

Sektion veranlaßten vergleichenden Untersuchungen, welche auch Herr Gulden in seinem Artikel erwähnt, haben wenigstens gezeigt, daß die Hauptpulvermenge, wenn im übrigen keine Fehler gemacht werden, das Resultat kaum beeinflußt. Wie erwähnt, halte ich es trotzdem für zweckmäßig, daß die Hauptpulvermenge festgelegt wird. In diesem Punkte befinde ich mich also auch in Übereinstimmung mit Herrn Gulden; ich halte jedoch die Beweisführung, die er zur Begründung dieser Forderung heranzieht, nicht für richtig, was aber in Anbetracht der Tatsache, daß Herr Gulden kein Chemiker ist, entschuldbar ist.

Zum Schluß möchte ich noch auf eine Tatsache zurückkommen, welche Herr Gulden in seinem Artikel ebenfalls anführt, und welche leicht Anlaß zu Mißverständnissen führen kann. Herr Gulden erwähnt, daß der „Verein deutscher Farbstoff- u. Gerbstoff-Extrakt-Fabrikanten“ kürzlich den Beschluß gefaßt hat, daß die zu gebenden Garantien von Extrakten wesentlich einzuschränken sind, und daß auf Grund von Analysen der Deutschen Versuchsanstalt für Lederindustrie bei flüssigen und teigförmigen Extrakten ein Mindergehalt von 3 % und bei festen Extrakten ein solcher von 4 % nicht zu Reklamationen Veranlassung geben darf, während bei anderen Laboratorien, deren Analysen von dem genannten Verein ebenfalls anerkannt werden, diese Zahlen mit 2, bzw. 3 % festgelegt sind. Es soll an dieser Stelle nicht in eine Erörterung darüber eingegangen werden, daß diese Zahlen ziemlich hoch angenommen worden sind; ich möchte aber hervorheben, daß diese verschiedene Bemessung bei denjenigen, welche den wirklichen Sachverhalt nicht kennen, den Glauben erwecken kann, als ob die Analysen der Versuchsanstalt weniger genau seien. Wie mir von seiten eines Vertreters dieses Vereins auf mein Befragen ausdrücklich versichert worden ist, liegt dem Beschlusse in der obigen Form folgende Tatsache zugrunde: Nach den Erfahrungen des genannten Vereins fallen bei den Analysen von Extrakten durch die Versuchsanstalt die Gerbstoffgehalte häufig um ca. 1 % niedriger aus, als bei einigen anderen Laboratorien. Diese Differenzen sind, wie ich auch an dieser Stelle hervorheben möchte, darin begründet, daß die Versuchsanstalt großen Wert darauf legt, daß zur Analyse nur vollständig klare Filtrate verwendet werden, damit nicht Stoffe, welche unlöslich sind, und in der Lösung in fein verteilter Form sich vorfinden, als gerbende Substanzen bestimmt werden. Auf diese Weise ergeben sich allerdings Gerb-

stoffgehalte, welche mitunter niedriger als die anderer Laboratorien sind. Da die Vorschrift besteht, daß die Lösungen vollständig klar sind, so halte ich in solchen Fällen die niedrigeren für diejenigen, welche den Vereinbarungen entsprechen.

Prinzipien der Gasscheidung durch Zentrifugalkraft.

VON G. BREDIG UND F. HABER.

(Mitgeteilt von F. Haber.)

(Eingeg. d. 8./1. 1904.)

1. Einleitung.

Seit zwei Jahren treten in technischen Zeitschriften Nachrichten über die großen Erfolge auf, welche Herr E. N. Mazza mit einem Apparate erzielt, in welchem er Gase durch Zentrifugalkraft scheidet. Auf die Mängel der bezüglichen Angaben ist wohl im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung alsbald¹⁾ hingewiesen worden, aber Herr Vittorio Calzavara, der technische Direktor der venetianischen Gas- und Elektrizitätsgesellschaft und Leiter der Zeitschrift „Il Gaz“, hat danach dem Kongreß Deutscher Gas- und Wasserfachmänner in Zürich 1903 einen Bericht vorgelegt, welcher die außerordentlichen Erfolge des Apparates nachdrücklich betont. Der Bericht führt das Zeugnis zweier Gelehrten an, welche die Anreicherung des Sauerstoffes in der mit diesem Apparat zentrifugierten Luft festgestellt haben sollen, und bringt Angaben über eine erstaunliche Kohleersparnis, welche in der Praxis mehrerer bedeutenden Fabriken durch Benutzung der zentrifugierten und dadurch an Sauerstoff angereicherten Luft erzielt worden ist. Die italienische Regierung hat den Apparat prüfen lassen, und das deutsche Patentamt hat das gleiche getan. Herr Calzavara berichtet, daß beide Prüfungen zum Vorteil des Mazzaschen Gasscheiders ausgefallen sind: Das italienische Marine-Ministerium hat einen solchen Apparat gekauft, das deutsche Patentamt ein D. R. P. (139210) darauf erteilt²⁾. Inzwischen haben die Herren G. Claude und E. Demoussy wissenschaftliche Versuche über den Gegenstand gemacht, deren Ergebnis³⁾ durchaus zu Ungunsten der Sache ausgefallen ist. Aber Herr Goffi⁴⁾, der technischer Leiter der italienischen Gasgesellschaft in Turin, tritt demgegenüber mit neuem Nachdruck und

¹⁾ März 1902, 9, 155.

²⁾ Das D. R. P. 139210 handelt nicht im speziellen von der Luftsecheidung.

³⁾ Claude und Demoussy Compt. r. d. Acad. d. sciences vom 27. Juli 1903, 250.

⁴⁾ J. de l'éclairage au gaz 20. Sept. 1903, 290.

neuen Zeugnissen aus der Dampfkesselpraxis für Herrn E. M. Mazzas Gasscheider ein, und in einem redaktionellen Artikel sucht das *Journal de l'éclairage au gaz*⁵⁾ die Versuche der Herren G. Claude und E. Demoussy mit wunderlichen atomtheoretischen Betrachtungen zu widerlegen, deren Wiedergabe füglich unterbleiben kann.

Bei dem ausgebreiteten Interesse, das der Gegenstand gefunden hat, wird man nicht ohne Befremden konstatieren, daß sich die Beteiligten anscheinend sämtlich in Unkenntnis der physikochemischen Grundlagen befinden, welche für jede Gasscheidung durch Zentrifugalkraft gelten. Ist doch einzig in einer neueren kritischen Betrachtung der Materie im *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*⁶⁾ der Tatsache gedacht, daß G. Bredig schon 1895 im Laboratorium von van t'Hoff die partielle Scheidung eines hälftigen Gemisches von Jodwasserstoffgas und Wasserstoffgas durch die Zentrifugalkraft theoretisch und experimentell erfolgreich behandelt, an der Hand einer von Des Coudres entwickelten Differentialgleichung den entstehenden Effekt der Zentrifugalkraft quantitativ auf thermodynamischem Wege berechnet und die berechnete Wirkung experimentell bestätigt gefunden hat⁷⁾. Die Kenntnis dieser in einer bekannten Zeitschrift veröffentlichten Bredigschen Versuche hätte voraussichtlich genügt, um Herrn Mazza zu überzeugen, daß seine Idee nicht neu, die Möglichkeit der Gasscheidung durch die Zentrifuge der Verwirklichung fähig, seine Hilfsmittel aber zugleich durchaus ungeeignet sind, um bei der Luft dieses Resultat in technisch nützlicher Art zu erreichen.

Wir haben nun über die Frage der Gasscheidung einzeln weitere Überlegungen theoretischer und technischer Natur angestellt, deren Austausch eine volle Übereinstimmung in den theoretischen und technischen Folgerungen ergeben hat. Bei der vielfältigen Beachtung, die das Mazzasche Vorgehen in technischen Kreisen gefunden hat, halten wir die Mitteilung dieser Überlegungen für angezeigt.

Wir haben zunächst noch zu bemerken, daß die zahlenmäßigen Belege für die Leistung des Mazzaschen Gasscheiders die dürtigsten sind. Aus der dem Bericht von Calzavara und dem angezogenen Aufsatz des *Journal de l'éclairage au gaz* beigefügten Abbildung ersieht man, daß er eine liegende Zentrifugalpumpe ist, die nach der Zeichnung einen

Zylinder von 1,460 m Durchmesser und 1,1 m Länge bildet. Während nun Herr Calzavara in undeutlichen Wendungen im Texte sagt, daß man die besten Resultate bei einem Durchmesser von 80 cm und 1000 Touren pro Minute, also mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 42 m/sek. erhält, spricht die angezogene jüngste Mitteilung des *Journal de l'éclairage au gaz* hingegen von 2400 Touren pro Minute bei dem Apparate, dessen Rotationsdurchmesser nach der Zeichnung 1,3 m beträgt. Das würde 246 m Umfangsgeschwindigkeit bedeuten. Wir werden später sehen, daß bei 42 m/sek. ein Erfolg ausgeschlossen ist, während er bei 246 m allerdings in einem nachweisbaren Umfange erwartet werden kann, ohne daß indessen der Apparat darum technische Bedeutung irgend besäße. Claude und Demoussy benutzten 100 m/sek. und fanden damit entsprechend der Theorie bei der Luft keine deutliche Veränderung.

