

# Zeitschrift für angewandte Chemie

Seite 449—456

Aufsatzteil

15. August 1913

## Physikalisches über Gasströmungen<sup>1)</sup>.

Von Dr.-Ing. KARL THELEN.

(Eingeg. 11.7. 1913.)

### I. Energieverteilung in einem Gasstrom.

Es sei  $AB$  ein Rohr von überall gleichem Querschnitt (Fig. 1). Die Strömung des Gases erfolge hierin 1. reibungsfrei und stationär, d. h. unabhängig von der Zeit, 3. in parallelen Stromfäden.

Lassen wir ein Gas mit einem bestimmten Anfangsdruck  $p_{st}$  durch dieses Rohr fließen, so wird infolge unserer Voraussetzungen der Druck  $p_{st}$  in jedem Querschnitt des Rohres dasselbe sein müssen. Tragen wir den Druck als Ordinat und die Länge des Rohres als Abszisse auf, so erhalten wir als Darstellung des Druckverlaufes eine gerade Linie. In der Technik wird dieser Druck der statische Druck genannt. Eine Definition des Druckes in einem strömenden Gase, also des statischen Druckes gibt Prof. L. Prandtl wie folgt<sup>2)</sup>: „Man betrachte die ebene Grenzfläche zwischen zwei nebeneinander befindlichen Gasmengen. Die Kraft, mit der die beiden Gasmengen in der Grenzfläche gegeneinander gepreßt werden, oder die Kraft, mit der die materiell gedachte Scheidewand zwischen beiden Gasmengen von beiden Seiten zusammengedrückt wird, ist der Druck der strömenden Gasmengen an der betreffenden Stelle. Dieser Druck könnte durch ein mit den Gasteilchen sich fortbewegendes Druckmeßgerät (z. B. ein Aneroidbarometer) beobachtet werden.“

Während der Strömung wird sich das Gas mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  fortbewegen müssen. Diese Geschwindigkeit können wir uns durch einen bestimmten Druck erzeugt denken. Den Druck wollen wir durch die Höhe einer Flüssigkeitssäule, und zwar in Millimeter Wassersäule messen. Zwischen der Geschwindigkeit  $v$  des Gases und der Höhe  $h_w$  dieser Wassersäule besteht nach der Mechanik die Beziehung

$$h_w = \frac{v^2}{2g} \times \frac{\gamma}{\gamma_w},$$

wo  $\gamma$  = spezifisches Gewicht des Gases,  $\gamma_w$  = spezifisches Gewicht des Wassers,  $g$  = Erdbeschleunigung.

Diese Druckhöhe  $h_w$ , wird in der Technik dynamischer Druck ( $p_{dy}$ ) genannt<sup>3)</sup>.

Da wir eine stationäre, reibungsfreie Strömung bei konstantem Rohrquerschnitt angenommen haben, so wird der dynamische Druck  $p_{dy}$  im Rohre überall dasselbe sein. Wir erhalten im Diagramm, Fig. 1, als Darstellung von  $p_{dy}$  eine gerade Linie. Die Summe  $p_{st} + p_{dy} = p$  stellt uns, wie man sofort durch Multiplikation der beiden Seiten der Gleichung mit dem Volumen  $V$  sieht, die Energie des Gases in jedem Querschnitt dar, und zwar gibt  $p_{st}$  die potentielle und  $p_{dy}$  die kinetische Energie des Gasstromes an.

<sup>1)</sup> Kürzeste Wiedergabe eines im Aachener Bezirksverein deutscher Chemiker gehaltenen Vortrages.

<sup>2)</sup> Z. Ver. d. Ing. 1912, 1835.

<sup>3)</sup> Obwohl der Physiker seit D. Bernoulli (1738) feststehende Bezeichnungen für  $p_{st}$ ,  $p_{dy}$ ,  $p$  gebraucht, hat eigentlich der Techniker abweichende Benennungen, die dadurch manche Begriffsverwirrung schaffen, aufgestellt. So stehen sich folgende Bezeichnungen für denselben Begriff gegenüber:

Technik	Physik
statischer Druck $p_{st}$	Druck
dynamischer „ $p_{dy}$	Geschwindigkeitsdruckhöhe
Gesamt- „ $p$	hydrodynamischer Druck
Pressung oder „ eines ruhendes Gases	hydrostatischer Druck

Die Geschwindigkeitsverteilung in irgendeinem Querschnitt, beispielsweise in  $B$ , ergibt parallel gerichtete, gleichgroße Geschwindigkeiten.

Wir nehmen jetzt an, die Strömung des Gases erfolge wie bisher reibungsfrei und stationär, jedoch soll der Rohrquerschnitt variabel sein. Die Kontinuität der Strömung verlangt, daß in den Querschnitten, welche kleiner wie  $A$  und  $B$  sind, die Geschwindigkeit und damit der dynamische Druck größer sein muß wie in  $A$  und  $B$  und umgekehrt, in den Querschnitten, welche größer sind wie  $A$  und  $B$ , muß

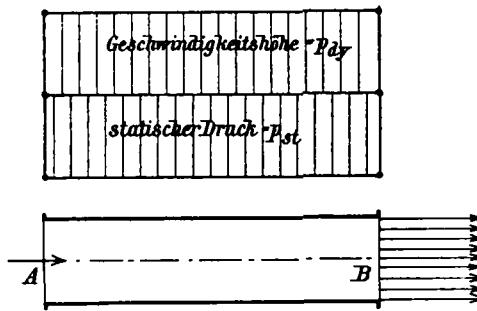


Fig. 1.

$p_{dy}$  kleiner sein wie in  $A$  und  $B$ . Mit veränderlichem  $p_{dy}$  muß nach dem Satze von der Energiekonstanz  $p_{st}$  veränderlich werden. Bei den angenommenen Querschnitten der Fig. 2 erhalten wir somit als Schaubild der Energieverteilung das dort gezeichnete Diagramm.

Die Geschwindigkeitsverteilung über einen Querschnitt, beispielsweise bei  $B$ , zeigt dasselbe Bild wie vorhin.

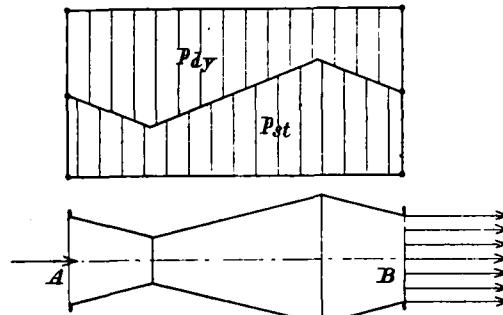


Fig. 2.

Wir lassen jetzt die Bedingung der Reibungsfreiheit der Strömung fallen und nehmen Reibungsströmung an, die einzelnen Stromfäden sollen jedoch noch parallel gerichtet sein. Die Strömung erfolge auch hier stationär, und der Querschnitt des Rohres sei zunächst konstant.

Das Gesetz der Kontinuität der Strömung verlangt bei konstantem Querschnitt  $p_{dy} = \text{konst}$ . Infolge der Reibung muß die Gesamtenergie des Gasstromes abnehmen; da  $p_{dy}$  gemäß vorhin = konst. ist, so muß  $p_{st}$  sich verringern. Fig. 3 zeigt die Energieverteilung, wobei hinsichtlich der Größe der Reibung angenommen ist, daß der statische Druck im Querschnitt  $B$  Null werden soll.

Der Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung in einem Querschnitt, etwa in  $B$ , zeigt jetzt nach dem Poiseuilleschen Gesetz eine Paraboloidform. Dieses Gesetz der paraboloidischen Geschwindigkeitsverteilung in einem Querschnitt wurde 1842 von Poiseuille rein empirisch aufgestellt. Hagenbach, Neumann und Helmholz bestätigten es auf Grund eingehender mathematischer Überlegungen.

Demnach müssen wir schon von einer mittleren Geschwindigkeit sprechen, wenn wir die Geschwindigkeit in einem Querschnitt angeben. Zu messen wäre diese mittlere

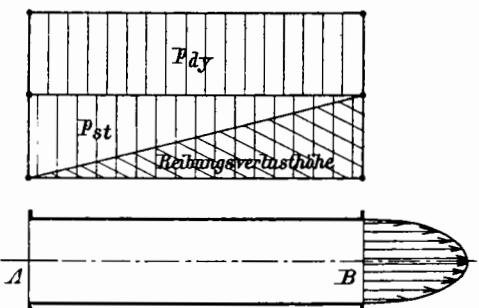


Fig. 3.

Geschwindigkeit im Abstande 0,7 r vom Mittelpunkt, was sich mit Hilfe einer kleinen Rechnung zeigen läßt.

