

Die Oxydation des Stickstoffs der Luft*).

Von Dr. O. SCHÖNHERR.

(Eingeg. d. 1./7. 1908.)

Im Programm steht als Titel meines Vortrages: „Die Oxydation des Stickstoffs der Luft“. Ich möchte ihm lieber den Titel geben: „Die Herstellung von Salpeter nach dem Verfahren der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik.“

Die Herstellung von künstlichem Salpeter ist ein ganz neuer Zweig der chemischen Technik und es würde interessant sein, die Entwicklungsgeschichte dieser neuen Industrie etwas ausführlicher zu schildern. Wenn ich dies nicht tue, sondern mich in meinen Darlegungen hauptsächlich auf die Herstellung des Salpeters nach dem Verfahren der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik beschränken will, so geschieht das aus dem Grunde, weil es ganz unmöglich sein würde, im Rahmen eines knappen Vortrages den Gegenstand erschöpfend zu behandeln oder auch nur in allen seinen Umrissen klar zu zeichnen. Ich kann auch um so eher darauf verzichten, als in den letzten Jahren bald die theoretische, bald die wirtschaftliche, bald die technische Seite des Gebietes eingehender in Veröffentlichungen und Vorträgen dargestellt wurde. Wer sich für diesen Gegenstand näher interessiert, ist daher in der Lage, durch Studium der Fachliteratur sich selbst ein getreues Bild zu verschaffen. Über das Verfahren der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik ist indessen außer durch die veröffentlichten Patentschriften bisher noch wenig in die Öffentlichkeit gedrungen, und da ich in der Lage bin, Ihnen dieses Verfahren durch Experimente zu erläutern, die hier zum ersten Male einem größeren Kreise vorgeführt werden, so rechtfertigt sich die Beschränkung meines Vortrages.

Bevor ich auf das Verfahren selbst eingehe, will ich einige Worte über die wirtschaftliche Bedeutung der neuen Industrie vorausschicken.

Mit berechtigtem Stolz blicken wir auf die Entwicklung der Technik in den letzten Jahrzehnten. Fast alle Zweige des gewerblichen Schaffens haben eine gründliche Umgestaltung erfahren. Mit Wunderschnelligkeit durchheilen wir Länder und Meere, mit der Schnelligkeit des Blitzes übertragen wir unsere Gedanken in weite Fernen. Das Ende dieser Entwicklung ist nicht abzusehen und wer weiß, was uns die nächste Zukunft noch alles bringen mag. Wenn wir infolge dieser glänzenden Entwicklung instande sind, unser Leben reichhaltiger zu gestalten und uns mit tausenderlei Annehmlichkeiten zu umgeben, die sich die Menschen früherer Jahrhunderte ver-

sagen mußten, so ist gleichwohl ein wichtiger Zweig im wesentlichen unverändert geblieben: die Beschaffung unseres täglichen Brotes. Wie vor Jahrtausenden, so sind wir auch heute noch auf den fruchtbaren Boden der Mutter Erde angewiesen, ihm entspringt unsere Nahrung unter dem Einflusse der belebenden Sonnenstrahlen.

