

Professor Kalähne
Danzig

1934

Über das Absetzen von Flugstaub

188

Von der
Technischen Hochschule der Freien Stadt Danzig
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ernst Kilb

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. G. Flügel

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. F. Neesen

Tag der Promotion: 26. Juli 1932

1934

VDI-Verlag G.m.b.H., Berlin NW 7

Über das Absetzen von Flugstaub

Von der
Technischen Hochschule der Freien Stadt Danzig
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Ernst Kilb

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. G. Flügel
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. F. Neesen

Tag der Promotion: 26. Juli 1932

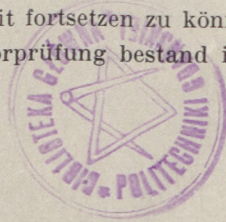
1934

VDI-Verlag G.m.b.H., Berlin NW 7

Lebenslauf

Geboren am 5. 3. 1903 zu Fulda, als Sohn des Studienrates Professor Dr. Joh. Kilb, besuchte ich das humanistische Gymnasium an der Kreuzgasse in Köln und legte daselbst im Frühjahr 1921 die Reifeprüfung ab. Ich ergriff das Studium der Elektrotechnik, verbrachte ein Semester an der Te. H. München, die übrigen neun Semester jedoch in Darmstadt, wo ich meine Studien im Jahre 1926 mit Ablegung der Diplomprüfung beschloß. In der Absicht, in den Dienst der Reichsbahn zu treten, legte ich im Jahre 1927 noch ein Zusatzexamen an der Te. H. Darmstadt ab und trat nunmehr meine Ausbildung bei der Reichsbahn an. Den Gang der regulären Ausbildung unterbrach ich durch meinen Eintritt in die Vollbahnabteilung der Bergmann-Elektrizitätswerke, um in der Konstruktion elektrischer Lokomotiven und der Bearbeitung von Bahnprojekten tätig zu sein. Zur Reichsbahn zurückgekehrt, beschäftigte ich mich ein Jahr mit dem Problem der Entstaubung der Rauchgase im Kraftwerksbetriebe, setzte darauf die Ausbildung fort und legte im Sommer des Jahres 1931 die Staatsprüfung im Maschinenbaufache ab; im Herbst wurde ich Assistent beim Lehrstuhl für Eisenbahnmaschinenbau an der Te. H. Danzig; am 1. November 1931 trat ich in den Dienst der Reichsbahn und wurde gleichzeitig beurlaubt, um die Assistententätigkeit fortsetzen zu können.

Die mündliche Doktorprüfung bestand ich am 13. Juli 1932.



2612/2/G/54

Versuche über das Absetzen von Flugstaub¹⁾

I. Einleitung — II. Fallversuche in ruhender Luft und Windsichtversuche nach Gonell — III. Ausbreitungsversuche in ruhender Luft — IV. Ausbreitungsversuche in turbulenter Strömung: 1. Versuchsanordnung; 2. Einfluß der Blasgeschwindigkeit auf die Ausbreitung; 3. Untersuchung des Absetzvorgangs im Kanal; 4. Durchschnittlicher Ausbreitungsradius in turbulenter Strömung; 5. Vergrößerung der Ausbreitung gegenüber ruhender Luft — V. Zusammenfassung.

I. Einleitung

Eine für das Kraftwerk des Reichsbahn-Ausbesserungswerkes Opladen errichtete Staubkammer wurde vor einiger Zeit auf ihre Arbeitsweise mit dem *Allnerschen* Rohr untersucht. Das Untersuchungsergebnis fiel jedoch ungünstiger aus, als die Fallgeschwindigkeit des Staubes, dessen Schwebegeschwindigkeit durch Versuch festgestellt war, es erwarten ließ. Schuld daran trägt eine Zusatzbewegung, die sich im Staubniederschlag als „Ausbreitung“ offenbart und stets gemeinsam mit der Fallbewegung auftritt. Um diese Verhältnisse zu klären, stellte man über den Fallvorgang und die Ausbreitung eingehende Versuche an, deren Ergebnisse nachstehend behandelt werden.

II. Fallversuche in ruhender Luft und Windsichtversuche nach Gonell

Aus jeder Siebfraktion der anfallenden Flugasche kann man zahlreiche Körner nacheinander in einem weiten Schacht auf eine Papierunterlage fallen lassen und die Schwebegeschwindigkeit feststellen. Man erhält so z. B. bei 100 Körnern irgend einer Siebfraktion jedem Geschwindigkeitsbereich, z. B. 60 bis 65 cm/s, eine gewisse Körnerzahl zugeordnet und für den Gesamtbereich die sog. Geschwindigkeitsverteilung.

Bei Körnern unter 200 μ kommt in erster Linie das Windsichtverfahren im senkrechten Rohr nach *Gonell* in Betracht²⁾. Bläst man z. B. 500 mg mit stufenartig ansteigender Geschwindigkeit aus und wiegt die jeweils ausgeblasenen Körner, so erhält man zuerst die Summenfunktion, a bis c in Abb. 1, und durch Differentiation die gesuchte Geschwindigkeitsverteilung, a' und c' , die für die Siebfraktionen 4900/6400, 1600/2500 und 400/576 (Durchgang bzw. Rückstand auf Sieben mit der genannten Maschenzahl auf 1 cm²) dargestellt sind. Grundsätzlich steht nichts im Wege, die Windsichtung auch am groben Korn, z. B. von 1 mm Dmr., vorzunehmen, doch werden große Körner infolge der parabolischen Geschwindigkeitsverteilung in lebhaftere Drehung versetzt und zeigen daher leicht eine andere Widerstandszahl als beim Herabfallen in ruhender Luft³⁾. In dieser aufgezungenen Drehung und der Eigendrehung beim Fallversuch ist der wesentliche physikalische Unterschied beider Methoden begründet.

Die Windsicht- und Fallversuche, Zahlentafel 1, sollen nur für wenige, später besonders interessierende Siebfraktionen die Schwebegeschwindigkeit v_s liefern. Das spezifische Gewicht ist für die verschiedenen Fraktionen mit Benzin im Pyknometer bestimmt. Zum Vergleich sind die Schwebegeschwindigkeiten der gleich großen, vollen Staubkugeln nach dem Verfahren von *Schüller* und *Naumann*⁴⁾ berechnet. Sie sind fast durchweg höher, ein Zeichen für den porösen Aufbau der untersuchten Körner. Die Körner, die den weitesten Weg im Rauchgasstrom zurückgelegt haben, sind die porösesten.

III. Ausbreitungsversuche in ruhender Luft

Beim Fallversuch im geschlossenen Schacht erreichen die einzelnen Körner den Schachtboden nicht lotrecht unter dem Ausgangspunkt, selbst wenn keine störenden Luftströmungen vorhanden sind. Dies läßt sich leicht an Körnern von 60 μ Dmr. und darüber nachweisen, bei denen eine *Brownsche* Bewegung, d. i. eine unaufhörliche, regellose Zitterbewegung, nicht mehr in Frage

¹⁾ Die Arbeit stellt eine gekürzte Wiedergabe meiner von der T. H. Danzig genehmigten Dr.-Ing.-Dissertation dar. Die Anregung verdanke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. *Neesen*, s. Zt. Werkdirektor des Reichsbahn-Ausbesserungswerkes Opladen, und Herrn Reichsbahnrat *Kaißling*; für wertvolle Winke bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. *Flügel* zu Dank verpflichtet. Die Durchführung der Versuche wurde von der Reichsbahndirektion Köln und dem Reichsbahn-Ausbesserungswerk Opladen mit größtem Entgegenkommen unterstützt. — Die ungekürzte Arbeit befindet sich im Institut für Hydro- und Aerodynamik der T. H. Danzig.

²⁾ *H. W. Gonell*, Zur Frage der Ausscheidung der Asche aus Kohlenstaub. Arch. Wärmewirtsch. Bd. 9 (1928) S. 209.

³⁾ *Ph. Forchheimer*, Grundriß der Hydraulik, Leipzig u. Berlin 1920.

⁴⁾ *L. Schüller* u. *A. Naumann*, Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung, VDI-Zeitschr. Bd. 77 (1933) S. 318.

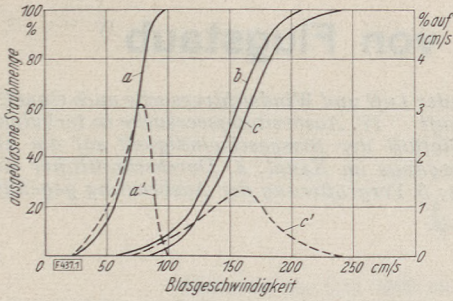


Abb. 1 (oben). Geschwindigkeitskennlinien von Flugasche der Siebfractionen 4900/6400 (a), 1600/2500 (b) und 400/576 (c)
 a' und c' Häufigkeitskurven für die Staubmengenanteile je 1 cm/s Geschwindigkeitszunahme, berechnet aus a und c

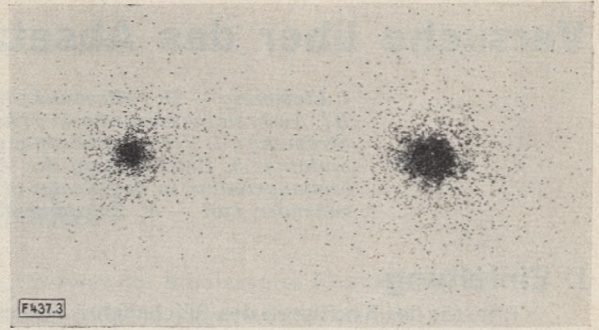
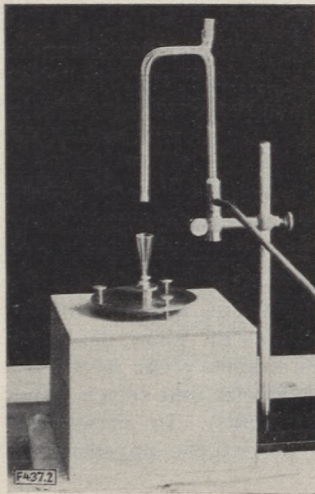


