Techn. Prüfstand.
Oppau

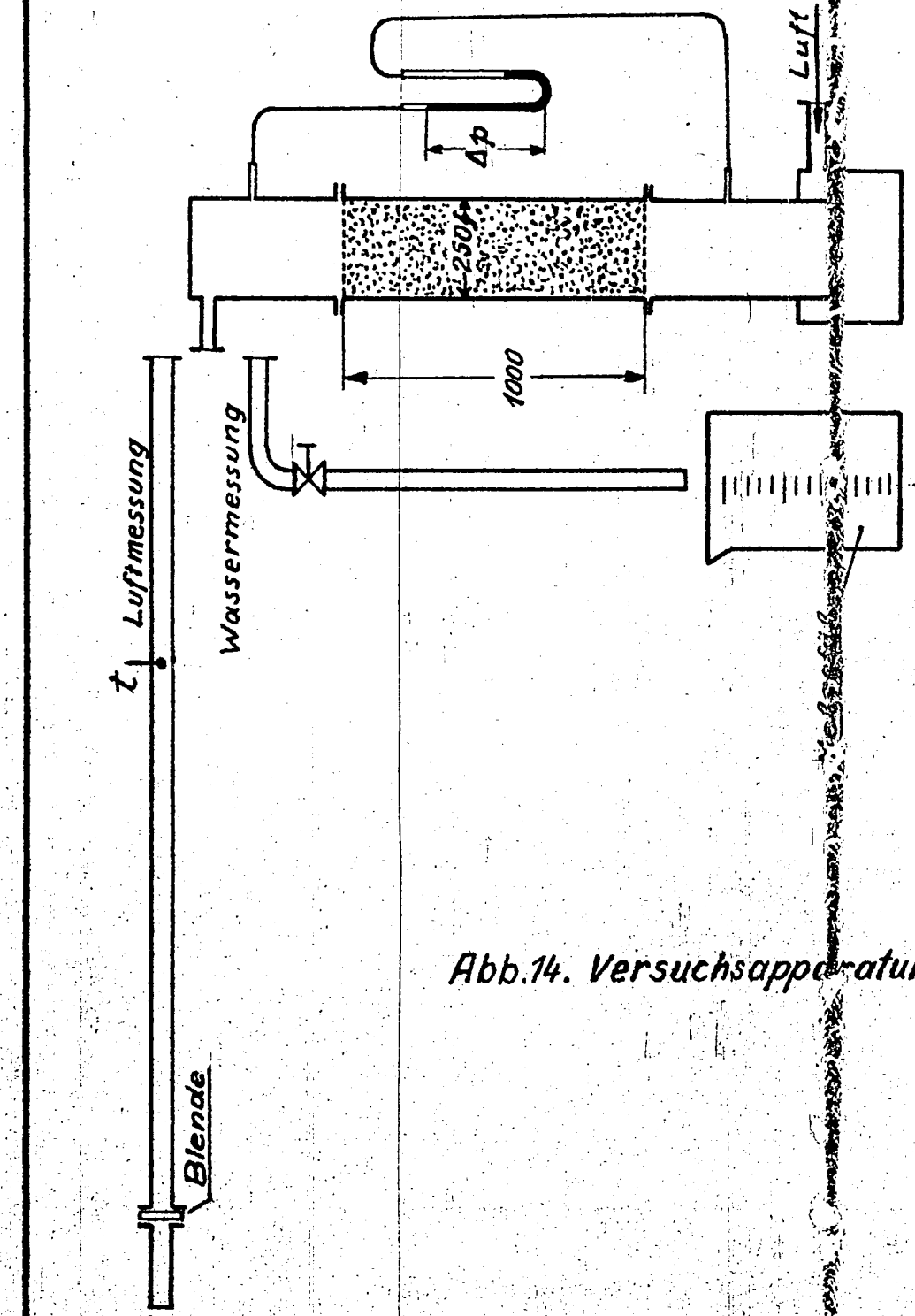
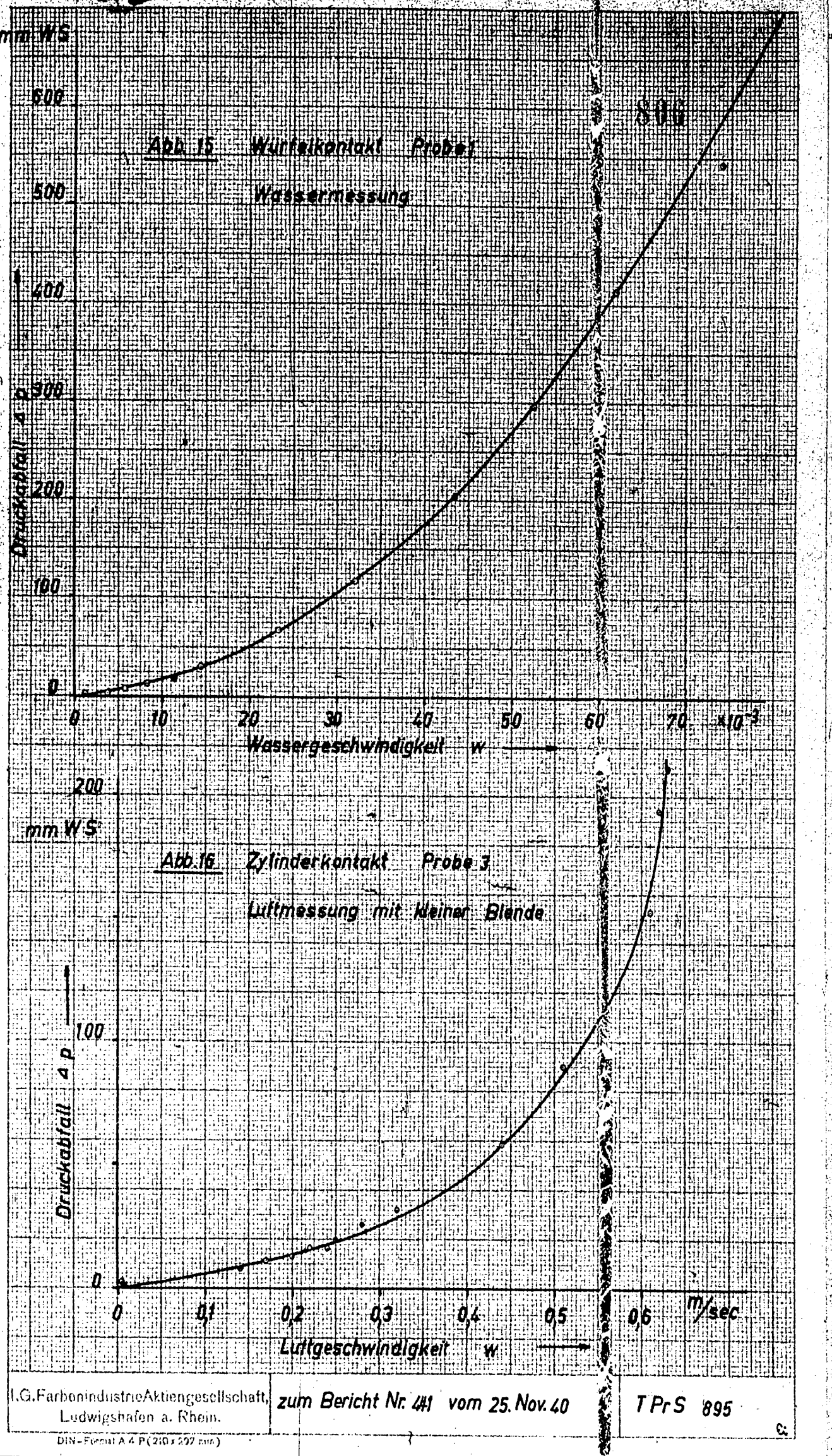


Abb.14. Versuchsapparatur.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rhein.	z. Bericht Nr. 441 v. 25.11.40	TPrS 876

DIN-Format A 4 (210 x 297)


mm WS
600
500
400
300
200
100
0
Druckabfall Δ p
Abb. 15 Wurfelkontakt Probe 1
Wassermessung
0
10
20
30
40
50
60
70
x10⁻³
Wassergeschwindigkeit w
806
200
mm WS
Abb. 16 Zylinderkontakt Probe 3
Luftmessung mit kleiner Blende
100
0
Druckabfall Δ p
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
m/sec
Luftgeschwindigkeit w
I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rhein.
zum Bericht Nr. 441 vom 25. Nov. 40
T Pr S 895
DIN-Format A 4 P (210 x 297 mm)

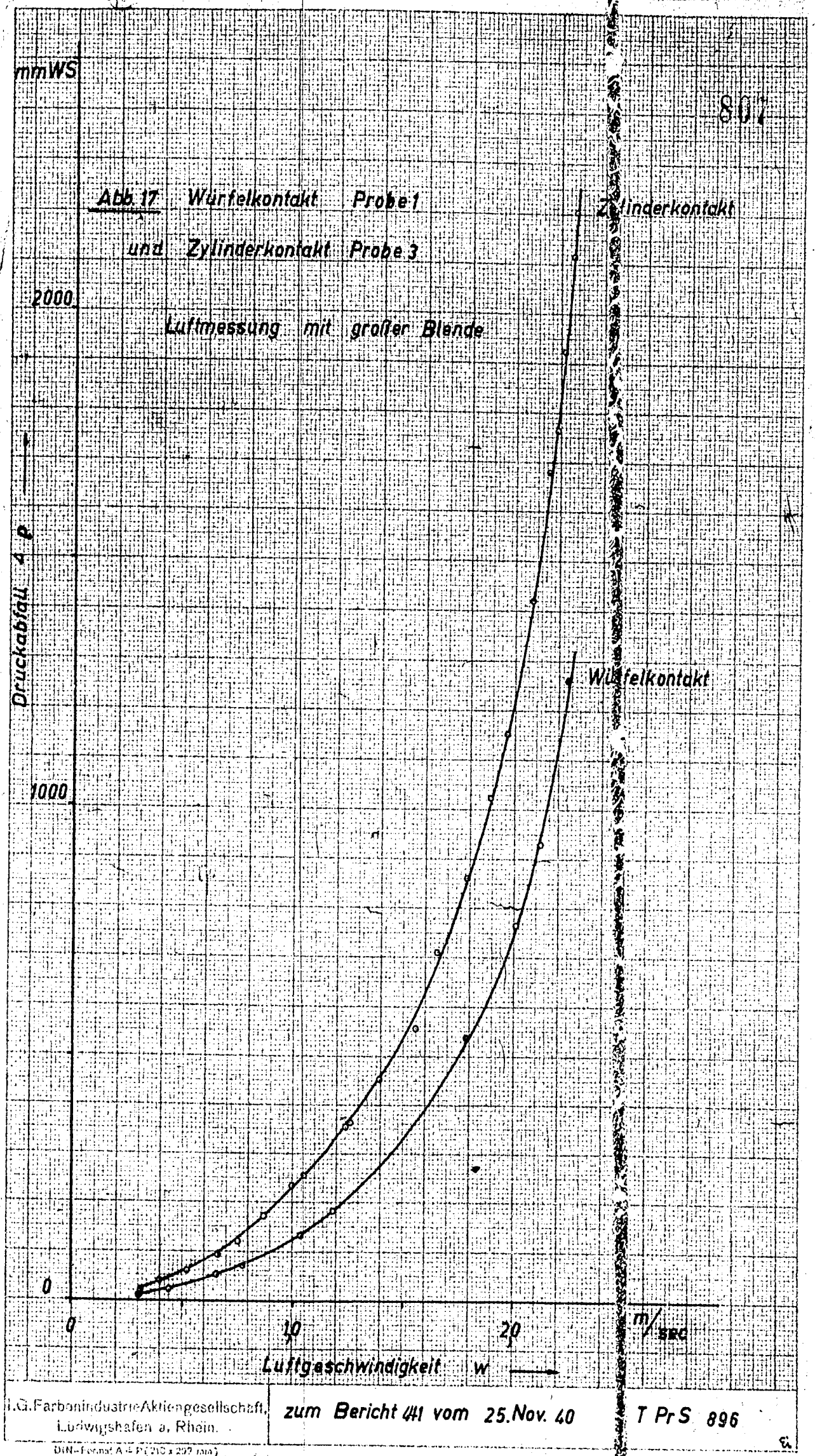


Abb. 17 Würfelkontakt Probe 1 und Zylinderkontakt Probe 3 Luftmessung mit großer Blende

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rhein.

zum Bericht 441 vom 25. Nov. 40

T Pr S 896

DIN-Format A 4 P (210 x 297 mm)

Beide Achsen logarithmisch geteilt 1 bis 10000 u. 1 bis 300 Einheit 62,5 mm.
Copyright Carl Schleicher & Schüll, Düren (Rhld.) No 3693 1. P

F PrS 897

zum Bericht Nr. /M vom 25. Nov. 4

Abb. 18

Widerstandsbeiwerte ζ von Wurfel-, Kugel- und Zylinderförmigem Schutgut in Abhängigkeit von der Reynoldsschen Zahl Re

Zylinder Probe 3

Würfel Probe 1

Kugel

Re

Abb. 1 Probe 1

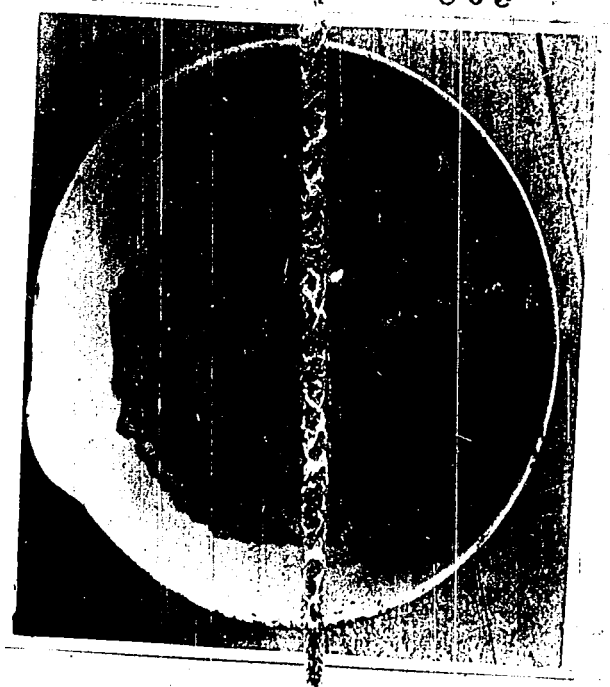


Abb. 2 Probe 2.