Und dies wird auch immer so bleiben. Es ist nicht anzunehmen, daß es uns jemals gelingen wird, die menschlichen Nahrungsmittel in großem Maßstabe in chemischen Fabriken herzustellen, in derselben Weise, wie man so viele andere Naturprodukte künstlich herzustellen gelernt hat. Wenn die Lösung dieses Problems auch nicht als undenkbar bezeichnet werden kann, so ist seine Lösung doch deshalb unwahrscheinlich, weil alle Kraftquellen der Erde nicht hinreichen würden, um die gewaltige Sonnenenergie zu ersetzen, die sich als Pflanzenleben alljährlich auf dem Erdball in Nahrungsmittel verwandelt. Die Bodenflächen aber, die zur Hervorbringung von Getreide geeignet sind, haben einen beschränkten Umfang, und die Zeit rückt mit Naturnotwendigkeit heran, wo die Erde nicht mehr ohne weiteres instande sein wird, genügende Nahrungsmittel für das immer zahlreicher heranwachsende Menschengeschlecht hervorzubringen. Wir gehen also einer allgemeinen Hungersnot entgegen, wenn es nicht gelingt, dem Boden reichere Ernte abzugewinnen. Das letztere ist aber möglich; wir können den Ertrag des Bodens nahezu verdoppeln, und wir kennen auch schon seit langer Zeit die Mittel hierzu. Wir brauchen nur die Lehren unseres Altmeisters Liebig zu befolgen und dem Ackerboden Kali, Phosphorsäure und Stickstoff in genügenden Mengen zuzuführen. Nun werden nach menschlichem Ermessen die Vorräte an Phosphorsäure und Kali kaum erschöpft werden, da sie wesentliche Bestandteile unserer Erdrinde bilden. Nicht so günstig liegen die Verhältnisse bei dem Stickstoff. Wohl sind wir von ungeheuren Mengen dieses Stoffs in unserem Luftmeer umgeben, aber leider vermag die Pflanze nicht ohne weiteres aus dieser Quelle zu schöpfen. Es sind nur einige Bakterien, die in den Wurzelknollen der Leguminosen leben, die den Stickstoff der Luft direkt zu pflanzlichen Stoffen verarbeiten können. Den übrigen Pflanzen muß der Stickstoff in gebundener Form dargeboten werden, und bei Deckung dieses Bedarfes zehren wir bisher von der aufgespeicherten Sonnenenergie verflüssigter Zeitperioden. Zwei Quellen sind es, aus denen wir schöpfen. Die eine ist die Steinkohle, aus der wir durch Destillation Ammoniak gewinnen. Da aber diese Gewinnung von Ammoniak an die Herstellung von Gas und Koks gebunden ist, so erhalten wir diesen Pflanzennährstoff nur als Nebenprodukt und sind daher außerstande, beliebig große Mengen davon zu erzeugen. Sie genügen bei weitem nicht, um auch nur annähernd den für die Bodenkultur erforderlichen

*) Vortrag, gehalten in der Festsitzung der Hauptversammlung des Vereins deutscher Chemiker zu Jena am 11. Juni 1908.

Stickstoff zu liefern. Die zweite Quelle fließt viel reichlicher. Es ist dies der Chilesalpeter, der in den regenlosen Zonen Chiles in früheren Jahrtausenden abgelagert wurde, und der dort durch eine verhältnismäßig einfache Aufbereitung gewonnen wird. Leider ist diese Quelle nicht unerschöpflich. Ängstliche Gemüter prophezeien ihre Erschöpfung schon in wenigen Jahrzehnten. Wenn aber auch der Zeitpunkt, an dem das letzte Schiff mit Salpeter die chilenische Küste verläßt, erst sehr viel später eintreten mag, einen Mangel an diesem wertvollen Düngemittel werden wir schon bald verspüren, bevor die Lager vollständig erschöpft sind. Der Bedarf der Landwirtschaft an Salpeter steigt nämlich viel rascher, als es möglich ist, ihn zu befriedigen, da es infolge von Streiks und aus anderen Ursachen nicht gelingt, die Produktion schnell genug zu steigern. Die Salpeterpreise sind daher in den letzten Jahren fortdauernd gestiegen. Um welche gewaltige Quantitäten es sich handelt, will ich Ihnen an unseren heimischen Verhältnissen erläutern. Die deutsche Landwirtschaft braucht jetzt nahezu 500 000 t Salpeter im Jahre. Sie produziert ungefähr 25 Mill. Tonnen Getreidekörner. Damit können wir unseren Bedarf nicht decken, wir müssen vielmehr noch etwas über 4 Mill. Tonnen Getreide einführen, die wir selbst erzeugen könnten, wenn wir durch verbesserte Kultur und durch vermehrte Düngung anstatt der jetzigen 18 dz 21 dz pro ha Getreide erzeugen würden. Eine derartige Steigerung ist nach Prof. Wagner sehr gut möglich. Sie erfordert aber einen Mehraufwand von etwa 160 000 t Stickstoff zur Düngung, die 1 Mill. Tonnen Salpeter im Werte von über 200 Mill. Mark entsprechen würden. Die Gesamtproduktion Chiles beträgt jetzt aber nur 1 800 000 t. Die Lager würden in kürzester Zeit erschöpft sein, wenn ihnen soviel größere Mengen entnommen würden. Bedenkt man, daß auch die anderen Länder mehr und mehr zur Düngung mit Chilesalpeter übergehen, so versteht man, daß hier gründliche Abhilfe geschaffen werden muß. Als Stickstoffquelle kann nur die atmosphärische Luft in Frage kommen, und man darf deshalb wohl behaupten, daß der Technik noch niemals ein Problem von größerer Wichtigkeit gestellt wurde, als das Problem, den Stickstoff der Luft in eine Form überzuführen, die als Pflanzennährstoff dienen kann. Dieses Problem hat unsere Zeit gelöst. Wir können der Zukunft ruhig entgegensehen, denn schon heute ist es der Technik auf zwei verschiedenen Wegen möglich, aus dem Stickstoff der Luft Pflanzennährstoffe herzustellen.

