

## Zur Ausstellung „Gas und Wasser“

Die Technik des Gases begann mit der Destillation der Steinkohle und bedeutete durch die Verwendung der Nebenprodukte, insbesondere des Teers, den Anfang der organischen Großindustrie. Die damit erschlossenen Gebiete nahmen eine so gewaltige Ausdehnung an, daß die Bedeutung des Leuchtgases zeitweise zurücktrat, besonders als die elektrische Erzeugung von Licht und Kraft das Gas allmählich zu verdrängen schien.

Indessen boten in der Folge Theorie und Technik der Gasherstellung wichtige neue Möglichkeiten. Die Ausnutzung des Rohstoffes wurde ständig verbessert: bis zu 60% der Kohlenenergie lassen sich durch die Zersetzung in Gas und Koks als Wärme und Licht herausholen. Der Gasverbrauch der Haushaltungen für Heizzwecke, der Kommunen für die Beleuchtung, der Industrie für die Kraftserzeugung ist gewaltig gestiegen; etwa die Hälfte der 15 Millionen Haushaltungen Deutschlands verbrauchten im Jahre 1928 Gas im Werte von schätzungsweise etwa 300 Millionen Mark; für die Straßenbeleuchtung Deutschlands wird zu 74% Gas verwandt.

Die deutsche Gasindustrie zeigt auf der Ausstellung „Gas und Wasser“, Berlin, dem Verbraucher, welcher technischen Hilfsmittel er sich bei der Verwendung von Gas am besten bedient, vor allem aber, daß die Gastechnik noch sehr entwicklungsfähig ist.

Bei dieser Entwicklung wird weit mehr als früher der Chemiker eine Rolle spielen. Die Schriftleitung der „Zeitschrift für angewandte Chemie“ widmet daher dem Gasfach in diesem Heft besondere Aufmerksamkeit.

Ein Aufsatz, der sich mit der Theorie der Verbrennung befaßt, wird vorangestellt, da erfahrungsgemäß gerade die theoretische Forschung die wesentlichsten Voraussetzungen für die größten technischen Fortschritte bietet. Die anschließenden Beiträge gehen auf die Ausstellung selbst, die Leuchtgaserzeugung und benachbarte Teilgebiete ein. Eine Abhandlung über die Frage der Gasentgiftung wird in einem der nächsten Hefte folgen.

Das Gebiet „Wasser“ wurde in einzelnen Beiträgen nicht berücksichtigt, weil hier schon durch die Fachgruppe für Wasserchemie des Vereins deutscher Chemiker sehr viel geleistet worden ist. Die Arbeitsergebnisse der umfangreichen Fachgruppentagung anlässlich der Hauptversammlung des Vereins deutscher Chemiker in Breslau werden mit ihren Vorträgen, Ausschußberichten und Aussprachen ihren Niederschlag im dritten Jahresband des „Buches vom Wasser“ finden, das demnächst im Verlag Chemie erscheint.

### Über Verbrennungs- und Explosionsvorgänge.

Von Geh. Rat Prof. Dr. F. HABER, Berlin-Dahlem.

(Kaiser Wilhelm-Institut für physikalische Chemie.)

Vorgetragen in der 1. Allgemeinen Sitzung der 42. Hauptversammlung des V. d. Ch. zu Breslau, 22. Mai 1929.

(Eingeg. am 22. Mai 1929.)

Die Verbrennungsvorgänge sind als Quelle von Wärme und Arbeit unter den chemischen Prozessen der unbelebten Natur durch Lebenswichtigkeit und zugleich durch Einfachheit weit im Vordergrunde. Die Beschäftigung der Wissenschaft mit ihnen hat früh begonnen und eine außerordentliche Fülle gelehrter Bemühung im Verlauf der Jahrzehnte geweckt. Jede Generation kommt in unserem Fache unter neuen Gesichtspunkten auf ihr Studium zurück und findet in ihrem Kreise Beispiele und Belege für neue Grundvorstellungen und ein Anwendungsbereich für neue Methoden.

Unsere Zeit ist ausgezeichnet durch einen besonders raschen Fortschritt theoretischer Vorstellungen. Die Rutherford'sche Vorstellung vom Aufbau der Atome aus positiven Kernen und umgebenden Elektronen und Planck's Erkenntnis von der Notwendigkeit, quantenmäßige statt klassischer Beziehungen für den Zusammenhang von Energie und Materie einzuführen, haben einen ständig wachsenden Strom neuer Gedanken und Versuche entstehen lassen, der heute ein großes Bereich der Physik erfüllt und an verschiedenen wichtigen Stellen in die Chemie einbricht. Mehrere solche Einbruchsstellen treffen auf das Gebiet

der Stoffe und Vorgänge der Verbrennung und bilden eine Einladung, die neuen Gedanken an Beispielen aus diesem Gebiete zu erläutern. Eine irgendwie erschöpfende Darstellung ist gleichwohl ausgeschlossen durch die Mannigfaltigkeit des Gegenstandes, durch die Unzulänglichkeit des augenblicklichen Standes der Sache und durch die Grenzen, in denen sich meine eigene Vertrautheit mit der Materie hält. Aber die sichere Erfahrungskenntnis, die jeder Chemiker von den gasförmigen Brennstoffen und den Erscheinungen besitzt, unter denen sie verbrennen, läßt mich hoffen, einige Gesichtspunkte am Beispiel dieser Vorgänge in der gebotenen Kürze verdeutlichen zu können.

Es sei mit der Bunsenflamme begonnen, in deren Innenkegel Luftsauerstoff in einem Überschluß brennbare Gase (Wasserstoff, Methan, Kohlenoxyd, schwere Kohlenwasserstoffe) verbrennt. Er bildet eine Zone stehender Explosion, die durch einen auffallenden Unterschied in der Farbe und Stärke des ausgesandten Lichtes ebenso vom zuströmenden Frischgas wie von den Verbrennungsprodukten unterschieden ist. Diese Zone ist sehr dünn, schwerlich dicker als 0,1 mm, und wird in

einer Zeit durcheilt, die in die Größenordnung der Zehntausendstelsekunden fällt<sup>1)</sup>). Aus diesem Innenkegel geht eine glühende Gasmasse, bestehend aus Kohlensäure, Wasserdampf, Kohlenoxyd, Wasserstoff und Stickstoff hervor, deren brennbare Bestandteile im Außenkegel mit der umgebenden Luft in erneuter Verbrennung zu Kohlensäure und Wasserdampf werden.