Um nun die Materie zunächst in ein gebührendes Licht zu rücken, wollen wir — entgegen der theoretischen Möglichkeit, wie sich später zeigen wird — annehmen, daß die Luftzentrifuge des Herrn Mazza ein erhebliches Stundenquantum um mehrere Prozente an Sauerstoff angereicherten Luft lieferte. Die Praxis der Dampfkesselfeuerung bliebe auch in diesem Falle noch immer die Stelle, an der der Apparat am wenigsten Nutzen stiftete. Von der Dampfkesselpraxis allein aber werden Zeugnisse des Nutzens aus der Technik beigebracht, die eine Kohlersparnis von $22-27\frac{3}{4}\%$ durch Einführung des Mazzaschen Scheiders bekunden. Ist diese Ersparnis eingetreten, so hat sie sicherlich mit der Sauerstoffanreicherung um einige Volumenprozent nichts zu tun. Wenn wir eine sauerstoffreichere und entsprechend stickstoffärmere Luft der Feuerung zuführen, so wird die Stickstoffmasse kleiner, welche wir als Ballast durch die Feuerzüge in den Kamin führen. Dieser Stickstoffballast bedingt aber nur insofern einen Aufwand an Kohle, als er eine gewisse Wärmemenge mit sich führt, wenn er in den Kamin tritt, die er beim Verbrennungsprozeß aufgenommen hat. Diese Wärme geht verloren, und dieser Verlust wird verkleinert, wenn der Stickstoffballast selber verkleinert wird. Aber bei einer verständig angelegten und betriebenen Dampfkesselfeuerung beträgt der Wärmeverlust, den die Gesamtheit der heißabgehenden Rauchgase bedingt, nicht leicht $22-27\frac{3}{4}\%$ von der Heizleistung der Kohle, geschweige denn daß der Stickstoff allein, der mit Kohlen-säure, überschüssigem Sauerstoff und mit Wasserdampf zusammen das Rauchgas bildet, einen solchen Wärmeverlust bedingte. Mithin

⁵⁾ J. de l'éclairage au gaz 5. Nov. 1903, 333.

⁶⁾ 28. Nov. 1903, 998.

⁷⁾ Z. physikal. Chem. 17, 459.

wäre eine Ersparnis von diesem Umfange selbst bei der Verwendung reinen Sauerstoffes statt der Luft im Dampfkesselbetriebe nicht zu gewärtigen. Es ist also zwar als prinzipiell richtig anzuerkennen, daß eine sauerstoffreichere Luft im Dampfkesselbetriebe wegen der Verminderung des Stickstoffballastes eine Ersparnis erwarten läßt. Es ist auch prinzipiell anzuerkennen, daß eine Erniedrigung dessen, was man die Abgangstemperatur der Rauchgase nennt, vermutet werden darf, da mit der Verminderung des Stickstoffballastes eine Verlangsamung der Rauchgasbewegung in den Zügen und eine vollkommene Wärmeabgabe einhergehen wird. Beträgt aber die Abnahme des Stickstoffes nur einige Volumenprocente, so ist der Effekt zweifellos höchst unbedeutend und nach den einfachen Grundsätzen der Feuerungslehre, welche H. Bunte in Muspratts Enzyklopädischem Handbuch der Technischen Chemie⁸⁾ in sehr klarer Form dargelegt hat, unzureichend, um auch nur den zehnten Teil der behaupteten Kohlersparnis zu erklären⁹⁾. Es ist also nicht die Sauerstoffanreicherung durch Zentrifugalkraft, sondern die Gebläsewirkung des Mazzaschen Apparates für die beobachtete Verbesserung der Feuerungseffekte haftbar zu machen. Die Benutzung an Sauerstoff angereicherter Luft hat ihre vorgezeichnete Stelle bei Schmelzprozessen, bei denen es auf einen hohen „pyrometrischen Heizeffekt“, d. h. auf die Erreichung hoher Temperaturgrade ankommt. Hier könnte sie mit der durch fraktionierte Verflüssigung, bezw. Verdampfung nach Lindes bekanntem Verfahren erzeugten sauerstoffreichen Luft in dem vorerst sehr zweifelhaften Falle in Wettbewerb treten, daß genügend haltbare, handliche und störungsfreie Konstruktionen der Zentrifugalpumpe sich bauen ließen, und daß der Arbeitsaufwand, mit welchem die Luft in ihnen angereichert werden kann, kleiner ist als derjenige, welcher auf dem von Linde erfolgreich begangenen Wege erforderlich ist.

2. Rotationsgeschwindigkeit und scheidende Wirkung der Zentrifuge.

Wir haben eingangs auf die Bredigsche Untersuchung verwiesen, in welcher der Zusammenhang von Rotationsgeschwindigkeit und scheidender Wirkung an der Hand einer von Des Coudres aufgestellten Differentialgleichung entwickelt worden ist. Im Hinblick auf unmittelbare Anschaulichkeit wird folgende

abweichende Ableitung desselben Zusammenhanges sich vielleicht empfehlen, bei welcher aus dem Prinzip der Erhaltung der Energie (1^{ter} Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie), unmittelbar auf die scheidende Wirkung der Zentrifuge bei gegebener Umfangsgeschwindigkeit geschlossen wird.

Wir denken uns zunächst eine abgeschlossene Zentrifuge vom Rotationsradius r und der Umfangsgeschwindigkeit v in Bewegung. Ist die Zentrifuge mit Luft gefüllt, so wird gegen den Rand hin der schwerere Gemengteil Sauerstoff, gegen die Mitte hin der leichtere Stickstoff sich anreichern. Es wird also das Ver-

hältnis der Partialdrucke $P_{(O_2)} = c$ am Rand $P_{(N_2)}$ der Zentrifuge größer und in der Mitte kleiner sein als in der atmosphärischen Luft. In der atmosphärischen Luft ist dieses Verhältnis bekanntlich:

$$c = \frac{20 \cdot 9}{79 \cdot 1} = 0,26423.$$

Am Zentrifugenrand haben wir also:

$$\frac{P_{(O_2)}(\text{Rand})}{P_{(N_2)}(\text{Rand})} = c_{(\text{Rand})} = > 0,26423$$

und in der Mitte:

$$\frac{P_{(O_2)}(\text{Achse})}{P_{(N_2)}(\text{Achse})} = c_{(\text{Achse})} = < 0,26423.$$

Der Quotient:

$$\frac{P_{O_2}(\text{Rand})}{P_{N_2}(\text{Rand})} \cdot \frac{P_{N_2}(\text{Achse})}{P_{O_2}(\text{Achse})} = \frac{c_{(\text{Rand})}}{c_{(\text{Achse})}}$$

mag die „relative Anreicherung“ heißen. Wir können diesen Quotienten leicht umformen in

$$\frac{P_{O_2}(\text{Rand})}{P_{O_2}(\text{Achse})} \cdot \frac{P_{N_2}(\text{Achse})}{P_{N_2}(\text{Rand})}$$

und ihn in dieser Form berechnen.

Zu dem Ende stellen wir uns unsere Zentrifuge gefüllt vor mit einem einheitlichen Gas, abgeschlossen und danach in Bewegung gesetzt. Die Drucke sind $p(\text{Achse})$ und $p(\text{Rand})$. Überall in der Zentrifuge herrsche die gleiche Temperatur, welche in Graden der absoluten Skala T beträgt¹⁰⁾. Um nun ein Mol eines

⁸⁾ Bd. 4, 299. Braunschweig 1893.

⁹⁾ Der Referent des J. Gasbel. u. Wasserversorg. (1903, 998) berechnet unter einigen vereinfachenden Voraussetzungen bei Luft mit 23 Volumenprozent O_2 ca. 1,5% Ersparnis.

¹⁰⁾ Bezüglich der Temperaturverhältnisse sind folgende Betrachtungen naheliegend. Rasche Änderungen der Druckverteilung in der Zentrifuge, wie sie beim Anlassen oder Abstellen auftreten können, lassen den Eintritt von Temperaturänderungen erwarten, deren Maximalwert nach den Gleichungen der adiabatischen Gasexpansion in derselben Art berechnet werden kann, in welcher die Metereologen für bewegte oder raschen Druckänderungen unterworfenen Luft den Temperaturabfall nach der Höhe hin (zu 1° pro 100 m) ableiten. (Hann, Lehrbuch der Metereologie, Arrhenius, Kosmische Physik.) In der mit ruhendem Gas gefüllten (abgeschlossenen) Zentrifuge, die mit gleichförmiger

Gases bei dieser Temperatur vom Drucke $p(\text{Achse})$ auf den Druck $p(\text{Rand})$ zu bringen, ist thermodynamisch die Arbeit A erforderlich, welche in Einheiten des absoluten Maßsystems beträgt ($R = 0,832 \cdot 10^8$):

$$A = RT \ln \frac{p(\text{Rand})}{p(\text{Achse})}. \quad (1)$$

Das Zeichen \ln bedeutet den natürlichen Logarithmus mit der Basis $e = 2,718 \dots$.

