

Mitteilungen
über
Forschungsarbeiten

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

insbesondere aus den Laboratorien
der technischen Hochschulen

herausgegeben vom

Verein deutscher Ingenieure.

Heft 113.

Walther: Versuche über den Arbeitsbedarf und die Widerstände beim Blechbiegen.

1912

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Preis: 1 *M* für Lehrer und Schüler technischer Schulen,
2 *M* für sonstige Bezieher.

Bezugsbedingungen:

Preis des Heftes 1 bis 112 je 1 Mk,

zu beziehen durch Julius Springer, Berlin W. 9, Linkstr. 23/24;

für Lehrer und Schüler technischer Schulen 50 Pfg,

zu beziehen gegen Voreinsendung des Betrages vom Verein deutscher Ingenieure, Berlin N.W. 7, Charlottenstraße 43.

Von Heft 113 an sind die Preise entsprechend auf 2 *M* und 1 *M* erhöht.

Eine Zusammenstellung des Inhaltes der Hefte 1 bis 107 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten zugleich mit einem Namen- und Sachverzeichnis wird auf Wunsch kostenfrei von der Redaktion der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin N.W., Charlottenstr. 43, abgegeben.

Heft 108/109: Vogel, Ueber die Temperaturänderung von Luft und Sauerstoff beim Strömen durch eine Drosselstelle bei 10° C und Drücken bis zu 150 at.

Soennecken, Der Wärmeübergang von Rohrwänden an strömendes Wasser.

Knoblauch und Hilde Mollner, Die spezifische Wärme c_p des überhitzten Wasserdampfes für Drücke von 2 bis 8 kg/qcm u. Temperaturen von 350 bis 550° C.

Heft 110/111: Untersuchungen an elektrisch u. mit Dampf betriebenen Fördermaschinen.

Heft 112: E. Heyn und O. Bauer, Untersuchung eines gerissenen Flammrohrschusses.

R. Baumann, Versuche mit Aluminium, geschweißt und ungeschweißt, bei gewöhnlicher und bei höherer Temperatur.

Heft 113: Walther, Versuche über den Arbeitsbedarf und die Widerstände beim Blechbiegen.

Heft 114: Hochschild, Versuche über die Strömungsvorgänge in erweiterten und verengten Kanälen.

Heft 115: Arit, Untersuchungen über Wetterführung mittels Lutten.

Heft 116: Hort, Untersuchung von Flüssigkeiten, die als vermittelnde Körper im oberen Prozeß einer Mehrstoffdampfmaschine Verwendung finden können.

Gary, Ueber die Prüfung feuerfester Steine nach den Vorschriften der Kaiserlichen Marine, insbesondere auf Raumbeständigkeit in der Hitze.

Literarische Unternehmungen d. Vereines deutscher Ingenieure:

ZEITSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

Redakteur: D. Meyer.

Berlin N.W., Charlottenstraße 43

Geschäftstunden 9 bis 4 Uhr.

Expedition und Kommissionsverlag: Julius Springer, Berlin N., Monbijou-Platz 3.

Die Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure erscheint wöchentlich Sonnabends. Je einmal im Monat liegt ihr die Zeitschrift „Technik und Wirtschaft“ bei. Preis bei Bezug durch Buchhandel und Post 40 *M* jährlich; einzelne Nummern werden gegen Einsendung von je 1.30 *M* — nach dem Ausland von je 1.60 *M* — portofrei geliefert.

TECHNIK UND WIRTSCHAFT.

MONATSSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

REDAKTEUR D. MEYER.

IN KOMMISSION BEI JULIUS SPRINGER BERLIN.

Die »Technik und Wirtschaft« liegt der ganzen Auflage der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure (Preis des Jahrgangs 40 *M*) allmonatlich bei. Sie ist außerdem für 8 *M* für den Jahrgang durch alle Buchhandlungen und Postanstalten sowie durch die Verlagsbuchhandlung von Julius Springer zu beziehen.

Mitteilungen
über
Forschungsarbeiten

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

insbesondere aus den Laboratorien
der technischen Hochschulen

herausgegeben vom

Verein deutscher Ingenieure.

Heft 117.



Berlin 1912
Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01708-1

ISBN 978-3-662-02003-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-02003-6

Inhalt.

	Seite
Untersuchung über die Verbrennung methanhaltiger Gasgemische. Von Dr.-Ing. W. Bucher	1
Die Wasserdruckmomente der Drehschaufeln von Zentripetal-Francis-Turbinen. Von Dr. R. Camerer	47

Untersuchung über die Verbrennung methanhaltiger Gasgemische.

(Mitteilung aus dem Maschinenlaboratorium der Kgl. Sächs. Technischen Hochschule zu Dresden.)

Von Dr.-Ing. **Willy Bucher.**

Einleitung.

Von den methanhaltigen Gasgemischen ist besonders das Leuchtgas wegen seiner hohen technischen und wirtschaftlichen Bedeutung Gegenstand zahlreicher Arbeiten gewesen. Die Forschungen haben sich hierbei sowohl auf die Verwendung dieses Gases zu Beleuchtungs- und Heizzwecken als auch auf den Gebrauch als Energiequelle für Motoren erstreckt.

Aus der Reihe der in der ersten Richtung angestellten Versuche sind hauptsächlich die von Cramer¹⁾, Renk²⁾ und Haber³⁾ zu erwähnen; sie haben das besonders für die Gesundheitslehre bedeutsame Ergebnis geliefert, daß die Abgase von Leuchtgasflammen bei richtiger Bauart der Brenner nur verschwindende Spuren von brennbaren Gasen enthalten. Von den Abhandlungen über die Benutzung des Leuchtgases für motorische Zwecke sind besonders die von Haber³⁾ und Eugen Meyer⁴⁾ bekannt geworden. Die letzte Arbeit befaßt sich außerdem mit der Beurteilung der Verbrennung, wenn das heizarme Kraftgas als Betriebsmittel verwendet wird.

Für die Untersuchung von Gasmaschinen ist die Kenntnis der stündlich in den Kreisprozeß eingeführten Wärmemenge von grundlegender Wichtigkeit. Die Ermittlung des Wärmeverbrauches erfolgt mit Hilfe des entweder auf Grund der Gaszusammensetzung berechneten oder durch Versuche gefundenen Heizwertes des Brennstoffes. Für die zweite Art der Heizwertbestimmung kommt heute wohl hauptsächlich das Kalorimeter von Junkers in Betracht. Während nun die kalorimetrischen Werte bei Leuchtgas gute Uebereinstimmung mit denen der Gasanalyse zeigen, sind bei Generatorgas von Nügel⁵⁾ gelegentlich seiner »Versuche an der Gasmaschine über den Einfluß des Mischungsverhältnisses« Unterschiede zwischen den beiden fraglichen Heizwertzahlen festgestellt worden, die trotz vieler Mühe nicht zum Verschwinden zu bringen waren. Die Versuchsergebnisse legten die Vermutung nahe, daß das dem Generatorgas in

¹⁾ Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1891 S. 1.

²⁾ Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1893 S. 321.

³⁾ Experimentaluntersuchungen über Zersetzung und Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, München 1896 S. 77.

⁴⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 8 S. 62.

⁵⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 54.

geringen Prozentsätzen beigemischte, schwer entzündliche Methan in dem stark gekühlten Kalorimeterraum nicht vollkommen verbrennt, während das im Leuchtgas enthaltene Methan durch den Einfluß der großen Menge des leicht brennbaren Wasserstoffes anscheinend vollständig zur Verbrennung gelangt.

Daß bis jetzt in dieser Richtung eingehende Versuche unterblieben sind, dürfte darauf zurückzuführen sein, daß die Heizwertzahlen in der Praxis wohl seltener auf verschiedenem Wege ermittelt und zum Vergleiche nebeneinandergestellt werden. Die Aufgabe der vorliegenden Versuche sollte es daher sein, den Einfluß des Wasserstoffes auf die Zündgeschwindigkeit von Methan zu untersuchen und Versuchsgrundlagen für die Beurteilung der Verbrennung von Generatorgas im Kalorimeter zu schaffen.

A. Erster Teil.

Untersuchung der Zündgeschwindigkeit von Methan-Wasserstoff-Luftgemischen.

I.

Die Versuchseinrichtung.

Zur Ermittlung der Zündgeschwindigkeit von Methan-Wasserstoff-Luftgemischen diente die Bombe als Explosionsgefäß, an der Langen¹⁾ seine Versuche über das Verhalten der mittleren spezifischen Wärme von Kohlensäure und Wasserdampf vorgenommen hat. Diese war von Nägel²⁾ bei seinen Untersuchungen über die Zündgeschwindigkeit explosibler Gasgemische mit einem optischen Indikator, neuen Meßvorrichtungen und Hilfsapparaten ausgestattet worden.

Bei den erwähnten Versuchen mit leicht entzündlichen Gasgemischen sprang der Zündfunke in der Mitte der Bombe zwischen zwei Platinspitzen über. Um bei dem schwer brennbaren Methan volle Sicherheit zu haben, daß ein Funke das Gemisch durchschlagen hatte, bildete man die beiden Elektroden kugelförmig aus. Diese Form läßt stille Entladung vermeiden, wenn nach Töppler der Durchmesser der Elektroden größer als die Funkenstrecke ist; letztere betrug 3 mm. Man verwendete daher in der Bombe als Zuleitung zwei Messingstäbchen von 4 mm Dmr. und ließ ihre Enden halbkugelig abdrehen. Der optische Indikator wurde mit einer neuen achromatischen Sammellinse versehen, deren Brennweite aus verschiedenen Beobachtungen zu 187 mm bestimmt worden ist. Die Aufzeichnung des Druckverlaufes in der Bombe erschien nunmehr auf dem Diagramm als feine, an den Seiten scharf begrenzte Linie. Da die Versuchseinrichtung im übrigen ohne Abänderungen übernommen wurde, kann hier von ihrer Beschreibung unter Hinweis auf die angegebenen Quellen Abstand genommen werden.

¹⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 8.

²⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 54.

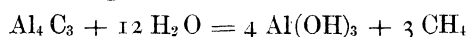
II.

Vorbereitende Arbeiten.

a) Methandarstellung.

Während bei der Bereitung des Explosionsgemisches der Wasserstoff einer im Handel erhältlichen Stahlflasche entnommen werden konnte und die Luft in einem Druckluftbehälter zur Verfügung stand, mußte das Methan auf irgend eine Weise selbst hergestellt werden.

Grubengas gehört zu denjenigen Gasen, die wegen ihrer technischen Wichtigkeit weitgehend untersucht worden sind. Es gibt daher eine Menge von Entwicklungsmöglichkeiten. Man benutzte das zuerst von Moissan¹⁾ angewandte Verfahren der Einwirkung von Wasser auf Aluminiumkarbid zur Darstellung. Nach der Gleichung



bildet sich Methan, das etwas Wasserstoff mit sich führt.

Als Reaktionsgefäß diente ein Glaskolben von 3,5 ltr Inhalt, der sich in einem Kühltopf mit regelbarem Wasserzufluß befand. Diese Vorsicht ist erforderlich, weil sich sonst der Inhalt zu stark erwärmt und eine zu lebhafte Gasentwicklung den Kolben gefährdet. Das entwickelte Gas wurde dann im Gegenstrome gekühlt und durch eine Vorlage zur Abscheidung von Unreinigkeiten zu einem Gasbehälter von rd. 90 ltr Inhalt geführt. Da im Behälter geringer Unterdruck herrschte, ließ man zur Sicherheit gegen das Eindringen von Luft das Sperrwasser unter Wasser abfließen. An einem mit dem Entwicklungskolben verbundenen Wassermanometer erkannte man, ob der Beharrungszustand aufrecht erhalten blieb.

Das Aluminiumkarbid wurde von der Aluminium-Industrie-Aktiengesellschaft Neuhausen (Schweiz) bezogen. Es ist fast immer mit etwas Calciumkarbid vermengt, welches die Bildung von Acetylen veranlaßt. Da die Zerlegung des Calciumkarbids mit Wasser sofort eintritt, gebrauchte man die Vorsicht, das bei Beginn der Entwicklung entweichende Gas ins Freie strömen zu lassen.

Wie schon erwähnt wurde, ist das gewonnene Methan nicht frei von Wasserstoff, den man für die Versuche mit Methan-Luftgemischen beseitigen mußte. Die Eigenschaft der beiden Gase, daß sie bei atmosphärischem Druck weit voneinander entfernte Kondensationspunkte (Methan — 152,5° C, Wasserstoff — 237° C) besitzen, wies einen Weg zu ihrer Trennung durch Verflüssigung des Methans. Dem aus dem Gasbehälter kommenden Gas entzog man die Feuchtigkeit mit Chlorkalcium und Schwefelsäure und leitete es darauf in das gläserne Verflüssigungsgefäß, Fig. 1. Dieses wurde in ein Dewarsches Gefäß mit flüssiger Luft gebracht, worauf sich bald das Methan verflüssigte. Hatte sich das Gefäß mit Flüssigkeit angefüllt, so unterbrach man die Gaszuführung und entfernte die flüssige Luft, um das Methan wieder zu verflüchtigen und aufzufangen. Die

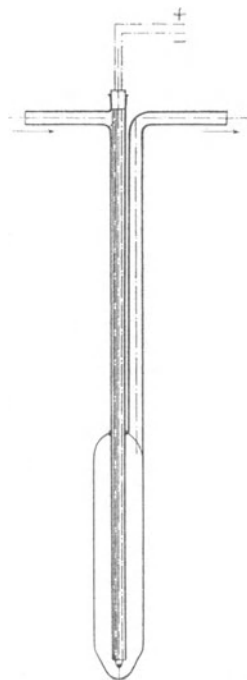


Fig. 1. Verflüssigungsgefäß.

¹⁾ Moissan, Der elektrische Ofen, übersetzt von Zettel 1900.

Temperatur im Gefäß zeigte hierbei ein aus Kupfer- und Konstantandraht hergestelltes Thermoelement an.

Obgleich dieses kurz angedeutete Verfahren zu brauchbaren Ergebnissen führte, wurde es doch zugunsten einer billigeren, später bekannt gewordenen Herstellungsweise verlassen, die auf der fraktionierten Verbrennung des Wasserstoffes über Kupferoxyd beruht. Nachdem das Gas durch einen Blasenähler und einen Chlorkaliumturm geleitet worden war, durchströmte es langsam ein 60 cm langes, auf 40 cm mit Kupferoxyd gefülltes Verbrennungsrohr aus schwer schmelzbarem Kaliglas von 12 mm lichter Weite, das in einem Verbrennungsofen auf Rotglut gehalten wurde. An das mit durchbohrten Gummistopfen verschlossene Rohr reihte sich ein Chlorkaliumrohr für die Aufnahme des gebildeten Verbrennungswassers und eine Flasche mit Kalilauge zur Entfernung entstandener Kohlensäure. Die Analyse des erzeugten Gases ergab eine Reinheit von 98 vH, die für den vorliegenden Zweck als vollkommen genügend erachtet wurde.

b) Gasanalyse.

Die Gasanalyse wurde nach dem Verfahren von Hempel¹⁾ über Quecksilber ausgeführt, wobei man sich alle im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden gesammelten Erfahrungen²⁾ zu nutze machte. Bei der Untersuchung von Gasgemischen, die bei sehr hohem Methangehalt wenig Wasserstoff (bis 5 vH) aufwiesen, stellten sich Schwierigkeiten ein, wenn man den Wasserstoff mit Palladium absorbierte und den Rest zur Verbrennung brachte. Die Ergebnisse der Verbrennung ließen den Schluß gerechtfertigt erscheinen, daß der Wasserstoff nicht vollständig vom Palladium aufgenommen worden war. Versuche, bei denen man das mit Palladium gefüllte Rohr in 150° C heißes Zylinderöl stellte, zeigten in dieser Beziehung eine Besserung. Der Grund für die unvollkommene Absorption des Wasserstoffes mag darin zu suchen sein, daß das Palladium bei diesen Gasgemischen die zur vollständigen Okklusion nötige Reaktionstemperatur nicht erreicht hat.

c) Bereitung der Gasladung.

Die Bereitung der Gasladung erfolgte in einem von der Firma Julius Pintsch in Berlin gelieferten Kubizierapparat, Fig. 11 und 12, von 800 ltr Fassungsvermögen. Man stellte in der Regel 500 ltr Gemisch von der gewünschten Zusammensetzung her. Die Mischung von Wasserstoff, Methan und Luft beschleunigte man durch starkes Rühren mit dem Ventilator und unterstützte sie außerdem dadurch, daß man etwa 150 ltr im Kompressor *K* bis auf 5 at Ueberdruck zusammendrückte und in den Kubizierapparat zurückströmen ließ.

Die Gaszusammensetzung war durch den Gesichtspunkt gegeben, daß der Heizwert des Gemisches stufenweise um 100 WE zunehmen sollte. Zu ihrer Ermittlung für einen bestimmten Heizwert kam ein Diagramm sehr zu statten, das die beiden den Heizwert besitzenden Komponenten, Wasserstoff und Methan, als Achsen hat, Fig. 2. Gasmischungen zeigen nach ihrer jeweiligen Zusammensetzung verschieden große Kontraktion nach der Verbrennung. Um nun Vergleiche zwischen verschiedenen Betriebsgasen anstellen zu können, bezieht man den Heizwert mit Vorteil auf das Volumen nach der Verbrennung.

¹⁾ Hempel, Gasanalytische Methoden 3. Aufl. 1900.

²⁾ Nägel, Versuche an der Gasmaschine über den Einfluß des Mischungsverhältnisses, Berlin 1907 S. 38.

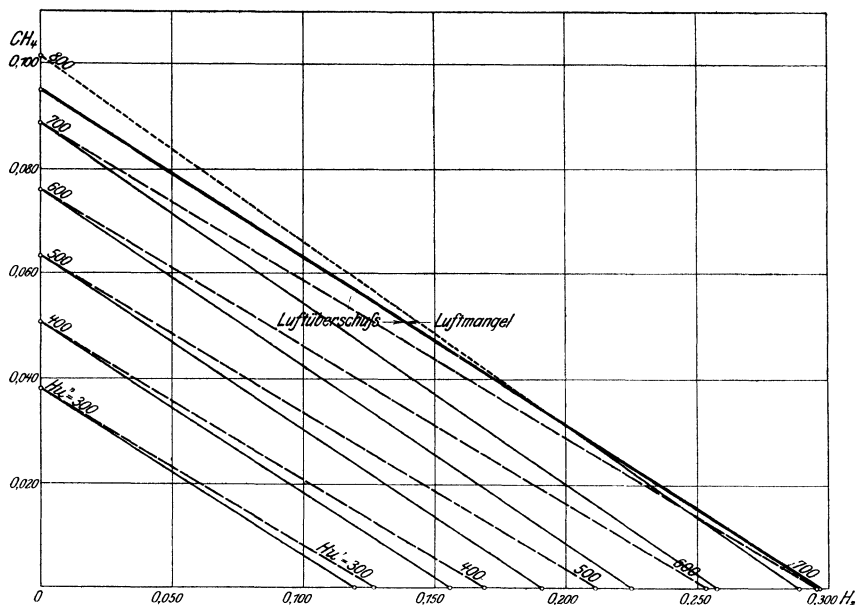


Fig. 2. Heizwert von Methan-Wasserstoff-Luftgemischen bei verschiedener Zusammensetzung.

Es bedeutet:

V' das Volumen des Gemisches

H_u' den unteren Heizwert des Gemisches, bezogen auf das Volumen

V'' das Volumen

H_u'' den unteren Heizwert des Gemisches, bezogen auf das Volumen

} vor der
Verbrennung,

} nach der
Verbrennung.

Dann ist

$$V' = H_2 + CH_4 + L = 1$$

und

$$V'' = H_2 - 0,5 H_2 + CH_4 + L = 1 - 0,5 H_2,$$

wenn L das Symbol für Luft ist und die chemischen Zeichen gleichzeitig die Raumteile bezeichnen.

Ferner ist

$$H_u' = 2370 H_2 + 7890 CH_4$$

und

$$H_u'' = \frac{2370 H_2 + 7890 CH_4}{1 - 0,5 H_2}.$$

Die Grenzlinie zwischen der Verbrennung mit Luftüberschuß und der mit Luftmangel ist durch ihre Schnittpunkte mit den Achsen bestimmt. Diese findet man durch Umformung der Gleichung für V' unter Berücksichtigung der Verbrennungsgleichungen von Wasserstoff und Methan. Die ausgezogenen Linien sind solche gleichen Heizwertes H_u'' , die gestrichelt gezeichneten verbinden Punkte von gleichem H_u' .

III.

Durchführung der Versuche.

Nachdem die vollkommene Durchmischung der Ladung durch Analysen aus verschiedenen Querschnitten des Kubizierapparates nachgewiesen war, ging man an die Ausführung des Versuches selbst. Die Bombe wurde mit einem

heißen Wasserbad umgeben und auf 0,01 at abs. ausgepumpt. Hierauf erfolgte ein Wechsel des Wasserbades; die Temperatur des neuen Bades mußte dauernd 15° C betragen. Der folgenden Füllung der Bombe, wozu bei höheren Drücken der Kompressor Verwendung fand, entnahm man eine Gasprobe mit Hilfe einer Quecksilberpumpe. Nach Ermittlung der Gaszusammensetzung durch das Explosionsverfahren wurde die genaue Druckeinstellung mit dem Quecksilbermanometer vorgenommen. Jetzt konnte der Antriebmotor für die photographische Trommel eingeschaltet und die Morseapparate für die Verzeichnung der Trommelumdrehungen und der Sekundenzwischenräume auf dem Papierstreifen in Betrieb gesetzt werden. Kurz darauf schloß man den Stromkreis für die Zündung und nahm den Druckverlauf in der Bombe auf.

Zunächst verbrannte man Methan-Wasserstoff-Luftgemische mit 0,02, 0,05 und 0,08 Methan- und steigendem Wasserstoffgehalt. Später wurden noch einige Versuche mit reinem Methan angestellt. Alle zur Verwendung gelangenden Gasmischungen waren annähernd mit Feuchtigkeit gesättigt. Bei sämtlichen Versuchsreihen wurde der Anfangsdruck von 0,5 bis 5,0 at abs. verändert. Die Anfangstemperatur blieb immer die gleiche (15° C), da Nägel bei seinen Versuchen durch Steigerung der Temperatur bis auf 75° C keine beträchtliche Zunahme der Zündgeschwindigkeit feststellen konnte, und eine weitere Temperatursteigerung bei der Versuchsanordnung ausgeschlossen war.

Bei den Versuchen mit höheren Anfangsdrücken und starker Ladung entstanden ziemliche Mengen von nitrosen Gasen, die mit Wasserdampf Salpetersäure bilden. Diese griff die Bombenwand bei längerem Verweilen stark an und mußte deshalb schnell entfernt werden. Die Bombe wurde daher sofort nach dem Versuche durch die Luftpumpe entleert und mehrmals mit getrockneter Luft gefüllt. Auf diese Weise gelang es gleichzeitig, die letzten Spuren von Kohlensäure zu beseitigen, die eine schädliche Wirkung auf die Zündfähigkeit von Gasluftgemischen¹⁾ ausübt.

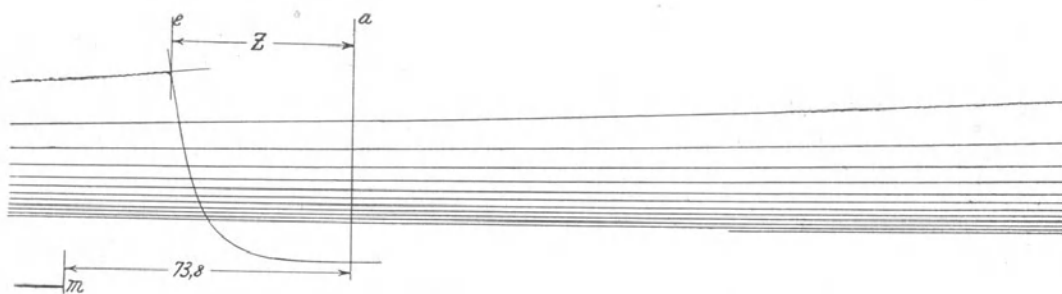
IV.

Die Versuchsergebnisse und ihre graphische Darstellung.

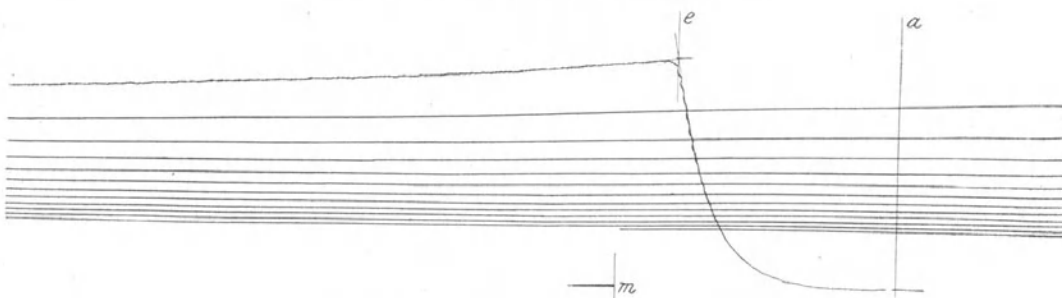
Zur Bestimmung der Abszisse z der Verbrennungslinie zog man in dem aufgenommenen Diagramm die zur Zündmarke m gehörige Ordinate und legte, 73,8 mm von derselben entfernt, die Senkrechte a fest, welche den Zündungsbeginn darstellt. Die eingezeichnete Linie e entspricht dem Endpunkt der abkühlungsfreien Verbrennung. Bei den meisten Methan-Luftgemischen, die sehr langsam verbrennen, war der erreichte Höchstdruck maßgebend für die Lage der Ordinate e (Diagramm vom Versuch 74).

Die Zeit für eine Trommelumdrehung ist aus den Aufzeichnungen der Morseapparate auf dem Papierstreifen ermittelt worden. Da die Länge des Diagramms bekannt ist, so läßt sich der Zeitwert für 1 mm Diagrammlänge berechnen. Die letzte Größe, multipliziert mit der in Millimetern gemessenen Abszisse z der Verbrennungslinie ergibt die Dauer der Verbrennung in Sekunden. Aus dieser findet man schließlich unter Beachtung des Umstandes, daß die Zündung in der Mitte einer Hohlkugel von 0,20 m Halbmesser eingeleitet wird, die mittlere totale Zündgeschwindigkeit des Gemisches.

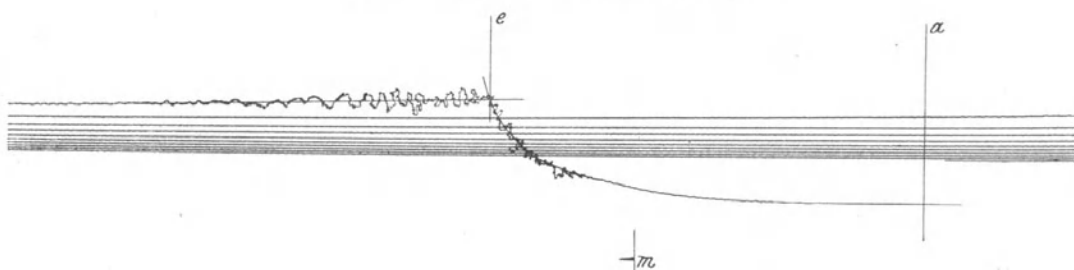
¹⁾ Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1890 S. 491.



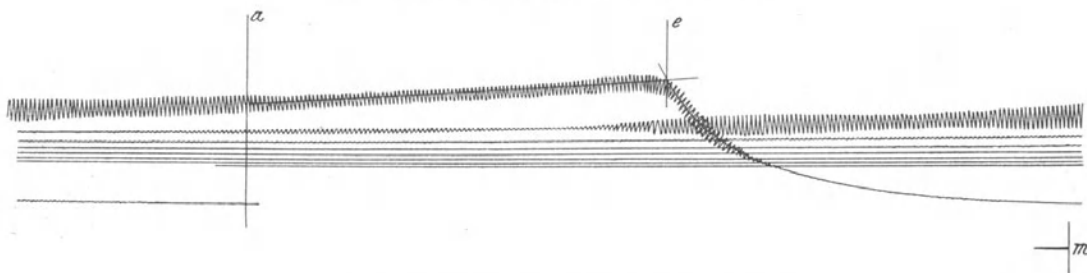
Versuch Nr. 3. Anfangsdruck 1,5 at abs.



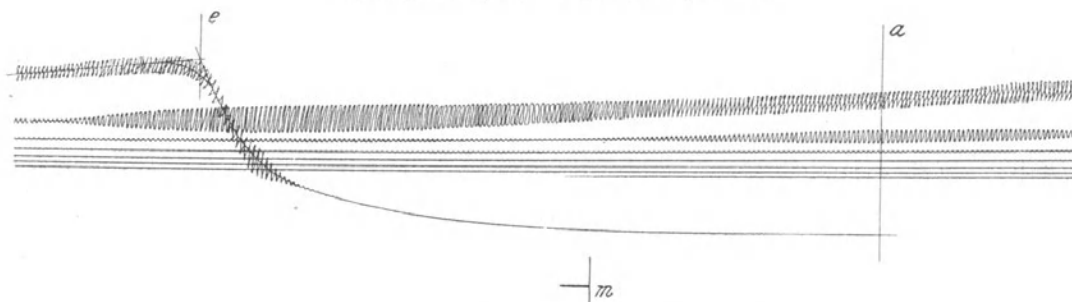
Versuch Nr. 11. Anfangsdruck 2,0 at abs.



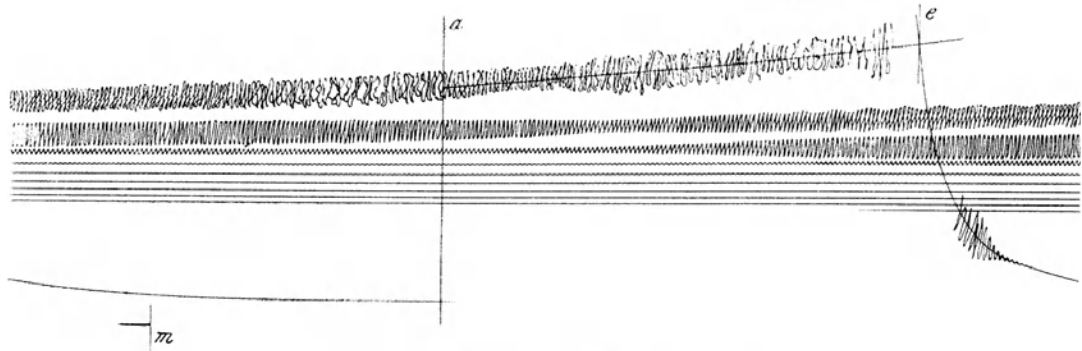
Versuch Nr. 24. Anfangsdruck 5,0 at abs.



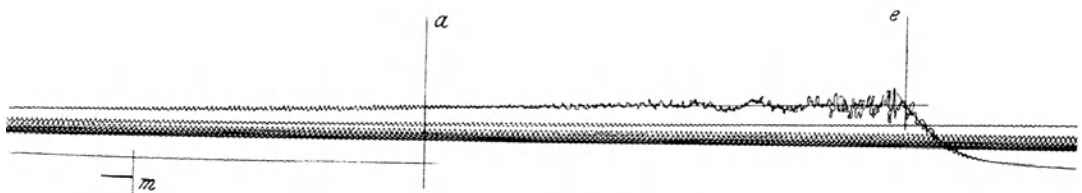
Versuch Nr. 27. Anfangsdruck 1,5 at abs.