Vor 50 Jahren hat man die besondere Lichtemission des Innenkegels damit erklären wollen, daß er heißer als die Gase sei, die aus ihm hervorgehen. Diese Vorstellung, die weder experimentell noch theoretisch gehalten werden konnte, verschwand und hinterließ eine Leere, die lange Zeit nicht ausgefüllt werden konnte. Wohl gelang es, das Spektrum im sichtbaren und ultravioletten Gebiete gut aufzunehmen und drei Gruppen von Banden herauszuschälen, die als Wasserdampfbanden, Banden verbrennender Kohlenwasserstoffe und Swanbanden in alle literarischen und photographischen Darstellungen übergegangen sind. Aber man konnte diese Banden nicht deuten. Die Emission eines Spektrums verlangt eine emittierende Substanz, beim Linienspektrum ein Atom, beim Bandenspektrum ein Molekül. Geht ein Elektron, das zum Bestande des Bandenträgers gehört, von einem höheren auf ein niedriges Energieniveau, so wird eine Spektrallinie ausgesandt, aus deren Wellenlänge wir den Unterschied der beiden Energieniveaus ablesen. Bei den Bandenspektren tritt in der einzelnen Bande eine große Anzahl solcher Linien auf, weil die Rotationsenergie des mehratomigen Bandenträgers, die auf dem oberen und unteren Energieniveau mannigfaltige Werte besitzt, in den Energiesprung eingeht. Das gleiche gilt von der Schwingungsenergie und bedingt, daß bei der Ausstrahlung nicht nur eine Bande, sondern ein Bandensystem auftritt. Der neue Fortschritt besteht darin, daß wir die Banden mit zweiatomigen Bandenträgern und unter ihnen am genauesten und sichersten diejenigen nach ihrer Gesetzmäßigkeit aufzulösen gelernt haben, bei denen das eine der Atome ein Wasserstoffatom ist. Diese zweiatomigen Hydride bilden eine viel größere Gruppe von Verbindungen als wir uns noch vor wenigen Jahren haben träumen lassen<sup>2)</sup>, und unter ihnen sind zwei Stoffe, die wir in den Flammen unserer üblichen Kohlenstoff und Wasserstoff enthaltenden Brennstoffe regelmäßig antreffen, nämlich das Hydroxyl OH (Wasserdampfspektrum) und das Methin CH (Spektrum verbrennender Kohlenwasserstoffe). Zu ihnen kommt als Drittes das Dicarbon CC (Swanspektrum). Sie sind die Träger der drei zuvor genannten Spektren, die wir seit langem kennen, und die uns nun zu unzweideutigen Zeugen für das Auftreten dieser drei vergänglichen Zwischenstoffe beim Verbrennungsvorgange werden<sup>3)</sup>.

Die Belehrung durch die Spektren reicht aber weiter. Wenn das Bandensystem eine ausreichende Zahl von Einzelbanden liefert, so erkennen wir durch Beobachtung oder extrapolierende Rechnung, daß die Bandenfolge einem Grenzwert im kurzweligen Gebiete zustrebt, dessen Wellenlänge kennzeichnend für die Trennungsarbeit der Atome des zweiatomigen Bandenträgers ist. Jede Bande hat vor der nächstlangwelligeren derselben Bandenträgers den Besitz eines Schwingungsquants voraus. Mit dem steigenden Inhalt an Schwin-

gungsquanten wird der Bandenträger lockerer, bis er in seine beiden Atome zerreißt. Diese Auffassung der Erscheinung ist zu einem wichtigen Wege für die Ermittlung der Bindungswärme zweier homöopolar verknüpfter Atome zu einem Molekül geworden<sup>4)</sup>. Ich will auch des länger bekannten Verfahrens gedenken, aus der zunehmenden Intensität eines Absorptionsspektrums mit steigender Temperatur die zunehmende Konzentration des absorbierenden Gebildes und daraus nach bekannten thermodynamischen Sätzen den Wärmeverbrauch des chemischen Vorganges abzuleiten, der das absorbierende Gebilde liefert. Die Anwendung dieses Verfahrens auf das Bandenspektrum des Hydroxyls<sup>5)</sup> hat uns im Vorjahr die qualitative und quantitative Kenntnis von dem neuen Zerfall des Wassers in molekularen Wasserstoff und Hydroxyl gebracht, nachdem jahrzehntelange Bemühungen den Zerfall des Wassers in Sauerstoffmoleküle und Wasserstoffmoleküle als die einzige Form der thermischen Spaltung ergeben zu haben schienen.

Wir wollen ein wenig bei dem Hydroxyl und seinem Spektrum verweilen, um an dem Beispiele dieses einfachen Flammenbestandteiles einen anderen Gesichtspunkt grundsätzlicher Art zu erläutern, dem die letzten Jahre besondere Bedeutung geliehen haben. Man wird schwerlich zweifeln, daß das Hydroxyl, das in jeder Flamme des Wasserstoffs oder wasserstoffhaltiger Substanzen auftritt, ein Zwischenprodukt der Verbrennung ist. Aber den genauen Mechanismus seiner Entstehung aus Sauerstoff und Wasserstoff und seines Übergangs in Wasser wissen wir darum noch nicht. Wir stehen an dieser Stelle offenbar gegenüber der Grundschwierigkeit, mit der die Chemie so lange zu tun hat, wie sie besteht. Wenn wir eine eingehende Kenntnis von der Zusammensetzung der Stoffe und von ihrem Reaktionsverhalten empirisch gesammelt, auch die Reaktionswärmen und die chemischen Gleichgewichte gemessen hatten, so blieb die Angabe, unter welchen Bedingungen eine chemische Reaktion eintrat, und mit welcher Geschwindigkeit sie verlief, immer eine Angelegenheit der reinen Erfahrung, die wir im glücklichen Falle mit unserem fachlichen Instinkt nach Analogien richtig beurteilen, aber nicht theoretisch mit Exaktheit ableiten konnten. Vom Standpunkt der praktischen Chemie war der bestehende Mangel bei den einfachen Substanzen am deutlichsten, weil die Zahl der ähnlichen Fälle kleiner ist als bei den komplizierten Gebilden. Vom Standpunkt der Theorie ist die Beschäftigung mit den einfachen Stoffen naturgemäß der vorgezeichnete Weg. Auf diesem Wege ist einiges zutage getreten, worauf an dieser Stelle einzugehen ist.

Da ist zunächst von einem Grundgedanken zu reden, der nichts enthält, was ihn der Wissenschaft bei einem früheren Stande unzugänglich gemacht hätte, den aber erst die neuere Zeit in das gebührende Licht gestellt hat. Er betrifft das Schicksal der Energie, die beim Umsatz in Freiheit gesetzt wird. Man hat sich früher vorgestellt, daß man der Rolle dieser Energie für den Reaktionsvorgang ausreichend durch die Annahme Rechnung trage, daß sie sich durch die Zusammenstöße der Moleküle gleichmäßig über die Masse des reagierenden Systems ausbreite und seine Temperatur steigere. Wurde die entstehende Wärme durch geeignete Vor-

<sup>1)</sup> F. Haber, Ztschr. physikal. Chem. 68, 728 [1910], u. 81, 591 [1912].

<sup>2)</sup> Meck e, Physikal. Ztschr. XXVIII, 482 [1927]. Mulliken, Physical Rev. 33, 730 [1929].