Der eine Weg liefert uns den Kalkstickstoff. In seinem Düngewert steht dieser dem Ammoniak nahe, dessen Stickstoff bekanntlich erst im Boden mit Hilfe der sogen. Nitrifikationsbakterien in salpetersaure Verbindungen übergeführt werden muß, die allein von den Pflanzen in organische Substanz umgewandelt werden können. Der andere Weg liefert uns direkt diese salpetersauren Salze.

Schon lange war es bekannt, daß sich der Stickstoff mit dem Sauerstoff verbindet, daß Salpetersäure entsteht, wenn man elektrische Funken durch feuchte Luft schlagen läßt. Diese Beobachtung datiert schon aus dem Jahre 1785, wo sie von Priestley gemacht, von Cavendish näher untersucht wurde. Natürlich konnte in jenen

frühen Zeiten niemand auf den Gedanken kommen, daß es möglich sein würde, mit Hilfe von Elektrizität große Mengen Salpetersäure so herzustellen, denn damals standen ja noch keine mächtigen Elektrizitätsquellen zur Verfügung. Dazu war erst die Erfindung der Dynamomaschine und die ganze wunderbare Entwicklung der Elektrotechnik nötig.

Nach dem heutigen Stande der Theorie betrachtet man den Vorgang, durch den die Verbindung des Stickstoffs mit dem Sauerstoff zu Stickstoffoxyd erfolgt, nicht als eine spezielle Eigenschaft der elektrischen Energieform, sondern als eine reine Wärmewirkung.

Muthmann und Hofer haben diese Anschauung zuerst geäußert und rechnerisch verfolgt, Nernst und seine Schüler haben sie durch genauere Messungen bestätigt und die den Vorgang charakterisierende Gleichgewichtskonstante ermittelt.

Wie bei allen endothermisch, d. h. unter Wärmeverbrauch verlaufenden Reaktionen bildet sich von dem Körper hier, also Stickoxyd, umso mehr, je höher die Temperatur ist. Jeder Temperatur ist aber ein ganz bestimmter Gleichgewichtszustand eigen, der auch bei noch so langem Erhitzen nicht überschritten werden kann, da sich nach Erreichung dieses Zustands in jeder Zeiteinheit ebensoviel Stickoxyd wieder zersetzt, als sich neu bildet.

Ich will auf diese theoretische Seite nicht näher eingehen, sondern nur ganz kurz erwähnen, daß sich bei 3000° aus Luft 4,5 Vol.-% Stickoxyd bilden können, bei 1800° dagegen nur 0,7%. Man sieht daraus, daß man eine recht hohe Erhitzung anstreben muß. Da aber zugleich mit der Temperatur außer der Konzentration auch die Reaktionsgeschwindigkeit wächst, und zwar die Zersetzungsgeschwindigkeit ebenso wie die Bildungsgeschwindigkeit, so hat man, wenn man Stickoxyd in größerer Konzentration erhalten will, zwei sich recht widersprechende Aufgaben zu lösen. Einmal muß man das Stickstoff-Sauerstoffgemisch auf sehr hohe Temperatur bringen, da nur bei dieser eine große Konzentration zu erreichen ist, zweitens muß man die hocheerhitzte Gasmasse ganz plötzlich abkühlen, um Verluste durch Rückzerersetzung möglichst zu vermeiden. Wir werden später sehen, daß gerade das Verfahren der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik diesen beiden Forderungen besonders gut Rechnung zu tragen gestattet. Ich will nicht unerwähnt lassen, daß in neuerer Zeit von anderen Seiten Zweifel laut geworden sind, ob nicht auch noch eine spezifisch elektrische Wirkung vorliegen könne, doch scheint diese Wirkung, wenn sie bei unserm Verfahren überhaupt vorhanden ist, hier nur von ganz untergeordneter Bedeutung zu sein.