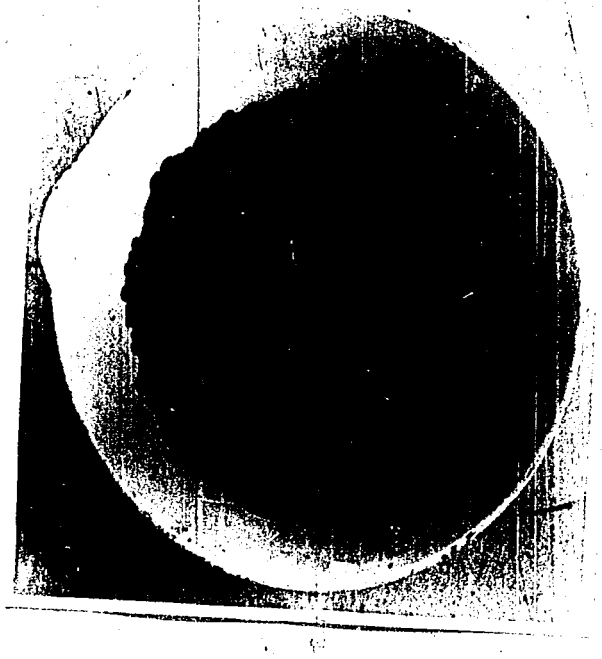


Abb. 3. Probe 3.

Abb.4 Gefäßmitte

Würfel von Hand hergestellt

Abb.5 Gefäßmitte.

Würfel maschinell hergestellt.

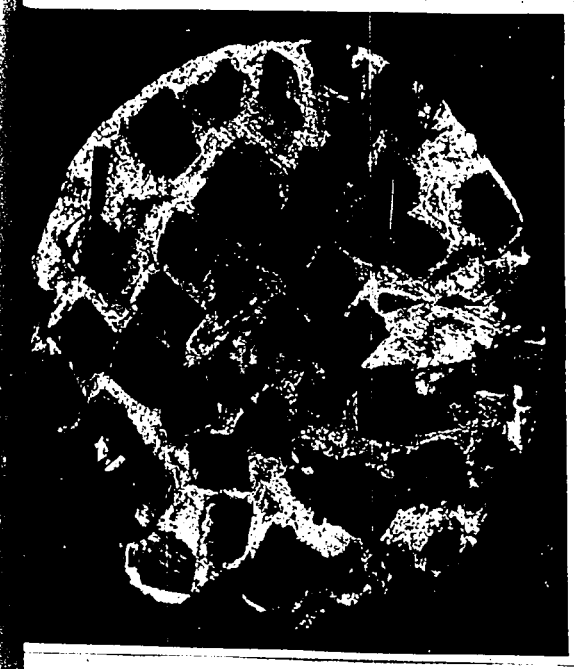


Abb.6. Gefäßboden.

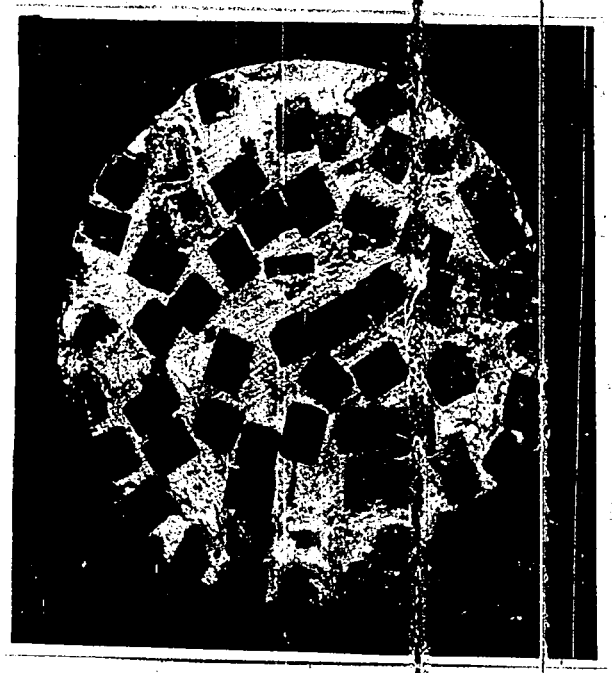


Abb.7 Gefäßboden.

Abb.8 Gefäßboden.

Würfelkontakt von Hand hergest. kleines Gefäß.

Abb.9 Gefäßmitte.

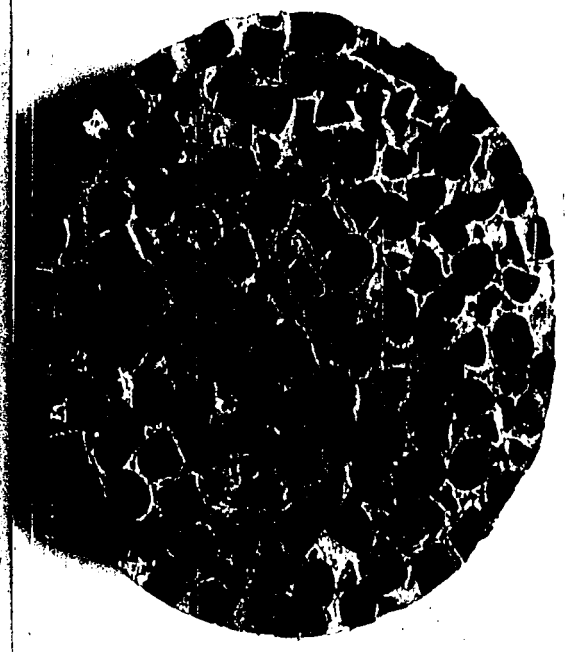


Abb.10 1. Schnitt

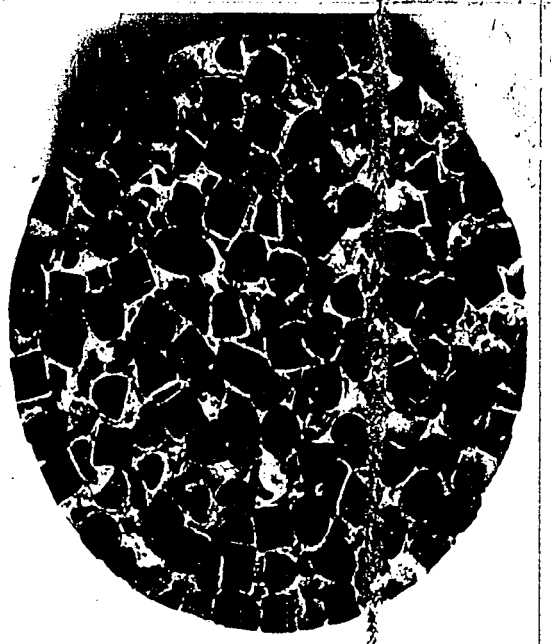


Abb.11 2. Schnitt.

Zylinderkontakt.

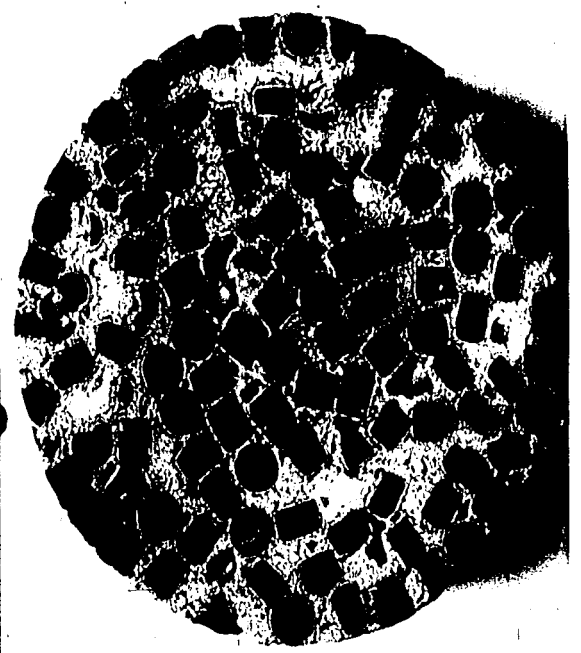


Abb.12 Gefäßboden

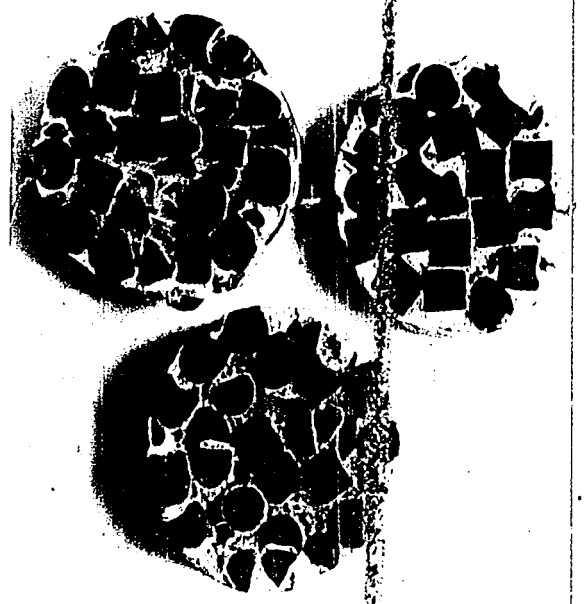


Abb.13 1.Schnitt.

Boden 2.Schnitt

Kleines Gefäß.

I.G.Farbenindustrie Aktiengesellschaft
Ludwigshafen/Rhein
Techn.Prüfstand Op.471
Bericht Nr.444

B e r i c h t

über

Fahrversuche mit Benzin als Dieselkraftstoff.

Techn.Prüfstand Op.471
Bericht Nr.444

9. Dezember 1940 Kö/Hr.

B e r i c h t
über
Fahrversuche mit Benzin als Dieselkraftstoff.

Zweck.

Auf Veranlassung des Amtes für Wirtschaftsausbau (Prof.Dr.Krauch) sollten die bereits früher durchgeführten Versuche, Benzin hilfsmässig als Kraftstoff für Dieselmotoren zu verwenden, im praktischen Fahrbetrieb weiter fortgeführt werden. Bei den früheren Versuchen hatte sich die Verbesserung der Cetanzahl und Erhöhung der Viskosität als wünschenswert ergeben. Mittel sind hierzu die Beimischung von Gasöl, Schmieröl und ein Verdickungsmittel Oppanol B 200. Mit Bleitetraäthyl, mit Benzol oder mit Alkohol versetzte Benzine sind für den Dieselbetrieb zu vermeiden.

Versuchsdurchführung.

Für die Versuche wurden von Leuna 5000 kg Grundbenzin (Br.162) mit R-OZ 66 beschafft, das in Mischung mit Dieselkraftstoff I, Einheitsschmieröl 8,5°E und Oppanol (5%iger Lösung in Gasöl) gefahren wurde. Die wichtigsten Analysendaten sind auf Blatt 1 angegeben. Im I.G.-Prüfdiesel wurden folgende Cetanzahlen bestimmt:

Grundbenzin	Cetanzahl 28
75 Vol.% Grundbenzin + 25 Vol.% Dieselkraftstoff II	32
90 Vol.% " + 9,5 Vol.% Gasöl + 0,5 Vol.% Oppanol	30
97 Vol.% + 3 Vol.% Einheitsschmieröl 8,5° E/50°C	29

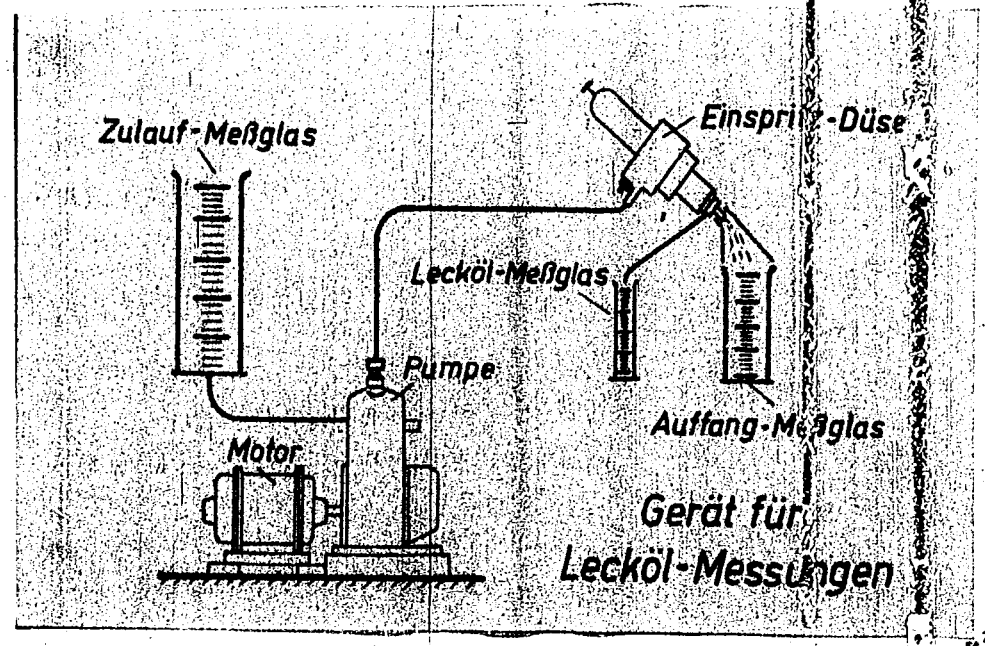
Das Gemisch aus Benzin mit 25% Gasöl hatte demnach die beste Zündwilligkeit.