Diese Arbeit A muß mithin von jedem Gasmol aufgenommen werden, welches bei konstanter Temperatur von der Rotationsachse zum Rande gelangt und kennzeichnet den Unterschied der Volumenenergie in beiden Grenzlagen. Es besteht aber außerdem ein Unterschied der lebendigen Kraft in den beiden Grenzlagen. Die lebendige Kraft B ist in der Rotationsachse Null und am Rande gleich $\frac{Mv^2}{2}$, wo M die Masse, d. h. das Molekulargewicht des Gases [in Gramm] und v die Umfangsgeschwindigkeit [in cm pro sec] bedeutet. Es ist also:

$$B [\text{in Erg}] = \frac{Mv^2}{2}$$

Für jedes in dünner ringförmiger Schicht konachsal zur Drehachse zwischen Rand und Mitte gelagerte Gasmol wird ein entsprechender Unterschied der Volumenenergie A_x und der lebendigen Kraft B_x gegen die Achsenlage vorhanden sein. Überwäge B_x , so müßte die Ringschicht sich dehnen; überwäge A_x , so müßte sie sich zusammenziehen. Herrscht in der geschlossenen, gleichförmig umlaufenden Zentrifuge der Beharrungszustand, so sind A_x und B_x überall gleich und:

$$\frac{Mv^2}{2} = RT \ln \frac{p(\text{Rand})}{p(\text{Achse})}. \quad (2)$$

Wir können diese Ableitung leicht kontrollieren, indem wir uns erinnern, daß die Zentrifugalkraft K [in Dynen] an die Masse M [in Gramm], die Geschwindigkeit v [in cm pro sec] und den Rotationsradius r [in cm] geknüpft ist durch die bekannte Beziehung:

$$K = \frac{Mv^2}{r}.$$

Geschwindigkeit umläuft, wird sich sehr bald Temperaturgleichheit herstellen. Arbeitet die Zentrifuge in der später beschriebenen Art als Zentrifugalpumpe, so wird der Temperaturunterschied im Innern der Gasmasse sehr klein sein, da die Geschwindigkeit, mit der Temperaturunterschiede sich in ruhender Luft durch Leitung ausgleichen (Hann, l. c. Seite 10), dieselbe ist, mit der sie in metallischem Eisen durch Leitung verschwinden, während die Diffusionsphänomene, von deren Ablauf die Wirkung des Gasscheiders abhängt, sehr langsam verlaufen.

Daraus ersieht man, daß:

$$\frac{rK}{2} = \frac{Mv^2}{2} = RT \ln \frac{p(\text{Rand})}{p(\text{Achse})}$$

sein muß.

Nun ist aber $r \frac{K}{2}$ die Arbeit [in Erg], welche geleistet wird, wenn ein Mol unter der Wirkung der Kraft $\frac{K}{2}$ [in Dynen] um den Abstand der Rotationsachse vom Rande also um r [in cm] verschoben wird; $\frac{K}{2}$ aber ist der Mittelwert der Zentrifugalkraft, welche bei dieser Verschiebung linear zum Weg von Null auf K stetig wächst. Der Ausdruck $r \frac{K}{2}$ mißt also die Arbeit, welche das Gasmol bei der Verschiebung von der Mitte zum Rande unter der Wirkung der Zentrifugalkraft aufnimmt, während

$$RT \ln \frac{p(\text{Rand})}{p(\text{Achse})}$$

die (isotherme) Arbeit darstellt, welche das Mol bei der entgegengesetzt gleichen Verschiebung unter der Wirkung der entgegengesetzt gleichen Zentripetalkraft abgibt.

Betrachten wir statt eines einheitlichen Gases ein Gemenge zweier Gase (Stickstoff und Sauerstoff), deren Partialdrucke bekanntlich voneinander unabhängig sind, so erhalten wir für jedes derselben einen der Formel 2 entsprechenden Ausdruck.

$$\frac{M_{(O_2)} v^2}{2} = RT \ln \frac{p_{O_2}(\text{Rand})}{p_{O_2}(\text{Achse})} \quad (2a)$$

$$\frac{M_{(N_2)} v^2}{2} = RT \ln \frac{p_{N_2}(\text{Rand})}{p_{N_2}(\text{Achse})} \quad (2b)$$

wo die Indizes o_2 und N_2 Sauerstoff und Stickstoff bedeuten. Durch Subtraktion dieser beiden Ausdrücke erhalten wir nun sofort den Ausdruck für die relative Anreicherung:

$$\begin{aligned} & \frac{(M_{(O_2)} - M_{(N_2)}) v^2}{2} \\ &= RT \ln \frac{p_{O_2}(\text{Rand}) \cdot p_{N_2}(\text{Achse})}{p_{N_2}(\text{Rand}) \cdot p_{O_2}(\text{Achse})}. \end{aligned} \quad (3)$$

Sind irgend zwei andere Gase zu scheiden, so erhält man den gleichen Ausdruck, wo dann die Molekulargewichte und Partialdrucke entsprechend andere sind. Bredig hat für seine Jodwasserstoff-Wasserstoffscheidung dieselbe Formel abgeleitet und experimentell bestätigt gefunden.

Für die Luft führen wir die Werte ein $M_{(O_2)} = 32$ (Molekulargewicht des Sauerstoffs = Gramm-masse eines Mol) $M_{(N_2)} = 28$ (Molekulargewicht des Stickstoffs = Gramm-masse eines Mol).

Die Temperatur wollen wir willkürlich zu 20° Celsius also zu 293° der absoluten Skala ansetzen. Schließlich wollen wir den natürlichen durch den dekadischen Logarithmus (\log^{10}) ersetzen. Dies liefert, wenn wir:

$$\frac{PO_2(\text{Rand})}{PN_2(\text{Rand})} = c_{(\text{Rand})} \text{ und } \frac{PO_2(\text{Achse})}{PN_2(\text{Achse})} = c_{(\text{Achse})}$$

setzen:

$$v^2 = 0,282025 \cdot 10^{11} \cdot \log^{10} \frac{c_{(\text{Rand})}}{c_{(\text{Achse})}} \quad (4)$$

Wollen wir statt des Verhältnisses der Partialdrucke c die Sauerstoffprocente x als anschaulichere Größe einführen, so ist zu setzen:

$$100 \frac{c}{1+c} = x \text{ oder: } c = \frac{x}{100-x}$$

also:

$$v^2 = 0,282025 \cdot 10^{11} \cdot \log^{10} \frac{x_{(\text{Rand})} \cdot [100 - x_{(\text{Achse})}]}{x_{(\text{Achse})} \cdot [100 - x_{(\text{Rand})}]} \quad (5)$$

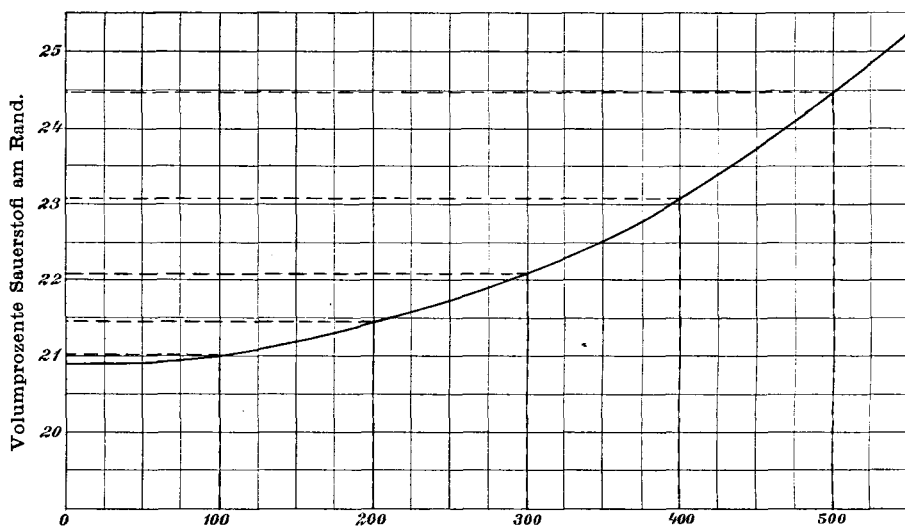


Fig. 1. Meter Umfangsgeschwindigkeit pro Sekunde.

$c_{(\text{Rand})}$ und damit $x_{(\text{Rand})}$, d. h. der Sauerstoffgehalt, erreichen bei konstanter Tourenzahl und konstantem Radius einen Maximalwert, wenn wir in der Achse der Zentrifuge dasselbe Partialdruckverhältnis aufrecht erhalten, welches in der atmosphärischen Luft besteht. Dem kommen wir sehr nahe, wenn wir die Zentrifuge mit Abführungsorganen ausrüsten und auf ein Mol angereicherten Gases, das wir am Rande abnehmen, eine sehr große Anzahl Mole ($y-1$) ungemein wenig veränderten Gases aus der Achse entfernen, während wir zugleich y Mole atmosphärischer Luft zuführen. y muß alsdann sehr groß gegen eins sein. Für $c_{(\text{Achse})}$ können wir dann in Formel 4 den der atmosphärischen Luft zugehörigen Wert 0,26423 setzen und erhalten:

$$\log^{10} c = \log^{10} \frac{x_{(\text{Rand})}}{100 - x_{(\text{Rand})}} \quad (6)$$

$$= 3,5459 \cdot 10^{-11} \cdot v^2 - 0,57803.$$

v ist die in cm pro Sekunde ausgedrückte Umfangsgeschwindigkeit. Die Rechnung, für eine Reihe von v -Werten ausgeführt, liefert die Daten der Tabelle I, die in Fig. 1 graphisch gegeben sind. Der leichteren Übersicht wegen ist v auf der Tabelle I und Fig. 1 in Metern pro Sekunde eingeschrieben.

Tabelle I.

v meter/sec	c	% O ₂
0	0,2642	20,90
100	0,2664	21,04
200	0,2730	21,44
300	0,2844	22,14
400	0,3011	23,14
500	0,3241	24,47
1000	0,5978	37,41

Es ist eine bekannte Eigenheit der logarithmischen Funktionen, daß sie, solange die logarithmischen Glieder klein sind, von linearen

Funktionen nicht nennenswert abweichen. Diese Eigenschaft tritt hier bis zum Werte $v = 500$ m/sec prägnant hervor. Wir können sowohl die Zunahme des prozentischen Sauerstoffgehaltes von der Achse zum Rande, wie die entsprechende Zunahme von c dem Quadrate der zugehörigen Radiuslängen oder dem Quadrate der betreffenden Geschwindigkeitswerte proportional setzen.