Wenn die Bildung von Stickoxyd, das immer als erstes Produkt bei der Vereinigung von Stickstoff und Sauerstoff in der Hitze entsteht, nur eine Wärmewirkung ist, so muß es natürlich auch möglich sein, durch andere Erhitzungsarten diesen Körper herzustellen, und tatsächlich gelingt dies. Schon Bunsen hat die Beobachtung gemacht, daß sich beträchtliche Mengen von Stickoxyd bilden, wenn man Wasserstoff mit Luft explodieren läßt. Es braucht uns deshalb nicht zu wundern, daß in den letzten Jahren zahlreiche Patente darauf genommen wurden, um durch Verbrennen

von gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffen Stickoxyd zu erzeugen. Andere suchen wieder durch Kompression von Luft, mit und ohne Zufuhr weiterer Energiemengen, die nötige hohe Temperatur hervorzubringen.

Bis jetzt ist es nur mit Hilfe elektrischer Erhitzung möglich gewesen, in technisch durchführbarer Weise Stickoxyd und damit auch Salpetersäure und salpetersaure Salze zu erzeugen. Dies ist auch begreiflich, da, wie erwähnt, die Ausbeute nach der Theorie um so höher werden muß, je höher die Temperatur ist, auf die das Stickstoff-Sauerstoffgemisch erhitzt wird. Die höchsten uns zugänglichen Temperaturen erreichen wir aber mit dem elektrischen Lichtbogen. Außerdem bietet gerade diese Erhitzungsart am bequemsten die Möglichkeit, starke Temperaturgefälle zu erzeugen, d. h. Stellen höchster Temperatur neben Stellen niedriger Temperatur anzuordnen, womit ja eine zweite Forderung der Theorie erfüllt wird.

Die ersten Versuche im größeren Maßstabe zur Herstellung von Salpetersäure mittels des elektrischen Lichtbogens wurden in Amerika gemacht. Sie endigten indessen sehr bald mit einer vollständigen Einstellung des Betriebes. Ich will nicht auf die Beschreibung des dort benutzten Apparates eingehen und muß ebenso auf die Beschreibung der vielen anderen Apparate verzichten, die von den verschiedenen Erfindern zur Lösung der Aufgabe konstruiert wurden. Ich würde heute nicht fertig werden und dürfte in die Gefahr kommen, nicht jede Erfindung gebührend gewürdigt zu haben, denn allein in Deutschland wurden in den letzten Jahren gegen 40 Patente auf diesem Gebiete angemeldet. Charakteristisch ist, daß die älteren Apparate mit Funkenentladungen, die späteren dagegen mit Lichtbogen arbeiten, und zwar vorwiegend mit Lichtbogen von sehr kleinem Energieinhalt. Es ist dabei immer das Bestreben erkennbar, recht viel Luft auf ganz kurze Zeit mit den elektrischen Entladungen in Berührung zu bringen, und meist wird noch besonders Wert auf Einrichtungen gelegt, die es ermöglichen sollen, daß die einzelnen Luftteilchen nicht wiederholt der Einwirkung der elektrischen Erhitzung ausgesetzt werden. Die Aufteilung einer großen Energiemenge in viele kleine Lichtbogen bietet aber ganz ungeheuer große technische Schwierigkeiten, und die meisten Vorschläge sind deshalb an der Kostspieligkeit der erforderlichen Apparatur gescheitert.

Die neue Industrie wird sich hauptsächlich da entwickeln können, wo große und billige Wasserkräfte vorhanden sind, wie dies z. B. in Norwegen der Fall ist. Dort sind bis heute in den technischen Großbetrieb zwei Verfahren übergeführt, das Verfahren von Birkeland und Eyde und das Verfahren der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik.

Bei dem Verfahren von Birkeland und Eyde werden in rascher Folge Lichtbogen von großer Stromstärke zwischen zwei sich nahe gegenüberstehenden Elektroden gebildet, durch den Einfluß kräftiger Elektromagnete seitwärts getrieben und damit zu großer Länge ausgedehnt, wobei für das Auge die Erscheinung einer großen elektrischen Sonne entsteht. Sie sehen diese elektrische Sonne unten auf dem Titelblatt der Einladung abgebildet.

Das Verfahren ist wiederholt von verschiedenen Seiten in öffentlichen Vorträgen genau beschrieben worden, am ausführlichsten von Prof. Birkeland selbst¹⁾, so daß ich mich mit dieser kurzen Erwähnung begnügen kann. Es war dies das erste Verfahren, das sich mit Erfolg in den Großbetrieb übertragen ließ, da es in einem Ofen Energiemengen von 1000 PS. auszunutzen gestattet. Mit allen anderen Verfahren hat es das Gemeinsame, daß die Luft im wesentlichen quer zur Hauptausdehnung des Lichtbogens, d. h. möglichst durch diesen selbst hindurch geführt wird.