Viskositätsmessungen zeigten, dass zur Erhöhung der Viskosität auf etwa 1,5 Centistokes mehr als 25% Schmieröl oder 10% Oppanol-Gasöl-

mischung gebraucht würden (Abb.1 auf Blatt 2). Ein Zusatz von 5% Schmieröl kommt aus wirtschaftlichen Gründen und wegen Gefährdung der Betriebssicherheit des Motors nicht in Betracht. Das Schmieröl verbrennt nur teilweise, gibt qualmenden Auspuff und Düsenverkokung. Auf Viskositätserhöhung wurde daher verzichtet und lediglich zur Verbesserung der Schmierölei enschaften ein Zusatz von 3% Schmieröl, der in dieser Höhe schon von vielen Stellen angewandt wird, dem Benzin beigegeben.

Die Zugabe von Oppanol, das im Gasöl für die Mischung mit Benzin schon vorgelöst ist, bewirkt bereits bei einem Zusatz von etwa 0,5 % eine Viskositätserhöhung auf 1,5 Centistokes. Benzin mit 25% Diesel hat nicht die gewünschte Viskosität, jedoch höhere Zündwilligkeit. Wie die späteren Versuche gezeigt haben, ist Erhöhung der Viskosität nicht unbedingt erforderlich, sodass wohl in den meisten Fällen darauf verzichtet werden kann.

Beim Starten des Motors treten wegen der niederen Anlassdrehzahlen mitunter Schwierigkeiten auf, wenn die Leckverluste an Pumpe und Düse bei den dünnflüssigen Kraftstoffen zu gross werden.+) Aus diesem Grunde wird Erhöhung der Viskosität gefordert. Dieses war für uns Veranlassung, durch besondere Versuche die Grösse der Leckverluste zu messen. Hierfür wurde nachstehender Apparat verwendet.



-3-

+) d.h. zu wenig Kraftstoff in den Motor kommt

Sie besteht aus Einspritzpumpe und Einspritzdüse. Gemessen wurde die Kraftstoffmenge vor der Pumpe, das am Düsenhalter abtropfende Lecköl und die hinter der Düse aufgefangene Einspritzmenge. Die Ergebnisse dieser Versuche sind aus Abb. 2 und 3 auf Blatt 2 ersichtlich. Bei reinem Benzin werden hinter der Düse 85 % der gesamten zugeführten Kraftstoffmenge aufgefangen. Etwa 5 % gehen als Lecköl an der Düse fort, die restlichen 10 % gehen verloren. Sie sind zum Teil im Schmieröl der Pumpe enthalten, der größte Teil ist jedoch verdampft und befindet sich in der die Pumpe und Düse umgebenden Luft. Auch wenn Zusätze dem Benzin beigegeben werden, ändert sich dieses Bild nur unwesentlich. Dagegen werden von dem zäheren Dieselkraftstoff II etwa 99 % hinter der Düse aufgefangen und nur 1/2 % ist Lecköl oder Licht verloren. Dieselkraftstoff II wird daher beim Starten weniger Schwierigkeiten machen als die Benzine.

Startversuche am Daimler-Benz-Lastwagen mit 4 Zylinder-Vorkammermotor OM 59 ergaben bei etwa 5 bis 10° Starttemperatur für Dieselkraftstoff II stets wesentlich leichteres Starten als für die Benzine. Am besten von ihnen konnte noch Benzin mit 25 % Dieselkraftstoff II verwendet werden.

Bei Fahrversuchen mit vollbeladenem Wagen war die Leistung mit Dieselkraftstoff II merkbar höher als mit den Benzinen, bei denen öfteres Schalten notwendig wurde. Der Wagen lief mit Benzin und 25 % DK II noch am besten. Am Berg traten mitunter Dampfblasen auf, wenn der Wagen kurze Zeit stillstand. Diese konnten jedoch durch Erhöhung des Druckes der Vorderpumpe weitgehend beseitigt werden. Das Ergebnis dieser Fahrversuche ist in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt.

Kraftstoff	Leistung	Verbrauch auf 100 km/Std.
Dieselkraftstoff II	am Berg umgeschaltet auf 3. Gang (Messmarke)	16,8 Ltr.
75 % Bi + 25 % DK II	100 m zuvor auf 3.Gang	13,0 Ltr.
90 % Bi + 0,5 % Oppanol + 9,5 % Gasöl	150 m zuvor auf 3.Gang	18,1 Ltr.
97 % Bi + 3 % Schmieröl	150 m zuvor auf 3.Gang	18,6 Ltr.

Der Verbrauch ist litermässig mit den Benzinmischungen um etwa 8 bis 12 % grösser als mit Dieselkraftstoff II. Gewichtsmässig und heizwertmässig ergibt sich praktisch kein Unterschied.

Mit dem Lastwagen wurden ausser diesen Messfahrten zahlreiche Betriebsfahrten durchgeführt. Mit Benzin und 25 % DK II ergaben sich keine Schwierigkeiten, auch bei längeren Fernfahrten mit vollbeladenem Wagen nicht.

Seit etwa 4 Wochen läuft der Wagen im Werk- und Stadtverkehr mit Benzin und 3 % Schmieröl. Hierbei wurde lediglich der merkbare Leistungsabfall gegenüber Gasölbetrieb lästig empfunden. Schwierigkeiten traten sonst nicht auf. Ausser diesem Daimler-Benz-Wagen werden noch Hanomag-Dieselschlepper mit Benzin und 3 % Öl betrieben. Auch hier macht sich die geringe Leistung mit diesem Kraftstoff bemerkbar. Im sonstigen hat sich dieses Benzin im Startverhalten und im Betrieb als brauchbar erwiesen. Seine behelfsmässige Verwendung im Dieselmotor kann also durchgeführt werden. Die Fahrzeuge werden weiterhin mit diesem Kraftstoff betrieben, um mehr Erfahrungen zu sammeln.

Dr. Dahl

Verteiler:

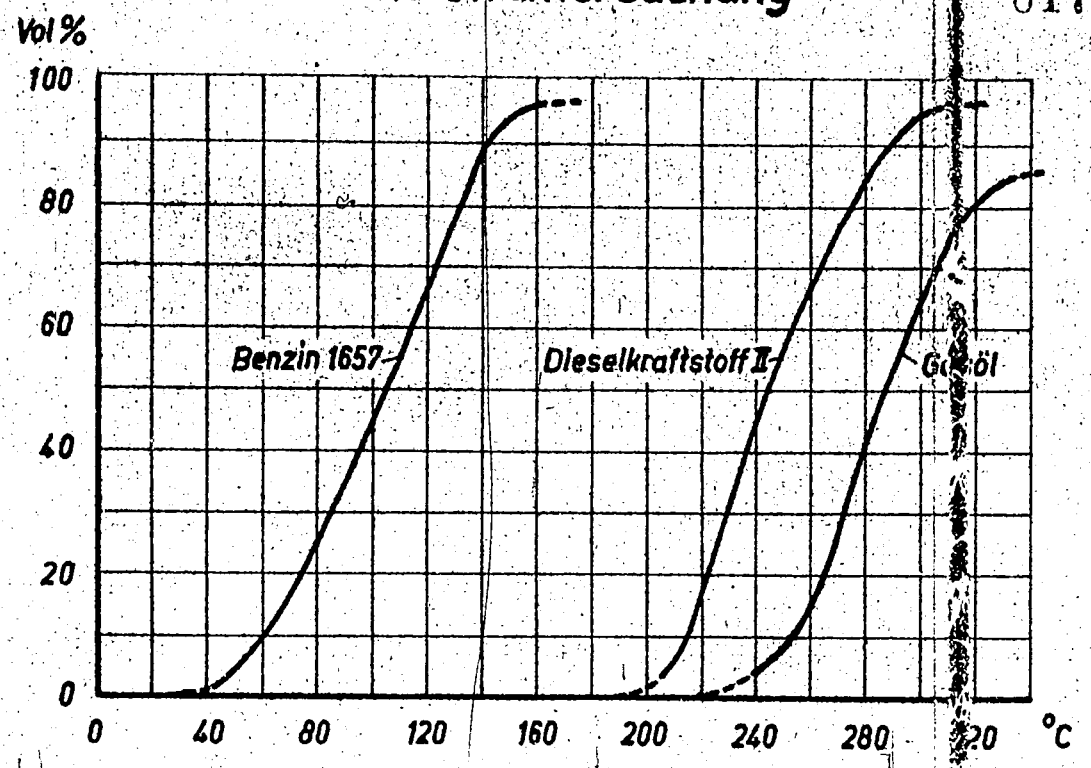
1. Herrn Dir.Dr.Krauch
2. Herrn Dir.Dr.Strombeck
3. Herrn Dr.Ester, Leuna
4. Herrn Dir.Dr.Müller-Cunradi
5. Herrn Dir.Dr.Lappe
6. Herrn Dir.Dr.Pier
7. Herrn Ob.Ing.Raichle - Herrn Dr.Dehn
8. Herrn Dipl.Ing.Köhler
9. Op.471.

Techn. Prüfstand
Oppau

Blatt 1

817

Brennstoffuntersuchung



Kraftstoffsorte Brennstoff Nr.	Benzin Br 1657	Dieselkraft-stoff B 572	Heeres Einheitsschmieröl	Standard Gasöl D 424
Spez. Gewicht 20°C	0,733	0,851	0,901	0,852
Viskosität cst 20°C	0,55	3,25	8,5°E/50°C	5,51
Stockpunkt	<-50	-25	-25	-22
Flammpunkt o.T./°C	< 20	89	235	100
Cetenzahl	-	46	42,5	46
R-Oktanzahl	66	-	-	-

Oppanol B 200 ist ein synthetisches Polymerisationsprodukt von gummiähnlicher Beschaffenheit.

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen am Rhein	Maßst.	Zum Bericht Nr. 444 vom 9. Dez. 40.	TPr.S. 912
Tag 9. 12. 40. Name H.		Urheberrechtsschutz nach DIN 34	

Seite 818

Texon Prüfstand Opapau

Viskosität cSt

Abhängigkeit der Berührungsdrücke

Leckölmessung

Dieselkraftstoff

Leckol

aufgefangene Fördermenge

Bl. (Gasol mit B 200)

Verlust Dieselkraftstoff

Leckol

aufgefangene Fördermenge

Bl. mit Schmieröl

Düse DLDS 105

Pumpenelement 6a

Druck 220 atü

Einspritzmenge 1 ltr/h

Pumpendrehzahl = 600 /min.

Viskosität in cSt

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rhein. 4.12.40

z. Bericht Nr. 444 v. 9. Dez. 1940.

TPS 907

DIN-Format A 4 P (210 x 297 mm)

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh.

819

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 446

Klopfverhalten und Klopfwertangaben von Kraftstoffen.

Übersicht: Das Klopfverhalten von unvermischt untersuchten Leichtkraftstoffen wird allgemein durch die "Oktanzahl" angegeben. Werden diese Stoffe aber in Mischung mit einem anderen untersucht, so wird ihr Klopfverhalten verschieden bezeichnet. Zur Vermeidung von Missverständnissen wird hiefür der Ausdruck "Mischwert" vorgeschlagen und angegeben, in welcher Weise er zu bestimmen ist. Der Unterschied zwischen den Begriffen "Oktanzahl" und "Mischwert" wird anhand von ausgewählten Beispielen erläutert.

Abgeschlossen am: 3. Februar 1941

Bearbeiter: Ing. Singer

Die vorliegende Ausfertigung 18 enthält

6 Textblätter

1 Bildblätter

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1		Me. Hydrierung, Herrn Dr. Ester	10		Hochdruck, Herrn Dr. Hirschberger,
2		Me. Benzinprüfungsbetrieb, Herrn Dipl. Ing. Rueß,	11		Kokerei-D-Vers. Herrn Dr. Kühn über Herrn Dir. Müller-Conradi,
3		Ammonlabor, Herrn Dr. Blümel,			
4		Ammonlabor, Herrn Dr. Jannek,			
5		Ammonlabor, Herrn Dr. Schlenk	12		K.-V. Vers. Herrn Dr. Häuber,
6		Ammonlabor, Herrn Dr. Thimm,	13		Kokerei-D-Vers. Herrn Dr. Beroh,
7		Crack-Vers. Herrn Dr. Stern,			
8		Herrn Dr. Winkler, Op.	14		" Herrn Dr. Sönksen,
9		Hochdruckvers. Herrn Dr. Dohn	15		Herrn Ma. Ostwald,
			16		Techn. Prüfstand, Herrn Dr. Roth,
			17		Herrn Ing. Singer,
			18-20		Techn. Prüfstand

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 19. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

Klopfverhalten und Klopfwertangaben von Kraftstoffen.

Einleitung.

Früher bestimmte Klopfwerte von reinen Stoffen decken sich nicht immer mit den heutigen Angaben, weil sich in der Zwischenzeit Prüfmotor, Prüfweise und Klopfwertangabe geändert haben. Heute wird das Klopfverhalten von Leichtkraftstoffen nur noch durch die "Oktanzahl" (OZ) oder durch den "Mischwert" (MW) angegeben. Die Bestimmung des Mischwertes erfolgt aber noch nicht einheitlich. In sprachlicher und begrifflicher Hinsicht müssen diese beiden Klopfwertangaben sorgfältig auseinander gehalten werden; Missverständnisse führen leicht zu Fehlbeurteilungen.

Schrifttumsangaben über Klopfwerte von reinen Stoffen.