Abb. 3. Staubniederschläge beim Fallversuch mit einzelnen Körnern der Siebfraction 400/576 in ruhender Luft
 Fallhöhe 25 cm (links) und 125 cm (rechts)

Abb. 2 (unten). Blasvorrichtung zum Aufgeben von Staub in den Schacht



Zahlentafel 1 Ergebnisse von Windsicht- und Fallversuchen

	Versuchsgruppe							
	1	2	2a	3	3a	3b	4	4a
Versuchsmethode	Windsichter					Fallversuch	Windsichter	
Herkunft des Staubes	Kammer					Aschen-trichter	Kammer	Aschen-trichter
spez. Gewicht	2,2	2,1	2,1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8
Siebfraction	4900	1600	1600	400	400	400	80	80
Mittlerer Korndurchmesser μ	6400	2500	2500	576	576	576	100	100
Mittl. Schwebegeschwindigkeit v_s cm/s:								
1. nach Versuch in Luft	80,5	135	135	375	375	375	634	634
2. umgerechnet für Rauchgas von 185° C	69,5 ¹⁾	142 ²⁾	135 ¹⁾	155 ²⁾	141 ¹⁾	175 ¹⁾	145 ¹⁾	205 ¹⁾
3. berechnet nach Schüler und Naumann für Luft	55	112	105	123	112	139	115	162
	34,1	74	74	235	235	235	375	375

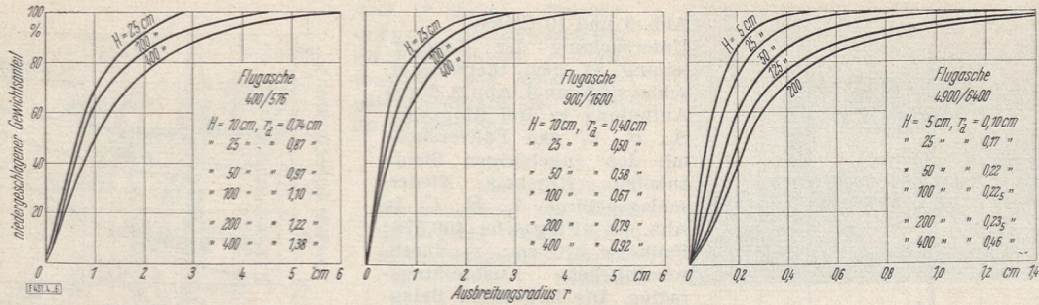
1) Mittelwert 2) Höchstwert

kommt, da diese nur bei Körnern unter 4 μ Dmr. stattfindet⁵⁾. Dazu führt man in den allseitig geschlossenen Schacht oben eine Düse von 2 mm l. W. ein und läßt durch sie mit der Hand oder der Blasvorrichtung, Abb. 2, ein Korn nach dem andern auf eine weiche Unterlage fallen, auf der es nicht hochspringen kann. Die Gesamtmenge der Körner muß dabei so klein sein, daß sie nicht etwa eine Böschung bilden und dabei seitlich abgleiten können. Einen Kornbelag der Fraction 400/576 zeigt Abb. 3 in der Draufsicht. Die Schachtbreite wird so groß gewählt, daß die Kornbewegung durch Wandwirkung nicht gestört wird. Die Schächte werden in einem Raum aufgestellt, der geringe Temperaturschwankungen aufweist, damit keine störenden Luftströmungen auftreten; an Stelle konzentrischer Ablagerungen könnten sonst exzentrische oder elliptische Formen entstehen.

Den erhaltenen Niederschlagskegel zerlegt man, gegebenenfalls unter Benutzung von Schablonen, durch konzentrische Kreise mit den Halbmessern $r_1, r_2, r_3 \dots$ in Ringe. Der Staub wird mit einem Haarpinsel abgenommen und gewogen. Der geringe hierbei auftretende Staubverlust von 0,2 bis 2% wird grundsätzlich vernachlässigt. Jeder Versuch wird mindestens dreimal ausgeführt, um die Streuung der Versuchswerte zu beobachten. Für feinsten Staub kommt nicht die Wägung, sondern nur die Auszählung der einzelnen Körner unter dem Mikroskop in Betracht. Bezeichnet man die Ergebnisse der einzelnen Wägungen für jeden Kreisring r_0 bis r_1, r_1 bis $r_2 \dots r_{n-1}$ bis r_n mit $g_1, g_2, g_3 \dots g_n$, so ist für ein Gesamtgewicht von 100 mg:

$$g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n = \sum_{n=1}^{n=\infty} g = 100 \text{ mg.}$$

⁵⁾ R. Meldau, Der Industriestaub, Berlin 1925.



In Abb. 4 bis 6 ist die Summenfunktion $\sum_0^r g = f(r)$ graphisch dargestellt. Die Belagdicke δ auf 1 cm^2 Ringfläche erhält man als

$$\delta = \frac{g_n}{\pi(r_n^2 - r_{n-1}^2)} = \frac{dg}{2\pi r dr}$$

Die durchschnittliche Ausbreitung r_a beträgt dann

$$r_a = \frac{1}{\sum_0^{100} g} \int_0^{\infty} r dg = \frac{1}{100} \int_0^{\infty} r dg$$

Schon der oberflächliche Vergleich der Werte r_a für Flugaschenkörner verschiedener Feinheit zeigt, daß bei derselben Fallhöhe große Körner stärker abirren als feine, entgegen der Vorstellung des Laien. Dasselbe gilt natürlich auch im engen Rahmen einer Siebfraktion. Staubkörner, die zusammenhängen, verhalten sich wie größere Körner; solche Korngruppen fallen schneller und breiten sich stärker aus als einzelne Körner. Es läßt sich also durch Koagulation, z. B. durch entgegengesetzte elektrische Aufladung, darauf hinwirken. Ein Blick durch das Mikroskop, Abb. 7 und 8, zeigt, daß die Körner mehr oder weniger von der hypothetischen Kugelgestalt abweichen; die symmetrischen und rundlichen findet man mehr außen am Fuße des Niederschlaggebirges, die unsymmetrischen und splittrigen dagegen mehr nach der Mitte zu. Stahlkörner gleicher Größe breiten sich noch viel stärker aus als Flugasche.

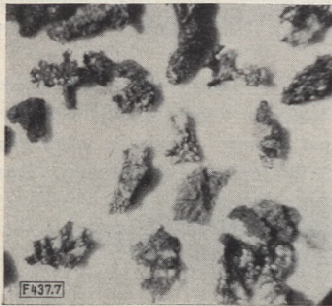


Abb. 7 und 8. Mikroskopische Aufnahmen von Flugaschekörnern

Abb 7.
Siebfraktion 100/256

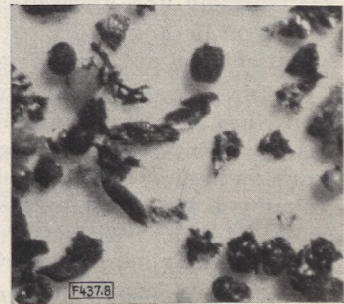


Abb. 8.
Siebfraktion 4900/6400

Diese Abhängigkeit von der Gestalt, Größe und dem spezifischen Gewicht des Kornes ergibt eine Ausbreitung von bestimmter Prägung, die in Abb. 4 bis 6 zum Ausdruck kommt. Es ist leicht zu beweisen, daß in jedem Staubniederschlagsgebirge eine gewisse Ordnung vorhanden ist. Man zerlegt ein Gebirge A in die Ringzonen $A_1, B_1, C_1 \dots$ und läßt den Staub jeder Zone für sich nochmals Korn für Korn in den Schacht fallen. Die in diesem Zweitversuch erhaltenen Gebirge $A_1, B_1, C_1 \dots$ unterscheiden sich in ihrer Form ganz wesentlich und beweisen dadurch, daß schon im Erstgebirge A zu jedem Radius r eine bestimmte Kornmischung mit entsprechenden Flugeigenschaften gehört.

Abb. 9 und 10 zeigen das Ergebnis eines Versuches mit Flugasche der Fraktion 400/576. Das Gebirge A ist hier in drei Zonen zerlegt, aus denen man durch Zweitversuch die Gebirge A_1, B_1, C_1 erhält. Der Drittversuch liefert für A_1, B_1 und C_1 je drei neue Gebirge: $(A_1)_1, (A_1)_2, (A_1)_3$ aus $A_1 \dots (C_1)_1, (C_1)_2, (C_1)_3$ aus C_1 . Die Kette $A, C_1, (C_1)_3, [(C_1)_3]_3 \dots$ liefert Körner mit wachsen-

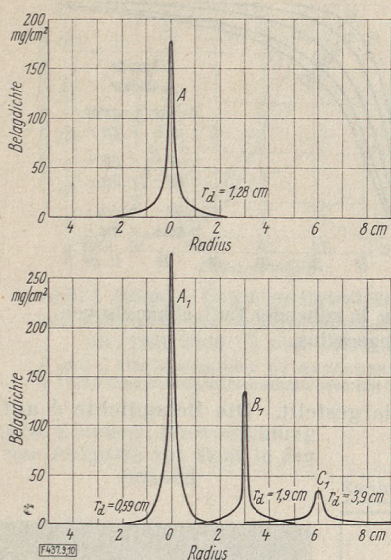


Abb. 9 und 10 (links).
Untersuchung der Kornverteilung in dem Staubsiederschlagsgebirge *A*, Abb. 9, durch Aufteilung in drei Ringzonen A_1 , B_1 , C_1 und Fallversuche mit den zugehörigen Staubanteilen. Ergebnis: Niederschlagsgebirge A_1 , B_1 , C_1 in Abb. 10. Flugasche 400/576; Fallhöhe 270 cm; r_a durchschnittlicher Ausbreitungsradius. Die dargestellte Belagdichte ist für jedes Gebirge auf 100 mg Niederschlagsmenge bezogen

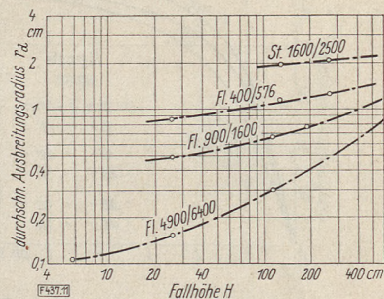
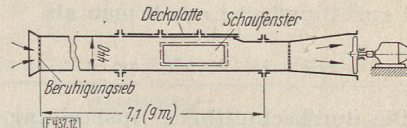


Abb. 11 (oben). Ausbreitung abhängig von der Fallhöhe in logarithmischem Maßstab. *Fl.* = Flugasche; *St.* = Stahlkörner

Abb. 12 (rechts).
Versuchskanal im Längsschnitt



dem r_a , dagegen A , A_1 , $(A_1)_1$, $[(A_1)_1]_1 \dots$ mit abnehmendem r_a . Aus der ersten Ableitung A_1 , B_1 , $C_1 \dots$ läßt sich graphisch das Niederschlagsgebirge für doppelte Fallhöhe entwickeln usw. Die Abhängigkeit der Ausbreitung r_a von der Fallhöhe H befolgt ein Exponentialgesetz; trägt man die wenigen, allerdings mehrfach geprüften Versuchswerte im logarithmischen Maßstab auf, so lassen sie sich durch Linienzüge verbinden, Abb. 11, deren veränderliche Neigung ebenfalls einem Gesetz folgt.

