Als Leitapparat kann auch eine Austrittspirale über dem Zyklondeckel dienen, die gewissermassen als Gegenstück zur Eintritt-Leitspirale dient. Abgesehen von solchen hydrodynamisch gerechtfertigten Leitvorrichtungen gelten sonstige Einbauten in Zyklonen allgemein als unerwünscht, worüber man sich angesichts des Vielen, was schon probiert und wieder verlassen worden ist, nicht zu verwundern braucht.

Als weiteres gutes Zyklonmodell, das im letzten Jahrzehnt durch systematische Arbeit entwickelt worden ist, gilt das von van Tongeren [9]). Es ist schon etwas komplizierter als der vorhin genannte ter Linden-Zyklon, und man sagt, van Tongeren hätte mehr als 10 000 Versuche machen müssen, um alle störenden Einflüsse auszuschalten. Van Tongeren arbeitet mit grösseren Geschwindigkeiten, also kleinern Apparateabmessungen als üblich, und es finden bei ihm ausser den schon genannten Abmessungsverhältnissen der Doppelwirbel im oberen Zyklonteil und der Wirbelkern im untern Zyklonteil (Trichter) eine besonders eingehende Berücksichtigung. Im besonderen wird der Staub an allen Stellen im Zykloninnern, wo er sich unter dem kombinierten Einfluss von Hauptwirbel und Doppelwirbel sammelt, raschmöglichst durch Schlitze oder Taschen in der Wandung aus der Strömung entfernt. Abb. 17b zeigt schematisch einen van Tongeren-Zyklon im Vergleich zu einem gewöhnlichen, unrichtigen Zyklon nach Abb. 17a. Wie daraus ersichtlich, kommt es auf die Lage der Staubtasche, das Wiedereinführen der Staubtasche in den Trichter und die Form des Trichters wesentlich an [8]). Der sekundäre Doppelwirbel, den ich vorhin als störendes Element erwähnte, wird zur besseren Staubabscheidung direkt herangezogen. Infolge der Mannigfaltigkeit der van Tongeren'schen Konstruktion erkundigt man sich über die für einen gegebenen Zweck geeignete am besten beim Hersteller [10]).

Allgemein ist zu sagen, dass Zyklone guter Bauart bei mittlerem und grobem Staub, d. h. über 10 μ Korndurchmesser, heute gute Entstaubungsgrade (90 bis 95 % und mehr) erreichen, dass aber bei feinerem Staub (unter 10 μ) auch die Zyklone kompliziert und teuer werden, wenn sie noch befriedigen sollen. Im besonderen ist dann nicht nur bei grossen Leistungen, sondern auch bei mittleren und kleinen Leistungen eine Unterteilung in eine Reihe von parallel geschalteten Wirbeln von geringem Durchmesser, also grosser Zentrifugalkraft nötig. Der Druckverlust ist in solchen Systemen wegen der angewendeten hohen Geschwindigkeit nur wenig geringer als in Schlauchfiltern und beträgt in jedem Falle ein Vielfaches des Druckverlustes im Elektrofilter.

Bei Zyklonen sind, wie allgemein bei mechanischen Entstaubern, noch die folgenden zwei Punkte besonders zu beobachten: Einmal ist für den mechanischen Staubfänger, infolge seiner hohen Selektivität noch mehr als für den elektrischen, eine vorherige Staubuntersuchung unerlässlich, und wenn möglich ist auch das Verhalten einer grösseren Staubprobe im wirklichen Staubabscheider zu prüfen. Ein zweiter wichtiger Punkt ist die Abfassung von Garantien. Infolge der Schwierigkeit, eine wirklich verbindliche Staubprobe zu erhalten, zieht man es oft vor, die Garantie betreffend Entstaubungsgrad nicht pauschal abzufassen, sondern auf die passend gewählten einzelnen Kornfeinheiten aufzuteilen. Wenn z. B. ein Staub, der alle Korngrössen von 1 bis 100 μ enthält, in Fraktionen von 1 bis 5, 5 bis 20 μ usw. aufgeteilt wird und die Entstaubungsgrade für jede dieser Fraktionen festgelegt werden, lässt sich der Gesamt-Entstaubungsgrad leicht aus der Summe der Fraktions-Entstaubungsgrade errechnen. Ist dann der im Betrieb anfallende Staub nicht gleich zu sammengesetzt wie das anfänglich vorgelegene Muster, so bleiben die garantierten Fraktions-Entstaubungsgrade trotzdem bestehen und nur der Gesamt-Entstaubungsgrad ändert sich dementsprechend. Dabei kann einer gewissen Aenderung der Staubzusammensetzung (Abrieb im Staubfänger), wenn vorher durch Versuche festgestellt, Rechnung getragen werden.