<sup>3)</sup> K. F. Bonhoeffer u. F. Haber, Ztschr. physikal. Chem. 137, 263 [1928].

<sup>4)</sup> J. Franck, Trans. Faraday Soc. 21, 2 [1925]; Ber. Dtsch. chem. Ges. 61, 445 [1928]. H. Sponer, Ergebn. d. exakten Naturwissenschaft. 1927, S. 75.

<sup>5)</sup> K. F. Bonhoeffer u. H. Reichardt, Ztschr. physikal. Chem. 139, 75 [1928].

richtungen nach außen abgeführt, so schien die Rolle der Reaktionsenergie ausgeschaltet. Bei der umkehrbaren Reaktion mochten die Reaktionsprodukte entsprechend dem Massenwirkungsgesetz ihre Gegenwirkung üben, aber im gewöhnlichen Falle des irreversiblen Reaktionsverlaufes waren sie bei ausreichender Abführung der Reaktionswärme vom Augenblick ihrer Entstehung ab ein toter Abfall. Dem tritt in unseren Tagen mit ständig wachsendem Gewichte die Überlegung entgegen, daß die beim Umsatz in Freiheit tretende Energie zunächst an den einzelnen Molekülen haftet, die aus dem Umsatz hervorgehen, und von diesen Primärteilchen, ehe sie Gelegenheit hat, sich über die ganze Masse des Reaktionsgemisches zu verstreuen, bei einem frühen Zusammenstoß mit einem geeigneten Molekül an dieses übergehen und es in einen chemisch verschiedenen Zustand überführen kann<sup>6)</sup>. Das führt zu einer Fülle möglicher neuer Ereignisse. Das einfachste solche Ereignis werden wir dann antreffen, wenn der Stoß des energiereichen Primärteilchens in dem getroffenen Molekül ein Elektron auf ein höheres Energieniveau hebt, aus dem es freiwillig unter Lichtemission wieder auf das niedrige Niveau zurückfällt. Denn dies ist gerade der Fall, in dem eine Bande emittiert wird, und hier besitzen wir ein einfaches Unterscheidungsmittel, welches uns lehrt, ob der Sprung des Elektrons auf das höhere Energieniveau auf Kosten der Wärmeenergie erfolgt ist oder aus der Reaktionsenergie herstammt, die das Molekül von einem energiereichen Primärteilchen empfangen hat. Im zweiten Fall nämlich, und nur in diesem, vermag die Strahlung diejenige der gleichen Wellenlänge beim schwarzen Körper zu übertreffen, der sich auf der Temperatur des reagierenden Systems befindet. Wir können dies Merkmal auf die Hydroxyle anwenden, die bei der Einwirkung von Wasserstoff auf Sauerstoff entstehen. Wir lassen einen Strahl heißen Sauerstoffs mit einem Strahl von Stickstoff sich kreuzen, der mit einem geringen Gehalte an Wasserstoff versetzt ist. Dann tritt an der Kreuzungsstelle Reaktion ein, begleitet von einer Temperatur, die wir thermoelektrisch messen und durch die Vorwärmung des Sauerstoffgases wie durch den Wasserstoffgehalt des Stickstoffstrahls nach Belieben regeln können. Mit dem Eintritt der Reaktion treten Hydroxyle auf. Ein Teil derselben macht durch Aufnahme von Energie den Elektronensprung durch, der, auf das Mol. bezogen, 92,8 kcal erfordert, und strahlt diese Energie in Gestalt der ultravioletten Bande aus, die für das Hydroxyl charakteristisch ist und bei 3064 Å ihren Ursprung hat. Prüfen wir jetzt das Spektrum des schwarzen Körpers bei derselben, etwa bei 900—1000° gelegenen Temperatur, so finden wir, daß es längst nicht bis zu dieser Wellenlänge reicht<sup>7)</sup>. Die Strahlung des Hydroxyls in diesem ultravioletten Gebiet ist weitaus intensiver als die des schwarzen Körpers bei der gleichen Temperatur und mithin nicht thermischen Ursprungs, sondern aus dem chemischen Geschehen hervorgegangen. Das Hydroxyl leuchtet nach älterer Ausdrucksweise durch die Chemiluminescenz, die seit vielen Dezennien bekannt, jetzt aber nach ihrem Zustandekommen und nach ihren Energiebedingungen deutlich geworden ist.

Das ist nun ein Fall der Wirksamkeit von Primärprodukten, der nicht notwendig in die Chemie gerechnet

<sup>6)</sup> F. Haber u. W. Zisch, Ztschr. Physik 9, 302 [1922].  
H. Kautsky und O. Neitzke, ebenda 31, 60 [1925].  
H. Fraenz und H. Kallmann, ebenda 34, 924 [1925].  
H. Beutler und B. Josephy, Ztschr. physikal. Chem. 139, 482 [1928].

werden muß. Zwar wenn etwas charakteristisch ist für den neuen chemischen Zustand eines Stoffes, so ist es sicherlich der Übergang eines seiner Elektronen auf ein anderes Energieniveau. Aber die Gesamtänderung bei dem Vorgang besteht schließlich nur in der Aussendung der Strahlung. So wollen wir ein anderes Beispiel bei den Verbrennungsvorgängen suchen. Ein solches bietet sich beim Studium des Leitvermögens der Flammen kohlenwasserstoffhaltiger Brennstoffe. Hier ist von langeher bekannt, daß der Innenkegel, der je nach der Bemessung der Zufuhr von Primär Luft in grüner oder blaugrüner Farbe strahlt, ein höheres Leitvermögen hat als die Gase, die aus ihm hervorgehen. Nun stammt das Leitvermögen der Flammengase daher, daß einer der Bestandteile eine elektrische Aufspaltung in positive Ionen und negative Elektronen erfährt. Wir fragen nach der Natur dieses Bestandteiles, und ob die elektrische Spaltung thermischen oder chemischen Ursprungs ist. Das war bis vor kurzem nicht zu beantworten, schon darum, weil die Antwort die Kenntnis der Energie voraussetzt, deren es zur Abspaltung eines Elektrons aus den Molekülen der verschiedenen Gase bedarf, die in den Innenkegel eintreten, und die aus ihm hervorgehen. Setzen wir zunächst willkürlich voraus, daß das Phänomen thermischen Ursprungs ist, so scheiden die Gase für die Beachtung aus, die aus dem Innenkegel hervorgehen; denn die Temperatur steigt auf dem Gasweg vom Innenkegel zum Außenkegel durch die Wärmeleitung vom Außenkegel her, der das heißeste Gebiet darstellt. Ein Leitvermögen, das von der thermischen Spaltung einer der im Innenkegel wie auch zwischen Innen- und Außenkegel anwesenden Molekülarten in positive Ionen und Elektronen beruhte, müßte wegen des Wärmeverbrauches des Spaltvorganges in dem heißeren Flammenraum zwischen beiden Kegeln größer und nicht kleiner als in der Zone der stehenden Explosion sein, die wir im Innenkegel vor uns haben. So bleiben für eine elektrische Dissoziation mit thermischem Ursprung die Bestandteile des Frischgases, die im Innenkegel verschwinden, also der Brennstoff und der Sauerstoff. Aber sie fallen aus einem anderen Grunde außer Betracht. Messen wir nämlich das Leitvermögen der Explosionszone, einmal wenn die Flamme mit Frischgas von gewöhnlicher Temperatur gespeist wird, und das andere Mal, wenn das Frischgas vorgeheizt ist, so können wir aus dem Unterschied den Wärmeverbrauch des elektrischen Dissoziationsvorganges berechnen. Dabei ergibt sich ein Betrag, der weit unter dem experimentell bekannten Werte für die Abspaltung eines Elektrons aus dem Sauerstoffmolekül oder aus einem Brennstoffmolekül liegt. Dies ist auch theoretisch vollkommen einleuchtend. Die mittlere Energie, die die Gasmoleküle bei der Temperatur einer mit Luft gespeisten Kohlenwasserstoff-Flamme im Innenkegel erlangen, beträgt im elektrischen Maß den kleinen Bruchteil eines Volts, und es sind nahezu 10 Volt bei den Kohlenwasserstoffen und 13,5 beim Sauerstoffmolekül erforderlich, um ein Elektron abzureißen. Die Häufigkeit von Molekülen, deren Wärmeenergie eine so außerordentliche Abweichung vom Mittelwert hat, ist äußerst gering, und die Anzahl der Zusammenstöße, die ein Gasteilchen in der sehr kleinen Zeit erleidet, in der es den Innenkegel durchläuft, gibt ihm nur eine verschwindend kleine Chance, ein solches Teilchen von extremer thermischer Energie zu treffen. Untersuchen wir nun Flammen verschiedenster Ursprungs auf das Leitvermögen ihrer Innenkegel, so entdecken wir, daß dieses Leitvermögen