Nehmen wir jetzt noch variablen Querschnitt hinzu und denken uns die Reibungsverluste in derselben Höhe wie

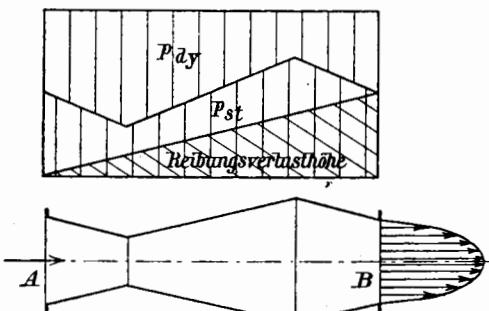


Fig. 4.

vorhin, so ergibt sich der Energieverlauf gemäß Fig. 4. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten in einem Querschnitt zueinander ist dasselbe wie in Fig. 3.

## II. Kritische Geschwindigkeit.

Wir haben bisher angenommen, daß die Strömung in dem Rohre in parallel gerichteten Stromfäden erfolge. Nun hat sich gezeigt, daß diese Annahme nur bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit, der sog. kritischen Geschwindigkeit, berechtigt ist. Zugleich ergab sich hinsichtlich der Höhe der Reibungsverluste, daß diese bis zur kritischen Geschwindigkeit proportional der ersten Potenz der mittleren Geschwindigkeit sind.

Während also bis zur kritischen Geschwindigkeit sich die Strömung durch eine gewisse Stabilität auszeichnet, wechselt mit größerer Geschwindigkeit der Vorgang, wie Prof. Reynolds bei den den Gasströmungen nah verwandten Flüssigkeitsströmungen durch gefärbte Flüssigkeitsfäden nachweisen konnte. Die Bewegung wird zunächst labil, um sich bei größerer Durchflußgeschwindigkeit dauernd in regellos verschlungenen und ständig wechselnden Stromfäden aufzulösen.

Die kritische Geschwindigkeit ist nach den Versuchen von Reynolds und Becker<sup>4)</sup> für Luft durch die Gleichung bestimmt:

$$v_k = 20 R \frac{\eta T}{pd},$$

wo  $R$  = Gaskonstante,

$T$  = absolute Temperatur,

$\eta$  = Zähigkeitskonstante in C. G. S.-Einheiten,

$d$  = Durchmesser,

$p$  = Druck.

Handelt es sich beispielsweise um Luft von 20°, so ergibt sich  $v_k = \frac{30}{pd}$ . Nach dieser Gleichung ist die Tabelle 1 ausgerechnet, welche die kritische Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Druck und Leitungs durchmesser angibt.

<sup>4)</sup> Mitteilungen über Forschungsarbeiten, Heft 48, Berlin, Julius Springer.

Tabelle I.

d =	25	50	100	250	500
0,2	6,00	3,00	1,50	0,60	0,30
p = { 1,0	1,20	0,60	0,30	0,12	0,06
10,0	0,12	0,06	0,03	0,012	0,006

Man sieht, bei welchen geringen Geschwindigkeiten die kritische eintritt, und daß die Strömung der Gase bei vielen chemischen Prozessen innerhalb des Gebietes der kritischen Geschwindigkeit fällt.

Von der kritischen Geschwindigkeit an werden die Reibungsverluste annähernd proportional dem Quadrate der mittleren Geschwindigkeit.

Die Geschwindigkeitsfläche im Querschnitt, d. i. der geometrische Ort der Endpunkte der aufgetragenen Geschwindigkeitsstrecken, hat nach den spärlichen bis heute vorliegenden Versuchen ziemlich flachen Verlauf<sup>5)</sup>.

Trotzdem eine Reihe von Forschern, wie Lord Raleigh, Kelvin, Reynolds, Klein, Sommerfeld, dem Gebiete dieser sog. turbulenten Strömungen ( $v \geq v_{krit.}$ ) mit dem Rüstzeug der mathematischen Untersuchung zu Leibe gerückt sind, hat man hierin noch wenig Klarheit bekommen, die Schwierigkeiten der Erforschung dieses auch praktisch wichtigen Gebietes sind sehr groß, so daß wir heute noch ganz auf die Erfahrung angewiesen sind.

Steigern wir die Geschwindigkeit einer Gasströmung oberhalb der kritischen, bis sie der Schallgeschwindigkeit der Größe nach vergleichbar ist, so finden während der Strömung erhebliche Druckänderungen statt. Die Reibungswiderstände werden hierbei in komplizierter Weise abhängig von Strom- und Schallgeschwindigkeit. Das Zusammenfallen der Strom- mit der Schallgeschwindigkeit spielt bei den Strömungserscheinungen eine ebenso entscheidende Rolle wie bei den Schwingungsvorgängen der Eintritt der Resonanz.

Da die chemische Technik in immer steigendem Maße Druck, Geschwindigkeit und Temperatur bei ihren Prozessen anwachsen läßt (erinnert sei an die Ammoniaksynthese nach Haber), so wird auch wohl das Gebiet der sehr großen, der Schallgeschwindigkeit vergleichbaren Geschwindigkeiten das Interesse des Chemikers in Zukunft gewinnen; von praktischer Bedeutung ist es einstweilen nur für den Ingenieur.

## III. Energieverluste eines Gases bei Strömung durch ein Rohr.

### A. Rohr mit konstantem Querschnitt.

Mannigfaltige Versuche über die Größe der Reibung von Gasen und Flüssigkeiten in runden Leitungen haben gezeigt, daß der Reibungsverlust  $H$  ist:

$$H = \lambda \frac{l}{D} \frac{rv^2}{2g},$$

wo  $\lambda$  = Reibungskoeffizient,

$l$  = Länge } des Rohres,

$D$  = Durchmesser } des Rohres,

$\gamma$  = Dichte des Gases,

$v$  = Geschwindigkeit,

und zwar tritt der Koeffizient  $\lambda$  an Stelle bis jetzt noch nicht erkannter und erforschter Gesetzmäßigkeiten. In älteren Schriften findet man  $\lambda$  noch als Konstante angegeben. Durch sorgfältig ausgeführte Versuche erkannte man indessen, daß  $\lambda$  abhängig ist:

a) von der wechselnden äußeren Reibung (Gas gegen feste Begrenzungswand),

<sup>5)</sup> Zwischen der kritischen Geschwindigkeit  $v_{krit.}$  und der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  besteht nach den Versuchen von Nusselt (Z. Ver. d. Ing. 1909, 1750) folgender Zusammenhang: Unterhalb der kritischen Geschwindigkeit ist  $\alpha$  nahezu unabhängig von ihr. Oberhalb der kritischen Geschwindigkeit steigt  $\alpha$  mit zunehmendem  $v$ . Dies erklärt sich daraus, daß bei geringer Geschwindigkeit die Gasteilchen in parallelen Stromfäden strömen, und somit bei der Wärmebewegung senkrecht zur Richtung des Gasstromes reine Wärmeleitung vorliegt. Oberhalb der kritischen Geschwindigkeit treten im Gasstrom Wirbelungen auf, so daß die Wärme auch noch durch Mischung der Gas- teilchen fortgepflanzt wird.

- b) von der Größe der inneren Reibung oder Zähflüssigkeit<sup>6)</sup>,  
c) von dem Durchmesser der Leitung und der Gasgeschwindigkeit.

Fig. 5 zeigt nach Blaeb „Die Strömung in Röhren“ eine graphische Zusammenstellung mehrerer für  $\lambda$  aufgestellten Gesetze bei verschiedenem Durchmesser, aber bei gleicher Geschwindigkeit  $v = 16 \text{ m/sec}$ . Wie man sieht, weichen die Werte von Grashof, Rietschel, Biel II und Petit in den Grenzen von 800–1200 mm Durchmesser sehr wenig voneinander ab; dagegen divergieren sie bei geringem Durchmesser so stark, daß es nicht möglich ist, hier auf wahrscheinliche Werte zu schließen.

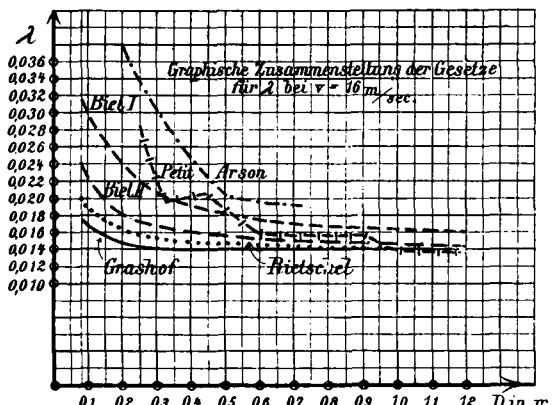


Fig. 5.