IV. Ausbreitungsversuche in turbulenter Strömung

1. Versuchsanordnung. In der Praxis wird meist die Aufgabe gestellt, das Korn aus einer turbulentbewegten Gasströmung abzusondern. Es liegt daher nahe, in einem senkrechten, zylindrischen Rohr die Ausbreitung des Staubes in turbulenter Strömung experimentell zu untersuchen. Bei der vorliegenden Versuchsarbeit wurde dieser Weg nicht beschritten, sondern man ging rein deduktiv von der Schwerkraftentstaubung im waagerechten Kanal aus, ohne die Begriffe Schwerkraftwirkung und Ausbreitung zu trennen. Abb. 12 stellt das Versuchsmodell einer Staubkammer von 44 cm Breite und 37,5 cm Höhe im Längsschnitt dar; die Länge läßt sich durch Anschließen von Kanalschüssen auf 9 m bringen.

Die Frage, wie man den Kanal mit Staub beschicken soll, hat große Bedeutung; selbst wenn man einen gleichen Staubgehalt über den ganzen Querschnitt erzielen könnte, wäre es sehr schwer, aus der Ablagerung die Flugbahn eines Staubkorns nachträglich zu bestimmen. Deshalb wird der Staub an bestimmter Stelle, und zwar 3,1 m hinter dem Einlauf, durch ein Röhrchen eingeblasen. Der Anlaufweg der Strömung bis zu dieser Stelle beträgt also das Achtfache der Kanalhöhe; die Turbulenz ist daher noch nicht vollkommen⁶⁾. In den anschließenden 4 m, die für die Ablagerung vorgesehen sind, nimmt der Turbulenzgrad weiter zu.

Beim Einblasen müssen vor allem drei Bedingungen erfüllt sein:

- Die Einblaseschwindigkeit (Mittelwert w) muß mit der Kanalgeschwindigkeit V an der Einblasestelle übereinstimmen, damit die Störung der Kanalströmung gering ist⁷⁾. Zu diesem Zweck wird V mit einem Staurohr überwacht, das mit der Mündung des Einblaserohrs in einer Achse liegt, Abb. 13. Der Wert w wird mit dem Gasmesser bzw. einem U-Rohr beobachtet, das an die Einblaseleitung angeschlossen ist.
- Der Staubgehalt der eingeblasenen Luft muß nach *Audibert* unter dem zulässigen Wert von 400 mg/m^3 liegen, damit der Absetzvorgang nicht in ungewollter Weise beschleunigt wird⁸⁾. Durch Einsetzen geeigneter Spritzdüsen in die Blasvorrichtung läßt sich erreichen, daß selbst bei dem feinen Staub 4900/6400 für eine Blaseschwindigkeit $w = 600 \text{ cm/s}$ der Staubgehalt nur $1/10$ des zulässigen beträgt; er steigt praktisch linear mit der Blaseschwindigkeit an.

⁶⁾ Vgl. *L. Prandtl*, Abriß der Strömungslehre, Braunschweig 1931.

⁷⁾ Diese Bedingung ist in den Versuchen 3, 5, 6, 10 und 11 der Zahlentafel 2 streng eingehalten.

⁸⁾ *Fr. Prockat*, Beiträge zur Kohlenstaubfrage. *Glaser's Ann.* Bd. 106 (1930) S. 73.

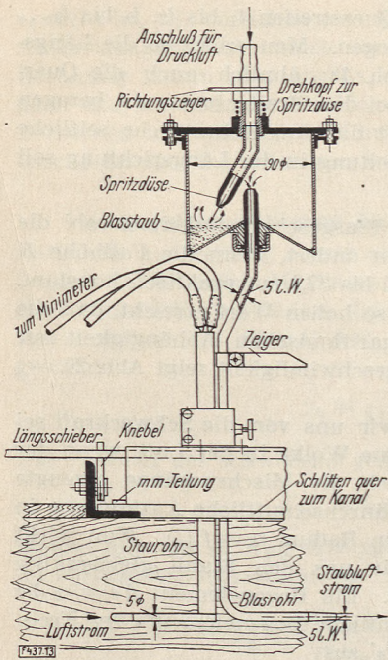


Abb. 13 (links). Blasvorrichtung zum Ausblasen von Staubluftgemisch. Überwachung der Strömungsgeschwindigkeit im Kanal durch Stauraum

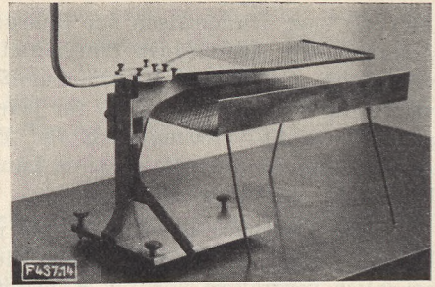


Abb. 14 (rechts). Untersuchung des Staubluftstromes durch Stromteiler (waagrecht gestellte Schneide)

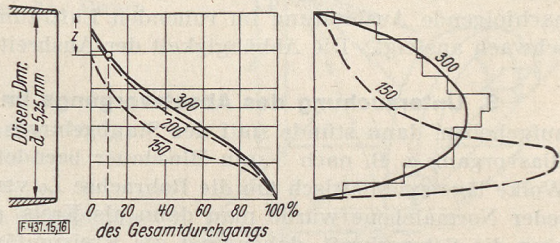


Abb. 15 und 16. Mengenverteilung und Mengenprofil beim Ausblasen eines Staubluftgemisches in den ruhenden Luftraum
Flugasche 4900/6400; Blasgeschwindigkeit $w = 150, 200$ und 300 cm/s

c) Es muß gewährleistet sein, daß die Körner einzeln schwebend das Röhrechen verlassen, also Bodenwanderung und Häufung ausgeschlossen sind. Das Profil der Staubströmung, die von der waagrecht gerichteten Rohrmündung ausgeht, wird daher mit einer ebenfalls waagerechten, dünnen Stahlschneide, Abb. 14, die senkrecht verschiebbar ist, untersucht. Die Schneide teilt den Staubstrom in die Anteile g_1 und g_2 als Funktion der senkrechten Verschiebung z . Die Summenkurve $\sum_0^z g = f(z)$ und das hieraus gewonnene Profil der Staubströmung ist in Abb. 15 und 16 dargestellt. Die Versuche zeigen, daß selbst beim groben Korn (400/576) für eine mittlere Blasgeschwindigkeit $w = 200$ cm/s ein befriedigendes Profil vorhanden ist.

2. Einfluß der Blasgeschwindigkeit auf die Ausbreitung. Um die dynamische Wirkung

des aus dem Röhrechen tretenden Luftstrahles auf den mitgeführten Staub zu ermitteln, läßt man das Rohr, das durch einen genügend großen Kasten vor Störungen von außen geschützt ist, zuerst in ruhende Luft auf eine waagerechte Platte ausblasen. Das entstehende Niederschlagsgebirge,

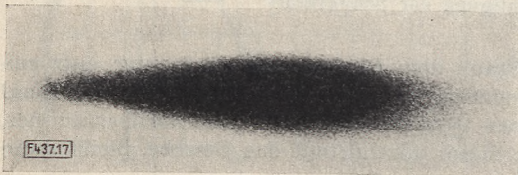


Abb. 17 (oben). Niederschlag von ausgeblasener Flugasche der Siebfraction 400/576 in ruhender Luft

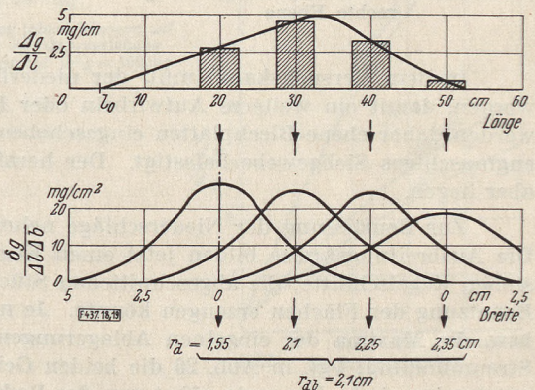


Abb. 18 und 19. Bestimmung der seitlichen Ausbreitung r_{ab} beim Ausblasen von Flugasche in ruhende Luft. Flugasche 4900/6400; Blasgeschwindigkeit 600 cm/s; Fallhöhe $9,3$ cm
Längsverteilung (oben) bezogen auf $\sum \Delta g = 100$ mg, Querverteilung (unten) bezogen auf $\sum \delta g = 100$ mg

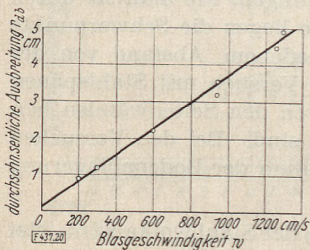


Abb. 20 (links). Seitliche Ausbreitung in ruhender Luft, abhängig von der Blasgeschwindigkeit