außerordentlich verschiedenen Betrag hat, je nachdem im Innenkegel die Swanbanden, die vom Dicarbon herühren, und die Banden verbrennender Kohlenwasserstoffe, deren Träger das Methin ist, auftreten oder fehlen. Offenbar sind diese beiden Zwischenprodukte, die zur Emission ihrer Banden erheblich weniger Energie verlangen als andere Flammenbestandteile, auch durch geringeren Energieverbrauch bei der elektrischen Spaltung ausgezeichnet<sup>8)</sup>). Wie klein dieser Aufwand auch sei, so kann er niemals auf den Wert herabgehen, der sich aus dem Unterschiede des Leitvermögens bei Benutzung kalten und vorgeheizten Frischgases berechnet. Denn dieser Betrag liegt unter der Anregungsenergie der Banden und ist kleiner als der Energiebedarf des ersten Elektronensprunges im Molekül, während erst der letzte Elektronensprung, der das Elektron ganz aus dem Molekularverbande löst, den Sachverhalt der elektrischen Dissoziation ergibt. So haben wir in der elektrischen Dissoziation im Innenkegel der Kohlenwasserstoff-Flammen ein zweites Beispiel für die Wirksamkeit von energiereichen Primärteilchen vor uns, die von der chemischen Reaktion herstammen und beladen mit der beim Umsatz freierwerdenden Energie mit anderen Teilchen zusammenstoßen. Aber auch das Energiepaket, das sie tragen und abgeben können, ist unzulänglich gegenüber dem Bedarf an Ionisierungsenergie bei den meisten Molekülsorten, die in der Zone der stehenden Explosion auftreten. Nur von den Molekülen der Radikale CC und CH gibt es eine bemerkenswerte Anzahl, die dadurch zur elektrischen Dissoziation gebracht werden. Vielleicht darf ich beim Verlassen dieses Gegenstandes einer Erscheinung gedenken, die wenig bekannt und verstanden ist<sup>9)</sup>). Wenn man eine Flamme, die aus einem Metallschlitz brennt, durch diesen Schlitz zurückschlagen läßt, so erreicht man, je nachdem man den Schlitz weiter oder enger stellt, daß die Explosion durch den Schlitzkanal entgegen der Zuströmungsrichtung des Frischgases durchgeht oder zwischen den Metallwänden erlischt. Gibt man den einander gegenüberstehenden Metallwänden eine starke entgegengesetzte Ladung, so erlischt sie bei passend gewähltem Abstande der geladenen Wände, auch dann, wenn sie zwischen den ungeladenen Metallwänden bei gleicher Schlitzweite noch hindurchgeht. Der Versuch setzt ein bedeutendes Leitvermögen der Explosionszone zum Gelingen voraus, wie wir es z. B. bei Benzolluftmischungen mit Benzolüberschüß antreffen. Die positiven Ionen werden von dem elektrischen Feld gegen die negative kalte Metallfläche geführt, nehmen durch Reibung die ungeladenen Moleküle der Flamme mit und drücken sie gegen die kalte Wandung, an der wie in der Davy'schen Sicherheitslampe die Verbrennung erlischt.

Die elektrische Spaltung einzelner Molekülarten in der Explosionszone steht unserem chemischen Interessenkreis wohl bereits näher als die Anregung einer Luminescenz. Aber wir werden uns eines Beispiels freuen, in welchem uns als Ergebnis ein gewöhnlicher chemischer Umsatz begegnet. Es scheint nun, daß sich auch dieser Fall bei dem einfachsten Verbrennungsvorgang, bei der Wasserbildung aus den Elementen, aufzeigen läßt, obwohl hier die natürliche Schwierigkeit

<sup>8)</sup> F. Haber, Sitzungsber. Preuß. Akad. Wiss., Berlin, 11. April 1929, S. 162.

<sup>9)</sup> A. E. Malinowski, Journ. Chim. physique 21, 469 [1924]. F. Haber, Sitzungsber. Preuß. Akad. Wiss., Berlin, 11. April 1929.