1907 hat R. Biel versucht<sup>7)</sup> das bis dahin vorliegende Versuchsmaterial über Rohrleitungswiderstände für sämtliche Flüssigkeiten und Gase in ein gemeinschaftliches Gesetz zu kleiden. Biel stellt für  $\lambda$  folgenden allgemeinen empirischen Ausdruck auf

$$\lambda = a + \frac{b}{\sqrt{D}} + \frac{c}{v\sqrt{D}} \cdot \eta,$$

worin neben den bekannten Größen auch die Zähigkeit  $\eta$  berücksichtigt ist. Diese Formel von Biel für  $\lambda$  wird augenblicklich als maßgebend zur Berechnung dieses Koeffizienten angesehen.

#### B. Rohr mit plötzlichen Querschnittsänderungen.

Nach dem Satze von Carnot-Borda entsteht bei schroffen Querschnittserweiterungen ein Energieverlust

$$H = \frac{\gamma}{2g} (v_1 - v_2)^2, \text{ wo } v_1 \text{ und } v_2 \text{ die Geschwindigkeit vor und}$$

nach dem Querschnittsübergang sind. Neuere Untersuchungen weisen darauf hin, daß der tatsächliche Erweiterungsverlust mit dem nach Carnot-Borda berechneten nicht übereinstimmt.

Der Carnot-Bordasche Satz ist entsprechend den Regeln des unelastischen Stoßes abgeleitet. Wie Isachsen<sup>8)</sup> auseinandersetzt, ist die Bezeichnung Stoßverlust hier eine unglückliche und irreführende. Der Energieverlust entsteht hier ausschließlich durch Sekundärströmungen, die verhältnismäßig sehr intensiv auftreten, und deren Verlauf ohne weiteres durch einfache Überlegung festzustellen ist (Fig. 6). Der Querschnitt BB ist größer als der Querschnitt AA, die Geschwindigkeit  $v_2$  ist daher kleiner als  $v_1$ ; mithin der statische Druck in BB größer als in AA. Das Gas in der Ecke ABC steht demnach an verschiedenen Punkten unter sehr verschiedenem Druck. Es ist nun ohne weiteres klar, daß ein stillstehendes Gas unmöglich verschiedenen Druck in seinen verschiedenen Punk-

<sup>6)</sup> Bei den Gasen ist die Zähigkeit zwar sehr gering, trotzdem zeigen die Versuche, daß die innere Reibung nicht vernachlässigt werden darf, da die Erfahrung nur in seltenen Fällen die Theorie der reibunglosen Gase bestätigt.

<sup>7)</sup> Mitteilungen über Forschungsarbeiten, Heft 44.

<sup>8)</sup> Z. Ver. d. Ing. 1912, 219.

ten aufnehmen kann. Das Gas in dem Zwickel ABC kann daher nicht still stehen, sondern es muß eine starke Rückströmung von B durch den Eckraum nach A erfolgen. Dies führt dazu, daß der Druck im Raum bei C größer wird als im Strahl selbst bei A. Das bei D aus dem Hauptstrahl austretende Gas tritt infolgedessen bei C wieder in den Strahl ein. Der hierdurch entstehende intensive Sekundärstrom verzehrt selbst Energie und ruft durch seinen Eintritt in den Hauptstrahl Energieverluste hervor. Das Eintreten des Sekundärstromes in den Hauptstrahl bei A sollte bei absoluter Energiegleichheit der einzelnen Gasfäden und Regelmäßigkeit des Vorganges gleichmäßig verteilt geschehen. In Wirklichkeit ist natürlich eine derartige Gleichmäßigkeit unmöglich. Das Gas tritt aus dem sog. Todraum „klumpenweise“ in den Strahl ein und wird hier durch Stoß, unter Umsetzung eines Teiles der lebendigen Kraft des Strahles in Wärme, auf die Geschwindigkeit des Hauptstrahles gebracht.

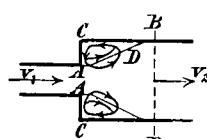


Fig. 6.

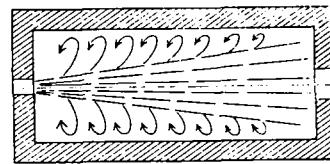


Fig. 7.

Der Wärmetechniker benutzt die Wirbelbildung bei dieser Art Strömung beim Ofenbau, um Gas und Luft innig zu mischen. Gas und Luft, Fig. 7, treten mit großer Anfangsgeschwindigkeit in den Ofen ein; die große Eintrittsgeschwindigkeit des Gases wird durch Wirbelbildung aufgezehrt, welche so das zur Verbrennung erforderliche Volumen bzw. die zur Verbrennung nötige Zeit vergrößert, ohne daß der Heizraum vergrößert wird.

Dem Chemiker dienen diese Sekundärströmungen dazu, um die Reaktion von Gasen bei chemischen Prozessen zu beschleunigen: es sei hier nur auf den Schwefelsäurekammerprozeß (Eintritt der Glovergase in die Kammern) hingewiesen.

Der Energieverlust bei plötzlicher Querschnittserweiterung kann auftreten, ohne daß eine tatsächliche Querschnittsänderung vorliegt. Dieser Fall ist besonders bei Saugleitungen zu beobachten. Strömt Gas in ein Rohr, so wird sich der Strahl infolge einer Verdichtung der Stromlinien unmittelbar nach dem Eintritt zusammenziehen und sich erst später an die Rohrfläche anlehnen. Die Wirkung dieser Kontraktion entspricht ganz dem Vorgange bei plötzlicher Erweiterung. Durch richtige Ausbildung der Saugmündung kann man diesen Energieverlust fast gänzlich aufheben, wie folgende Beispiele zeigen.

Ein Turbogebläse auf dem Hüttenwerk Rothe Erde<sup>9)</sup> saugte Luft aus dem Maschinenhaus und sollte sie auf 2 m Wassersäule bei 1000 cbm minutlicher Förderung pressen. Es trat nun zunächst die Luft fast unmittelbar aus der Atmosphäre in das Gebläse. Hierdurch entstanden, wie durch Messung festgestellt wurde, bedeutende Ansaugwiderstände, die sich mit steigender Leistung stark vermehrten. Außerdem wurde ein fast unerträgliches Geräusch verursacht. Nachdem man einen gemauerten Ansaugekanal angebracht hatte, der sich allmählich auf die Größe der Ansaugöffnung verjüngte, sank der Ansaugwiderstand entsprechend der gezeichneten Kurve. Fig. 8 zeigt die Größe des Ansaugwiderstandes in Abhängigkeit von der geförderten Luftmenge  $Q$  vor und nach Anbringung des Kanals.

Privatdozent Dr. Blaeb, Darmstadt, zeigt in seinem Buche: „Die Strömung in Röhren“, an Hand eines sehr lehrreichen Beispieles den Einfluß der Formgebung einer Ansaugmündung.

Ein Ansaugrohr von 1,895 m Länge war an einem Exhauster angebracht; an das freie Ende konnten die in Fig. 9 gezeichneten Mündungen angeschlossen werden. Blaeb bestimmte den Kontraktionskoeffizienten dieser Mündungen, d. h. das Verhältnis des engsten Strahlquerschnittes zum

<sup>9)</sup> Z. Ver. d. Ing. 1907, 1849.

Rohrquerschnitt. In Tabelle II ist der Kontraktionskoeffizient „ $\mu$ “ dieser drei Mündungen eingeschrieben.

Tabelle II.

Saugmündung	glattes Rohr	Rohr mit Ring	Rohr mit Trichter
$\mu$	0,568	0,685	1,00

Er ist am günstigsten für das Rohr mit Trichter, hier sind die Ansaugwiderstände gleich Null.

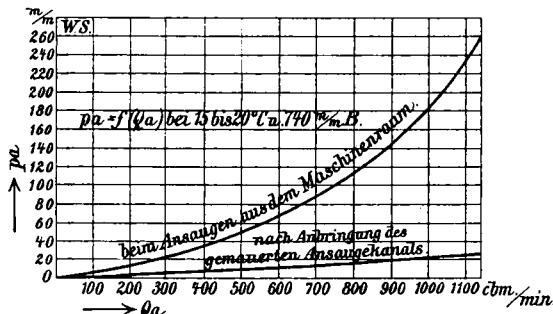


Fig. 8.

Vielfach findet man heute noch in der chemischen Industrie Gasfänger nach Fig. 10. Daß die Formgebung eine gänzlich falsche ist, bedarf nach dem Vorhergehenden wohl keiner weiteren Erläuterung.

