

und eine zweite Portion Petroleum eingewogen, abermals rauchende Salpetersäure zugesetzt und der Vorgang, wie oben beschrieben, fortgesetzt.

Die Analysenergebnisse waren folgende:

I. Bestimmung	II. Kontrollbestimmung
Schwefel 0,049%	0,042%

Die Methode bietet den Vorteil, daß der Schwefel in einer beliebig großen Menge Petroleum bestimmt werden kann, was auch gerade bei Petroleum von Wichtigkeit ist, da es meistens nur ganz minimale Mengen dieses Stoffes enthält, deren Quantität kaum auf andere Weise mit Genauigkeit festzustellen wäre.

Es wurde dann mit derselben Methode der Schwefel in Naphta bestimmt. Die Analysenergebnisse sind auch hier günstig gewesen, was eigentlich vorauszusehen war, da Naphta als ein Gemenge von Petroleum und schwerem Mineralöl (Liquid Fuel) zu betrachten ist.

Der Schwefel läßt sich besonders gut mit der angegebenen Methode in bituminösen Kohlenarten bestimmen. Die Kohlen, welche aus Monte Promina (Dalmatien) stammen, werden stets von uns in rauchender Salpetersäure gelöst, um darin den hohen Schwefelgehalt zu bestimmen. Diese Kohlenarten enthalten sehr viele bituminöse Substanzen, Wasser und flüchtigen Schwefel. Ihr Heizwert beträgt ungefähr 4000 Kalorien.

Bei Torf, Braunkohlen und Steinkohlen ergab die Schwefelbestimmung nach dem beschriebenen Verfahren übereinstimmende Resultate mit denen der E s c h k a s c h e n Methode.

Es wurde schließlich in gleicher Art der Schwefel in anderen schwefelhaltigen mineralischen und organischen Substanzen bestimmt, wobei die Resultate mit denen auf andere Weise bestimmten oder mit dem theoretischen Schwefelgehalt übereinstimmte. Solche Substanzen sind: fette Öle, Schwefelharnstoff, Methylenblau und Ultramarin.

Explosion einer Sauerstoffflasche.

Von E. BOSSHARD und A. HÄUPTLI,
Winterthur.

(Eingeg. d. 15./7. 1905.)

Am Morgen des 29./4. 1905, kurz vor 8 Uhr, erfolgte im Hauptgebäude des Technikums in Winterthur eine heftige Explosion, deren Knall in der ganzen Stadt gehört wurde. Das große Gebäude wurde von einer dunklen Staubwolke erfüllt, durch die zahlreiche Schüler dem Ausgang zueilten. Ein Brand war nicht ausgebrochen, lediglich im Korridor des Erdgeschosses zeigte sich kurze Zeit hindurch ein kleines Flämmchen, das bald selbst erlosch.

Man fand, daß eine der bekannten Stahlflaschen, die zur Aufbewahrung verdichteter Gase dienen, explodiert sein mußte und zwar in dem Vorbereitungszimmer für den Physikunterricht, das im Hochparterre zwischen dem Lehrsaal für Physik und der physikalischen Sammlung liegt. Dieses Zimmer war gegen den Korridor durch eine große Glastür abgeschlossen; die Holzwand mit der Glastür war in das Vorbereitungszimmer hineingestürzt.

Unter ihren Trümmern und anderem Schutte fand sich die Leiche des Mechanikers des physikalischen Instituts, Baldere r. Der Unterkörper der Leiche war gänzlich zerstört, der eine Fuß etwa 20 m in den Korridor hinausgeschleudert, während der andere in einer Richtung etwa rechtwinklig dazu sich vorfand. Die Leiche zeigte am Kopfe und auf der Brust unerhebliche Brandwunden. In dem Zimmer selbst war alles zerstört; ein Fläschchen mit 100 ccm Äther hatte wahrscheinlich das oben erwähnte Flämmchen veranlaßt.

Auch die umgebenden Räume zeigten eine schreckliche Verwüstung. Im Lehrsaale für Physik, in dem von 8 Uhr an Unterricht stattfinden sollte, wäre wohl niemand unverletzt geblieben.

In einem benachbarten Lehrzimmer wurde die Türe über die Köpfe der Schüler weggeschleudert, ihrer drei durch Holzsplitter verletzt; eine Schülerin der Kunstgewerbeschule, die vor dem Gebäude vorbeiging, trug eine Schnittwunde im Gesicht davon, durch herausfliegende Glasscherben veranlaßt.

Die Scherben einer großen Anzahl von Fensterscheiben bedeckten die Umgebung des Gebäudes.

Der Boden des Vorbereitungszimmers war nach unten gedrückt, die Holzbalken geknickt. Die Decke war ebenfalls zerstört, so daß ein Teil der darüber liegenden Bibliothek herunterstürzte.

Die Türen der Sammlungsschränke der physikalischen Sammlung waren nach außen aufgesprengt. In einem Teile des Gebäudes waren die Böden der zwei oberen Stockwerke momentan um einige Zentimeter gehoben worden.

Der Gebäude- und Mobiliarschaden wurde auf etwa 13 000 Fcs. geschätzt.

Die Verff. dieser Zeilen wurden mit der gerichtlichen Untersuchung beauftragt, worüber im nachfolgenden berichtet werden soll.

I. Untersuchungen über die unmittelbaren Ursachen der Explosion.

Zunächst wurden die Trümmer der zersprungenen Stahlflasche sorgfältig aus dem Schutte gesammelt. Es fanden sich alle wesentlichen Stücke vor¹⁾; der Mantel der Flasche war nur in drei Stücke zerteilt. Aus der eingeprägten Inschrift ergab sich, daß es sich um die Stahlflasche Nr. 683 handelte. Sie hatte einen Inhalt von 11,4 l und war im April 1899 auf 250 Atm. Druck geprüft. Diese Prüfung war im Juni 1902 durch die eidgenössische Materialprüfungsanstalt in Zürich wiederholt worden.

Diese Flasche war laut Frachtbrief vom 22./4. von einer Fabrik in W. auf Bestellung geliefert, gleichzeitig mit einer zweiten Flasche gleicher Art, Nr. 2609. Beide Flaschen langten am 25./4. im Technikum an. Sie sollten laut Bestellung und nach den Angaben des Frachtbriefes Sauerstoffgas enthalten. Beide Flaschen waren am Abend des 28./4. 1905 an zwei verschiedenen Orten zum Betriebe der Kalklichtlampen in Projektionsapparaten gebraucht worden.

1) Siehe Abbildung S. 1532.

An beiden Orten hatte der verunglückte Abwärter A. Baldere die Bedienung der Apparate, also auch die Handhabung der Flaschen besorgt. Nachdem er am Morgen des 29./4. dann die Sauerstoffflasche 683 wieder ins Technikum zurückgebracht hatte, erfolgte deren Explosion, die ihn tötete.

Es war von vornherein anzunehmen, daß der Inhalt der Flasche 2609 von gleicher Art gewesen sein müsse. Diese Annahme wurde dann am 30./4. auf Befragen durch die Fabrik in W. bestätigt. Die Flasche 2609 wurde unter Beobachtung der gehörigen Vorsichtsmaßregeln geöffnet und ein Teil des Inhaltes behufs chemischer Unter-

Die Untersuchung der Trümmer der zerbrochenen Sauerstoffflasche 683 ergab, daß im Augenblicke der Katastrophe ein Probiermanometer an dem Verschlußventil der Flasche angeschraubt war (wie auf Abbildung 1, links zu sehen ist).

Das nach der Explosion gefundene Verschlußventil selbst war *geöffnet*. Es war stark verbogen, so daß es nicht erst nachträglich durch den Finder geöffnet sein konnte. Die Verschlußschraube des Ventils ließ sich nämlich infolge der Deformation nicht umdrehen.