besteht, daß wir nicht die bequemen elektrischen Hilfsmittel haben, die uns bei der elektrischen Dissoziation die Veränderung und ihren Umfang festzustellen erlauben. Hier müssen wir von der Vermutung ausgehen, daß die Atome des einen der beiden Reaktionsteilnehmer, des Sauerstoffs oder des Wasserstoffs, in dem Mechanismus der Reaktion eine Rolle spielen. Nun wissen wir mit voller Sicherheit, daß die Aufspaltung des Wasserstoffs in Atome weniger Energie fordert als die gleiche Aufspaltung des Sauerstoffs, und so werden wir unsere Vermutung auf eine Wasserstoffspaltung richten. Es hat aber das Studium des Verhaltens von atomistischem Wasserstoff die bemerkenswerte Einsicht geliefert, daß zwei Wasserstoffatome, die sich im Gasraum begegnen, keineswegs regelmäßig zu Molekülen zusammentreten<sup>10)</sup>). Wir werden alsbald in anderem Zusammenhang darauf zurückkommen. Hier darf es genügen, festzustellen, daß sie sich an einer festen Wand sehr viel leichter vereinigen. Spielen die Wasserstoffatome die Rolle von Zwischenstoffen bei der Gasreaktion, so müssen Wände deren Ablauf nicht begünstigen, sondern stören. Das ist nun anscheinend mit den wohlbekanntesten Tatsachen unvereinbar; denn was wäre besser bekannt, als daß sich Knallgas an festem Platin bei einer Temperatur vereinigt, bei der Sauerstoff und Wasserstoff im freien Gasraum nicht in Umsatz treten. Aber der Schluß ist offenbar nicht richtig. Man muß den Einfluß der Wand auf die Gasreaktion nicht in dem Temperaturgebiet untersuchen, in welchem im freien Gasraum gar kein Umsatz erfolgt, sondern bei den etwas höheren Temperaturen zwischen 500 und 600°, bei denen er im freien Gasraum zu verlaufen beginnt. Dann aber findet sich in der Tat, daß der Ablauf in weiteren Gefäßen begünstigt und in engeren benachteiligt ist, ganz so wie man erwarten muß, wenn Wasserstoffatome für die Gasreaktion einen Zwischenkörper abgeben, und wenn feste Wände diesen Zwischenkörper durch Vereinigung zu Molekülen zerstören<sup>11)</sup>). Es ist klar, daß man diese Erfahrung umkehren und schließen wird, daß Zumischung von Wasserstoffatomen zu Knallgas den Vorgang begünstigen sollte. Dies ist in der Tat der Fall. Wir beherrschen die Lebensbedingungen des atomistischen Wasserstoffs so weit, daß wir einen kleinen Gehalt desselben in Knallgas einführen können, ohne gleichzeitig eine fremde Zündursache, etwa in Gestalt einer Flamme, eines glühenden Drahtes oder eines Lichtbogens auf die explosive Mischung zur Wirkung zu bringen. Führen wir diesen Versuch aus, so setzt die Knallgasexplosion bei gewöhnlicher Temperatur ein, lediglich vermöge des kleinen Gehaltes an Wasserstoffatomen in der Mischung<sup>12)</sup>). Läßt man das für einen Nachweis der Wasserstoffatome als Zwischenprodukte der Wasserstoffverbrennung gelten, und dies ist jedenfalls die nahegelegene und wahrscheinliche Vorstellung, so bleibt übrig festzustellen, daß es Knallgasexplosionen gibt, bei denen die Entstehung solcher Wasserstoffatome aus thermischen Ursachen nicht zu verstehen ist. Die Knallgasexplosion schreitet nämlich an der unteren Explosionsgrenze der Wasserstoff-Luft-Mischungen bei einer Flammtemperatur fort, die nur etwa 750° beträgt. Bei dieser Temperatur kann der Aufspaltungsvorgang in der kurzen Zeit des Durchgangs durch die Explosionszone

<sup>10)</sup> K. H. Bonhoeffer, Ztschr. physikal. Chem. 113, 199 [1924].

<sup>11)</sup> Hinselwood u. Gibson, Proceed. Roy. Soc., London 119, 591 [1928]. Hinselwood und Thompson, ebenda 118, 170 [1928].

<sup>12)</sup> F. Haber u. Graf H. D. v. Schweinitz, Sitzungsber. Preuß. Akad., Berlin 1928, S. 499.

wegen der hohen Spaltwärme des molekularen Wasserstoffs von 100 kcal nur in so winzigem Umfange ablaufen, daß die Spaltprodukte die für die Rolle der Zwischenprodukte erforderliche Konzentration in der Gasmischung nicht erreichen. Gibt es aber den chemischen Vorgang der Wasserbildung aus Hydroxylen und Wasserstoffatomen, der 115 kcal liefert, so werden die Primärteilchen des so gebildeten Wassers energiereich genug sein, um Wasserstoffmoleküle in Atome zu spalten.

Die Reaktionshemmung bei Verbrennungsvorgängen, die sich davon herschreibt, daß Wasserstoffatome an festen Wänden miteinander vereinigt und dadurch dem Gassystem entzogen werden, für dessen weiteren Umsatz sie erforderlich sind, liefert eine glaubhafte Erklärung für die verbrennungshemmende Wirkung, die man bei Staubteilchen in Flammen, z. B. im Mündungsfeuer der Geschütze, beobachtet hat und mit den Antiklopfmitteln im Automobilmotor absichtlich herbeiführt.

Wenn wir die Hydroxyle und die Wasserstoffatome als Zwischenprodukte der Knallgasverbrennung ansehen, so bleibt damit doch immer noch der eigentliche Mechanismus dieses Vorganges undeutlich. Eine frühere Zeit pflegte solche Dinge nach dem Gesichtspunkt der „einfachsten Reaktion“ zu behandeln, und sie sah Additionsvorgänge als die einfachsten Reaktionen an. Wenn Sauerstoff und Wasserstoff in einer Knallgasflamme, die auf Eis schlug, Hydroperoxyd bildeten, so hatten sich nach der einfachsten möglichen Reaktionsgleichung Sauerstoff- und Wasserstoffmoleküle durch Addition verbunden. Dieser Zustand unserer Vorstellungen hat eine wichtige Veränderung durch die unbedeute Überlegung erfahren, warum das Additionsprodukt bestehen bleibt; denn bei seiner Bildung wird ja gerade so viel Energie frei, als es zu seiner Rückwärtsspaltung benötigt. In der klassischen Theorie war diese Schwierigkeit nicht gleich wichtig. Die kinetische Energie und das Bewegungsmoment der beiden Komponenten bestimmten nach mechanischen Gesetzen die fortschreitende Bewegung des entstehenden Additionsproduktes, und sie bestimmten sie immer zu einem möglichen Werte. Alles andere blieb offen. Insbesondere ließ sich die Möglichkeit konstruieren, daß eine Rotation bei den Primärteilchen der Additionsverbindung auftrat, die sie zusammenhielt und ihnen Zeit ließ, ihre Reaktionsenergie zu zerstreuen. Mit den Quantenvorstellungen aber kamen für alle Energieformen die genau bestimmten diskreten Werte, die allein mit dem Bestande des Moleküls verträglich waren, und die Zwischenwerte dieser Beträge fielen aus. Jetzt war es nahezu ein Wunder, wenn zwei Moleküle sich unter solchen Bedingungen trafen, daß ihre Addition einen der möglichen diskreten Quantenzustände verwirklichte, sofern nicht ein drittes Molekül sich in der Nähe befand, auf das ein Teil der Energie übergehen konnte. So entstand die Lehre vom Dreierstoß als Bedingung für eine Additionsreaktion. Sie hat ihr einfaches Beispiel in dem schon erwähnten Verhalten der Wasserstoffatome, von denen die Erfahrung zeigt, daß sie weit entfernt sind, sich bei der ersten Begegnung zu vereinigen, und bei denen die Rechnung lehrt, daß höchstens jeder Dreierstoß, also jeder Fall, in dem zwei Wasserstoffatome gleichzeitig miteinander und mit einem dritten Gasmolekül zusammentreffen, zur Bildung einer Wasserstoffmolekel zu führen vermag. Damit aber verliert die Additionsreaktion offenbar den Charakter des einfachsten Vorganges. Die Austauschreaktion, bei der zwei chemisch verschiedene Aufangsstoffe zwei neue Endprodukte liefern, rückt in den