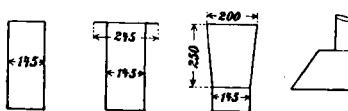


Fig. 9.

Fig. 10.

Den Energieverlusten bei der Einströmung entsprechen natürlich solche beim Ausströmen

aus Kanälen und Leitungen. Diese Ausströmungsverluste werden am besten durch folgendes Beispiel klar<sup>10)</sup> werden. Durch ein Rohr von 230 mm lichter Weite, Fig. 11, preßte ein Ventila-

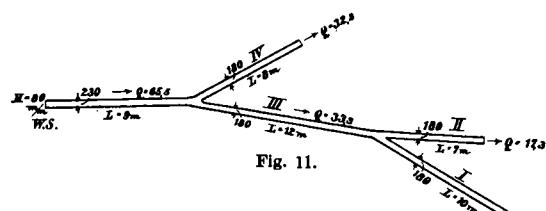


Fig. 11.

tor mit einem Ansaugdruck von 80 mm Wassersäule minutlich 65,5 cbm Luft. Durch Versuch wie durch Rechnung wurde nachgewiesen, daß die Luftpunkte sich auf die den Ventilator entfernt verlegten Zweigrohren, deren Dimensionen in der Zeichnung angeschrieben sind, wie folgt verteilen: pro Minute gingen durch I 16, durch II 17,3 cbm, während durch IV 32,2 cbm strömten. Man sieht nun ohne weiteres ein, daß durch Rohrleitungszweig I eine geringere Menge fließt wie durch II, da Strang I bei gleichem Durchmesser wie II um 43% länger ist. Anders verhält es sich aber, wenn man die Zweigleitungen III und IV miteinander vergleicht. Das Rohr III ist ohne Seitenzweigrohre noch um 50% länger bei gleichem Durchmesser wie das Rohr IV, und dennoch ist die durchfließende Menge bei ihm um 3,5% größer, wie bei IV. Dieser scheinbare Widerspruch ist sofort behoben, wenn man nicht nur die Reibungswiderstände in den Rohren, sondern auch die Ausflußwiderstände in Betracht zieht, welche in diesem Falle die ersten bedeutend überwiegen. Bei den Zweigen I, II und III sind die Mündungswiderstände wegen der doppelten Fläche wesentlich kleiner als bei Strang IV, der diesen Vorsprung nicht durch geringere Länge einzuholen vermag.

Bei Zweigrohren und -kanälen ist darauf hinzuweisen, daß man an der Einmündungsstelle einen Wechsel der Geschwindigkeit zu vermeiden hat, d. h. die Querschnitte der

Rohre und Kanäle den Zu- und Abnahmen der Gasmengen anpaßt; sonst bilden sich an solchen Stellen wirbelnder Bewegung Staubablagerungen, die sich weiter und weiter erstrecken, weil immer folgende Staubteilchen hinter ihnen einen willkommenen Schutz finden.

Bei den Mehrkörperverdampfern wird durch ein längeres und mehrfach geknicktes Rohr der Dampf aus dem Dampfraum des einen Körpers in den Heizraum des nächsten geführt. Häufig legt man zu wenig Wert auf die Formgebung der Ein- und Ausströmungsstellen des Dampfes. Wenn man bedenkt, daß man es mit Geschwindigkeiten bis zu 60 m/sec zu tun hat, so kann man nach dem Vorhergehenden leicht verstehen, daß gerade diese Stellen eine sorgfältige Ausbildung verlangen. Oft genug werden durch diese Übergangsleitungen Druckverluste von 30—40 mm Wassersäule hervorgerufen, die sich bei Einschaltung eines Saftfängers in die Brüdenleitung bis auf das Zehnfache steigern können. Als Beispiel einer guten Ausführung diene Fig. 12, welche eine Überleitung vom Vertikalrohr in die Seitenwand einer Heizkammer eines stehenden Verdampfapparates angibt. Diese Konstruktion soll von dem bekannten Verdampfungstechniker La Baum e hren<sup>11)</sup>. Die Mündung ist ein vertikaler Schlitz so hoch, daß ihn die Kammer gestattet. Dem Schlitz gegenüber soll auch das Rohrbündel dieselbe Öffnung zeigen.

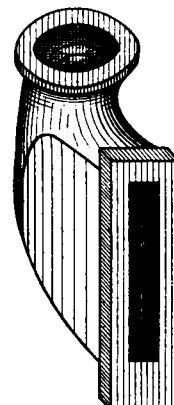


Fig. 12.

## C. Krümmere.

Strömt Gas durch einen Rohrkrümmer, und zwar so, daß es vor dem Eintritt in dem Krümmer sich durch ein gerades Rohr in allen Punkten des Querschnittes mit derselben Geschwindigkeit  $v$  bewegt, so würde es im Krümmer bei reibungloser Bewegung Geschwindigkeiten annehmen, die dem Halbmesser  $r$  des Krümmers umgekehrt proportional sind, so daß  $v = \frac{C}{r}$ , wo  $C = \text{konst}$ . Andererseits ergibt sich aus dem Vorhergehenden, daß die Teile des Gases, welche den Rohrwandungen am nächsten sind, durch die Reibung am meisten gehemmt werden. Beim Krümmer werden nun die durch die Ablenkung der Gasstromfäden erzeugten Zentrifugalkräfte, die dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional sind, für die verschiedenen Gasstromfäden sehr verschiedene Größe haben. Die mit größerer lebendiger Kraft, also auch mit größerer Zentrifugalkraft begabten Gasteilchen in der Mitte des Rohres werden sich nach außen drängen und dadurch die an den Wandungen strömenden Teile nach innen schieben. Es entstehen mithin in den Querschnitten des Krümmers die in Fig. 13 schematisch angedeuteten Sekundärströmungen, die sich natürlich mit den Hauptgeschwindigkeiten des Gases zusammensetzen, so daß die Gasteilchen schraubenähnliche Bahnen beschreiben<sup>12)</sup>.

Dieselben Wirbelscheinungen rufen vielfach beim Austreten der Heizgase aus dem Schornstein eine Zweiteilung der Rauchgase hervor. Der Wind biegt die Rauchgase beim Verlassen des Schornsteins krümmerförmig um; dadurch entstehen die eben besprochenen Sekundärströmungen. Der Rauchstrahl bildet dann zwei mehr oder weniger ausgeprägte im entgegengesetzten Sinne rotierende Strähne<sup>13)</sup>.

Viel weniger noch wie bei geraden Leitungen sind bei den Krümmern die Reibungsscheinungen einer exakten theoretischen Behandlung zugänglich; man ist hier nur auf Erfahrungswerte angewiesen. Nach den allgemeinen Ergeb-

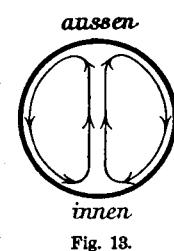


Fig. 13.

<sup>11)</sup> Zentralbl. f. d. Zuckerind. 1911, Nr. 49, „Über die Widerstände in den Rohrleitungen der Verdampfstation und deren Einfluß auf den Gütegrad der Anlage“ von W. Greiner.

<sup>12)</sup> Z. Ver. d. Ing. 1911, 215.

<sup>13)</sup> Verh. Ver. Beförd. d. Gewerbefleiß. 1902, 171

nissen von Weisbach und anderen Forschern kann man den Druckverlust  $H_K$  in einem Rohrkrümmer darstellen durch:

$$H_K = \zeta \frac{\gamma \cdot v^2}{2g}.$$

Für Luft und einen rechtwinkligen Krümmer, dessen mittlerer Radius zwischen dem einfachen und doppelten Rohrdurchmesser liegt, soll  $\zeta = 0,2$  betragen<sup>14)</sup>.

#### IV. Über den Druckverlauf bei senkrechten Gasströmungen und über den Wert von Druckbestimmungen.

Die Druckmessung bei Gasströmungen gibt uns:

A. einen Rückschluß auf die Gasgeschwindigkeit und damit auf die Gasmenge,

B. die Höhe des Über- und Unterdruckes zwecks reiner Druckermittlung; man denke hier etwa an die später zu besprechende Druckmessung oberhalb des Muffelgewölbes des Überdrucksulfatofens oder an die Druckbestimmung bei chemischen Gasreaktionen, welche ein Druckoptimum haben,

C. einen Hinweis hinsichtlich der konstruktiven Durchbildung unserer Apparaturen für Gasströmungen.

A. Hier läge es näher, direkt die Geschwindigkeit im Gasstrom zu messen. Allein schon das einfachste Meßinstrument, das Pitotrohr, würde meistens infolge des Staubgehaltes unserer industriellen Gase nicht verwendbar sein.