So liefert uns die Näherungsformel:

$$c_{\text{Rand}} = 2,2 \cdot 10^{-11} v^2 + c_{\text{Achse}} \quad (v \text{ in cm/sec}),$$

wenn wir für c_{Achse} wieder 0,26423 setzen, folgende Zahlenreihe, der unter Δc die Abweichungen beigelegt sind, welche sich gegen die nach Formel (6) berechneten genauen Werte ergeben

0	100	200	m/sec
0,2642	0,2664	0,2730	c (genähert)
0,0000	0,0000	0,0000	Δc

300	400	500	m/sec
0,2840	0,2994	0,3192	c (genähert)
0,0004	0,0017	0,0049	Δc

Was aber die Sauerstoffprocente x anlangt, so können wir näherungsweise bis zum Werte $v = 500$ m/sec setzen:

$$x_{\text{Rand}} = 1,6 \cdot 10^{-9} \cdot v^2 + x_{\text{Achse}} \quad (v \text{ in cm/sec}) \quad (7)$$

und erhalten auf diese Weise

0	100	200	m/sec
20,90	21,04	21,46	x (genähert)
0,0	0,0	0,02	Δx

300	400	500	m/sec
22,16	23,14	24,40	x (genähert)
0,02	0,0	0,07	Δx

Der Umstand, daß bei den Geschwindigkeiten bis 500 m/sec zwischen den Quadraten der Geschwindigkeit und den Werten für die Anreicherung wie für den Sauerstoffprozentgehalt eine einfache Proportionalität besteht, birgt die Möglichkeit in sich, eine Reihe weiterer Fragen näherungsweise in sehr einfacher Form zu lösen. Diese einfache Proportionalität gilt auch für die Drucke, so daß die Masse des Sauerstoffes in der Raumeinheit, d. i. die Sauerstoffdichte, ebenso wie die Masse des Stickstoffes in der Raumeinheit, d. i. die Stickstoffdichte in der rotierenden Zentrifuge wenigstens bei Geschwindigkeiten bis 300 m/sec nahezu proportional dem Quadrate des Abstandes von der Drehachse wächst. Denken wir nun eine Zentrifuge vom Radius r , während sie ruht, mit Luft gefüllt, danach vollständig geschlossen und in Bewegung gesetzt, so wird die Dichte der Gase von der Mitte nach dem Rande zunehmen, und zwar proportional dem Radiusquadrat. Dort wo dieses gerade gleich der Hälfte des Wertes ist, den es am Rand der Zentrifuge hat, also bei $0,707 r$

$$\left(\text{d. i. } \sqrt{\frac{r^2}{2}} \right),$$

wird die Dichte dieselbe bleiben, wie sie vor der Ingangsetzung der Zentrifuge überall in der Zentrifuge war. Dort wird zugleich der Sauerstoffprozentgehalt den Wert 20,9% bewahren, den er in der atmosphärischen Luft hat, und von dort nach der Drehachse wird er um ebensoviel fallen, wie er nach dem Rande hin zunimmt. Wir werden also bei dieser Art Benutzung der Zentrifuge den Sauerstoffgehalt am Rand in Prozentsen (x) gerade halb so groß finden als in Tabelle I angegeben ist, wo wir die Voraussetzung zugrunde legten, daß in der Drehachse unveränderte atmosphärische Luft ist. Indem wir die Anreicherung des Sauerstoffes, verglichen mit atmosphärischer Luft als „absolute Anreicherung“ bezeichnen, gelangen wir zu dem Satze: Die

absolute Anreicherung wird der nach Formel 6 berechneten relativen gleich in dem Grenzfalle, daß in der Drehachse die Zusammensetzung der atmosphärischen Luft erhalten bleibt, und sinkt fast genau auf die Hälfte — wenn nur Werte der Geschwindigkeit bis 300 m/sec beachtet werden —, in dem anderen Grenzfalle, daß die ruhend mit atmosphärischer Luft gefüllte Zentrifuge abgeschlossen in Rotation gesetzt wird.

Der Gegensatz gewinnt an Klarheit, wenn wir an eine mit Abführungsorganen ausgerüstete Zentrifuge denken, atmosphärische Luft kontinuierlich zu speisen und einerseits „reiche“ Gase am Rande, andererseits „arme“ Gase aus der Achse dauernd abnehmen. Aus y -Molen zugepeister Luft erhalten wir immer 1 Mol reiches und $(y-1)$ Mole armes Gas. Es wird dann bei Geschwindigkeiten bis 300 m/sec die absolute Anreicherung $\frac{1}{2}$ der relativen sein, wenn y den Wert 2 annimmt. Dagegen wird die absolute Anreicherung der relativen der Größe nach um so ähnlicher, je größer y wird, und bei sehr großen Werten von y wird der Unterschied der relativen und absoluten Anreicherung verschwindend.

Um nun die Nutzenanwendung dieser Überlegungen auf das technische Problem zu machen, so ist zunächst nach Tab. I zu schließen, daß mit dem Apparat des Herrn Mazza so wenig wie mit irgend einem anderen eine nachweisbare Luftscheidung bei 42 m/sec Umfangsgeschwindigkeit zu erzielen ist. Bei 246 m/sec kann man in der Tat rund 1% Sauerstoffanreicherung erwarten. Die angezogene Mitteilung des Journal de l'éclairage au gaz bringt eine Reihe von zwölf sehr differierenden Daten, die B. Porro gefunden hat, und nach denen der Sauerstoffgehalt der zentrifugierten Luft von 21,81—27% beträgt. Alles nähere fehlt indessen. Man könnte versucht sein, die behauptete größere Anreicherung auf eine größere Umfangsgeschwindigkeit zurückzuführen; lehrt doch unsere Berechnung, daß mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 400 bis 500 m/sec praktisch in Betracht kommende Effekte (Tabelle I) wohl erwartet werden dürfen. Eine solche Umfangsgeschwindigkeit aber kann dem in der angezogenen Quelle abgebildeten Mazzaapparat nicht erteilt werden, ja es erscheint uns fraglich, ob eine entsprechende Konstruktion sich überhaupt schaffen läßt. Eine Gaszentrifugalpumpe nämlich, welche nicht nur als Gebläse, sondern als Gasscheider wirken soll, darf nicht einfach, wie sonst für die Beziehungen von Zentrifugalpumpen und Turbinen geläufig ist, als eine sehr rasch laufende Dampfturbine gedacht werden, welche statt Arbeit zu leisten

vielmehr solche aufnimmt. Man darf also von den bekannten hohen Geschwindigkeiten, welche namentlich die Lavalsche Dampfturbinen besitzen, nicht ohne weiteres darauf schließen, daß man dieselbe Geschwindigkeit in einem Gasscheider benutzen kann, der die Luft in hier erörterter Art zerlegen soll. Die Aufgabe unseres Gasscheiders ist nämlich nicht bloß die einer Zentrifugalpumpe, welche der geförderten Flüssigkeit eine hohe lebendige Kraft erteilt, die danach entsprechend dem Prinzip von der Erhaltung der Energie als Hubarbeit in anschließenden Vorrichtungen ausgenutzt wird. Der Gasscheider hat vielmehr die Aufgabe, einem Gase, dessen Schichten von der Drehachse an nach dem Rande hin unter der Wirkung stetig steigender Zentrifugalkraft stehen, Entmischung durch **Diffusion** zu erlauben. Jede Störung der Diffusion durch mechanische Strömungen in dem Gase vernichtet die scheidende Wirkung in größerem oder geringerem Umfange. Jedes Schleudern der Gase von der Mitte zum Rand durch rotierende Organe in feststehendem Gehäuse ist also mit dem Prinzip der Gasscheidung unverträglich, wie übrigens auch in dem angezogenen deutschen Patente von Mazza richtig bemerkt ist. Man bedarf vielmehr eines gaserfüllten, von inneren Strömungen freien Hohlraumes, dessen äußere Wandung, die in Tabelle I gegebenen Umfangsgeschwindigkeiten besitzt. Eine solche zylindrische Wandung aber ist mechanisch als ein freier Schwungrad zu betrachten. Die Beanspruchung eines solchen erreicht schon bei 400 m/sec den Wert¹¹⁾ 128 kg-qmm (red). Soweit unsere Kenntnis reicht, hat die Konstruktionstechnik ein Konstruktionsmaterial nicht zur Verfügung, welches in größeren Formstücken einer Dauerbeanspruchung von dieser außerordentlichen Größe mit erträglicher Sicherheit ausgesetzt werden dürfte. Wenn im Dampfturbinenbau, z. B. bei der de Lavalschen Turbine, diese und etwas höhere Geschwindigkeiten verwendet werden, so baut man die betreffenden Teile nicht als Ringe mit oder ohne Versteifung, sondern als Scheiben¹²⁾. Ein ähnliches Hilfsmittel ist für unseren Fall des erforderlichen freien Hohlraumes wegen nicht ohne weiteres zu sehen. Deshalb glauben wir jedenfalls Geschwindigkeiten von mehr als 300 m/sec ganz beiseite stellen zu sollen. Da aber bis

zu 300 m/sec die Trennung durch Zentrifugalkraft bei der Luft keinen erheblichen Effekt (Tabelle I) gibt, so sieht man, daß die **Luftscheidung** in einem **einstufigen** Zentrifugalapparat technisch ausichtslos ist.