In der Tat, man sollte nicht erwarten, daß eine andere Art der Luftbewegung für den Zweck überhaupt in Betracht kommen könnte, denn wenn man die Luft nur sehr kurze Zeit mit einem Lichtbogen in innige Berührung bringen soll, so erscheint es am natürlichsten, sie quer durch den Lichtbogen hindurchzutreiben.

Bei dem Verfahren der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik finden wir aber eine ganz andere Art der Luftbewegung. Bei ihm werden Lichtbogen von großer Stromstärke und bis dahin noch niemals dargestellter Länge verwendet. Aber diese Lichtbogen brennen ganz ruhig, und man gibt sich ganz besonders Mühe, sie möglichst wenig durch die Bewegung der Luft aus ihrer Lage zu bringen, indem man die Luft in der Längsausdehnung des Lichtbogens an diesem entlang führt. Das ist ein so vollständiges Brechen mit dem Hergebrachten, daß es nicht an Stimmen gefehlt hat, welche glaubten, die gewerbliche Verwendbarkeit unseres Verfahrens glattweg bestreiten zu dürfen und zwar merkwürdigerweise unter Anführung diametral sich gegenüberstehender Gründe. Die einen sagen, bei dieser Art der Luftführung komme die Luft nicht genügend mit dem Lichtbogen in Berührung, nach Meinung der anderen dagegen bleibt sie zu lange mit ihm in Berührung.

Nun, wir haben inzwischen den Beweis erbracht, daß unser Verfahren mit jedem anderen Verfahren erfolgreich in Konkurrenz treten kann. Das Prinzip des Verfahrens besteht, wie schon angedeutet, darin, an einem ruhig brennenden Lichtbogen von großer Länge die zu behandelnden Gase entlang zu leiten, den Lichtbogen gleichsam mit einem sich vorwärts bewegendem Gasmantel zu umgeben. Der Apparat, mit dem das Verfahren ausgeführt wird, ist ebenso einfach wie das Prinzip. Er besteht im wesentlichen aus einem Rohr, in dessen Achse der lange Lichtbogen ruhig brennt, umgeben von dem Mantel der umzuwandelnden Gase. Das Rohr selbst und die Luftbewegung in demselben muß nur so angeordnet werden, daß eine einseitig auf den Lichtbogen gerichtete Bewegung so vollkommen wie möglich vermieden wird, dagegen macht es z. B. nichts, wenn von zwei entgegengerichteten Stellen oder allseitig durch einen Schlitz Luft gleichstark gegen den Lichtbogen geführt wird, da hierdurch der Lichtbogen in seiner Lage nicht gestört wird.

Es gibt nun aber eine Art der Luftbewegung, die ganz besonders vollkommen diese Bedingung erfüllt. Wir haben sie daher bei unserem Verfahren im Großbetrieb fast ausschließlich verwendet. Sie

¹⁾ Transaction of the Faraday Society 2 (1906).

gestattet uns, ganz enorm lange Lichtbogen herzustellen, die gleichwohl so stabil sind, daß sie wochenlang ohne Neuzündung zu brennen vermögen. Es ist das eine Luftbewegung, wo trotz raschester Bewegung in allen übrigen Teilen gerade der Teil in Ruhe verharret, den der Lichtbogen einnehmen soll. Sie alle kennen diese Art der Bewegung, es ist die Wirbelbewegung. Sie alle wissen, mit welcher verheerender Gewalt Wirbelstürme gewisse Gegenden der Erde in erschreckender Regelmäßigkeit heimsuchen. Wie ein starres Gebilde schreiten sie viele Meilen weit über das Land, alles vor sich niederwerfend. Nichts vermag ihrer Wucht zu widerstehen, und doch führen sie im Zentrum ein Gebiet der Windstille mit sich.

Diese Erscheinung haben wir uns zu nutze gemacht. Wir erzeugen in unseren Röhren einen solchen Luftwirbel in kleinen, eng begrenzten Dimensionen, und in seinem ruhigen Zentrum lassen wir den Lichtbogen brennen. An ihm eilen die Luftteilchen in schneller, schraubenförmiger Bewegung entlang und werden dabei in der gewünschten Weise verändert. Auf diese Weise können Lichtbogen von fast beliebiger Länge in ruhigem Brennen erhalten werden.