Wir sehen uns also mangels geeigneter Geschwindigkeitsmesser gezwungen, zur Feststellung der Geschwindigkeit und damit der Gasmenge Druckmessungen zu machen. Wir eichen unsere Druckmesser, indem wir durch Versuch feststellen, daß, um eine bestimmte Gasmenge durch einen bestimmten Querschnitt unseres zu verfolgenden Prozesses zu schicken, der und der Über- oder Unterdruck herrschen muß. Nach dieser notwendigen Druckhöhe richten wir uns dann bei den täglichen Betriebskontrollen unseres Prozesses. Indessen muß dieser erprobte Druck bei Querschnittsveränderungen im System, also etwa bei Staubablagerungen, variiert werden, wie folgende Überlegung zeigt.

In Figur 14 werde durch ein Rohr  $R_1 R_2$  einmal Gas durchgepreßt, das anderemal durchgesaugt. Die zeichnerische Darstellung der Reibungsströmung liefert nach dem Vorhergehenden das Diagramm in Fig. 14, und zwar das obere für Druck-, das untere für Saugpression.

Durch Staubablagerung soll eine Drosselung in  $R_1 R_2$  entstehen. Diese Drosselung wollen wir in Fig. 15 durch eine Rohrverengung  $R_3 R_4$  darstellen.

Betrachten wir das erste Diagramm, wenn das Gas durch das Rohr gepreßt wird. Der Drosselwiderstand, hervorgerufen durch Ein- und Ausströmungsverluste, Reibung in dem engen Rohre, habe die gezeichnete Größe  $\delta$ . In jedem Querschnitt des Rohres  $R_1 R_2$  wird infolge des vorgeschalteten Widerstandes der statische Druck um  $\frac{\delta}{2}$  erhöht und der dynamische um  $\frac{\delta}{2}$  verringert werden; denn dann ist die Gesamtenergie hier

$$p_{R_1 R_2} = p_{st} + \frac{\delta}{2} + p_{dyn} - \frac{\delta}{2} = p_{st} + p_{dyn}.$$

Als Darstellung von statischem und dynamischem Druck erhalten wir für  $R_1 R_2$  die Linien  $e' b'$  und  $E' D'$ .

In Rohrstück  $R_2 R_3$ , also hinter dem Widerstand, hat die Gesamtenergie um  $\delta$  abgenommen. Das Gesetz der Kontinuität der Strömung verlangt, daß  $p_{dyn}$  in  $R_2 R_3$  denselben Wert hat, wie in  $R_1 R_2$ , also  $p_{dyn} - \frac{\delta}{2}$ . Da hier  $p_{dyn}$  um  $\frac{\delta}{2}$  abgenommen hat, so muß auch  $p_{st}$  sich um  $\frac{\delta}{2}$  verringern,

<sup>14)</sup> In meinem Vortrage bin ich dann auf die Messung von Druck und Geschwindigkeit bei strömenden Gasen näher eingegangen; hier sei nur erwähnt, daß bei Gasleitungen mit geringen Querschnitten eine Messung von statischem oder dynamischem Druck in der Leitung selbst mit zu vielen Fehlern behaftet ist. Eine sichere Bestimmung der Geschwindigkeit der strömenden Gase liefert die Ermittlung der Ausströmungsgeschwindigkeit mittels der Reaktionsdruckmessung.

denn dann ist für  $R_2 R_3$  wie verlangt

$$p_{R_2 R_3} = p_{st} - \frac{\delta}{2} + p_{dyn} - \frac{\delta}{2} = p_{st} + p_{dyn} - \delta.$$

Als Darstellung des statischen und dynamischen Druckverlaufes ergibt sich für  $R_2 R_3$  die Linie  $a' f'$  und  $C' F'$ .

Auf Grund derselben Überlegung folgt für den Fall, daß das Gas durchgesaugt wird (das untere Diagramm in Fig. 15) in  $R_1 R_4$  als statischer Druckverlauf  $e' b'$ , als dynamischer  $E' D'$ , in  $R_2 R_3$   $a' f'$  als statischer und  $C' F'$  als dynamischer Druckverlauf.

Bei dem durchgesaugten Gas hatten wir, bevor die Drosselung einsetzte, für die Betriebskontrolle etwa der Feuerung irgendeiner Ofenanlage, in  $A$  den Unterdruck  $Aa$  zugrunde gelegt. Nach erfolgter Drosselung, die aber äußerlich nicht wahrnehmbar ist, findet sich an dem sog. Zugmesser der vermehrte Unterdruck  $Aa'$ . Der Schluß, daß dieser stärkere Unterdruck durch zu große Öffnung des Abschlußschiebers der Feuergase oder bei derselben Schieberstellung durch erhöhten Kaminzug oder durch verschlacktes Feuer entstanden sei, wäre samt den hiernach zu treffenden Maßregeln zur Herbeiführung des Normalunterdruckes  $Aa$  falsch. Um dieselbe Gasmenge durch die Ofenanlage durchzuleiten,

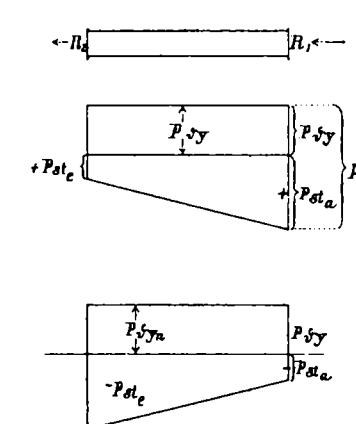


Fig. 14.

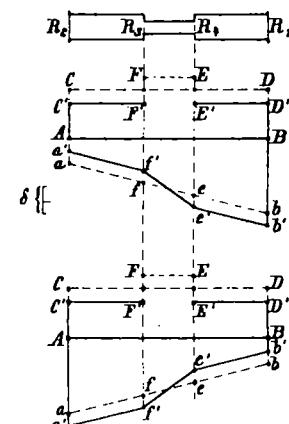


Fig. 15.

darf man die Regulierung des Gasabzugschiebers überhaupt nicht mehr nach dem normalen Betriebsdruck vornehmen, sondern muß durch vermehrte Schieberöffnung einen Unterdruck  $> Aa'$  einstellen.

Hieraus folgt, daß man bei Druckmessungen nur mit Vorsicht Rückschlüsse auf die Gasmenge machen und die Druckmessung nicht auf eine Stelle beschränken soll.

B. Hier wie auch bei C hat man sich Klarheit zu verschaffen, wie der Druckverlauf bei senkrechten Gasströmungen erfolgt. Wir werden sehen, daß der Druckverlauf bei dieser Strömung nicht durch die Reibung allein beeinflußt wird.

Natürlich handelt es sich um die Feststellung des relativen Druckverlaufes, da wir in der Technik den Druck des Gases auf den Atmosphärendruck beziehen, also von Über- oder Unterdruck sprechen, je nachdem der Gasdruck größer oder kleiner als der Atmosphärendruck ist. Den Unterdruck nennt man in der Technik meistens mit einer unglücklich gewählten Bezeichnung „Zug“.

Wir nehmen zunächst an, daß das Gas in einem Gasbehälter von der Höhe  $h$  eingeschlossen sei, sich also vorläufig in Ruhe befindet<sup>15)</sup>. Dabei soll sein

g das Gewicht des Gases pro cbm } l und g = konst. für  
l das Gewicht der Luft pro cbm } jede Höhe  
b der Atmosphärendruck am Boden des Gasbehälters,  
p der absolute Gasdruck am Boden des Gasbehälters.

Wir können 4 Fälle unterscheiden:

1. Überdruck des Gases am Boden des Gasbehälters und  $l > g$ .

<sup>15)</sup> Die Grundlagen zu dieser Überlegung sind dem Aufsatze R. N ö r r e n b e r g: „Studien über die Bewegung von Gasen bei chemischen Prozessen,“ Chem. Industr. 1899, entnommen.

Der Überdruck des Gases am Boden des Gasbehälters ist  $p - b = \Delta$ .

An der Decke des Gasbehälters ist der absolute Gasdruck  $p - gh$ .

Der Druck der Luft ist hier  $b - hl$ .

Folglich ist der Überdruck des Gases an der Decke  $p - gh - (b - hl) = p - b + hl - g = \Delta + hl - g$ .

Gibt man diese Überlegung an Hand eines Schaubildes wieder (Fig. 16), so sieht man, daß der Überdruck des Gases mit steigender Höhe wächst.

Beispiel: Druckverlauf im Gloverturm einer Schwefelsäureanlage, welche mit natürlichem Auftrieb arbeitet.

2. Überdruck des Gases am Boden des Gasbehälters und  $l < g$ .