Die Trennung anderer Gase als Luft ist gemäß Formel 3 um so leichter zu bewirken, je größer die Unterschiede im Molekulargewicht sind. Für zwei Gase mit den Molekulargewichten M_x und M_y , wo $M_x > M_y$ sein möge, nimmt die Formel die Gestalt an:

$$\frac{M_x - M_y}{4} v^2 = 0,2820125 \cdot 10^{11} \cdot \log^{10} \frac{C_{\text{(Rand)}}}{C_{\text{(Achse)}}}$$

In dem von G. Bredig untersuchten Falle war:

$$\frac{M_x - M_y}{4} = 31,5,$$

so daß er die Geschwindigkeit um das 5,6fache kleiner wählen konnte, als wenn er denselben scheidenden Effekt bei einem Sauerstoff-Stickstoffgemenge hätte erzwingen wollen. Technisch wichtige Fälle, bei denen die Differenz der Molekulargewichte so groß wäre wie im Bredigschen Beispiel, sind nicht leicht zu finden. Man müßte denn etwa Naphtalindampf und Wasserstoffgas, die bekanntlich im technischen Leuchtgas nebeneinander vorkommen, ins Auge fassen. Für einen solchen Fall aber wird man nicht leicht zu dem Hilfsmittel der Zentrifuge zu greifen geneigt sein, da die auswählende Löslichkeit passender Waschmittel einen einfacheren Weg zur Entfernung des schweren Bestandteils darbietet. Für diesen Vorzug sind die Betrachtungen des nächsten Paragraphen von Wichtigkeit.

Kehren wir zu der Luftscheidung zurück, so erscheint der Gedanke einer vielstufigen Zentrifugalpumpe als Ausweg. Es läßt sich eine Konstruktion denken, bei der die an Sauerstoff angereicherte Luft stets einer folgenden, die an Sauerstoff verarmte einer vorangehenden Zentrifugalpumpe überliefert wird, die sämtlich auf einer Drehachse sitzen und ähnlich den Kammern mehrstufiger Dampfturbinen angeordnet sind. Ein solcher Apparat würde sich zu dem einstufigen ähnlich verhalten wie die Dampfturbine von Rateau zu der von De Laval. Auch Parsons wohlbekannte Dampfturbine ist hier anzuziehen. Liefert die Gasscheidung in der einzelnen Kammer den Effekt

$$\frac{C_{\text{(Rand)}}}{C_{\text{(Achse)}}},$$

so liefern die n Kammern

$$\left[\frac{C_{\text{(Rand)}}}{C_{\text{(Achse)}}} \right]^n$$

¹¹⁾ Wegen der Ableitung dieser Größe und sonstigen Information über Dampfturbinen sehe man Neilson: The Steam Turbine. London 1903 (Formel: S. 74 Anmerkung).

¹²⁾ Über die Festigkeit solcher Scheiben vergl. man die Angaben der Firma Krupp in Stodola: Die Dampfturbinen. Berlin 1903.

vorausgesetzt, daß sie sämtlich gleiche Umfangsgeschwindigkeit haben. Nehmen wir an, daß wir „Linde-Luft“ mit 50% Sauerstoff und ebensoviel Stickstoff erzeugen wollen, so erhalten wir die in Tabelle II vereinigten Mindestwerte für die Anzahl n der Kammern.

Tabelle II.

m/sec	(abgerundet)
$\frac{v}{n}$	$\frac{n}{v}$
100	77
200	19
300	9
400	5
500	3

Diese Zahlen sind darum Minimalzahlen, weil die relative Anreicherung gleich der absoluten gesetzt ist. Die mehrstufige Zentrifugalpumpe dieser Art würde mithin am einen Ende ein relativ sehr großes Quantum ($y - 1$ Mole) kaum merklich an Sauerstoff verarmter Luft am anderen Ende ein relativ sehr kleines Quantum (1 Mol) Lindeluft ausstoßen, während das Durchsetzungsquantum sehr hoch, nämlich y Mole ist. Wenn wir diese Verhältnisse ändern, indem wir das Durchsetzungsquantum verkleinern, wird die nötige Anzahl der Zentrifugalkammern entsprechend größer.

Mit der Vermehrung der Kammerzahl aber tritt eine neue Schwierigkeit auf, die wir im nächsten Abschnitt beleuchten.

3. Scheidungsgeschwindigkeit.

Die Gasscheidung in der Zentrifuge hat alle Ähnlichkeit mit der Gasscheidung in der freien Atmosphäre durch den Einfluß der Schwere. Wenn es nach der Theorie ginge, so müßte die Luft bei Erhebung vom Erdboden ziemlich rasch an Sauerstoff verarmen. Heben wir nämlich ein Mol Stickstoff um die Höhe dh , so ist, wenn M die Masse des Moles und g die Erdschwere bedeutet, die Hubarbeit dA

$$dA = M_{(N_2)} \cdot g \cdot dh \text{ (Grammgewicht} \times \text{Centim.)}.$$

Die entsprechende Abnahme des Gasdruckes bei der Erhebung ist dp , und die Änderung der Volumenenergie des Gasmoles deshalb vdv . Beachten wir, daß ist:

$$pv = RT$$

so können wir schreiben:

$$RT \frac{dp}{p} = RT d \ln p = M_{(N_2)} \cdot g \cdot dh^{13)}.$$

Bezeichnen wir nun den Gasdruck des Stickstoffs in der Höhe h mit $p_h(N_2)$ in der Höhe $h = 0$, d. h. am Erdboden, mit $p_0(N_2)$, so erhalten wir:

¹³⁾ Die Seiten der Gleichung haben dasselbe Vorzeichen, denn $RT d \ln p$ ist eine Abnahme der Volumenenergie, wenn $M_{(N_2)} \cdot g \cdot dh$ eine aufgewandte Arbeit ist.

$$RT \ln \frac{p_0(N_2)}{p_h(N_2)} = M_{(N_2)} \cdot g \cdot h^{14)},$$

und analog für Sauerstoff:

$$RT \ln \frac{p_0(O_2)}{p_h(O_2)} = M_{(O_2)} \cdot g \cdot h.$$

Subtraktion liefert

$$RT \ln \frac{p_0(O_2)}{p_0(N_2)} \cdot \frac{p_h(N_2)}{p_h(O_2)} = (M_{(O_2)} - M_{(N_2)}) \cdot g \cdot h.$$

Das logarithmische Glied gibt genau wie früher die „relative Anreicherung“, die aber in diesem Falle stets negativ ist, nämlich eine Abnahme des Sauerstoffs nach der Höhe hin ergibt. Hier ist auch kein Unterschied zwischen relativer und absoluter Anreicherung, da der Wert am Erdboden für

$$\frac{p_0(O_2)}{p_0(N_2)}$$

mit 0,26423 ein für allemal durch die Erfahrung feststeht. Hann¹⁵⁾ hat diese Überlegungen verfolgt und die Zahlenwerte berechnet. Er setzte die Zusammensetzung der Luft am Erdboden zu

N ₂	78,04 %
O ₂	20,99 „
Argon	0,94 „
CO ₂	0,03 „

und erhielt danach für z. B. 10 km Höhe

N ₂	81,05 %
O ₂	18,35 „
Argon	0,58 „
CO ₂	0,02 „

Die Sauerstoffabnahme von 20,99 auf 18,35 % ist außerordentlich groß, und die ungefähr halb so große Abnahme bei 5000 bis 6000 m müßte immerhin noch spielend gasanalytisch nachzuweisen sein. Bei Ballonfahrten in diesen Höhen genommene Proben haben aber erklärlicherweise stets die Differenz Null zwischen dem Sauerstoffgehalt an der Erdoberfläche und in der Höhe ergeben. Denn wie Arrhenius¹⁶⁾ hervorhebt, würde die Luft, wenn sie einmal bis 1 km Höhe homogen gemischt und dann vollkommen ruhig sich selbst überlassen würde, mehr als 100 Jahre brauchen, um sich bis zu dem durch die entwickelte Formel vorausgesehenen Grade zu entmischen. In dieser Zeit aber wird sie naturgemäß tausendfältig durch die Winde wieder durchgemengt.

¹⁴⁾ Ersetzt man hier (N₂) durch Luft, so hat man eine andere Form der sogenannten hypsometrischen Gleichung. Wegen deren Ableitung siehe Winkelmann: Handbuch der Physik, Band I, 525 oder Nernst-Schönflies: Einführung in die mathem. Behandlung der Naturwissenschaften. München 1898, S. 133.

¹⁵⁾ Lehrbuch der Meteorologie Leipzig 1901.

¹⁶⁾ Kosmische Physik. Leipzig 1903. Bd. II, S. 596.

Die Einstellung des berechneten Entmischungsverhältnisses ist so außerordentlich langsam, weil die Diffusion allein sie herbeiführt, deren Fortgang ungemein träge ist.

Ganz dasselbe aber gilt in unserem Falle der Zentrifugalpumpe. Eine ursprünglich homogene Gasmasse kann sich in dem der Zentrifugalkraft entsprechenden Betrage nur in dem langsamen Fortgange der Diffusion entmischen. Denken wir uns nun zunächst die völlig geschlossene Zentrifuge mit 300 m/sec Umfangsgeschwindigkeit in Rotation. Die Luft hat

am Rande 21,52% O₂ und 78,48% N₂
in der Achse 20,28% O₂ „ 79,72% N₂.