Das Rohr kann aus beliebigem Material bestehen. Wir nehmen z. B. ein ganz gewöhnliches eisernes Gasrohr. An dem einen Ende wird im Innern des Rohres eine vom Rohr selbst isolierte Elektrode angebracht und von diesem Ende her die Luft eingeführt. Die isolierte Elektrode verbindet man mit dem einen Pol einer Hochspannungsstromquelle und das Rohr selbst mit dem anderen Pol. Die Wirbelbewegung der Luft erzeugt man in der einfachsten Weise durch tangential Einführung. Nun entzündet man in beliebiger Weise den Lichtbogen. Die mannigfachen Wege, wie dies geschehen kann, will ich hier nicht alle anführen, sie sind jedem Fachmann geläufig.

Es ist dies bei unserem Verfahren ziemlich gleichgültig, denn der einmal entzündete Lichtbogen kann, wie erwähnt, wochenlang brennend erhalten werden, ohne einer Neuzündung zu bedürfen. In der allereinfachsten Form kann das Zünden so geschehen, daß man den Abstand zwischen Rohr und Elektrode so klein macht, daß er von der Spannung, die bei unterbrochenem Strom an und für sich im Stromkreis herrscht, von selbst durchschlagen wird. Da einem jeden Lichtbogen ein induktiver Widerstand vorgeschaltet sein muß, der zum ruhigen Brennen durchaus erforderlich ist und der auch bei jeder gewöhnlichen Wechselstrom-Bogenlampe vorhanden ist, so sinkt nach Entzündung des Bogens die Spannung zwischen Elektrode und Rohr sogleich um einen gewissen Betrag, und es kann bei der verminderten Spannung kein neues Durchschlagen mehr stattfinden, solange der Bogen brennt. Erlischt er aus irgend einer Ursache, so erfolgt die Zündung ganz von selbst unter der sodann wieder auftretenden höheren Spannung. Bei dieser Zündungsweise tritt die Luft unterhalb der Elektrode in das Rohr ein, sie treibt das eine Ende des zunächst ganz kurzen Lichtbogens an der Rohrwand rasch vor sich her, und so resultiert, sobald die Erscheinung stabil geworden ist, was so schnell vor sich geht, daß der Vorgang kaum mit dem Auge verfolgt werden kann, ein ruhig in der Achse des Rohres brennender Licht-

bogen, der weit von der zentral angebrachten Elektrode erst sein Ende an der Rohrwand findet, d. h. nämlich, wo die Gase so heiß geworden sind, daß sie genügend Leitfähigkeit angenommen haben und dann durchschlagen werden. Es kommt ganz auf die gewählten Verhältnisse an, wo das stattfindet. Die Stelle, an der der Lichtbogen endet, muß natürlich gekühlt werden, entweder mit Wasser oder auf eine sonst geeignete Weise.

Die eben geschilderte Art der Zündung erfordert einen sehr engen Zwischenraum zwischen Rohr und Elektrode. Hierbei wird ein gewisser Druck der eingeführten Luft zum Passieren der engen Stelle gebraucht. Man vermeidet diesen Übelstand, indem man den größten Teil der Luft oberhalb der Elektrode einführt, oder indem man den Zwischenraum weiter macht und in irgend einer Weise zwischen Rohr und Elektrode einen vorübergehenden Kurzschluß herstellt, z. B. durch einen von außen eingeführten Stab oder auch durch überschlagende Induktionsfunken, durch eine Stichflamme u. dgl. mehr. Hierauf kommt gar nichts an, da, wie gesagt, der einmal entzündete Lichtbogen, wenn alles sachgemäß ausgeführt wurde, ohne zu verlöschen ruhig brennen bleibt. Das Rohr kann indessen auch aus nicht leitendem Material, z. B. Schamotte bestehen; dann muß man durch vorübergehende Annäherung einer zweiten Elektrode den Lichtbogen bilden oder durch Anbringung eines Leiters entlang der Rohrwand für Überbrückung des Zwischenraumes zwischen den Elektroden sorgen.