Wie das Schaubild, Fig. 17, zeigt, nimmt der Überdruck mit steigender Höhe ab. Wird das Schaubild, Fig. 17, in etwas veränderter Größenanordnung in Fig. 18 wiedergegeben.

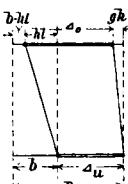


Fig. 16.

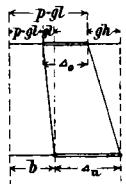


Fig. 17.

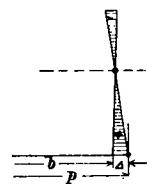


Fig. 18.

geben, so sieht man, daß die Gas- und atmosphärische Drucklinie sich in einem Punkte schneiden und von hier aus divergieren. In dem Schnittpunkte wird demnach der Überdruck gleich Null sein. Man nennt die durch diesen Nullpunkt gelegte Linie die neutrale Linie oder die Nullpunktlinie.

Da unterhalb der neutralen Linie das von den beiden Drucklinien eingeschlossene Gebiet Überdruck aufwies, so muß nach dem Durchgang durch den Nullpunkt die von den beiden Drucklinien begrenzte Fläche ein Gebiet negativen Druckes sein. Die Differenzdrücke stellen also Unterdruck dar, wie auch aus folgendem hervorgeht:

Vor dem Nullpunkt ist  $p - b = + \Delta$ , da  $p > b$ .

Hinter dem Nullpunkt ist  $p - b = - \Delta$ , da  $p < b$ .

Beispiel: Druckverlauf in dem Heizgassystem eines Sulfatofens, dessen Feuerung mittels der Kombination Preßluft und Kaminzug arbeitet.

3. Unterdruck am Fuße des Gasbehälters und  $l > g$ .

Der Unterdruck am Boden des Behälters ist  $b - p = \Delta_\mu$ .

Der Unterdruck an der Decke des Behälters ist

$$b - p - hl - g = \Delta_\mu - hl - g.$$

Es wird somit die Druckdifferenz  $\Delta_\mu$  von unten nach oben abnehmen, wie auch Fig. 19 zeigt. Auch hier bekommt

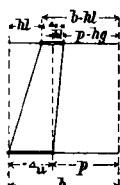


Fig. 19.

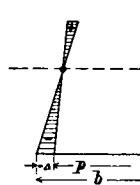


Fig. 20.

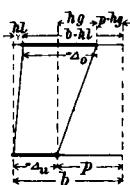


Fig. 21.

man einen Nullpunkt und damit einen Übergang von Unter- zu Überdruck, Fig. 20.

Beispiel: Druckverlauf im Heizgassystem eines Sulfatofens mit Deaconfeuerung, ferner im Röstofen und in der Staubkammer einer Schwefelsäureanlage, welche den Auftrieb als Gasbeförderungsmittel benutzt.

4. Unterdruck am Fuße des Gasbehälters und  $l < g$ .

In diesem Falle nimmt gemäß Fig. 21 der Unterdruck  $\Delta$  vom Boden des Gasbehälters nach oben hin zu.

Beispiel: Verlauf des Unterdruckes beim Heizgassystem eines gewöhnlichen Sulfatmuffelofens.

### Anwendungen.

#### Druckverlauf in einem Schornstein.

Der in Fig. 22 skizzierte Schornstein von 120 m Höhe soll mit einer warmen Gassäule von gleichmäßig  $150^\circ$  an-

gefüllt sein. Zunächst soll die Gassäule sich in Ruhe befinden, indem wir den Schornstein unten durch eine Klappe verschlossen halten. Im Diagramm, Fig. 22, konstruieren wir uns die atmosphärische Drucklinie  $AC'$ , indem wir von der vereinfachenden Annahme ausgehen, daß das Gewicht von 1 cbm Luft bis zu 120 m Höhe konstant bleibt. Bei einer Temperatur von  $0^\circ$  und einem atmosphärischen Druck von 745 mm Hg = 9800 mm W. S. am Fuße des Kamins ist das Gewicht von 1 cbm Luft:

$$h = \frac{p \times v}{RT} = \frac{9800 \times 1}{29.4 \times 273} = 1.2 \text{ mm W. S.},$$

so daß pro Meter Höhenlage der Luftdruck um 1.2 mm W. S. abnimmt.

Messen wir bei der ruhenden Gassäule den Druckunterschied oder den sog. Auftrieb, so findet sich, daß er unten seinen größten Wert  $AB'$  hat, begrenzt von den beiden Drucklinien  $AC'$  und  $B'C'$  entsprechend der Höhe abnimmt, und am Kopfe des Kamins Null ist.

Wenn sich die Gase jetzt in stationärer Strömung durch den Schornstein bewegen sollen, so hat der Auftrieb zwei Funktionen zu verrichten, indem er 1. die Reibungswiderstände, welche wir durch den statischen Druck messen, im Schornstein überwinden, 2. den Gasen eine bestimmte Geschwindigkeit verleihen muß. Angenommen, es sei  $AB$  der statische und  $BB'$  der dynamische Druck am Fuße des Schornsteines, so wird der Druckverlauf von den Linien  $AC'$

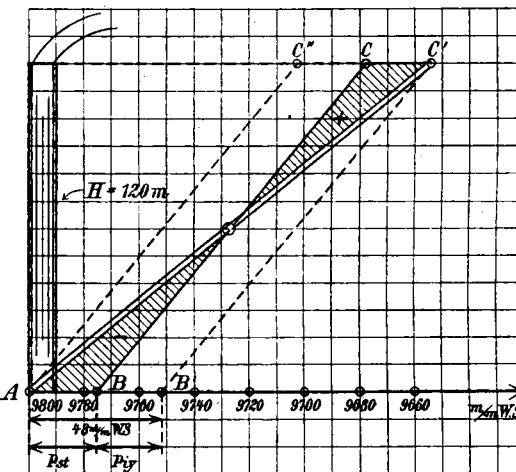


Fig. 22.

und  $BC$  begrenzt, indem sich die Drucklinie des ruhenden Gases  $B'C'$  um die dynamische Druckhöhe  $BB'$  verschiebt, so daß  $BC \parallel B'C'$  wird.

Wir erhalten somit im Schornstein eine negative und positive Zone des Relativdruckes und natürlich auch eine Nulllinie<sup>18</sup>). Mit wechselndem Auftrieb, der abhängig ist von der Temperatur und Zusammensetzung der Gassäule, von dem Winddruck an der Mündung des Kamins, wandert die neutrale Linie durch den Schornstein.

Hinsichtlich des Druckverlaufes können wir zwei Grenzfälle unterscheiden, 1. den idealen Fall der reibungsfreien Strömung, wobei sich der Unterdruck  $AB$  am Fuße des Kamins in Geschwindigkeit umsetzen würde, so daß jetzt  $AB'$  den dynamischen Druck angibt; 2. daß durch senkrechten Winddruck die Schornsteingase am Ausströmen verhindert würden. Dann entsteht Überdruck im Kamin; die Gasdrucklinie verlegt sich nach  $AC''$ . Der Überdruck wird durch die Linien  $AC''$  und  $AC'$  begrenzt. Er ist am Fuße des Kamins Null und hat an dessen Mündung den größten Wert  $C''C' = AB'$ .

#### Druckverlauf in den Heizgaskanälen bei Sulfatmuffelöfen.

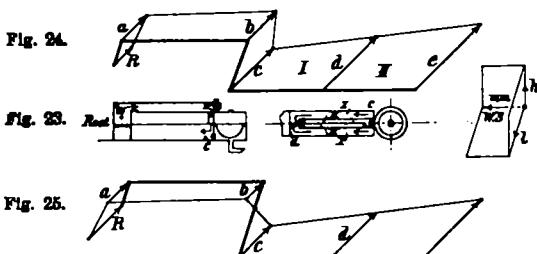
Fig. 23 zeigt schematisch die Anordnung der Heizgasführung in einem Sulfatmuffelofen für Handbetrieb. Die

<sup>18)</sup> D. h. für die Darstellung auf den Querschnitt bezogen, in Wirklichkeit ist die neutrale Zone eine Fläche.

Heizgase umspülen zunächst das Muffelgewölbe, fallen durch zwei Kanäle senkrecht nach unten dem Herde zu, beheizen den Herd, indem sie in Teilströmen in je zwei Kanäle unter der Herdsohle durchziehen und gehen, nachdem sie die Sulfatpfanne, in welcher die Reaktion bis zur Bisulfatbildung vor sich geht, erwärmt haben, dem Schornstein zu.