Im Abstand

$$\sqrt{\frac{r^2}{2}}$$

von der Achse wird die Zusammensetzung nach früherer Darlegung stets die der atmosphärischen Luft sein. In die zylindrische Schicht, die diesen Abstand

$$\sqrt{\frac{r^2}{2}}$$

hat, speisen wir nun pro Sekunde 2n Kubikcentimeter frischer Luft nach, während wir gleichzeitig n Kubikzentimeter des „reichen“ Gases in der Randzone und ebensoviel in der Achse abnehmen. Die Anzahl n wird bei gegebener Temperatur und gegebenem Druck in der Einspeisungszone einen bestimmten Betrag nicht überschreiten dürfen, wenn die Zusammensetzung der an beiden Grenzen abgenommenen Gase konstant bleiben soll. Nehmen wir mehr Gas ab, so bleibt die Anreicherung hinter dem im Abschnitt 2 berechneten Werte zurück. Offenbar könnte n beliebig groß sein, wenn die abgenommene Luft dieselbe Zusammensetzung wie die eingespeiste hätte. Aber wenn wir 100 ccm Gas obigen „reichen“ Gases am Rand abnehmen, so sind darunter 0,62 cm Sauerstoff, welche in 100 ccm Frischgas noch nicht waren und während der Abnahmezeit der 100 ccm von der Zuspiszone her zu der Abnahmezone am Rand durch die entmischende Kraft der Zentrifuge getrieben sein müssen. In derselben Zeit müssen auch 0,62 ccm Stickstoff (gedacht unter dem am Rande herrschenden Druck) den entgegengesetzten Weg zurücklegen. Es superponiert sich also eine Diffusion über das einfache Durchströmen der Gase durch den Apparat, und wir haben lediglich nötig, die Geschwindigkeit dieser Diffusion zu bestimmen, wenn wir wissen wollen, wieviel angereichertes Gas wir mit der in Tabelle I gegebenen Zusammensetzung stündlich gewinnen können. Nun erfordert die Zuführung der 0,62 ccm Sauerstoff von der

Eintrittszone her zum Rande dieselbe Zeit, die 0,62 ccm Sauerstoff ceteris paribus benötigen würden, um unter den in der Zentrifuge herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen nach der Achse zu von der Randzone durch die Diffusion abgeführt zu werden. In derselben Zeit wandern die 0,62 cm Stickstoff den Gegenweg. Diese Zeit läßt sich nun auf Grund einiger zulässigen Näherungsannahmen leicht berechnen. Die eine dieser Näherungsannahmen betrifft den Diffusionskoeffizienten Sauerstoff-Stickstoff, den v. Obermeier¹⁶⁾ bestimmt hat. Wir setzen denselben für 20° und für einen Gesamtdruck beider Gase welcher dem atmosphärischen gleich ist, zu 0,2 und vernachlässigen seine Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis der beiden Gase. Wir nehmen also (als Näherung) an, daß in der Grundformel der Gasdiffusion:

$$dS = k \cdot q \cdot \frac{dP_{(O_2)}}{ds} \cdot dt.$$

die Menge dS des Sauerstoffs, welche durch einen Querschnitt q von 1 qcm in der Zeit (dt) von 1 Sek. hindurchtritt, 0,2 ccm von 20° und 760 mm beträgt, wenn das Gefälle $\frac{dP_{(O_2)}}{ds}$ den Wert 1 hat. Diesen Wert besitzt

das Gefälle, wenn der Partialdruck des Sauerstoffs $\frac{1}{2}$ cm rechts von unserem Querschnitt q den Wert 1 Atmosphäre, $\frac{1}{2}$ cm links den Wert 0 Atmosphären, der Stickstoff umgekehrt rechts in der gedachten Entfernung den Wert 0 Atmosphären und links entsprechend 1 Atmosphäre Druck besitzt. Die zweite Näherungsannahme ist dieselbe, die wir früher bereits an der Hand der Belegzahlen eingeführt haben, daß in unserem Apparat der Volumenbruchteil, den der Sauerstoff im Gase ausmacht, und den wir gemäß früherer Darlegung als x/100 zu bezeichnen haben, proportional zum Radiusquadrat wächst. Mit Hilfe der zweiten Näherungsannahme leiten wir den Wert $\frac{dP_{(O_2)}}{ds}$ ab, indem wir die Überlegung

heranziehen, daß in einem Raume, durch welchen in der einen Richtung Sauerstoff, in der anderen Stickstoff in stationärem Strome diffundieren, Änderungen des Gesamtdruckes die in der Zeiteinheit durchtretende Gasmasse nicht beeinflussen. Es liegt dies daran, daß das treibende Druckgefälle dem Gesamtdruck direkt, der Diffusionskoeffizient ihm umgekehrt proportional ist. Bei unserer Betrachtung des Diffusionsstromes in der Gaszentrifugal-

¹⁶⁾ Ber. d. Wiener Akademie 81 II 1124 (1880) und 96 II 546 (1887). Er ist dort in Stefanischen Einheiten gegeben. Umgerechnet auf C.-G.-S. Einheiten findet er sich in Wüllners Physik 5. Aufl. Leipzig 1895. Bd. I, § 120.

pumpe dürfen wir um dessentwillen den Anstieg des Gesamtdruckes unbeachtet lassen, welcher von der Achse gegen den Rand hin stattfindet, und uns vorstellen, daß auf dieser Strecke der Gesamtdruck überall jenen — mittleren — Wert von 1 Atmosphäre hat, mit welchem wir die frische Luft dauernd in der Einspeiszone zuführen. Dann ist das treibende Druckgefälle:

$$\frac{dP_{(O_2)}}{ds} = \frac{d\left(\frac{x}{100}\right)}{dr} = \frac{1}{100} \cdot \frac{dx}{dr}$$

Den Wert für dx/dr finden wir leicht aus Formel 7 zu

$$\frac{dx}{dr} = 1,6 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{d(v^2)^{17}}{dr} \quad (8)$$

Somit wird

$$\frac{dP_{(O_2)}}{dr} = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-11} \frac{v^2}{r} \quad (9)$$

Mit Hilfe von (9) bilden wir nun den Ausdruck für die Gasmenge, welche von der Einspeiszone sekundlich nach der nächst benachbarten Schicht diffundiert. Wir beachten, daß in der Einspeiszone der Gesamtdruck der einer Atmosphäre und $k = 0,2$, der Radius aber r_e und die Geschwindigkeit v_e ist. Wir erhalten:

$$dS = 0,2 \cdot 2\pi r_e \cdot h \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} \frac{v_e^2}{r_e} \cdot dt$$

oder

$$dS = 4,0 \cdot 10^{-11} \cdot h \cdot v_e^2 \cdot dt$$

Machen wir schließlich von der Näherungsannahme Gebrauch, daß v_e^2 gleich $\frac{1}{2} v^2_{(\text{Rand})}$

ist, so ergibt sich, daß die durch jeden Querschnitt bei der Schichthöhe von h cm in der Sekunde durchtretende Sauerstoffmenge

$$h \cdot 2 \cdot 10^{-11} \cdot v^2 \text{ ccm}$$

von 20° und 760 mm beträgt. Ebenso groß ist nach dem Grundgesetz der Gasdiffusion die in der Gegenrichtung durchtretende Stickstoffmenge. Diese

$$h \cdot 2 \cdot 10^{-11} v^2 \text{ ccm}$$

treten also auch sekundlich zu der Randschicht. Bei:

$$300 \text{ m/sec} = 3 \cdot 10^4 \text{ cm/sec}$$

Umfangsgeschwindigkeit treten also 0,018 ccm zum Zentrifugenrand, wenn die Höhe der zylindrischen Zentrifuge $h = 1$ cm beträgt. Um bei diesem Zufluß 0,62 cm der Grenzzone zuzuführen sind rund $35/h \cdot \text{sec}$ erforder-

¹⁷⁾ v^2 ist $(2\pi r)^2$, wo r die Tourenzahl ist, $\frac{d(v^2)}{dr}$ ist also $(2\pi r)^2 \cdot 2r$. Dies läßt sich umformen

$$(2\pi r)^2 \cdot 2r = \frac{(2\pi r)^2 \cdot 2}{r} = \frac{2v^2}{r}$$

lich. Bei einer Zentrifuge von 1 m Randhöhe werden wir also 100 ccm nicht rascher als in 0,35 sec und in der Stunde nur 1,03 ccm reichen Gases mit 21,52% Sauerstoff abnehmen können.

An diesem Punkte dürfte technisch die Idee eines vielstufigen Gasscheiders mit mehreren auf eine Achse gesetzten Kammern scheitern. Denn die Kammern müssen, um eine nennenswerte Stundenleistung zu geben, so lang sein, daß deren mehrere bald eine Achse von der Länge einer Schiffswelle erfordern würden. Die vielstufige Räteausche Dampfturbine gibt hier kein Vorbild, weil bei ihr die einzelnen Organe im Gegensatz zu den langen Kammern, welche der mehrstufige Gasscheider bedarf, überaus schmal sein können.