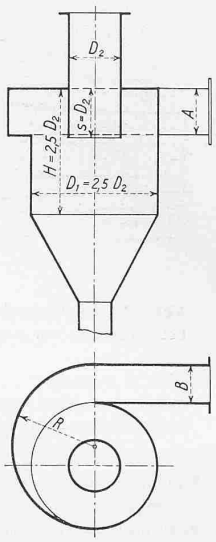


Abb. 15. Staubverteilung nach 180° Umlauf
Abb. 16 (rechts). Schematischer Schnitt durch den ter Linden-Zyklon

Wie schon erwähnt, wird bei den Zyklonen die Energie des staubausscheidenden Wirbels durch die Druckhöhe der eintretenden Staubluft aufgebracht; alle Zyklonteile sind fest. Eine Abart des mechanischen Staubfängers, die sich mit Erfolg durchgesetzt hat, besteht darin, dass die Kreisströmung durch rotierende Maschinenteile erzwungen oder wenigstens unterstützt wird. Von dieser Art ist z. B. das alte deutsche Patent von August Beck aus dem Jahre 1895 laut Abb. 18. Dieser Staubfänger besteht aus einer rotierenden einzelnen Trommel mit durchbrochener Mantelfläche, die sich mit waagrechter Axe in einer Kammer dreht. Der Staub oder die Staubluft wird oben eingeführt und kann infolge der Drehung der Trommel im Gegensatz zur Luft nicht in das Trommelinnere übertreten, sondern sammelt sich unten im Trichter. Die Trägerluft dagegen tritt durch den Trommelmantel ins Innere und wird daraus in axialer Richtung abgezogen. Auf diese Weise können viele Schwierigkeiten, die z. B. die Entwicklung des van Tongeren-Zyklons so langwierig gestaltet haben, von vornherein vermieden werden. Durch die Trommeldrehung, die in passender Weise zur Staubfeinheit und zur Luftmenge abzustimmen ist, kann die Kreisströmung zwangläufiger geführt werden, als dies durch die feste Wand des Zyklons möglich ist.

Heute kommt dieser Staubabscheider unter dem Namen Elex-Jaffhor-Entstauber in den Handel. Abb. 19 zeigt eine ausgeführte Doppelanlage zur Abscheidung eines staubförmigen Kunstharzes. Aus diesem Bild sind ausser den Gehäusen die angebauten Ventilatoren, Motoren, sowie Staubaustrag und Transmissionen ersichtlich. Der Eintritt der Staubluft erfolgt tangential von hinten. Besonders für die feinen und leichten Staube der Getreidemühlen hat sich dieser Fänger mit Erfolg eingeführt, sodann auch für Giessereistaub. Eine wesentliche Konstruktionsänderung, die unter dem Namen Elex-Rotor gebaut wird, ermöglicht das Erreichen guter Wirkungsgrade auch mit solchen Staubsorten, z. B. Kohle, deren Abscheidung früher nicht befriedigte. Nachteilig ist der Druckverlust, der ebenso hoch ist wie in einem Zyklon, ferner der Umstand, dass es sich hier, trotz mässiger Drehzahl, um eine rotierende Maschine handelt, die mehr Unterhalt benötigt als