Hier fällt auf, dass in vielen Fällen die angegebenen Werte weit über die übliche Genauigkeitsgrenze hinaus streuen. Die Ursachen sind entweder im verschiedenen Reinheitsgrad der untersuchten Stoffe, oder im unterschiedlichen Prüfverfahren zu suchen. Da im letzten Jahrzehnt diese Verfahren sowohl hinsichtlich des Motors als auch der Prüfweise sehr entwickelt worden sind, haben sich naturgemäss in Verbindung damit die erhaltenen Werte geändert. Sofern es sich um die Untersuchung von unvermischten Kraftstoffen handelt, dürften heute die an verschiedenen Prüfstellen bei gleicher Methode erhaltenen Oktanzahlen praktisch miteinander übereinstimmen. Wird jedoch der Kraftstoff in Mischung mit einem anderen untersucht, und von diesem Mischverhalten auf die Oktanzahl des unvermischten Stoffes geschlossen, dann können je nach der

Mischungsverhältnis und dem gewählten Grundkraftstoff stark von einander abweichende Werte erhalten werden. Um hier Klarheit zu schaffen, wurden für solche Untersuchungen in der Betriebsvorschrift zum I.G.-Prüfmotor genaue Richtlinien aufgestellt, sodass die hiernach bestimmten "Mischwerte" unter sich vergleichbar sind. Es sind jedoch in Schriftumsangaben vor allem in älteren und in ausländischen, Zahlenangaben veröffentlicht, denen eine andere Prüfweise zugrunde gelegen hat. Solche Werte sind untereinander nicht vergleichbar. Da sie zudem oft als "Oktanzahlen" angegeben werden, können sie die Ursache von Missverständnissen bilden.

Begriff der Oktanzahl und des Mischwertes.

Definitionsgemäss besagt die Oktanzahl eines Kraftstoffes, dass er in einem anerkannten Prüfmotor und unter festgelegten Prüfbedingungen das gleiche Klopfverhalten zeigt wie eine Oktan-Heptan-Mischung die soviel Raumprozente Oktan enthält, wie die Oktanzahl des Kraftstoffes angibt.

Beispiel: Ein Benzin mit OZ 74 ist klopfgleich einer Mischung von
74% Oktan + 26% Heptan.

Aufgrund dieser Festlegung kann die Oktanzahl also nur für solche Kraftstoffe angegeben werden, die unvermischt untersucht worden sind.

Nun ist es nicht immer möglich, den Klopfwert unmittelbar zu bestimmen. Manchmal reicht die zur Verfügung stehende Probemenge nicht aus; in anderen Fällen liegt der Klopfwert über der Messmöglichkeit des Prüfmotors. Oft soll auch der Kraftstoff nicht rein, sondern nur zum Aufmischen von schlechten Benzinen verwendet werden. In solchen Fällen hilft man sich durch Angabe des "Mischwertes". Gemäss der Betriebsvorschrift zum I.G.-Prüfmotor wird der Mischwert folgendermassen bestimmt:

Man stellt zunächst fest, um wieviel Oktanzahlen der Klopf-wert von Eichbenzin sich ändert, wenn man dieses in Mischung mit 25 Vol.% Probe untersucht. Dann errechnet man die Verbesserung bei einem 4x25%igen Zusatz, also bei 100% und zählt diese Zahl zu dem Grundwert des Eichbenzin. Die erhaltene Summe ist der in Oktanzahlen ausgedrückte Mischwert der zugesetzten Probe. Bei der Bestimmung des Mischwertes geht man also von der Annahme aus, dass die Klopfwertzunahme dem Mischungsverhältnis verhältig ist. Es ist bekannt, dass diese Annahme in der Regel nicht zutrifft.

Der Mischwert ist also ein Rechenwert, für den nur die Oktanskala mitbenutzt wird, und kein unmittelbar gefundener Klopfwert. Der Ausdruck "Oktanzahl" widerspricht also der Art seiner Ermittlung. In den meisten Fällen wird der "Mischwert" und die "Oktanzahl" eines Kraftstoffes verschieden grosse Werte aufweisen; nur bei paraffinischen Stoffen wird zwischen diesen beiden Angaben kein wesentlicher Unterschied bestehen (Zahlentafel 1). Deshalb wird der Mischwert oft in Verbindung mit der Oktanzahl benutzt, um die Kraftstoffart zu charakterisieren (vgl.Bild 1).

Zahlentafel 1, Zusammenhang zwischen Oktanzahl und Mischwert.

Kraftstoff	MOZ	ROZ	MMV	RMV
Reinbenzol	115	über 120	83	103
Eichstoff Z	97	100	97	100
Alkohol	95	über 120	120	200

Aus der Natur des Mischwertes heraus ergibt sich weiter, dass er viel ungenauer bestimmt werden kann als die Oktanzahl. Gibt man, wie üblich, für diese eine Messgenauigkeit von ± 1 OZ an, so beträgt sie beim Mischwert ± 8 OZ.

Aus diesen Gründen sind Oktanzahl (OZ) und Mischwert (MV) nicht nur begrifflich, sondern auch sprachlich streng auseinander zu halten. Der da und dort anstelle von "Mischwert" gebrauchte Ausdruck "Mischoktanzahl" wird besser vermieden, weil er zu Verwechslungen Anlass geben kann.

Zu diesen beiden Angaben tritt noch diejenige der Prüfmethode. Der Technische Prüfstand Oppau setzt bei Bestimmungen nach der Research-Methode den Buchstaben "R", bei solchen nach der Motor-Methode den Buchstaben "M" vor den entsprechenden Ausdruck, wie in der Zahlentafel 1 angegeben ist.

Sonstige Klopfwertangaben.

Früher konnten Klopfwertbestimmungen über OZ 90 kaum durchgeführt werden. Man half sich bei Untersuchungen von sehr klopffesten Stoffen, z.B. Benzol, damit, dass man eine Eichkurve soweit als möglich aufstellte, und sie dann extrapolierte. Der so erhaltene Klopfwert wird am besten als "Extrapolationswert" (EW) angegeben. Nach der Motor-Methode weist er für Reinbenzol den MEW = 105 auf (Bild 2). Solche Bestimmungen sind aber heute nicht mehr üblich.

Manchmal möchte man auch die Wirkung verschiedener Klopfbremsen miteinander vergleichen. Hierzu stellt man fest, welche Menge nötig ist, um ein Oktan/Heptan-Gemisch von OZ 65 auf OZ 75 zu bringen. Die erhaltenen Raumprozente in der Mischung mit OZ 75 liefern dann die gewünschten Verhältniszahlen. Da diese ausserordentlich stark von der willkürlich angenommenen Oktanzahlsteigerung um 10 Einheiten abhängen, haben sie nur einen sehr bedingten praktischen Wert und werden deshalb selten bestimmt. Nachstehend sind einige dieser Vergleichswerte nach der Research-Methode angegeben:

Zahlentafel 2. Wirkungsgleiche Zusatzmengen

Bleitetraäthyl	0,03 Raum%
Eisenkarbonyl	0,09 "
Alkohol	12 "
Motorenbenzol	~30 "

Folgerungen:

Prüfmotor und Prüfbedingungen sind genormt, und im allgemeinen wird der Kraftstoff unvermischt untersucht. Den Messwerten dieser Regelfalles soll der Ausdruck "Oktanzahl" vorbehalten bleiben.

Soll jedoch aus irgendwelchen Gründen der Kraftstoff nur in Mischung untersucht werden, so soll die Versuchsdurchführung und -bewertung ausschliesslich nach den Richtlinien in der Betriebsanleitung geschehen, und die so erhaltenen Ergebnisse zur Vermeidung von Missverständnissen als "Mischwerte" bezeichnet werden.

Die jeweilige Prüfweise ist durch Voranstellen der Buchstaben "M" (Motormethode) bezw. "R" (Researchmethode) anzugeben.

Nach diesen Gesichtspunkten wird der Technische Prüfstand Oppau alle erreichbaren reinen Kohlenwasserstoffe einer Nachprüfung unterziehen

Singer

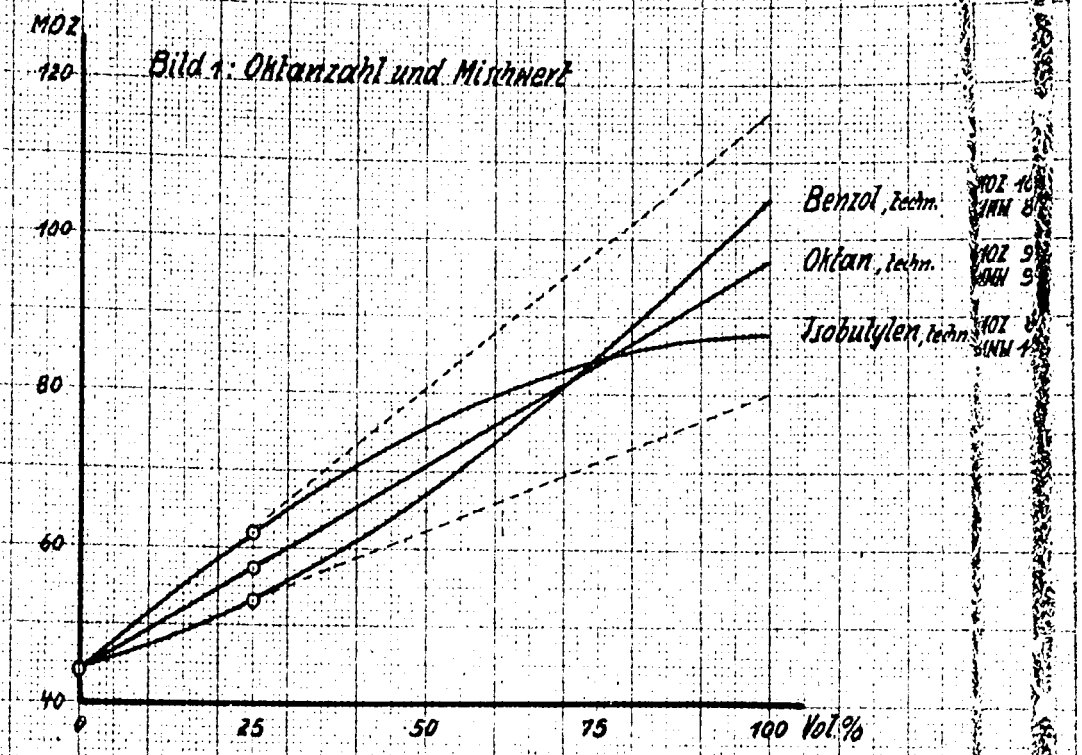


Bild 1: Oktanzahl und Mischwert

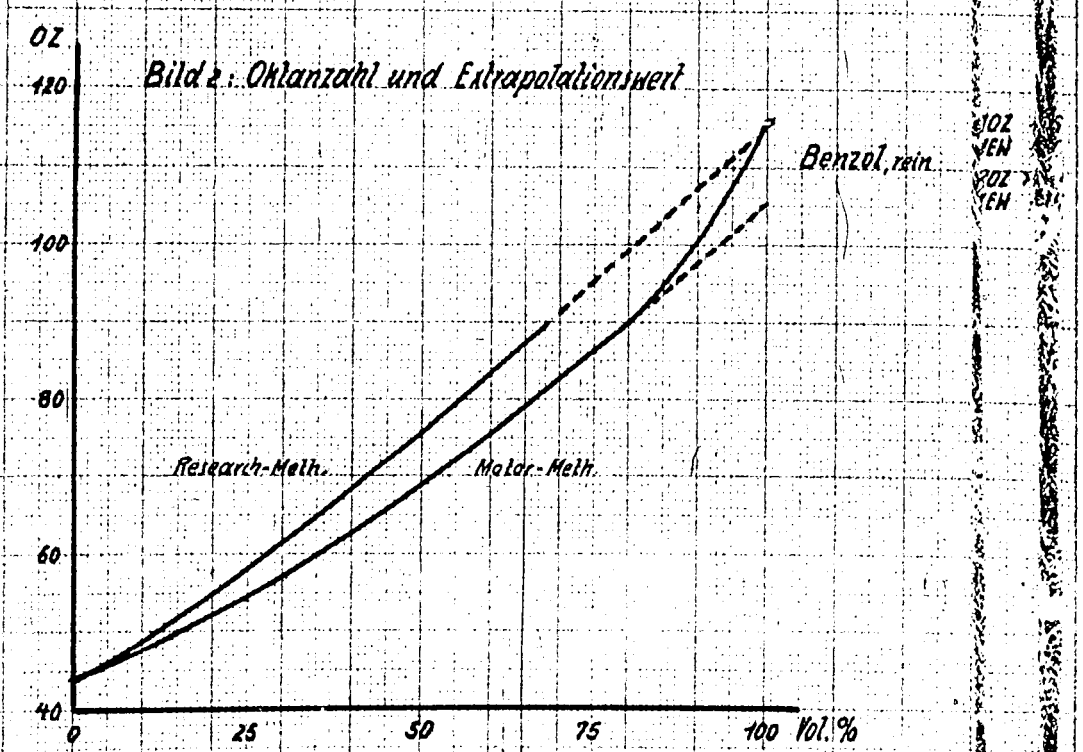


Bild 2: Oktanzahl und Extrapolationswert

23.1.1941 dr.

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh.

826

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau
Nr. 447

Untersuchung von Düsen mit dem Mengenstroboskop.

Es wurde mittels des Mengenstroboskopes die während des Spritzvorganges aus der Düse je °Kurbelwinkel austretende Kraftstoffmenge gemessen. Das Mengenstroboskop besteht aus Einspritzpumpe und Düse, die rotieren und den Kraftstoff in Taschen mit Messgläschen als Endungen einspritzen.

Die untersuchten Zapfendüsen hatten trotz verschiedener Düsenformen alle annähernd gleiche Spritzmengencharakteristik. Eine Lochdüse ergab etwas längere Einspritzzeit und etwas geringere Einspritzmenge. Die Viskosität des Kraftstoffes erhöht erst bei über 10° E (entsprechend 75 cSt) etwas die Einspritzzeit, bei gleichzeitiger Verzögerung am Einspritzende. Mit kleinem Pumpenkolben ist die Spritzmenge kurz nach Spritzbeginn am grössten und fällt dann erheblich ab, wogegen sie bei grösserem Pumpenkolben länger in der Nähe des Höchstwertes bleibt. Hoher Einspritzdruck verringert die Einspritzzeit, ergibt allerdings auch stärkere Schwankungen im Spritzverlauf, als niederer Einspritzdruck. Die Gleichmässigkeit der Einspritzungen wurde durch Aufspritzen des Kraftstoffes auf ein Filterband geprüft.