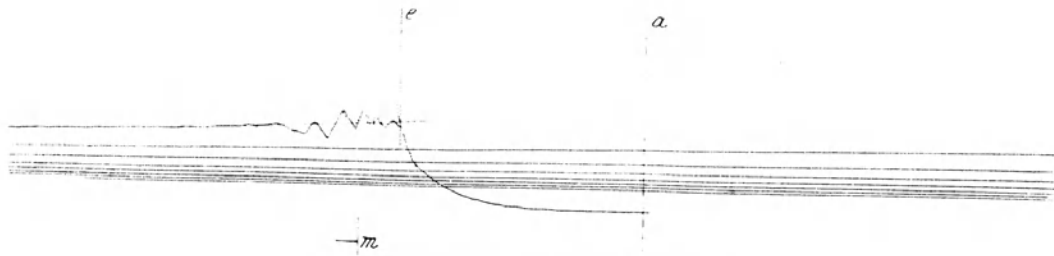
Versuch Nr. 28. Anfangsdruck 2,0 at abs.



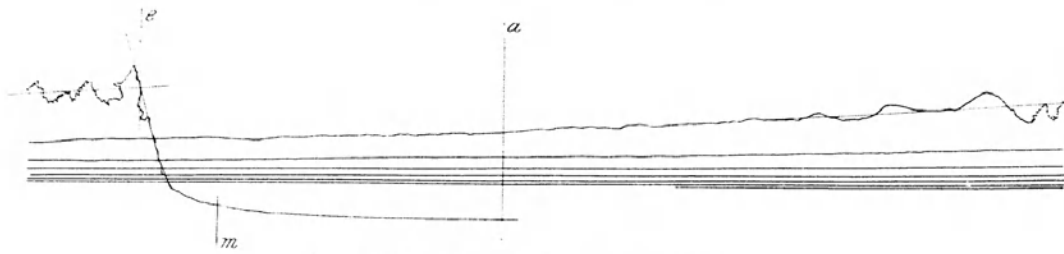
Versuch Nr. 29. Anfangsdruck 3,1 at abs.



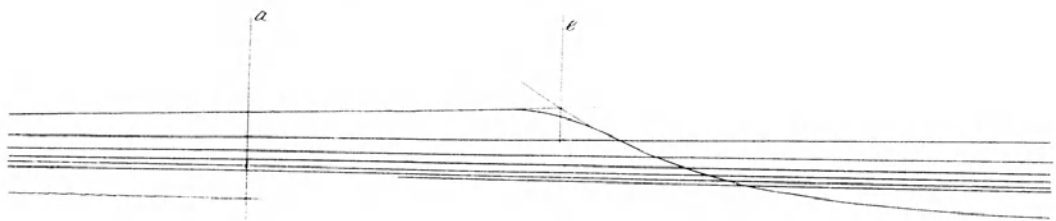
Versuch Nr. 36. Anfangsdruck 4,0 at abs.



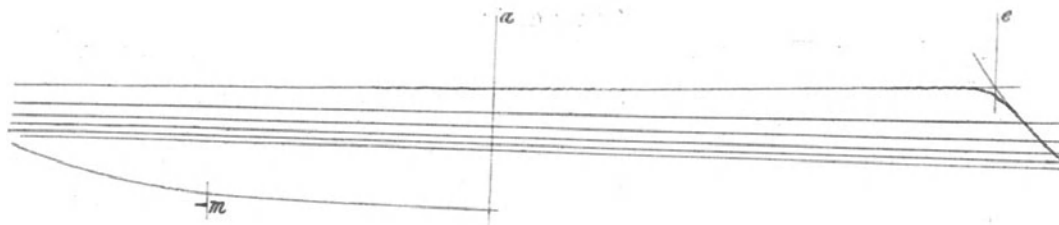
Versuch Nr. 37. Anfangsdruck 3,0 at abs.



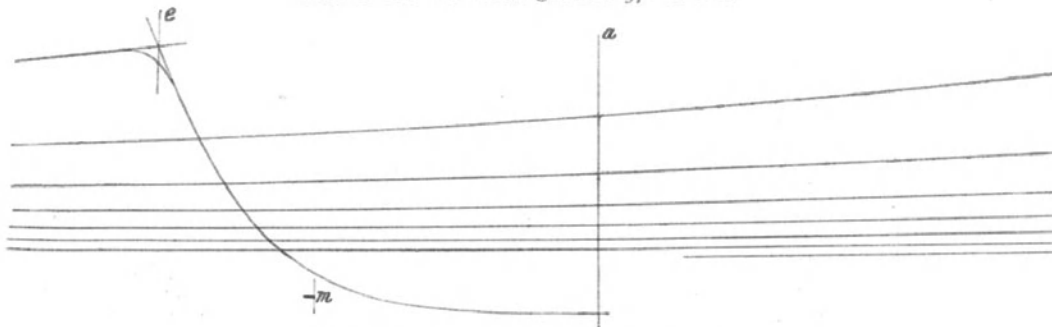
Versuch Nr. 46. Anfangsdruck 3,2 at abs.



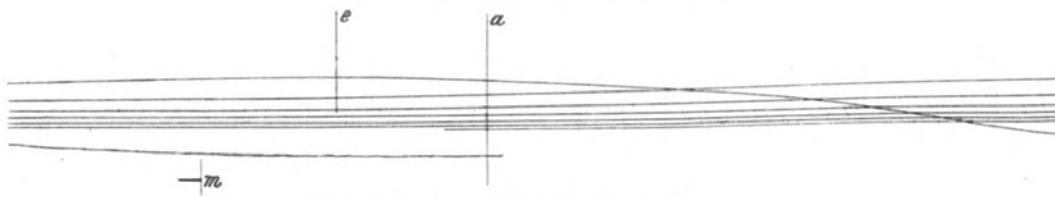
Versuch Nr. 48. Anfangsdruck 1,0 at abs.



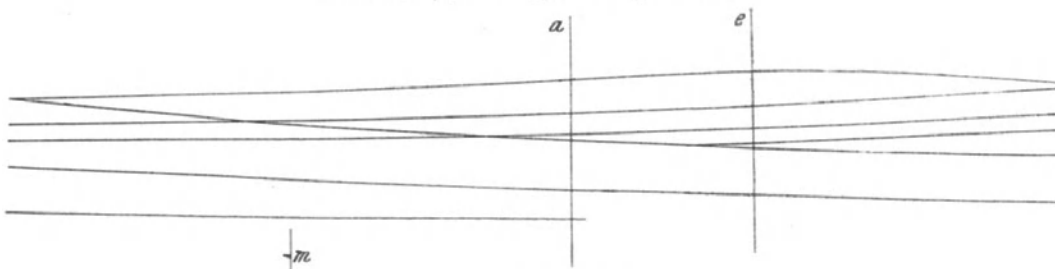
Versuch Nr. 60. Anfangsdruck 5,0 at abs.



Versuch Nr. 64. Anfangsdruck 2,0 at abs.



Versuch Nr. 74. Anfangsdruck 4,0 at abs.



Versuch Nr. 79. Anfangsdruck 2,0 at abs.

Die gewonnenen Versuchszahlen sind in der Zahlentafel 1 zusammengestellt.

Sobald ein Gasgemisch mehr als einen brennbaren Bestandteil enthält, ist es schwierig, seine Komponenten so zu bemessen, daß ihm ein Heizwert von bestimmter Größe zukommt. Um die Ergebnisse bei demselben Heizwert, aber verschiedener Zusammensetzung der Ladung vergleichen zu können, trug man die demselben Anfangsdruck entsprechenden Zündgeschwindigkeiten der Gemische mit annähernd gleichem Methan- und zunehmendem Wasserstoffgehalt über dem unteren Heizwerte H_u'' auf. Fig. 3 zeigt die Linien für 0,5 und 1 at Anfangsdruck. Aus diesen Kurven wurden die Zündgeschwindigkeiten für H_u'' gleich 400, 500, 600 und 700 Wärmeeinheiten abgegriffen. Die in der Zahlentafel 2 niedergelegten Werte ergeben in graphischer Darstellung über dem Anfangsdruck die Fig. 4 bis 7.

Die Schaulinien zeigen im allgemeinen die Abhängigkeit der Zündgeschwindigkeit von dem Brenngasgehalt der Mischung; hierbei lassen die Ver-

Zahlentafel I.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nr. des Versuches und des Diagrammes	Volumanteil im Gemisch		unterer Heizwert, bezogen auf das H_u -Volumen nach der Verbrennung	absoluter Anfangsdruck at	Zeitwert der Diagrammlänge sk	Zeitwert für 1 mm Diagrammlänge 10^{-3} sk	Diagrammabszisse der Verbrennung mm	Dauer der Verbrennung sk	mittlere totale Zündgeschwindigkeit msk^{-1}	Bemerkung über das Zündgeräusch
	CH ₄	H ₂								

A) Versuche mit Methan-Wasserstoff-Luftgemischen.

1	0,0220	0,1960	707	0,5	0,1488	0,526	54	0,0284	7,042	
2	0,0220	0,1960	707	1,0	0,1475	0,519	45	0,0233	8,583	
3	0,0210	0,1940	693	1,5	0,1348	0,476	47	0,0224	8,930	
4	0,0200	0,1950	687	2,0	0,1313	0,462	47	0,0217	9,220	
5	0,0205	0,1944	689	3,0	0,1215	0,429	50	0,0214	9,350	
6	0,0200	0,1960	690	4,0	0,1974	0,694	32	0,0222	9,010	schw. Kn.
7	0,0110	0,1940	693	5,0	0,1148	0,403	62	0,0250	8,000	Kn.
15	0,0200	0,2053	719	5,0	0,1340	0,473	50	0,0236	8,475	Kn.
16	0,0200	0,1933	682	5,0	0,1402	0,494	53	0,0262	7,635	Kn.
17	0,0200	0,1960	690	5,5	0,2000	0,703	37	0,0260	7,695	st. Kn.
8	0,0220	0,1653	617	0,5	0,1689	0,595	86	0,0512	3,908	
9	0,0220	0,1673	622	1,0	0,1587	0,559	58	0,0324	6,155	
10	0,0215	0,1663	614	1,5	0,1488	0,525	59	0,0309	6,475	
11	0,0205	0,1697	616	2,0	0,1459	0,512	58	0,0297	6,735	
12	0,0215	0,1644	610	3,0	0,1431	0,506	61	0,0309	6,475	schw. Kn.
13	0,0220	0,1651	616	4,0	0,1451	0,512	60	0,0307	6,518	Kn.
14	0,0220	0,1654	617	5,0	0,1381	0,486	66	0,0321	6,232	Kn.
18	0,0205	0,1291	500	0,5	0,2244	0,791	107	0,0847	2,362	
19	0,0200	0,1320	504	1,0	0,1816	0,640	99	0,0634	3,156	schw. Pf.
20	0,0200	0,1307	500	1,5	0,2078	0,733	73	0,0535	3,740	Pf.
21	0,0210	0,1300	507	2,0	0,1998	0,704	76	0,0535	3,740	Pf.
22	0,0215	0,1290	508	3,0	0,2042	0,722	76	0,0549	3,643	Pf.
23	0,0200	0,1280	493	4,0	0,1379	0,486	116	0,0564	3,548	Pf.
24	0,0215	0,1260	500	5,0	0,1399	0,493	111	0,0547	3,658	Pf.
25	0,0200	0,0933	398	0,1	0,1945	0,684	277	0,0474	1,056	
26	0,0195	0,0967	403	1,0	0,2052	0,724	184	0,0452	1,502	schw Pf.
27	0,0190	0,0953	395	1,5	0,2108	0,742	177	0,0455	1,524	Pf.
28	0,0200	0,0933	398	2,0	0,2050	0,723	174	0,0451	1,590	st. Pf.
29	0,0195	0,0944	396	3,0	0,2126	0,750	162	0,0469	1,646	st. Pf.
30	0,0210	0,0947	410	4,0	0,1956	0,690	161	0,1111	1,801	HI.
31	0,0200	0,0920	394	5,0	0,1835	0,647	209	0,1352	1,480	st. HI.
32	0,0220	0,0927	411	5,0	0,1886	0,694	194	0,1288	1,553	st. HI.
33	0,0500	0,1120	699	0,5	0,1494	0,527	90	0,0474	4,203	
34	0,0495	0,1127	697	1,0	0,1474	0,520	87	0,0452	4,427	
35	0,0500	0,1133	693	1,5	0,1418	0,500	91	0,0455	4,397	
36	0,0495	0,1140	691	2,0	0,1506	0,531	85	0,0451	4,436	Kn.
37	0,0500	0,1146	707	3,0	0,2080	0,733	64	0,0469	4,267	Kn.
38	0,0500	0,1146	707	4,0	0,2022	0,712	69	0,0491	4,075	Kn.
39	0,0500	0,1160	711	5,0	0,2090	0,736	68	0,0500	4,000	st. Kn.
40	0,0500	0,0800	609	0,5	0,1533	0,539	137	0,0738	2,711	
41	0,0505	0,0784	608	1,0	0,1533	0,538	137	0,0737	2,715	
42	0,0500	0,0806	610	1,5	0,1541	0,543	135	0,0733	2,730	schw. Pf.
43	0,0500	0,0773	601	2,0	0,2162	0,762	99	0,0754	2,653	Pf.
44	0,0500	0,0783	604	3,0	0,2243	0,788	99	0,0780	2,565	HI.
45	0,0500	0,0786	605	4,0	0,2318	0,814	99	0,0806	2,482	st. HI.
46	0,0495	0,0783	593	5,0	0,2741	0,966	95	0,0918	2,179	st. HI.

Zahlentafel 1 (Fortsetzung).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nr. des Versuches und des Diagrammes	Volumanteil im Gemisch		unterer Heizwert, bezogen auf das H_2 -Volumen nach der Verbrennung	absoluter Anfangsdruck at	Zeitwert der Diagrammlänge sk	Zeitwert für 1 mm Diagrammlänge 10^{-3} sk	Diagrammabszisse der Verbrennung mm	Dauer der Verbrennung sk	mittlere totale Zündgeschwindigkeit msk^{-1}	Bemerkung über das Zündgeräusch
	CH ₄	H ₂								

A) Versuche mit Methan-Wasserstoff-Luftgemischen (Fortsetzung).

47	0,0500	0,0413	503	0,5	0,1947	0,685	344	0,2355	0,849	
48	0,0500	0,0426	506	1,0	0,2778	0,980	202	0,1979	1,011	
49	0,0500	0,0406	501	1,5	0,2868	1,009	208	0,2099	0,953	
50	0,0500	0,0406	501	2,0	0,2785	0,983	237	0,2329	0,859	
51	0,0500	0,0413	503	3,0	0,2647	0,934	289	0,2699	0,741	schw. Pf.
52	0,0500	0,0426	506	4,0	0,3122	1,099	269	0,2958	0,679	Hl.
53	0,0500	0,0423	506	5,0	0,4680	1,646	185	0,3045	0,657	Hl.
54	0,0825	0,0267	724	0,5	0,2606	0,915	158	0,1445	1,384	
55	0,0820	0,0267	720	1,0	0,2750	0,966	109	0,1053	1,899	
56	0,0820	0,0254	717	1,5	0,2328	0,820	132	0,1082	1,849	
57	0,0820	0,0254	717	2,0	0,2600	0,915	133	0,1217	1,644	
58	0,0820	0,0280	724	3,0	0,2575	0,946	138	0,1305	1,533	
59	0,0825	0,0280	728	4,0	0,2608	0,919	156	0,1434	1,395	schw. Pf.
60	0,0825	0,0283	729	5,0	0,2675	0,941	154	0,1448	1,381	Pf.

B) Versuche mit Methan-Luftgemischen.

61	0,0890	—	702	0,5	0,4088	1,442	124	0,1787	1,120	
62	0,0890	—	702	1,0	0,4200	1,482	95	0,1407	1,422	
63	0,0890	—	702	1,5	0,3942	1,386	111	0,1538	1,301	
64	0,0890	—	702	2,0	0,4152	1,465	115	0,1685	1,187	
65	0,0890	—	702	3,0	0,4862	1,716	104	0,1785	1,121	
66	0,0890	—	702	4,0	0,4810	1,700	122	0,2074	0,964	
67	0,0890	—	702	5,0	0,4743	1,672	125	0,2090	0,957	
68	0,0780	—	615	0,5	0,5160	1,817	135	0,2452	0,816	
69	0,0780	—	615	1,0	0,4938	1,737	114	0,1980	1,010	
70	0,0780	—	615	1,5	0,5284	1,864	111	0,2069	0,967	
71	0,0780	—	615	2,0	0,5500	1,935	120	0,2322	0,861	
72	0,0740	—	584	2,5	0,5078	1,791	211	0,3779	0,529	
73	0,0740	—	584	3,0	0,4636	1,635	255	0,4170	0,480	
74	0,0740	—	584	4,0	0,5085	1,796	323	0,5800	0,345	
75	0,0740	—	584	5,0	0,5142	1,815	389	0,7060	0,283	
76	0,0620	—	489	0,5	0,5212	1,840	486	0,8940	0,224	
77	0,0625	—	493	1,0	0,5463	1,927	563	1,084	0,184	
78	0,0625	—	493	1,5	0,4800	1,690	721	1,218	0,164	
79	0,0625	—	493	2,0	0,5084	1,788	806	1,441	0,139	
80	0,0630	—	497	3,0	0,8400	2,953	573	1,692	0,118	
81	0,0630	—	497	4,0	0,7435	2,613	970	2,533	0,079	
82	0,0630	—	497	5,0						Gemisch nicht mehr zündbar.

Bemerkung über das Zündgeräusch: Kn. = Knall, Pf. = Pfeffen, Hl. = Heulen.

suche mit gleicher Methanmenge deutlich den die Zündgeschwindigkeit vergrößernden Einfluß wachsenden Wasserstoffgehalts erkennen. Die Zündgeschwindigkeit nimmt bei einem Methangehalt von 0,02 mit der Erhöhung des Anfangsdrucks bis zu einem Höchstwert zu, der bei rd. 2,5 at liegt. Eine weitere Vermehrung des Druckes vermag die Zündgeschwindigkeit nicht mehr zu steigern; sie fällt wieder, und zwar um so mehr, je höher der Heizwert der

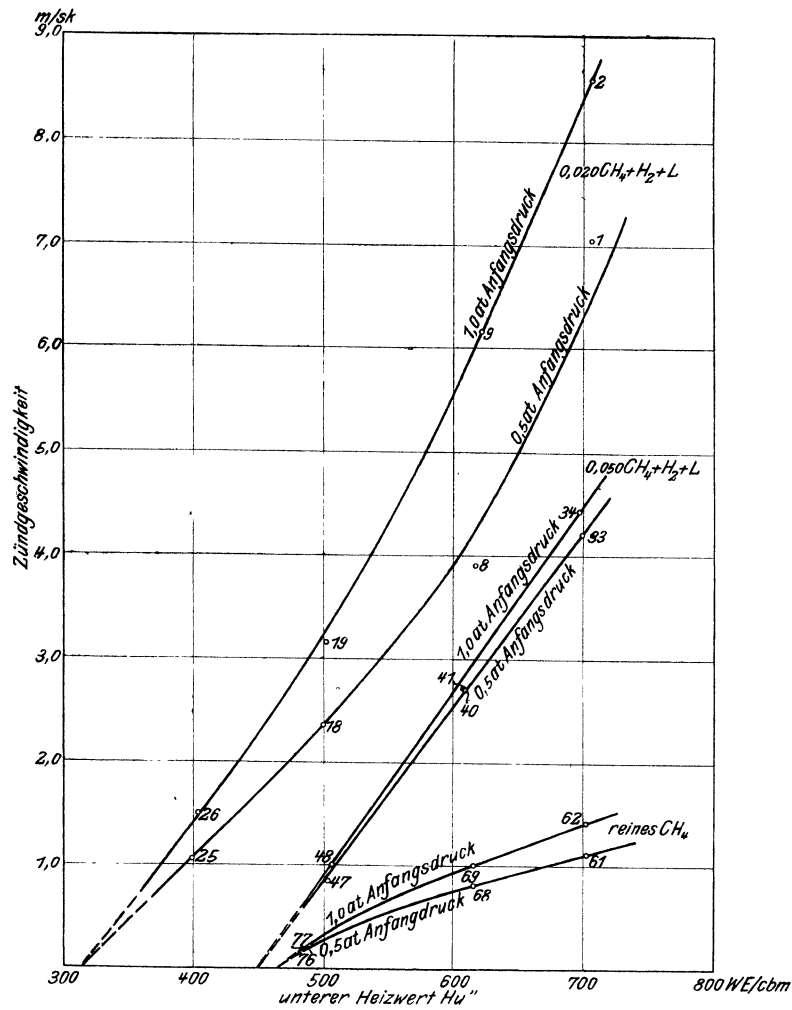


Fig. 3. Zündgeschwindigkeit von Methan-Wasserstoff-Luftgemischen bei unveränderlichem Anfangsdruck und verschiedenem Heizwert H_u'' .

Zahlentafel 2.

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
absoluter Anfangsdruck at	$H_u'' = 700$ WE			$H_u'' = 600$ WE			$H_u'' = 500$ WE			$H_u'' = 400$ WE
	$0,020$ CH ₄ + $0,199$ H ₂ + $0,781$ L ¹⁾	$0,050$ CH ₄ + $0,112$ H ₂ + $0,838$ L	$0,089$ CH ₄ + $0,911$ L	$0,020$ CH ₄ + $0,166$ H ₂ + $0,814$ L	$0,050$ CH ₄ + $0,077$ H ₂ + $0,873$ L	$0,076$ CH ₄ + $0,924$ L	$0,020$ CH ₄ + $0,131$ H ₂ + $0,849$ L	$0,050$ CH ₄ + $0,040$ H ₂ + $0,910$ L	$0,063$ CH ₄ + $0,937$ L	$0,020$ CH ₄ + $0,091$ H ₂ + $0,886$ L
	Zündgeschwindigkeit m/sk			Zündgeschwindigkeit m/sk			Zündgeschwindigkeit m/sk			Zündgeschw. m/sk
0,5	6,30	4,05	1,11	3,93	2,47	0,76	2,27	0,80	0,26	1,05
1,0	8,26	4,59	1,40	5,50	2,72	0,92	3,32	0,95	0,32	1,48
1,5	9,25	4,66	1,31	6,15	2,74	0,87	3,72	0,95	0,30	1,65
2,0	9,75	4,56	1,19	6,36	2,64	0,79	3,76	0,87	0,26	1,66
3,0	9,87	4,28	1,03	6,37	2,44	0,64	3,75	0,78	0,21	1,65
4,0	9,14	4,07	0,96	6,14	2,30	0,61	3,70	0,72	0,20	1,63
5,0	8,10	3,90	0,92	5,80	2,23	0,60	3,65	0,67	0,20	1,60

¹⁾ L bedeutet Luft.

Ladung ist. Es hat sich damit zum ersten Male die Vermutung von Nägel¹⁾ bestätigt, daß die Zündgeschwindigkeit bei steigendem Anfangsdruck durch einen Höchstwert hindurchgeht. Die niedrigen Werte des Anfangsdrucks spielen für das Anwachsen der Zündgeschwindigkeit nicht mehr die bedeutende Rolle,

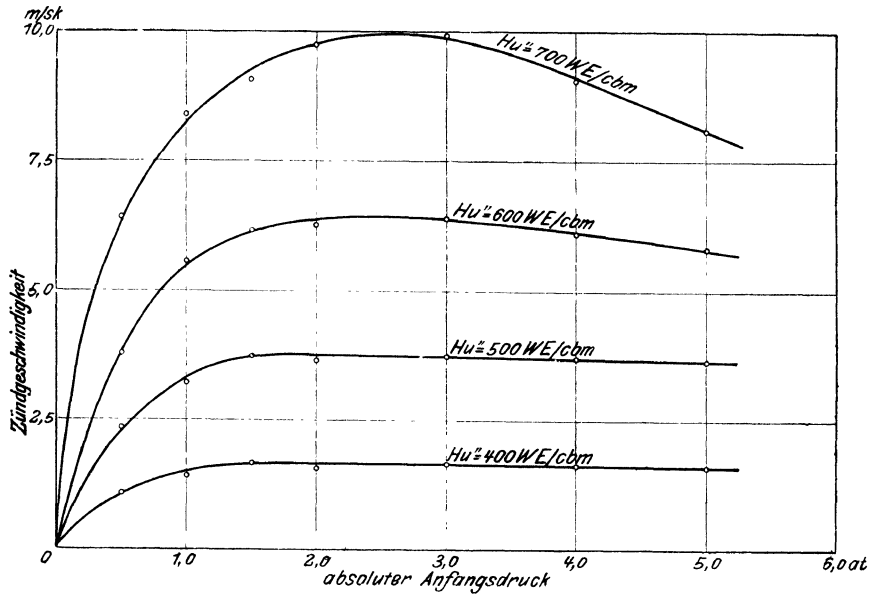


Fig. 4. Zündgeschwindigkeit der Gemische mit 2 vH Methan- und steigendem Wasserstoffgehalt bei verschiedenen Anfangsdrücken der Ladung.

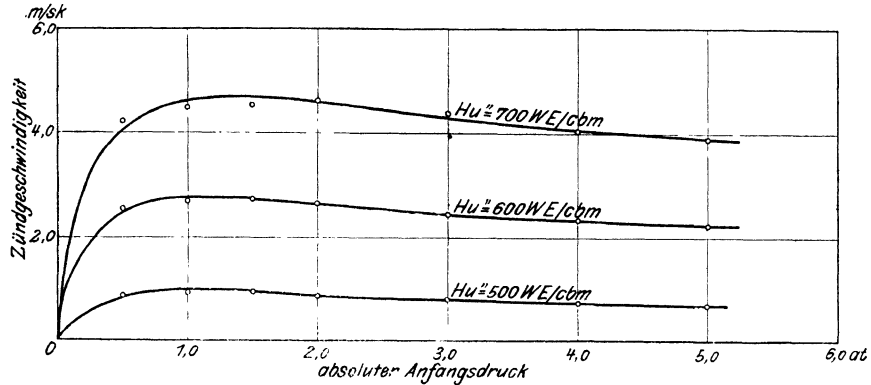


Fig. 5. Zündgeschwindigkeit der Gemische mit 5 vH Methan- und steigendem Wasserstoffgehalt bei verschiedenen Anfangsdrücken der Ladung.

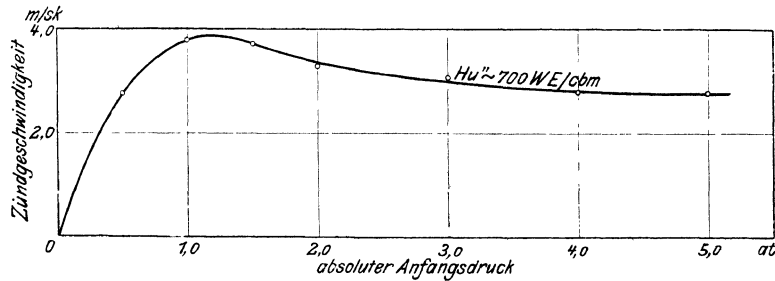


Fig. 6. Zündgeschwindigkeit eines Gemisches von annähernd gleichem Heizwert bei verschiedenen Anfangsdrücken der Ladung.

¹⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 54 S. 30.

wenn der Volumanteil des Methans größer und der des Wasserstoffs entsprechend verringert wird. Die Höchstgeschwindigkeit wird bei immer geringer werdenden Anfangsdrücken erhalten, und man findet die beachtenswerte Tatsache, daß die größte Zündgeschwindigkeit von Methan-Luftgemischen ungefähr bei atmosphärischem Druck erreicht wird.

Einen Ueberblick über die Zündgeschwindigkeiten von Gemischen gleicher Wärmedichte und veränderlicher Zusammensetzung kann man gewinnen, wenn

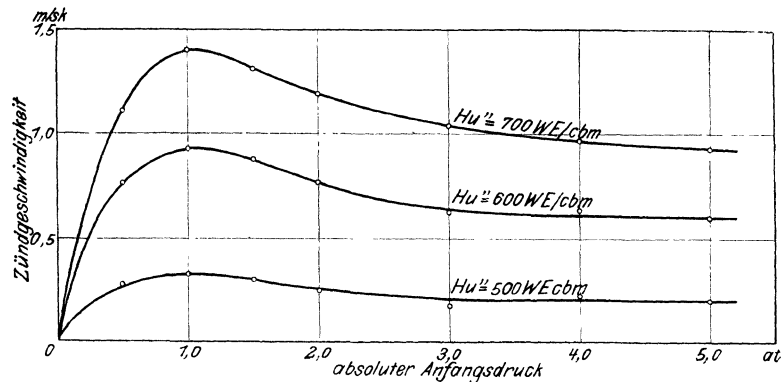


Fig. 7. Zündgeschwindigkeit von Methan-Luftgemischen bei unverändertem Heizwert und verschiedenen Anfangsdrücken der Ladung.

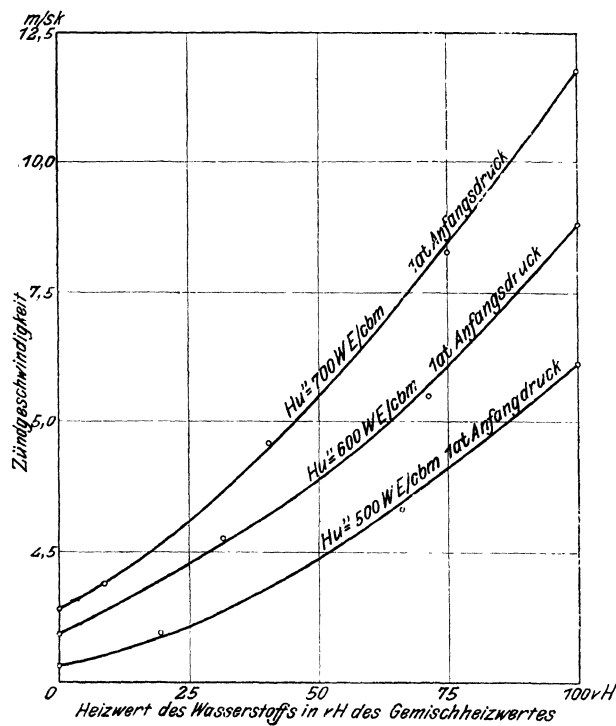


Fig. 8. Abhängigkeit der Zündgeschwindigkeit von Methan-Wasserstoff-Luftgemischen bei gleichem Heizwert und gleichem Anfangsdruck vom Heizwert des Wasserstoffgehaltes.

die Zündgeschwindigkeit als Funktion des Wasserstoffheizwertes in vH des gesamten Gemischheizwertes zum Ausdruck kommt. Die Abszisse in Fig. 8 hat demnach die Größe $\frac{2370 H_2}{(1 - 0,5 H_2) H_u} 100$; die zur Darstellung nötigen Werte weist Zahlentafel 3 auf. Die in Zahlentafel 4 eingetragenen Zündgeschwindigkeiten

Zahrentafel 3.