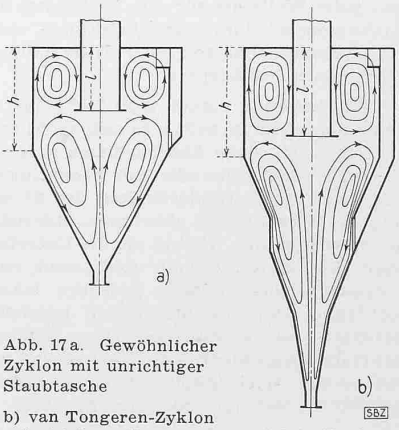


Abb. 17a. Gewöhnlicher Zyklon mit unrichtiger Staubtasche
b) van Tongeren-Zyklon mit richtiger Staubtasche u. richtig. Trichter

[9]) Vgl. auch SBZ Bd. 112 (1938) S. 78*.
[10]) Lizenzinhaber für die Schweiz sind Gebr. Sulzer in Winterthur.

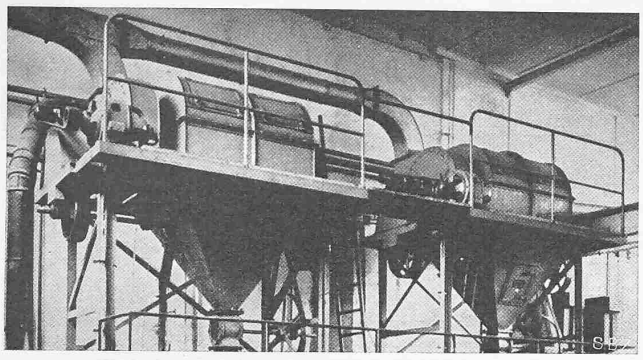


Abb. 19. Gruppe von zwei Elex-Jaffhor-Staubfängern

ein Zyklon aus Eisenblech. Vorteilhaft gegenüber Schlauchfiltern und Zyklonen ist die Unempfindlichkeit gegen Teillast und gegen Feuchtigkeit. Bei der Abscheidung von Giessereistaub kann der Wirkungsgrad durch Einspritzen von Dampf oder Wassernebeln zu einem Optimum gesteigert werden.

Ein anderes bekannt gewordenes System eines rotierenden Staubfängers ist der deutsche Rotex-Entstauber. Hier tritt die Staubluft axial in einen längeren rotierenden Zylinder ein und in gleicher Richtung wieder aus. Der Staub lagert sich dann innen auf der Zylinder-Mantelfläche ab und muss periodisch durch Abstreifer oder ähnliche Massnahmen ausgebracht werden. Der mechanische Antrieb des Staubwirbels erfolgt hier also im Gegensatz zum Elex-Jaffhor-Staubfänger von aussen, was theoretisch den Vorteil hat, dass die Kreisring-Strömung mit umlaufendem äusserem Zylinder bei beliebig hohen Drehzahlen stabil, also laminar bleibt und somit die Staubauswanderung an die Aussenwand sauberer und in kürzerer Zeit erfolgt als die Auswanderung aus einer infolge hoher Geschwindigkeit turbulent gewordenen Kreisring-Strömung, die von ihrem Innenzylinder angetrieben wird. Als Nachteil müssen sich bei der Rotex-Konstruktion der schwere Aussenzylinder, sowie die periodische Staubaustragung auswirken. Auch hängt die Laminarität des Wirbels davon ab, in welchem Zustand die Staubluft in den rotierenden Zylinder eintritt.

Vom Kurs «Sols et Fondations» der E. I. L.