Den Druckverlauf in einem Vertikalschnitt des Heizgassystems bis zum Eintritt in den Pfannenraum zeigt Fig. 24. In dem Druckdiagramm sind die Unterherdkanäle II, II als geradlinige Fortsetzung der Kanäle I, I gedacht. Zur Darstellung des Druckverlaufes mußte infolge der drei Veränderlichen, Druck, Länge und Höhe ein dreiachsiges Koordinatensystem angewandt werden; auf der X-Achse wird der Druck in Millimetern Wassersäule, auf der Y-Achse die Höhe und auf der Z-Achse die Länge des Heizgassystems in irgendeinem Maßstab aufgetragen. (Entsprechend den drei gezeichneten Ebenen hat man sich das Druckdiagramm senkrecht zur Bildebene, also um  $90^\circ$  gedreht, vorzustellen.) Die atmosphärische Drucklinie ist, wie auch in den folgenden Figuren, doppelt ausgezogen. Der Unterdruck wurde an den Punkten *R*, *a*, *b*, *c*, *d*, *e* gemessen und in das Druckdiagramm eingetragen. Verbindet man die Endpunkte der Drucke an diesen Stellen miteinander, so ergibt sich das Druckdiagramm *Rabcde* des Heizgassystems.

Zur sofortigen Orientierung, ob Unter- oder Überdruck in den verschiedenen Teilen des Systems herrscht, sind die eingezeichneten Differenzdrucke mit einer Pfeilspitze versehen. Weist die Pfeilspitze gegen die Gasdrucklinie, so drückt die Atmosphäre gegen das Gas, es herrscht Unterdruck im System, zeigt die Spitze gegen die atmosphärische Linie, so herrscht Überdruck an der betreffenden Stelle.



Nun hat sich bei den Sulfatöfen dieser Art gezeigt, daß, da außerhalb der Muffel ein größerer Unterdruck als innerhalb herrscht, die Chlorwasserstoffgase bei Undichtheiten des Muffelgewölbes nach den Heizgasen zu entweichen und so HCl-Verluste entstehen. Schon in den achtziger Jahren der vorigen Jahrhunderts kam man auf den naheliegenden Gedanken, oberhalb der Muffel einen größeren Druck zu erzeugen, als wie in der Muffel herrscht. Da man in der Muffel einen Druck von 0 bis  $-3$  mm W. S. hat, so bedarf es bloß eines Überdruckes von  $1-2$  mm W. S., um den beabsichtigten Zweck zu erreichen. Den Überdruck oberhalb der Muffel hat man auf zwei verschiedene Wege erzielt, wobei allerdings wirtschaftliche und technische Wirkung in beiden Fällen nicht Hand in Hand gehen. So hat man

1. der Verbrennungsluft vor ihrem Eintritt in das Ofensystem auf mechanischem Wege einen Überdruck verliehen, bedient sich jedoch noch immer, wenn auch in geringerem Maße wie vorhin der Saugkraft des Schornsteines. Fig. 25 gibt das Druckdiagramm der Heizgase in den Feuerungskanälen des mit Preßluft betriebenen Sulfatofens wieder. Man sieht, wie oberhalb der Muffel Überdruck herrscht, der beim Durchgang der Gase durch die senkrechten Kanäle in Unterdruck übergeht, welchen die Gase bis zum Kamin behalten.

2. den Rost etwa 3 m unterhalb der Feuerbrücke gelegt und erzielt infolge des vermehrten Auftriebes jetzt Überdruck oberhalb der Muffel. Das Prinzip dieses Vorganges erläutert Fig. 26. Es sei *AB* die atmosphärische Drucklinie. Der Rost liege mit der Erdoberkante gleich. *CB* stelle die Gasdrucklinie dar. Man sieht, wie die Heizgase die Mitte des Raumes oberhalb der Muffel mit Unterdruck antreffen. Legt man jetzt den Rost in *A'C'*, also unterhalb der Erdoberkante, so erreichen, wie verlangt, die Heizgase den erwähnten Raum mit Überdruck.

Dementsprechend gibt Fig. 27 des Druckdiagrammes die Heizgase für den Sulfatofen mit tiefliegender, sog. Deacon-

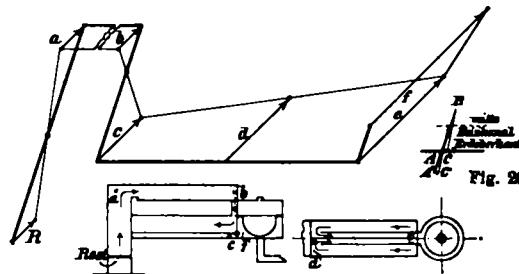


Fig. 27.

feuerung. Von den beiden Nullpunkten liegt der erste zwischen Rost und Feuerbrücke, der zweite in den senkrechten Kanälen, die oberhalb der Muffel zur Unterseite des Herdes führen.

#### Druckverlauf in einem Schwefelsäurebleikammerystem.

Fig. 28 zeigt eine Skizze der Schwefelsäureanlage<sup>17)</sup>. In den Punkten *a b c* ..... *m* wurde der Druck gemessen und dem Diagramm Fig. 29 zugrunde gelegt. Der Druckverlauf im Röstofen, in der Staubkammer und in dem Kanal zum Glover wurde, da hier keine Druckmessungen vorlagen, nach angenommenen Differenzdrucken eingetragen. Die

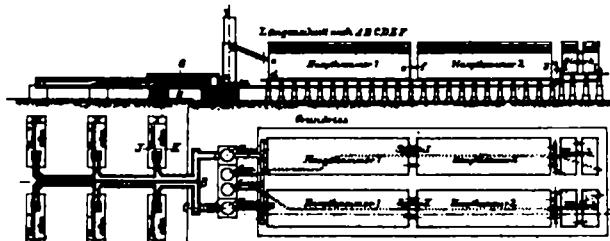


Fig. 28.

schräge Leitung der Gase von *b* nach *c* ist für das Diagramm in eine senkrechte und wagerechte zerlegt; ebenso ist die Leitung von der Hinterkammer nach dem Gay-Lussac behandelt. Man sieht, wie unter den vorliegenden Verhältnissen sich drei neutrale Punkte ergeben, der erste in der Staubkammer, der zweite in der Gasleitung von der zweiten Hinterkammer zum Gay-Lussac und der dritte im Gay-Lussac selbst. Auf den vorhin erwähnten Druckverlauf im Glover sei hingewiesen.

Es ist einleuchtend, daß die Drucklinien in Wirklichkeit nicht stets mit der Regelmäßigkeit verlaufen, wie hier gezeichnet; insbesonders werden Drucksprünge bei den durch Staubablagerungen hervorgerufenen Querschnittsverengungen, sowie bei Umkehr und Ablenkung der Strömungsrichtung entstehen. Änderung der Zusammensetzung, der Temperatur der Gase und der Luft, Staubansammlungen und Winddruck beeinflussen fortwährend den Druckverlauf der Gasströmungen.

C. Druck- und Zugmessungen werden in der Technik angestellt, um hieraus Folgerungen auf konstruktive Einrichtung bzw. Verbesserung unserer Apparaturen für Gasströmungen zu ziehen. Wie leicht hier Fehler beim Entwurf derartiger Anlagen gemacht werden, soll an einem wenn auch nicht der chemischen Industrie<sup>18)</sup> entnommenen, praktischen Beispiele gezeigt werden.

<sup>17)</sup> Chem. Industr. 1899, 46.

<sup>18)</sup> In unserer chemischen Literatur ist die Nutzanwendung solcher Messungen bisher wenig gezogen worden. Als einziger mir be-

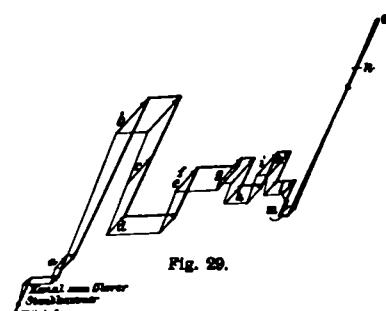


Fig. 29.

Für eine weit ausgedehnte Holzbearbeitungsstätte wurde eine Entstaubungsanlage eingerichtet. Bei dieser Einrichtung glaubte man alle erdenkliche Sorgfalt angewandt zu haben, denn man war sich darüber klar, daß ein Transport so verschiedenartigen Materials, wie Hobel-, Säge- und Fräserspäne durch den Luftstrom manche Schwierigkeiten bereiten würde. Bei der Inbetriebsetzung zeigte sich, daß trotz aller Vorsicht Störungen ganz eigener Art vorkamen, und der nötige Kraftaufwand den veranschlagten erheblich überstieg. Sorgfältige Untersuchungen über die Vorgänge in den Rohrleitungen, von Prof. Prandtl, Göttingen, ausgeführt, zeigten die Ursachen der Unzulänglichkeit in klarster Form. Es wurde ein Umbau, fast ein Neubau der Leitungen vorgenommen mit dem Ergebnis einer tadellosen Leistung in Verbindung mit einem Rückgang des Kraftbedarfes auf 37% des bisherigen. [A. 130.]