Abb. 17, liegt symmetrisch zur Rohrachse. Es wird in zahlreiche Querstreifen l_1 bis l_2 , l_2 bis $l_3 \dots$ unterteilt, die zugehörigen Staubanteile $g_1, g_2, g_3 \dots$ werden abgewogen. Man erhält so die Längsverteilung $\Delta g / \Delta l = f(l)$, die auf $\Sigma \Delta g = 100 \text{ mg}$ bezogen ist, Abb. 18; ähnlich auch die Querverteilung $\delta g / \Delta l \Delta b = f(b)$ für jeden Streifen vom Gewicht Δg bei der Streifenbreite Δl , bezogen auf $\Sigma \delta g = \Delta g = 100 \text{ mg}$, Abb. 19. Eine einfache Rechnung ergibt die durchschnittliche seitliche Ausbreitung r_{ab} über die gesamte Länge der Ablagerung; die Ausbreitung in der Längsrichtung soll hier nicht erörtert werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen nun, daß für eine bestimmte Blasgeschwindigkeit sowohl die Lage als auch die Gestalt eines Niederschlagsgebirges sich kaum ändert, wenn die Fallhöhe H erheblich vergrößert wird; z. B. bleibt die Ausbreitung von $H = 4,7$ bis $37,2 \text{ cm}$ praktisch konstant. Schon bei $4,7 \text{ cm}$ hat sie also infolge der Mündungswirkung einen so hohen Wert erreicht, daß die nachfolgende Ausbreitung im ruhenden Luftraum wegen ihrer logarithmischen Abhängigkeit nur schwach ansteigt. Die Abhängigkeit der Ausbreitung von der Blasgeschwindigkeit zeigt Abb. 20.

3. Untersuchung des Absetzvorgangs im Kanal. Stellen wir uns vor, die Schwerkraft sei aufgehoben, dann stünde statt des Staubgebirges gewissermaßen eine Wolke in der Luft, wenn der Blaskvorgang z. B. nach 5 min Blasdauer beendet wäre. Diese durch die Mischvorgänge erzeugte Wolke läge symmetrisch um die Rohrachse L_0 verteilt, Abb. 21; die durchschnittliche Ausbreitung in jeder Normalebene würde man dann als Kreis darstellen mit dem Radius $r_a = f(l)$. Nun wirkt aber die Schwerkraft, daher sind die Kreisumfänge, auf denen wir uns den Staub gleichmäßig verteilt denken, auf die waagerechte Ebene zu projizieren, Abb. 22. Ein Bogenelement $ds = r_a d\alpha$ befindet sich im Abstand $r'_a = r_a \cos \alpha$ von der Rohrachse. Für sämtliche Bogenelemente des Kreisumfangs ergibt sich dann der durchschnittliche seitliche Abstand r'_a aus

$$r_a : r'_a = 2\pi r_a : 4r_a \int_0^{\pi/2} \cos \alpha d\alpha = \pi : 2.$$

Die Versuche, vgl. Abb. 18 und 19, liefern die Werte r'_a , aus denen r_a dann hervorgeht. Der über die ganze Länge der Rohrachse genommene Mittelwert ist r_{a0} .

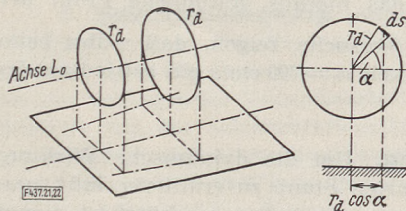


Abb. 21 und 22 (oben). Projektion der räumlichen Ausbreitung in die waagerechte Ebene

Abb. 23 und 24 (rechts). Veranschaulichung der Ausbreitung in strömender Luft

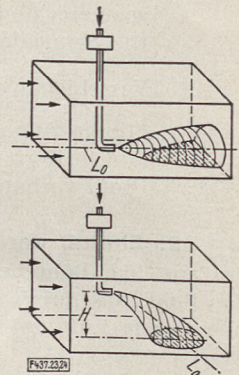


Abb. 23 (oben) ohne, Abb. 24 (unten) mit Berücksichtigung der Schwerkraft

In dem Versuchskanal muß der niederfallende Staub dem Einfluß der Strömung entzogen werden, damit ein weiteres Aufwirbeln oder Bodenwanderung ausgeschlossen sind. In den Kanal werden daher ebene Blechplatten eingeschoben; auf ihnen wird weißes Papier und darüber dünnes, engmaschiges Siebgewebe befestigt. Der herabfallende Staub durchdringt das Gewebe, bleibt dann aber liegen.

Zur Beurteilung der Niederschläge nehmen wir wieder an, die Schwerkraft sei ausgeschaltet. Die Ausbreitungskreise bilden jetzt einen Kegel, Abb. 23. Auf den angrenzenden Wandungen entstehen Kegelschnitte; die abgeschnittenen Stücke entsprechen den Ablagerungen, wie man sie durch Benetzung der Flächen erzeugen könnte. Je nach der Lage der Streuachse liegen die Schwerpunkte bzw. die Maxima der einzelnen Ablagerungen in gleichem oder verschiedenem Abstand von der Streumündung; vgl. in Abb. 26 die beiden Gebirgsspitzen, die bei einem Versuch mit Stahlspänen entstanden sind. Die erste rührt von der Bodenablagerung, die zweite von den Seitenwänden her. Grundsätzlich ergeben sich so viele Maxima, wie Kegelschnitte vorhanden sind. Bei den Versuchen mit Flugasche sind die Bedingungen stets so gewählt, daß das erste Maximum der Bodenablagerung nicht durch die folgenden Maxima gestört wird.

Nummehr sei die Schwerkraft eingeschaltet, Abb. 24. Die Mittellinie L_0 der Staubwolke wird jetzt parabolisch abgelenkt und läuft dann fast geradlinig weiter, sobald die Schwebegeschwindigkeit

erreicht ist. Es entstehen also Kegelschnitte; die Bildung einer Ellipse wäre nur möglich, wenn der Ausbreitungsradius r längs der Mittellinie linear ansteige oder konstant bliebe; Versuch und Rechnung liefern aber ein Exponentialgesetz. Die Ausbreitung verlangt also stets ein der Länge nach unsymmetrisches Gebilde, und umgekehrt ist dieses der Beweis für die Ausbreitung. Nur bei Versuchen in ruhender Luft beträgt die Neigung der Staubwolkenachse 90° , so daß eine symmetrische Ablagerung entstehen muß.

4. Durchschnittlicher Ausbreitungsradius in turbulenter Strömung. Zur Ermittlung der seitlichen Ausbreitung eignet sich von allen Querstreifen der Ablagerungsebene, vgl. Abb. 26, am besten der im ersten Maximum, da er die Profillachse schneidet und infolgedessen die Projektion eines halben Kreiszylinders darstellt. Das Staubgewicht eines-Raumteilchens $dl db dh$, Abb. 25, sei g' , dann ist das Raumgewicht

$$\gamma_k = \frac{g'}{dl db dh}$$

Das Gewicht des schwebend gedachten Ringelementes beträgt

$$d g_R = 2 \pi b db \gamma_k dl$$

Dessen Moment ist $d g_R \cdot b = \gamma_k 2 \pi b^2 db dl$; dann beträgt die durchschnittliche Ausbreitung

$$r_{a_2} = \frac{\int d g_R b}{\int d g_R} = \frac{\int \gamma_k b^2 db}{\int \gamma_k b db}$$

Die schwebend gedachte Wolke mit dem Ausbreitungsradius r_{a_2} ist entstanden durch Blasen mit einer Düse von 5,25 mm Dmr., die auch für das Ausblasen in ruhende Luft verwendet ist. Beim Ausblasen in turbulente Strömung entstehen allerdings nicht die gleichen Übergangsverhältnisse für den austretenden Luftstrahl wie beim Ausblasen in ruhende Luft; die Benutzung der Versuchswerte $r_{a_1} = f(w)$, Abb. 20, ist daher nur angenähert richtig.

Weiter sei angenommen, daß über die ganze Fallhöhe bzw. die Fallzeit t^9 , gerechnet von der Düsenmündung bis zum Kanalboden, für die Zunahme der Ausbreitung das oben erwähnte Exponentialgesetz gilt. Der Exponent sei konstant und habe den Wert $m = 0,349$; er ist der Versuchskurve für Flugasche der Fraktion 4900/6400, Abb. 11, entnommen. Dann läßt sich aus der Ausbreitungszunahme von r_{a_1} auf r_{a_2} bei jeder Fallhöhe H berechnen, welche Ausbreitung $r_{a_{20}}$ bei 1 m Fallhöhe zu erwarten ist, Zahlentafel 2, Reihe 10; diesen Werten werden die entsprechenden Werte $r_{a_{10}}$ für ruhende Luft gegenübergestellt.

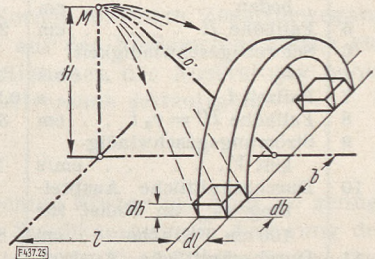


Abb. 25. Schematische Skizze zur Berechnung der seitlichen Ausbreitung in turbulenter Strömung

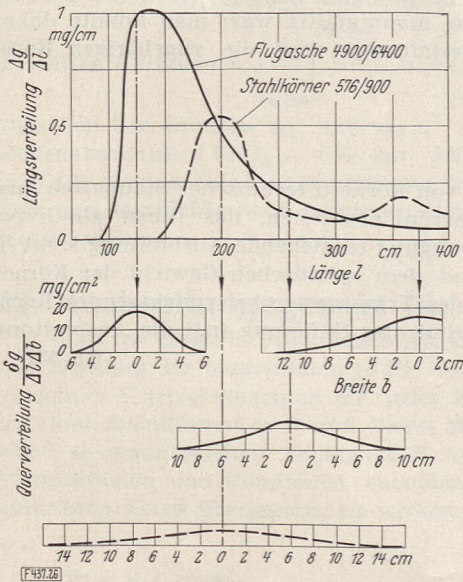


Abb. 26 (links). Niederschlagsformen in turbulenter Kanalströmung

Längsverteilung (oben) bezogen auf $\Sigma \Delta g = 100$ mg, Querverteilung (unten) bezogen auf $\Sigma \delta g = 100$ mg

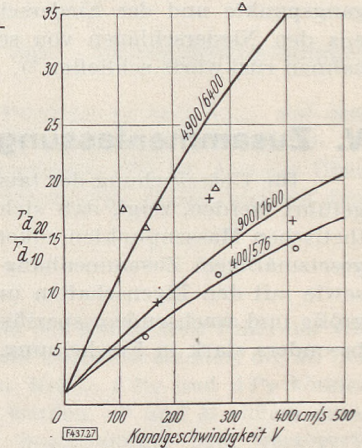


Abb. 27. Vergrößerungsfaktor für die Ausbreitung in turbulenter Kanalströmung (Ausbreitung in ruhender Luft gleich eins gesetzt)

⁹⁾ Bei der Berechnung wird der Beschleunigungsabschnitt berücksichtigt.