Die im Jahre 1938 durch die E. T. H. und die E. I. L. durchgeführten Erdbaukurse waren auf fruchtbaren Boden gefallen. Deshalb führte das Laboratoire de Géotechnique der E. I. L. in Lausanne, verschiedenen Wünschen aus der Praxis entsprechend, vom 29. Juni bis 1. Juli 1944 einen neuen Kurs durch. Ueber 120 Teilnehmer, darunter auch eine Gruppe Deutschschweizer, besuchten im prachtvoll gelegenen neuen Hochschulgebäude die 18 Vorträge, die teils von den Lehrkräften der Hochschule, teils von ehemaligen Schülern und andern Ingenieuren der Praxis gehalten wurden. Der Kurs wandte sich in erster Linie an den Praktiker, mit dem Ziel, ihn mit den Methoden und Erfahrungen der Baugrundgeologie und des Erdbaues bekannt zu machen. Besonderes Gewicht wurde auf eine engere Zusammenarbeit von Geologie, Geotechnik und Erdbaumechanik gelegt.

Nach der Begrüssung durch Prof. Dr. *A. Stucky* sprach der Senior der Lausanner Geotechniker, Prof. Dr. *M. Lugeon*, über seine 50-jährige Erfahrung mit dem Baugrund von Lausanne. Die wechselnde Zusammensetzung und Lagerung des Molasseuntergrundes, die eiszeitlichen Ablagerungen mit ihren Grundmoränen, die z. T. Schwimmsande enthalten, und den Blockmoränen, die Abschwemmlehme und künstlichen Auffüllungen ergeben für diese Stadt, zusammen mit der starken Durchtalung, eine Fülle verschiedenster technisch-geologischer Probleme. Wie die sorgfältige geologische Untersuchung und Analyse in Verbindung mit dem durch Erfahrung geschulten geologischen Blick die Voraussetzung zur Sanierung von Rutschungen bildet, zeigte Prof. *E. Gagnebin*, Lausanne. An den Rutschungen «Les Luges» bei Lausanne in durchnässten Moränen über Molasse führten ausgedehnte Entwässerungsstollen längs der Gleitfläche zu Beruhigungen, während bei Euvettes-Sépey, wo Tonschiefer in Bewegung waren, die Verbauung des Baches, d. h. die Sicherung des Hangfusses die Sanierung brachte.

Anschliessend legte Dr. *Joukowsky*, Genf, dar, wie bedeutsam in der Umgebung von Genf die glazialen Ablagerungen, insbesondere die mächtige und festgelagerte Grundmoräne für die Bautechnik sind und wie sich, etwa beim Fundament des Stauwehrs Verbois, auf kleinstem Raum alle Bodenarten zusammendrängen können. Den Uebergang von der Geologie zum Erdbau stellte Dr. *A. Falconnier*, Lausanne, her, indem er an Hand von Beispielen, namentlich aus Nordafrika, die Mitarbeit der Geologen bei Fundationsfragen in Lockergesteinen erläuterte. Anschliessend erklärte Ing. *D. Bonnard*, Lehrbeauftragter der E. I. L., die grundlegenden erdbaumechanischen Kennziffern und deren Bestimmung im Laboratorium, wobei hauptsächlich die von der Schule Terzaghi entwickelten Methoden berücksichtigt wurden.