Abgeschlossen am:	10.März 1941	Die vorliegende Ausfertigung	2 enthält
Bearbeiter:	Dipl.Ing.Köhler	5 Textblätter	
		6 Bildblätter	

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1		Herrn Dir.Dr.Müller-Cunradi,			
2	25.3.41	Herrn Ob.Ing.Raichle,			
3		Herrn Dipl.Ing.Scholz, Leuna,			
4		Herrn Prof.Dr.Ing.Wilke,			
5		Herrn Dipl.Ing.Penzig,			
6		Herrn Dipl.Ing.Köhler,			
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 19. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

Untersuchung von Düsen mit dem Mengenstroboskop.

Zweck der Versuche.

Ganghärte und saubere Verbrennung eines Dieselmotors werden einerseits durch die Güte der Zerstäubung des Kraftstoffes und dessen Verteilung über den gesamten Brennraum und andererseits durch die Kraftstoffmenge und ihre Verteilung über den Einspritzvorgang beeinflusst. Zur Beobachtung der Zerstäubung hat sich das Blitzlicht-Stroboskop +) gut bewährt. Dagegen fehlte bisher noch ein zuverlässiges Gerät, mit dem die Kraftstoffverteilung über den gesamten Einspritzvorgang gemessen werden konnte. Die vorstehenden Versuche haben den Zweck, für eine Reihe von Kraftstoffen, insbesondere solchen von verschiedener Viskosität, sowie für einige Einspritzdüsen den Verlauf der Einspritzmenge während des Einspritzvorganges zu untersuchen.

Versuchsdurchführung.

Die Untersuchungen wurden mit dem nachstehend beschriebenen Mengenstroboskop, das hierfür besonders entwickelt wurde, durchgeführt. Auf Blatt 1 ist der Aufbau dieses Gerätes dargestellt, Blatt 2 zeigt es in zwei Ansichten. Seine Arbeitsweise ist folgende: Die Einspritzpumpe kreist um die feststehende Nockenwelle. Sie trägt die Einspritzdüse, die somit die Drehbewegung mitmacht. Am Umfang des von der Düsenöffnung beschriebenen Kreisbogens sind über einen Winkel von 60° Taschen angebracht, in die der Kraftstoff eingespritzt wird. Die Taschen sind in Abständen von je einem Kurbelgrad angeordnet und endigen in kleinen Messgläschen von 9 mm ∅. Wenn die Düse im Vorbeilauf Kraftstoff in die Auffanggläschen spritzt wird dieser den Messgläschen zufliessen und sich dort ansammeln.

+) s.Bericht Nr.418 des Techn.Prüfstandes

Durch diese Anordnung kann daher schon während des Versuches die Kraftstoffverteilung beobachtet werden.

Die Einspritzpumpe wird mittels Riemenscheibe durch einen Klein-Elektromotor angetrieben. Das Gerät hat ein zum Schutz gegen abfliegende Teile kräftig ausgebildetes zylindrisches Gehäuse, an dem die Kraftstoffauffangtaschen befestigt sind. Auf dem Deckel des Gehäuses ist der Drehzahlmesser der Pumpe, die Regelvorrichtung zur Mengenverstellung der Pumpe und eine Kraftstoffmessglas angebracht.

Zur Untersuchung der Gleichmässigkeit der Einspritzung wird anstelle der Auffangtaschen ein laufendes, durch einen regelbaren Motor angetriebenes Band verwendet, (vgl. Bild 2a auf Blatt 2) auf dem ein Streifen Filterpapier aufgespannt ist. Der Kraftstoff wird mit einem Farbstoff versetzt und auf das Filterband aufgespritzt. Aus Form und Gleichartigkeit der Ölflecken kann auf die Gleichmässigkeit der Einspritzung geschlossen werden. Bild 3 zeigt die Einspritzflecken einer gleichmässig arbeitenden Düse, Bild 3a diejenigen einer unregelmässig spritzenden Düse.

Versuchsergebnis.

1.) Einfluss der Düse auf den Einspritzverlauf.

Auf Blatt 4 sind die Messergebnisse an sechs verschiedenen Düsen, einer Lochdüse (DLOS 103) und fünf Zapfendüsen aufgetragen. Es ist hierbei der Flüssigkeitsstand, verzeichnet der sich je Auffangglöchen, d.h. also je ° KW ergab. Zur Messung wurden jeweils 400 Einspritzungen, bei sonst gleichen Bedingungen verwendet. Für jede Düse sind die Ergebnisse bei vier Pumpeneinstellungen eingetragen. Die Pumpenstellungen wurden willkürlich gewählt. Es entspricht Pumpenstellung 10 der kleinsten, Stellung 25 der grössten Einspritzmenge.

Die Einlochdüse DLOS 103 ergab einen ziemlich flachen Verlauf, insbesondere das Ende der Einspritzung erfolgte nur allmählich. Es lässt dies ungünstige Verbrennung erwarten und auf Nachtropfen der Düse schliessen. Die Diagramme von den Zapfendüsen weisen unter sich keine hervorstechenden Unterschiede auf. Beginn und Ende der Einspritzung erfolgte ziemlich rasch, was erwünscht ist.

2.) Einfluss der Viskosität des Kraftstoffes.

Der Einfluss der Viskosität wurde mit sechs Kraftstoffen und zwar mit Benzin von 0,7, Spindelölen von 5 bis 320 und einem Schmieröl von 1140 cSt untersucht. Es wurde hierbei die Lochdüse DLOS 103 verwendet.

Bei den dünnflüssigen Kraftstoffen (Bild 10-12) ist der Einspritzbeginn und das Einspritzende ziemlich scharf. Bei den dickflüssigeren Kraftstoffen über 50 Centistockes (Bild 13-15) schliesst die Düse träger, wodurch die Einspritzzeit etwas länger wird. Der Unterschied beträgt zwischen Benzin und dem dickflüssigsten der verwendeten Kraftstoffe mit 1140Centistockes etwa 7°Kurbelwinkel. Weil die zuletzt eingespritzten Mengen der dickflüssigeren Kraftstoffe nicht mehr genügend zerstäubt werden, ist zu erwarten, dass hierdurch schlechte Verbrennung des Kraftstoffes eintritt.

3.) Einfluss des Pumpenkolbendurchmessers.

Auf Blatt 6 ist für die Zapfendüse DN8 S2 die Einspritzmenge bei Verwendung eines Pumpenkolbens von 5 und eines von 6 mm Ø aufgetragen. Das Einspritzdiagramm ist bei Verwendung des 8 mm Kolbens wesentlich höher, weil wesentlich mehr Kraftstoff eingespritzt wird. Beim 5 mm Kolben (Bild 16) steigt die Einspritzmenge je ° KW sofort rasch an, da der Kolben jedoch weniger Kraftstoff nachliefert, fällt sie wieder et-

was ab. Das Einspritzende ist weniger scharf ausgeprägt wie beim grösseren Kolben. Bei Verwendung des 8 mm Kolbens (Bild 17) steigt die Einspritzmenge je ° KW auch sofort steil an, bleibt jedoch bei langer Einspritzzeit z.B., längere Zeit in der Nähe der Höchstmenge, um dann wieder mit Einspritzende rasch abzusinken.

4.) Einfluss des Einspritzdruckes.

Ebenso wie der Kolbendurchmesser wirkt der Einspritzdruck auf den Verlauf der Einspritzlinie ein (Bild 18, Blatt 6). Bei höherem Druck öffnet die Düse später und schliesst früher. Die Einspritzmenge schwankt während des Einspritzvorganges ziemlich heftig. Es sind hierbei Schwingungen zu erkennen, die etwa denjenigen der Vorspannfeder der Düse entsprechen. Wegen des höheren Druckes in der Einspritzleitung sind die Spitzen des Einspritzdiagramms höher als bei geringem Einspritzdruck.

Techn. Prüfstand
Oppau

Blatt 1

831

Mengenstroboskop

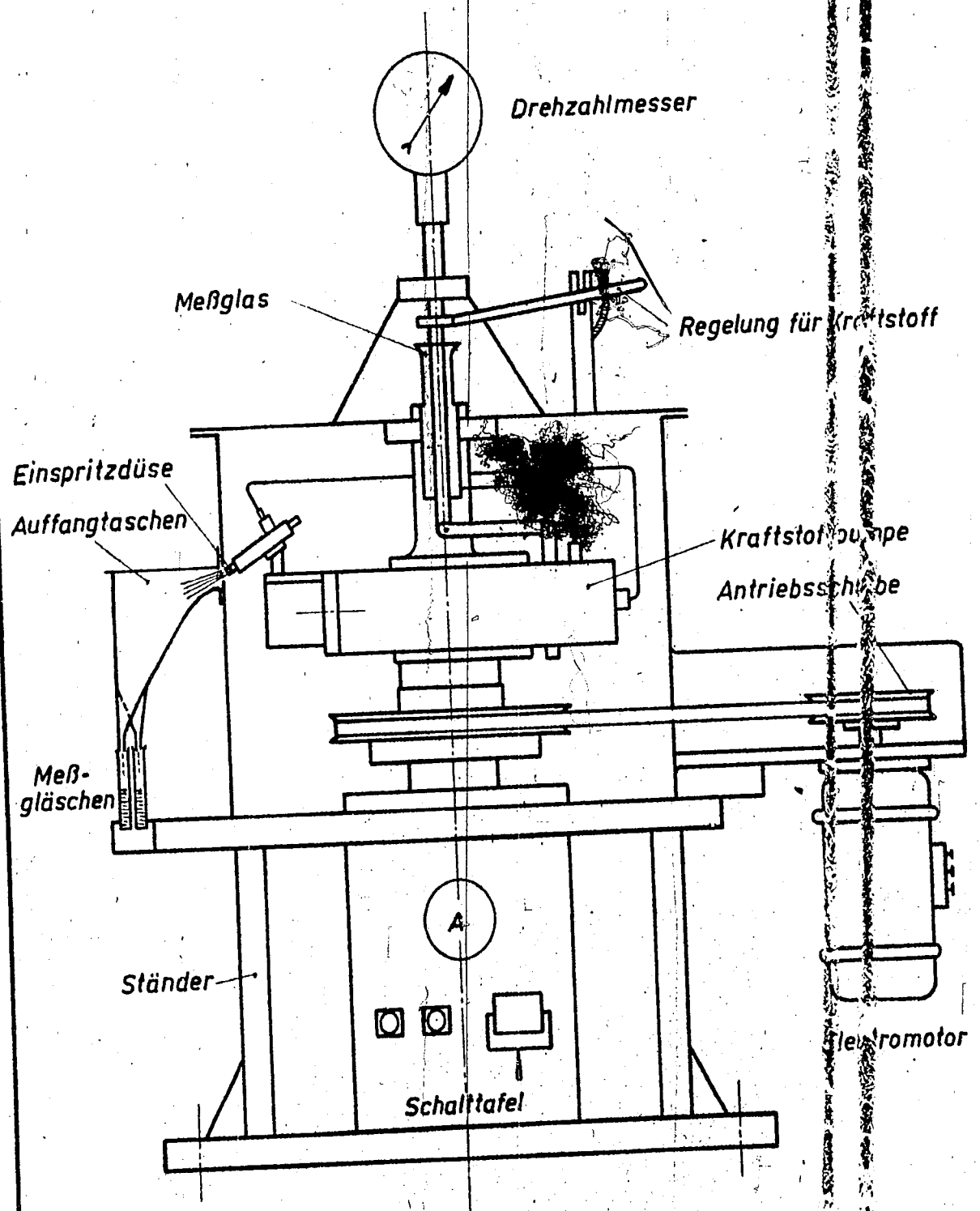


Bild 1 Aufbau des Mengenstroboskops

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen am Rhein Tag 26. 2. 41. Name Wa	Zum Bericht Nr. 447 vom 10. März 1941.	FPS. 1086

Techn. Prüfstand
Oppau

Blatt 2

832

Mengenstroboskop

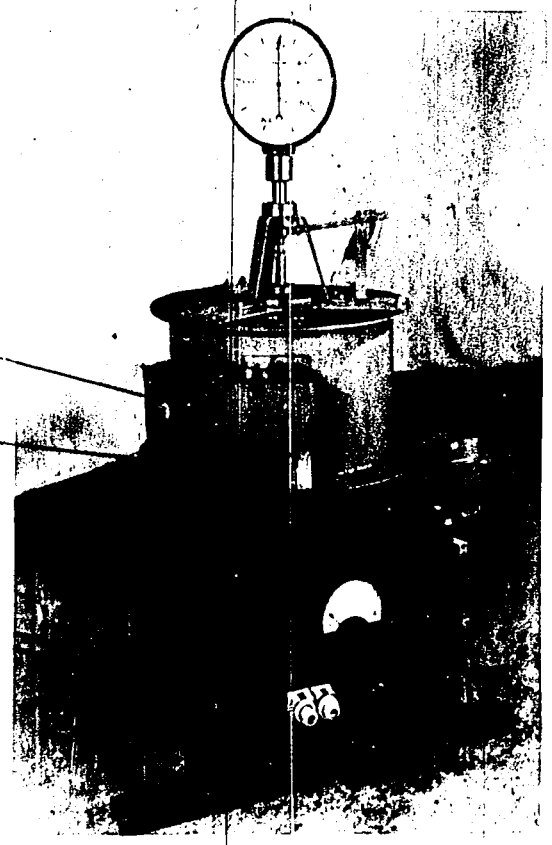


Bild 2 Ansicht des Mengenstroboskops mit den Auffangtaschen

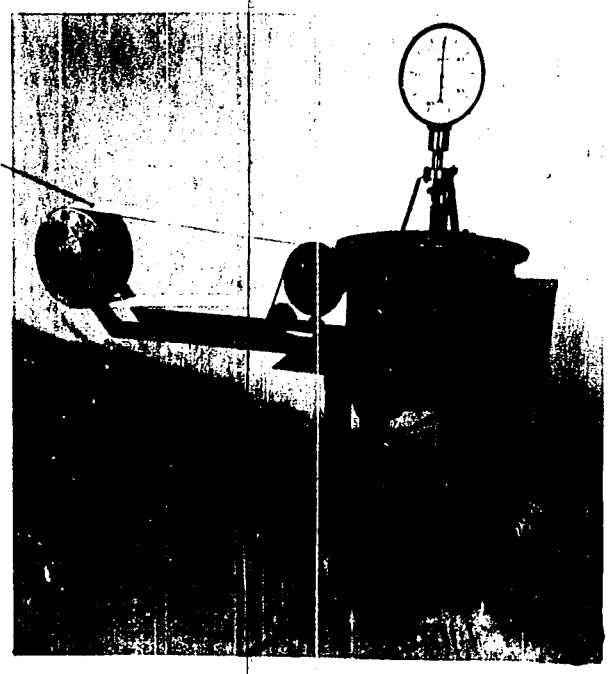


Bild2a Ansicht des Mengenstroboskops mit Band zur Aufzeichnung des Spritzstrahles