Wir haben die Rechnung mit Zugrundelegung eines möglichst kleinen Durchsetzungsquantums geführt. Daß die Größenordnung der Effekte nicht günstiger wird, wenn man ein höheres Durchsetzungsquantum wählt, läßt sich leicht schätzen. Ebensowenig kann man die Sachlage durch Erhöhung des Gesamtdruckes, also durch Zuspeisung komprimierter Frischluft bessern, denn bei Steigerung des Gasdruckes sinkt, wie erwähnt, der Diffusionskoeffizient. Experimentelle Daten zur Kontrolle dieser Diffusionsrechnungen existieren nicht. Es genügt aber, wenn die Größenordnung ihres Ergebnisses auch nur annähernd richtig ist, um die Idee der Luft-scheidung, ja allgemeiner der Gasscheidung, durch die Zentrifuge ihres technischen Interesses zu entkleiden, weil der Gewinn von einem kleinen Volumen schwach angereicherten Gases in keinem technischen Verhältnis zu der Notwendigkeit steht, einen 1 m hohen Apparat eine Stunde lang mit 300 m/sec Umfangsgeschwindigkeit laufen zu lassen. Doch wird es immerhin empfehlenswert sein, noch die Arbeitsleistung eines solchen Gasscheiders zu studieren.

4. Scheidungsarbeit.

Die Arbeit des Gasscheiders zerfällt in drei Teile. Der erste ist die thermodynamische Entmischungsarbeit. Wir denken uns irgend eine ideale Vorrichtung, die Luft bei konstantem Druck und konstanter Temperatur in einen sauerstoffreichen und einen sauerstoffärmeren Anteil zerlegen kann, so wird diese Vorrichtung zur Trennung stets die Zufuhr von Energie verlangen. Die geleistete Arbeit erhöht beim Entmischungsvorgang nicht die Eigenenergie der entmischten Körper, sondern verwandelt sich in Wärme. Sie ist ebensogroß wie die Arbeit, welche beim umgekehrten Vorgang der Vermischung, wenn dieser bei konstanter Tem-

peratur in umkehrbarer (idealer) Art abläuft, aus Wärme gewonnen werden kann.

Um unsere thermodynamische Scheidungsarbeit zu berechnen, nehmen wir zunächst als Volumeneinheit die Größe von 22,4 Liter bei 0° und 760 mm und beachten, daß die Zentrifugalpumpe auf ein solches Volumen von „schwerem“ Gas $(y - 1)$ Volumina leichten Gases liefert. Wir denken uns nun dieses Gasquantum auf folgendem idealen Weg nach Lord Rayleigh und Boltzmann vermischt: Wir bringen (Figur 2) in das Gefäß M unsere $(y - 1)$ Volumina der leichten Gase auf die linke (I), ein Volumen der schweren Gase auf die rechte Seite (II). In I wie in II herrscht der Atmosphärendruck. Beide sind durch die Wand a getrennt. Diese ist mit den Stangen K und K' verbunden, welche Kraft an benachbarte Arbeitsmaschinen übertragen können. Die Wand a ist spaltbar. Ihre isolierte linke Hälfte ist durchgängig für Stickstoff, aber nicht für Sauerstoff, die rechte Hälfte hat die umgekehrte Eigenschaft. Wir vollziehen die Spaltung der Wand und lassen die Hälften unter isotherm reversibler

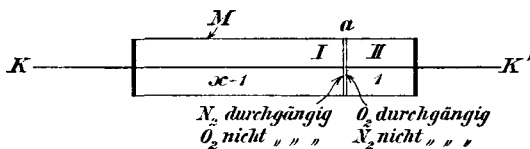


Fig. 2.

Arbeitsleistung vorrücken. Haben wir nun in II den Partialdruck p_o des Sauerstoffs, so beträgt der Partialdruck dieses Gases in I

$$0,209 - \frac{p_o - 0,209}{y - 1}.$$

Bei der Bewegung des für Stickstoff durchlässigen Kolbens expandiert der Sauerstoff in II, während er in I komprimiert wird. Der Endzustand ist beiderseitig durch den Partialdruck der atmosphärischen Luft 0,209 gekennzeichnet. Beide Vorgänge zusammen liefern die nach außen verfügbare Arbeit:

$$A_o = p_o RT \ln \frac{p_o}{0,209} + (0,209 y - p_o) RT \ln \left(1 - \frac{p_o - 0,209}{0,209 (y - 1)} \right).$$

Haben wir andererseits in I den Partialdruck p_N des Stickstoffs, so ist der Partialdruck in II

$$0,791 - \frac{p_N - 0,791}{y - 1}.$$

Bei der Bewegung des für Sauerstoff durchlässigen Kolbens expandiert der Stickstoff in I und wird in II komprimiert mit dem Endergebnis, daß der Partialdruck beiderseits den Wert des Stickstoffpartialdrucks in atmo-

sphärischer Luft 0,791 annimmt. Beide Vorgänge zusammen liefern die nach außen verfügbare Arbeit:

$$A_N = (0,791 y - p_N) RT \ln \left(1 - \frac{p_N - 0,791}{(y - 1) 0,791} \right) + p_N RT \ln \frac{p_N}{0,791}.$$

Fig. 3 gibt die Stellung an, in welcher sich dann etwa die Kolben befinden können. Die Summe der von den Kolbenstangen K und K' an die mit ihnen verbunden gedachten idealen Arbeitsmaschinen übertragenen Energiebeträge $A_o + A_N$ stellt die Arbeitsleistung dar, welche von der Zentrifugalpumpe bei der Scheidung der y Volumina Luft in ein Volumen schwere und $(1 - y)$ Volumina leichte Gase thermodynamisch zu leisten ist.

Setzen wir wie früher für die natürlichen Logarithmen die dekadischen, und rechnen wir die Arbeit in Einheiten des absoluten Maßsystems, so ist für $RT \ln \dots$ zu setzen

$$1,925 \cdot 0,293 \cdot 10^{11} \log^{10} \dots$$

Dabei ist für T wieder der Wert von 20°

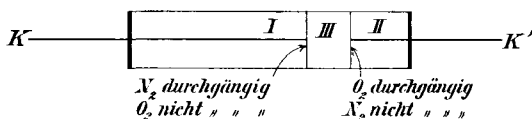


Fig. 3.

genommen. Der Arbeitsbetrag, den wir so erhalten, bezieht sich auf das Volumen schweren Gases, welches bei 0° und 760 mm 22,4 l einnimmt. In dem folgenden Beispiel ist er statt dessen auf 1 cbm schweren Gases von 760 mm und 20° bezogen.

Prozente Sauerstoff im Sauerstoff- Stickstoffgemenge	Die thermodynamische Arbeit beträgt in kg/m pro cbm des angereicherten Gases bei den Werten T = 293 und
y = 10	y = 100
50	4421
	3724

Der Arbeitsbetrag wird, wie eine einfache Überlegung ergibt, um so größer, je kleiner y wird. Setzen wir nämlich y in einem Falle gleich 100 im anderen Falle gleich 10, so können wir uns den folgenden Arbeitskreisprozeß ausgeführt denken, dessen Glieder sämtlich isotherm und reversibel verlaufen. Wir vermischen zunächst mit Hilfe der beschriebenen idealen halbdurchlässigen Kolben arme und reiche Gase beim Wert $y = 10$ und gewinnen die Arbeit a_{10} . Darauf fügen wir 90 Teile Luft zu, was die Arbeit $a_{10 \rightarrow 100} = 0$ erfordert. Nun trennen wir durch Umkehrung des Vermischungsvorganges und erhalten die dem Wert $y = 100$ entsprechende Scheidung mit der Arbeit $-a_{100}$. Danach schließlich wenden wir die Arbeit $a_{100 \rightarrow 10}$ auf, um aus den 99 Teilen armen Gases 90 Teile

Luft mittels halbdurchlässiger Kolben auszusondern. Damit ist der Anfangszustand wieder erreicht. Wir haben also:

$$+ a_{10} - a_{100} - a_{100 \rightarrow 10} = 0$$

$$a_{10} = a_{100} + a_{100 \rightarrow 10}$$

a_{10} übertrifft also a_{100} um den Arbeitsbetrag der nötig ist, die 99 Teile armen Gase im Falle $y = 100$ in 90 Teile Luft und jene 9 Teile ärmeren Gases zu sondern, die dem Falle $y = 10$ zugehören.

Die Größe des Wertes $a_{100 \rightarrow 10}$ kann ohne Schwierigkeit analog den vorstehenden Entwicklungen abgeleitet werden. Zu bemerken ist noch, daß zwischen y und p_0 (bezw. p_N) eine einfache Beziehung besteht. y kann nämlich für jeden gegebenen Wert von p_0 nicht unter einen bestimmten Wert hinabgehen, weil man 1 Teil reiches Gas mit p_0 Teilen Sauerstoff überhaupt nicht mehr aus y Teilen Anfangsgas ausschleudern kann, wenn diese nicht mindestens p_0 Teile Sauerstoff insgesamt enthalten.

Man sieht aus dem Beispiel, daß die thermodynamische Scheidungsarbeit recht klein ist. Sie ist insbesondere unter den Verhältnissen am geringsten, unter denen die Sauerstoffanreicherung absolut genommen (d. h. verglichen mit dem Zustand der freien Atmosphäre) am weitesten geht, nämlich wenn das Quantum der armen Gase sehr groß gegen das der reichen wird.

Man kann allerdings auch thermodynamische Scheidungsarbeit verschwenden. Dies geschieht dann, wenn man Gasschichten als armes Gas zusammengreift und abführt, welche um ihrer wesentlichen Abstandsverschiedenheit von der Rotationsachse willen merkliche Verschiedenheit der Zusammensetzung angenommen haben. Denn indem man diese Massen sich im Abführungskanal mischen läßt, macht man eine Trennung rückgängig, die unter Leistung thermodynamischer Arbeit bewirkt war. Der bezügliche Betrag wird aber nicht leicht von wesentlicher Bedeutung werden.