Eines der wichtigsten Elemente einer geotechnischen Untersuchung bildet zweifellos die Kenntnis der Schichtfolge. Diesem Thema war der Vormittag des zweiten Kurstages gewidmet, der von Ing. *D. Mousson*, Bern, durch eine umfassende Uebersicht über die verschiedenen Bohrmethoden, sowie die heute üblichen Verfahren zur Entnahme ungestörter Bodenproben eingeleitet wurde. Anschliessend legte Ing. *J. Bonjour* die vom geotechnischen Laboratorium der E. I. L. benutzten Methoden und Apparaturen zur Entnahme von Bodenproben dar, während Dr. *L. Bendel*, Luzern, über zwei geophysikalische Verfahren, das geoelektrische einerseits und das seismische anderseits, berichtete. Die geoelektrische Sondierung benötigt bei ihrer Anwendung auf geschichteten Böden, selbst bei einfachsten Randbedingungen, einen erheblichen mathematischen Aufwand. Praktische Erfolge und Misserfolge wurden an Hand von Beispielen beschrieben. Die in der Erdbebenkunde entwickelten seismischen Verfahren sind in neuerer Zeit mit Rücksicht auf die Bedürfnisse der Baugrundforschung erweitert worden. Der zweite Vortrag von Dr. L. Bendel war den dynamischen Baugrundaufgaben gewidmet, wobei an Hand von Beispielen die Verfahren zur Bestimmung der dynamischen Einflüsse auf Bauwerke erläutert wurden. Eine eingehende Darstellung der Scherfestigkeit des Bodens, deren richtige Bestimmung bekanntlich zu den wichtigsten und schwierigsten Aufgaben der Erdbaumechanik gehört, wurde von Ing. *J. P. Daxelhofer*, Lausanne, mit wertvollen Hinweisen auf die praktische Anwendung gegeben. Anschliessend vermittelte Ing. *J. C. Ott* einen klaren Einblick in die Druckwirkungen auf Tunnel, wobei er die beim Bau der grossen Alpentunnel gewonnenen Erfahrungen analysierte und die Ergebnisse eigener Laboratoriumsversuche an Hand von Lichtbildern erklärte. Der Abendvortrag über Setzungen und deren Bekämpfung wurde von *D. Bonnard* mit einigen grundsätzlichen Betrachtungen eingeleitet, während anschliessend Prof. *Stucky* seine Erläuterung der Setzungsberechnung durch Beispiele aus der Praxis beleuchtete und durch interessante Hinweise auf die Spannungsverteilung in der Sohle von Staumauern ergänzte.

Nachdem schon am zweiten Kurstag eine Besichtigung des geotechnischen Laboratoriums unter der Führung von D. Bonnard und J. Bonjour stattgefunden hatte, wurden die Kursteilnehmer am Samstagvormittag eingehender mit den Untersuchungen und Einrichtungen des hydraulischen und des erdbaulichen, hauptsächlich nach den Methoden von Terzaghi arbeitenden Laboratoriums bekannt gemacht. Anschliessend referierten *D. Bonnard* und *J. Bonjour* über eine zur Erzielung von möglichst dichten, setzungsfreien Erdschüttungen mit Erfolg angewandte amerikanische Methode, die vor allem auf der sorgfältigen Kontrolle und Regulierung des Wassergehaltes der eingebauten Materialien beruht. Als wohltuende Abwechslung wurden der gastliche Empfang und das gemeinsame Mittagessen empfunden, wodurch das Gleichgewicht zwischen Flüssigkeitsgehalt und Festsubstanzanteil der Kursteilnehmer wieder hergestellt wurde. Der anschliessende Vortrag von Ing. *L. Perret*, Chef du Service des Routes de l'Etat de Vaud, über die Fundierung von Strassen beleuchtete auf Grund sorgfältig ausgewählter Beispiele die allgemeine

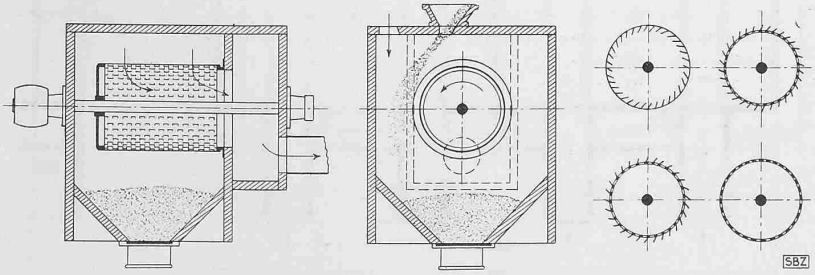


Abb. 18. Trommel-Entstauber nach D. R. P. von P. Beck (1895)