Zahlentafel 2

 Berechnung der durchschnittlichen Ausbreitung
 bei 100 cm Fallhöhe in einer turbulenten Kanalströmung

Reihe	Versuch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Flugasche	400	400	400	900	900	900	4900	4900	4900	4900	4900	4900
		576	576	576	1600	1600	1600	6400	6400	6400	6400	6400	6400
2	Blasgeschwindigkeit w cm/s	525	525	410	300	280	420	410	450	525	270	410	410
3	Durchschnittliche Ausbreitung r_{d_1} für ruhende Luft bei w cm	2,0	2,0	1,5	1,1	1,0	1,5	1,5	1,6	2,0	1,0	1,5	1,5
4	Durchschnittliche Ausbreitung r_{d_2} auf dem Kanalboden cm	5,7	11,6	8,5	2,1	4,4	5,6	3,0	2,5	3,4	3,2	5,3	5,5
5	Fallhöhe H cm	24,7	24,7	12,5	12,5	12,5	12,5	18,6	12,5	24,7	18,6	12,5	18,6
6	Schwebegeschwindigkeit v_s cm/s	138	138	138	138	138	138	69,5	69,5	69,5	69,5	69,5	69,5
7	Fallzeit t s	0,265	0,265	0,175	0,175	0,175	0,175	0,31	0,22	0,40	0,31	0,22	0,31
8	Fallhöhe $H' = v_s t$ cm	36,5	36,5	24,2	24,2	24,2	24,2	21,5	15,3	27,8	21,5	15,3	21,5
9	Strömungsgeschwindigkeit V cm/s	165	260	410	150	280	420	110	150	170	270	410	410
10	Durchschnittliche Ausbreitung $r_{d_{20}}$ im Kanal für 100 cm Fallhöhe cm	8,05	16,4	14,4	3,8	7,2	9,1	4,9	4,3	4,9	5,4	10	9,3
11	Durchschnittliche Ausbreitung $r_{d_{10}}$ in ruhender Luft für 100 cm Fallhöhe cm	0,90	0,90	0,90	0,64	0,64	0,64	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
12	Vergrößerungsfaktor $r_{d_{20}} : r_{d_{10}}$	8,9	18	16	5,9	11	14	18	15	18	19	36	33
13	Reynoldssche Zahl Re	22 000	34 000	54 000	20 000	37 000	55 000	14 000	20 000	22 000	35 000	54 000	54 000

5. Vergrößerung der Ausbreitung gegenüber ruhender Luft. Das Verhältnis von $r_{d_{20}}$ zu $r_{d_{10}}$ stellt dann den Vergrößerungsfaktor der Ausbreitung in der vorliegenden turbulenten Strömung dar, Abb. 27; er beträgt hier das 10- bis 20-fache der Ausbreitung in ruhender Luft und steigt mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit an. Dabei liegt die Vermutung nahe, daß jede Kurve einem Höchstwert zustrebt und dann wieder fällt.

Ein Überblick über sämtliche Versuchsergebnisse läßt erkennen, daß die Art des Niederschlags im wesentlichen von vier Umständen abhängt: den Eigenschaften der Staubkörner, den wirkenden Massenkräften, dem Zustand der Strömung und der Lage der Niederschlagsflächen zum fliegenden Korn. In den Ablagerungsversuchen, die aus der Fachliteratur bekannt sind, war der eintretende Staub stets über den ganzen Eingangsquerschnitt verteilt, so daß die gegenseitige Lage der Ausgangspunkte und der Niederschlagsflächen zueinander sehr mannigfaltig war; man konnte daher aus den Niederschlägen von scheinbar ungewöhnlicher Gestalt nicht auf die zugehörigen Kornbahnen rückwärts schließen⁸⁾.

V. Zusammenfassung

Die Untersuchung der tatsächlichen Bewegungen, die von Körnern technischer Staubarten ausgeführt werden, zeigt, daß sich die Körner um das Ziel herum ausbreiten, das ihnen als hypothetischen Massenpunkten zukommt. Diese bei der Kornbewegung entstehende Ausbreitung steht in gesetzmäßigem Zusammenhang mit der Größe, Gestalt und dem spezifischen Gewicht der Körner sowie mit den Eigenschaften und dem Strömungszustand des Trägergases; bei zunehmender Korngröße und wachsendem spezifischem Gewicht sowie bei turbulenter Strömung tritt die Ausbreitung besonders stark in Erscheinung.

[RF 437]

Gesetzmäßigkeiten beim Absetzen von Flugstaub

I. Einleitung — II. Ablagerung auf Grund der Fallgesetze — III. Ausbreitungsgesetz für ruhende Luft — IV. Ausbreitung in strömender Luft — V. Ähnlichkeitsgesetze für die Absetzbewegung mit Ausbreitung: 1. Allgemeine Ähnlichkeitsbedingungen; 2. Ähnlichkeitsbedingungen für die Grenzfälle; 3. Allgemeine Ähnlichkeitsbedingungen bei nicht maßstäblicher Korngröße — VI. Praktische Anwendung der Ergebnisse — VII. Zusammenfassung

I. Einleitung

Die Versuche über das Absetzen von Flugstaub¹⁰⁾ haben gezeigt, daß man neben der reinen Fallbewegung eine durch die zufällige Gestalt des einzelnen Kornes bedingte Zusatzbewegung berücksichtigen muß, die eine Auseinanderbreitung der Körner auf der Niederschlagsfläche zur Folge hat. Ziel der vorliegenden Abhandlung ist, die Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung näher zu untersuchen sowie die Ähnlichkeitsbedingungen für den Modellversuch festzulegen.

II. Ablagerung auf Grund der Fallgesetze

Faßt man bloß den Fallvorgang der als Massenpunkte gedachten Körner ins Auge, so genügt es, durch Versuch die Rückstandkurve festzustellen, um für eine Staubkammer die Änderung des Staubgehaltes der strömenden Gasteilchen oder die gesamte Abscheidung für beliebige Strömungsgeschwindigkeit berechnen zu können. Die mathematischen Ansätze¹¹⁾ sind nicht schwierig. Für den praktischen Gebrauch wird man folgendes Verfahren vorziehen:

Man teilt den Eingangsquerschnitt der Kammer (vgl. Abb. 12, Seite 4) schachbrettartig in z. B. neun Felder auf, deren Schwerpunkte mit P_1 bis P_9 bezeichnet werden; von einem solchen Punkte P in der Höhe H bewegt sich ein Korn mit einer Geschwindigkeit, die aus der Strömungsgeschwindigkeit V und der Schwebegeschwindigkeit v_s resultiert, zu einem Punkte B_n des Kanalbodens, der von P den waagerechten Abstand $OB_n = l_n$ hat, Abb. 28. Nun ist $PO : OB_n = QS : PQ = v_s : V$. Über den Schwebegeschwindigkeiten v_s ist die Geschwindigkeitsverteilung $y = f(v_s)$, Abb. 29, aufgetragen. Von der

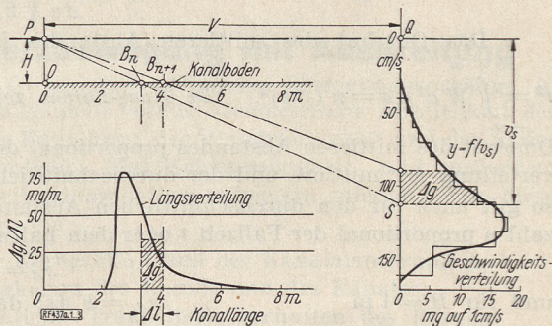


Abb. 28 bis 30. Graphische Ermittlung des Staubniederschlags (Längsverteilung) für die Siebfraktion 1600/2500 aus der Geschwindigkeitsverteilung; Fallhöhe $H = 150$ cm; laminarer Parallelstrom im Kanal $V = 240$ cm/s

gesamten Kornmenge $g = \int_{v_s=0}^{v_s=\infty} y dv_s$ hat der Anteil $\Delta g = \int_{v_{sn}}^{v_{sn+1}} y dv_s$ eine Schwebegeschwindigkeit

zwischen den Grenzen v_{sn} und v_{sn+1} . Er kommt zwischen den Punkten B_n und B_{n+1} auf dem Bodenabschnitt $\Delta l = l_{n+1} - l_n$ zur Ablagerung. Die zu jedem Δl gehörende Belagdicke ist $\Delta g / \Delta l$; die gesuchte Längsverteilung wird durch $\Delta g / \Delta l = f(l)$ dargestellt, Abb. 30. Aus der Überlagerung sämtlicher neun Längsverteilungskurven erhält man die vollständige Ablagerung auf dem Kanalboden.

III. Ausbreitungsgesetz für ruhende Luft

Die im Versuch¹⁰⁾ gefundene Abhängigkeit der Ausbreitung von der Korngestalt rührt her von der Wirkung der tangentialen (dP_T) und normalen Kräfte (dP_N) des Luftwiderstandes, die an den einzelnen Flächenelementen dF jedes Kornes angreifen. Sämtliche Kräfte dP_N und dP_T können zu einer Resultierenden P und einem Moment M zusammengefaßt werden. P und M stehen unter einer so mannigfachen Abhängigkeit von der Zeit, daß dauernd beschleunigte bzw. verzögerte Translationen und Rotationen entstehen, die sich der reinen Fallbewegung des als Massenpunkt gedachten Kornes überlagern; sie wirken sich in der Waagerechten als Ausbreitung aus.