H_u''	Volumanteil des		Heizwert des Wasserstoffes in vH des Gemischheizwertes	Zündgeschwindigkeit bei 1 at Anfangsdruck
	CH ₄	H ₂		
WE				
700	0,0887	0,0000	0,0	1,40
	0,0800	0,0253	8,7	1,89
	0,0500	0,1124	40,4	4,59
	0,0200	0,1993	75,0	8,26
	0,0000	0,2573	100,0	11,75
600	0,0761	0,0000	0,0	0,92
	0,0500	0,0770	31,6	2,72
	0,0200	0,1656	71,3	5,50
	0,0000	0,2248	100,0	8,79
500	0,0634	0,0000	0,0	0,32
	0,0500	0,0403	19,5	0,95
	0,0200	0,1306	66,2	3,32
	0,0000	0,1908	100,2	6,12

Zahrentafel 4.

absoluter Anfangsdruck at	$H_u'' = 700$ WE		$H_u'' = 600$ WE		$H_u'' = 500$ WE	
	Volumanteil des	Zündgeschwindigkeit	Volumanteil des	Zündgeschwindigkeit	Volumanteil des	Zündgeschwindigkeit
	H ₂	m/sk	H ₂	m/sk	H ₂	m/sk
0,5	0,2573	9,36	0,2248	7,23	0,1908	4,98
1,0		11,75		8,79		6,12
1,5		13,22		9,83		6,48
2,0		14,17		10,72		6,74
2,5		15,75		11,19		6,85

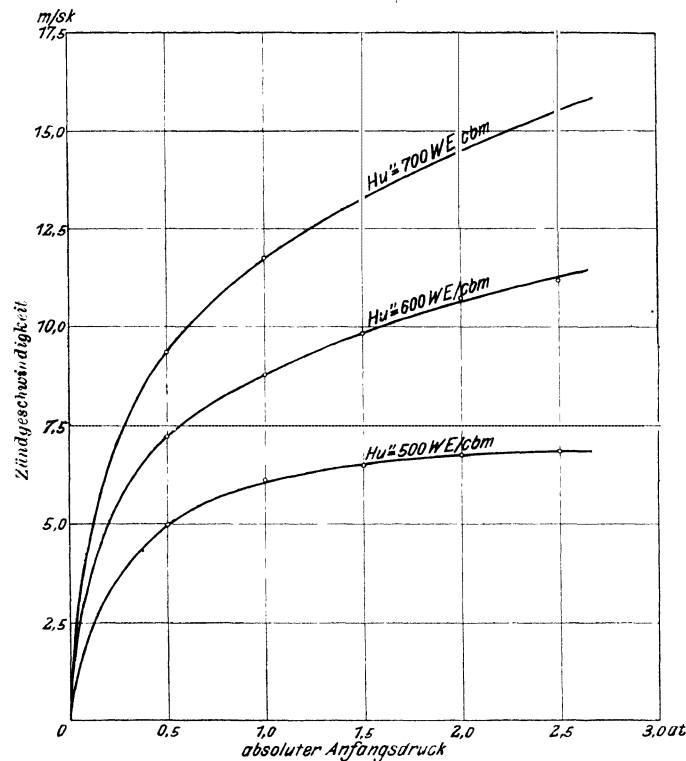


Fig. 9. Zündgeschwindigkeit von Wasserstoff-Luftgemischen bei gleichem Heizwert und verschiedenen Anfangsdrücken der Ladung.

von reinem Wasserstoff wurden aus den schon erwähnten Versuchen von Nägel hergeleitet und sind in Fig. 9 über dem Anfangsdruck zur Aufzeichnung gelangt. Für rd. 26 vH Wasserstoffgehalt wird bei 1 at abs. Anfangsdruck ungefähr eine Zündgeschwindigkeit von 12 m/sk erreicht, während sie bei dem Methan-Luftgemisch von gleichem Wärmeinhalt nur 1,40 m/sk beträgt. Bei 500 Wärmeeinheiten im Kubikmeter besitzt das Wasserstoffgemisch immer noch eine Zündgeschwindigkeit von 6 m/sk; sie geht auf 0,32 m/sk zurück, wenn der brennbare Bestandteil nur Methan ist.

Der Verlauf der Kurven in Fig. 10, die mit Hilfe der Zahlentafel 5 entworfen und in der die Zündgeschwindigkeit über dem Quotienten $\frac{L}{L_{chem}}$ aus der

Zahlentafel 5.

H_n WE	Volumanteil des		Volumen des Brenngases	Luft- volumen	zur vollkommenen Ver- brennung nötige		Luftmenge chem. Luftmenge $= \frac{L}{L_{chem}}$
	CH ₄	H ₂			Sauerstoff- menge	Luftmenge	
700	0,0500	0,1124	0,1624	0,8376	0,1562	0,744	1,126
600		0,0770	0,1270	0,8730	0,1385	0,660	1,323
500		0,0403	0,0903	0,9097	0,1202	0,572	1,590
700	0,0200	0,1993	0,2193	0,7807	0,1497	0,713	1,095
600		0,1656	0,1856	0,8144	0,1328	0,633	1,287
500		0,1306	0,1506	0,8494	0,1153	0,549	1,548
400		0,0943	0,1143	0,8857	0,0972	0,463	1,914
700	0,0887	0,0000	0,0887	0,9113	0,1774	0,845	1,078
600	0,0761	0,0000	0,0761	0,9239	0,1522	0,725	1,275
500	0,0634	0,0000	0,0634	0,9366	0,1268	0,604	1,551

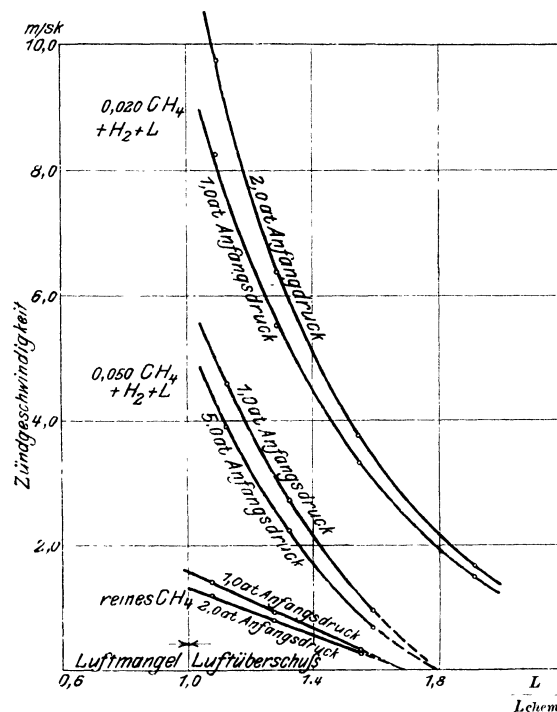


Fig. 10. Zündgeschwindigkeit der Gemische bei verschiedenem Luftüberschuß und gleichem Anfangsdruck der Ladung.

wirklichen und der zur vollkommenen Verbrennung erforderlichen Luftmenge zur Darstellung gekommen ist, scheint darauf hinzudeuten, daß die größten Zündgeschwindigkeiten bei den Versuchen im Gebiete des Luftüberschusses nicht erreicht werden. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die Methan-Wasserstoff-Luftgemische bei Luftmangel den Höchstwert der Zündgeschwindigkeit besitzen. Diese Vermutung gewinnt eine Stütze durch die Versuche von Neumann¹⁾, bei denen nachgewiesen wurde, daß die größte Zündgeschwindigkeit von Benzindampf-Luftgemischen Ladungen zukommt, die rd. 20 vH Luftmangel aufweisen. Das Diagramm Fig. 10 gibt noch Veranlassung zu einer weiteren Bemerkung. Der Schnittpunkt derselben Kurvenschar, die zugunsten übersichtlicher Darstellung nur durch zwei Linien vertreten ist, liegt auf der Abszissenachse; mit anderen Worten, die Zündgeschwindigkeit wird für einen gewissen Luftüberschuß gleich null. Unter der nur ungefähr zutreffenden Annahme²⁾, daß die Zündgeschwindigkeit null den Explosionsgrenzen des Gases entspricht, kann man beispielsweise die untere Explosionsgrenze von Methan festlegen. Bezeichnet x die gesuchte Methanmenge, so gilt die Gleichung

$$x + 1,69 L_{chem} = 1.$$

Berücksichtigt man, daß ein Volumen Methan die doppelte Sauerstoffmenge zur Verbrennung braucht, dann ergibt sich $x = 0,0585$. Dieser Wert steht in guter Uebereinstimmung mit den Versuchen von Le Chatelier³⁾ und Eitner⁴⁾, die 6 vH als untere Explosionsgrenze des Methans ergeben haben. In ähnlicher Weise kann berechnet werden, wann die Zündfähigkeit der Methan-Wasserstoff-Luftgemische erlischt.

Bei fast allen Versuchen setzte die Verbrennung sofort nach dem Ueberspringen des Zündfunkens ein, nur bei denen mit reinem Methan mußte die Zündung öfters wiederholt werden, wenn der Gasgehalt gering war und der Anfangsdruck die höchsten Stufen erreicht hatte. Wenn der Anfangsdruck 5 at abs. erreicht hatte, war es nicht mehr möglich, die Ladung mit 0,064 vH Methan zur Entflammung zu bringen. Nimmt man 6 vH als untere Explosionsgrenze an, so erkennt man, daß durch Erhöhung des Anfangsdrucks diese Grenze nach oben gerückt wird. Das Gemisch wurde sofort explosionsfähig, wenn man den Druck erniedrigte.

Die Verbrennungs- und Abkühlungslinien des photographischen Diagramms verlaufen bei einigen Versuchsreihen ($0,020 \text{ CH}_4 + 0,094 \text{ H}_2 + 0,886 \text{ L}$; $0,050 \text{ CH}_4 + 0,077 \text{ H}_2 + 0,873 \text{ L}$) unter starken Schwingungen, die sich ebenso wie das sie begleitende Zündgeräusch mit wachsendem Anfangsdruck steigern. Diese Druckschwankungen setzen nicht gleich beim Beginn der Verbrennung, sondern erst kurze Zeit danach ein.

Weitere Versuche an der Bombe werden es schließlich gelingen lassen, die Zündgeschwindigkeit eines Gases in Beziehung zu seinen Konstanten zu setzen.

¹⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 79 S. 50.

²⁾ Annales des mines 1891 8. Série Mémoires 19 S. 395.

³⁾ Ebenda S. 394.

⁴⁾ Untersuchungen über die Explosionsgrenzen brennbarer Gase und Dämpfe, München 1902.

B. Zweiter Teil.

Untersuchung der Verbrennung von Generatorgas im Kalorimeter.

Nachdem der Einfluß des Wasserstoffes auf die Zündgeschwindigkeit von Methan klargestellt war, ging man dazu über, die Verbrennung von Generatorgas, das aus Wasserstoff, Kohlenoxyd, Kohlensäure, Stickstoff und Methan als häufiger Beimengung besteht, in einem für die Technik äußerst wichtigen Verbrennungsapparat, dem Kalorimeter von Junkers, einer näheren Untersuchung zu unterziehen. Für eine eingehende Beurteilung der Verbrennung darf man sich — wie schon Eugen Meyer¹⁾ nachgewiesen hat — zur Abgasuntersuchung nicht der üblichen technisch-gasanalytischen Verfahren bedienen. Um mit hinreichender Genauigkeit zum Ziele zu kommen, muß man vielmehr zu umständlicheren Verfahren greifen, die an anderer Stelle besprochen werden sollen.

I.

Herstellung der Gase und ihre Messung.

Das Generatorgas wurde von der Gaserzeugungsanlage des Maschinenlaboratoriums geblasen und in einer Gasglocke von 50 cbm Inhalt aufgespeichert. Bei der Verwendung von Koks enthielt das erzeugte Gas kein Methan; denn dieses ist im Generatorgas nicht als Resultat der Synthese aus seinen Elementen, sondern als Entgasungsprodukt der angewandten Kohle anzusprechen. Da aus früher ausgeführten Versuchen der Wirkungsgrad des Generators bekannt war, konnte man sich mit Hilfe der Diagramme von Mollier²⁾ leicht Rechenschaft über die Gaszusammensetzung geben.

Das Generatorgas wurde im Kubizierapparat, Fig. 11 und 12, mit dem gewünschten Prozentsatz Methan, das auf die früher beschriebene Weise gewonnen worden war, gemischt. In das Innere der Glocke G führen zwei Rohrleitungen l_1 und l_2 . Durch die Leitung l_1 konnte man den Kubizierapparat mit dem großen Gasbehälter des Instituts in Verbindung setzen, sobald man den Hahn h_1 öffnete. Auf diesem Wege strömte das Generatorgas zu, während das Methan gleichzeitig durch die Leitung l_2 unter Vermittlung der Hähne h_2 , h_3 und h_4 aus einem kleinen Gasbehälter von 90 ltr Inhalt in die Glocke G gedrückt wurde. Vor Beginn der Ladung wurde der Druckunterschied zwischen Methanbehälter und Kubizierapparat durch das Wassermanometer m gemessen. Die Mischung beförderte der bei der Ladung stets laufende Ventilator. Nach vollendeter Auffüllung der Glocke benutzte man das schon früher erwähnte Verfahren zur Durchmischung des Gases. Man öffnete die Hähne h_3 und h_4 und ließ durch den Niederschraubhahn h_5 das Wasser aus dem Kompressor K abfließen. Die Entleerung konnte durch Vorschalten einer Wasserstrahlpumpe w beschleunigt werden. Hatte sich der Kompressor von etwa 150 ltr Fassungsvermögen mit Gas gefüllt, dann schloß man die Hähne h_5 und h_3 und verband K durch

¹⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 8 S. 62.

²⁾ Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1907 S. 532.

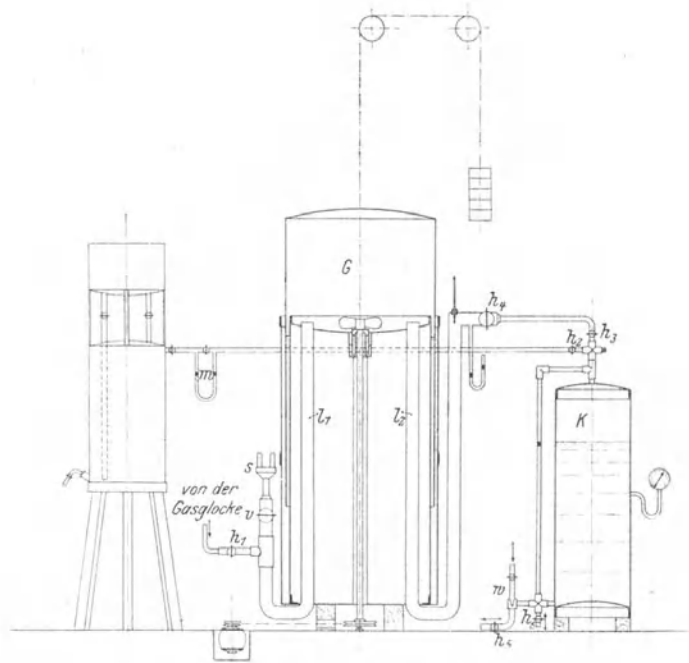


Fig. 11. Rohrplan für den Kubizierapparat.

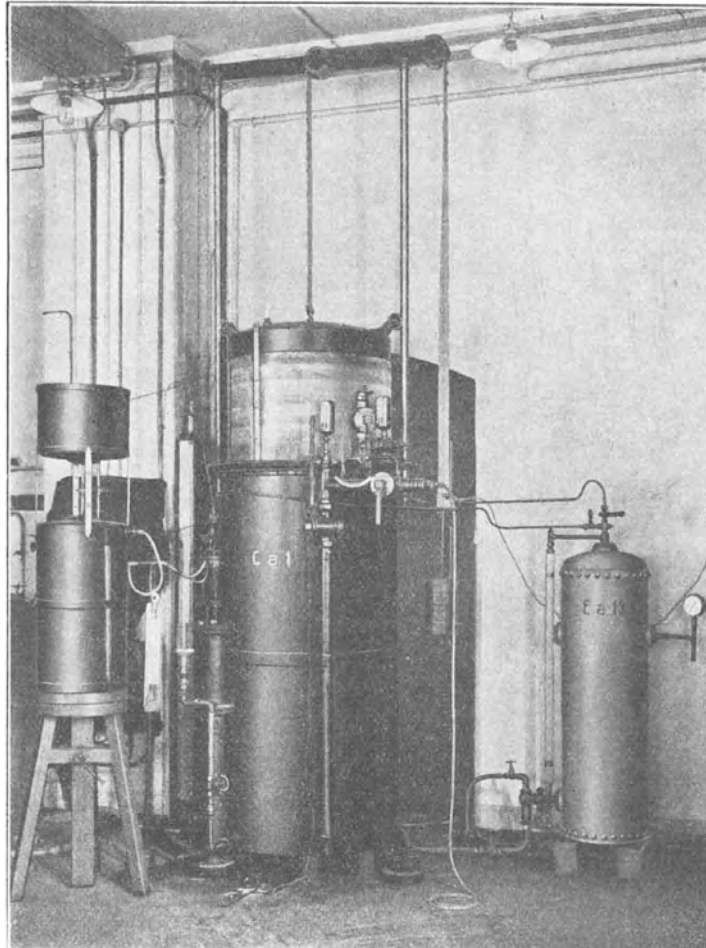
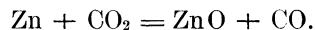


Fig. 12.

h_6 mit der Wasserleitung. Diese brachte das Gas auf rd. 5 at Ueberdruck, unter dem man es durch Oeffnen des Hahnes h_3 in die Glocke zurückleitete.

Bei einigen Versuchen wurde aus später zu erörternden Gründen mit künstlich zusammengesetztem Generatorgas gearbeitet. Wasserstoff, Kohlen- säure und Stickstoff wurden von den Sauerstoff-Fabriken Berlin in Stahlflaschen bezogen; das Kohlenoxyd wurde nach mancherlei Versuchen auf folgende Weise dargestellt. Beim Ueberleiten von Kohlen- säure über glühende Metalle, z. B. Zink, wird diese zu Kohlenoxyd reduziert nach der Gleichung



Man brachte den Zinkstaub in fein verteilter Form in eine flache, aus 2 mm dickem Eisenblech hergestellte Pfanne, die durch Deckel und Asbest- dichtung fest verschlossen und durch kräftige Bunsenbrenner erhitzt werden konnte. Da sich die Gaszuleitung in mehrere Rohre gabelte, aber nur ein Ab- leitungsrohr vorgesehen war, wurde die einer Stahlflasche unter Zwischenschal- tung eines Reduzierventiles entströmende Kohlen- säure gezwungen, in feinen Strahlen über das erhitzte Metall zu streichen. Mit dem Ableitungsrohr war eine Kupferschlange verschraubt, die zur Kühlung des Gases in ein Wasserbad gesetzt wurde. Aus der Schlange gelangte das Gas nach öfterem Richtungs- wechsel in Flaschen mit Wattefiltern, welche die letzten mitgerissenen Zink- staubmengen zurückhalten sollten. Zur Abscheidung noch vorhandener Kohlen- säure wurde das Gas darauf durch Flaschen geleitet, die mit Kalilauge be- schickt waren. Das durch den seitlichen Tubus der Flaschen geführte, einseitig verschlossene Messingrohr war zur Verteilung des Gases mit einer Menge kleiner Bohrungen versehen. Vor den gekühlten Kaliapparaten zweigte eine Leitung zu einem Brenner ab, damit man sich jederzeit durch Entzünden des Gases überzeugen konnte von dem Stande der Entwicklung, dessen Beharrungszustand durch Beobachtung einiger Wassermanometer aufrecht erhalten wurde. Das Gas strömte bei Beginn der Darstellung ins Freie, später in einen kleinen Gas- behälter.

Mit dem angegebenen Verfahren gelang es, große Mengen von Kohlen- oxyd in verhältnismäßig kurzer Zeit zu erzeugen. Die Herstellung des Kohlen- oxyds auf anorganischem Wege bietet im Gegensatz zu den organischen Pro- zessen den Vorteil, daß man es nahezu rein gewinnt.

Zur Prüfung der vollkommenen Mischung des Gases wurden Proben durch die Leitung l_2 aus dem Kubizierapparat entnommen und über Queck- silber analysiert.

Die Bestimmung von kleinen Gasmengen durch eine Glocke ist vielfach der Messung mit Gasuhren vorzuziehen, weil man damit die Unsicherheit um- geht, mit der die Konstante einer kleinen Gasuhr stets behaftet ist. Das zur Kalorimetrierung verwendete Gas wurde daher mit der Glocke des Kubizier- apparates abgemessen. An ihr ist ein geeichter Maßstab angebracht, der in 5 ltr entsprechenden Abständen geteilt ist und an dem gegen eine feststehende Marke der jeweilige Inhalt abgelesen werden kann.

Die Temperatur des Gases wurde bei seinem Austritt aus dem Kubizier- apparat festgestellt, da keine Möglichkeit für ihre Messung in der Glocke selbst gegeben war. An gleicher Stelle konnte der Gasüberdruck an einem Wasser- manometer beobachtet werden.

II.

Temperaturmessung.

Zur Temperaturmessung sind sowohl Quecksilberthermometer als auch Thermoelemente benutzt worden. Die Thermometer von Richter in Berlin, die in $\frac{1}{10}^{\circ}\text{C}$ geteilt waren, wurden in einem Thermostaten mit Normalthermometern verglichen, welche die Physikalisch-Technische Reichsanstalt geeicht hatte.

Die Thermoelemente¹⁾ bestanden aus Kupfer- und Konstantandrähten, die alle demselben Drahtvorrat entnommen waren. Die Verbindungsstellen waren teils stumpf gelötet teils geschweißt. Zur Isolierung wurden feine Gummischläuche über die Drähte geschoben, Glasröhrchen oder Glasperlen aufgereiht.

Bei der Eichung war die eine Verbindungsstelle in den Thermostaten neben ein Normalthermometer eingebaut, während die andere Lötstelle in schmelzendem Eis immer auf 0°C gehalten wurde. Die zur Messung höherer Temperaturen (bis 450°C) erforderlichen Eichungen wurden beim Siedepunkt des Wassers, des Anilins und des Schwefels vorgenommen. Die entstehenden Spannungen sind nach dem Kompensationsverfahren gemessen worden. Aus ihnen leitete man die Gleichung für die thermoelektrische Kraft in Abhängigkeit von der Temperatur her und brachte sie in einem Diagramm zur Darstellung. Die während der Versuche öfters angestellten Nacheichungen im Kalorimeter ergaben stets, daß eine Aenderung des Thermoelementes nicht eingetreten war.

III.

Die Versuchseinrichtung.

a) Für den Versuch am Kalorimeter.

Der leitende Grundgedanke bei der Versuchsanordnung war der, das Kalorimeter durch keinerlei Umbauten zu verändern, sondern so in Betrieb zu nehmen, wie es in der Praxis zur Verwendung kommt. Die Versuchseinrichtung ist in Fig. 13 in der Gesamtansicht dargestellt.

Um von den Temperatur- und Druckschwankungen der Wasserleitung vollständig unabhängig zu sein, entnahm man das Kühlwasser einem besonderen, im Laboratorium aufgestellten Hochbehälter. Das Wasser, das durch längeres Stehen eine ganz gleichmäßige Temperatur angenommen hatte, floß dem Kalorimeter unter stets gleichem Drucke zu und wurde durch ein kippbares T-Stück aus Glas entweder in die Schleuse abgeleitet oder der Messung in einem auf einer Dezimalwage stehenden Glasgefäß von 50 ltr Inhalt zugänglich gemacht.

Da Thermoelemente für Differenzmessungen geradezu wie geschaffen sind, brachte man in den Ein- und Austrittsstutzen für das Kühlwasser die Lötstellen eines Elementes, das aus Kupfer- und Konstantandraht von 0,5 mm Dicke gefertigt war. Zur Prüfung der Temperaturhöhe über dem Nullpunkt war in den Eintrittsstutzen noch ein Quecksilberthermometer eingebaut, dessen Kugel mit der Lötstelle in einer wagerechten Ebene lag. Der durch Glasröhrchen isolierte Kupferdraht wurde mit dem Konstantandraht durch ein Glasrohr geführt und an einem Ende mit Schellack eingedichtet. Die Lötstelle ragte nur wenige

¹⁾ Ueber Temperaturmessung mit Thermoelementen vergl. die Arbeiten von Nusselt: Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 63 und 64 S. 27. Der Wärmeübergang in Rohrleitungen, Berlin 1909 S. 14.

Millimeter hervor und war zur Isolation mehrmals mit Zaponlack bestrichen worden. Am anderen Ende des Glasrohres war die Berührung der beiden Drähte durch einen Schellackpfropfen verhindert, auf den sich zur weiteren Isolation Glasperlen aufrehten. Zum Schutze der Drähte wurde dieses Ende außerdem mit Isolierband umwickelt. Die beiden Glasrohre wurden mit dichthaltenden Gummistopfen in die beiden Stutzen des Kalorimeters eingesetzt. Da Eintrittstemperatur des Kühlwassers und Abgasthermometer durch ein Fernrohr abgelesen wurden, hatte man während des Versuches in der Nähe des Kalorimeters nichts zu schaffen.

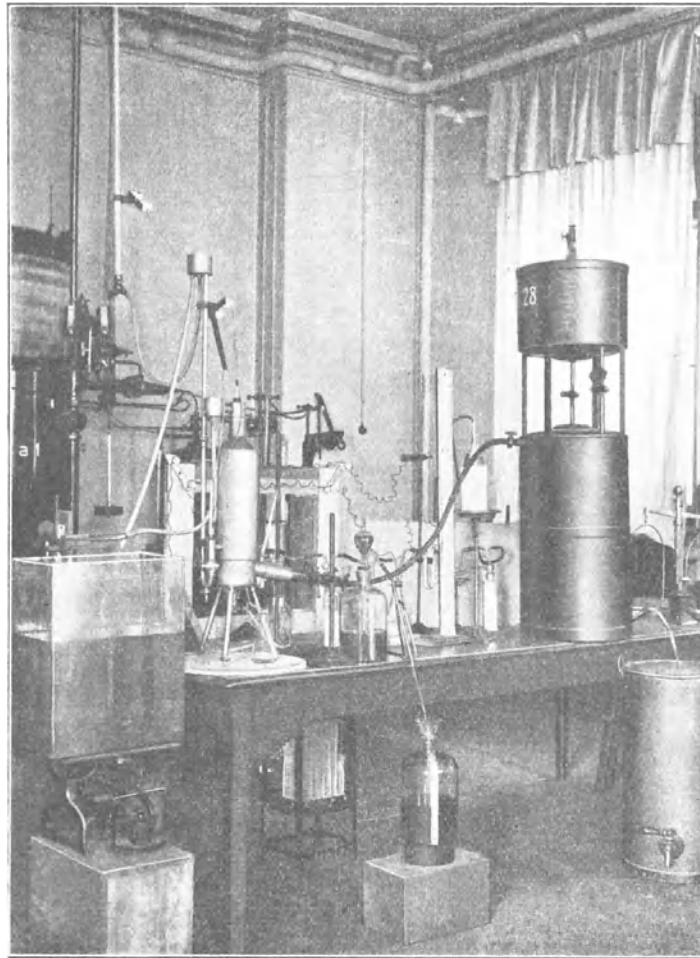


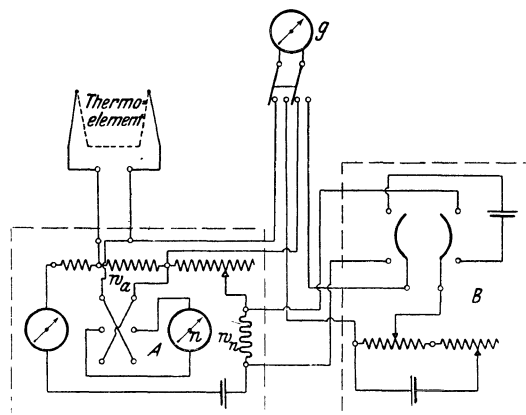
Fig. 13.

Die beiden Kupferdrähte des Thermoelementes führen, auf Porzellanisolatoren gelagert, zu der von Lindeck und Rothe¹⁾ angegebenen Kompensationschaltung, die für genauere Messungen mit einem Wolffschen Kompensator²⁾ verbunden ist, Fig. 14. Die gesuchte Spannung wird bei dem ersten Apparat durch Aenderung des Regulierwiderstandes im Hauptstromkreise gefunden, während der Abzweigwiderstand derselbe bleibt. In den Hauptstromkreis ist außerdem

¹⁾ Zeitschrift für Instrumentenkunde 1900 S. 192.

²⁾ Zeitschrift für Instrumentenkunde 1903 S. 301.

noch ein auswechselbarer Normalwiderstand eingeschaltet. Für die Wahl des Abzweigwiderstandes (0,025 bis 0,4 Ω) ist der Gesichtspunkt maßgebend, daß die Spannung e_n an den Enden des Normalwiderstandes w_n , der in unserem Falle 100 Ω war, ungefähr 1 V betragen soll. Es verhält sich aber e_n zu der zu messenden Spannung ε_x wie der Normalwiderstand w_n zum Abzweigwider-



A Kompensator nach Lindeck-Rothe.

B Kompensator nach Feußner (O. Wolff).

Fig. 14. Schaltungsschema.

stande w_a , der zu 0,05 Ω angenommen wurde. Hat man am Apparat von Lindeck-Rothe mit Hilfe von Nullinstrument n und Spiegelgalvanometer g kompensiert, dann vergleicht man die Spannung e_n noch mit der eines Normal-Weston-Elementes. Die Stromstärke im Wolffschen Kompensator wird auf 0,0001 Amp durch Kompensation des Normalelementes eingestellt. Bezeichnet w den am Wolffschen Kompensator abgelesenen Widerstand, so ergibt sich die gesuchte Spannung in V

$$\varepsilon_x = \frac{0,0001 w_a w}{w_n}$$

oder nach Einsetzung der bekannten Größen

$$\varepsilon_x = 0,00005 w \text{ in Millivolt.}$$

Das Gas wurde dem Brenner des Kalorimeters vom Kubizierapparat durch einen Schlauch zugeführt. Wie schon erwähnt wurde, hatte man keine Vorrichtung zur Luftmessung getroffen. Die Abgasmenge spielt jedoch bei der Auswertung der Versuche eine Rolle und wurde deshalb rechnerisch ermittelt. Da zu diesem Zwecke die Zusammensetzung der Abgase bekannt sein mußte, ergab sich die Notwendigkeit, einen Teil derselben aufzufangen und zu analysieren.