Die Trümmer des Probiermanometers³⁾ wurden auch gefunden, kein wesentlicher Bestandteil fehlt. Ein abgebrochenes Stück des Verschlußventils der



Abb. 1. Trümmer der explodierten Flasche und des Probiermanometers.
Links: Eine unversehrte Flasche mit aufgesetztem Probiermanometer (zum Vergleich).

suchung in Glasgasometer abgefüllt. Die Analyse dieses Gases²⁾ ergab, daß es ein Gemenge von 77,57 Volumenprozenten Sauerstoff mit 20,10 % Wasserstoff und 2,33% Stickstoff war. Wir stellten durch direkte Versuche fest, daß dieses Gemenge beim Entzünden lebhaft explodierte, es enthielt eben *Knallgas*.

²⁾ Die Analyse des Gases wurde dreimal durch Behandlung mit alkalischer Pyrogallollösung ausgeführt. Dies ergab einen Sauerstoffgehalt von 77,5, 77,6, und 77,6, im Mittel also 77,57%. Durch Explosionsanalyse, die fünfmal wiederholt wurde, stellte man fest, daß der Rest des Gases bestand aus 20,10% Wasserstoff (die Einzelergebnisse schwanken von 19,9–20,2%) und 2,33% Stickstoff. Andere Bestandteile, wie Kohlenoxyd, Kohlensäure, Ozon, ließen sich darin nicht nachweisen.

Flasche steckte noch eingeschraubt in dem Ansatzrohr des Manometers. Es ließ sich ohne Gewaltanwendung daraus losschrauben, was den Beweis liefert, daß das Verschlußventil nicht etwa beim Ausschrauben des Manometers durch Gewalt beschädigt worden war.

Das Ansatzrohr⁴⁾ des Manometers ist aus zwei Stücken zusammengesetzt; die durch zwei Verschraubungen unter sich und mit dem Verschlußventil verbunden waren. Diese Verschraubungen waren durch Ringe aus sogenannter *Fibermasse* gasdicht aneinander gefügt. Die Fibermasse ist, wie sich durch Analyse eines solchen Ringes aus einem gleichartigen Manometer zeigte, ein Gemenge von Holzstoff (Zellulose) mit 34,4%

³⁾ u. ⁴⁾ Siehe oben stehende Abbildung.

unverbrennlicher Mineralsubstanz. Ein ebensolcher Ring befand sich im Verschlußventil der Flasche.

Diese Dichtungsringe waren zum Teil angebrannt und zeigten einen starken Geruch nach unvollständig verbranntem Öl (Akrolein?).

Die Dichtungsringe wurden sorgfältig herausgelöst und der chemischen Untersuchung unterworfen. Es ergab sich, daß zwei davon geringe Mengen von Öl enthielten. Die nähere Beschaffenheit dieses Öles ließ sich wegen der zu kleinen Mengen, die zur Verfügung standen, nicht feststellen. Die Bohrungen des Verschlußventils der Flasche, sowie des zum Manometer führenden Ansatzrohres zeigte an mehreren Stellen deutliche Spuren von Verbrennung; das Metall (Bronze oder Messing) war dort mit einem grauen Beschlag bedeckt.

Die elastische hohle Feder (Bourdonfeder) des Probiermanometers erwies sich als unbeschädigt. Sie hielt bei der Prüfung einen Druck von 40 Atm. aus, ohne daß sich Undichtigkeiten zeigten. Nach dieser Prüfung wurde die Feder abgesägt und ihr Hohlraum auf Öl oder Fettgehalt untersucht. Er war frei davon. Es fand sich lediglich ein Überzug aus einer Art festem Firnis im Inneren.

Ungebrauchte Fiberringe, die wir bei der Fabrik erhoben, erwiesen sich als durchaus frei von Öl oder Fett, ebenso ein solcher Ring, der dem Probiermanometer des Chemiegebäudes des Technikums entnommen wurde.

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen, in Verbindung mit anderweitig festgestellten Tatsachen, lassen sich Schlüsse ziehen, die zur Beantwortung der uns vorgelegten Frage führen.

Der oben erwähnte Tatbestand beweist, daß im Augenblick der Explosion das Probiermanometer an die Sauerstoffflasche angeschraubt war. Dieses Probiermanometer war am Abend vorher nicht benutzt worden, es kann während des Verbrauches des Gases überhaupt nicht an der Flasche sein, weil es diese verschließt. Auch beim Transport nach dem Technikum war es nicht an der Flasche. Offenbar wollte nun *Baldere*, nachdem er die Flasche wieder ins Technikum verbracht hatte, den Rest des Gases messen, der noch in der Flasche war, durch Messung des Gasdruckes.

Zu diesem Zwecke hatte er, die Flasche zwischen den Knieen haltend, das Probiermanometer angeschraubt und dann das Verschlußventil der Flasche geöffnet. In diesem Augenblicke muß die Explosion erfolgt sein, die hauptsächlich den Unterkörper *Baldere*s zerstörte.

Häufig lassen sich die Ventile der Flaschen nicht langsam, sondern nur ruckweise öffnen, namentlich wenn die Schraube etwas fest angezogen war. Da erst vor kurzem der Inhalt einer Sauerstoffflasche, vermutlich durch ein nicht völlig verschlossenes Ventil, sich teilweise entleert hatte, wodurch *Baldere* in etwelche Verlegenheit gekommen war, liegt es nahe zu vermuten, daß er seither die Ventile besonders sorgfältig verschloß durch starkes Anziehen der Schrauben.

Beim ruckweisen Öffnen des Verschlußventils am 29./4. strömte nun das Gas aus der Flasche mit plötzlichem Stoße in das Manometer. Die Luft in dem Ansatzrohr

zwischen Flasche und Manometer mußte dadurch momentan stark zusammengepreßt werden, ebenso die Luft in der Manometerfeder. Sie erlitt infolge dieser Zusammenpressung einen Augenblick lang eine beträchtliche Temperaturerhöhung.

Der Druck in der Flasche betrug schätzungsweise (nach Messungen, die früher nach ähnlicher Verwendung frisch gefüllter Flaschen jeweilen angestellt worden waren) noch etwa 80 Atmosphären. Nach den physikalischen Gesetzen über die Kompression von Gasen läßt sich die Erwärmung infolge einer Drucksteigerung berechnen. Die Rechnung zeigt, daß, wenn ein Luftvolumen plötzlich einem Druck von 80 Atmosphären ausgesetzt, also auf $\frac{1}{80}$ seines ursprünglichen Volumens zusammengepreßt wird, eine Temperatursteigerung der Luft um 719° eintritt. Eine solche plötzliche Erhitzung mußte aber brennbare Stoffe sofort zur Entzündung bringen.

Brennbare Stoffe waren nun im gegebenen Falle wirklich zugegen: das Schmieröl, mit dem die Dichtungsringe getränkt waren, und ferner der Wasserstoffgehalt des Gases selbst. Der Entzündungspunkt der verschiedensten Schmieröle liegt zwischen 140 und 340° . Unter starkem Druck entzünden sich aber diese Öle bei erheblich niedrigeren Temperaturen. In dem D. R. P. Nr. 67 207 gibt R. D. i e s e l a n, daß die Entzündungstemperaturen der meisten flüssigen Brennmaterialien (die mit den Schmierölen gleiche oder ähnliche Zusammensetzung haben) sehr niedrig liegen, wenn diese Temperaturen durch Kompression erzeugt sind. Petroleumöle entzünden sich z. B. unter diesen Umständen schon bei 70 — 100° . Diese Beobachtungen liegen der Konstruktion des Dieselmotors zugrunde, wie er z. B. von Gebrüder Sulzer in Winterthur gebaut wird.

Direkte Versuche, die wir am 30./4. und 1./5. anstellten, zeigten uns, daß Schmieröle verschiedener Herkunft sich ausnahmslos leicht entzünden lassen, wenn man sie in Sauerstoffgas bringt und dieses dann rasch stark zusammengepreßt (im sogenannten pneumatischen Feuerzeug.)

Wie wir dann später fanden, sind ähnliche Versuche und Beobachtungen mit gleichen Resultaten im Jahre 1895 im Auftrage einer amtlichen Kommission⁵⁾ in England von J. F. S m i t h angestellt worden.