¹⁰⁾ s. S. 1 bis 8.

¹¹⁾ Vgl. die Originalarbeit; die Ansätze ähneln z. T. denen von Rosin, Rammler und Intelmann in: Grundlagen der Zyklonentstaubung, VDI-Zeitschr. Bd. 76 (1932) S. 433.

Bei aufmerksamer Beobachtung der Absatzbewegungen der verschiedenen Körner fallen zwei Bewegungsarten besonders auf: eine schraubenförmige und eine zickzackförmige Bewegung. Herrscht die erste vor, so erhält der Niederschlag, besonders bei grobem Korn und geringen Fallhöhen, die Gestalt eines Bergkegels mit Krater. Die zickzackförmige Bewegung beobachtet man an Körnern mit stark exzentrischer Schwerpunktslage. Beide Arten der Bewegung treten nicht in reiner Form, sondern in beliebiger Mischung auf. Diese resultierende Bewegung läßt sich in eine Komponente in Richtung der Flugbahn des Massenpunktes und eine solche lotrecht dazu zerlegen. Im folgenden betrachten wir nur die zweite Komponente. Die dabei gewonnenen Überlegungen gelten sinngemäß auch für die erste. Die Bewegung (in der lotrechten Komponente) denkt man sich aus Elementarschritten Δs von konstanter Länge zusammengesetzt, die sich unter den Winkeln α aneinanderreihen, und zwar nach einem Gesetz, das durch Gestalt und Massenaufbau des Kornes sowie durch die Anfangsbedingungen der Bewegung gegeben ist; es braucht nicht eindeutig zu sein, da Strömungsvorgänge zuweilen labilen Charakter haben.

Ist α beliebig groß, liegt also ein unbeschränktes empirisches Gesetz für das Aneinanderreihen der Elementarschritte vor, so läßt sich der in einer gewissen Zeit erreichte Abstand r vom Ursprungslot nach dem Ansatz feststellen, den *De Haas-Lorenz* für die Brownsche Bewegung entwickelt hat¹²⁾. Der Ansatz gilt für eine Bewegungsmöglichkeit auf einer Geraden und eine unendlich große Schrittzahl n . Für die Erreichung eines Abstandes innerhalb der Grenzen a und $a + da$ ergibt sich die Wahrscheinlichkeit W in der Form einer *Gaußschen* Fehlerverteilung

$$W = \frac{1}{\Delta s} \sqrt{\frac{1}{2\pi n}} e^{-\frac{a^2}{2n(\Delta s)^2}} da.$$

Das Quadrat des mittleren Abstandes in den Grenzen $a = +\infty$ und $a = -\infty$ ist dann $r^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} W a^2 da = n(\Delta s)^2$. *De Haas-Lorenz* zeigt, daß auch für Bewegungen in der Ebene das Quadrat des mittleren Abstandes proportional der Schrittzahl n ist. Da bei einer Gaußschen Fehlerverteilung der mittlere und der durchschnittliche Fehler in einem konstanten Verhältnis stehen¹³⁾, so gilt auch für den durchschnittlichen Abstand allgemein $r_a = c\sqrt{n}\Delta s$. Setzt man die Schrittzahl n proportional der Fallzeit t oder dem Fallweg H , so erhält man

$$r_a = k\sqrt{H}\Delta s$$

und für $H = 1\text{ m}$

$$r_{a_0} = k\Delta s; \text{ daraus } r_a = r_{a_0}H^{0.5};$$

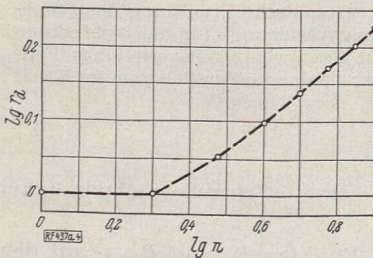


Abb. 31. Angenähertes Ausbreitungsgesetz bei geringer Schrittzahl n ; r_a durchschnittlicher Ausbreitungsradius

die Größen c und k sind hier Konstanten. Die Versuchskurven in Abb. 11, Seite 4, weichen von der Steigung $m = 0,5$ mehr oder weniger ab. Der Grund liegt darin, daß die Voraussetzungen: $n = \infty$ sowie α beliebig groß, nicht erfüllt sind, und zwar am wenigsten beim größten Korn; hier ist auch die Abweichung am stärksten.

Durch einfache Näherungsrechnung läßt sich zeigen, daß der Exponent m mit niedrigen Werten beginnt und allmählich erst dem Grenzwert $m = 0,5$ zustrebt. Angenommen sind Schritte konstanter Länge; sie sind entweder radial vom Ausgangspunkt abgewandt (positiv) oder ihm zugewandt (negativ), oder sie verlaufen in Richtung der Peripherie im Rechtssinn (positiv) oder im Linkssinn (negativ). Durch diese Möglichkeiten für die Anreihung der Schritte sind vier kenn-

zeichnende Anlenkungswinkel α erfaßt. Für die Aneinanderreihung von n Schritten gibt es $z_{\text{ges}} = 4^n$ Möglichkeiten. Der jeweilig erreichte Abstand ist r , der durchschnittliche ist dann $r_a = \frac{1}{z_{\text{ges}}} \sum_0^{z_{\text{ges}}} r$. Die Zahlenrechnung liefert

$n = 1$	2	3	4	5	6	7	8	\dots
$r_a = 1$	1	$1,125$	$1,25$	$1,37$	$1,48$	$1,58$	$1,68$	\dots

Die Darstellung von $\lg r_a$ in Abhängigkeit von $\lg n$, Abb. 31, zeigt den allmählichen Anstieg von $m = \frac{\lg r_{a_n} - \lg r_{a_{n-1}}}{\lg n - \lg(n-1)}$ und erklärt hiermit die Lage der Versuchskurven in Abb. 11, Seite 4. Wählt man in der allgemeinen Gleichung $r_a = r_{a_0}H^m$ den Kornhalbmesser x als Maßeinheit für r und H , so ergibt sich die spezifische Ausbreitung $r_s = r_{s_x} \left(\frac{H}{x}\right)^m$ mit der Bezugsgröße r_{s_x} .

¹²⁾ *De Haas-Lorenz*, Die Brownsche Bewegung, Braunschweig 1913.

¹³⁾ *Hegemann*, Die Ausgleichsrechnung, Berlin 1919.

IV. Ausbreitung in strömender Luft

Für die tangentialen und normalen Widerstandskräfte ist nunmehr die Relativgeschwindigkeit zwischen Korn und Gasströmung maßgebend. Liegt in einem geraden zylindrischen Kanal eine laminare Gasströmung vor, die in Querrichtung eine parabelartige Geschwindigkeitsverteilung aufweist, dann bewirken die tangentialen Kräfte an den Körnern ein Drehmoment. Der entstehende Drall verursacht während der Fallbewegung eine seitliche Bewegung, also einen zusätzlichen Elementarschritt, und zwar bei Rechtsdrall nach links und bei Linksdrall nach rechts. Infolgedessen erfahren in einem aufsteigenden Strom die Körner eine Beschleunigung zur Mitte²⁾, im absteigenden eine solche zur Wandung.

Bei turbulenter Strömung ist nicht nur die Grundgeschwindigkeit V , sondern auch die Störungsgeschwindigkeit V_z , die von der Reynoldsschen Zahl, der Kanalform, der Anlaufstrecke, der Oberflächenrauigkeit usw. abhängt, für das Zustandekommen von dP_T und dP_N und daher auch der Elementarschritte von Einfluß. Die Bewegung kann man sich entsprechend dem Prandtlischen Ansatz über die Mischbewegungen⁶⁾ so vorstellen, daß ein Korn innerhalb eines Wirbelballens durch eine Störungsgeschwindigkeit einen Impuls erhält, sich dabei aus dem Bereich des Wirbelballens entfernt, in den Bereich eines benachbarten Ballens gelangt usw. Je nach der Richtung und Größe der zusätzlichen Wegelemente, die sich aneinanderreihen, entsteht eine Ausbreitung von gewisser Größe. Die Ausbreitung in Richtung der Hauptbewegungsrichtung des Staubträgers bzw. lotrecht zu ihr befolgt dabei ähnliche Gesetzmäßigkeiten wie die Ausbreitung fallender Staubkörner in ruhender Luft.

V. Ähnlichkeitsgesetze für die Absetzbewegung mit Ausbreitung

1. Allgemeine Ähnlichkeitsbedingungen. Geometrisch ähnliche Bewegungsvorgänge in strömenden Flüssigkeiten oder Gasen setzen ganz allgemein voraus: Geometrische Ähnlichkeit der beteiligten Körper, also geometrische Ähnlichkeit der Kanalform, der Wandrauigkeit und der in der Flüssigkeit bewegten Körper, die ebenfalls ähnliche Oberflächenrauigkeit und außerdem geometrisch ähnliche Schwerpunktlage und Trägheitseigenschaften aufweisen müssen. Für diese Voraussetzungen führen wir folgende Bezeichnungen ein:

k_{11} für das Längenverhältnis zwischen der Korngröße l und der Kanalabmessung L ,
 $\delta_I/l = k_{12}$ bzw. $\delta_L/L = k_{13}$ für die relativen Rauigkeiten des Kornes und des Kanales,
 $s_I/l = k_{14}$ für die Schwerpunktlage sowie ähnliche Trägheitseigenschaften des Kornes.