Für die Aufbewahrung von kohlensäurehaltigen Gasen darf Wasser nicht als Sperrflüssigkeit verwendet werden, weil es die Kohlensäure sehr stark verschluckt. Man benutzte daher eine 50 prozentige Glycerinlösung, mit der Constam und Schlöpfer¹⁾ bei ihren Dampfkesseluntersuchungen recht gute Erfahrungen gemacht hatten. Die Abgase wurden durch ein ungefähr 10 cm tief in den Abgasstutzen eingeführtes Glasrohr von 5 mm lichter Weite entnommen und in einer Flasche aufgespeichert, die mit einem mehrmals durchbohrten Gummistopfen verschlossen und mit Paraffin verschmolzen war. Eine Saugheborrichtung sorgte für die Leitung der Sperrflüssigkeit in der Gas-

¹⁾ Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1909 S. 1837.

probeflasche nach einer zweiten Flasche. Während des Versuchs von halbstündiger Dauer erhielt man rd. 5 ltr Abgase. In dem seitlichen Ansatzstutzen des Kalorimeters wurde gleichzeitig ein zweites Rohr von 12 mm innerem Durchmesser befestigt, welches durch einen angeschlossenen Schlauch Abgase zu einem 90 ltr fassenden Gasbehälter führte. Um möglichst eine Mittelprobe zu bekommen, wurden in 30 min rd. 50 ltr abgesaugt, wovon ein Teil für die gravimetrische Untersuchung Verwendung finden sollte. Als Sperrflüssigkeit diente in dem Gasometer nur mit den Abgasen gesättigtes Wasser. Obwohl auch bei diesem noch eine geringe Aufnahme von Kohlensäure stattfindet, ließ die große Menge der Sperrflüssigkeit und vor allen Dingen die nicht vollkommen genaue Bestimmung der Luftmenge dieses Verfahren zulässig erscheinen. Die beiden Absaugerohre waren derart in den Kalorimeterstutzen eingebracht, daß eine Behinderung des herabrinnenden Kondenswassers nicht möglich war. Die Absauggeschwindigkeit war durch den Abfluß der Sperrflüssigkeit genau eingeregelt worden, damit die Geschwindigkeit der Abgase im Abgasstutzen nicht überschritten wurde.

Das gebildete Verbrennungswasser floß in eine mit durchbohrtem Stopfen verschlossene Flasche, um das Verdunsten in der verhältnismäßig trocknen Zimmerluft zu verhindern.

b) Für die Abgasuntersuchung.

Verschiedene Forscher¹⁾ haben in ihren Arbeiten ausführlich dargelegt, daß das Verfahren der technischen Gasanalyse nicht gestattet, den Gehalt der Abgase an brennbaren Bestandteilen genügend genau festzustellen. Für die Abgasuntersuchung ist deshalb der gewichtanalytische Weg als der zweckmäßigere zu beschreiten.

Eingehende Versuche von Bone²⁾ und anderen haben erwiesen, daß als kennzeichnende Erzeugnisse unvollkommener Verbrennung Kohlenoxyd, Wasserstoff, Acetylen und Methan in Betracht kommen. Nach den ausgezeichneten Untersuchungen von Haber³⁾ ist es nun nicht möglich, Wasserstoff und Kohlenoxyd durch fraktionierte Verbrennung zu trennen. Man muß also darauf Bedacht nehmen, Kohlenoxyd und Wasserstoff gemeinsam aus den Abgasen zu entfernen und später das Methan herauszubrennen. Aus der gestellten Forderung ergibt sich die folgende Versuchsanordnung:

- 1) Befreiung der Abgase vom Wasserdampf,
- 2) Absorption der Kohlensäure,
- 3) Verbrennung von Wasserstoff und Kohlenoxyd,
- 4) Beseitigung des neugebildeten Wasserdampfes,
- 5) Entfernung der neugebildeten Kohlensäure,
- 6) Ueberführung des Methans in Kohlensäure und Wasserdampf,
- 7) Entfernung des neugebildeten Wasserdampfes,
- 8) Aufnahme der neugebildeten Kohlensäure.

Die Versuchseinrichtung ist in Fig. 15 und 16 veranschaulicht.

Die zu untersuchenden Abgase, die aus Wasserdampf und Kohlensäure sowie aus überschüssigem Sauerstoff, aus Stickstoff und aus etwaigen unverbrannten Gasteilen bestehen, leitete man durch einen Chlorkalciumturm *a*, an

¹⁾ Vergl. die einschlägigen Arbeiten von Bunte, E. Meyer, Haber, Constam und Schläpfer.

²⁾ Journal of the Chemical Society 1892 und 1894.

³⁾ Experimentaluntersuchungen über Zersetzung und Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, München 1896 S. 91.

den sich eine mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllte Winklersche Absorptionsschlange *b* und ein **U**-Rohr *c* schloß, das mit staubförmigem Phosphorpentoxyd beschiekt war. Die seitlichen Ansätze der verwendeten **U**-Rohre waren durch gut eingeschliffene und eingefettete Glasstopfen verschließbar. Das getrocknete Gas gelangte dann zur Abgabe der Kohlensäure durch zwei Flaschen *d* mit Kalilauge in einen Turm *e* mit Natronkalk. Nach diesem zweigte eine Leitung

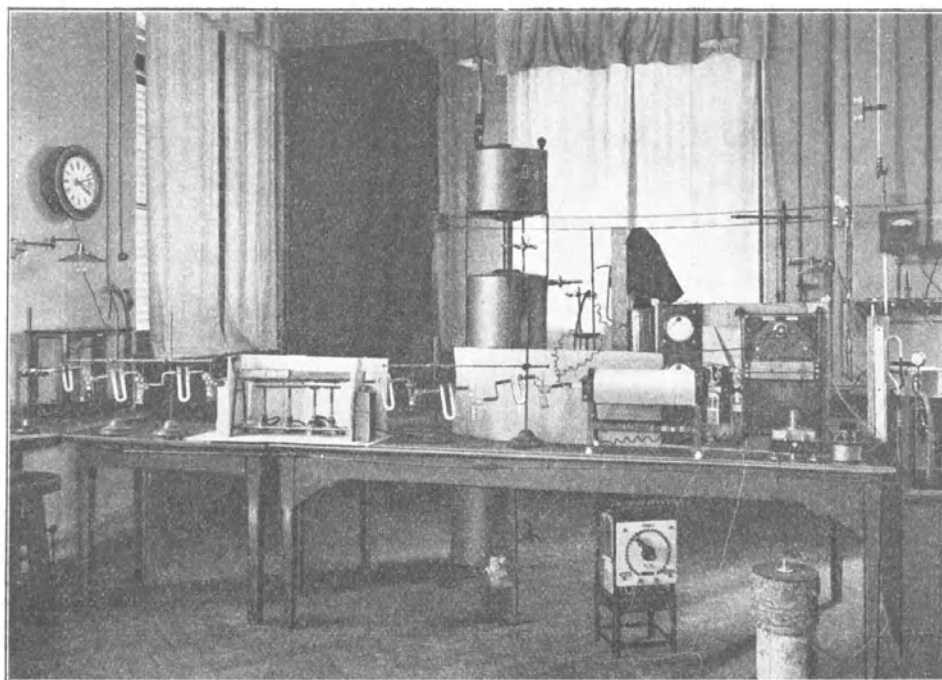


Fig. 15 und 16. Versuchseinrichtung für die Abgasuntersuchung.

zu einem Gefäß *f* mit Barytwasser ab, das zum Nachweis vollständiger Entfernung der Kohlensäure dienen sollte. Da das trockne Gas in den letzten drei Gefäßen Gelegenheit gehabt hatte, Feuchtigkeit aufzunehmen, wurde es nochmals durch eine Flasche *g* mit Schwefelsäure und ein **U**-Rohr *h* mit Phosphor-pentoxyd geschickt.

Die Abgase traten nunmehr zur Ueberführung der leicht verbrennlichen Bestandteile in Kohlensäure und Wasser in die erste Verbrennungsvorrichtung v_1 ein, worauf sie die Apparate zur Absorption der neugebildeten Verbrennungserzeugnisse durchströmten. Der Wasserdampf wurde durch einen v. Walther'schen Absorptionsapparat i , Fig. 17, mit konzentrierter Schwefelsäure und ein U-Rohr k mit Phosphorpenoxyd aufgefangen. Um volle Gewähr für die Abgabe der entstandenen Kohlensäure zu besitzen, schaltete man zwei Kohlen-

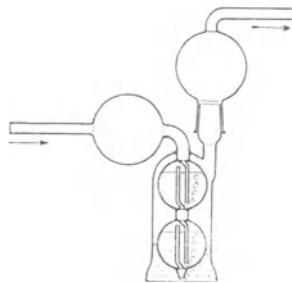


Fig. 17. Absorptionsapparat nach v. Walther.

säure absorbierende Stoffe, einen festen und einen flüssigen, hintereinander. Das Gas ging erst durch einen Apparat l mit Kalilauge und weiter durch ein feinkörnigen Natronkalk enthaltendes U-Rohr m . Zur Entziehung mitgegerissener Feuchtigkeit reihte sich an die letzten Gefäße ein Schwefelsäureapparat n und ein U-Rohr o mit Phosphorpenoxyd. Die Absorptionsgefäße waren zweckmäßig an zwei Eisenstäben, die durch Stative gehalten wurden, mittels kleiner Drahthaken aufgehängt. Die Apparate wurden untereinander durch guten Vakuummischlauch so verbunden, daß Glas an Glas stieß.

Hinter der zweiten Verbrennungsvorrichtung v_2 , in der das Methan verbrannt wurde, befanden sich wiederum die beiden Gruppen von Absorptionsgefäßen für Wasserdampf und Kohlensäure, wie sie eben beschrieben worden sind. Zum Schutze gegen das Eindringen der Luftfeuchtigkeit hatte man noch ein Chlorkaliumrohr p vorgesehen. An dieses war eine kleine Wasserstrahlpumpe w geschaltet, die in Betrieb gesetzt wurde, wenn der im Gasometer herrschende Ueberdruck nicht genügte, um die Abgase durch die Versuchseinrichtung zu treiben. Ein Quecksilbermanometer ermöglichte die Einstellung und Aufrechterhaltung des Beharrungszustandes.

Der kleine Gasbehälter, in dem die Abgase aufgesammelt worden waren, war weder mit Thermometersäcken noch mit einem Anschluß für die Druckmessung versehen. Man mußte sich deshalb damit begnügen, Temperatur und Druck des Gases sofort nach dem Verlassen des Gasometers zu bestimmen und die wohl zutreffende Annahme zu machen, daß sich beide auf dem kurzen Weg bis zur Meßstelle nicht geändert hatten. Das Thermometer und das zum Wasseranometer führende Rohr waren in eine mit Strahlungsschutz umgebene Flasche eingebaut, die durch einen mit Paraffin überzogenen Gummistopfen abgeschlossen war.

Um ganz kleine Mengen von Kohlensäure mit Sicherheit zu entfernen, darf die Gasmenge nach Habers Angaben 3 ccm in der Sekunde nicht überschreiten. Infolge der hierdurch bedingten geringen Geschwindigkeit bewegte sich der Zeiger einer anfangs eingeschalteten 3 ltr-Gasuhr nur sprungweise. Außerdem waren die Stellen, wo die Welle das Gehäuse durchstößt, bei dem für Gasuhren hohen Ueberdruck von 800 mm Wassersäule nicht dicht zu halten. Diese Uebelstände zwangen dazu, die Gasmenge durch die sie verdrängende Wassermasse zu messen. Zur Einstellung des Wasserspiegels im oberen Gefäß des Gasbehälters diente ein gegen eine feste Marke verschieblich angeordneter Maßstab aus Messing, der an seinem unteren Ende drei Spitzen trug. Zwei von ihnen berührten den Wasserspiegel von oben, die dritte gleichzeitig von unten. Die Wasserhöhe im unteren Gefäß des Gasbehälters konnte man an einem Wasserstandglas nachprüfen; über die im oberen gab ein Schwimmer Aufschluß.

Einer besonderen Besprechung bedürfen noch die Verbrennungsvorrichtungen. Auf Grund einer Litteraturangabe¹⁾, nach der Wasserstoff und Kohlenoxyd bei 250° C über Kupferoxyd vollständig verbrennen, während Methan noch unverändert bleibt, entwarf man die Verbrennungsvorrichtung Fig. 18.

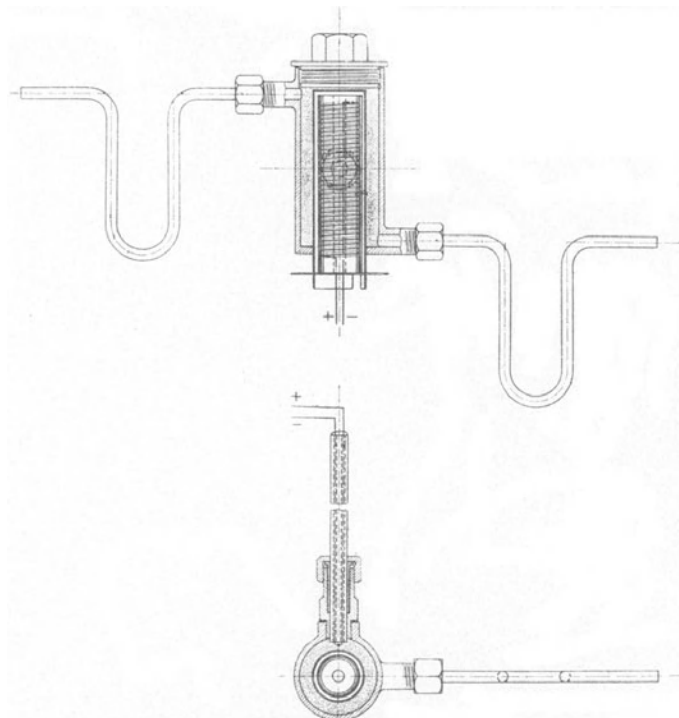


Fig. 18. Verbrennungsvorrichtung mit Kupferoxyd.

Diese besteht aus einem Rohr von 52 mm innerem Durchmesser und 120 mm Länge, in welches ein oben verschlossenes, nahtlos gezogenes Stahlrohr von 32 mm lichter Weite und 0,8 mm Wandstärke gleichachsig und dicht eingesetzt ist. An das äußere Rohr sind zwei Stutzen mit 5 mm-Bohrung für den Anschluß der Gasleitungen und eine Warze für den Aufsatz des Thermoelementes durch Autogenschweißung angefügt. Der Boden und der mit Feingewinde versehene Deckel sind so bemessen, daß ein schädlicher Raum vermieden wird. An den unteren Stutzen wird die Gaszuleitung, an den oberen die Gasabführung angeschraubt. Diese sind aus Kupferrohr von 5 mm lichter Weite hergestellt und U-förmig gebogen, um sie zum Schutze der anschließenden Gummistücke kühlen zu können. Die Kupferrohre werden mit aufgerauhtem Klingerit, der Deckel durch eine dünne Asbestschicht dicht aufgesetzt.

Das Kupferoxyd wurde elektrisch durch einen Nickelindraht von 0,6 mm Durchmesser geheizt. Dieser war in mehreren voneinander durch Asbestpapier getrennten Schichten auf einen Porzellanzyylinder aufgewickelt, der in das innere Rohr eingesetzt und durch einen Schlitzverschluß in seiner Lage festgehalten war. Die Heizschlange wurde unter Zwischenschaltung von Regulierwiderständen, Meßgeräten und zweipoligem Ausschalter an das 220 V-Netz des Instituts angeschlossen.

Die Temperatur in dem mit Kupferoxyd völlig gefüllten Ringraum des Apparates wurde mit dem Thermoelement 1 gemessen. Die Drähte waren von

¹⁾ Chemiker-Zeitung 1909 Heft 79.

der geschweißten Verbindungsstelle nach außen durch ein mit zwei feinen Bohrungen versehenes Porzellanrohr geführt, das in das äußere Rohr eingedichtet war. Am äußeren Ende des 20 cm langen Porzellanrohres waren die Bohrungen mit Siegellack verschmolzen. Die mit Gummischlauch isolierten Drähte wurden an einem thermokraftfreien Umschalter *u*, Fig. 19, befestigt, von dem sie unter Zwischenschaltung der in schmelzendes Eis gebrachten zweiten Lötstelle an ein Zeigergalvanometer *g* (Siemens & Halske, Berlin) von 184,3 Ω innerem Widerstand und einem Meßbereich von 8 Millivolt angeschlossen waren,

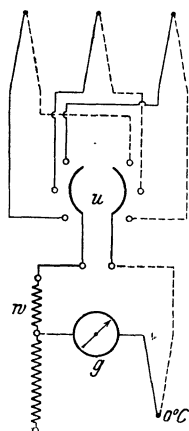


Fig. 19.

Schaltungsschema.

Schaltungsschema Fig. 19. Bei Messung hoher Temperaturen konnte das Meßbereich des Galvanometers durch die verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten des Vorschaltwiderstandes *w* auf 16, 24 und 32 Millivolt erweitert werden.

Um sich zu vergewissern, bei welcher Temperatur ungefähr die Verbrennung des Methans über Kupferoxyd einsetzt, leitete man durch den Apparat ein Gemisch von 3 vH Methan und 97 vH Luft, das man vorher durch Kalilauge strömen ließ. Eine Trübung des dahintergeschalteten Barytwassers trat nach etwa 5 Minuten bei 280° C ein. Man hielt deshalb die Temperatur bei den Abgasuntersuchungen auf rd. 260° C.

Da es nicht möglich war, den Apparat mit Kupferoxyd auf die Dauer dicht zu erhalten, benutzte man bei einer Reihe von Versuchen — die als Prüfversuche angesehen werden können —, in der ersten Verbrennungsvorrichtung einen Draht aus reinem Palladium als Kontaksubstanz. Dieses Metall hat vor Kupferoxyd den Vorzug, daß seine Eigenschaften als Katalysator Gegenstand ausgedehnter Forschung gewesen sind. Die Untersuchungen von Haber und Richardt¹⁾ haben dargetan, daß bis zu einer Temperatur von 450° C Methan unter der katalytischen Wirkung von Palladiumdraht nicht angegriffen wird, während Wasserstoff und Kohlenoxyd in Wasserdampf und Kohlensäure übergeführt werden.

Den Draht erhitzte man in einem von W. C. Heraeus in Hanau gelieferten elektrischen Ofen auf die gewünschte Temperatur. In ein 60 cm langes Porzellanrohr von 20 mm innerem Durchmesser brachte man ein Glasrohr von 4 mm lichter Weite und 65 cm Länge, das von zwei Korkstopfen in seiner mittleren Lage gehalten wurde. Dieses Rohr trug in seiner Mitte den Palladiumdraht von 50 cm Länge und 1,2 mm Stärke, der dreifach auf 17 cm zusammengelegt und verdreht in das Rohr eingeschoben war.

Zur Bestimmung der Temperatur diente das Thermoelement 3. Bei diesem war der mit Glasröhrchen isolierte Kupferdraht mit dem Konstantandraht durch ein Glasrohr gezogen, aus dessen einem Ende die Schweißstelle nur wenige Millimeter hervorsah. Das andere Ende war mit Siegellack verkittet und mit Isolierband umwickelt. Das Rohr des Thermoelementes lag unmittelbar auf dem Glasrohr, in dem sich das Palladium befand, und die geschweißte Verbindungsstelle war der zu bestimmenden Temperatur in der Mitte des eingelegten Palladiumdrahtes ausgesetzt. Das Thermoelement 2 wurde durch Reißen eines Drahtes bald unbrauchbar.

Durch die Eichung ergab sich zwischen der thermoelektrischen Kraft ϵ und der zu messenden Temperatur t , wenn die inaktive Lötstelle auf 0° C gehalten wurde, die Beziehung

¹⁾ Zeitschrift für anorganische Chemie 1904 Bd. 38 S. 65.

für Thermoelement	1:	$\varepsilon = 0,03915 t + 0,0000365 t^2,$
»	2:	$\varepsilon = 0,03911 t + 0,0000368 t^2,$
»	3:	$\varepsilon = 0,03999 t + 0,0000288 t^2,$

wenn ε in Millivolt ausgedrückt ist. Bei den Versuchen bediente man sich zweckmäßig der graphischen Darstellung der Gleichungen.

Als Verbrennungsvorrichtung für das Methan wurde ein Verbrennungsofen benutzt, wie er in organischen Laboratorien verwendet wird. Das 60 cm lange, mit einem dünnen Asbestnetz umhüllte Verbrennungsrohr hatte 6 mm lichte Weite und wurde von 3 Bunsen- und einem Flachsblitzbrenner erhitzt. Die verschiebbaren Brenner waren so gestellt, daß sie eine zusammenhängende Flamme bildeten. Das Verbrennungsrohr wurde mit Kupferoxyd, das von Kupferwindungen in seiner Lage gehalten wurde, auf 40 cm Länge gefüllt, wenn als erste Verbrennungseinrichtung der Kupferoxydapparat in Verwendung kam. Das zur Füllung verwendete Kupferoxyd war in einer Flasche mit reinem Kupferoxydpulver geschüttelt worden, um es zur Vergrößerung der wirksamen Oberfläche mit dem Pulver zu überziehen. Das vom Gasstrome mitgerissene Pulver wurde von einem Wattebausch aufgefangen. Bei den Versuchen mit Palladiumdraht gelangte ein Verbrennungsrohr mit Platin-Asbestfüllung zur Benutzung.

IV.

Ausführung der Versuche.

a) Der Versuch am Kalorimeter.

Zuerst wurde das Kühlwasser für das Kalorimeter angestellt und darauf gesehen, daß etwa vorhandene Luftblasen entwichen und dauernd Wasser am Ueberlauf austrat. Zeigte das Eintrittsthermometer eine gleichbleibende Temperatur, dann wurde das Gas entzündet und die Luftzufuhr durch Verstellen der Regulierhülse am Brenner derartig geregelt, daß die Flamme ruhig als Bunsenflamme brannte. Hierauf wurde der Brenner in die Verbrennungskammer eingesetzt, so daß er bei allen Versuchen gleichweit in dieselbe hineinragte. Das aus dem Kalorimeter ablaufende Kühlwasser wurde in einem Glasgefäß aufgefangen und seine Temperatur bestimmt. In der Regel ließ man so viel Wasser durch das Kalorimeter fließen, daß es etwa um 10° C erwärmt wurde. Bei jeder Kalorimetrierung sind rd. 300 ltr Gas verbrannt und 30 bis 40 kg Kühlwasser verbraucht worden. Die im Abgasstutzen angebrachte Drosselklappe mußte wegen des Einbaues der Absaugeröhre bei allen Versuchen ganz geöffnet bleiben.

Lange Zeit vor Beginn des Versuches wurden die Stromquellen am Kompensationsapparat eingeschaltet, damit die Widerstände während des Versuches auf eine gleichbleibende Erwärmung gekommen waren. Der Versuch wurde erst begonnen, nachdem das Kondenswasser längere Zeit regelmäßig abgetropft war. Die Messungen von Gas, Kühl- und Verbrennungswasser erfolgten von dem Augenblick ab, in dem sich ein Teilstrich des Maßstabes an der Glocke des Kubizierapparates mit der feststehenden Marke deckte. Kurz darauf wurden die Gasabsaugevorrichtungen in Tätigkeit gesetzt. Die Abgas- und Raumtemperatur, der Ueberdruck des Gases, die Gastemperatur und die beiden Thermometer des Aspirationspsychrometers für die Feuchtigkeitsmessung der Luft wurden alle 5 Minuten abgelesen. Die Messung mit dem Thermolement im Kalorimeter ist fortlaufend vorgenommen worden; die Temperatur am Ein-

trithermometer wurde aufgeschrieben, wenn das Spiegelgalvanometer der Kompensationschaltung von Lindeck-Rothe auf null einspielte. Da die Temperatur des eintretenden Kühlwassers fast unveränderlich blieb, und das Gas infolge starker Durchmischung ganz gleichmäßig zusammengesetzt war, konnte man mit der elektrischen Temperaturmessung sehr schnell folgen. Die Messungen wurden in der Regel abgebrochen, wenn die Spannung des Thermoelementes 20mal kompensiert worden war.

Nachdem Kühl- und Kondenswasser gewogen worden waren, setzte man das Psychrometer mit zwei Gummischläuchen auf den Stützen *s*, Fig. 11, am Kubizierapparat auf, um die Feuchtigkeit des Gases zu ermitteln. Da dieser Feuchtigkeitsmesser nur richtige Werte gibt, wenn ihm das Gas unter atmosphärischem Druck zuströmt, belastete man das Gegengewicht der Glocke, bis das Wassermanometer nur noch einige Millimeter Ueberdruck zeigte, die zur Ueberwindung der Rohrreibung nötig waren. Nachdem man die eine Thermometerkugel nochmals befeuchtet hatte, setzte man die Ventilationsvorrichtung in Betrieb und öffnete das Ventil *v*. Nach 2 Minuten begann man mit den Ablesungen, die alle Minuten ausgeführt wurden.

An diese Arbeiten schloß sich die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung des Generatorgases und der Abgase in der mit Quecksilber gefüllten Hempelschen Bürette, die mit Temperatur- und Druckberichtigung ausgestattet war. Die Abgase wurden mit der Glycerinlösung in der Flasche geschüttelt, um möglichst eine Mittelprobe in das Meßrohr zu nehmen.

b) Die Abgasuntersuchung.

Vor Beginn jeder Abgasuntersuchung wurden die Verbrennungsvorrichtungen angewärmt und die aufgenommene Luftfeuchtigkeit sowie von früheren Versuchen zurückgebliebene Verbrennungsgase durch einen getrockneten, von Kohlensäure befreiten Luftstrom ausgetrieben. Mit großer Sorgfalt sind die Gewichte der Absorptionsgefäße hinter den Verbrennungsapparaten bestimmt worden; sie wurden in Gruppen zu je zwei auf einer analytischen Wage gewogen. Jetzt konnte man die verschiedenen Gefäße zusammenschalten und unter den jeweiligen Versuchsbedingungen auf Dichtheit prüfen. Man brachte darauf die eine Lötstelle des Thermoelementes in schmelzendes Eis und heizte die Verbrennungsvorrichtung. Die Apparatur wurde vor dem ersten Verbrenner abgesperrt und durch Zuleiten von Abgas aus dem Gasbehälter unter den beim Versuch gewünschten Ueberdruck gesetzt. Zur Vorsicht wurde das mit Kalilauge und Natronkalk in Berührung gewesene Abgas durch die Flasche mit Barytwasser gedrückt. Nachdem man sich überzeugt hatte, daß die Kohlensäure vollständig beseitigt war, wurden im oberen Gasbehältergefäß die Spitzen auf den Wasserspiegel eingestellt und eine gewogene Wassermenge nachgefüllt. War die zur Verbrennung von Kohlenoxyd und Wasserstoff notwendige Temperatur erreicht, dann wurden die Hähne in der Abgasleitung geöffnet und mit dem Versuch begonnen. Der Wasserzufluß im Gasbehälter ließ sich durch einen Hahn, der mit einem auf einer feinen Teilung spielenden Zeiger ausgerüstet war, sehr gut regeln und damit die sekundliche Gasmenge erheblich unter 3 ccm halten. Die nötigen Temperatur- und Druckablesungen wurden alle 5 Minuten ausgeführt. Jeder einzelne Versuch erstreckte sich, je nach der untersuchten Abgasmenge, über einen Zeitraum von 5 bis 10 Stunden. Bei seiner Beendigung schloß man zunächst den letzten Gashahn vor der ersten Verbrennungsvorrichtung. Wenn sich der

Druck in den Gefäßen ausgeglichen hatte, wurden alle Hähne abgesperrt und die Verbindungen gelöst. Gut passende Glasstöpsel verhinderten die Aufnahme von Feuchtigkeit und Kohlensäure aus der Luft an den offenen Enden der Gefäße. Die Menge der neu gebildeten Verbrennungsgase wurde wiederum durch Wägen der Absorptionsapparate bestimmt.

Bei der langen Dauer der Versuche und der hohen Erhitzung war es nicht zu umgehen, daß öfter benutzte Verbrennungsrohre während des Versuches zerstört wurden. Merkte man rechtzeitig, daß ein Bruch eintreten würde, dann war der Versuch durch schnellen Abschluß noch brauchbar; im anderen Falle wurden die Versuchszahlen nicht für die Rechnung verwendet. Sehr oft zeigten sich an den v. Waltherschen Absorptionsapparaten Spannungsrisse, die meist an den mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllten Gefäßen auftraten und eine Wägung unmöglich machten. Die Absorptionsmittel wurden stets nach mehreren Versuchen erneuert.

Zur Prüfung der Fehlergrenzen bei den Gewichtbestimmungen mußten blinde Versuche gemacht werden, bei denen man nur Luft durch die gesamte Versuchseinrichtung schickte.

Die ersten 6 Versuche (Zahlentafel 8) sind durchgeführt worden, um die Größenordnung der Abweichung des aus der Analyse berechneten von dem durch das Kalorimeter erhaltenen Heizwert festzustellen. Hierbei wurden die Versuche 3 bis 6 mit einem Gase angestellt, das aus den Einzelgasen zusammengesetzt worden war. Man wollte sich dadurch vergewissern, daß nicht die schweren Kohlenwasserstoffe, die als Entgasungserzeugnisse der Kohle in mannigfacher Form im Generatorgas auftreten können, als Ursache des Unterschiedes zwischen den fraglichen Heizwerten anzusehen sind. Die schweren Kohlenwasserstoffe sind wegen ihrer geringen Menge durch die Analyse sehr schwer genau festzustellen; sie üben aber auf das Ergebnis der Heizwertberechnung einen großen Einfluß aus wegen der hohen Verbrennungswärme, die ihnen zukommt.

Nachdem hinter den beiden ersten Verbrennungsvorrichtungen (Kupferoxyd und Palladiumdraht) sich nur Gewichtsteigerungen der Absorptionsgefäße nachweisen ließen, die vollkommen innerhalb der Fehlergrenzen lagen, schloß man einige Versuche an, bei denen nur die zweite Verbrennungsvorrichtung (Kupferoxyd oder Platinasbest) in Betrieb genommen wurde. Bei mehreren Versuchen gelangte mit Rücksicht auf eine Zeitersparnis eine geringere Abgasmenge zur Untersuchung. Da jedoch die Gewichte des neugebildeten Wasserdampfes und der Kohlensäure hinter dem zweiten Verbrenner nur wenig verschieden waren von den entsprechenden Größen, die bei den blinden Versuchen gefunden wurden, entschloß man sich, die Versuchsdauer wiederum auf 10 Stunden auszudehnen.

V.

Die Auswertung der Versuche.

Im Folgenden soll zunächst das Auswertungsverfahren der Versuche allgemein durchgeführt werden.

Die von den Verbrennungsgasen im Kalorimeter an das Kühlwasser abgegebene Wärme läßt sich berechnen, wenn bekannt sind

- G das Gewicht der Kühlwassermenge in kg,
- t_1 die Eintritttemperatur des Kühlwassers,
- t_2 die Austritttemperatur » » und
- V das Volumen der gemessenen Gasmenge in cbm.

Unter der Annahme, daß die spezifische Wärme des Wassers in dem in Betracht kommenden Temperaturbereich gleich 1 ist, gilt für den oberen Heizwert bei gleichbleibendem Druck die Formel

$$H_p = \frac{G(t_2 - t_1)}{V}.$$

Durch zweimalige Anwendung der Gasgleichung läßt sich das gemessene Gasvolumen auf den Normalzustand von 15° C und 1 at umrechnen.

Es bedeutet:

b_{15} den Barometerstand in mm Q.-S. von 15° C,

h den Ueberdruck des Gases in mm W.-S.,

1 at gleich 737,4 mm Q.-S. von 15° C und

t_g die Temperatur des Gases in °C.