Schon 1892 hatte ferner C. F. B u d e n b e r g⁶⁾ folgendes Experiment gemacht, das dem Einströmen des Gases aus der Flasche in das Manometer genau entspricht. Er ließ Luft, die in einer Stahlflasche unter einem Drucke von 80 Atmosphären stand, plötzlich in ein mit Luft von Atmosphärendruck gefülltes Rohr eintreten. Brennbare Substanzen kamen dadurch in diesem Rohre sofort zur Entzündung⁷⁾.

⁵⁾ Report of the Committee appointed to inquire into the causes of the explosion and the precautions required to ensure the safety of cylinders of compressed gas. Presented to both houses of Parliament by command of Her Majesty, London 1896, S. 41 ff.

⁶⁾ Leiter der Firma Schäffer & Budenberg in Manchester, der bekannten Manometerfabrik.

⁷⁾ Report of the Committee etc., S. 42.

Auch an Manometern selbst wurde experimentiert, durch B r i e r, mit ähnlichen Ergebnissen. Er konnte die Manometer durch solche Zündungen bis zur Explosion bringen⁸⁾. Man kennt ferner eine Anzahl Fälle, wo beim Einpumpen von Sauerstoffgas in Stahlflaschen Explosion eintrat.

Bei mehreren dieser Fälle war die Entzündung zweifellos durch Öl veranlaßt; bei anderen war dies wenigstens die wahrscheinlichste Annahme. Wir zitieren hier die Fälle, die in der Fachliteratur beschrieben sind, soweit sie genügend genau untersucht worden sind.

1. Prof. Frankland komprimierte im Jahr 1864 Sauerstoff auf 25 Atmosphären. Dabei trat durch Entzündung von Olivenöl Explosion ein. (Journal of the Chemical Society, 1864, Seite 52, zitiert im vorgenannten Report, Seite 40).

2. Bei der Scotch and Irish Oxygen Company in Glasgow explodierte 1890 eine Stahlflasche, als man den Druck messen wollte (also genau wie in unserem Falle). Die Flasche hatte vor dem Einfüllen des Sauerstoffs noch einen Rest Wasserstoff enthalten. Die Zündung wurde oxydierbarem Material, Öl oder Feilspänen zugeschrieben. (Report, Seite 40).

3. In London, Fenchurch Street, wurde 1895 ein Mensch durch Explosion einer Sauerstoffflasche getötet. Die Flasche enthielt von früherer Füllung her einen Rest von Kohlengas. Als Zündungsursache wurde vermutet das Vorhandensein von Schmieröl oder Eisenteilchen in der Flasche. Dieser Fall gab Anlaß zur Einsetzung der erwähnten Kommission, die es als zweifellos erachtet, daß Öl oder Öldämpfe mehrere derartige Explosionen bewirkt haben. (Report, Seiten 40 und 54).

4. In der chemischen Fabrik Griesheim-Elektron in Bitterfeld explodierte im Jahre 1902 eine Flasche während des Einpumpens von Wasserstoffgas. Ein Mann wurde sofort getötet, vier andere verletzt, wovon zwei nachher den Verletzungen erlagen. Die Akten der gerichtlichen Untersuchung liegen uns vor, durch gütige Vermittlung der Staatsanwaltschaft Halle a. S. Die Flasche war mit Sauerstoff gefüllt, durch ein Verssehen beim Eisenbahntransport in die Fabrik gelangt, wo nun Wasserstoffgas eingepumpt wurde, ohne daß man die Füllung mit Sauerstoff vorher bemerkte. Das entstandene Knallgas wurde wahrscheinlich durch Ölteilchen, die aus dem Wasserstoffkompressor mitgerissen wurden, entzündet. Es war nachgewiesen, daß der Druck des Kompressors nicht hingereicht hätte, die Flasche zu sprengen. (Originalakten. Ferner: diese Z. 1902, 760; Z. f. d. ges. Kohlensäure-Ind. 1902, 285.)

5. Ebenfalls im Jahre 1902 erfolgte in der Akkumulatorenfabrik in H a g e n i. W. eine Explosion von Teilen einer Kompressionsanlage. Man wollte ein neues Sicherheitsventil durch Einpressen von Sauerstoffgas prüfen. Als der Druck

auf 190 Atmosphären gestiegen war, trat Explosion ein. Als Ursache wurde Entzündung von unreinem Glycerin, das zum Schmieren des Kompressors gedient hatte, angenommen. Das Sauerstoffgas war in einem S e h m i d t s c h e n Elektrolyseur hergestellt. (Diese Z. 1902, 559 u. 1233; Elektrotechn. Z. 1902, 988. Briefliche Mitteilung vom Königl. Gewerberat C l a u s s e n in Hagen i. W., 1905.)

Bei der Handhabung von Flaschen mit komprimiertem Sauerstoff hat man ferner mehrfach gesehen, daß Öl, das zur Schmierung von Gewinden oder Vontilen benutzt war, sich beim Ausströmen lassen des Gases entzündete, so daß Flämmchen aus der Öffnung herauschlügeln. Ein Fall dieser Art wurde von dem einen von uns (A. H.) selbst beobachtet; andere sind in den Fachzeitschriften erwähnt. Wir zählen auch hier wieder die genügend genau beschriebenen Fälle auf:

1. Aus der Ö s t e r r e i c h i s c h e n Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen 1899 werden drei Fälle zitiert, in denen beim Öffnen der Ventile von Sauerstoffflaschen mit nur 25 Atmosphären Druck die gefetteten Baumwolldichtungsschnüre sich entzündeten. (Diese Z. 1902, 434.)

2. Im Physikalischen Institut der T e c h n i s c h e n H o c h s c h u l e i n S t u t t g a r t brannte 1902 beim Öffnen einer Sauerstoffflasche ohne weiteres eine starke Stichflamme unter lebhaftem Geräusche aus dem Reduzierventil heraus. Die Kautschukinlage des Ventils hatte sich durch den Sauerstoff entzündet. (B u j a r d, diese Z. 1902, 367.)

3. In einer F a b r i k wurde öfters beobachtet, daß beim Ausströmen von Sauerstoff die Manometer der Reduzierventile, die innen gefettet waren, Feuer fingen. Dies unterblieb, seitdem man vorher das Fett aus den Ventilen mittels Benzin entfernte. (C l a u s s e n, diese Z. 1902, 500.)

4. Aus dem J o u r n a l d e P h a r m a c i e e t d e C h i m i e 1904 wird über eine ähnliche Erscheinung berichtet. Beim Öffnen einer Sauerstoffflasche entströmte dieser ein Sprühregen von glühenden Metallteilchen. Die Hand des Mannes wurde verbrannt; ein Schlüssel, den er in der Hand hielt, teilweise geschmolzen, ebenso das Verschlußventil der Flasche. Man vermutete eine Entzündung von Fett oder Vaseline durch das Gas. (Z. f. d. ges. Kohlensäure-Ind. 1904, 845.)

Als Ursache solcher Entzündungen durch ausströmendes Sauerstoffgas wird angenommen, daß feste Teilchen von Eisen oder Rost und dgl., die mit dem Gasstrom aus der Flasche herausfliegen, sich durch Reibung bis zum Glühen erhitzen können. Dadurch kann ebenfalls eine Entzündung von Öl oder anderen brennbaren Stoffen in dem Sauerstoffstrom zustande kommen, wie durch Versuche von R a s c h erwiesen ist⁹⁾. Beim Entleeren von Sauerstoffflaschen in der Fabrik in W.

⁸⁾ H. R a s c h. Die Zündungen durch verdichteten Sauerstoff und die Explosionsgefahr des Stickoxyduls. Weimar 1904, S. 25 ff.

⁹⁾ Report of the Committee etc., S. 41.

haben wir in der Tat auch beobachtet, daß solche feste Teilchen mit dem entweichenden Gase fortgerissen wurden und sich dabei stark erwärmen.