Die Einhaltung sämtlicher Verhältnisse k_{11} , k_{12} , k_{13} und k_{14} sei ausgedrückt durch $k_1 = \text{konst.}$ Bei der Bewegung von Körnern in einer Kanalströmung treten folgende Kräfte auf:

1. die Schwere des Kornes $G_k = \gamma_k l^3$;
- 1a. die Schwere des Gases $G_g = \gamma_g L^3$; sie kann gegenüber G_k vernachlässigt werden;
2. der Trägheitswiderstand des Kornes. Allgemein gilt die Dimensionsgleichung

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = m \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial l} \right) = \frac{\gamma_k l^3}{g} \cdot \left(\frac{v}{t} + \frac{v^2}{l} \right),$$

wobei $m = G_k/g$. Bei stationärer Strömung genügt die Form $m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{\gamma_k l^3 v^2}{g}$, während

zur Verfolgung zeitlich veränderlicher Vorgänge $m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{\gamma_k l^3 v}{g} \frac{v}{t}$ zweckmäßiger ist. In unserem Falle genügt die erstere Schreibweise.

3. Der Trägheitswiderstand des Gases, bezogen auf den Kanal, $\frac{\gamma_g L^3}{g} \frac{dV}{dt} = \frac{\gamma_g L^2 V^2}{g}$;
4. die Zähigkeitskräfte des Gases, wirksam am Korn, $\eta \frac{\partial v}{\partial l} \cdot l^2 = \eta l v$;
5. die Zähigkeitskräfte des Gases, wirksam am Kanal, $\eta \frac{\partial V}{\partial L} L^2 = \eta V L$.

Bei der Kornbewegung entstehen Reaktionen seitens des Gases, und zwar als Normalkräfte $\frac{\gamma_g l^2 v_r^2}{g}$ und Tangentialkräfte $\eta l^2 \frac{v_r}{L}$ (Kraft 4a). Die Normalkräfte sind jedoch nichts anderes als Trägheitskräfte des Gases, lassen sich daher auch in der Form schreiben $\frac{\gamma_g l^3}{g} \cdot \frac{v_r^2}{l}$ (Kraft 2a). Für 2a sowie für 4a ist die Relativgeschwindigkeit v_r zwischen Korn (v) und Gas (V) bestimmend. Da es sich um geometrisch ähnliche Bewegungsvorgänge handelt, muß nicht nur l/L , sondern auch v/V einen bestimmten Wert haben. Daher sind die Kräfte 2a und 4a bestimmte Vielfache von 2 und 4; dies

möge die Form ausdrücken: $k_5 l^2 v^2 \gamma_k / g$ bzw. $k_6 \eta l v$. Die Kräfte 2 a und 4 a sind auf diese Weise durch bekannte Größen festgelegt. Liegt eine turbulente Kanalströmung vor, dann besteht zwischen den Störungsgeschwindigkeiten V_z und den Grundgeschwindigkeiten V der Strömung ein Verhältnis $k_7 = V_z / V$, das durch die Reynoldssche Zahl Re_L (gebildet aus 3 und 5) gegeben ist¹⁴⁾.

Besteht beim Vergleich zweier Anlagen, z. B. Modell und Großausführung, nicht vollständige geometrische Ähnlichkeit, so muß wenigstens der Zustrom zu den geometrisch ähnlichen Kanal-Versuchsstrecken gleichen Turbulenzgrad, d. h. gleiches k_7 haben. Zu der Relativgeschwindigkeit v_r tritt bei Turbulenz ein Zusatzvektor V_z hinzu, so daß die Ausdrücke für die Kräfte 2 a und 4 a eine neue Form erhalten:

$$k_7^2 k_5 \frac{\gamma_k}{g} l^2 v^2 \quad \text{und} \quad k_7'' k_6 \eta l v.$$

Einfachheitshalber sollen im folgenden nur die Grundformen 2 und 4 verwendet werden.

Für geometrische Ähnlichkeit der Bewegungsvorgänge müssen nun sämtliche beteiligten Kräfte 1, 2, 3, 4 und 5 im gleichen Verhältnis stehen. Diese Forderung wird durch folgende vier unabhängige, konstante Verhältniszahlen eindeutig zum Ausdruck gebracht:

$$\text{aus 2 und 1: } \frac{\gamma_k}{g} l^2 v^2 : \gamma_k l^3 = \frac{v^2}{g l} = k_2 \text{ (Froudesche Kennzahl } F_l);$$

$$\text{aus 2 und 4: } \frac{\gamma_k}{g} l^2 v^2 : \eta l v = \frac{\gamma_k l v}{g \eta} = k_3 \text{ (Reynoldssche Kennzahl } Re_l);$$

$$\text{aus 4 und 5: } \eta l v : \eta L V = \frac{l v}{L V} = k_1';$$

$$\text{aus 3 und 5: } \frac{\gamma_g}{g} L^2 V^2 : \eta L V = \frac{\gamma_g L V}{g \eta} = k_4 \text{ (Reynoldssche Kennzahl } Re_L).$$

Die Konstante k_1' besagt nichts Neues, da nach Früherem l/L und v/V Konstanten sein müssen, wenn überhaupt geometrisch ähnliche Bewegungsvorgänge bestehen sollen; die Bedingung $k_1 = \text{konst.}$ gewährleistet dies bereits. Es kann also überall an Stelle von l und v auch L und V gesetzt werden und umgekehrt. Da k_2 und k_3 konstant sein müssen, so auch beliebig gebildete Verbindungen dieser Größen, z. B. $k_3^2/k_2 = \gamma_k^2 l^3/g \eta^2$; entsprechend auch $k_3/k_4 = \gamma_k/\gamma_g$. Die Konstanten k_1 , k_2 , k_3 und k_4 lassen sich also durch k_1 , k_2 , k_3^2/k_2 und k_3/k_4 ersetzen.

Die allgemeine Ähnlichkeitsbedingung für die Kornbewegung in laminarer oder turbulenter Strömung beliebiger gestalteter Kanäle läßt sich daher schreiben:

$$\left(\frac{l}{L}, \frac{\delta_l}{l}, \frac{\delta_L}{L}, \frac{s_l}{l} \right), \frac{v^2}{g l}, \frac{\gamma_k^2 l^3}{g \eta^2}, \frac{\gamma_k}{\gamma_g} = \text{konst.} \dots \dots \dots \text{(I)}$$

Die Konstante $\frac{\gamma_k^2 l^3}{g \eta^2}$ besagt: Die dritten Potenzen der Kornabmessungen müssen sich verhalten wie die Quadrate der Zähigkeiten der Gase bei gleichem spezifischen Korngewicht, dagegen umgekehrt wie die Quadrate der spezifischen Korngewichte bei der gleichen Gaszähigkeit. Bei demselben Gas werden daher kleine Staubabscheidermodelle nur dann ähnliche Kornbahnen und denselben Wirkungsgrad wie Großausführungen zeigen, wenn sowohl die Kornabmessungen als auch deren spezifisches Gewicht sinngemäß geändert werden. Ein Korn bestimmter Größe wird daher bei höherer Temperatur eine geringere Ausbreitung zeigen als bei niedriger, da für dieselbe spezifische Ausbreitung ein größeres Korn erforderlich wäre.

2. Ähnlichkeitsbedingungen für die Grenzfälle. Meist ist es schwierig, die zahlreichen Bedingungen (I) bei Modellversuchen zu erfüllen. Nun können bei genügend kleinen Kornabmessungen bzw. Reynoldsschen Zahlen die Trägheitskräfte, dagegen bei genügend großen Abmessungen bzw. Reynoldsschen Zahlen die Zähigkeitskräfte vernachlässigt werden¹⁵⁾. Für diese Grenzfälle kann man einfachere Ähnlichkeitsbedingungen aufstellen.

a) Bei Vernachlässigung der Trägheitskräfte des Trägergases, also bei schleichender Laminarströmung oder auch bei ruhender Luft verschwinden die Kräfte 3; die Trägheitskräfte 2 des Kornes gelten noch nicht als vernachlässigbar. Dann ergibt sich

$$\left(\frac{l}{L}, \frac{\delta_l}{l}, \frac{s_l}{l} \right), \frac{v^2}{g l}, \frac{\gamma_k^2 l^3}{g \eta^2} = \text{konst.} \dots \dots \dots \text{(Ia)}$$

Lassen sich noch die Kräfte 2 vernachlässigen, so ist

$$\left(\frac{l}{L}, \frac{\delta_l}{l}, \frac{s_l}{l} \right), \frac{\gamma_k l^2}{v \eta} = \text{konst.} \dots \dots \dots \text{(Ib)}$$

¹⁴⁾ Vgl. v. Kármán und Levi-Civita, Vorträge aus dem Gebiete der Hydro- und Aerodynamik, Berlin 1924.

¹⁵⁾ Vgl. H. W. Gonell, Zur Frage der Gültigkeit des Stokesschen Gesetzes, VDI-Zeitschr. Bd. 76 (1932) S. 664; außerdem L. Schiller u. A. Naumann, Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung, VDI-Zeitschr. Bd. 77 (1933) S. 318.

In dieser Formulierung ist das Stokessche Gesetz enthalten. Wenn bei vernachlässigbaren Kräften 3 statt der Trägheitskräfte 2 die Zähigkeitskräfte 4 am Korn vernachlässigbar sind, erhält man wiederum die Bedingungen Ia.

b) Bei Vernachlässigung der Zähigkeitskräfte des Staubträgers, also bei sehr hoher Reynoldsscher Zahl Re_L , verschwinden die Kräfte 5; dann ergibt sich dieselbe Ähnlichkeitsbedingung wie im allgemeinen Fall I. Können außerdem die Zähigkeitskräfte 4 vernachlässigt werden, so vereinfacht sich die Bedingung zu

$$\left(\frac{l}{L}, \frac{\delta_l}{l}, \frac{\delta_L}{L}, \frac{s_l}{l}\right), \frac{\gamma_k v^2}{\gamma_g g l} = \text{konst.} \dots \dots \dots \text{(Ic)}$$

Hierbei ist auf konstante Reynoldssche Zahl Re_L und auf konstanten Turbulenzgrad k_T verzichtet. Die Ähnlichkeit der Ausbreitung ist daher nicht mehr gewährleistet. Wenn bei vernachlässigbaren Kräften 5 die Zähigkeitskräfte 4 und die Trägheitskräfte 2 am Korn vernachlässigt werden können, so entsteht

$$\left(\frac{l}{L}, \frac{\delta_l}{l}, \frac{\delta_L}{L}, \frac{s_l}{l}\right), \frac{\gamma_k l^2}{v \eta}, \frac{\gamma_k \gamma_g l^3}{g \eta^2} = \text{konst.} \dots \dots \dots \text{(Id)}$$

In dieser Formulierung ist auch die Reynoldssche Zahl Re_L als Konstante enthalten. Können bei Vernachlässigung der Kräfte 5 noch die Zähigkeitskräfte 4 und die Trägheitskräfte 2 beim Korn vernachlässigt werden, so ergibt sich

$$\left(\frac{l}{L}, \frac{\delta_l}{l}, \frac{\delta_L}{L}, \frac{s_l}{l}\right), \frac{\gamma_g v^2}{\gamma_k g l} = \text{konst.} \dots \dots \dots \text{(Ie)}$$

In dieser Bedingung ist das quadratische Widerstandsgesetz nach *Newton*¹⁶⁾ enthalten.