Sie sehen hier drei kleine Demonstrationsöfen mit Glasröhren aufgestellt. In zwei der Röhren ist innen ein schraubenförmig gewundener Draht angebracht, der mit dem oberen metallischen Kopf des Apparates, der die zweite Elektrode bildet, leitend verbunden ist. Die schraubenförmige Windung ist nur deshalb gewählt, damit sich der Draht fest gegen die Rohrwand legt. Am unteren Ende steht dieser Draht nur ganz wenig von der in der Achse des Rohres angebrachten Elektrode ab, so daß sich unter der im Stromkreis herrschenden Spannung hier ein Lichtbogen bilden kann. Dieser Apparat veranschaulicht den Fall, daß das Rohr aus einem Metall besteht. Man kann sich vorstellen, daß von der gesamten metallischen Wand nur noch der Draht übrig geblieben ist. In einem ganz aus Metall bestehenden Apparat könnten sie das rasche Hochklettern des Lichtbogens nicht wahrnehmen. Ich lasse jetzt die Luft mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch einen tangentialen Stutzen unterhalb der Stelle, wo sich Elektrode und Draht auf kurze Entfernung gegenüberstehen, einströmen und gebe nun Hochspannung auf die untere Elektrode, indem ich einen Ausschalter hineinlege. Sie werden dann sofort den einen Endpunkt des Lichtbogens am Draht hochklettern sehen, und es resultiert ein geschwungener, ruhig wie eine Kerze oder wie eine Gasflamme brennender Lichtbogen. Es ist dies auch tatsächlich eine Gasflamme, was Sie sehen, nämlich brennender Stickstoff. Der Lichtbogen selbst, d. h. der Teil, in dem die elektrische Leitung hauptsächlich stattfindet, ist an sich viel dünner, wovon man sich überzeugen kann, wenn man ein einheitliches Gas, z. B. Stickstoff allein durch den Apparat leitet. Die schwache Deformation des Lichtbogens ist dadurch hervorgerufen, daß die Luft in eingängiger Schrau-

benbewegung das Rohr durchströmt. Würde man sie aus mehreren Öffnungen oder gleichmäßig im ganzen Umfange zuströmen lassen, so würde der Lichtbogen ganz geradlinig brennen. Ich bitte Sie, zu beachten, daß der Lichtbogen den Draht während des Brennens nicht berührt, sondern nur bei der Zündung.

Bei dem anderen Apparat ist kein Draht im Innern des Rohres angebracht. Hier muß ich den Lichtbogen dadurch anzünden, daß ich den Abstand zwischen den beiden Elektroden durch vorübergehende Verbindung mittels eines Drahtes überbrücke. Die Lichtbögen in den kleinen Apparaten verbrauchen ungefähr 4 Amp. bei 3000 Volt, also rund 16 PS. elektrische Energie. Das Produkt, das hierbei entsteht, sehen Sie in den eingeschalteten Schaufflaschen als gelbbraunen Dampf.

Bekanntlich bildet sich im Lichtbogen primär farbloses Stickoxyd, daß sich dann beim Abkühlen infolge des überschüssig vorhandenen Sauerstoffs weiter zu NO_2 oxydiert. Im Großbetrieb werden diese nitrosen Gase, nachdem sie zuvor zur Heizung von Dampfkesseln gedient und sich hierbei abgekühlt haben, durch Rieseltürme mit Wasser geschickt, wo sie sich in Salpetersäure umwandeln, die zur Auflösung von Kalkstein dient. Es resultiert so eine Lösung von salpetersaurem Kalk, die mittels Dampf im Vakuum eingedampft wird. Dieser Kalksalpeter ist als Düngemittel dem Chilesalpeter in jeder Beziehung ebenbürtig, auf kalkarmen Böden sogar überlegen.

Nachdem in den Jahren 1905/07 die Einzelheiten unserer Öfen in Ludwigshafen mit immer größeren Energiemengen ausprobiert waren, setzten wir im Herbst v. J. in Christianssand in Süd-norwegen eine Versuchsfabrik mit 2000 PS. in Gang, um im Dauerbetrieb unsere Öfen zu erproben. Dort in Christianssand sind jetzt drei Öfen in ständigem Betrieb. Die Länge der Flamme beträgt ca. 5 m, ihr Energieinhalt etwa 600 PS., vorübergehend haben wir auch schon einen Ofen von 700 Kw., also annähernd 1000 PS. in Betrieb gehabt. Diese riesigen Lichtbögen sind genau so leicht und sicher im Brennen zu erhalten, wie die viel kleineren, die ich Ihnen hier vorführte. Es ist das um so überraschender, wenn man bedenkt, daß in ihnen Wechselstrom von 50 Perioden zum Ausgleich kommt, daß also der Strom hundertmal in der Sekunde aussetzt, jedesmal wenn er den Nullwert passiert, um dann sofort die lange Bahn in entgegengesetzter Richtung wieder zu durchfließen, ohne daß eine Neuzündung nötig wurde. Diese technischen Öfen sehen allerdings etwas anders aus, als die hier vorggeführten Demonstrationsöfen. Bei ihnen wird die Luft in systematischer Weise durch die abgehenden heißen Gase vor ihrem Eintritt in das eigentliche Elektrodenrohr auf ca. 500° vorgewärmt. Das Prinzip ist aber schließlich das gleiche. Wesentlich für den guten Effekt ist außerdem eine richtige Dimensionierung der Rohre und eine gleichmäßige Luftführung, sowie eine gute Kühlung im oberen Teil, wo die Gase abgeschreckt werden müssen. Das läßt sich alles bei unseren Öfen, wie Sie sehen, ganz besonders leicht ausführen. Die Haltbarkeit der Öfen ist eine sehr große. Der einzige Teil, der einem schnelleren Verschleiß unterworfen ist, ist die untere Elektrode, die wir bei den technischen Öfen übrigens