Trotzdem halten wir diese Art der Zündung in dem uns beschäftigenden Falle für nicht wahrscheinlich, weil das Gas bei der Katastrophe nur einen Augenblick lang und nur auf eine kurze Strecke ausströmte, in das Manometer, aus dem es nicht weiter entweichen konnte.

Als zweite brennbare Substanz war im Moment der Explosion vom 29./4. (neben dem Öl) der Wasserstoffgehalt des Inhaltes der Flasche selbst zugegen. Es war denkbar, daß dieser durch die Kompressionswärme, eventuell durch Funken, direkt zur Entzündung gelangte.

Die Entzündungstemperatur der Gemenge von Sauerstoff und Wasserstoff wird hauptsächlich vom Mengenverhältnis der beiden Gase und vom Druck abhängen. Sie wird für reines Knallgas (1 Volumen-Teil Sauerstoff auf 2 Volumenteile Wasserstoff) bei Atmosphärendruck zu 650—730° angegeben¹⁰⁾; bei höherem Druck ist zu erwarten, daß ähnlich wie bei Ölen die Zündung leichter eintritt¹¹⁾. Bei einem Drucke von 180 Atmosphären soll sogar Selbstentzündung des Knallgases eintreten. Genauere Beobachtungen, namentlich bei verschiedenen Mischungsverhältnissen und höheren Drucken, sind leider bisher nicht angestellt worden.

Wie aber oben gezeigt wurde, genügte zur Zündung in unserem Falle die Entflammung des Öles durch die Kompressionswärme, so daß es nicht nötig ist, die direkte Entzündung des wasserstoffhaltigen Gases, über die nichts genaueres bekannt ist, zur Erklärung der Explosionsursachen mit heran zu ziehen.

Wir dürfen nach alledem als sicher annehmen, daß die Zündung bei der Explosion vom 29./4. durch Entflammung von Ölteilchen (vielleicht auch des Wasserstoffs) infolge der Kompression beim Einströmen des Gases in das Probiermanometer zu stande kam. Es ergibt sich dies aus unseren, wie aus fremden Beobachtungen und Versuchen, aus den Erfahrungen der Praxis, sowie auch aus Schlüssen, die aus der Wärmetheorie zu ziehen sind.

Hätten nun die Flasche 683 reines Sauerstoffgas enthalten, so wäre diese Zündung von keinen erheblichen Folgen gewesen. Das explosive Gas, Knallgas, das sich aber in der Flasche befand, mußte dadurch zur Explosion gelangen.

Es ist auch die Vermutung ausgesprochen worden, daß die Stahlflasche durch Fallenlassen hätte zerspringen können. Dies erscheint indessen bei näherem Zusehen als sehr unwahrscheinlich.

Die erwähnte englische Kommission¹²⁾ ließ auf

¹⁰⁾ Fr. Freyer und Victor Meyer. Berl. Berichte 1892, 622.

¹¹⁾ Das entgegengesetzte Resultat, das Mischertlich (Berl. Berichte 1893, 403) bei einigen Versuchen innerhalb enger Versuchsgrenzen erhielt, ist uns bekannt. Es widerspricht den Forderungen der Gastheorie und anderweitiger Erfahrung.

¹²⁾ Report, S. 43 u. 56, mit Abbildungen der Versuchsfaschen auf Tafeln III und IV.

mit Sauerstoff von 120 Atmosphären Druck gefüllte Stahlflaschen eiserne Blöcke bis zu 9,3 Zentnern Gewicht aus verschiedener Höhe bis zu 20 Fuß herunterfallen, oft mehrmals hintereinander, ohne daß die Flaschen zerbrachen.

Andere Flaschen ließ man 50 Fuß tief zweimal auf einen eisernen Block fallen, ebenfalls ohne Schaden. Eine Explosion, die 1893 in Bradford durch Fallenlassen einer Sauerstoffflasche eintrat, war lediglich durch schlechtes kristallinisches Material der Flasche bedingt¹³⁾.

Nach übereinstimmender Aussage hiesiger sachverständiger Maschineningenieure, die die Trümmer der am 29./4. explodierten Flasche besichtigten, ist deren Material, Stahl, ein sehr gutes und läßt an den Bruchflächen keine Fehler erkennen. Von einer besonderen Prüfung auf Festigkeit konnte daher Abstand genommen werden. Die Flasche war ja laut Inschrift am 12./4. 1899 auf einen Druck von 250 Atmosphären geprüft worden, und diese Prüfung, die nach dem internationalen Transportreglement für die Eisenbahnen alle drei Jahre vorzunehmen ist, war am 20./6. 1902 durch die Eidgenössische Materialprüfungsanstalt in Zürich wiederholt worden.

Verschiedentlich wurde die Frage erhoben, warum die Explosion nicht schon beim Gebrauche der Flaschen am Abend des 28. April eingetreten sei.

Es ist darauf hinzuweisen, daß dort die unmittelbare Ursache der Zündung, die, wie gezeigt, durch das Einströmen des Gases in das Probiermanometer erfolgte, nicht vorhanden war. Das Probiermanometer war dabei überhaupt nicht zur Verwendung gekommen. Durch die Flamme der Projektionslampen aber konnte das Gas in den Flaschen nicht entzündet werden. Die tägliche Erfahrung beim Gebrauch von Knallgas zum Löten, z. B. in Schwefelsäurefabriken, Akkumulatorenfabriken usw., lehrt, daß eine Flamme, in die ein absichtlich hergestelltes Gemenge von Wasserstoff und Sauerstoff, also Knallgas, einströmt, nicht durch die Brenner oder gar durch die Schläuche „zurückschlägt“. Die Zündung pflanzt sich nicht nach rückwärts in die Gasbehälter fort, sofern nur das Gas mit einer gewissen Geschwindigkeit, die nicht besonders groß zu sein braucht, ausströmt.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß bei der richtigen Verwendung selbst des stark wasserstoffhaltigen Sauerstoffgases zur Erzeugung von Kalklicht in den Projektionslampen eine Explosion nicht eintreten konnte oder doch zum mindesten sehr unwahrscheinlich war.

Wir fassen die Ergebnisse unserer Untersuchung über die unmittelbaren Ursachen der Explosion vom 29./4. wie folgt kurz zusammen:

I. Die explodierte Stahlflasche enthielt ein explosives Gemenge von Sauerstoffgas mit 20,1 Vol.-% Wasserstoff.

II. Im Augenblicke der Explosion war ein Probiermanometer auf die Flasche geschraubt. Die Verbindungsstücke der Flasche mit diesem Manometer enthielten Schmieröl.

¹³⁾ Report, S. 40.

III. Das Verschlußventil der Flasche war geöffnet worden, so daß das Gas in das Manometer einströmen und in dem Verbindungsrohr und Manometer eine Kompression, damit aber auch eine starke Temperaturerhöhung der eingeschlossenen Luft bewirken mußte.

IV. Infolge dieser Temperaturerhöhung ist augenscheinlich das Schmieröl durch den komprimierten Sauerstoff entzündet worden und brachte das explosive Gas in der Flasche zur Explosion.

struktion von O. Schmidtherrührt. Zur Wasserzersetzung wird dort der elektrische Strom benutzt, nur soweit er nicht für andere Zwecke dient. Die Anlage ist an das Elektrizitätswerk des Ortes angeschlossen und befindet sich im gleichen Hause wie dieses.