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rhein.	Zum Bericht Nr. 447 vom 10. März 1941.	TPr. S. 1087

Überwachung des Düsenstrahles

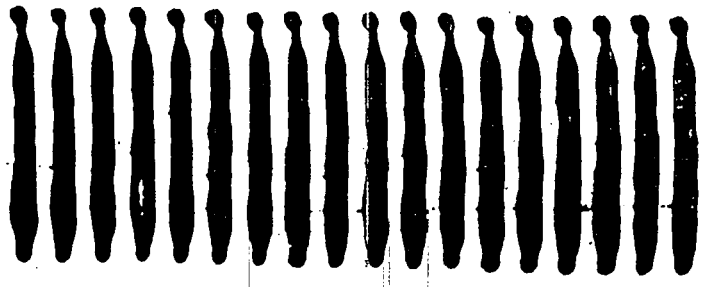


Bild 3 Spritzmarken einer gleichmäßig arbeitenden Düse

Bild 3a Spritzmarken einer ungleichmäßig arbeitenden Düse

Techn. Prüfstand
Oppau

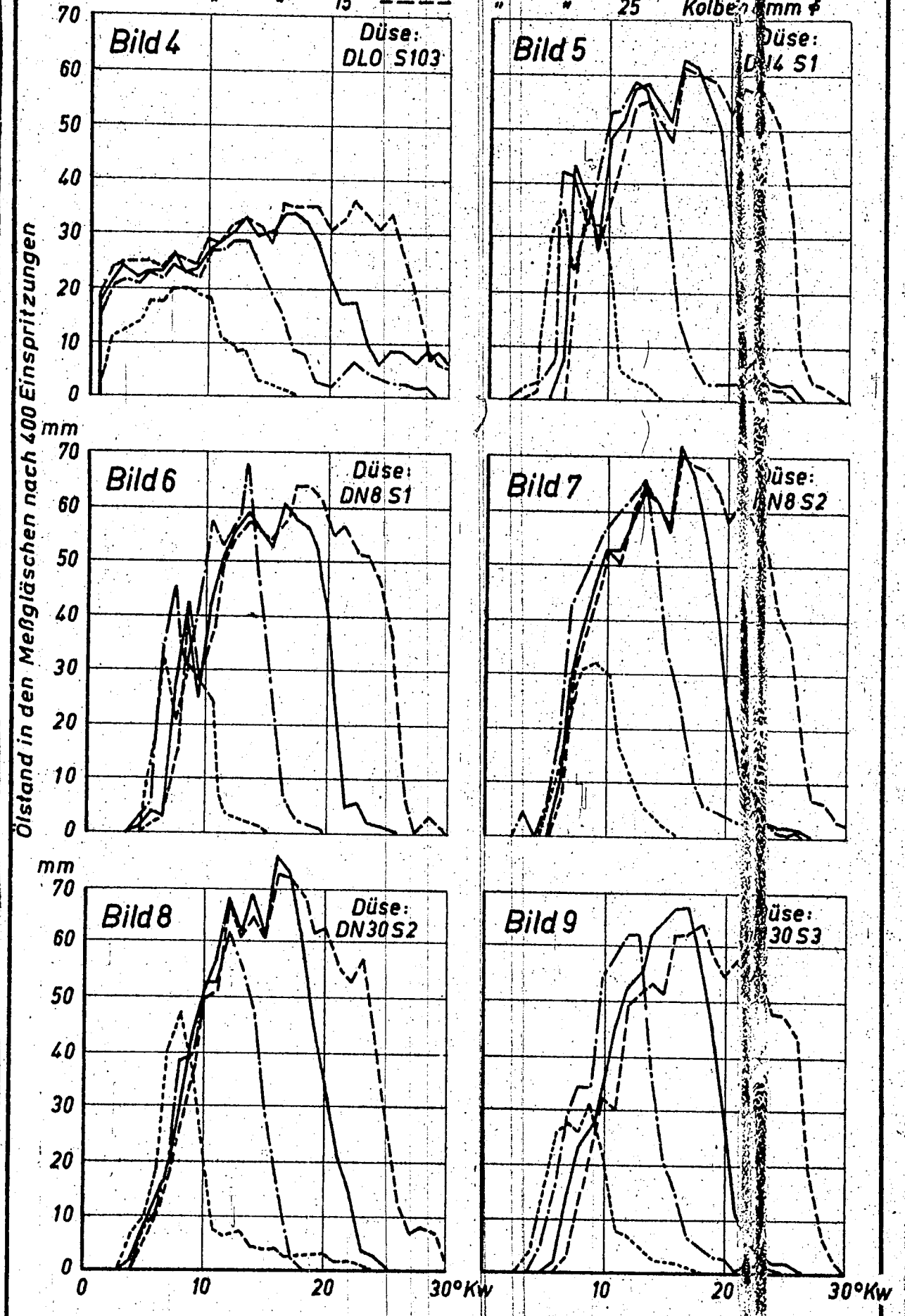
Blatt 4

Spritzverlauf verschiedener Düsen

834

Pumpenstellung 10 —— Pumpenstellung 20 Spindelöl 4° E = 320 cSt.
-·-·- " " 15 - - - - " " 25 Kolben 8 mm ⌀

Ölstand in den Meßgläschen nach 400 Einspritzungen



I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen am Rhein	Zum Bericht Nr. 447 vom 10. März 1941.	TPI S. 1088
Tag 6. 3. 41. Name [illegible]		

Techn. Prüfstand
Oppau

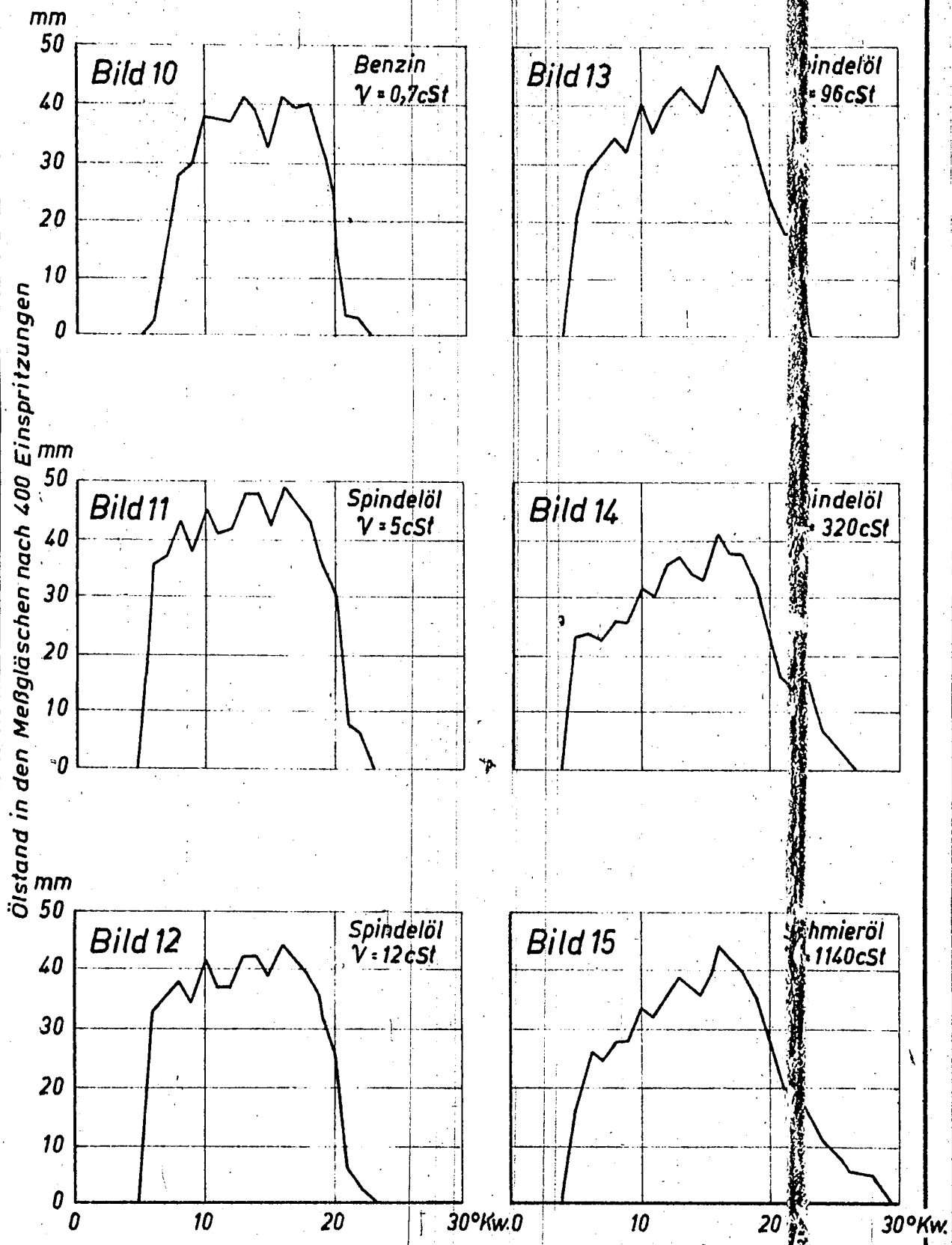
Blatt 5

835

Spritzverlauf abhängig von der Viskosität des Kraftstoffes

Düse: DLO S 103 Kolben: 5mm ϕ

Ölstand in den Meßgläschen nach 400 Einspritzungen



I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen am Rhein Tag 7. 3. 41. Name Re	Zum Bericht Nr 447 vom 10. März 1941.	TPr. 1089

chneiden

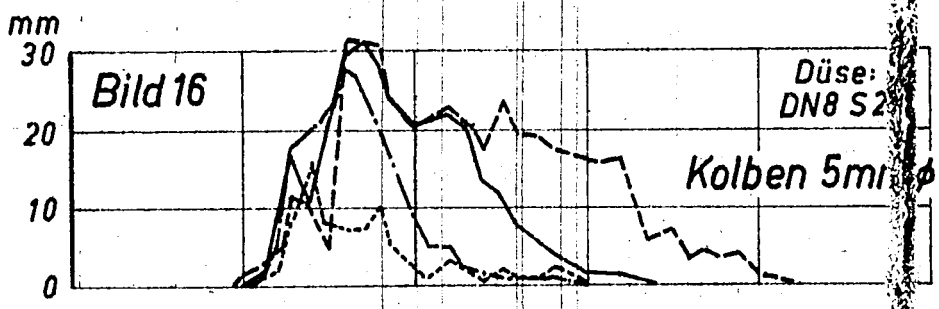
Techn. Prüfstand
Oppau

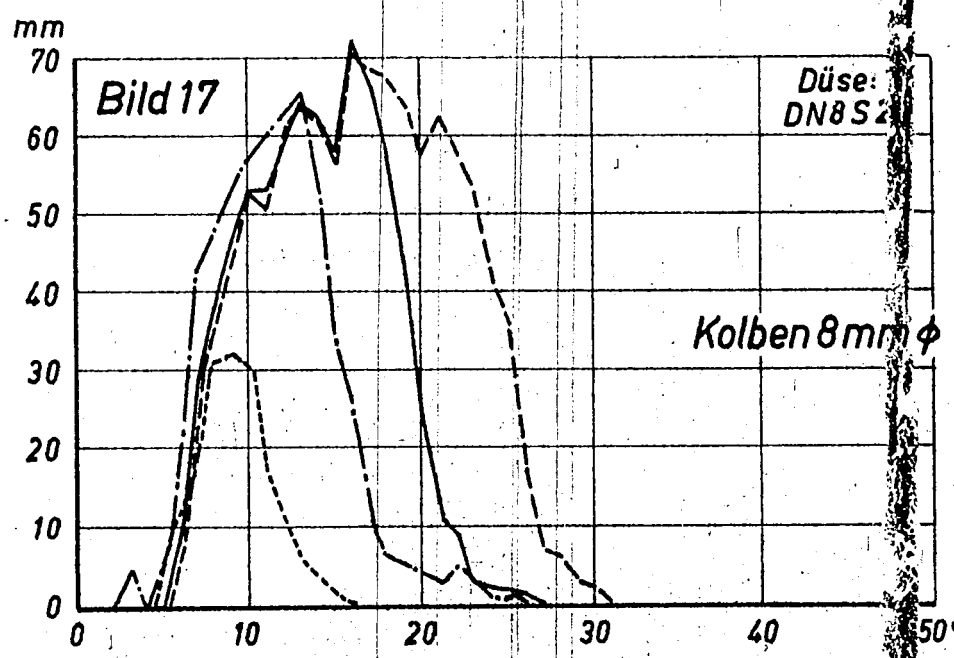
Blatt 6

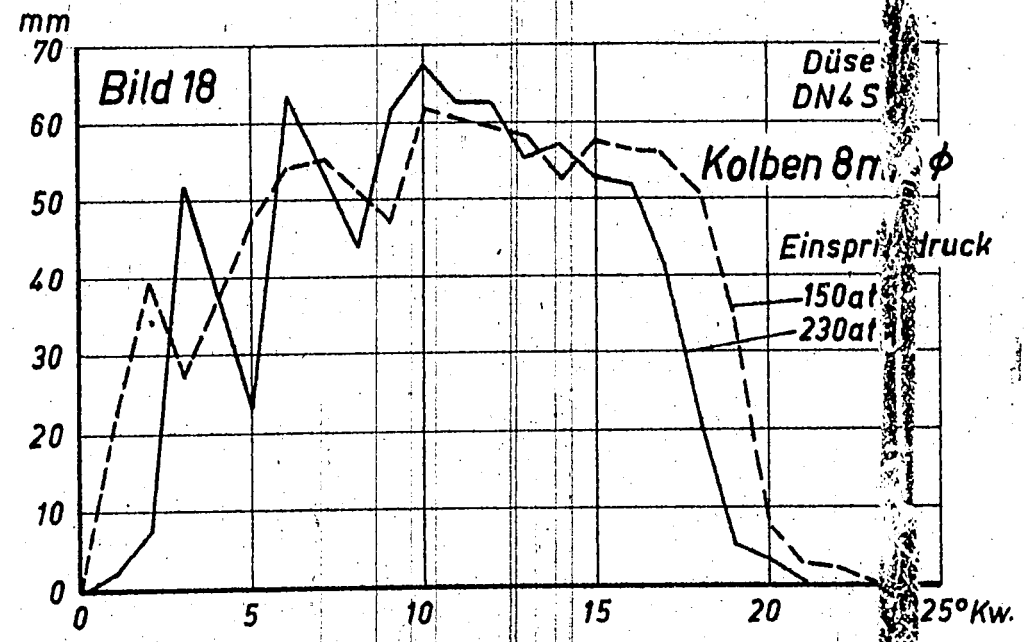
836

Spritzverlauf abhängig von Pumpenkolben und Einspritzdruck

..... Pumpenstellung 10 —— Pumpenstellung 20 Spindelöl, ν = 320 cSt
—·—·— " " 15 – – – – " " 25







I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen am Rhein Tag 7. 3. 41. Name Her	Zum Bericht Nr. 447 vom 10. März 1941	TP S. 1090

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh.