noch besonders mit Wasser kühlen. Sie kann in ihrer einfachsten Form wie bei den hier stehenden Demonstrationsöfen, aus einem nachstellbaren Eisenstab bestehen; es können aber auch andere Materialien, auch Leiter zweiter Klasse, z. B. Zirkonoxyd, als Elektroden Verwendung finden.

Unser Verfahren zeichnet sich vor allen anderen bekannten Verfahren dadurch aus, daß es bei einer vorzüglicher Ausnützung der elektrischen Energie gleichzeitig relativ hohe Gaskonzentrationen ergibt, wodurch die Absorption wesentlich erleichtert wird. Die Apparatur ist außerordentlich einfach und billig. Bewegliche Teile, kostspielige Magnete u. dgl. sind nicht vorhanden, und infolge des ruhig brennenden Lichtbogens ist auch der elektrische Leistungsfaktor hoch.

Nicht lange mehr wird es dauern, bis überall, wo die Verhältnisse es gestatten, Salpeterfabriken entstehen. Es dürfte allgemein bekannt sein, daß wir uns mit den Besitzern des Birkeland-Eydeschen Verfahrens zu gemeinsamer Arbeit vereinigt haben. In Norwegen befinden sich bereits 120 000 PS. für diesen Zweck im Ausbau. Die neue Industrie ist allerdings an das Vorhandensein besonders billiger Kraftquellen gebunden, aber gerade dadurch leistet sie Pionierdienste und erschließt der Industrie Gegenden, die ohne das plötzlich auftauchende Bedürfnis nach großen Mengen billiger Energie noch viele Jahrzehnte im Dornröschenschlaf geschlummert hätten.

Die physikalische Farbenanalyse.

VON F. V. KALLAB.

(Eingeg. 10./6. 1908.)

Man darf wohl behaupten, daß die Farbenlehre eine universelle Bedeutung besitzt. Trotzdem fristet sie ein Aschenbröddasein, weil ihre Erlernung auf theoretischem Wege ohne gleichzeitige Vornahme praktischer Versuche beschwerlich ist. Abhilfe bietet hier ein kleiner, einfacher durch D. R. P. Nr. 193 814 und 198 449 geschützter Apparat, dessen Vorführung der Zweck des Vortrages ist.

Einleitend sei bemerkt: Man hat stets streng zu unterscheiden zwischen farbigen Lichtstrahlen, wie sie durch Zerlegung des weißen Sonnenlichtes z. B. mittels eines Glasprismas entstehen (Spektrumfarben) und Farbstoffen bzw. farbigen Körpern. Während durch Wiedervereinigung der Spektrumfarben Weiß entsteht: *a d d i t i v e F a r b e n m i s c h u n g*, erhält man durch Mischen äquivalenter Mengen von Farbstoffen Schwarz: *s u b t r a k t i v e F a r b e n m i s c h u n g*. Nur letztere kommt bei der vorliegenden „physikalischen Farbenanalyse“ in Betracht.

Weiter ist daran zu erinnern, daß wir drei Hauptgruppen von Farben zu unterscheiden haben:

1. Die Grundfarben oder die primären Farben (Farben erster Ordnung) Rot, Gelb und Blau.
2. Die sekundären Farben oder Farben zweiter Ordnung: Orange, Grün und Violett, entstehend durch Mischung von je zwei Primärfarben.
3. Die tertiären Farben oder Farben dritter Ordnung, wie Schwarz, Bordeaux, Braun, Oliv usw.,