Vordergrund. Ein Chlormolekül und ein Natriumatom, die sich im Gasraum begegnen und ein Kochsalzmolekül und ein Chloratom liefern, führen niemals auf die quantentheoretischen Schwierigkeiten, die beim Additionsvorgänge charakteristisch sind. Es braucht keines Dreierstoßes und keiner Energieabgabe an ein drittes Molekül, dessen Fähigkeit zur Aufnahme der Reaktionsenergie von seiner Beschaffenheit und seinem Abstande abhängen wird, sondern der Vorgang spielt sich lediglich zwischen den Reaktionsteilnehmern ab<sup>13)</sup>. Aber ist die Entscheidung, was beim Zusammentreffen zweier Moleküle geschieht, damit gegeben? Auch nur insoweit gegeben, daß wir den Eintritt eines Austauschvorganges voraussagen können? Sehen wir das einfachste Beispiel aus der Chemie der Verbrennungsvorgänge, das Verhalten von Sauerstoff und Wasserstoff an! Die Addition liefert Hydroperoxyd, der Austausch zwei Hydroxyle; die Erfahrung aber zeigt, daß bei gewöhnlicher Temperatur weder das eine noch das andere erfolgt und die chemisch verschiedenen Moleküle praktisch unbegrenzte Zeiten unverändert im Knallgasgemisch bestehen. Es muß der endotherme Vorgang einer Aktivierung eintreten, der die eine Molekülsorte oder beide in eine reaktionsfähige Form bringt. Über das Wesen dieses Aktivierungsvorganges ließ sich noch vor einem Jahre kaum mehr sagen, als daß man sich zweierlei vorstellen konnte. Entweder mußte bei einem oder bei beiden Reaktionsteilnehmern durch einen Elektronensprung eine neue chemische Modifikation entstehen, die ein verschiedenes Reaktionsverhalten aufwies, oder es mußte mit der Zunahme der Schwingungsenergie im Molekül bei steigender Temperatur das Molekül lockerer und dadurch reaktionsfähiger werden. Inzwischen ist in einem merkwürdigen Zusammenhang die Wahrscheinlichkeit der zweiten Vorstellung wesentlich gewachsen.

Als die Quantentheorie einsetzte, war das Licht eine Schwingung des Äthers und der Äther ein Gebilde, das nach einem berühmten Worte erfunden war, um zu dem Verbum schwingen einen Nominativ zu haben. Die Materie aber bestand aus Massenteilchen, die sich nach den Gesetzen der Mechanik bewegten. In der Entwicklung der Quantentheorie bildeten zunächst die Gesetze der Mechanik die Stütze, auf der die Theorie zu fußen suchte, und das Licht wurde immer corpuscularer, je mehr man sich in seine Beziehung zur Materie vertiefte. Auf diesem Wege haben sich die Schwierigkeiten so lange gehäuft, bis man zu dem entgegengesetzten Verfahren der Wellenmechanik übergegangen ist, die, auf dem Boden der theoretischen Akustik erwachsen, die Zustände des einzelnen Massenteilchens für sich allein durch stehende Schwingungen interpretiert und alle Wechselwirkung zwischen Massenteilchen von der gegenseitigen Störung solcher Schwingungen herleitet. Die Grundlage dieser Vorstellung ist so abstrakt und die Entwicklung so jung, daß es schwerlich möglich ist, einen anschaulichen kurzen Weg zum Verständnis zu beschreiben. Aber es läßt sich nicht verkennen, daß große Chancen für die Förderung unserer chemischen Grundfragen in diesem Gedankengebäude enthalten sind. Seine stärkste Stütze zieht es für den Chemiker daraus, daß eine sehr merkwürdige Voraussage in den letzten Wochen eine glänzende experimentelle Bestätigung ge-

<sup>13)</sup> Vgl. die wichtige Untersuchungsreihe von M. Polanyi und seinen Mitarbeitern. Naturwiss. 13, 711 [1925]; 14, 164 [1926]; Ztschr. Physik 47, 379 [1928]; Ztschr. physikal. Chem. Abt. B, Bd. 1, S. 3, 21, 30 [1928]; u. die zugehörigen Untersuchungen von Ootuka u. Schay, ebenda, S. 62, 68 [1928].

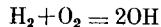
funden hat. Wir haben alle den elementaren Wasserstoff für eine einheitliche Form des Elementes gehalten. Die wellenmechanische Betrachtungsweise hat ihn für ein Gemisch aus Ortho- und Parawasserstoff erklärt, das bei gewöhnlicher und höherer Temperatur im Gleichgewicht immer drei Teile des ersten und einen Teil des letzteren enthält. Der Ortho-Wasserstoff enthält Rotationsenergie nur in ungeraden, der Parawasserstoff nur in geraden Quantenbeträgen. Bei tiefer Temperatur verschiebt sich das Gleichgewicht weiter und weiter nach der Richtung des Para-Wasserstoffs, und vom Siedepunkt des flüssigen Wasserstoffs abwärts ist im Gleichgewicht praktisch nur noch reiner Para-Wasserstoff vorhanden. Das Experiment hat bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs die Umwandlung des Gemisches in reinen Para-Wasserstoff unter der Kontaktwirkung von Kohle ergeben, und die Untersuchung des Para-Wasserstoffs hat hinsichtlich der spezifischen Wärme, der Wärmeleitung, der Linien des Bandenspektrums und der Rückverwandlung in das Gemisch beider Formen bei höherer Temperatur alle Voraussagen der Theorie bestätigt<sup>14)</sup>. Das ist eine sehr bedeutsame Stütze für andere aus der wellenmechanischen Vorstellung gefolgte Zusammenhänge, von denen uns hier einer besonders interessiert. Die Theorie scheint nämlich zu ergeben, daß zwei Moleküle, die grundsätzlich imstande sind, eine exotherme Austauschreaktion einzugehen, bei der Annäherung sich abstoßen, bis sie nahe genug gekommen sind. Es liegt ein Energieberg zwischen ihnen, den die kinetische Energie überwinden muß. Je größer die kinetische Energie ist, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß er überwunden wird. So wächst der Umsatz mit der Temperatur. Aber zugleich wird gezeigt, daß der Energieberg niedriger wird, wenn das Molekül Schwingungsenergie enthält, und so werden die Bedingungen für den Eintritt des Umsatzes ein zweites Mal durch die steigende Temperatur begünstigt. Das ist die Deutung, die die Aktivierungswärme erfährt<sup>15)</sup>. Sie liefert in dieser Form noch nichts Quantitatives, bis auf eine wichtige Aussage für einen speziellen Fall. Sie lehrt nämlich, daß keine Aktivierungswärme erforderlich ist, wenn das eine Molekül zweiatomig, das andere einatomig ist, und dasselbe gilt, wenn es sich um den Umsatz eines zweiatomigen Moleküls mit zwei einzelnen anderen Atomen, also z. B. um den Umsatz des Sauerstoffmoleküls mit zwei Wasserstoffatomen handelt<sup>16)</sup>. Dabei ist in beiden Fällen vorausgesetzt, daß aus dem Umsatz nicht ein Additionsprodukt, sondern zwei selbständige Massenteilchen exotherm hervorgehen. Wenn man diese Überlegungen dahin erweitern darf, daß von einem freien Radikal wie dem Hydroxyl dasselbe gilt wie von einem freien Atom, so läßt sich der Mechanismus