## Über das Verhalten der Cellulose gegen reine Salpetersäure. II.<sup>1)</sup>

Von C. HAEUSSERMANN.

(Eingeg. 14.7. 1913.)

Wie die Baumwolle wird auch der Sulfitzellstoff durch kalte hochkonzentrierte Salpetersäuren ohne erhebliche Strukturänderung in mehr oder weniger stickstoffreiche Produkte übergeführt.

So gelangt man beispielsweise mittels Säure von 1,495 spez. Gew. zu einem Produkt, das 11,1% und mittels Säure von 1,48 spez. Gew. bei 3—4tägiger Einwirkungsdauer zu einem solchen, das 9,6% Stickstoff enthält.

Bleibt der Sulfitzellstoff mit sehr viel überschüssiger Säure in Berührung, so geht er selbst bei gewöhnlicher Temperatur im Verlauf einiger Monate so gut wie vollständig in säure- und wasserlösliche Substanzen über.

Beim Eintragen in kalte Salpetersäure von 1,47 spez. Gew. quillt der Sulfitzellstoff, falls er vorher in einzelne Fäserchen zerteilt worden ist, wie lose Baumwolle sofort auf und liefert bei Verwendung der 100—150fachen Säuremenge eine sirupöse Flüssigkeit, aus der beim Eingießen in Wasser weiße, 8,0% Stickstoff enthaltende Flocken ausfallen.

Etwas weniger stark quellend wirkt Säure von 1,46 spez. Gew., die zu einem Produkt mit 7,5% Stickstoff führt, während die Struktur der Zellstofffasern durch Säure von 1,4 spez. Gew. unter Bildung eines Produktes mit höchstens 2,3% gebundenem Stickstoff nur ganz allmählich alteriert wird.

Beim Erwärmen mit konzentrierten Säuren löst sich der Sulfitzellstoff rasch auf und derartige Lösungen scheiden, wenn sie ohne Verzug in kaltes Wasser gegossen werden, amorphe Nitrocellulosen aus, die in Alkoholäther nur teilweise löslich sind.

Im Anschluß hieran ist auch das Verhalten von aus Baumwolle (Verbandwatte) und von aus Sulfitzellstoff gewonnenen Hydrocellulosen gegen konz. Salpetersäuren untersucht worden.

Zwecks vollständiger Umwandlung in Hydrocellulose wurde die Baumwolle in kalter Salpetersäure von 1,1 spez. Gew. untergetaucht und mit der Säure ca. 1 Jahr lang bei Zimmertemperatur in Berührung gelassen. Dann wurde das Fasermaterial von der Flüssigkeit getrennt<sup>2)</sup>, durch Behandeln mit kaltem, sowie mit heißem Wasser vollkommen entsäuerst und im noch feuchten Zustand in einer Porzellanschale zu einem gleichförmigen Brei zerrieben, der sich beinahe restlos durch ein engmaschiges Drahtsieb hin-

kannte wertvolle Arbeit in dieser Hinsicht sei der erwähnte Nörenberg'sche Aufsatz: „Studien über die Bewegung von Gasen bei chemischen Prozessen“ genannt, wo an Hand von Druck- und Zugmessungen schätzenswerte Anhaltspunkte für den Bau von Bleikamersystemen gegeben werden.

Hingewiesen sei auch auf die ebenfalls derartige Messungen behandelnde schöne Arbeit von Prof. Mayer-Aachen: „Die Wärmetechnik des Siemens-Martinofen“ (Erschienen 1909 bei W. Knapp, Halle a. S.)

<sup>1)</sup> Angew. Chem. 23, 1761 (1910).

<sup>2)</sup> Nach dem Übersättigen mit Alkali reduzierte die Flüssigkeit Fehlingsche Lösung in der Wärme.

durchtreiben ließ. Nach dem Absaugen des Wassers und nach dem Trocknen bei 90—95° resultierte ein feines, weißes Pulver, das unter dem Mikroskop die für die Girardsche Hydrocellulose charakteristischen Formen zeigte und sich als frei von Nitratstickstoff erwies.

In der Kälte wirken Salpetersäuren von 1,5, 1,485, 1,48 und 1,4 spez. Gew. nur wenig lösend auf dieses Präparat und liefern Nitrohydrocellulosen, die 13,0 bzw. 9,5 bzw. 8,9 bzw. 2,3% gebundenen Stickstoff enthalten. Erwärmst man die Hydrocellulose mit Säure von 1,4 spez. Gewicht und darüber, so geht sie rasch in Lösung.

Die für die Nitrierversuche erforderliche Zellstoffhydrocellulose wurde in derselben Weise wie die Baumwollhydrocellulose unter Verwendung von noch wasserhaltendem, zuvor nicht getrocknetem Sulfitzellstoff hergestellt und nach dem schließlichen Zerkleinern mit Hilfe einer Porzellankugelmühle in Form eines weißen, der Hauptmenge nach aus sehr kurzen mikroskopischen Fäserchen bestehenden Pulvers erhalten, das sich wie die Girardsche Hydrocellulose in kalter 10%iger Natronlauge teilweise löst<sup>3)</sup>.

Die aus Proben dieses Pulvers mittels Säure von 1,495, 1,48, 1,45 und 1,4 spez. Gew. gewonnenen Präparate enthielten 11,2, 8,8, 6,6 bzw. 2,1% gebundenen Stickstoff und verhielten sich gegen Lösungsmittel annähernd ebenso wie aus Baumwolle erzeugte Nitrocellulosen von gleichem Stickstoffgehalt. Doch lösten sich weder die hochnitrierten Hydrocellulosen, noch der hochnitrierte Zellstoff rückstandslos in Aceton auf.

Schließlich ist noch die in der ersten Abhandlung enthaltene Angabe, Baumwolle werde durch Salpetersäuren von 1,48—1,50 spez. Gew. innerhalb 24 Stunden in Pyroxyline mit 9—12,5% Stickstoff umgewandelt, dahin zu ergänzen, daß zur vollständigen Nitrierung durch Säuren von 1,49—1,48 spez. Gew. ein etwas längerer Zeitraum erforderlich ist und daß insbesondere Säure von 1,48 spez. Gewicht erst nach mehrwöchentlicher Einwirkungsdauer zu einem Präparat mit dem maximalen Gehalt von 9,5% Stickstoff führt. [A. 143.]

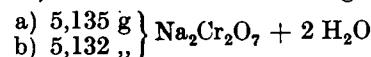
## Über die Löslichkeit des Natriumdichromats in Alkohol.

Von B. REINITZER.

(Eingeg. 29.7. 1913.)

Das Kaliumdichromat ist in Alkohol unlöslich. Es ist daher überraschend, daß sowohl das Natron- als Ammoniumsalz sich in Alkohol ziemlich leicht lösen.

Als ein Überschuß des krystallisierten Natriumsalzes  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 2 \text{H}_2\text{O}$  mit absolutem Alkohol von 19,4° durch 10 Minuten geschüttelt worden war, zeigte die filtrierte Lösung eine Dichte von 0,8373, und zwei Chrombestimmungen ergaben, daß 100 ccm der Lösung



enthielten. Die Lösung zersetzt sich schon nach wenigen Minuten unter Trübung und Abscheidung eines braunen Niederschlags, während die Flüssigkeit nach einiger Zeit Aldehydgeruch annimmt. Die angegebenen Zahlen sind daher auch nur als vorläufige, annähernd richtige zu betrachten. Genaue Bestimmungen, auch über die Löslichkeit des wasserfreien Salzes, das ebenfalls beträchtlich zu orangegelber Flüssigkeit löslich ist, werden folgen. Die Lösung der Natrium- und Ammoniumsalze der Chromsäure in Alkohol dürften als Oxydationsmittel für die organische Chemie von Bedeutung sein. Auch eine Trennung des Kalium- und Natriumsalzes durch Alkohol scheint möglich zu sein. — Auch das Magnesiumsalz scheint eine wenn auch nur geringe Löslichkeit in Alkohol zu besitzen. Genaue Angaben über diese Verhältnisse werden demnächst folgen.

Graz, im Juli 1913.

Chemisches Institut für anorgan.-chem. Technologie d. K. K. technischen Hochschule Graz.

<sup>3)</sup> Die Lösung färbt sich beim Kochen gleichfalls gelb.