Dann besteht für den oberen Heizwert, bezogen auf 1 cbm Gas von 15° C und 1 at, die Beziehung

$$H_o = \frac{G(t_2 - t_1)}{V} \cdot \frac{737,4}{b_{15} + h} \cdot \frac{273 + t_g}{288}.$$

Die noch unbekannte Größe t_2 läßt sich aus der gemessenen Thermospannung ε_x unter Beachtung der Temperatur t_1 ermitteln. Nach der Eichung des Thermoelements war die thermoelektrische Kraft ε mit der Temperatur t durch die Gleichung verknüpft

$$\varepsilon = 0,03734 t + 0,000049 t^2.$$

Für die Eintrittstemperatur wird demzufolge

$$\varepsilon_1 = 0,03734 t_1 + 0,000049 t_1^2.$$

ε_x ist dargestellt als Unterschied zwischen ε_2 und ε_1 ; es folgt mithin

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_x + \varepsilon_1.$$

Zur bequemen Ausmittlung von t_2 benutzt man die Kurve in Fig. 20. Man addiert die Thermospannung ε_1 zur gemessenen Größe ε_x und greift die zu ε_2 gehörige Temperatur t_2 ab. Zur Erzielung hoher Genauigkeit war das verwendete Diagramm mit großen Maßstäben (0,1 Millivolt = 100 mm, 1° C = 100 mm) aufgezeichnet worden.

Der obere Heizwert, vermindert um das Produkt aus der Verdampfungswärme für 1 kg und der aus 1 cbm Gas gebildeten Wassermenge W , gibt den unteren Heizwert, der durch die übliche Formel ausgedrückt wird

$$H_u = H_o - 600 W.$$

Die abgeleiteten Beziehungen für die beiden Heizwerte besitzen nur Geltung, wenn die im Gas enthaltene Wasserdampfmenge unberücksichtigt bleibt. Für genauere Messungen darf jedoch ihr Einfluß nicht vernachlässigt werden. Deshalb wurde der Feuchtigkeitsgehalt des Gases gemessen; man muß allerdings dabei die Annahme machen, daß sich die relative Feuchtigkeit innerhalb der kurzen Zeit zwischen Kalorimeter- und Psychrometerversuch nicht ändert. Um die Angaben des Aspirationspsychrometers zu prüfen, wurden einige Feuchtigkeitsbestimmungen durch Absorption des Wasserdampfes mit Chlorkalzium, Schwefelsäure und Phosphorpentoxyd ausgeführt. Die in Zahlentafel 6 niedergeschriebenen Werte zeigen, daß die Angaben des Psychrometers etwas höher als die durch Absorption erhaltenen Zahlen liegen. Da bei Temperaturen bis zu 20° C Spannung und Gewicht der Mengeneinheit des Wasserdampfes sehr klein sind, bleibt diese geringe Unstimmigkeit ohne Belang.

Zahlentafel 6.

Versuchs-Nr.	mittlere Lufttemperatur während der Absorption °C	Luftmenge cbm	Gewichtzunahme der Absorptionsgefäße g	Barometerstand mm Q.-S.	Psychrometerangaben		relative Feuchtigkeit, berechnet aus	
					trockenes Thermometer °C	feuchtes Thermometer °C	Absorption	Psychrometerangaben
1	17,69	0,010	0,1490	747,4	17,89	16,93	0,857	0,907
2	20,07	0,010	0,1296	748,2	20,24	19,02	0,848	0,895

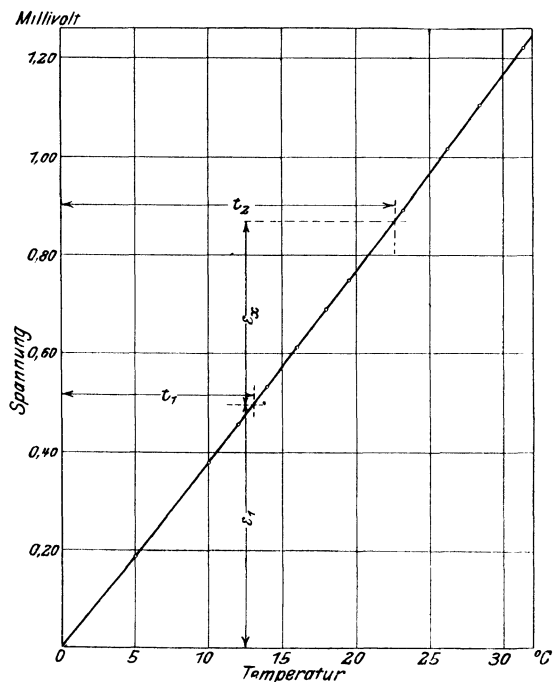


Fig. 20.

Zahlentafel 7.

Versuchs-Nr.	Barometerstand mm Q.-S.	Luftfeuchtigkeit			Gasfeuchtigkeit		
		trockenes Thermometer °C	feuchtes Thermometer °C	relative Feuchtigkeit der Luft %	trockenes Thermometer °C	feuchtes Thermometer °C	relative Feuchtigkeit des Gases %
7	739,4	15,95	9,15	0,395	17,80	12,96	0,576
8	758,9	19,68	11,20	0,331	18,73	16,89	0,830
9	751,6	18,84	10,84	0,387	18,40	16,49	0,823
10	751,0	16,28	9,88	0,430	16,32	15,16	0,889
12	751,9	20,28	12,10	0,365	21,76	20,15	0,865
13	729,6	16,80	8,78	0,321	17,45	14,47	0,732
14	759,2	14,13	7,73	0,384	14,63	13,44	0,876
15	747,5	16,60	10,80	0,482	16,96	15,20	0,836
16	746,6	18,15	11,97	0,475	18,33	16,82	0,859
17	752,3	15,12	7,32	0,292	15,85	14,18	0,839
20	738,4	16,65	11,85	0,568	16,66	16,01	0,936
21	754,4	15,82	10,17	0,482	16,22	15,29	0,910
22	747,0	16,92	11,34	0,505	16,82	16,02	0,922
23	745,3	16,73	10,55	0,454	16,84	15,55	0,877
24	751,9	16,67	10,53	0,455	16,82	15,52	0,877
25	746,7	15,54	9,74	0,466	15,60	14,76	0,918
26	743,3	15,20	10,22	0,531	16,07	14,69	0,869

Das Psychrometer gibt den gesuchten Feuchtigkeitsgehalt

$$f = f'' - 1/2 (t' - t'') \frac{b}{755},$$

wenn

t' die am trocknen,

t'' die am feuchten Thermometer des Psychrometers gemessene Temperatur,

f'' den Feuchtigkeitsgehalt für die Sättigungstemperatur t'' und

b den Barometerstand in mm Q.-S.

bezeichnet. Die relative Feuchtigkeit des Gases folgt dann aus

$$\varphi_g = \frac{f}{f'},$$

wenn f' die Feuchtigkeit des bei t' gesättigten Gases bedeutet.

Die Feuchtigkeitsgehalte können bei niedrigen Temperaturen mit genügender Genauigkeit durch die entsprechenden Teildrücke des Wasserdampfes ersetzt werden, die aus Zahlentafeln zu entnehmen sind. Die relative Feuchtigkeit für Luft und Gas gibt Zahlentafel 7.

Zahlen-

I	2	3	4	5			6					12				
				Versuchs-Nr.	Barometerstand, reduziert auf Q.-S. von 15 °C b_{15} mm Q.-S.	Raumtemperatur °C	Temperatur der Abgase °C	Gas			Kühlwasser					
								Menge V cbm	Temperatur t_g °C	Ueberdruck h mm W.-S.	Menge G kg		Eintrittstemperatur t_1 °C	gemessene Thermospannung ε_x Millivolt	Austrittstemperatur t_2 °C	Temperaturerhöhung $t_2 - t_1$ °C
1	753,5	21,87	21,42	0,360	22,26	66	31,550	20,21	0,39891	30,22	10,01					
2	751,3	19,40	21,45	0,300	20,35	63	31,630	20,48	0,40606	30,66	10,18					
3	758,7	15,49	17,60	0,300	16,14	74	33,940	15,82	0,44157	27,03	11,21					
4	747,9	17,00	15,81	0,330	18,52	75	41,350	13,68	0,36494	23,01	9,33					
5	754,2	17,54	16,18	0,240	18,40	74	30,280	14,03	0,31848	22,18	8,15					
6	748,5	16,26	15,75	0,245	17,00	74	20,940	14,00	0,46893	25,92	11,92					
7	739,4	16,27	11,77	0,300	16,08	65	30,590	8,87	0,39293	19,02	10,15					
8	758,9	19,82	15,43	0,300	19,89	64	34,315	12,20	0,40375	22,54	10,34					
9	751,6	19,39	15,10	0,280	18,42	62	28,530	12,63	0,36888	22,08	9,45					
10	751,0	16,57	13,79	0,280	16,40	62	30,910	11,19	0,40927	21,70	10,51					
12	751,9	20,97	14,64	0,330	22,80	65	37,850	11,37	0,35734	20,55	9,18					
13	729,6	17,46	12,19	0,300	19,25	64	33,040	8,82	0,44660	20,34	11,52					
14	759,2	14,59	11,39	0,305	14,44	64	32,815	8,29	0,41302	18,97	10,68					
15	747,5	16,83	15,07	0,300	17,03	61	32,975	12,43	0,43346	23,52	11,09					
16	746,6	18,50	16,64	0,300	18,22	62	34,785	13,67	0,44026	24,89	11,22					
17	752,3	15,29	14,43	0,300	14,90	62	40,210	11,88	0,40299	22,21	10,33					
20	738,4	16,74	15,38	0,300	16,80	61	37,810	12,98	0,40717	23,39	10,41					
21	754,4	16,09	16,98	0,300	16,14	61	37,850	14,70	0,42096	25,41	10,71					
22	747,0	17,19	15,95	0,300	18,10	61	35,495	13,38	0,41080	23,87	10,49					
23	745,3	16,93	15,46	0,300	17,13	61	33,630	13,10	0,38810	23,02	9,92					
24	751,9	16,85	14,36	0,300	16,20	61	33,170	11,85	0,39741	22,16	10,31					
25	746,7	15,59	15,57	0,300	15,77	61	32,130	13,38	0,41358	23,94	10,56					
26	743,3	15,50	15,01	0,300	15,33	61	35,110	12,71	0,41064	23,21	10,50					

Der durch das Kalorimeter mit Berücksichtigung des Wasserdampfes gefundene obere Heizwert läßt sich schreiben:

$$H_{ok} = \frac{G(t_2 - t_1)}{V} \frac{737,4}{b_{15} + \frac{h}{13,6} - \varphi_g h'} \frac{273 + t_g}{288},$$

wobei die Spannung h' des gesättigten Wasserdampfes in mm Q.-S. bei der Temperatur t_g einzuführen ist.

Das für 1 cbm Gas vom Normalzustand erzeugte Verbrennungswasser W_k berechnet sich bei Beachtung des Wasserdampfgehaltes im Gas aus der beobachteten Kondenswassermenge w zu

$$W_k = \frac{w}{V} \frac{737,4}{b_{15} + \frac{h}{13,6} - \varphi_g h'} \frac{273 + t_g}{288},$$

und der untere Heizwert ist gegeben durch

$$H_{uk} = H_{ok} - 600 W_k.$$

tafel 8.

	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	Feuchtigkeit				Feuchtigkeit				
	nicht berücksichtigt		berücksichtigt		nicht berücksichtigt		berücksichtigt		
	gemessenes Kondenswasser	Verbrennungswasser für 1 cbm Gas (15°, 1 at)	Verdampfungswärme d. Verbrennungswassers	Verbrennungswasser für 1 cbm Gas (15°, 1 at)	Verdampfungswärme d. Verbrennungswassers	oberer Heizwert von 1 cbm Gas (15°, 1 at)	unterer Heizwert von 1 cbm Gas (15°, 1 at)	oberer Heizwert von 1 cbm Gas (15°, 1 at)	unterer Heizwert von 1 cbm Gas (15°, 1 at)
w kg	W kg/cbm	600 W WE/cbm	W_k kg/cbm	600 W_k WE/cbm	H_o WE	H_u WE	H_{ok} WE	H_{uk} WE	
0,01783	0,0494	29,6	—	—	874	844	—	—	
0,01997	0,0662	39,7	—	—	1067	1027	—	—	
0,04651	0,1502	90,1	—	—	1228	1138	—	—	
0,04905	0,1472	88,4	—	—	1157	1069	—	—	
0,02749	0,1125	67,5	—	—	1009	941	—	—	
0,02707	0,1088	65,3	—	—	1003	938	—	—	
0,02368	0,0786	47,1	0,0794	47,6	1030	983	1040	992	
0,03106	0,1016	61,0	0,1036	62,1	1162	1101	1184	1122	
0,03015	0,1063	63,8	0,1082	64,9	951	887	968	903	
0,03674	0,1287	77,2	0,1309	78,6	1138	1061	1157	1078	
0,05375	0,1630	97,8	0,1670	100,2	1054	956	1080	980	
0,05266	0,1789	107,4	0,1820	109,2	1293	1186	1314	1205	
0,03405	0,1076	64,6	0,1091	65,4	1108	1043	1124	1059	
0,03836	0,1264	75,8	0,1284	77,0	1205	1129	1225	1148	
0,04246	0,1405	84,3	0,1431	85,9	1291	1207	1315	1229	
0,04446	0,1443	86,6	0,1464	87,8	1348	1261	1367	1279	
0,04385	0,1460	87,6	0,1487	89,2	1310	1222	1335	1246	
0,04458	0,1450	87,0	0,1474	88,4	1318	1231	1341	1253	
0,04067	0,1345	80,7	0,1371	82,3	1231	1150	1256	1174	
0,03379	0,1116	67,0	0,1136	68,2	1103	1036	1121	1053	
0,03555	0,1160	69,6	0,1179	70,8	1116	1046	1134	1063	
0,03455	0,1133	68,0	0,1152	69,1	1113	1045	1131	1062	
0,04225	0,1391	83,5	0,1414	84,9	1214	1130	1234	1149	

Um den Einfluß der unvermeidlichen Versuchsfehler möglichst herabzudrücken, verbrannte man eine große Gasmenge und nahm die Messung des Verbrennungswassers auch nur während des Kalorimeterversuchs vor; seine Beobachtungen sind daher ebenfalls für die rechnerische Darstellung der spezifischen Verbrennungswassermenge maßgebend.

Obwohl die Gasmenge vor ihrer Verbrennung auf 15° C bezogen wurde, ist doch der abgerundete Wert für die Verdampfungswärme bei 0° C beibehalten worden, weil bei Generatorgas so kleine Wassermengen durch die Verbrennung entstehen, daß der Fehler kaum merkbar ist.

Die Ergebnisse der Beobachtung und Rechnung sind in der Zahlentafel 8 zusammengestellt worden.

Im Anschluß hieran soll die Verbrennungswärme des Generatorgases noch aus dem Ergebnis der Analyse (Zahlentafel 9) berechnet werden. Für die

Zahlentafel 9.

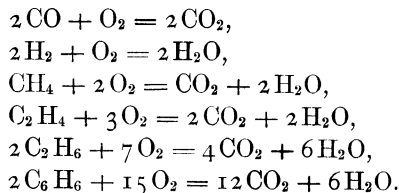
Ver- suchs- Nr.	CO ₂	C ₆ H ₆	C ₂ H ₄	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
1	0,077	0,000	0,002	0,005	0,220	0,091	0,002	0,604
2	0,072	0,000	0,002	0,003	0,216	0,101	0,025	0,582
3	0,055	—	—	0,022	0,176	0,207	0,026	0,515
4	0,063	—	—	0,015	0,170	0,209	0,017	0,526
5	0,098	—	—	0,031	0,185	0,190	—	0,496
6	0,098	—	—	0,031	0,185	0,190	—	0,496
7	0,046	0,000	0,003	0,003	0,240	0,100	0,008	0,600
8	0,039	0,000	0,002	0,002	0,224	0,124	0,022	0,587
9	0,076	—	—	0,040	0,172	0,181	—	0,531
10	0,086	—	—	0,014	0,216	0,207	—	0,477
12	0,059	—	—	0,031	0,138	0,227	0,011	0,534
13	0,083	—	—	0,012	0,173	0,221	0,027	0,484
14	0,046	0,000	0,001	0,003	0,217	0,161	0,009	0,563
15	0,037	»	0,001	0,002	0,210	0,165	0,020	0,565
16	0,031	»	0,001	0,003	0,205	0,173	0,029	0,558
17	0,029	»	0,001	0,004	0,206	0,161	0,039	0,560
20	0,037	»	0,001	0,002	0,204	0,151	0,039	0,566
21	0,036	»	0,001	0,002	0,202	0,162	0,039	0,558
22	0,034	»	0,002	0,002	0,202	0,161	0,029	0,570
23	0,036	»	0,001	0,001	0,193	0,158	0,018	0,593
24	0,035	»	0,005	0,002	0,200	0,158	0,015	0,585
25	0,039	»	0,001	0,002	0,198	0,143	0,023	0,594
26	0,036	»	0,002	0,003	0,183	0,163	0,030	0,583

Zahlentafel 10.

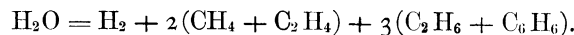
Gasart	oberer Heizwert	unterer Heizwert
	von 1cbm Gas (15°, 1 at)	von 1cbm Gas (15°, 1 at)
Kohlenoxyd	2785	2785
Wasserstoff	2800	2370
Methan	8755	7890
Aethylen	13650	12785
Aethan	15170	13870
Benzol	32260	30960

rechnerische Gewinnung des Heizwertes aus der Gaszusammensetzung sind die in Zahlentafel 10 aufgeführten Werte zugrunde gelegt. Die Zahlen für die Heizwerte gelten bei der Verbrennung der Raumeinheit vom Normalzustand (15° C, 1 at), wenn der Druck unveränderlich ist. Sie wurden durch Umrechnung der von Thomsen¹⁾ gefundenen Größen erhalten unter Beachtung der kritischen Betrachtungen, die Ostwald²⁾ in seinem bekannten Lehrbuche über die Heizwertbestimmungen verschiedener Autoren angestellt hat.

Es gelten für die im Generatorgas vertretenen Bestandteile folgende Verbrennungsgleichungen:



Hieraus folgt die Menge des erzeugten Verbrennungswassers:



Die analytisch berechenbare, spezifische Verbrennungswassermenge ist

$$W_a = \frac{18}{24,4} [\text{H}_2 + 2(\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4) + 3(\text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_6\text{H}_6)].$$

Ueber die Größenordnung des Unterschiedes zwischen den verschiedenen Verbrennungswärmen gibt die Zahlentafel 11 Aufschluß. Diese weist ebenfalls die spezifischen Mengen des Verbrennungswassers auf, die einerseits aus der Gaszusammensetzung, andererseits nach den Angaben des Kalorimeters berechnet worden sind. Man sieht, daß der vom Kalorimeter angezeigte Heizwert des Generatorgases durchgängig 1 bis 3 vH kleiner ist, als die Berechnung aus der Gasanalyse ergibt, vergl. Zahlentafel 11, Spalte 10 und 11. Daß der untere Heizwert H_{ak} einigemal größer wie H_{ua} ausfällt, hat seinen Grund darin, daß das gewogene Kondenswasser bei allen Versuchen um rd. 0,025 kg zu klein ist (Zahlentafel 11, Spalte 16). Es ist besonders hervorzuheben, daß dieser Unterschied zwischen der analytisch gefundenen und der im Kalorimeter gemessenen Verbrennungswassermenge auch bei den Versuchen nicht verschwindet, die mit künstlich zusammengesetztem Gas ohne Methanzusatz durchgeführt wurden. Unter der Annahme³⁾, daß die Abgase bei der Temperatur des eintretenden Kühlwassers mit Feuchtigkeit gesättigt sind, wurde eine Bilanz der zu- und abgeführten Wasserdampfmengen aufgestellt. Durch diese konnte zwar dargetan werden, daß etwas mehr Wasser von den Abgasen mitgenommen, als durch Gas und Luft zugeleitet wird, doch blieb der Unterschied in seiner Größenordnung bestehen. Diese Beobachtungen stehen vollkommen im Einklang mit den Erfahrungen, die Nägel⁴⁾ bei seinen Versuchen mit Generatorgas gemacht hat.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Abgasmenge, die im Kalorimeter bei Verbrennung von 1 cbm Gas erzeugt wird. Die mittlere Zusammensetzung der Abgase läßt sich durch die Analyse der über einer Glycerinlösung aufgesammelten Mittelprobe festlegen. Die Kohlensäure wird durch Kalilauge absor-

¹⁾ Thermochemische Untersuchungen Bd. IV 1886.

²⁾ Lehrbuch der allgemeinen Chemie 2. Auflage.

³⁾ Immenkötter, Ueber Heizwertbestimmungen mit besonderer Berücksichtigung gasförmiger und flüssiger Brennstoffe, München 1905 S. 56.

⁴⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 54 S. 59.

Zahlentafel II.

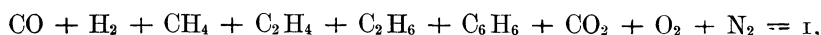
Ver- suchs- Nr.	2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		
	oberer und unterer Heizwert																spezifische Menge des Verbrennungswassers kg/cbm														
	aus Analyse be- rechnet				durch Kalorimeter bestimmt								Unterschied				aus Ana- lyse be- rechnet				durch Kalorimeter bestimmt				Unterschied						
	H _{oa}		H _{ua}		Feuchtigkeit nicht berücksichtigt				Feuchtigkeit berück- sichtigt				H _{oa} - H _o		H _{ua} - H _u		H _{oa} - H _{ok}		H _{ua} - H _{uk}		W _a		Feuchtig- keit nicht berück- sichtigt		Feuchtig- keit be- rück- sichtigt		W _a - W		W _a - W _k		
	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	
1	912	870	874	844	—	—	—	—	—	—	—	—	—	38	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2	1131	1064	1067	1027	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
3	1297	1186	1228	1138	—	—	—	—	—	—	—	—	—	69	48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
4	1207	1103	1157	1069	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
5	1047	966	1009	941	—	—	—	—	—	—	—	—	—	38	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
6	1047	966	1003	938	—	—	—	—	—	—	—	—	—	44	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
7	1059	1007	1030	983	1040	992	1040	983	1040	992	1040	992	29	24	19	15	19	15	19	15	19	15	19	15	19	15	19	15	19		
8	1091	1117	1162	1101	1184	1122	1184	1101	1184	1122	1184	1122	29	16	7	-5	16	-5	16	-5	16	-5	16	-5	16	-5	16	-5	16		
9	986	980	951	887	968	903	968	887	968	903	968	903	35	21	18	5	21	18	18	5	21	18	18	5	21	18	18	5	21		
10	1181	1092	1138	1061	1157	1078	1157	1061	1157	1078	1157	1078	43	31	24	14	31	24	24	14	31	24	24	14	31	24	24	14	31		
12	1116	1009	1054	956	1080	980	1080	956	1080	980	1080	980	62	53	36	29	53	36	36	29	53	36	36	29	53	36	36	29	53		
13	1337	1219	1293	1186	1314	1205	1314	1186	1314	1205	1314	1205	44	33	23	14	33	23	23	14	33	23	23	14	33	23	23	14	33		
14	1148	1070	1108	1043	1124	1059	1124	1043	1124	1059	1124	1059	40	27	24	11	27	24	24	11	27	24	24	11	27	24	24	11	27		
15	1236	1146	1205	1129	1225	1148	1225	1129	1225	1148	1225	1148	31	17	11	-2	17	11	11	-2	17	11	11	-2	17	11	11	-2	17		
16	1323	1223	1291	1207	1315	1229	1315	1207	1315	1229	1315	1229	32	16	8	-6	16	8	8	-6	16	8	8	-6	16	8	8	-6	16		
17	1380	1276	1348	1261	1377	1279	1377	1261	1377	1279	1377	1279	32	15	13	-3	15	13	13	-3	15	13	13	-3	15	13	13	-3	15		
20	1346	1247	1310	1222	1335	1246	1335	1222	1335	1246	1335	1246	36	25	11	1	25	11	11	1	25	11	11	1	25	11	11	1	25		
21	1371	1267	1318	1231	1341	1253	1341	1231	1341	1253	1341	1253	53	36	30	14	36	30	30	14	36	30	30	14	36	30	30	14	36		
22	1295	1199	1231	1150	1256	1174	1256	1150	1256	1174	1256	1174	64	49	39	25	49	39	39	25	49	39	39	25	49	39	39	25	49		
23	1151	1067	1103	1036	1121	1053	1121	1036	1121	1053	1121	1053	48	31	30	14	31	30	30	14	31	30	30	14	31	30	30	14	31		
24	1199	1114	1116	1045	1134	1063	1134	1045	1134	1063	1134	1063	83	68	65	51	68	65	65	51	68	65	65	51	68	65	65	51	68		
25	1167	1085	1113	1045	1131	1062	1131	1045	1131	1062	1131	1062	54	40	36	23	40	36	36	23	40	36	36	23	40	36	36	23	40		
26	1256	1158	1214	1130	1234	1149	1234	1130	1234	1149	1234	1149	42	28	22	9	28	22	22	9	28	22	22	9	28	22	22	9	28		

biert, der Sauerstoff in der Phosphorpipette verbrannt. Der Rest, der — wie später dargelegt werden wird — noch unverbrannte Gasteilehen mit sich führt, mußte bei der volumetrischen Gasanalyse als Stickstoff angesprochen werden (Zahlentafel 12).

Zahlentafel 12.

Versuchs-Nr.	CO ₂	O ₂	N ₂ (Rest)
7	0,064	0,130	0,806
8	0,065	0,125	0,810
9	0,058	0,142	0,800
10	0,068	0,132	0,800
12	0,054	0,130	0,816
13	0,064	0,124	0,812
14	0,063	0,128	0,809
15	0,066	0,122	0,812
16	0,064	0,118	0,818
17	0,064	0,116	0,820
20	0,066	0,118	0,816
21	0,070	0,114	0,816
22	0,063	0,119	0,818
23	0,060	0,125	0,815
24	0,056	0,124	0,820
25	0,059	0,121	0,820
26	0,057	0,118	0,825

Für die Herleitung der Abgasmenge aus der Analyse macht sich folgende Rechnung nötig. Die Raumeinheit des Generatorgases sei aus den folgenden Bestandteilen zusammengemischt:



wobei die chemischen Symbole gleichzeitig die Raumteile der betreffenden Gase bezeichnen sollen. Unter Berücksichtigung der Verbrennungsgleichungen für die Einzelgase findet man den zur vollständigen Verbrennung der Raumeinheit des Gemisches nötigen Sauerstoff

$$S_{\min} = \frac{\text{CO} + \text{H}_2}{2} + 2 \text{CH}_4 + 3 \text{C}_2\text{H}_4 + 3,5 \text{C}_2\text{H}_6 + 7,5 \text{C}_6\text{H}_6 - \text{O}_2.$$

Führt man diesen durch die Luft zu, dann ist die entsprechende Luftmenge gegeben durch

$$L_{\min} = \frac{S_{\min}}{0,21}.$$

Bei der Verbrennung mit der chemischen Luftmenge entstehen folgende Verbrennungsprodukte:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2'' &= \text{CO}_2' + \text{CO}' + \text{CH}_4' + 2 (\text{C}_2\text{H}_4' + \text{C}_2\text{H}_6') + 6 \text{C}_6\text{H}_6', \\ \text{H}_2\text{O}'' &= \text{H}_2' + 2 (\text{CH}_4' + \text{C}_2\text{H}_4') + 3 (\text{C}_2\text{H}_6' + \text{C}_6\text{H}_6'), \\ \text{N}_2'' &= \text{N}_2' + 0,79 L_{\min}, \end{aligned}$$

wenn das Volumen vor der Verbrennung durch das Zeichen ', das nach der Verbrennung durch '' angegeben wird. Mithin beträgt in diesem Falle das Volumen der trocknen Abgase

$$V_t = 1 + L_{\min} \cdot \Delta V = \text{CO}_2' + \text{CO}' + \text{CH}_4' + 2(\text{C}_2\text{H}_4' + \text{C}_2\text{H}_6') \\ + 6\text{C}_6\text{H}_6' + \text{N}_2' + 0,79 L_{\min},$$

während die Kontraktion unter der Annahme, daß sich aller Wasserdampf niederschlägt, nach der Formel

$$\Delta V = 0,5(\text{CO}' + \text{H}_2' - \text{C}_2\text{H}_6' - \text{C}_6\text{H}_6') \\ + [\text{H}_2' + 2(\text{CH}_4' + \text{C}_2\text{H}_4') + 3(\text{C}_2\text{H}_6' + \text{C}_6\text{H}_6')]$$

gewonnen wird.

Das gesamte Abgasvolumen V_a wird dargestellt durch die Summe aus dem durch das Kalorimeter gehenden Luftüberschuß und der Abgasmenge V_t , welche bei der Verbrennung mit der theoretisch nötigen Luft erzeugt werden würde. Kennt man die Abgasanalyse, die auf 1 Raumteil k Raumteile Kohlensäure, o Raumteile Sauerstoff und n Raumteile Stickstoff enthalten soll, dann besteht die Beziehung

$$\frac{o}{0,21} V_a + V_t = V_a,$$

woraus folgt

$$V_a = \frac{V_t}{1 - \frac{o}{0,21}}.$$

Die dem Kalorimeter zugeführte Luftmenge ist gegeben durch den Ausdruck

$$L = \frac{o}{0,21} V_a + L_{\min},$$

also

$$\frac{L}{L_{\min}} = \frac{\frac{o}{0,21} V_a + L_{\min}}{L_{\min}}.$$

Das Kalorimeter hat bei allen Versuchen mit einem ziemlich hohen Luftüberschuß gearbeitet. Es ist ihm fast durchgängig eine Luftmenge zugeführt worden, welche die zur Verbrennung erforderliche um das Drei- bis Vierfache übersteigt. Demnach ist genügend Sauerstoff für die Oxydation der unveränderten Gasteilchen in den Verbrennungsvorrichtungen vorhanden.

Das Volumen der Abgase vergrößert sich durch die Aufnahme von Wasserdampf. Nach dem Gesetz von Dalton verhalten sich die Teildrücke der einzelnen Gase einer Mischung wie ihre Raumteile. Bedeutet

b_{15} den Barometerstand in mm Q.-S. von 15°C ,

h_w den Teildruck des Wasserdampfes bei der Temperatur des eintretenden Kühlwassers in mm Q.-S.,

V_a das Volumen des Wasserdampfes in cbm,

V_a das Volumen der trocknen Abgase in cbm bei Verbrennung von 1 cbm Gas,

V_w die wirkliche Menge der feuchten Abgase in cbm (15°C , 1 at),

dann ist

$$V_a = \frac{h_w}{b_{15} - h_w} V_a$$

und

$$V_w = \frac{b_{15}}{b_{15} - h_w} V_a.$$

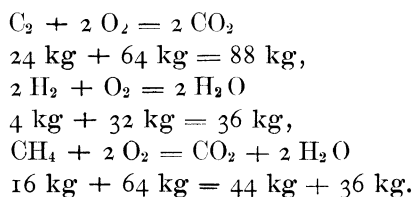
Der Wasserdampfgehalt der Abgase beträgt bei diesen Versuchen ungefähr 1 vH. Die Ergebnisse der Abgasberechnung sind in der Zahlentafel 13, die Beobachtungsergebnisse bei den Abgasuntersuchungen in Zahlentafel 14 zusammengestellt.

Zahlentafel 13.