<sup>14)</sup> K. F. Bonhoeffer u. P. Harteck, Naturwiss. 17, 182 [1929], Ztschrift v. 24. 2. 1929; A. Eucken, ebenda, Ztschrift v. 5. 3. 1929. K. F. Bonhoeffer u. P. Harteck, Sitzungsber. Preuß. Akad., Sitzung v. 28. 2. 1929, S. 102 u. 103.

<sup>15)</sup> Für die Darstellung dieser von London abgeleiteten Zusammenhänge glaube ich am zweckmäßigsten auf den (im Druck befindlichen) Vortrag hinweisen zu sollen, den London bei der diesjährigen Hauptversammlung der Deutschen Bunsengesellschaft für angewandte physikalische Chemie in Berlin [1929] soeben gehalten hat.

<sup>16)</sup> Die experimentellen Grundlagen für dieses Verschwinden der Aktivierungswärme verdankt man besonders M. Polanyi (l. c.) und seinen Mitarbeitern. Hingewiesen sei noch besonders auf L. Frommer u. M. Polanyi, Ztschr. physikal. Chem. Abt. A, Bd. 137, S. 201 und auf den Vortrag von M. Polanyi auf der soeben stattgehabten Tagung der Deutschen Bunsengesellschaft in Berlin, vgl. diese Ztschr. 42, 708 [1929].

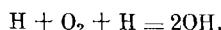
der Wasserbildung aus den Elementen in einer plausiblen Form darstellen<sup>17)</sup>). Den Anfang wird die Umsetzung eines Sauerstoffmoleküls mit einem Wasserstoffmolekül zu zwei Hydroxylen abgeben. Das ist ein Vorgang,



der eine Aktivierungswärme fordert und darum erst bei erheblich gesteigerter Temperatur verläuft. Jedes Hydroxyl wird mit dem molekularen Wasserstoff, auf den es trifft, in einer Austauschreaktion ohne Aktivierungswärme ein Molekül Wasser und ein Wasserstoffatom liefern können, also



Zwei Wasserstoffatome werden mit einem Sauerstoffmolekül wiederum ohne Aktivierungswärme zwei Hydroxyle zurückbilden



Dies liefert eine Reaktionskette, die so lange fortschreitet, bis ein Hydroxyl und ein Wasserstoffatom in der benachteiligten Additionsreaktion zu Wasser zusammentreten. In gleicher Weise wird eine Addition zweier Wasserstoffatome zu einem Wasserstoffmolekül eine Kettenfolge zum Abbruch bringen. Die Primärteilchen, die bei diesen Additionsvorgängen entstehen, mögen neue Wasserstoffatome durch Stoß hervorbringen.

Nach dem Stande der Sache wird man diese Zusammenhänge in vielem mehr als die Arbeitshypthesen wie als die Einsichten ansehen mögen, die wir besitzen. Wir sind des Fortschritts der jungen Theorie wie der Erweiterung des experimentellen Wissens von den Reaktionen der mehratomigen Moleküle mit Atomen und Radikalen gleich bedürftig. Wenn wir bei der Wasserstoffverbrennung z. B. Hydroperoxyd statt zweier Hydroxyle finden, so mögen wir vermuten, daß es sich um einen Vorgang an der Wand handelt, der anders als im freien Gasraum verläuft, und wenn wir bei Verbrennungsvorgängen Ozon beobachten, so können wir daran denken, daß es sich um einen Vorgang handelt, bei dem zwei Hydroxyle und ein Sauerstoffmolekül ein Ozonmolekül und ein Wassermolekül liefern. Aber das ist noch unwegsames Gelände.

Die Unsicherheit wird besonders fühlbar, wenn wir den Kohlenwasserstoffverbrennungen nähertreten.

Wir wissen noch recht unvollkommen über die Reaktionen der Wasserstoffatome mit den Molekülen der Kohlenwasserstoffe Bescheid, und über die Einwirkung der Hydroxyle auf diese Moleküle ist noch keine Erfahrungskennnis gesammelt. Der Stand der Beobachtungen über die Wirkung der Wasserstoffatome auf Kohlenwasserstoffe gibt vorerst noch kein klares Bild<sup>18)</sup>. Sie vertragen sich mit dem Methan, sie verschwinden beim Zusammenstoß mit anderen Kohlenwasserstoffen. Dabei wird Äthylen hydriert, Äthan und Acetylen sehr viel weniger verändert. Bei allen drei Stoffen tritt das Spektrum des Dicarbons und des Methins auf als ein Zeugnis, daß ein Abbau bis zu diesen zweiatomigen Molekülen in merkbarem Umfange vor sich geht. Lange aliphatische Ketten werden durch Wasserstoffatome unter Bildung der niedrigsten Glieder gespalten. Benzol geht

<sup>17)</sup> Genauere Behandlung siehe bei K. F. Bonhoeffer u. F. Haber, Ztschr. physikal. Chem. 137, 263 [1928].

<sup>18)</sup> Vgl. die Untersuchungen von Hugh S. Taylor mit Marshall, Journ. physical Chem. 29, 1140 [1925], u. mit Hill, Ztschr. physikal. Chem. Abt. B, 2, 449 [1929]; ferner Bonhoeffer u. Harteck, Ztschr. physikal. Chem. 139, 64 [1928]; weiterhin H. v. Wartenberg u. G. Schultze, Ztschr. physikal. Chem. Abt. B, 2, 1 [1929]; A. Klemenc u. Franz Patat, Ztschr. physikal. Chem. Abt. B, 3, 289 [1929].

in Acetylen über. Wir werden einen späteren Zeitpunkt abwarten müssen, ehe wir diese Elementarvorgänge übersichtlich ordnen können. Für heute wird uns genügen müssen, daß auf dem Theater der chemischen

Vorgänge, von dem Schönbein gesagt hat, daß wir nur das wissen, was vor dem Aufgehen und hinter dem Niedergehen des Vorhangs liegt, ein erster Eindruck des eigentlichen Stückes gewonnen ist. [A. 83.]