Die Einrichtung des Wasserzersetzers ist aus den Abbildungen 2 und 3 ersichtlich. Die Zersetzung des durch Zusatz von 10% reinem Kaliumcarbonat (Pottasche) alkalisch gemachten destillierten Wassers geschieht in Zellen, die wie die einer Filterpresse aus gußeisernen Platten zusammengesetzt sind. Jede Zelle ist durch eine

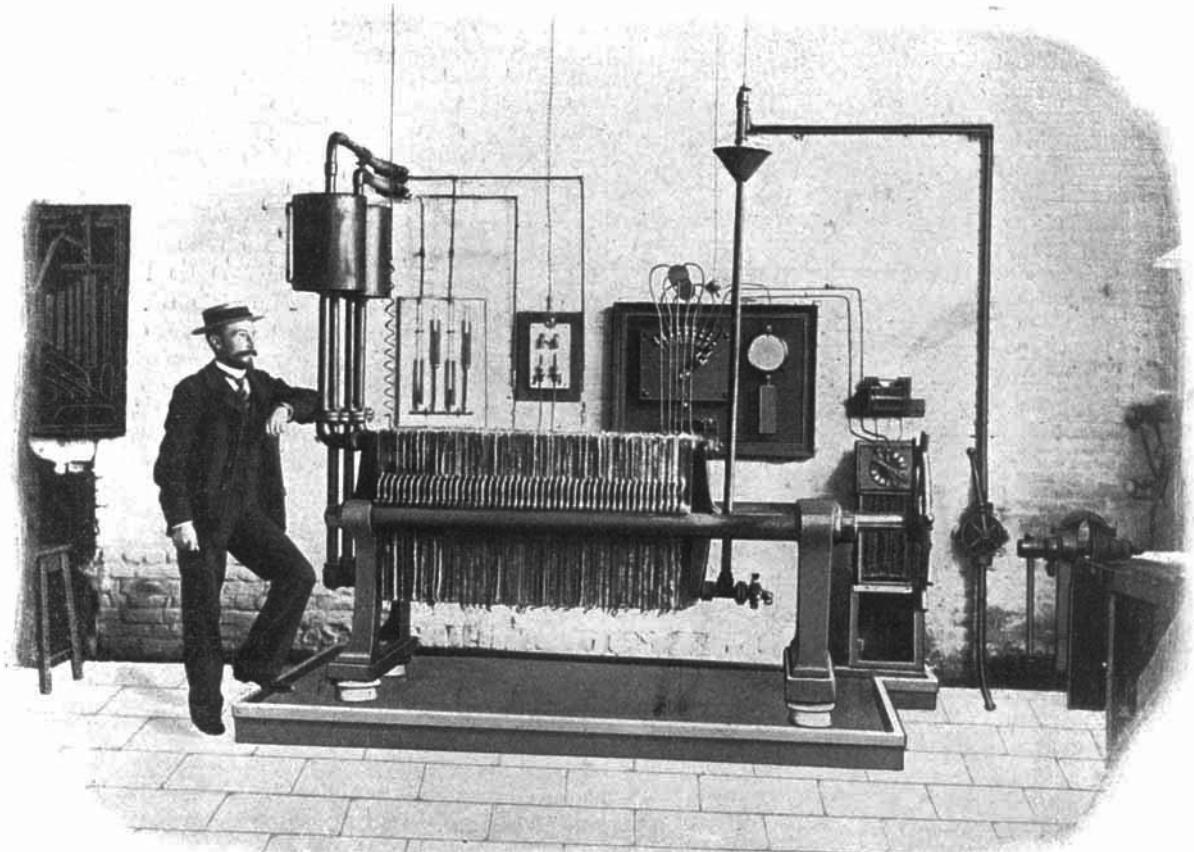


Abb. 2. Schmidtscher Wasserzersetzer.

II. Untersuchungen über die Ursachen des Wasserstoffgehaltes des Sauerstoffgases.

Wir haben uns auch die Aufgabe gestellt, zu ergründen, woher der abnorm hohe Wasserstoffgehalt des Sauerstoffs in der explodierten Flasche 683 und der Flasche 2609 röhre. Zu diesem Bechu (und um womöglich weitere Unglücksfälle durch ähnlich beschaffenes Gas zu verhüten) begaben wir uns sofort, nachdem dieser Gehalt konstatiert war, Sonntag den 30./4. abends in die Fabrik, und zwar in Begleitung des Bezirksanwaltes.

Das Sauerstoffgas wird in dieser Fabrik neben Wasserstoffgas durch Elektrolyse von Wasser in einem Zersetzungssapparat hergestellt, dessen Kon-

poröse Scheidewand (Diaphragma) aus Asbestgewebe in zwei Teile geteilt. Die mit Gummi belegten Ränder des Diaphragmas isolieren zugleich die einzelnen Platten voneinander. Diese Platten bilden nun die Elektroden der Zersetzungszellen derart, daß je an der einen Platte der Sauerstoff, an der anderen der Wasserstoff sich abscheidet. 96 solcher Zellen sind bei dem Apparate in W. nebeneinander angeordnet; die äußersten Platten der ersten und letzten Zelle dienen zur Stromzuführung. Im regelrechten Betriebe sind alle Zellen völlig mit Wasser gefüllt, das durch einen Kanal der unten durch die ganze Zellenreihe durchgeht, eintritt. Die Gase entweichen durch ähnliche Kanäle, die oben auf beiden Seiten der Platten

angebracht sind, und zwar so, daß der eine Kanal mit der Sauerstoffseite, der andere mit der Wasserstoffseite der Zellen verbunden ist. Die Gase treten dann in je einen „Gasabscheider“, in dem sie das mitgerissene Wasser zurücklassen, das dann wieder in den Zersetzungskörper zurückfließt. Aus den Gasabscheidern gehen die Gase in die Gasometer, die im Freien aufgestellt sind. Aus diesen Gasometern werden die Gase dann durch einen Kompressor abgesaugt und in die zum Versandt dienenden Stahlflaschen gepreßt. Der Zersetzer in W. arbeitet normal mit einer Spannung von 230 Volt und einer Stromstärke von 30 Amp. Er kann in 24 Stunden rund 8 cbm Sauerstoff und 16 cbm Wasserstoff liefern.

Auch bei normalem Betrieb des Wasserzersetzers werden die Gase stets etwas verunreinigt, derart, daß der Sauerstoff 2—5 Vol.-% Wasserstoff, der Wasserstoff aber 1—2½% Sauerstoff enthält. Zu Beginn der Elektrolyse sind die Gase stärker verunreinigt als nachher. Sobald die Erwärmung des Apparates genügend ist, sinkt der Wasserstoffgehalt des Sauerstoffs auf etwa 3%. Nach Angaben des Erfinders ist dies der normale Gehalt, der im regulären Betriebe nicht wesentlich

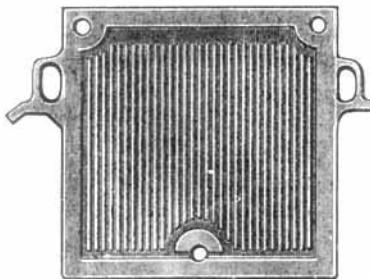


Abb. 3. Eine Platte des Schmidtschen Wasserzersetzers.

überschritten wird. Dies wird uns auch durch Herrn Gewerberat Clausen nach Beobachtungen in Hagen i. W. brieflich bestätigt.

Die Verunreinigung der Gase röhrt daher, daß die Wasserzersetzung nicht nur in den Zellen stattfindet, wo die beiden Gase durch die Diaphragmen voneinander getrennt gehalten werden, sondern auch in den Kanälen für Zufuhr des Wassers und für die Ableitung der Gase. Diese Kanäle enthalten auch Wasser, das auch elektrolysiert wird. Die hier entstehenden Gase, Wasserstoff und Sauerstoff gemengt, mischen sich den aus den Zellen kommenden einzelnen Gasen bei.

Da diese Beimischung größer oder kleiner werden kann, und da nämlich bei der Inbetriebsetzung die Gase noch mit Luft gemengt aus dem Apparate kommen, ist es stets nötig, die Gase auf ihre Reinheit zu prüfen. Dem Wasserzersetzer ist zu diesem Zwecke ein „Kontrollapparat“ beigegeben (Abbildung 4). Ein kleiner Teil des Wasserstoffstromes tritt fortwährend in die eine der beiden Glasröhren des Kontrollapparates und wird an deren oberem Ende an einem kleinen Specksteinbrenner angezündet. In gleicher Weise geht ein geringer Teil des Sauerstoffstromes durch das zweite Glasröhren und tritt durch eine Öffnung aus, die dem Wasserstoffflämmchen gerade gegenüberliegt. Wird nun

der Wasserstoffgehalt des Sauerstoffs zu groß, das Gas dadurch explosiv, so soll in dem Sauerstoffröhren eine kleine Explosion erfolgen, die als Warnungssignal dient. Ebenso würde bei zu starkem Wasserstoffgehalt des Wasserstoffs dieser durch das Flämmchen zur Explosion kommen.