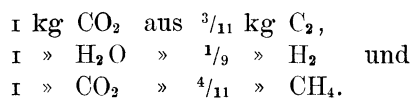
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Versuchs-Nr.	theoretisch erforderlicher Sauerstoff S_{\min} cbm	theoretisch erforderliche Luftmenge L_{\min} cbm	Kontraktion ΔV cbm	Volumen der trockenen Abgase bei theoretischer Verbrennung V_t cbm	wirkliches Volumen der trockenen Abgase V_a cbm	Luftgehalt der Abgase in Bruchteilen von V_a	Für 1 cbm Gas zugeführte Luft L cbm	Verhältnis der wirklichen Luftmenge zur theoretisch erforderlichen $\frac{L}{L_{\min}}$	wirkliches Volumen der feuchten Abgase V_e cbm (15°, 1 at)
7	0,1920	0,914	0,292	1,622	4,258	0,619	3,550	3,89	4,308
8	0,2220	1,057	0,346	1,711	4,226	0,595	3,570	3,38	4,285
9	0,1365	0,650	0,358	1,293	3,992	0,676	3,349	5,15	4,050
10	0,1975	0,940	0,419	1,522	4,102	0,629	3,520	3,75	4,159
12	0,1735	0,826	0,432	1,395	3,662	0,619	3,082	3,73	3,716
13	0,2390	1,138	0,472	1,666	4,069	0,591	3,541	3,11	4,119
14	0,2070	0,986	0,370	1,616	4,144	0,610	3,514	3,57	4,190
15	0,2275	1,084	0,395	1,690	4,034	0,581	3,428	3,16	4,092
16	0,2480	1,181	0,422	1,758	4,016	0,562	3,438	2,91	4,080
17	0,2605	1,241	0,425	1,816	4,054	0,552	3,479	2,80	4,113
20	0,2565	1,222	0,409	1,813	4,140	0,562	3,549	2,90	4,207
21	0,2610	1,243	0,424	1,819	3,983	0,543	3,405	2,74	4,053
22	0,2435	1,159	0,405	1,755	4,053	0,567	3,457	2,98	4,119
23	0,2135	1,017	0,372	1,645	4,063	0,595	3,435	3,38	4,128
24	0,2220	1,058	0,377	1,681	4,110	0,591	3,487	3,29	4,167
25	0,2175	1,036	0,362	1,674	3,950	0,576	3,310	3,20	4,013
26	0,2360	1,124	0,400	1,724	3,938	0,562	3,336	2,97	3,997

Eine wichtige Größe bei der Untersuchung von Abgasen ist das Atomverhältnis C:H, das man aus den hinter den Verbrennungsvorrichtungen festgestellten Gewichtszunahmen ableiten kann und das einen Schluß auf den Charakter der unverbrannten Gasteilchen zuläßt.

Für Kohlenstoff, Wasserstoff und Methan gelten folgende Verbrennungsgleichungen:



Es entsteht demgemäß



Setzt man die Atomgewichte von Kohlenstoff und Wasserstoff ein, so erhält man für das Atomverhältnis den Ausdruck

$$C:H = \frac{CO_2 \cdot 3 \cdot 9}{H_2O \cdot 11 \cdot 12} = 0,2045 \frac{CO_2}{H_2O},$$

wenn die chemischen Zeichen zugleich die gefundenen Gewichte (Zahlentafel 14, Spalte 11 und 12) vertreten. Das Atomverhältnis ist nur für die Verbrennungs-

Zahlentafel 14.

Ver- suchs- Nr.	2		3		4		5		6		7	8	9			10		11		12	13	14	
	gemessene Menge	litr	Abgas		Ueber- druck	Tempera- tur	Menge, re- duziert auf 15° und 1 at	V	Baro- meter- stand	Temperatur in der ersten Ver- brennungs- vorrichtung			Unterdruck an der Wasser- strahl- pumpe	Gewichtszunahme in g			hinter der ersten Ver- brennungsvorrichtung		hinter der zweiten Ver- brennungsvorrichtung				
			mm W.-S.	°C										litr	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O				CO ₂
7	15,0	16,16	794	19,50	16,16	748,7	260	38	0,005	0,0065	0,0133	0,0181	0,0065	0,0133	0,0181	Kupferoxyd und Kupferoxyd	Thermolement 1	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3		
8	8,5	9,26	796	19,52	9,26	757,7	261	45	0,0040	0,0076	0,0023	0,0059	0,0076	0,0023	0,0059							Kupferoxyd	blinder Versuch
9	7,0	7,52	793	20,70	7,52	749,3	261	61	0,0054	0,0048	0,0008	0,0028	0,0054	0,0008	0,0028	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
10	10,0	10,61	704	19,74	10,61	743,9	261	63	0,0076	0,0037	0,0014	0,0036	0,0076	0,0037	0,0014						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
11	10,0	10,87	797	18,73	10,87	753,4	—	64	0,0080	0,0032	0,0012	0,0039	0,0080	0,0032	0,0012	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
12	18,5	19,48	682	18,92	19,48	737,0	—	—	—	—	0,0187	0,0230	0,0187	—	0,0230						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
13	15,0	15,99	725	17,57	15,99	740,1	—	—	—	—	0,0050	0,0060	0,0050	—	0,0060	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
14	9,0	9,85	816	18,58	9,85	757,5	450	66	0,0017	0,0007	0,0081	0,0081	0,0017	0,0007	0,0081						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
15	10,0	10,77	816	19,09	10,77	745,9	450	64	0,0002	0,0007	—	—	0,0002	0,0007	—	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
16	10,0	10,77	767	19,26	10,77	749,3	450	64	0,0006	0,0021	0,0031	0,0057	0,0006	0,0021	0,0031						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
17	10,0	10,83	811	17,95	10,83	746,8	449	60	0,0006	0,0005	0,0042	0,0054	0,0006	0,0005	0,0042	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
18	10,0	10,75	818	19,31	10,75	741,8	—	50	0,0013	0,0008	0,0021	0,0061	0,0013	0,0008	0,0021						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
19	15,0	16,14	816	18,06	16,14	741,6	—	57	0,0014	0,0034	0,0036	0,0074	0,0014	0,0034	0,0036	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
20	15,0	16,16	819	17,88	16,16	741,8	449	54	0,0002	0,0008	—	—	0,0002	0,0008	—						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
21	15,0	16,29	813	19,12	16,29	752,5	449	56	0,0009	0,0007	0,0090	0,0139	0,0009	0,0007	0,0090	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
22	15,0	16,18	784	18,16	16,18	746,6	450	56	0,0005	0,0002	0,0104	0,0129	0,0005	0,0002	0,0104						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
23	15,0	16,27	823	19,38	16,27	752,0	449	56	0,0001	0,0009	0,0145	0,0192	0,0001	0,0009	0,0145	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
24	11,0	11,88	829	19,32	11,88	747,5	—	18	—	—	0,0152	0,0181	—	—	0,0152						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
25	14,0	15,14	826	18,63	15,14	746,1	—	24	—	—	0,0120	0,0155	—	—	0,0120	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			
26	14,0	15,12	824	19,47	15,12	748,1	—	27	—	—	0,0098	0,0128	—	—	0,0098						Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd
27	14,0	15,17	829	17,23	15,17	744,3	—	14	—	—	0,0051	0,0039	—	—	0,0051	Kupferoxyd	blinder Versuch	Kupferoxyd	Thermolement 2	Thermolement 3			

1) Die Versuchszahlen gingen durch Platzen der Absorptionsgefäße verloren.

Die durch das Kühlwasser abgeführte Wärmemenge, vermindert um die Verdampfungswärme des Kondenswassers, ist gegeben durch

$$Q_k = H_{uk} = H_{ok} - 600 W_k.$$

Auf 1 cbm Generatorgas bezogen, beträgt der Wärmeverlust durch unvollständige Verbrennung

$$Q_v = \frac{V_w}{V} V_{CH_4} 7890.$$

Für das Restglied erhält man den Ausdruck

$$Q_r = H_{ua} - Q_k - Q_v.$$

Um die einzelnen Wärmemengen miteinander vergleichen zu können, sind noch die Werte q bestimmt worden, welche die Wärmemengen Q_k , Q_v und Q_r in Bruchteilen des unteren Heizwertes H_{ua} darstellen.

Demnach ist

$$q_k = \frac{Q_k}{H_{ua}}; \quad q_v = \frac{Q_v}{H_{ua}}; \quad q_r = \frac{Q_r}{H_{ua}}$$

und

$$q_k + q_v + q_r = 1.$$

VI.

Erörterung der Versuchsergebnisse.

Wenn man die Unterschiede betrachtet, die sich zwischen den durch das Kalorimeter mit und ohne Beachtung der Feuchtigkeit gefundenen Heizwerten von Generatorgas herausstellen, so erkennt man, daß der Wasserdampfgehalt nicht ohne weiteres vernachlässigt werden darf. Die mit Berücksichtigung des Wasserdampfes ermittelten Heizwerte sind bis zu 2,5 vH höher als die Zahlen, die nur aus den Beobachtungen beim Kalorimeterversuch berechnet wurden.

Es erhellt wiederum aus den Werten in Zahlentafel 15, Spalte 3 und 4, daß mit der technischen Gasanalyse kein Beweis für das Vorhandensein von unverbrannten Gasteilen in Abgasen erbracht werden kann. Im übrigen geht aus sämtlichen Versuchen mit einer einzigen Ausnahme (Versuch 8) hervor, daß im Kalorimeter eine nicht vollständige Verbrennung des im Generatorgas enthaltenen Methans stattfindet. Die Auffassung der unverbrannten Bestandteile im Abgas als Methan ist unzweifelhaft gerechtfertigt dadurch, daß das für die Verbrennungserzeugnisse hinter der zweiten Verbrennungsvorrichtung berechnete Atomverhältnis (Zahlentafel 15, Spalte 2) bei fast allen Versuchen eine starke Annäherung an das des Methans zeigt. Kein anderer Bestandteil des Generatorgases ist fähig, das Atomverhältnis über 1:2 hinaus zu steigern. Methan ist ferner aus dem Grunde am wahrscheinlichsten, weil es der einzige Stoff im Generatorgas ist, der sich durch schwere Verbrennlichkeit auszeichnet.

Die Gewichtszunahmen der Absorptionsgefäße hinter der ersten Verbrennungseinrichtung liegen meist innerhalb der durch die blinden Versuche festgelegten Fehlergrenzen; sie sind so gering, daß man nicht mit Sicherheit auf die Anwesenheit von Wasserstoff und Kohlenoxyd in den Abgasen schließen kann. Die Gewichtvermehrung zählt bei den Versuchen mit Palladiumdraht nur nach Bruchteilen von Milligramm, für deren genaue Bestimmung selbst eine analytische Wage keine Gewähr mehr bietet. Bei der niedrigen Verbrennungstemperatur von Wasserstoff, der die Entzündungstemperatur des Kohlenoxyds herabzusetzen vermag, ist es auch kaum zu erwarten, daß sich nachweisbare Mengen von beiden Stoffen in den Abgasen vorfinden. Aus diesen Gründen ist

es unterlassen worden, eine Berechnung des Wärmeverlustes durch unvollkommene Verbrennung von Wasserstoff und Kohlenoxyd anzustellen.

Der Wärmeverlust durch unvollkommene Verbrennung beziffert sich ungefähr auf 1 bis 2 vH des unteren, aus der Analyse berechneten Heizwertes. Hierbei ist darauf hinzuweisen, daß diese Zahl eher etwas zu hoch ausgefallen ist, weil die Abgase über gesättigtem Wasser aufgesammelt worden sind. Dieses hat die Eigenschaft, nach und nach noch etwas Kohlensäure aufzunehmen. Da die Löslichkeit von Methan an und für sich hinter der von Kohlensäure in Wasser zurückbleibt, und sein Partialdruck in den Abgasen erheblich kleiner ist, tritt gewissermaßen in dem Abgasbehälter eine Anreicherung mit unverbrannten Gasteilchen ein, und infolgedessen muß ihre Menge etwas zu groß erscheinen.

Daß kleine Unstimmigkeiten in der Feuchtigkeitsmessung gänzlich belanglos sind, ersieht man aus den Wärmebilanzen (Zahlentafel 15, Spalte 6 bis 8), die recht zufriedenstellende Ergebnisse für die einzelnen Größen aufweisen. Die negativen Werte von Q_r sind durchaus nicht auf einer Einstrahlung in das Kalorimeter begründet; sie beruhen vielmehr darauf, daß der untere kalorimetrische Heizwert etwas zu groß wird, weil sich die im Kalorimeter gemessene Kondenswassermenge zu gering ergibt. Dadurch nähert sich der untere, durch das Kalorimeter bestimmte Heizwert wieder dem analytisch berechneten.

Die unvollkommene Verbrennung des Methans im Kalorimeter kann nicht mit dem Hinweis auf mangelnden Sauerstoff begründet werden, da das Kalorimeter bei den Versuchen mit hohem Luftüberschuß gearbeitet hat. Die Erklärung für die Anwesenheit von Methan in den Abgasen liegt jedenfalls darin, daß einzelne Teilchen in dem stark gekühlten Verbrennungsraum des Kalorimeters nicht auf die hohe Temperatur kommen, die zur Entzündung des Methans nötig ist. Als vollkommen gesättigter Kohlenwasserstoff ist das Methan äußerst beständig¹⁾, es wird daher von allen Bestandteilen des Generatorgases am leichtesten unverändert in Spuren durch die verhältnismäßig kalte Flamme gehen können.

Der Wärmeverlust, den Eugen Meyer²⁾ bei Verwendung von Kraftgas für Motoren gefunden hat, ist sicherlich zum Teil auf die unvollkommene Verbrennung des Methans zurückzuführen.

In der Praxis dürfte man sich im allgemeinen damit begnügen, den Heizwert eines Gases nach einem einzigen Verfahren zu ermitteln. Daß man hierbei stets zu dem in der Technik fast ausnahmslos eingeführten Kalorimeter und nicht zu der zeitraubenden Gasanalyse greifen wird, steht außer Zweifel. Obwohl die unvollständige Verbrennung des dem Generatorgas in geringen Prozentsätzen beigemischten Methans nicht zu vermeiden ist, muß man doch auch in diesem Falle das Kalorimeter von Junkers, das stets gebrauchsfertig ist und ein schnelles Arbeiten ermöglicht, als für die Anforderungen der Praxis vollkommen genügend erachten.

¹⁾ The Chemical News 97 1908 S. 214.

²⁾ Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 8 S. 67.

Die Wasserdruckmomente der Drehschaufeln von Zentripetal-Francis-Turbinen.

Von Professor Dr. **R. Camerer** in München.

In der vorliegenden Arbeit werden die im Titel angeführten Größen zunächst an Hand von Versuchen in verschiedener Art bestimmt. Daran anschließend werden die Verfahren besprochen und durchgeführt, die auf rein rechnerischem oder zeichnerischem Wege zum gleichen Ziele führen sollen. Aus dem Vergleich beider folgt eine Klärung der technisch wichtigen Frage, mit welchem Grade von Genauigkeit eine Vorausberechnung der Schaufeldrücke und Momente möglich erscheint.

Versuchseinrichtung. Ich habe in der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1906 S. 54 eine kurze Abhandlung darüber veröffentlicht, wie die Wasserdruckmomente der sogenannten Finkschen Drehschaufeln von Wasserturbinen, und wie insbesondere Größe und Richtung des resultierenden Wasserdruckes durch Wahl von zwei verschiedenen Drehpunkten durch Versuche bestimmt werden können.

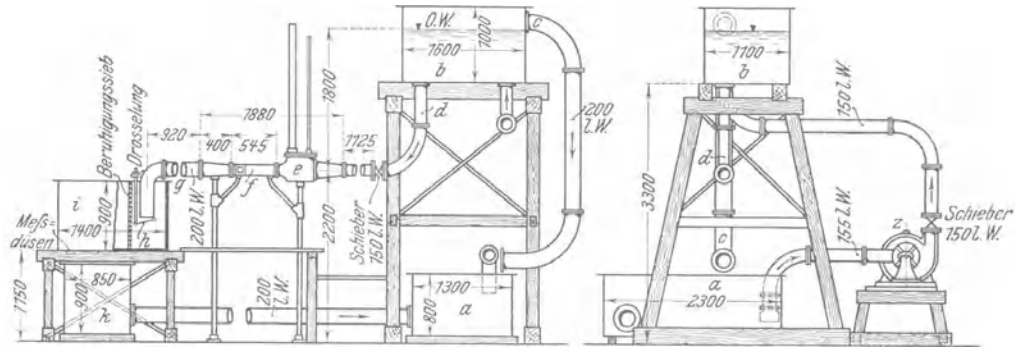


Fig. 1 und 2. Einrichtung für Schaufelversuche. Maßstab 1:100.

Durch Unterstützung des Vereines deutscher Ingenieure war ich im folgenden Jahr in den Stand gesetzt, nach ähnlichen Grundsätzen eine genaue, mit feinen Meßvorrichtungen versehene Versuchsanlage zu bauen, deren Gesamtanordnung aus der Aufstellungszeichnung, Fig. 1 und 2, ersichtlich ist.

Eine von einem vierpferdigen Elektromotor getriebene Kreiselpumpe *z* fördert aus dem Behälter *a* in den Hochbehälter *b*, dessen Oberwasserspiegel während der Versuche durch den Ueberlauf *c* auf gleichbleibender Höhe gehalten wird. Durch weitgehende Regelung der Umlaufzahl des Motors läßt sich die Förderung der Pumpe so einstellen, daß nur wenig mehr als nötig dem Hochbehälter zugeführt wird. Aus dem Hochbehälter fließt das Wasser durch das mit Drosselschieber ver-

schene Rohr *d* der eigentlichen Versuchseinrichtung zu. Nach Durchströmen eines Beruhigungsraumes *e* mit Sieben und Standrohr gelangt es in den die Drehschaufeln enthaltenden Kasten *f*, der einen Ausschnitt aus einem Leitrade darstellt und im folgenden noch näher beschrieben wird. Von hier wird das Wasser in das Ausflußrohr *g* zusammengeführt, von dem es durch eine Drosselstelle *h*¹⁾ in den Meßbehälter *i* und endlich durch dessen Meßdüsen in die Unterwasserbehälter *k* und *a* zurückfließt.

Fig. 3 ist ein Schaubild der in das Kesselhaus des neuen chemischen Institutes der Technischen Hochschule München eingebauten Versuchseinrichtung. Besonders deutlich erscheint dabei der eigentliche Versuchsapparat *e* und *f* mit den Meßvorrichtungen an den Drehschaufeln und den an Gummischläuche angeschlossenen 10 Piezometerrohren, mit denen die Wasserdrücke bestimmt wurden.

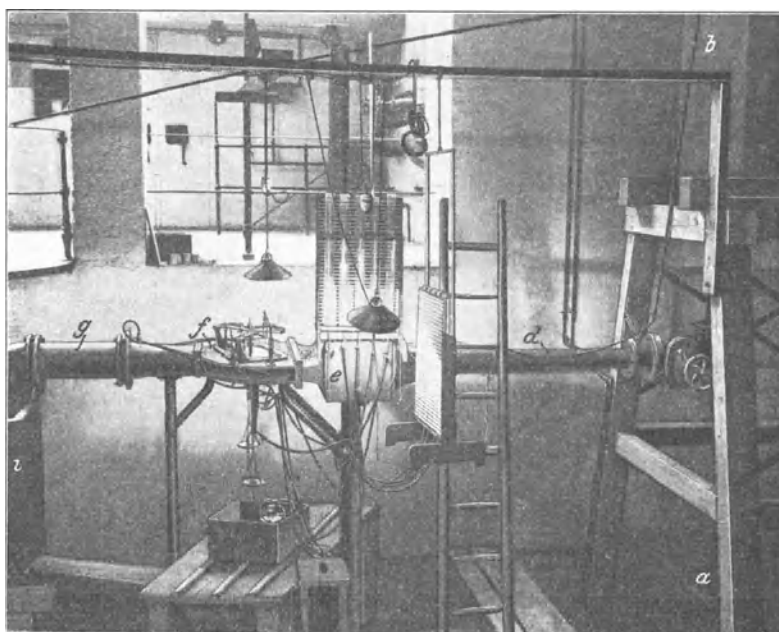


Fig. 3. Versuchseinrichtung.

Fig. 4 und 5 zeigen den wichtigsten Teil der Versuchseinrichtung in Aufsicht und Längsschnitt. Man erkennt bei mittlerer Oeffnung gestrichelt eingezeichnet 5 Schaufeln. Sie sind auch während der Versuche sichtbar, da der Kasten oben und unten mit Glasplatten von 7 mm Dicke verschlossen ist, die in gußeiserne Rahmen gefaßt und auf den Behälter bündig aufgeschraubt sind. Zum Messen dient vor allem die mittlere Schaufel, deren Drehzapfen in der unteren Glasplatte mit einem sehr dünnen und kurzen Bolzen ruht, durch die obere Platte dagegen mit Spiel hindurchgeht. Der Zweck dieses Spieles liegt darin, die absolute Größe des Wasserdruckes durch Abwägen mit der in einer Kugellager-Führung angreifenden Federwaage feststellen zu können, indem der Schaufeldruck dem Zug an der Federwaage im Verhältnis der zugehörigen Hebelarme (Drehpunkt: Führung in der Grundplatte) gleich gesetzt wird. Das Gleichgewicht ist erreicht, wenn die Spitze der beweglichen Drehachse unter die mit *m* bezeichnete Schraube fällt, Fig. 5 und 6.

¹⁾ um den Druck stets so einstellen zu können, daß die Piezometerrohren (vergl. später) nicht leer laufen.

Auch die Richtung des Wasserdruckes läßt sich mit der gleichen Vorrichtung feststellen, da die Federwage auf einem am Umfang eines Gradbogens geführten Schlitten ruht, Fig. 4 bis 7, und mithin so eingestellt werden kann, daß die Drehachse gegen die Einstellspitze *m* auch nicht seitlich ausweichen kann. Das Leckwasser, das infolge des Spieles zwischen Drehbolzen und Glasplatte austritt, wird in dem kleinen Messingbehälter *n*, Fig. 5, aufgefangen und durch einen Schlauch *o* abgeführt.

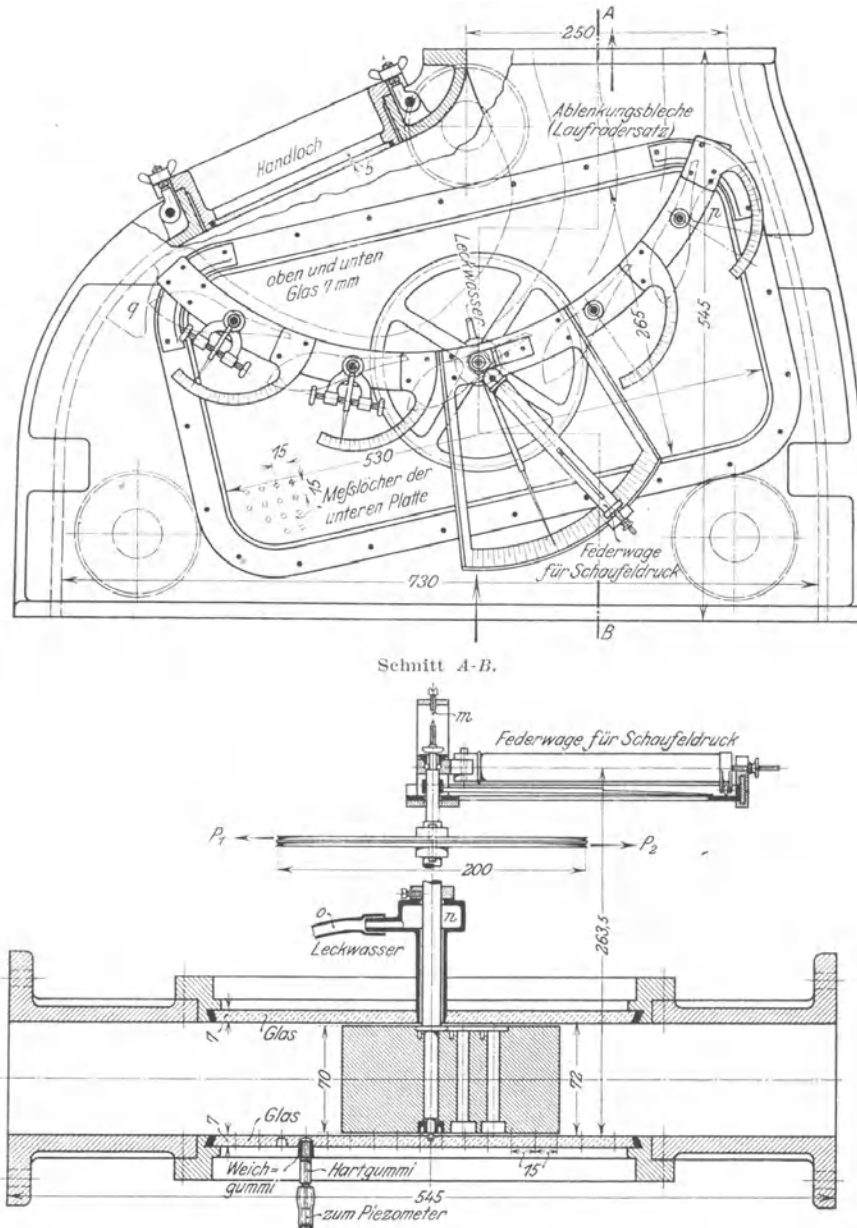


Fig. 4 und 5. Versuchseinrichtung.

Das Drehmoment der mittleren Schaufel wird als Kräftepaar, ähnlich wie bei den eingangs erwähnten Versuchen, mittels zweier Schnurzüge (Seidenfäden) bestimmt, die an der leichten doppelrilligen Scheibe, Fig. 4 und 5, in P_1 und P_2 angreifen. Die übrigen Schaufeln werden durch eine Klemmvorrichtung festgestellt;

sie haben ebenso wie die mittlere Schaufel Zeiger, damit sie rasch und genau auf bestimmte gleiche Schaufelweiten eingestellt werden können.

In der unteren Glasplatte befinden sich 548 eingeschliffene Meßlöcher, Fig. 4, 5 und 8, die auf der Wasserseite eine Bohrung von 1 mm und außen eine schwach kegelige Bohrung von 7 mm l. W. haben. Gewöhnlich sind sie mit Gummistopfen geschlossen, die bei Druckmessungen durch Hartgumminippel zum Anschluß der

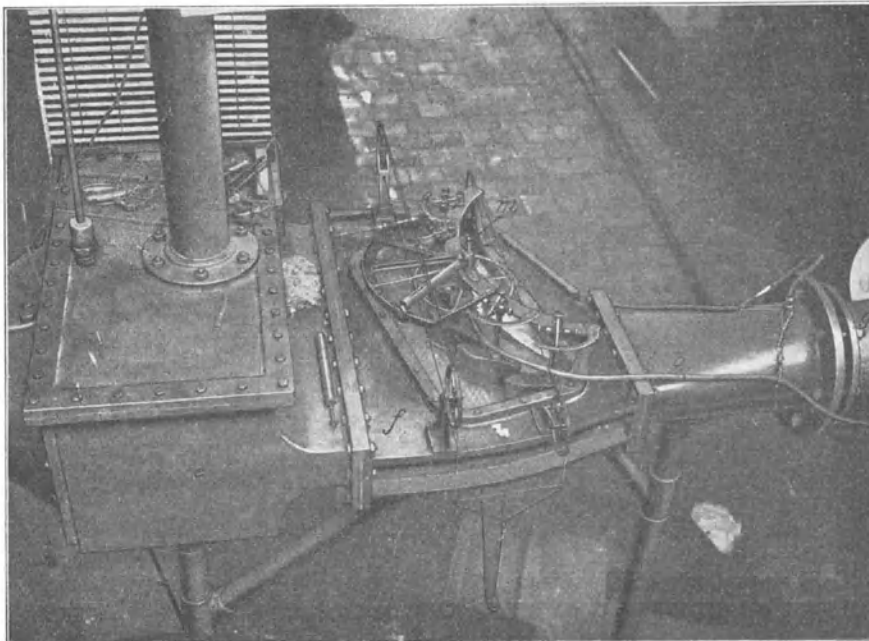
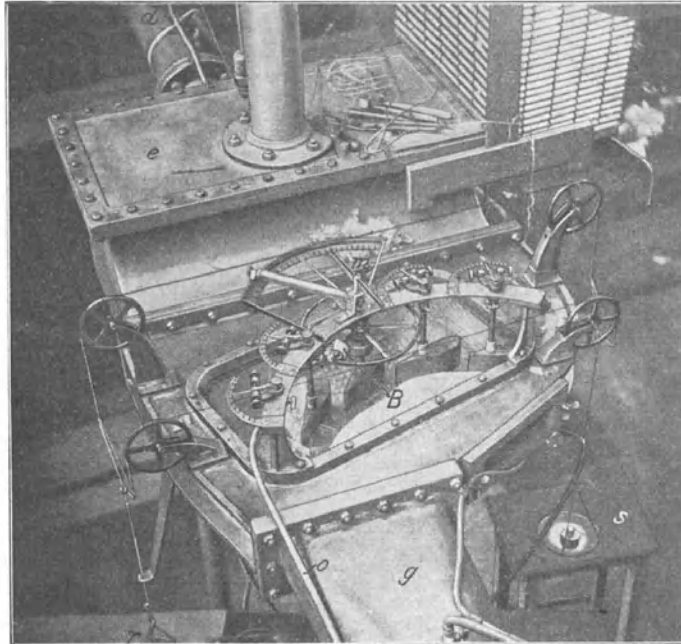


Fig. 6 und 7. Meßvorrichtung.

Schläuche für die Piezometerrohre ersetzt werden. Fig. 3 und 5 zeigen, wie die Schläuche zu den Gestellen der Piezometer geführt sind, Fig. 6 und 7 sind Schaubilder der Meßvorrichtung von oben, wobei auch die Drehschaufeln und die Bohrungen der unteren Platte durch die obere hindurch kenntlich sind. Die Meßeinrichtung für das Drehmoment mit Schnurzug und Wagschale (r, s) ist dort gleichfalls erkennbar.

Die Durchführung der Versuche erstreckte sich zeitlich über mehrere Jahre. Dies war nicht nur darin begründet, daß die Einrichtung erst in den letzten Jahren in der Hochschule aufgestellt wurde, wodurch ein wirksames Arbeiten möglich wurde, sondern vor allem darin, daß sich zu Anfang einer gleichmäßigen Wasserströmung erhebliche Schwierigkeiten entgegenstellten. Eine gewisse Unvollkommenheit der Einrichtung, die jedoch durch ihre Handlichkeit und die stete Sichtbarkeit aller in ihr auftretenden Vorgänge bedingt ist, liegt natürlich darin, daß sie nicht die volle Turbine wiedergibt, sondern nur einen Ausschnitt aus dem Leitrad, und daß das Laufrad gänzlich fehlt. Durch die Anordnung von 5 Schaufeln konnte wohl erreicht werden, daß die mittlere Schaufel ähnlich beaufschlagt wurde, wie es bei einem vollen Leitradkranz zu erwarten war; es zeigte sich aber, daß das die äußersten Schaufeln umfließende Wasser schädlich wirkte, weshalb es durch die in Fig. 4 und 8 mit p und q bezeichneten Holzklötze abgedrosselt werden mußte. Auch dann machte sich aber noch eine wilde Wasserbewegung, insbesondere hinter den Schaufeln, bemerkbar, die hauptsächlich infolge mitgerissener Luft höchst unausgeglichenen und schwankenden Druckzustände verursachte. Das Mitreißen von Luft aus dem Standrohr konnte durch entsprechende Drosselung an der in Fig. 1 mit h bezeichneten Drosselklappe vermieden werden. Eine wirklich geregelte Strömung wurde aber erst erreicht, nachdem hinter den Schaufeln Ablenkungsbleche eingebaut waren, Fig. 4 und 8, die einem absoluten Wasserweg durch das Laufrad entsprachen.