3. Allgemeine Ähnlichkeitsbedingungen bei nicht maßstäblicher Korngröße. Da es beim Modellversuch u. U. schwierig ist, der Forderung $l/L = \text{konst.}$ entsprechend ein genügend feines Staubkorn zu beschaffen, fragt es sich, ob nicht ein größeres Korn $l' > l$ mit anderem spezifischem Gewicht γ_k' in einem anderen Trägergas mit einer Zähigkeit η' verwendet werden kann, ohne daß dabei die Größe der wirksamen Kräfte geändert wird. Da die Kanalabmessung L unverändert bleiben soll, lauten die Beziehungen für die Differentialquotienten (in der Form einer Dimensionsgleichung)

$$\frac{dv'}{dt} = \frac{v'^2}{L} \quad \text{und} \quad \frac{\partial v'}{\partial y} = \frac{v'}{L}$$

Für die Kräfte gelten daher die Bedingungen:

- a) für die Schwerkraft $\gamma_k' l'^3 = \gamma_k l^3$;
- β) für die Trägheitskraft $\frac{\gamma_k' l'^3 v'^2}{g L} = \frac{\gamma_k l^3 v^2}{g L}$;
- γ) für die Zähigkeitskraft $\frac{\eta' l'^2 v'}{L} = \frac{\eta l^2 v}{L}$.

Daraus folgt: $v' = v$ und daher $V' = V$; ferner: $\frac{\gamma_k'}{\gamma_k} = \left(\frac{l}{l'}\right)^3$; $\frac{\eta'}{\eta} = \left(\frac{l}{l'}\right)^2$.

Aus den bekannten Größen l, v, l', γ_k und η ergibt sich hiernach γ_k' und η' . Die Reynoldssche Zahl hat sich nunmehr in den Wert $Re_L' = \frac{\gamma_g L V}{g \eta'} = \left(\frac{l'}{l}\right)^2 Re_L$ geändert, während $F_L' = F_L$ geblieben ist. Da nun in turbulenter Strömung die Störungsgeschwindigkeiten V_z sich entsprechend der neuen Reynoldsschen Zahl Re_L' geändert haben, so sind die Bedingungen für die Kornbewegung nicht mehr genau dieselben, wie vordem (vgl. k_T' und k_T''); die Ähnlichkeit ist daher nicht vollkommen. In laminarer Strömung macht sich $Re_L' > Re_L$ nicht störend bemerkbar. Bei Betrachtung der Grenzfälle treten auch hier Vereinfachungen auf, je nachdem eine oder mehrere der Größen α), β) und γ) verschwinden dürfen.

VI. Praktische Anwendung der Ergebnisse

Im Versuch galt es, die Wandwirkung bei der Ausbreitung auszuschalten. In der Entstaubungspraxis gilt es dagegen, sie auszunutzen, indem man z. B. an der Schachtwand Taschen zur seitlichen Ableitung des Staubes anordnet (Elektrofilter) oder Rohrwände durch herabrieselndes Wasser benetzt.

Läßt man in der Achse eines senkrechten Zylinderrohres von 2 cm Dmr. und 100 cm Länge Staubkörner der Fraktion 400/576 bzw. 4900/6400 fallen, so werden unter Zugrundelegung der Werte

¹⁶⁾ *Auerbach* und *Hort*, Handb. d. physikal. u. techn. Mechanik, Leipzig 1930, Bd. II, Zweiter Teil, S. 198 sowie 1931, Bd. 5, S. 270.

in Abb. 4 bzw. 6 (Seite 3) rd. 38 % bzw. 5 % sämtlicher Körner allein durch Ausbreitung abgetrennt. Bei voller Beaufschlagung des Rohrquerschnitts sind es 80 bzw. 40 %. Viel günstiger ist es, wenn man statt der 100 cm langen Rohre zehn Rohrreihen von je 10 cm Länge senkrecht übereinander anordnet und jedes Rohr um 1 cm gegen das nächste in waagerechter Richtung versetzt. Vom Staub 4900/6400 werden bei voller Beaufschlagung 13 % im ersten Rohr zurückgehalten, 87 % gehen ins zweite, 71 % ins dritte; nur noch 20 % verlassen das zehnte Rohr. Geht man von der senkrechten Anordnung zu einer regellosen Schüttung von Rohrstücken über, so hat man das Raschigfilter. Die nächsten Verwandten sind die Schütt- und Siebfilter, soweit deren Poren größer als die Korndurchmesser sind.

Ist dagegen in den Rohren eine turbulente Gasströmung vorhanden, so lassen sich bei 10 bis 20 fachen Rohrdurchmessern gegenüber den Versuchen mit ruhender Luft die gleichen Abscheidungsgrade η erzielen, falls ähnliche Turbulenzgrade wie in den Versuchen der Zahlentafel 2 vorliegen. Bei 2 cm Rohrdurchmesser und Flugasche von 4900/6400 wird $\eta = 95$ %. Die Rohrlängen sind dabei so zu wählen, daß dieselben Fallzeiten zur Verfügung stehen wie in ruhender Luft. Die Frage, ob die Ausbreitung die Abscheidung stets verbessert, kann durch folgendes Beispiel geklärt werden.

Ein waagerechter Kanal habe einen Querschnitt 80×80 cm² und eine Länge von 700 cm. Die Grundgeschwindigkeit der turbulenten Strömung sei über den ganzen Kanal $V = 600$ cm/s; die Schwebegeschwindigkeit der Körner 4900/6400 betrage $v_s = 70$ cm/s, die Ausbreitung das 20 fache von der in ruhender Luft. Es sollen daher die 20 fachen Werte der Ausbreitung in Abb. 6 (Seite 3) für die Rechnung als Grundlage dienen. Es ist angenommen, daß der Staubgehalt über den Eingangsquerschnitt gleichmäßig verteilt ist. Der Querschnitt wird schachbrettartig in 16 gleichgroße Felder aufgeteilt und der Schwerpunkt jedes Feldes zum Ausgangspunkt der Staubbewegung gewählt. Ohne Ausbreitung legen dann die Körner unter Vernachlässigung des Beschleunigungsabschnittes die strichpunktierten Bahnen zurück, Abb. 32,

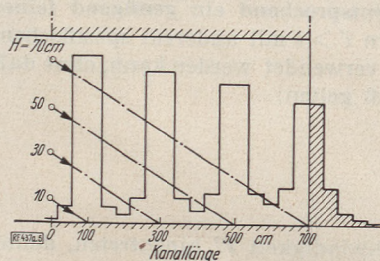


Abb. 32. Vereinfachte Darstellung der Längsausbreitung, errechnet für die Ablagerung in einem waagerechten Kanal

die sämtlich den Kanalboden treffen. Mit Hilfe von Abb. 6 (Seite 3) erhält man leicht die ausgebreiteten Niederschläge.

Es zeigt sich, daß außer der durch die zwölf unteren Felder durchgehenden Staubmenge von dem restlichen, durch die vier oberen Felder gehenden Staub nur die Hälfte, also auf der Kanallänge von 700 cm $7/8$ der Gesamtmenge abgelagert wird. Bei stärkerer Ausbreitung würde ein noch geringerer Teil abgetrennt. Der Verlust entsteht dadurch, daß in irgend einer Richtung, in der eine Ausbreitung stattfinden kann (z. B. in der Längsachse des Kanals), keine begrenzende Abscheidungsfläche geboten wird. Die Decken und Wandflächen verbessern das Ergebnis nur dann wesentlich, wenn sie viskos benetzt werden (etwa auf 15/16).

Man kann also durch Ändern der Kanalabmessungen, ferner durch Einbau oder Fortnahme von Führungswänden oder Leitflächen, die Abscheidung dank der Ausbreitung positiv oder negativ beeinflussen. Stellt man dagegen in den Strömungsraum Hindernisse, etwa Winkelroste, Strömungsumlenkvorrichtungen usw.¹⁷⁾, so vergrößert sich die spezifische Ausbreitung infolge der Störungsbewegungen des Gases, die eine stärkere Durchmischung der Körner bewirken; man verbessert also hiermit nur die grundlegende Vorbedingung für die erwähnte positive oder negative Beeinflussung.

VII. Zusammenfassung

Die Bewegung technischen Staubes weicht von der Bewegung des hypothetischen Massenpunktes mit zunehmender Korngröße immer stärker ab. Die tatsächliche Bewegung läßt sich in die Hauptbewegung des Massenpunktes und eine Zusatzbewegung, die als Ausbreitung bezeichnet wird, trennen. Diese Trennung ist bei der Absatzbewegung in ruhender Luft und in turbulenter Kanalströmung durchgeführt. Unter Anwendung der Ähnlichkeitsgesetze läßt sich nunmehr durch Modellversuch (Staubkammer, Zyklon usw.) und bei einfachen Verhältnissen auch durch Rechnung die Abscheidung in einer Entstaubungsanlage vorausermitteln. [RF 437 a]

¹⁷⁾ Die Strömungsumlenkung dient bei Fliehkraftabscheidern, Fangkörpern usw. zur Ausnutzung der Trägheit der Körner für die Abscheidung, hat dann aber eine ganz andere Bedeutung; vgl. Sell, Staubabscheidung an einfachen Körpern oder in Luftfiltern, VDI-Forschungsheft 347, Berlin 1931.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



27188

Politechniki Gdańskiej