## Deutsche Ausstellung „Gas und Wasser“ in Berlin.

Von Ing.-Chem. ADOLF BRÄUER und Patentanwalt Dipl.-Ing., Dr. phil., Dr. techn. JOSEF REITSTÖTTER.

(Eingeg. 13. Juni 1929.)

Die Ausstellung will in ihrer Abteilung „Gas“ zeigen, wie sich die Gasindustrie, worunter im folgenden die Leuchtgasindustrie verstanden werden soll, zu ihrer heutigen Höhe entwickelt hat.

Die Ausstellung bietet eine anschauliche und umfassende Darstellung der gesamten großen technischen Neuerungen dieses bedeutenden Industriezweiges und versucht, den Besucher über den Werdegang der Gas-technik und des Gasverbrauchs sowie über die Anordnung der Gaserzeugungsanlagen, wie sie sich im Laufe der Zeit herausgebildet haben, zu unterrichten. Ferner findet sich eine Sammlung der Rohstoffe, die zur Gaserzeugung dienen, als auch eine solche der zur Gaserzeugung erforderlichen Apparaturen, Maschinen, Reinigungsanlagen, sowie der Vorrichtungen zur Messung und Aufspeicherung des Gases. Eine weitere Abteilung zeigt die Nebenprodukte der Gaserzeugung, deren Trennung und Verwendung in den verschiedenen Industriezweigen. Schließlich ist auch noch hinzuweisen auf die Ausstellung der Zuführungselemente des Gases von der Herstellungsstätte an den Gebrauchsort, wie da sind: Guß- und Stahlrohre, Druckregler, Gasmesser usw.

Diese große Industrieschau bringt alle Neuerungen der Gaserzeugung, wie die Darstellung von Doppelgas, von automatischem Wassergas, die kontinuierliche Entgasung u. a. m. Auch was die Gasreinigung anlangt, werden, der heutigen Zeit entsprechend, die elektrische Entfeuerung, die Reinigung mit A-Kohle vorgenommen. Besondere Stände sind der Entgiftung und Entphenolung der Abwasser gewidmet, und auch die Ferngasversorgung findet die ihr gebührende Würdigung. Beachtenswert ist die Darstellung der projektierten Ferngasversorgung von Stuttgart über Karlsruhe und Frankfurt, die jährlich etwa 400 Millionen Kubikmeter betragen soll. Außerdem werden von verschiedenen großen Städten übersichtliche Darstellungen der Gasversorgung durch ihre Werke gebracht. Insbesondere die Berliner Städtischen Gaswerke führen in verschiedenen Modellen ihre Gaserzeugungsanlagen und die Gasverteilung über die Stadt, sowie die Anlagen zur Gewinnung der Nebenprodukte vor. Zahlreiche Bilder geben von den Kohlenverladungsanlagen bis zur Erzeugung des Gases und der Nebenprodukte Kenntnis. In vielen Diagrammen werden die Menge der Gaserzeugung, die Verteilung des Gases und die Gasabgabe dargestellt. Lübeck zeigt z. B. die Gasfernversorgung seiner Umgebung und die Verarbeitung der aus der Erdgaststelle in Neuengammem entnommenen Naturgase.

Schließlich wird der Besucher noch aufgeklärt über die volkswirtschaftliche Bedeutung der Gasindustrie in unserem heutigen Wirtschaftsleben.

In der Abteilung „Wasser“ der Ausstellung sieht man den Betrieb der Wasserversorgung, ihre technische und hygienische Durchführung und Durchbildung. Ferner wird in dieser Abteilung gezeigt, welche Bedeutung für das gesamte Wirtschaftsleben dem Vorkommen, der Entnahme, der Reinigung und Aufspeicherung des Wassers zukommt.

### Gas.

#### Rohstoffe:

Es werden die verschiedenen Sorten oberschlesischer und westfälischer sowie auch englischer Kohle zur Schau gestellt, desgleichen auch Kohle aus dem Saar- und anderen Revieren. Interessante Stücke sind u. a. ein Stammstumpf aus der Braunkohlenzeit von einem Alter von etwa 5 Millionen Jahren und ein Siegelbaum aus der Steinkohlenzeit. In zahlreichen Koksproben wird sehr anschaulich die Qualität des Kokses demonstriert. Namentlich sind zu erwähnen die Kastenversuche, welche zur Bestimmung der Abhängigkeit der Koksqualität von der Korngröße, dem Schüttgewicht, dem Wassergehalt und dem Gehalt in flüchtigen Bestandteilen der Kohle dienen.

Großes Interesse erheischt neben der Gasgewinnung aus Kohlen in Großstädten die *aus Faulschlamm*.

Faulgas entsteht durch Zersetzung organischer Stoffe unter folgenden Bedingungen:

1. Zersetzung findet im Wasser oder bei Anwesenheit von Wasser unter Abschluß von Luft statt.
2. Der pH-Wert der Wasserstoffionenkonzentration des faulenden Schlammes muß möglichst zwischen 7,3 und 7,6 gehalten werden.
3. Temperatur des Faulschlammes zwischen 6° und 50°, Bestwert der Faulgaserzeugung bei 25–28° (unter Umständen Erhöhung der Faulraumtemperatur durch künstliche Heizung).

Im Durchschnitt enthält das Faulgas: 70–80% Methan, 15–30% Kohlendioxyd, 0–8% Stickstoff, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Kohlenoxyd.

Eine moderne Kläranlage zur Faulgasgewinnung, insbesondere zur Methangewinnung zeigt Berlin, in Modellen und Schaubildern (Berlin-Waßmannsdorf). Die Gasentwicklung von Waßmannsdorf betrug im Jahre 1928 rund 1,4 Millionen Kubikmeter Methan bei einer Abwassermenge von 27,5 Millionen Kubikmetern.

#### Gaserzeugungsöfen:

Retortenöfen mit horizontaler, schräg liegender und vertikaler Anordnung der Retorten kommen heute für Großleistungen kaum mehr in Frage, dementsprechend sind vornehmlich nur Kammeröfen verschiedenster Bauart ausgestellt.

Die Heinrich Koppers A.-G. zeigt hier in großen Modellen den Aufbau von Gaswerksöfen aus den hierfür in Frage kommenden feuerfesten Steinen, insbesondere *Silica* und *Sillimanit*. Ferner ein Modell einer Koksofenanlage mit Kokslöschen- und -verladeeinrichtung sowie eine Vertikal-Kammeranlage für stetigen Betrieb. Außerdem stellt diese Firma neue Zeichnungen von Generatoren mit kombinierter Hochdruck-Dampferzeugung aus.

Der Didier-Konzern führt in natürlicher Größe Regenerativ-Verbund-Koksöfen, Bauart Hinzenmann vor; ferner horizontale Kammeröfen, sowie in den sogenannten *Dessauer Vertikal-kammeröfen*. In sehr instruktiven Modellen werden