Jetzt erst ergaben sich gleichbleibende Werte des in den Bohrungen der unteren Platte gemessenen Druckes und ein Wiedereintreten desselben Beharrungszustandes für gleiche Schaufelweiten auch bei wiederholtem Abstellen des Zuflusses, mit andern Worten: ein stabiler Strömungszustand. Immerhin war das Meßverfahren ziemlich mühsam und zeitraubend, da das Einbringen der Nippel in die Glasplatte und die Bedienung der Meßeinrichtungen Geschicklichkeit und Uebung erforderten, da zudem jeweils längere Zeit verstreichen mußte, bis der Wasserdruck sich durch die engen Bohrungen der Glasplatte in den 40 mm weiten Piezometerrohren richtig eingestellt hatte, und da endlich noch manche andere Nebenumstände berücksichtigt werden mußten. Mein damaliger Privatassistent, Hr. Ingenieur Reindl, hat sich dieser Mühe mit großem Fleiß und der Durchführung der Versuche mit anerkennenswerter Umsicht unterzogen, wofür ihm an dieser Stelle der beste Dank ausgesprochen werden möge.

Die Beschreibung der Versuche und Berechnungen soll in die folgenden Abschnitte zerlegt werden:

- 1) Bestimmung von Drehmoment und Schaufeldruck durch unmittelbares Abwägen der durch den Schaufelbolzen nach außen geleiteten Kräfte;
- 2) Bestimmung des hydrostatischen Wasserdruckes im Innern der Strömung und insbesondere an den Schaufelflächen mit daraus folgender Berechnung von Schaufeldruck und Drehmoment;
- 3) Gegenüberstellung dieser beiden durch Versuche gefundenen Ergebnisse mit dem zeichnerisch-rechnerischen Verfahren, das Wagenbach in seinen »Beiträgen zur Berechnung und Konstruktion der Wasserturbinen«¹⁾ angedeutet hat, wonach die

¹⁾ Zeitschr. für das gesamte Turbinenwesen 1907 S. 273.

Strömungslinien unter der Voraussetzung von Ebenen mit gleichbleibender Summe von Druck und kinetischer Energie für den der Beschleunigung unterworfenen Teil der Wasserströmung nach einem Gesetz $cs = \text{konst}$ eingezeichnet werden.

1) Messung von Drehmoment und Schaufeldruck.

Zu Beginn einer Versuchsreihe wurden die fünf Schaufeln auf gleiche Oeffnung eingestellt, die vier seitlichen Schaufeln festgeklemmt, während der mittleren Meßschaufel ein beiderseitiges Spiel von einigen Graden gegeben war. Darauf wurde die Gewichtbelastung der Wagschalen r und s , Fig. 6, die das Kräftepaar $P_1 P_2$ darstellt, so abgeglichen, daß die Schaufel in ihrer Mittellage stehen blieb und nur durch Aufbringen von gleichgroßen Zusatzgewichten nach rechts oder links abgelenkt werden konnte. Die Anordnung zeigte sich dabei sehr empfindlich; bei Gewichtbelastungen von z. B. 670 und 100 g an den Wagschalen r und s (P_1 und P_2), entsprechend einem Drehmoment von $(670 - 100) \text{ g} \times 10 \text{ cm} = 5700 \text{ cmg}$, genügte eine Mehr- oder Minderbelastung von 10 g, um merkliche Störungen des Gleichgewichtes hervorzurufen.

Da das Drehmoment durch ein Kräftepaar ausgeglichen wurde, war der am Drehbolzen auftretende Bolzendruck von gleicher Größe und Richtung wie der Schaufeldruck. Auch seine Messung lieferte mit Hilfe der erwähnten wagerechten Federwage und des Teilkreises verhältnismäßig genaue Ergebnisse, wobei allerdings viel Sorgfalt und Uebung erforderlich waren. Eine bei kleineren Schaufelkräften auftretende Fehlerquelle bildete anfangs u. a. der Umstand, daß wegen des weit gegen die Schaufelspitze zu gerückten Drehpunktes die Schaufel rückwärts ein bedeutendes Uebergewicht hatte, das sich mit dem Wasserdruck zu einer Resultierenden räumlich zusammensetzte und demzufolge besonders die Richtung des Schaufeldruckes falsch messen ließ. Die Schaufel mußte demnach erst so ausgewuchtet werden, daß das in Fig. 6 sichtbare, an einer Speiche der Schnurscheibe angebrachte Gegengewicht (Bleiblech) B dem Uebergewicht der Schaufel abzüglich seines Auftriebes im Wasser das Gleichgewicht hielt. Schließlich wurde eine so hohe Genauigkeit erzielt, daß davon abgesehen werden konnte, die genannten Größen durch Veränderung der Lage des Drehpunktes zur Schaufel nach dem in Z. 1906 S. 54 beschriebenen Verfahren rechnermäßig zu bestimmen. Letzteres Verfahren hätte zudem bei der vorliegenden Versuchseinrichtung eine Aenderung des Leitraddurchmessers erfordert.

Es wurden auf diese Weise für die aus den Abbildungen, z. B. Fig. 8 und 10, zu entnehmende Schaufelform (Gesamtlänge 140 mm, Abstand des Drehpunktes von der Spitze 57 mm, Schaufelhöhe $b_0 = 70 \text{ mm}$) unter andern die folgenden Werte für drei Leitradöffnungen α_0 bestimmt:

Zahlentafel 1.

α_0	Drehmoment	Schaufeldruck	Richtung des Schaufeldruckes ²⁾	Hebelarm des Schaufeldruckes	Gefälle
mm	cmg	g		cm	mm
8	9050	6560 ¹⁾	rd. 5°	1,38	513
17	5700	3280	» 24°	1,74	380
33	3700	1837	» 27°	2,02	203

¹⁾ durch Interpolation bestimmt.

²⁾ gegen die Normale.

Dabei hatte der Wasserdruck stets die Neigung, die Schaufel zu schließen. Unter Gefälle ist hier der Druckunterschied zwischen Oberwasserspiegel und Druck in der Leitschaufelöffnung a_0 verstanden, also die Größe $H_a - \frac{c_0^2}{2g}$, weil diese Größe bei jedem Leitrad zu ermitteln ist und den bequemsten Vergleich zwischen den vorliegenden Ergebnissen und den Verhältnissen in vollständigen Leiträdern gestattet, unabhängig vom Ueberdruckverhältnis des Laufrades.

2) Berechnung der Schaufelkräfte durch Betrachtung der tatsächlich vorhandenen Strömungszustände.

Hierzu wurde zunächst der Wasserdruck an etwa 150 Punkten im Bereich der Meßschaufel nach dem zu Anfang angegebenen Verfahren gemessen. In Fig. 8

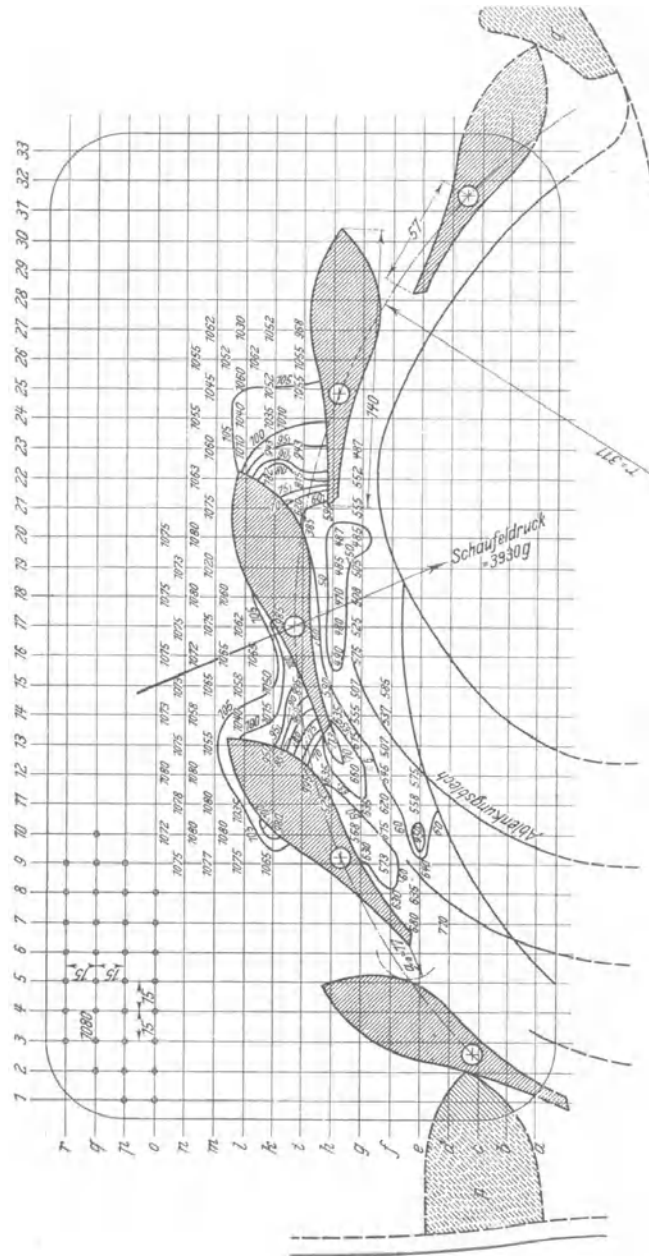


Fig. 8. Kurven gleichen Druckes für 17 mm Leitradöffnung.

ist der für $a_0 = 17$ mm erhaltene Ueberdruck in mm Wassersäule an den zugehörigen Punkten eingetragen. Dabei sei erwähnt, daß für die Druckmessungen insbesondere an solchen Punkten, die sich in der Nähe der Schaufeln befanden, die Schaufeln satt auf die untere Glasplatte aufgelegt werden mußten, um dem störenden Einfluß von Wasser, das zwischen Schaufel und Grundplatte sehr energisch hindurchgesaugt wurde und den Druck zu klein messen ließ, zu vermeiden. Umgekehrt war es bei der Bestimmung der Drehmomente notwendig, die Schaufel etwas anzuheben, so daß sie oben und unten geringes Spiel für reibungsfreie Drehung bekam.

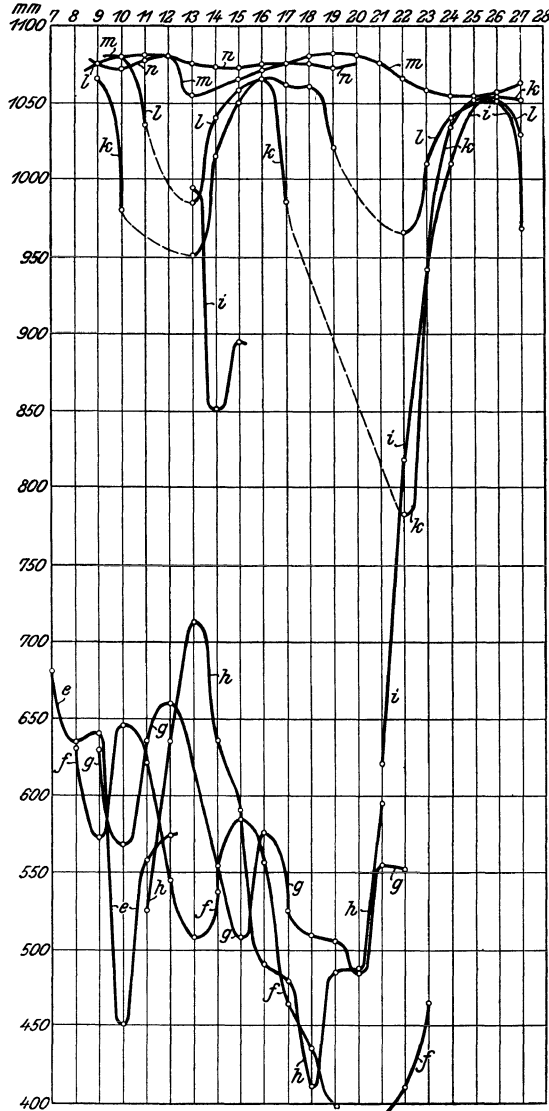


Fig. 9. Hilfsdiagramm zur Bestimmung der Kurven gleichen Druckes.

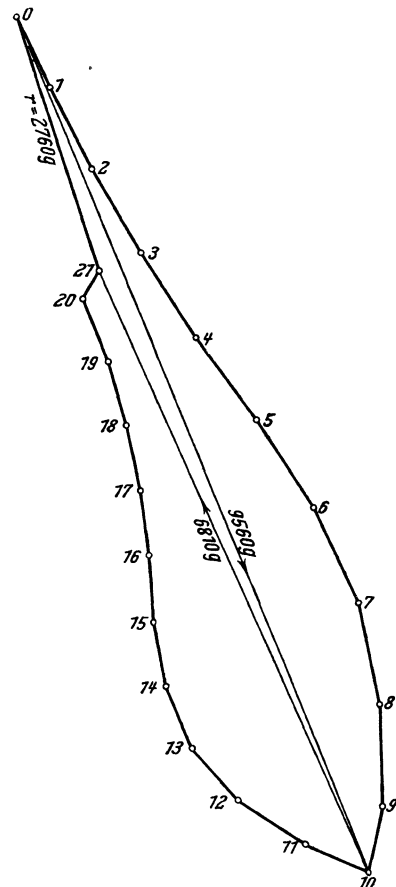


Fig. 11. Seilvieleck zu Fig. 10.

Um den allmählichen Verlauf der Druckänderungen zu überblicken und den Druck am Umfang der Meßschaufel zu erhalten, wurden die gemessenen Druckhöhen, wie Fig. 9 beispielsweise für $a_0 = 17$ mm zeigt, über den Meßpunkten als Abszissen aufgetragen und der in gleichen Lochreihen m - m , n - n , usw. beobachtete

Druck durch Kurvenzüge verbunden. Aus diesen Kurven können die Linien gleichen Druckes durch einfache punktweise Uebertragung in den Grundriß, Fig. 8, eingezeichnet werden (in cm Wassersäule angegeben), und damit ist der am Schaufelumfang auftretende Druck gewonnen. Die Kurven gleichen Druckes lassen hier erkennen, daß der Durchfluß in den beiden Leitzellen vor und hinter der Meßschaufel nicht ganz gleichartig vor sich geht: eine Folge der ringsum nicht gleichen Zuflußverhältnisse.

In Fig. 10 ist der für unser Beispiel ermittelte Druck über dem Schaufelumfang aufgetragen, in Einzelkräfte zerlegt und in Fig. 11 in einem Kräfte- und Seilvieleck zur Richtung des resultierenden Schaufeldruckes vereinigt. Man bemerkt, daß die Richtung der resultierenden Kraft mit der unmittelbar gemessenen im Hinblick auf die Schwierigkeiten und Störungsmöglichkeiten dieser Messung in

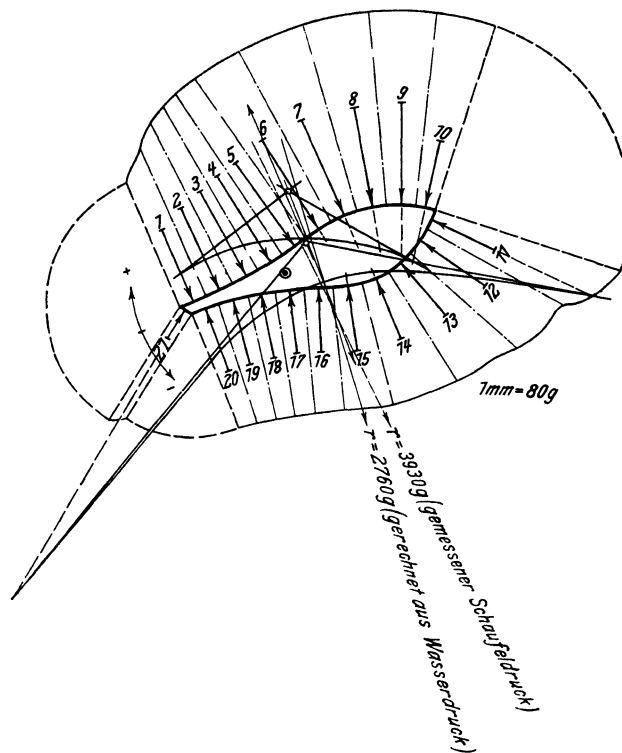


Fig. 10. Die Wasserdrücke am Schaufelumfang.

befriedigendem Maße übereinstimmt. Die Größe der Kraft ergibt sich zu 2760 g, die des Drehmomentes zu 5020 cmg, gegenüber 3280 g und 5700 cmg der Messung. Diese auf 19 bzw. 14 vH genaue Uebereinstimmung darf, da das Ergebnis als kleiner Unterschied großer Summen in dem langgestreckten Seilvieleck auftritt, annehmbar genannt werden.

Die Ergebnisse sind für die drei Schaufelöffnungen $a_0 = 8, 17$ und 33 mm in Fig. 12 vergleichsweise übereinander aufgetragen und durch die Ziffern 1 bis 3 unterschieden. Während der Druck bei 2 und 3 verhältnismäßig gleichartig verläuft, zeigt 1 eine eigenartige Druckanschwellung hinter der Schaufelöffnung, vermutlich hervorgerufen durch die starke Kontraktion bei dieser Schaufelstellung, die sich aus der eingezeichneten Spitze der Nachbarschaufel erkennen läßt. Hierdurch tritt wohl unmittelbar nach dem Austritt eine merkliche Diffusorwirkung mit entsprechen-

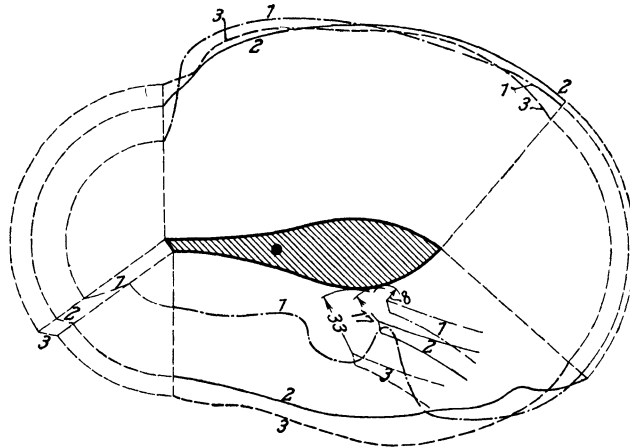
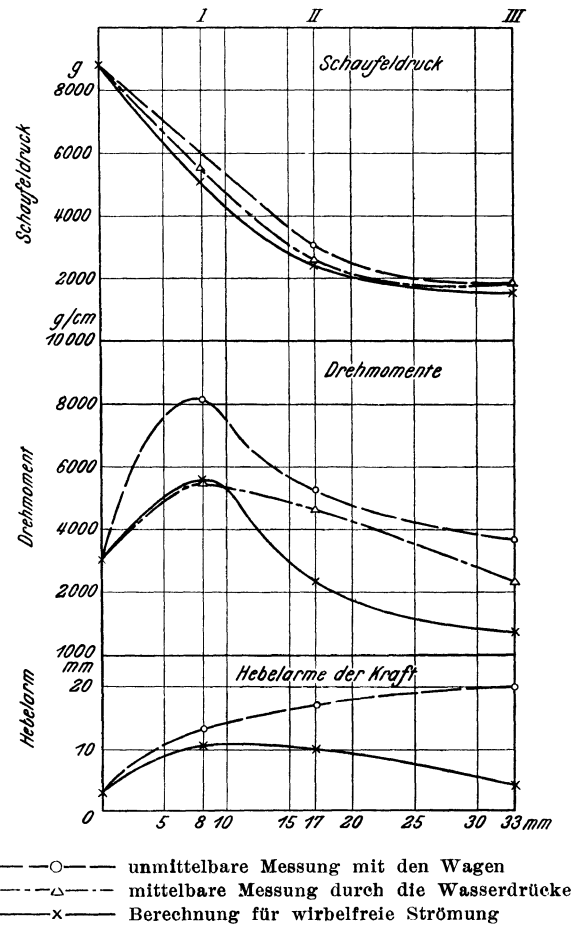


Fig. 12. Die Wasserdrücke am Schaufelumfang für 8, 17 und 33 mm Leitradöffnung.



Fehler zwischen dem Hebelarm der Kraft nach unmittelbarer Messung und nach Berechnung in vH der Schaufellänge:

bei Versuch	I	2,5 mm	=	1,8 vH
»	»	II 7	»	= 5 »
»	»	III 16	»	= 11,4 »

Fig. 13. Schaufeldruck, Drehmoment und Hebelarm der Kraft, nach Leitradöffnungen geordnet.

dem Druckrückgewinn ein¹⁾, die bei weiterer Oeffnung entsprechend der geringer werdenden Verengung des Kanales abnimmt. Die beobachteten drei Fälle der Fig. 12 scheinen dies deutlich zu bestätigen.

In Fig. 13 ist eine Uebersicht über die hauptsächlichsten Ergebnisse der unmittelbaren Messung der Kräfte und der aus dem gemessenen Wasserdruck ermittelten Kräfte für die drei Versuchsreihen von $a_0 = 8, 17$ und 33 mm zusammengestellt. Dabei sind die Versuche für $a_0 = 8$ mm und $a_0 = 17$ mm auf das bei $a_0 = 33$ mm vorhandene Gesamtgefälle H (nicht $H_d - \frac{c_0^2}{2g}$) umgerechnet.

Danach stimmen die unmittelbar und mittelbar erhaltenen Werte des Schaufeldruckes bemerkenswert gut überein; von den Drehmomenten läßt sich dies allerdings nicht behaupten. Das läßt sich aber auch kaum anders erwarten, da bei der zufälligen Lage des Drehbolzens die Hebelarme des Schaufeldruckes absolut sehr klein ausgefallen sind und demnach schon eine geringfügige Verschiebung des Bolzens das Drehmoment wesentlich beeinflussen mußte.

Bei geschlossenen Schaufeln konnte der rechnermäßige Wert leicht bestimmt und für alle Fälle als richtig eingesetzt werden.

Schließlich wurde auf Grund der vorhandenen Versuchsergebnisse

3) die rein rechnermäßige Bestimmung von Drehmoment und Bolzendruck

einer kritischen Beleuchtung unterzogen.

Für die nach dem Verfahren von Wagenbach auszuführende Rechnung bildet den ersten Schritt die Einzeichnung von Strömungslinien und Niveaulflächen. Dabei liegt schon zu Beginn eine Unsicherheit darin, in welcher Weise man die Wasserströmung zu den Schaufeln hingeleitet und von ihnen weggeleitet denken will, oder, mathematisch gesprochen, welche Grenzbedingungen man bei Integration der Differentialgleichung der wirbelfreien Strömung einsetzen soll. Bei einer in großem Wasserkasten offen eingebauten Turbine wird es am natürlichsten sein, anzunehmen, daß das Wasser von allen Seiten dem Leitrade radial zufließt. Bei einer Turbine im Spiralgehäuse hingegen wird man von Strömungslinien ausgehen können, die sich, soweit die Führungswände parallel sind, dem Leitrade nach logarithmischen Spiralen nähern.

Im vorliegenden Falle war die Frage nach der Zuströmung des Wassers zum Leitrad schwieriger zu beantworten, weshalb Hr. Reindl in sehr zweckmäßiger Weise durch Einpressen eines dünnen Luftstrahles durch die Bohrungen der unteren Platte oder durch einen sonst zur Druckmessung dienenden Schlauchanschluß es unternahm, die Strömungslinien ohne weiteres sichtbar zu machen. Die Druckluft wurde einer Wolffschen Flasche von 2 ltr Inhalt, Fig. 14, unter etwa 0,25 bis 0,30 at Ueberdruck entnommen. Das Zuführungsrohr der Flasche wurde aus dem vorhandenen Oberwasser gespeist. Es ergab sich ein auf lange Strecken zusammenhängender Luftfaden, der unschwer mit hinreichender Genauigkeit abgezeichnet werden konnte, da die auf der Unterplatte vorhandenen Bohrungen den Weg des Luftstrahles recht genau auf die Grundrißzeichnung der Platte, Fig. 8, zu übertragen erlaubten. Das Ergebnis dieses Verfahrens,

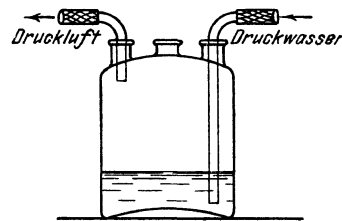


Fig. 14. Druckluftflasche.

¹⁾ Vergl. die entsprechenden Bemerkungen in: Beiträge zur Berechnung der Zentripetal-(Francis-)Turbinen, Z. d. V. d. I. 1911 S. 1025.

wieder für $a = 17$ mm Öffnung, ist in Fig. 15 dargestellt. Vor allem kann man hieraus die Winkel toten Wassers erkennen, in denen die Luft längere Zeit ohne ausgesprochene Richtung hin- und hertanz¹⁾. Bemerkenswert ist auch, daß sich die Strömungslinien an der konkaven Seite des Austrittes zusammenziehen und sich im Bereich der Austrittsevolvente von der Schaufel scheinbar loslösen.

In Fig. 16 ist zum Vergleich noch der Strömungsverlauf für die größte Öffnung dargestellt. Auch hierbei war der tote Winkel vor der mittleren Schaufel scharf zu erkennen; das Wasser fließt etwas weniger regelmäßig zu als bei 17 mm Öffnung.

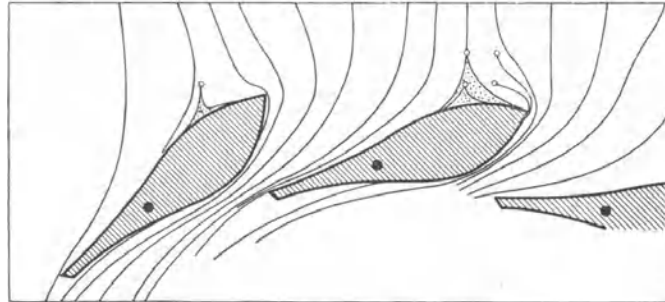


Fig. 15. Unmittelbar gemessene Wasserströmung bei 17 mm Leitraddöffnung.

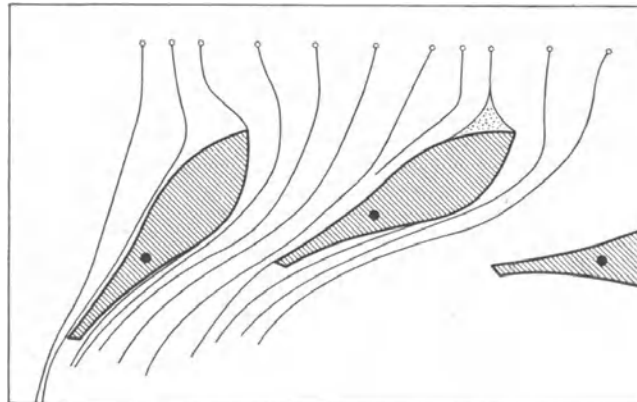


Fig. 16. Unmittelbar gemessene Wasserströmung bei 33 mm Leitraddöffnung.

Bei der Kritik dieser Strömung darf man aber nicht übersehen, daß sich die Luftfäden jeweils nicht genau in derselben wagerechten Ebene hielten. Nachdem der Luftstrahl durch die Bohrung eingetreten war, wurde er je nach der Höhe des angewandten Ueberdruckes in geringere oder größere Höhe emporgeblasen und dann vom Wasser bei ganz geringem Aufsteigen mitgenommen. Die in Fig. 15 eingezeichneten Strömungslinien stellen deshalb nicht genau den Weg eines Wassertheilchens dar; dazu kommt, daß in der Wasserströmung noch sekundäre Wirbelbewegungen auftreten, die von innen nach außen und umgekehrt verlaufen, so daß die eingezeichneten Strömungslinien lediglich ein Bild der Hauptströmrichtung geben können.

Durch die eingeblasene geringe Luftmenge werden die Druckverhältnisse nicht meßbar beeinflußt; vor der Anwendung einzelner Fähnchen oder von Schwimmkörpern hat dies Verfahren den Vorzug, daß man den ganzen Verlauf der Strömungsrichtung in zusammenhängender Linie darstellen kann.

¹⁾ Dies bildet eine hübsche Bestätigung der von Isaachsen in Z. d. V. d. I. 1911 S. 220 angeführten Bemerkungen.

Auch unter der Einschränkung, daß auf die genannte Weise nur die Hauptströmrichtung gefunden wird, bieten die Ergebnisse doch einen wertvollen Anhalt zur Einzeichnung des Wagenbachschen Kurvennetzes. Wieviel aber von dessen richtiger Einzeichnung abhängt, zeigen die Rechnungsergebnisse nach den Figuren 18 bis 21. Vor Besprechung der Hauptpunkte des Rechenverfahrens seien sie zur leichteren Uebersicht im folgenden kurz abgeleitet.

Wird für eine Niveaulfläche Druck + Geschwindigkeitsenergie = konst gesetzt, d. h. $h + \frac{c^2}{2g} = \text{konst}$, so folgt durch Differentiation $dh + \frac{c \, dc}{g} = 0$. Andererseits ruft die Fliehkraft eines Massenteilchens $dM \frac{c^2}{\rho}$ (wobei dM seine Masse, ρ den Krümmungshalbmesser seiner Bahn bezeichnet) eine Drucksteigerung in radialer Richtung hervor, die gleich ist der Kraft geteilt durch die entsprechende Querschnittfläche df . Mit der radialen Erstreckung $\Delta \rho$ des Massenteilchens ist seine Masse $dM = \Delta \rho \, df \frac{\gamma}{g}$ und sonach der Druckzuwachs in m Wassersäule

$$dh = \frac{dp}{\gamma} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche } \gamma} = \frac{\Delta \rho \, c^2}{g \, \rho}.$$

In Verbindung mit obiger Gleichung folgt

$$\frac{dc}{c} = - \frac{\Delta \rho}{\rho}.$$

$\Delta \rho$ ist kein Differential, da der Krümmungsmittelpunkt wandert. Wagenbach führt deshalb nach Fig. 17 den Abstand s zweier Ebenen ein, wobei sich aus der

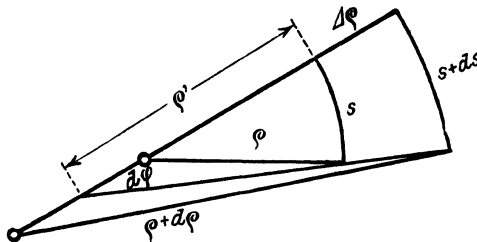


Fig. 17. Geometrischer Zusammenhang zwischen Strömungs- und Niveaulinien.

geometrischen Beziehung $\frac{ds}{s} = \frac{\Delta \rho}{\rho}$ ergibt. Die Integration liefert $cs = \text{konst}$, d. h. die Geschwindigkeiten wechseln über eine Niveaulfläche umgekehrt wie ihre Abstände von der benachbarten Niveaulfläche.