837

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 449

Über die Bestimmung der Klopfstärke.

Übersicht: Es werden zwei Ausführungsformen eines Klopfmessgerätes beschrieben. Zur Messung werden die Schwingungen herangezogen, die in einem eigens zu diesem Zweck angebrachten Schussskanal infolge des Klopfens entstehen. Die Aufnahme dieser Schwingungen erfolgt durch eine normale Quarzdose, die auf einen Verstärker arbeitet. Die verstärkten Schwingungen arbeiten bei der einen Ausführungsform über eine Leistungsröhre auf ein Anzeige-Instrument bei der anderen Ausführungsform steuern sie über eine Relaisröhre ein elektromagnetisches Zählwerk, womit einzelne Klopfstösse registriert werden können.

Abgeschlossen am: 27. Februar 1941

Bearbeiter: Dr. Schuch

Die vorliegende Ausfertigung 7 enthält
8 Textblätter
3 Bildblätter

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1		ZWB, Berlin-Adlershof,			
2		HerrnDr. Gmelin, Op. 190,			
3		Herrn Ob. Ing. Raichle, Lu. 558,			
4		Herrn Prof. Dr. Ing. Wilke,			
5		Herrn Dipl. Ing. Penzig,			
6		Herrn Dr. Schuch,			
8-10		Techn. Prüfstand.			
7	20.3.41	Hochdruckvers. Lu 558			

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 19. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

Über die Bestimmung der Klopfstärke.

Einleitung.

Klopfstärkemessungen werden z.Zt. in Deutschland meist mit Hilfe des Springstab-Indikators (1) (2)+) durchgeführt. Diese allgemeine Anwendung verdankt dieser Indikator vor allem der Einfachheit des Messverfahrens, das trotz mancher Mängel (3) recht brauchbare Werte zu erhalten gestattet (4) (5). Bei sehr starkem Klopfen, wie es beispielsweise bei Überladeversuchen auftritt, befriedigt jedoch der Springstift nicht. Auch der Klopfbeginn dürfte nur schlecht mit dem Springstab-Indikator zu ermitteln sein. Es ist daher schon öfters (5 - 19) versucht worden, ein vielseitiges Klopf-Messgerät zu schaffen. Bis jetzt hat sich jedoch keine der entwickelten Apparaturen richtig durchsetzen können.

Auf der Suche nach einem geeigneten Verfahren zur Klopfstärkemessung erwies sich nun die Heranziehung von durch das Klopfen erzeugten Schwingungen als am aussichtsvollsten. Bereits A.Köchling (1) benutzte die sog. Klopfschwingungen zur Untersuchung von Klopfvorgängen. Er führte seine Messungen an Bomben durch und zeichnete die Schwingungen mit Hilfe einer Braunschen Röhre auf. Wegen der unterschiedlichen Klopfstärke ist hierbei jedoch die unbedingt erforderliche Mittlung nur schlecht möglich. Die Mittlung ist noch schwieriger, wenn man die Klopfvorgänge am Motor untersucht. Zur Messung der Klopfstärke muss man hier zu mittelnden Geräten übergehen. Nun zeigt sich, dass in manchen Maschinen die Klopfschwingungen bei normaler Verstärkung so schwach auftreten, dass sie kaum zu irgendwelchen Messungen herangezogen werden können. Wie im folgenden angeführt ist, gelingt es jedoch auch in diesen Fällen, in einfacher Weise Schwingungen durch das Klopfen hervorzurufen, die leicht zu Messzwecken verwendet werden können.

+) Die eingeklammerten Zahlen bedeuten Literaturangaben am Schluss des Berichtes.

Grundsätzliche Arbeitsweise des Geräts.

Nimmt man mit Hilfe eines Piezo-Indikators den Druckverlauf im Zylinder einer Verbrennungsmaschine auf, so beobachtet man im Diagramm bei klopfender Maschine oft Schwingungen höherer Frequenz, die sogen.Klopfschwingungen. Sie setzen nach dem plötzlichen Druckanstieg infolge der Explosion ein und sind dem eigentlichen Druckverlauf überlagert. Jedoch sind diese Schwingungen keineswegs immer ausgeprägt vorhanden; gerade an dem meist für Klopfmessungen verwendeten I.G.-Prüfmotor sind sie beim Klopfen nur schwach oder garnicht zu beobachten. Nun lassen sich in einfacher Weise zur Messung geeignete Schwingungen durch Verwendung eines geeignet bemessenen Schusskanals, der zwischen dem Verbrennungsraum und der Quarzdose angebracht wird, hervorrufen. Die Vorbedingungen für die Ausbildung dieser Schwingungen sind dann am günstigsten, wenn die Frequenz der Eigenschwingung der Gassäule des Kanals mit der der eigentlichen Klopfschwingungen übereinstimmt.

Bei nicht klopfender Verbrennung zeigen sich im Druckdiagramm zunächst keine Schwingungen. Sobald die Maschine aber anfängt zu klopfen, treten Schwingungen direkt nach dem plötzlichen Druckanstieg auf; ihre Amplituden sind umso höher, je grösser die Klopfstärke ist. Für die Klopfmessung wird nun die Grundschwingung, die nicht weiter interessiert, herausgesiebt und es werden nur die Schwingungen höherer Frequenz verwendet. Nach Verstärkung mit einem ein- bis zweistufigen Widerstandsverstärker kann man dann diese Schwingungen zur Feststellung der Klopfstärke heranziehen (Bild 1). Wie die Aufnahmen zeigen, ist die durch das Klopfen hervorgerufene Schwingung stark gedämpft, sie enthält ausser dem Oberwellen, die jedoch auf das Messresultat ohne wesentlichen Einfluss sind, wie eingehende Versuche zeigten. Es ist allerdings eine gute Frequenzkurve des verwendeten Widerstandsverstärkers erforderlich.

Tritt nun das Klopfen bei jeder Explosion auf, so kann man die Klopfstärke, gegeben durch die Amplituden der Schwingungen, durch ein mittelndes Gerät messen. Tritt dagegen das Klopfen nur gelegentlich auf, so ist man gezwungen, mit Hilfe eines Zählwerkes die Klopfstöße in einer gewissen Zeit zu zählen bezw. sie zu registrieren.

Ausführung der Geräte.

Zur Aufnahme der Schwingungen in der Gassäule (etwa 1-3000 Hz) verwendet man eine Quarzdose, wie sie allgemein bei piezoelektrischen Druckmessungen benutzt wird, oder auch einen elektromagnetischen Geber, die mit einem geeignet bemessenen Schusskanal an den Verbrennungsraum angebracht werden. Dieser wird so gewählt, dass die Eigenschwingung der Gassäule dieses Kanals mit der eigentlichen Klopfschwingung in Resonanz steht, was am schnellsten durch Ausprobieren ermittelt wird. So war in einem Falle ein Kanal von etwa 40 mm Länge und 8 mm Durchmesser am günstigsten. Die Benutzung einer Quarzdose bringt den Vorteil mit sich, dass man leicht den Verbrennungsablauf durch ihren Anschluss an einen Gleichstromverstärker mit Braunscher Röhre kontrollieren kann. Die oben erwähnte Aussiebung der Grundschwingung erfolgt durch eine geeignete Bemessung des Eingangswiderstandes an dem verwendeten Wechselstromverstärker. Massgeblich ist hier die sogenannte Zeitkonstante, dargestellt durch das Produkt R.C, wobei R der Widerstand und C die Kapazität des Eingangskreises bedeuten. Im Druckdiagramm ist die Grundschwingung bedingt durch den Kompressions- und Explosionsverlauf. Um sie herauszusieben, muss R kleiner als etwa 10^6 Ω gemacht werden. Es sei an dieser Stelle betont, dass es sich hier nicht um eine Differentiation handelt. Auch die differentiierte Grundschwingung ist hier nicht brauchbar. Die Schaltung des Verstärkers selbst geht aus Bild 2 hervor. Es ist ein gewöhnlicher Wechselstromverstärker, bei dem als Verstärkerröhren wahlweise die Röhren AF 7 oder AC 2 benutzt werden können. Unabhängig davon, ob man das

Klopfen regelmässig oder seltener auftritt, werden zunächst die ein gehenden Schwingungen zweistufig verstärkt. Im ersten Falle werden nur diese verstärkten Schwingungen auf das Gitter einer Leistungsröhre, einer AL 4, gegeben (Bild 2).

Der Ausgangstrafo ATr im Anodenkreis dieser Röhre arbeitet auf einem Thermo-Umformer TU, an den ein Drehspul-Millivoltmeter angeschlossen ist.

Da die Intensität des Klopfens nicht ganz gleichmässig ist und ausserdem die Klopfstösse selbst relativ kurz im Vergleich zu den dazwischen liegenden Zeiten sind, so ist ein Thermo-Umformer sehr grosser Wärmeträgheit notwendig, der die Mittlung vornimmt. Auf andere Möglichkeit der Mittlung sei hier nicht näher eingegangen.

Die Messung der Klopfstärke und damit die Oktanzahlbestimmung ist eine Vergleichsmessung: Man ermittelt diejenige Mischung am Normal-Eichstoffen, die gerade den gleichen Ausschlag am Millivoltmeter liefert, wie der zu untersuchende Treibstoff. Da dabei mit Hilfe des Eingangs-potentiometers die Empfindlichkeit verändert werden kann, so darf bei Übergang von Eichkraftstoff auf den unbekannten Kraftstoff dieses nicht verstellt werden.

Die Anordnung nach Bild 2 gestattet noch, die Schwingungen mit Hilfe der Braunschen Röhre beobachten zu können. Zu diesem Zwecke ist der Ausgang der zweiten Verstärkerstufe nach aussen geführt. Da kann hier direkt die eine Platte der Braunschen Röhre angeschlossen werden. Die Beobachtung mit Hilfe der Braunschen Röhre ist zur Festlegung des Klopfbeginns besonders angenehm, weil man jeden einzelnen Klopfstoss verfolgen kann.

Falls die einzelnen Klopfstösse hinsichtlich des Auftretens (etwa 10/min) und der Intensität sehr unregelmässig sind, so ist die

Messung mit einem Instrument nur schlecht möglich. Es ist am günstigsten, nur die Stösse über einer gewissen Stärke in einer gewissen Zeit zu zählen. Das kann beispielsweise so erfolgen, dass man an dem Ausgang der zweiten Röhre des Verstärkers nach Bild 2 eine Glimmlampe legt. Falls die Schwingungen selbst nicht zur Zündung ausreichen, gibt man der Glimmlampe eine solche Vorspannung, dass sie oberhalb einer gewissen Klopf - stärke aufleuchtet. Man kann dann direkt abzählen, wieviel Klopfstösse über einer gewissen Stärke innerhalb einer gewissen Zeit im Motor auf - treten. Statt der Glimmlampe kann man von den verstärkten Klopfschwingungen auch ein elektrisches Zählwerk steuern lassen. Eine entsprechende Schaltung zeigt Bild 3, worin die ersten beiden Verstärkerstufen denen des Bildes 2 entsprechen. Nach Gleichrichtung laden die Schwingungen einen passend gewählten Kondensator C auf. Sobald dessen negative Vorspannung auf einen bestimmten Wert gefallen ist, zündet die Relaisröhre. Es fliesst ein Anodenstrom, mit dessen Hilfe der Schrittzähler (Z) in Tätigkeit ge - setzt wird. Die Löschung der Relaisröhre erfolgt über ein besonderes Relais mit Hilfe eines rotierenden Unterbrechers. Das Zählerwerk gestattet so ohne weiteres die Zahl der Klopfstösse in einer beliebigen Zeit fest - zustellen. Was dabei noch als Klopfstösse gezählt wird, hängt von der Stellung des Eingangspotentiometers ab. Daher ist es auch hier günstig, dessen Einstellung mit Hilfe eines Bezugskraftstoffes vorzunehmen.