Ein ganz ähnlicher Wasserzersetzer, wie der eben beschriebene der Fabrik in W., ist in einer Akkumulatorenfabrik in Oerlikon in täglichem Betriebe und liefert dort die zum Bleilöten dienenden Gase. Wir haben diesen Apparat besichtigt zu einer Zeit, da er schon seit mehreren Wochen in ununterbrochenem Betriebe war. Die Analyse einer von uns diesem Apparate entnommenen Sauerstoffprobe ergab einen Sauerstoffgehalt von 96,95 Vol.-%, also nicht mehr als 3,05% Wasserstoff.

Ein weiterer Schmidtscher Wasserzersetzer ist in der Maschinenfabrik Oerlikon aufgestellt und wurde uns von der Direktion in dankenswerter Weise für Versuche zur Verfügung gestellt.

Woher rührte nun der außerordentlich hohe Gehalt an Wasserstoff in dem Sauerstoffgas aus dem Apparate in W., der die Explosion vom 29./4. verursacht hatte. Dafür konnten neun verschiedene Vermutungen aufgestellt werden, die wir im nachfolgenden diskutieren wollen.

1. Der Kompressor konnte beim Füllen der kritischen Flaschen mit Sauerstoff noch Wasserstoff enthalten haben, der dann mit eingespumpt wurde.

Die Fabrik in W. besitzt auffallenderweise nur einen einzigen Kompressor, der abwechselnd zur Füllung von Sauerstoff- oder Wasserstoffflaschen verwendet wird. Der Kompressor ist nach System Linde gebaut; sein Kolben wird nicht mit Öl oder Glycerin, sondern nur mit Wasser geschmiert. Nach Aussage der Fabrikleitung wird der Kompressor jedesmal, bevor er zur Füllung von Sauerstoffflaschen dient, durch Einsaugen von Luft, dann von Sauerstoffgas „ausgespült“, d. h. von vorhandenen Resten von Wasserstoffgas gereinigt. Erst wenn dieses geschehen ist, werde der Sauerstoff in die Stahlflaschen gepreßt. Die Reinigung erstreckt sich natürlich auch auf die Zuleitung des Gases zu den Flaschen. Wäre nun diese Reinigung einmal unterlassen oder nur unvollständig durchgeführt worden, so könnte ein noch vorhandener Rest von Wasserstoff offenbar nur die erste Flasche einer Serie, die gefüllt wurde, verunreinigen, während die folgenden davon unberührt blieben. Wir haben aber am 30./4. in W. festgestellt, daß eine ganze Reihe von Sauerstoffflaschen, die in der zweiten Hälfte des Monats April gefüllt worden waren, explosives Gas, also eine starke Beimischung von Wasserstoffgas enthielt. Dieser Wasserstoffgehalt wurde um

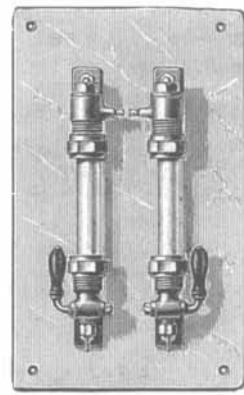


Abb. 4.
Gas-Kontrollapparat.

so größer, je näher der von der Fabrik angegebene Zeitpunkt der Füllung an den 30./4. heranrückte.

Es zeigte sich im weiteren, daß am 30./4. auch der Inhalt der beiden Sauerstoff-Gasmometer explosiv war, also Wasserstoff in größerer Menge enthielt. Wir stellten den Wasserstoffgehalt fest, indem jeweilen ein Teil des Gases in Seifenwasser geleitet wurde. Die entstandenen Seifenblasen wurden dann mit einem Zündholz angezündet. Bei starkem Gehalt an Wasserstoff verbrannte das Gas mit mehr oder minder lautem Knall.

Aus diesen Beobachtungen ergibt sich, daß der hohe Wasserstoffgehalt des nach Winterthur gelieferten Sauerstoffs nicht durch den Kompressor bewirkt sein konnte.

2. Die Stahlflasche, die zur Explosion kam, konnte vor ihrer Füllung mit Sauerstoff einen Rest von Wasserstoff enthalten haben (oder umgekehrt).

Die unter 1. angegebenen Beobachtungen beweisen auch, daß diese Vermutung nicht zutreffen kann.

3. Die beiden aus den Sauerstoff- und Wasserstoffgasometern zum Kompressor führenden Röhrenleitungen sind in der Fabrik in W. durch einen Hahn miteinander in Verbindung. Wenn nun dieser Hahn undicht war, konnte beim Aussaugen des Sauerstoffs aus dem Sauerstoffgasometer auch Wasserstoffgas aus dem Wasserstoffgasometer mit eingesaugt und in die Flaschen gepreßt werden. Auch konnte durch den undichten Hahn Wasserstoff aus dem Wasserstoffgasometer in den Sauerstoffgasometer hinübergepreßt werden, wenn der Druck in ersterem größer war als in letzterem.

Es wurde daher dieser Hahn genau geprüft. Man saugte dazu durch die eine Röhrenleitung mittels des Kompressors Luft an, während auf der anderen Seite des Hahns ein empfindliches Wasser manometer angesetzt war. Der Hahn erwies sich für Luft wie für Wasser als undurchlässig, konnte also nicht zu einer Mischung der beiden Gase Anlaß gegeben haben.

4. Es war denkbar, daß Wasserstoff durch s c h a d l i c h e D i a p h r a g m e n in die Sauerstoffräume der Zersetzungszellen übertrat.

Man kann von vornherein annehmen, daß das Asbestgewebe der Diaphragmen mit der Zeit durch die 10%ige Pottaschelösung etwas angegriffen wird. Durch Untersuchungen von K. Egli in Zürich, die uns durch die Direktion der Maschinenfabrik Oerlikon gütigst zur Verfügung gestellt wurden, ist dies auch bestätigt. Die genaue Besichtigung aller Diaphragmen des Wasserzersetzers in W., die wir am 30./4. und eingehender noch am 3./5. vornahmen, ergab, daß verschiedene der Diaphragmen kleine Löcher, wie von Nadelstichen herührend, hatten. Eigentliche Risse oder gröbere Schäden waren dagegen an keinem zu bemerken.

Ganz ähnlich war aber der Befund an gebrauchten Diaphragmen von den beiden Wasser zersetzern in Oerlikon. Auch da fanden wir solche kleinen Löcher, die aber, wie S. 000 bemerkt, keine Unzuträglichkeiten veranlaßt haben.

5. Auch durch unbeschädigte Diaphragmen konnte eine Vermischung (Diffusion) der beiden

Gase stattfinden, falls der Wasserstand in den Zellen zu tief sank.

Eine Diffusion durch die unbeschädigten Asbestdiaphragmen, die immerhin auch im neuen Zustande sehr porös sind, mußte nicht als unbedingt ausgeschlossen erscheinen. Man konnte denken, daß Gasblasen auf beiden Seiten an den rauhen Diaphragmen hängen blieben und dann durch die Poren des Gewebes diffundierten. Die genannten Beobachtungen an den Wasserzersetzern in Oerlikon zeigen aber, daß eine solche Diffusion bei n o r m a l e m Betriebe, d. h. wenn die Zellen gänzlich mit Wasser gefüllt sind, kaum eintritt. Die Gase steigen dann durch die Rinnen der Elektrodenplatten in der Flüssigkeit in die Höhe, offenbar ohne stark mit den Diaphragmen in Berührung zu kommen. Anders wird es sein, wenn durch unachtsame Bedienung der Wasserstand im ganzen Apparate so tief sinkt, daß die Zellen nur noch zum Teil mit Wasser gefüllt sind. Dann werden die Gase, die den Raum der Zellen über dem Wasser erfüllen, in der Tat durch die Diaphragmen hindurch sich gegenseitig vermischen, und zwar wird der Wasserstoff infolge seiner größeren Diffusionsgeschwindigkeit rascher in den Sauerstoff übertragen als umgekehrt. Dieser Fall, daß der Wasserstand zu tief sank, ist zugestandenermaßen in W. schon vorgekommen, und bewirkte dann einmal eine kleine *Explosion* in der Sauerstoffleitung des Apparates. Ob dieser Fall auch während der kritischen Betriebsperiode eingetreten ist, entzieht sich unserer Kenntnis. Es wird durch den Betriebsleiter verneint.