Das zweite Glied der Scheidungsarbeit ist der Energieverlust des abgenommenen Gases. Das Gas kann erstlich

die Arbeitsgröße $\frac{Mv^2}{2}$ verlieren, welche für das „reiche“ Gas, das wir als einheitlichen Stoff mit dem Molekulargewicht 30 behandeln wollen, bei 300 m/sec Umfangsgeschwindigkeit:

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{30 \cdot 9 \cdot 10^8}{2} = 135 \cdot 10^8 \text{ Erg} = 137 \text{ kg/m}$$

für 22,4 l von 0° und 760 mm ist. Das 41,5 fache dieser Größe entfällt auf jene Masse reichen Gases die bei 20° und 760 mm 1 cbm einnimmt. Die verlierbare lebendige Kraft auf

den Kubikmeter beträgt also unter diesen Bedingungen 5685 kg/m oder rund 0,02 PS Stunden. Das ist, wie man sieht, ein nicht eben großer Betrag. Bei einer 10—20 fachen Wiederholung des Vorganges in einem ebenso oft abgestuften Scheideprozeß aber würde er immerhin zu einem beachtenswerten Betrage anwachsen. Das reiche Gas kann zweitens die Volumenenergie verlieren, welche der lebendigen Kraft gleich ist, wodurch der verlierbare Arbeitsinhalt gleich dem doppelten des eben berechneten Betrages wird. Der verlierbare Arbeitsinhalt der „armen“ Gase kann außer Betracht bleiben, da für diese der entscheidende Wert v^2 einen ungemein viel kleineren Betrag hat.

Ob diese verlierbare Energie wirklich verloren geht, hängt von der Art der Gasabnahme ab. Es lassen sich aus dem Dampfturbinenwesen verschiedene Ideen für die Anordnung von Abführungsorganen schöpfen, deren Benutzung zu einer wenigsten teilweisen Ausnutzung dieses Energiebetrages statt zum vollständigen Verluste führen mag.

So bleibt noch das dritte Glied, die reine Reibungsarbeit oder Leerlaufarbeit des Gasscheiders. Für die Sauerstoffanreicherung eines Kubikmeters um 1% müssen wir, wenn unsere Diffusionsrechnung der Größenordnung nach richtige Resultate gibt, um runde Zahlen zu wählen eine etwa 1 m hohe Kammer mit 300 m/sec Umfangsgeschwindigkeit 1 Stunde laufen lassen.

Wir möchten vermuten, daß dieses dritte Glied zu Ungunsten des Gasscheiders besonders schwer ins Gewicht fällt. Denn die Angaben über die analoge Leerlaufarbeit großer Dampfturbinen nach De Laval¹⁸⁾ sprechen von mehreren PS, die allein durch Lagerreibung vernutzt werden.

5. Schlußbetrachtung.

Wir haben anknüpfend an die Angaben über die Konstruktion des Mazzaschen Gasscheiders das Problem der Gasscheidung durch Zentrifugalkraft nach verschiedenen Gesichtspunkten erörtert. Wir sind dabei von dem durch Bredig schon vor mehr als acht Jahren erreichten theoretischen und experimentellen Resultat ausgegangen, daß die Gasscheidung durch Zentrifugalkraft durchführbar ist. Wir haben die von Bredig zuerst gegebenen Beziehungen von Rotationsgeschwindigkeit und scheidender Wirkung auf einem anderen Wege abgeleitet und die Berechnung der Scheidungsarbeit und Scheidungsgeschwindigkeit hinzugefügt. Wir sind zu dem Resultate gelangt, daß die Kon-

¹⁸⁾ Stodola: Die Dampfturbinen, Berlin, 1903, 109.

struktion eines einstufigen Gasscheiders für die Luftsecheidung keinen Erfolg verspricht, weil die Rotationsgeschwindigkeiten, die für erhebliche Wirkung erforderlich sind, mit den üblichen Konstruktionsmaterialien nicht erreichbar sind. Eine mehrstufige Luftsecheidung durch eine Serie auf eine Achse gesetzter Zentrifugalkammern fanden wir ungeeignet, weil die Kammern und damit die Rotationsachse eine überaus große Länge haben müßten, wenn in der Zeiteinheit mit praktisch erreichbaren Umfangsgeschwindigkeiten ein nennenswertes Quantum angereicherter Luft produziert werden sollte. Bezüglich der Arbeitsgrößen stellten wir fest, daß die Scheidung theoretisch nur kleinen Arbeitsaufwand fordert, daß aber bei vielstufiger Scheidung eine recht ansehnliche Energiemenge nebenher leicht vernutzt werden kann, so daß auch in dieser Richtung Bedenken bestehen.

Alle diese Schwierigkeiten liegen an dem Umstande, daß der Dichteunterschied der zu scheidenden Gase bei der Luft ein relativ sehr kleiner ist. Ein etwa dreißigfach größerer Dichteunterschied der zu schei-

denden Gase würde die Dinge in wesentlich anderem Lichte erscheinen lassen. Ebenso würde das Urteil ein anderes sein, wenn Konstruktionsmaterialien von wesentlich größerer Festigkeit, als zurzeit geläufig ist, erzeugt und verwendet werden könnten. Die bisher bei den Angaben über den Mazzaschen Scheider ganz vernachlässigte Frage nach der Scheidungsgeschwindigkeit führt dazu, die Zukunft der Gassecheidung auf der Zentrifuge besonders aus dem Grunde mit Bedenken anzusehen, weil die Herstellung des Anreicherungs Zustandes von dem langsamen Vorgang der Gasdiffusion abhängt. Man wird sich erinnern, daß früher Grahams Beobachtungen¹⁹⁾ zu technischen Vorschlägen²⁰⁾ geführt haben, die Luftdiffusion durch dünne Kautschukhäute zur Gewinnung sauerstoffreichen Gases zu benutzen, und daß diese Vorschläge wegen der Langsamkeit des Vorganges erfolglos geblieben sind. Es scheint also nicht viel Aussicht vorhanden, daß die Gaszentrifuge technische Bedeutung gewinnt. Heidelberg und Karlsruhe, Dezember 1903.

¹⁹⁾ Compt. r. de l'academie 63, 471 (1866).

²⁰⁾ Wagner-Fischers Jahresbericht 1867, 216, D. R. P. 17981. Franz. Pat. 116260.

Sitzungsberichte.

Die American Chemical Society, N. Y. Section, hielt ihre Februarsitzung am 5. Februar ab. Auf dem Programm stand ein Vortrag des Leiters der Wm. H. Nichols Co. und Chefchemikers der General Chemical Co., Herrn J. B. F. Herreshoff über: „Die Erziehung von technischen Chemikern“. Der Vortragende beschrieb in klarer und ausführlicher Weise wie wichtig die technische Chemie für den Nationalwohlstand eines Landes sei, und, daß dieselbe in Deutschland beherrsche. Deutschland verdankt diese führende Stellung vor allen Dingen der sachgemäßen Erziehung seiner Chemiker. Für amerikanische Verhältnisse, meinte der Vortragende, sollten drei Arten Chemiker erzogen werden, nämlich die analytischen, die wissenschaftlichen und die Betriebschemiker, welch letztere sowohl Chemiker als Ingenieure sein sollten. In der Debatte hoben die Universitätsprofessoren, wie Chandler (Columbia), Arthur A. Noyes (Massachusetts Institute of Technology), Wm. A. Noyes (Johns Hopkins) auf der einen Seite hervor, daß es unmöglich sei, innerhalb vier Jahren Chemie und Ingenieurwesen zu lehren, auf der andern Seite betonten die Fabrikanten, wie Wm. H. Nichols (Präsident General Chemical Co.), T. J. Parker (General Co.), Dr. Mc Murtrie (Royal Baking Powder Co.), M. C. Whitaker (Welsbach Light Co.) die Wichtigkeit der Kenntnis des Ingenieurwesens bei den Betriebschemikern, die ohne dieselbe hilf-

los daständen. Dr. Wm. J. Schieffelin (Schieffelin & Co.) hebt hervor, daß die Kenntnis von Sprachen, namentlich der deutschen und französischen, nötig seien, und daß, ohne Deutsch zu können, ein Chemiker nur wenig leisten könne, da alle wichtigen Veröffentlichungen in deutscher Sprache erfolgen und namentlich Nachschlagbücher, wie „Dammer“ und „Beilstein“, unentbehrlich beim chemischen Arbeiten seien. Schließlich führte Dr. H. Schweitzer (Elberfelder Farbenfabriken) aus, daß Spezialisierung heutzutage auf allen Gebieten zu den größten Erfolgen geführt habe, und daß es daher ein Unding sei, wenn die Fabrikanten technische Chemiker auf den Universitäten ausgebildet haben wollen, die Chemiker und Mechaniker seien. Sie sollten darauf bestehen, daß die Universitäten tüchtige Chemiker erziehen, die dann als Angestellte der Fabrik in ein oder zwei Jahren sich genügende mechanische Kenntnisse erwerben könnten, um Betriebe sachgemäß zu leiten. Nachdem noch Prof. Bogert (Columbia) ausführte, wie wichtig die wissenschaftlichen Chemiker in den Betrieben seien, und wie wenige in amerikanischen Fabriken angestellt seien, wird die Sitzung geschlossen.

Die N. Y. Section der Society of Chemical Industry hielt die Februarsitzung am 19./2. ab. Herr Dr. S. S. Sadtler sprach über: „Eine Methode zur Bestimmung der Aldehyde in einigen ätherischen Ölen“. Herr Frederic S. Hyde über: „Graphit-