Spielt sich der Vorgang zwischen parallelen Wänden ab, so ist die Geschwindigkeit wieder umgekehrt proportional dem Abstand zwischen zwei Strömungslinien, der mit l bezeichnet sei; d. h. es ist $\frac{s}{l} = \text{konst}$. Die Konstante hängt von dem willkürlichen Abstand ab, in dem man die Niveaulflächen einzeichnen will. Im folgenden ist für diese Abstände jeweils $\frac{l}{s} = 1$ gesetzt, demnach erscheinen die Strömungslinien mit den Niveaulflächen richtig aufgezeichnet, wenn sie durch ein Kurvennetz verschieden großer Quadrate dargestellt werden.

Wir sind in folgender Weise verfahren: Zunächst wurde die Wassermenge, die durch die Leitradöffnung vor und hinter der Meßschaufel fließt, durch die Druckabnahme in den sich verengenden Kanälen, wie etwa in einem Venturi-Wassermesser, bestimmt. Nachprüfende Rechnungen für verschiedene Querschnitte zeigten, daß dieses Verfahren recht genaue Ergebnisse lieferte, was um so mehr zu be-

größen war, als es wegen der Verschiedenheit der Strömungsverhältnisse eines jeden Kanales keinen Zweck gehabt hätte, die gesamte Durchflußmenge durch den Apparat auf dem Wege der Messung zu bestimmen. So ergab sich z. B. für die Zelle links von der Meßtafel eine Wassermenge von 2,785 ltr/sk, für die Zelle rechts aber von 2,680 ltr/sk.

Die erhaltenen Geschwindigkeiten c_0 an den Austrittsquerschnitten wurden benutzt, um die Konstanten c_0, s_0 zu bestimmen. Hiervon ausgehend sind in Fig. 18 die Kurven auf Grund der Beziehung $c s = \text{konst}$ durch Probieren eingezeichnet.

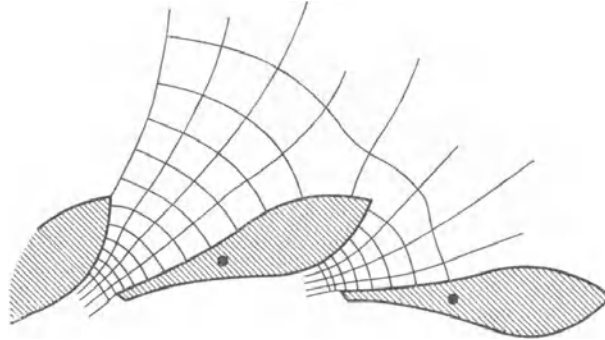


Fig. 18. Berechnete Strömungs- und Niveaulinien bei 17 mm Leitradöffnung.

Dieses Gesetz der wirbelfreien Strömung wurde nur für den Bereich des Strömungsvorganges angewandt, wo eine Wasserbeschleunigung auftritt. An den Stellen, wo das Wasser verzögert wird, würde seine Anwendung eine vollkommene Umsetzung von Geschwindigkeit in Druck bedingen, die nur in besonders allmählich erweiterten Kanälen erwartet werden darf. Es ist deshalb angenommen, daß sich das Wasser nach dem Austritt aus der Leitradöffnung mit dem gleichbleibenden, in der Oeffnung herrschenden Druck weiter bewegt, was jedenfalls auch mit

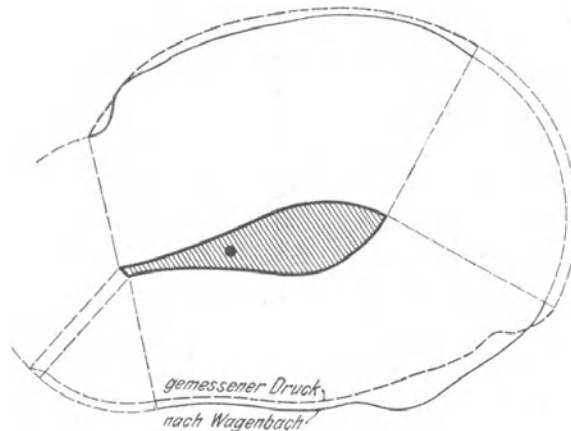


Fig. 19. Berechnete und gemessene Schaufeldrücke bei 17 mm Leitradöffnung.

dem durch Versuch gefundenen Druckverlauf an jener Stelle gut übereinstimmt, vergl. Fig. 11 und 12. Ein besonderer Druckzuwachs durch Fliehkraftwirkung infolge der Krümmung der Schaufeln nach dem Austritt konnte nicht beobachtet werden.

Das Rechnungsergebnis aus dieser ohne Rücksicht auf die durch Versuche gefundenen Wasserlinien eingetragenen Strömung ist in Fig. 19 für 17 mm Oeffnung ausgezogen dargestellt, und man bemerkt den Unterschied gegen die gestrichelt gezeichnete gemessene Druckverteilung. Das Ergebnis ist für den Schau-

feldruck nicht schlecht, für das Drehmoment aber wiederum ziemlich unbefriedigend, indem sich für letzteres nur 2775 cmg an Stelle der gemessenen 5700 cmg ergaben.

Mit Hilfe der vorhin genannten Strömungslinien und an Hand des gemessenen Druckes wurde nun der Versuch gemacht, die Strömungslinien nach der Wagenbachschen Beziehung möglichst mit der Wirklichkeit in Einklang zu bringen; das Ergebnis ist aus Fig. 20 und 21 zu entnehmen. Die Strömungslinien sind in Fig. 20 wiederum durch Probieren, rückwärts vom Leitradaustritt ausgehend, ermittelt worden; das Linienbild konnte aber trotz aller Bemühungen nicht auf den gleichen regelmäßigen Verlauf wie in Fig. 18 gebracht werden.

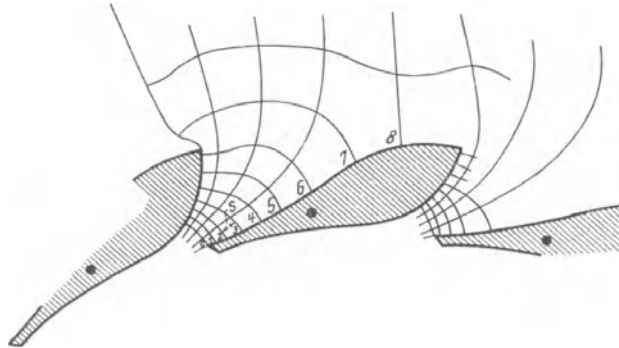


Fig. 20. Berechnete, aber der Messung angepaßte Strömungs- und Niveaulinien bei 17 mm Leitradöffnung.

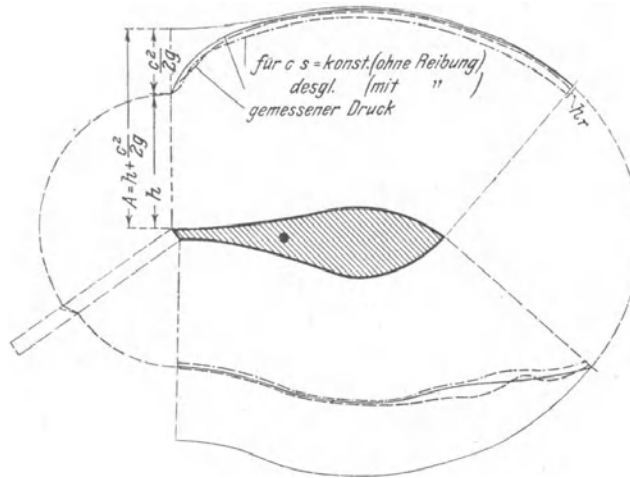


Fig. 21. Berechnete, der Messung angepaßte Schaufeldrücke mit und ohne Berücksichtigung der Reibung bei 17 mm Leitradöffnung.

Der rechnermäßige Vergleich der so erhaltenen, in Fig. 21 strichpunktierten Druckverteilung war gegenüber der Wirklichkeit noch immer unbefriedigend. Dieser Vergleich, der (wie auch schon bei Fig. 18 und den sonstigen Versuchen) von der Schaufelspitze, wo der berechnete Druck mit dem gemessenen übereinstimmen mußte, bis zum Schaufelende einen wachsenden Unterschied zwischen der berechneten und der tatsächlichen Druckverteilung aufweist, ließ die Vermutung aufkommen, daß die Vernachlässigung der Reibung hier im Spiele sei. Denn durch Hinzunahme des Druckabfalles längs der Schaufelfläche würde die berechnete Druckverteilung näher gegen die gemessene, gestrichelt dargestellte hingerrückt werden.

Dieser Unterschied zwischen gemessenem und berechnetem Druck, in Fig. 21 mit h_r bezeichnet, wurde dem durch die Reibung längs der Schaufel verursachten Druckabfall gleichgesetzt und demgemäß die Gleichung aufgestellt:

$$h_r = \text{konst} \frac{1}{2g} (l_{0-1} c_{0-1}^2 + l_{1-2} c_{1-2}^2 + l_{2-3} c_{2-3}^2 + \dots),$$

worin c_{0-1} , c_{1-2} usw. die mittlere Geschwindigkeit auf der Strecke 0-1, 1-2 usw. bezeichnet.

Hieraus ergibt sich die Ziffer $k = \text{konst}$ zu

$$k = 7,9$$

und

$$h_r = 7,9 s \frac{c^2}{2g}$$

(s in mm eingesetzt), ein Wert, der im Bereich sonstiger an Leiträdern ermittelter Erfahrungswerte liegt. Rechnet man zur Nachprüfung der in den bereits erwähnten »Beiträgen zur Berechnung von Zentripetal-(Francis-)Turbinen«¹⁾ gefundenen Ziffer für die Leitradreibung $k_0 = 0,008$ aus dem hier unmittelbar gemessenen Druckabfall von 0,045 m im Leitkanal den Wert von k_0 nach, so ergibt sich aus $k_0 \frac{L_0 U_0}{F_0} \frac{c_0^2}{2g} = 0,045$ m mit $L_0 = 14$ cm, $U_0 = 0,174$ m, $F_0 = 0,00119$ m:

$$k_0 = 0,00777,$$

also eine sehr gute Uebereinstimmung.

Vergleicht man dagegen die Ziffer $k = 7,9$ der Formel $h_r = 7,9 s \frac{c^2}{2g}$ mit dem Reibungsverlust in Rohren nach der Gleichung

$$7,9 s \frac{c^2}{2g} = k_0 \frac{L_0 U_0}{F_0} \frac{c^2}{2g},$$

so folgt für die einzelnen Abschnitte im Mittel

$$k_0 = \frac{7,9}{\frac{U_0}{F_0}} = 0,06,$$

das ist etwa der 10fache Wert der für Rohre geltenden Ziffern. Der Unterschied dürfte in erster Linie auf Kosten der Schaufelkrümmung zu setzen sein. Dabei sei bemerkt, daß der Wert $k_0 = 0,00777$ unter denselben Voraussetzungen wie in der genannten Veröffentlichung gilt, wobei für L_0 die gesamte Schaufellänge, für U_0 und F_0 aber die Abmessungen der Austrittöffnung eingesetzt waren, während der Wert 0,06 für die Abstände und Abmessungen zwischen den einzelnen Ebenen ermittelt ist.

Wurden die Reibungshöhen, die mit dieser Ziffer für die einzelnen, zwischen den Ebenen liegenden Längenabschnitte berechnet waren, zu den nach dem Wagenbachschen Verfahren bestimmten Druckhöhen zugezählt, so ergab sich tatsächlich jede nur wünschenswerte Uebereinstimmung mit den gemessenen Druckhöhen, Fig. 21. Das Drehmoment ergibt sich aus dieser so berichtigten Druckverteilung schließlich zu 4710 cmg, also nur um 6,5 vH vom abgewogenen Wert verschieden. Es kann demnach wohl ausgesprochen werden, daß die Vernachlässigung der Reibung eine merkliche Fehlerquelle im Verlauf der Druckverteilung darstellt.

In der Größe des Schaufeldruckes sind, wie bemerkt, die Ergebnisse der Wagenbachschen Druckverteilung aus dem bereits früher erwähnten Grunde wesentlich besser. Hier machen sich bei Vernachlässigung der Reibung nur Unterschiede von 24 vH bemerkbar, während es bei Einführung der erwähnten Reibungsziffer gelang, die Unterschiede zwischen Rechnung und Messung praktisch zum Verschwinden zu bringen.

Im Anschluß an das Gesagte möge noch eine Versuchsanordnung erwähnt werden, bei der nach einer Anregung des damaligen Assistenten für Mechanik,

¹⁾ Z. d. V. d. I. 1911 S. 1025.

Dr. Thoma, die Strömungslinien weniger mühsam als sonst mit Hilfe der wirbelfreien elektrischen Strömung, die sich in einem stromdurchflossenen Leiter einstellt, eingezeichnet werden.

Zu diesem Zwecke wurde die Kanalform aus dünnem Konstantanblech ausgeschnitten und beiderseits mit Kupferschienen armiert, Fig. 22 und 23. Durch Abtasten des dazwischen liegenden Raumes mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brücke konnten leicht die eingetragenen Linien gleichen Potentials gefunden werden. Im Verlauf der Wasserbeschleunigung bezw. Kanalverengung stimmten die so gefun-

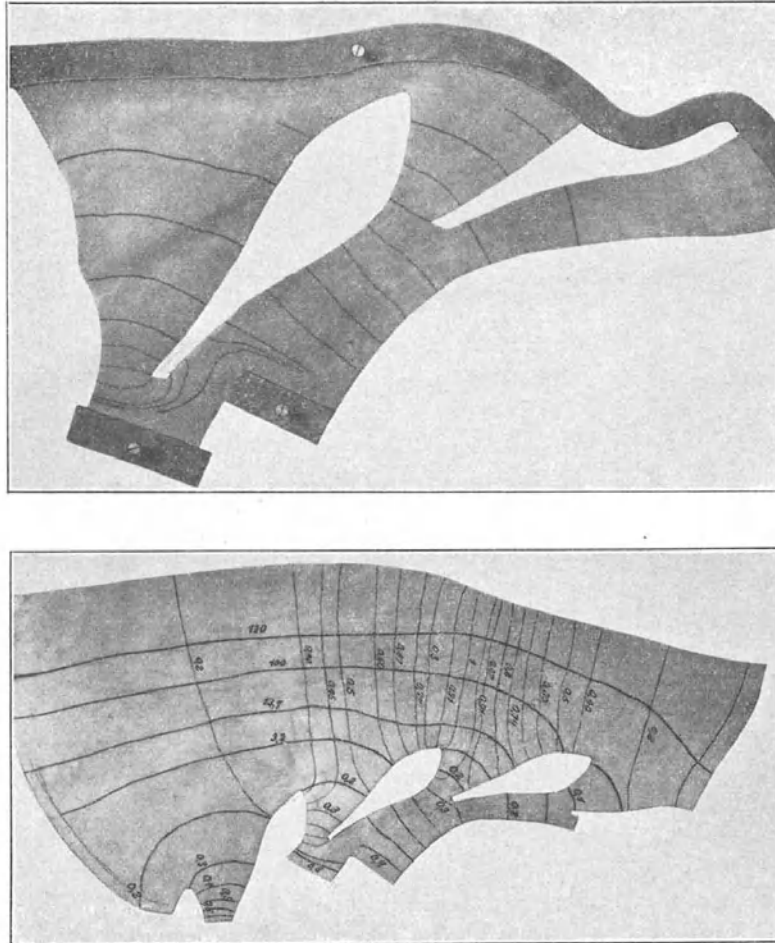


Fig. 22 und 23. Aus elektrischem Potentialabfall gemessene Strömungs- und Niveaulinien.

denen Kurven mit den früher eingezeichneten verhältnismäßig gut überein. Im Bereich der Querschnittserweiterung dagegen mußten sie infolge der fehlenden Trägheitskräfte versagen. In diesem letzteren Punkte liegt die Schwäche des Verfahrens, da es streng genommen nur möglich ist, Wasserströmungen mit elektrischen Strömungen zu vergleichen, wenn man die Anfangs- und Endebenen und die Grenzbedingungen kennt. So wird sich z. B. eine unter einem Winkel α_1 in der Mitte zwischen parallelen Wänden laufende Wasserströmung gemäß dem Flächensatz nach logarithmischen Spiralen, Fig. 24 und 25, entwickeln, während eine elektrische Strömung, Fig. 26, wie sie auch von außen zugeführt sein mag, jeweils senkrecht auf der Ableitung in der Mitte münden muß. Um sie mit der Wasserströmung zu

vergleichen, müßte sie in einer senkrechten Trajektorie der logarithmischen Spirale, abgeleitet werden, etwa nach Fig. 27, wobei wieder die primären Spiralen als Begrenzungsflächen des Kanales gegeben sein müssen.

Bei dieser Gelegenheit sei darauf aufmerksam gemacht, daß der Ausdruck Niveaulfläche in verschiedener Beziehung gebraucht wird. In einem Falle versteht man darunter lediglich eine Fläche gleichbleibenden Potentials, für die $h + \frac{c^2}{2g} = \text{konst}$ ist. Nach dieser Bezeichnung ist z. B. der Zylinder $D_1 \pi b_1$, in Fig. 24 und 25 eine Niveaulfläche, vorausgesetzt nur, daß das Wasser ihn in konzentrisch gleich-

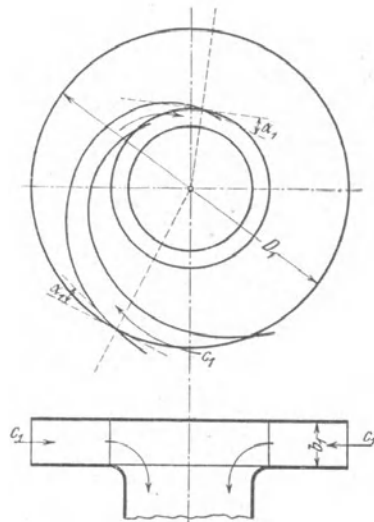


Fig. 24 und 25.
Massenbehaftete Strömung.

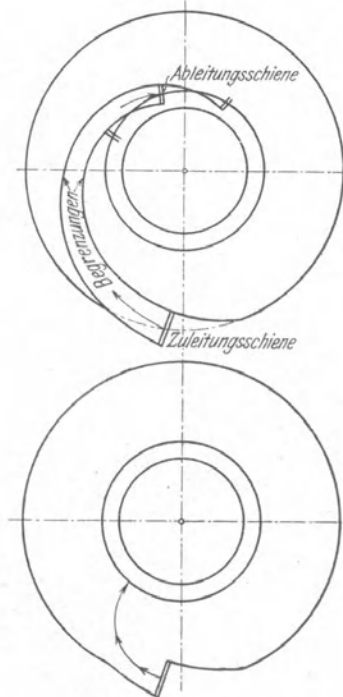


Fig. 26 und 27. Massenlose Strömung.

mäßiger Strömung durchfließt. Eine solche Niveaulfläche würde nicht brauchbar sein, um zum Vergleich die Kupferschienen anzulegen. Hierfür muß die Niveaulfläche noch die weitere Bedingung erfüllen, von den Strömungslinien senkrecht geschnitten zu werden, und in der Schwierigkeit, letztere Art von Niveaulflächen von vornherein anzunehmen, liegt die Unsicherheit für den Vergleich der mit Massenträgheit behafteten Strömung des Wassers mit der trägheitlosen elektrischen Strömung.

Immerhin bietet der Vorschlag Thomas eine wertvolle Bereicherung für die zeichnerische Entwicklung dieser Aufgaben, die nach einer Anregung des Hrn. Assistenten Otto Schmidt noch eine Erweiterung dahin gestattet, daß durch Anlegen der Zuführungsschienen an die seitlich begrenzenden Strömungslinien die Lage der zwischenliegenden Strömungslinien gleichfalls durch Abtasten mit der Brückenschaltung objektiv gefunden werden kann. Für die lebenswürdige Ermöglichung dieser Versuche sei Hrn. Professor Dr. Heinke und seinem Assistenten, Hrn. Schmidt, aufrichtiger Dank ausgesprochen.

Ergebnisse.

Eine Einrichtung wie die vorliegende ist wohl geeignet, die Größe und Richtung des Schaufeldruckes sowie sein Drehmoment mit genügender Genauigkeit fest-

zustellen, und gibt dadurch die Möglichkeit, verschiedene Schaufelformen und die Lage der Schaufeldrehpunkte kritisch zu beleuchten. Die Versuche haben aber auch ergeben, daß zu einem endgültigen Urteil die Verhältnisse der Wasserzuführung von wesentlicher Bedeutung sind, d. h., daß die in Frage kommenden Eigenschaften einer Leitvorrichtung nicht nur von der Form der Leitschaufeln, sondern sehr wesentlich von der Art der Zu- und Abströmung des Wassers abhängen. Das zeigen vor allen Dingen die Versuche zum Feststellen der Druckverteilung über die Wasserquerschnitte, Fig. 8, die die Einrichtung gleichfalls in sehr hübscher Weise erkennen ließ, sowie deren ausschlaggebende Bedeutung für das resultierende Drehmoment der Schaufel, Fig. 21. Eine um so wichtigere Rolle spielt dieser Umstand deshalb, weil die auf die Schaufel wirkenden Kräfte sich zum großen Teil im Gleichgewicht halten und das nach außen wirksame Gesamtergebnis deshalb nur als eine verhältnismäßig kleiner Rest der großen auftretenden Kräfte zutage tritt.

In letzterem Umstande liegt die Hauptschwierigkeit einer rein rechnerischen Bestimmung der an der Schaufel wirkenden resultierenden Kräfte, und es erscheint nach den vorliegenden Untersuchungen überhaupt nicht möglich, genaue Ergebnisse in allgemeinen Fällen, in denen über den Verlauf der Strömung und dergl. noch gar nichts bekannt ist, zu erzielen. Betrachten wir nochmals Fig. 19, so darf freilich gesagt werden, daß die Wirklichkeit mit der Wagenbachschen Beziehung $cs = \text{konst}$ mit ziemlicher Annäherung in Uebereinstimmung gebracht werden kann, sowie daß die Einführung des Druckabfalles durch die Reibungsverluste die Uebereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung bis zu einem hohen Grad ermöglicht hat. Aber man darf auch nicht vergessen, daß schon die geringe Abweichung, die sich zwischen den rein rechnerisch festgelegten Strömungslinien und den durch Versuche ermittelten ergeben hat (vergl. Fig. 17, 18, 8 und 15), weit aus genügt, um aus den obigen Gründen die Lage der Resultierenden zum Drehpunkt und mithin das Drehmoment sehr wesentlich zu beeinflussen.

Immerhin gelingt es durch einen kleinen Kunstgriff in der Wahl des Sicherheitskoeffizienten auch, auf dem Wege des zeichnerisch-rechnerischen Verfahrens Ergebnisse zu ermitteln, die für die wichtige Vorausberechnung des Drehmomentes praktisch brauchbar sind. Freilich ist es dabei notwendig, der hier gefährlichsten Fehlerquelle, und das ist die Hebellänge des Schaufeldruckes, die gebührende Beachtung zu schenken.

Wir haben gesehen, daß sich der Schaufeldruck selbst auch ohne die zuletzt angewendeten Berichtigungen mit genügender Genauigkeit bestimmen läßt. Von ihm muß man daher ausgehen. Seine Lage erscheint allerdings ungenau; führen wir nun aber eine entsprechende Sicherheit in der Größe des Hebelarmes ein, die aber — und das ist der springende Punkt — nicht in Teilen des letzteren, sondern etwa in Teilen der Schaufellänge anzugeben ist, so werden wir auch das Schlußergebnis mit völligem Vertrauen verwenden können.

Zum Nachweis des Gesagten wurden in Fig. 13 die mit \times bezeichneten Werte eingetragen, die aus einer nicht besonders angepaßten Einzeichnung der Strömungslinien nach Wagenbach und ohne die oben erwähnte Berichtigung des Reibungsabfalles ermittelt worden waren. Man bemerkt die gute Uebereinstimmung der Schaufeldrucke, während die Drehmomente Unstimmigkeiten bis über 400 vH aufweisen. Dies letztere hängt aber nicht unmittelbar von der Messung, sondern in erster Linie von der zufälligen Lage des Schaufeldrehpunktes ab. Der wirkliche Unterschied zwischen den durch Rechnung ermittelten und den gemessenen Hebelarmen ist auch, wie man aus dem dritten Diagramm erkennt, keineswegs groß. In unserm Beispiel beträgt er 1,8, 5 und bei voller Oeffnung 11,4 vH der gesamten Schaufellänge.

Man wird sonach auch das Moment einer Drehschaufel genügend sicher aus einer zeichnerisch-rechnerischen Vorausberechnung ermitteln dürfen, wenn man die Strömungslinien nach dem Gesetze $\frac{l}{s} = \text{konst.}$ unter möglichster Beachtung der Zulaufverhältnisse aufzeichnet, daraus die Wasserdrücke und mit ihnen die Größe und Lage des Schaufeldruckes berechnet und dann schließlich zur Berücksichtigung der unvermeidlichen Fehlerquellen den Schaufeldruck um etwa $\frac{1}{10}$ der Schaufellänge im Sinne der Vergrößerung des Momentes verschiebt. Durch Einführung des von der Reibung hervorgerufenen Druckabfalles kann das Ergebnis noch genauer werden. Bei dem im allgemeinen vorhandenen Genauigkeitsgrad der Rechnung wird man aber auf solche feineren Berichtigungen meistens verzichten können.

Bei den vorstehenden Schlußfolgerungen darf nicht übersehen werden, daß sie sich nur auf eine Form von Leitschaufeln und nur auf eine Art der Wasserzuführung beziehen, und es ist zu wünschen, daß ähnliche Versuche auch auf andre Ausführungsformen ausgedehnt werden. Dabei ist anzunehmen, daß für den in der Praxis meist vorkommenden Fall, daß das Wasser vom vollen Kreisumfang her zuströmt, das zeichnerische Verfahren leichter sein wird, als es sich bei der vorliegenden Versuchseinrichtung ergeben hat. Immerhin ist auch soweit schon eine erfreuliche Klärung der vorliegenden Fragen zu verzeichnen, und es sei noch gestattet, dem Verein deutscher Ingenieure dafür Dank zu sagen, daß er durch seine hochherzige Unterstützung den Bau der Einrichtung und damit die Ausführung der Versuche ermöglicht hat.

Zusammenfassung.

Nach Beschreibung der Versuchseinrichtung wird gezeigt, in welcher Weise Drehmoment sowie Größe und Richtung des Schaufeldruckes der zu untersuchenden Leitschaufeln aus den durch den Drehbolzen nach außen geleiteten Kräften bestimmt werden können. Daran schließt sich die Bestimmung der Verteilung von Druck und Geschwindigkeit im durchströmenden Wasser durch den Versuch und im Zusammenhange damit die Berechnung der Schaufelkräfte, die mit der ersten unmittelbaren Messung befriedigend übereinstimmt. Zum Schluß wird die durch ein zeichnerisch-rechnerisches Verfahren ermittelte Druckverteilung dem Versuch gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß bei der vorliegenden Versuchsanordnung die Strömungslinien sowie die Größen der Schaufeldrücke mit der Wirklichkeit verhältnismäßig gut übereinstimmen, und daß auch die Drehmomente mit einer für Vorausberechnungen genügenden Genauigkeit bestimmt werden können, wenn dem gefundenen Hebelarm des Schaufeldruckes zur Sicherheit ein Bruchteil der gesamten Schaufellänge zugefügt wird.

Sonderabdrücke aus der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure,

die in folgende Fachgebiete eingeordnet sind:

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Bagger. | 15. Gesundheitsingenieurwesen (Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Wasserversorgung und Abwässerung). |
| 2. Bergbau (einschl. Förderung und Wasserhaltung). | 16. Hebezeuge (einschl. Aufzüge). |
| 3. Brücken- und Eisenbau (einschl. Behälter). | 17. Kondensations- und Kühlanlagen. |
| 4. Dampfkessel (einschl. Feuerungen, Schornsteine, Vorwärmer, Überhitzer). | 18. Kraftwagen und Kraftboote. |
| 5. Dampfmaschinen (einschl. Abwärmekraftmaschinen, Lokomobilen). | 19. Lager- und Ladevorrichtungen (einschl. Bagger). |
| 6. Dampfturbinen. | 20. Luftschiffahrt. |
| 7. Eisenbahnbetriebsmittel. | 21. Maschinenteile. |
| 8. Eisenbahnen (einschl. Elektrische Bahnen). | 22. Materialkunde. |
| 9. Eisenhüttenwesen (einschl. Gießerei). | 23. Mechanik. |
| 10. Elektrische Kräfteerzeugung und -verteilung. | 24. Metall- und Holzbearbeitung (Werkzeugmaschinen). |
| 11. Elektrotechnik (Theorie, Motoren usw.). | 25. Pumpen (einschl. Feuerspritzen und Strahlapparate). |
| 12. Fabrikanlagen und Werkstatteinrichtungen. | 26. Schiffs- und Seewesen. |
| 13. Faserstoffindustrie. | 27. Verbrennungskraftmaschinen (einschl. Generatoren). |
| 14. Gebläse (einschl. Kompressoren, Ventilatoren). | 28. Wasserkraftmaschinen. |
| | 29. Wasserbau (einschl. Eisbrecher). |
| | 30. Meßgeräte. |

Einzelbestellungen auf diese Sonderabdrücke werden gegen Voreinsendung des in der Zeitschrift als Fußnote zur Überschrift des betr. Aufsatzes bekannt gegebenen Betrages ausgeführt.

Vorausbestellungen auf sämtliche Sonderabdrücke der vom Besteller ausgewählten Fachgebiete können in der Weise geschehen, daß ein Betrag von etwa 5 bis 10 M eingesandt wird, bis zu dessen Erschöpfung die in Frage kommenden Aufsätze regelmäßig geliefert werden.

Zeitschriftenschau.

Vierteljahrsausgabe der in der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure erschienenen Veröffentlichungen 1898 bis 1910.

Preis bei portofreier Lieferung für den Jahrgang
3,— M für Mitglieder. 10,— M für Nichtmitglieder.

Seit Anfang 1911 werden von der Zeitschriftenschau der einzelnen Hefte einseitig bedruckte gummierte Abzüge angefertigt.

Der Jahrgang kostet

2,— M für Mitglieder.

4,— M für Nichtmitglieder.

Portozuschlag für Lieferung nach dem Ausland 50 Pfg für den Jahrgang. Bestellungen, die nur gegen vorherige Einsendung des Betrages ausgeführt werden, sind an die **Redaktion der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin NW., Charlottenstraße 43** zu richten.

Mitgliederverzeichnis d. Vereines deutscher Ingenieure.

Preis 3,50 M. Das Verzeichnis enthält die Adressen sämtlicher Mitglieder sowie ausführliche Angaben über die Arbeiten des Vereines.

Bezugsquellen.

Zusammengestellt aus dem Anzeigenteil der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. Das Verzeichnis erscheint zweimal jährlich in einer Auflage von 85 bis 40000 Stück. Es enthält in deutsch, englisch, französisch, italienisch, spanisch und russisch ein alphabetisches und ein nach Fachgruppen geordnetes Adressenverzeichnis.

Das Bezugsquellenverzeichnis wird auf Wunsch kostenlos abgegeben.