6. Falls die Verbindung einzelner Zersetzungszellen mit dem Wasserstoffkanal verstopft war, müßte Wasserstoff durch die Diaphragmen in den Sauerstoff hinüber gedrückt werden.

Die Untersuchung sämtlicher Elektrodenplatten des Wasserzersetzers in W., die am 3./5. vorgenommen wurde, zeigte uns, daß verschiedene Platten auf beiden Seiten ziemlich stark mit einer schlammigen Schicht einer braunen, rostartigen Substanz überzogen waren. Diese Erscheinung fehlte an den Apparaten in Oerlikon. Der Schlamm füllte auch die Bohrungen, die die Wasserstoffräume mit dem Wasserstoffsammelkanal verbinden, zum Teil aus. Bei einer Zelle wurde eine völlig e Verstopfung festgestellt.

Besondere Versuche, die nun am 8./5. am Wasserzersteller in der Maschinenfabrik Oerlikon von uns vorgenommen wurden, sollten zeigen, welchen Einfluß auf die Beschaffenheit des Wasserstoffgases dieser Fehler haben kann. Es wurden dazu absichtlich die Verbindungsbohrungen von einer bis drei Zellen mit dem Wasserstoffkanal verstopft und der Apparat dann in Gang gesetzt. Das Sauerstoffgas, das vorher 95,6 bis 96,2 Vol.-% Sauerstoff, also höchstens 3,8 bis 4,4% Wasserstoff enthalten hatte, wies infolge der genannten Verstopfungen nur noch 92,5—93,6% Sauerstoff, also einen Wasserstoffgehalt von etwa 6,4—7,5% auf. Diese Verstopfungen bilden also in der Tat eine Ursache, um den Wasserstoffgehalt des Sauerstoffs zu vermehren.

7. Bei zu geringer Stromstärke des elektrischen Stromes konnte die Elektrolyse in den

einzelnen Zellen zu gering werden, so daß dann das in den Kanälen entwickelte Gasgemisch einen höheren Bruchteil der Gesamtgasmenge ausmachte.

Nach den Aussagen der Betriebsleitung arbeitete man in W. nicht selten mit geringerer Stromstärke als für den normalen Betrieb des Wasserzersetzers vorgeschrieben ist (30 Amp.). Dies geschah immer, wenn die elektrische Energie vorwiegend für andere Zwecke benutzt werden mußte.

Durch einen Versuch in Oerlikon haben wir festgestellt, daß, wie zu vermuten war, die Stromstärke auf den Wasserstoffgehalt des Sauerstoffs von Einfluß ist.

Durch Steigerung der Stromstärke von 30 auf 50 bis 60 Amp. sank nämlich der (vom vorhergehenden Versuche her noch hohe) Wasserstoffgehalt innerhalb einer halben Stunde von 7,4 auf 5,6%. Bei geringerer Stromstärke wird also der Wasserstoffgehalt des Sauerstoffs größer.

8. Die Stromstärke, und damit der Wasserstoffgehalt des Sauerstoffs, konnten sich ändern durch unrichtige Beschaffenheit der Flüssigkeit in den Zellen.

Die von O. Schmidt und von der Maschinenfabrik Oerlikon gegebenen Betriebsvorschriften geben an, daß dem Wasser, das als Elektrolyt dient, 10% reinster Pottasche zugesetzt werden soll, so daß eine Lösung vom spez. Gew. 1,10 im Maximum entsteht. Eine geringere Konzentration der Flüssigkeit erhöht deren Widerstand und vermindert dadurch die Stromstärke, was nach dem zu Punkt 7 Gesagten eine Vermehrung des Wasserstoffgehaltes im Sauerstoff bedingt. Die in Wetzikon am 3./5. dem Apparate entnommene Pottaschelösung hatte nur ein spez. Gew. von 1,05 und enthielt nur 5,7% Pottasche. Sie erhielt überdies erhebliche Mengen von Chloriden und Sulfaten. Die Lösung war sonach entweder mit unreiner Pottasche oder mit unreinem, nicht, wie vorgeschrieben, mit destilliertem Wasser hergestellt. Diese Verunreinigungen der Zersetzungslösigkeit werden (wahrscheinlich infolge ihrer elektrolytischen Zersetzungsprodukte) eine stärkere Verschlammung der Eisenplatten bewirken, was nach dem Gesagten, durch Erhöhung des Widerstandes, Möglichkeit von Verstopfungen usw., ebenfalls ungünstig wirkt.

9. Es konnte sich durch Einwirkung des Sperrwassers auf das Blech der Sauerstoffgasometer Wasserstoff entwickelt haben.

In chemischen Laboratorien ist schon beobachtet worden, daß das Sperrwasser kleiner Zinkblechgasometer zufällig sauer geworden war, und dann durch chemische Einwirkung auf das Zinkblech Wasserstoff entwickelt hat. Es ist ein Fall bekannt, wo dadurch eine Explosion eintrat¹⁴⁾.

Die Gasometer in W. sind aus „galvanisiertem“, d. h. verzinktem Eisenblech gemacht, das in ähnlicher Weise durch Säuren, unter Umständen auch durch Alkalien angegriffen werden könnte. Das Sperrwasser dieser Gasometer erwies sich aber bei der Analyse als völlig neutral, frei von Säuren, wie

von Alkalien, so daß es diese Wirkung nicht ausüben konnte.

Durch diese Überlegungen und Untersuchungen ist dargetan, daß bei dem Betriebe des Wasserzersetzers in W. verschiedene Unregelmäßigkeiten vorgekommen sind, die eine Erhöhung des Wasserstoffgehaltes im Sauerstoff zur Folge haben mußten.

Diese Unregelmäßigkeiten waren:

a) Zeitweises Sinken des Wasserstandes im Apparat unter das zulässige Niveau. Es ist nicht festzustellen, ob dieser Umstand auch während der kritischen Betriebsperiode eintrat.

b) Verschlammung und teilweise Verstopfung der eisernen Elektrodenplatten.

c) Zeitweiser Betrieb mit zu geringer Stromstärke.

d) Zu geringer Pottaschezusatz zum Wasser.

e) Verunreinigungen in der Pottaschelösung.

In welchem Grade diese verschiedenen Unregelmäßigkeiten an der Erzeugung des schließlichen Ergebnisses — 20,1% Wasserstoffgehalt des Sauerstoffgases — beteiligt waren, läßt sich selbstverständlich nachträglich nicht mehr entscheiden. Man kann nur sagen, daß, wenn der Wasserzersetzer den Vorschriften gemäß stets in normalem Betrieb gehalten und mit genügender Sachkenntnis und Umsicht überwacht worden wäre, dieses außergewöhnliche Ergebnis nicht hätte zustande kommen können.

III. Untersuchungen über die Mängel bei der Betriebskontrolle.

Wie oben gezeigt, ist es durchaus nötig, das Sauerstoffgas, das dem Wasserzersetzer entströmt, auf seine Reinheit zu prüfen. Dazu soll der auf S. 1537 erwähnte Kontrollapparat dienen.

Ein solcher Kontrollapparat war auch bei der Anlage in W. vorhanden. Nach Aussage des Betriebsleiters funktionierte er aber nicht gut, indem das Wasserstoffflämmchen häufig auslöschte, ohne daß dies jeweilen sofort bemerkt wurde. Deswegen sei der Kontrollapparat schon vor längerer Zeit außer Gebrauch gesetzt worden.

Wir haben diesen Kontrollapparat der Anlage in W. in unserem Laboratorium einer näheren Prüfung unterzogen, nachdem wir einige Versuche mit einem selbst zusammengestellten ähnlichen Apparate gemacht hatten.

Es zeigte sich, daß der Kontrollapparat der Fabrik, wie der von uns selbst gebaute, einen Gehalt von 10,4 Vol.-% Wasserstoff im Sauerstoffgas noch gar nicht anzeigt; weder bei raschem, noch bei langsamem Gasstrom trat eine Explosion oder Verpuffung ein. Das Sauerstoffgas mit 20,1% Wasserstoff, das die große Explosion im Technikum veranlaßt hatte, kam im Kontrollapparat nur zu schwacher Verpuffung, ohne Knall oder gar Zertrümmerung des Glasröhchens.

Die Gasprüfung mit diesem Kontrollapparate ist also eine recht rohe. Sie mag für manche Verwendungen des Sauerstoffs genügen, genügt aber keinenfalls für die Untersuchung des Gases, das komprimiert werden soll.

Man ersetze in W. die Gasprüfung mit dem Kontrollapparat durch eine einfachere Prüfung auf

¹⁴⁾ K. Egli, Über die Unfälle beim chemischen Arbeiten, Zürich 1903, S. 73. Berl. Berichte 15, 2360.

Explosivität. Eine kleine Menge des zu prüfenden Gases wurde dazu jeweilen in Seifenblasen geleitet und diese entzündet (wie S. 1538 beschrieben). Diese rohe, in chemischen Laboratorien häufig angewandte Prüfungsmethode sollte dann dartun, ob das Gas zum Einfüllen in Flaschen verwendbar sei oder nicht. Sie ist aber ebenso unempfindlich wie die Probe mit dem Kontrollapparat. Nach Bunsen¹⁵⁾ entzünden sich Gemenge von Sauerstoff mit weniger als 6,44 Vol.-% Wasserstoff überhaupt nicht mehr unter Atmosphärendruck, während sie unter erhöhtem Druck doch explosiv sein können. Auch Sauerstoff mit 10,4% Wasserstoff zeigte bei unseren Versuchen in Seifenblasen (wie im Kontrollapparat) keine Explosionserscheinungen. Diese „Seifenblasenprobe“ kann also wohl ausreichen, um rasch zu entscheiden, ob das Sauerstoffgas bei Verwendung unter Atmosphärendruck stark explosiv ist. Für eine Prüfung des Gases, das verdichtet werden soll, ist sie unbrauchbar.

Eigentliche chemische Analysen zu direkter Bestimmung des Sauerstoff- oder Wasserstoffgehaltes der Gase, die allein maßgebend sein können, wurden seltsamerweise in W. gar nicht ausgeführt. Apparate dazu waren nur teilweise und unvollständig vorhanden.

Aber auch die genannte „Seifenblasenprobe“ wurde nicht regelmäßig gemacht, und in der kritischen Zeit, d. h. in der zweiten Hälfte des Monats April 1905 gänzlich unterlassen.

Dagegen führte man eine Art Kontrolle dadurch aus, daß ein Teil des erzeugten Wasserstoffgases von dem Wasserzersetzer nach der Wohnung des Maschinisten geleitet und dort täglich in der Küche als Kochgas benutzt wurde. Ferner wurde solches Wasserstoffgas in der Fabrik hin und wieder zum Löten benutzt. Da bei diesen Verwendungen, nach Aussage der Beteiligten, nichts Ungewöhnliches wahrgenommen wurde, glaubte man, annehmen zu dürfen, daß die vom Wasserzersetzer gelieferten Gase normale Beschaffenheit hätten.

Abgesehen davon, daß diese Art der Prüfung sich nur auf den Wasserstoff, nicht auch auf den Sauerstoff erstreckte, kann sie selbst über die Explosivität des Wasserstoffs keinen Aufschluß geben. Man vergleiche hierüber das auf S. 1537 über die Verwendung von Knallgas zum Löten Gesagte. Auch Knallgas brennt dabei ohne Explosion. Aber selbst wenn man in der Küche beobachtet hätte, daß das Wasserstoffgas explosiv ist, also zu viel Sauerstoff enthielt, so würde das zu gleicher Zeit erzeugte Sauerstoffgas schon etwa die doppelte Menge Wasserstoff (im Vergleich zum Sauerstoffgehalt des Wasserstoffgases) enthalten haben und daher schon sehr gefährlich gewesen sein. Nach Bunsen¹⁶⁾ wird Wasserstoff erst explosiv, wenn er mehr als 7,6% Sauer-

stoff enthält. Das gleichzeitig vom Wasserzersetzer gelieferte Sauerstoffgas hätte dann schon mindestens etwa 15,2% Wasserstoffgehalt, während es nach Bunsen bei mehr als 6,44% Wasserstoffgehalt entzündlich zu werden beginnt, namentlich wenn es unter erhöhtem Drucke steht.

Neben dieser, wie wir sehen, durchaus illusorischen Kontrolle des Wasserstoffgases in der Küche verließ man sich im übrigen darauf, daß der Wasserzersetzer, wenn er nach Ansicht der Betriebsleitung in regelrechtem Betrieb war, auch normale Gase geben müsse. Die öfters ausgeführten Beobachtungen der elektrischen Spannungen zur Überwachung des regelrechten Betriebes waren allerdings auch nur recht rohe.

So kam es also, daß gegen Ende April 1905 der Wasserstoffgehalt des erzeugten Sauerstoffgases immer größer werden konnte, ohne daß es in der Fabrik bemerkt wurde.

Wir fassen zusammen:

- I. Der dem Wasserzersetzer beigegebene Kontrollapparat ist für den gegebenen Zweck nicht geeignet.
- II. Die zum Ersatz dafür verwendete „Seifenwasserprobe“ ebensowenig.
- III. Die Verbrennung von Wasserstoff in einem Kochherde oder Lötrohr kann nicht als Kontrolle für die Beschaffenheit des gleichzeitig erzeugten Sauerstoffs angesehen werden.
- IV. Gasanalysen wurden nicht ausgeführt.
- V. In der kritischen Zeit wurde jede Kontrolle des Gases überhaupt unterlassen.

Aus dieser Untersuchung ergibt sich, daß das elektrolytische Verfahren auch Gase von geringerer Reinheit zu liefern imstande ist, daß also diese Reinheit durch chemische Analysen regelmäßig kontrolliert werden muß. Außer einer amtlichen Überwachung der betreffenden Fabriken, wie sie bereits in mehreren Ländern besteht, sollten an die Beschaffenheit der in den Handel kommenden Gase bestimmte Anforderungen gestellt werden¹⁷⁾. Am einfachsten und sichersten erschien es uns, daß dies durch internationale Vereinbarungen geschähe, etwa in der Art, daß die Bahnverwaltungen auch Vorschriften über die Qualität der Gase aufstellen würden, wie solche über die Prüfung der Flaschen, über die Stärke der Kompression der Gase usw. seit längerer Zeit schon in Kraft sind. Für den Sauerstoff dürfte wohl ein Wasserstoffgehalt von 4 Vol.-% als das zulässige Maximum angesehen werden.

Durch solche Vorschriften würde es allein möglich, die hochgradige Erregung und Furcht, die in weiten Kreisen durch den Unglücksfall vom 29./5. erzeugt wurde, auf das richtige Maß zurückzuführen und die Industrie komprimierter Gase vor weiterem Schaden zu schützen.

¹⁵⁾ Bunsen, Gasometrische Methoden, 1857, S. 260.
¹⁶⁾ Bunsen, Gasometrische Methoden, 1857, S. 260.

¹⁷⁾ Anregungen dazu sind von uns bei den zuständigen schweizerischen Behörden gemacht worden.