Verwendet man ein anderes Gerät als die Quarzdose zur Aufnahme der Schwingungen, so ist darauf zu achten, dass auch hier die Grund - schwingung oder auch ihre Ableitung völlig zu unterdrücken sind. So er- hält man z.B. bei einem elektromagnetischen Geber zunächst den Diffential- quotienten des regulären Druckverlaufs. Es muss also hier die Ableitung der Grundschwingung herausgesiebt werden. Dazu kommt noch der Nachteil, dass elektromagnetische Geber leicht zu Schwingungen angeregt werden können, die nicht nur vom Druckverlauf der Verbrennung direkt herrühren.

Bisherige Erfahrungen.

Die Versuche über die Brauchbarkeit der Geräte sind heute noch nicht völlig abgeschlossen. Nach den bisherigen Erfahrungen am I.G.-Prüf - motor liefert das Gerät mit dem Anzeige-Instrument für normalen Klopf- betrieb etwa die gleichen Werte wie der Springstift. Bei Überladeversuchen am I.G.-Prüfmotor erweist es sich jedoch dem Springstab überlegen. Es ist insbesondere angenehm, dass der Kompressionsdruck ohne jeglichen Einfluss auf die Messung ist. Das Gerät mit dem elektromagnetischen Zählwerk ist in erster Linie für Überladeversuche an Flugmotoren gedacht. Orientierende Versuche haben seine gute Verwendbarkeit ergeben. Dabei stellte sich heraus dass mit der Anordnung mehr Klopfstösse gezählt werden als mit dem Gehör, da nicht alle Stösse gleich stark sind.

Was noch die Feststellung des Klopfbeginns mit Hilfe der Braun- schen Röhre anbetrifft, so ist auch hier das Gehör dem angegebenen Ver - fahren gegenüber unterlegen. Das Gehör stellt schon längst kein Klopfen mehr fest, wenn auf der Braunschen Röhre noch deutlich Schwingungen er- kennbar sind. Der Nachweis, dass dann noch Klopfschwingungen vorliegen, lässt sich leicht mit Hilfe von Eisencarbonyl erbringen.

Literatur.

1) T.Midgley jr. und T.A.Boyd: Detonation Characteristics of Blends of Aromatic and Paraffin Hydrocarbons. Ind.Eng.Chem. 14,1922,589.

2) E.Neher: Klopfmessungen an Otto-Motoren. ATM V.8234-1.

3) R.Schütz: Messung der Klopffestigkeit. Deutsche Kraftfahr-Forschung H 31, Berlin 1939. ATZ 13, 1939, 364.

4) W.Wilke: Prüfmotoren für Klopfwertbestimmung von Kraftstoffen ZdVDI 82, 1938, 1135.

5) W.Wilke: Motorische Prüfung von Kraftstoffen. Beiheft zu VDCh Nr. 3, 1939.

6) F.Postlethwaite: Measurement of Detonation. Aircr.Eng.10, 1938, 201 u.211. Luftfahrt-Schrifttum des Ausl.4, 1939, 277.

7) R.Lichtenberger u.F.Seeber: Beitrag zur Frage der Klopfmeßverfahren. ATZ 41, 1938, 372.

8) C.F.Taylor, C.S.Draper, E.S.Taylor & G.L.Williams: A New Instrument Devised for Study of Combustion. SAE Journal 34, 1934, 59.

9) J.Ratzke: Ein elektromagnetischer Indikator und Klopfmesser. Jb.d.Deutschen Luftfahrt-Forschung II, 1938, 363.

10) J.Ratzke: Beitrag zur Messung von Klopfschwingungen an Motoren. MTZ 2, 1940, 4.

11) A.Köchling: Versuche zur Aufklärung des Klopfvorgangs. ZdVDI 82,1938,1126.

12) W.S.Mount: Cathode-Ray Oszillograph in Multizylinder Detonation Work. SAE Journal 1939, 135.

13) W.Schmidt: Untersuchungen über den Klopfvorgang in Mehrzylindermotoren. ZdVDI 1940, 435.

14) K.Generlich: Untersuchungen über das Klopfverfahren von Vergasermotoren und Leichtkraftstoffen auf elektroakustischem Wege. Diss.TH.München 1936.

15) A.W.Schmidt:und K.Generlich: Untersuchungen der Klopfgeräusche von Otto-Motoren mit elektroakustischen Messgeräten. Deutsche Kraftf.-Forschung H 33, Berlin 1939.

16) C.S.Grinstead: Sound and Pressure Waves in Detonation. J.Aeronautical Sciences, Bd.6, 1939, Nr.10.

17) O.Wawrizinock: Methode zur Messung der Klopfgeräusche in Verbrennungskraftmaschinen. ATZ 34, 1931, 544, 572, 652.

18) O.Wawrizinock: Druckanstieg, Gasschwingungen und Verbrennungsgeräusche bei der Verpuffung von Kraftstoffen. ATZ 36, 1933, 73 u. 136.

19) H.Illgen und H.Hintze: Beitrag zur Prüfung von Brennstoffen mittels piezoelektrischen Indikators. Dt.Motor-Zeitschr. 34,1937,H.10, 234.

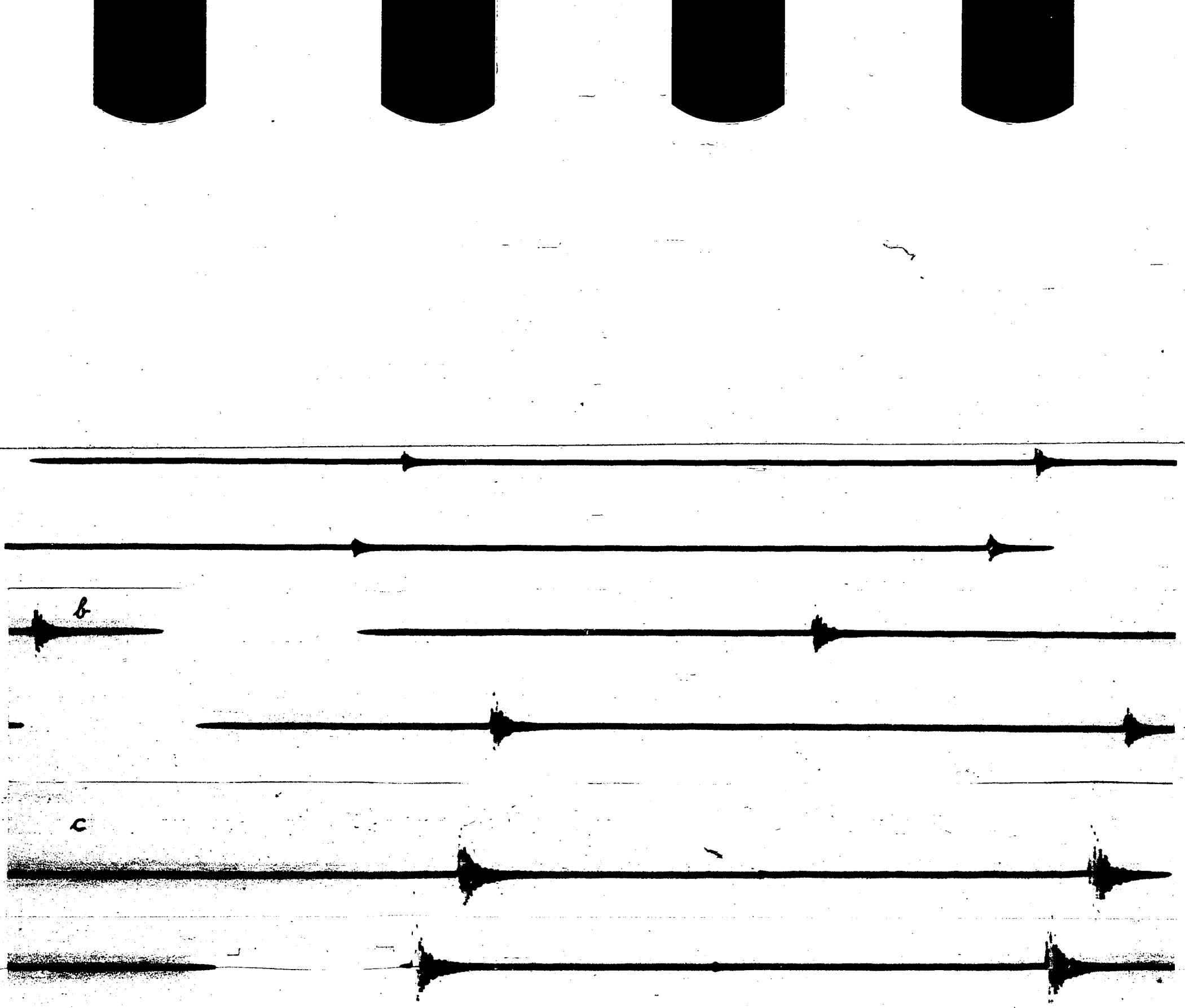


Bild 1: Klopfschwingungen im Schusskanal bei verschiedenen Verdichtungen.

Blatt 1.

Übereinstimmend mit Blatt 1 des Berichtes Nr.419 vom 27.2.1941.

845

I.G. Farbenindustrie A.G.
Ludwigshafen am Rhein a. H.

Zum Bericht Nr. 449 vom 27. Febr. 1941.

TPrüfS. 1079

Techn. Prüfstand
Oppau

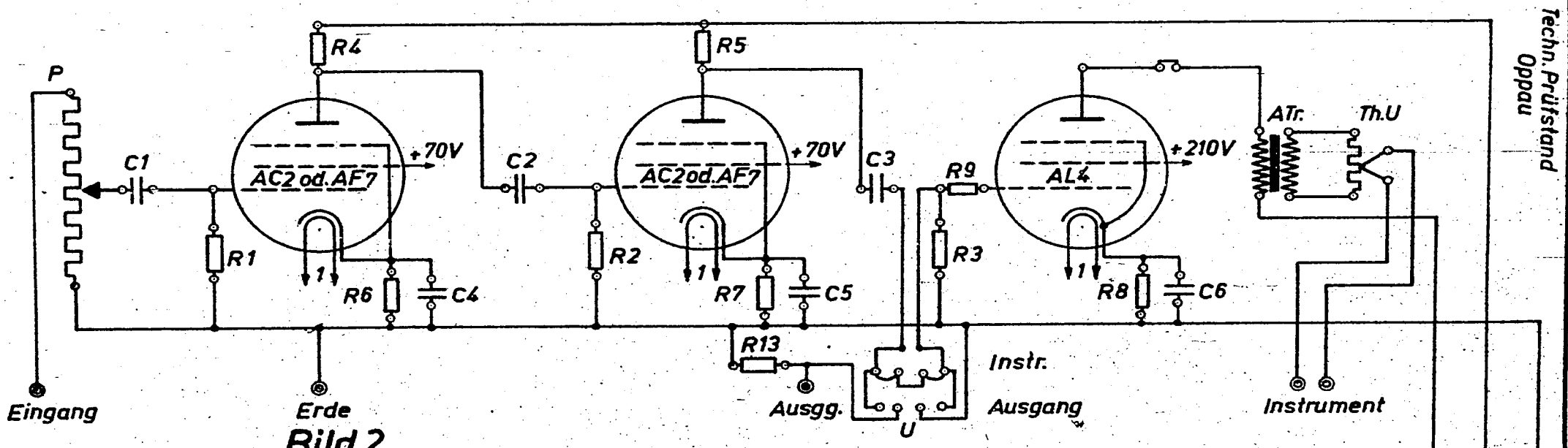
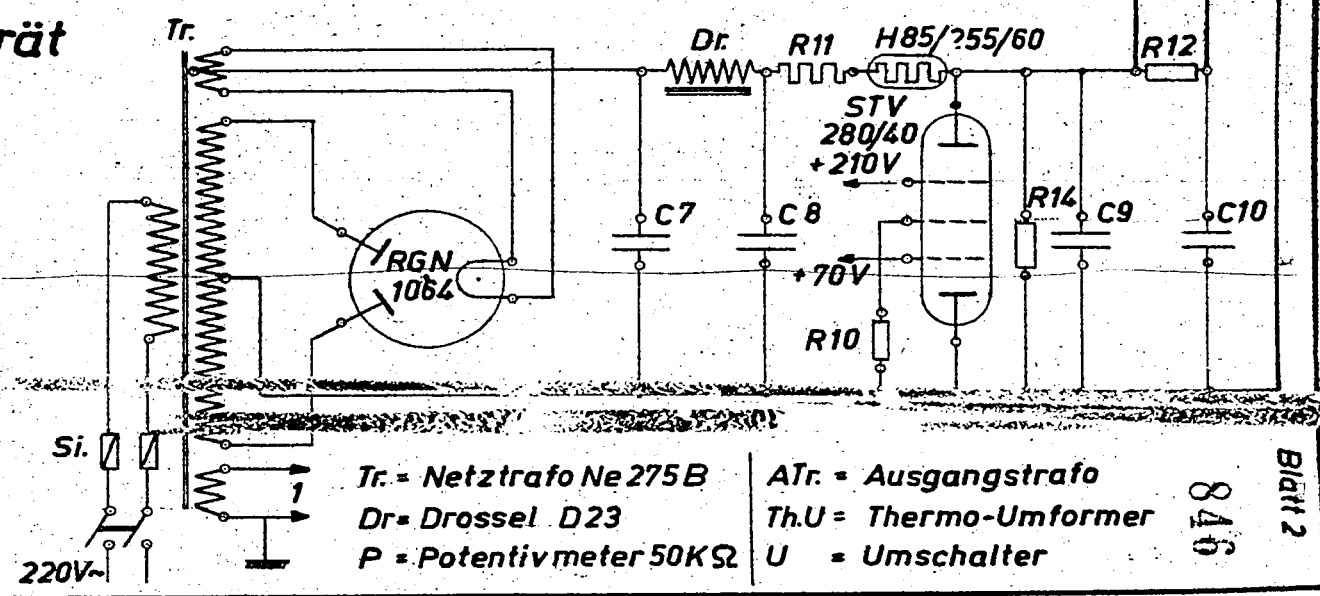


Bild 2

Schaltbild zum Klopfmeßgerät mit Thermoumformer

R 1	= 0,8 MΩ 0,5 W	C 1	= 50 000 pF
R 2	= 0,8 " " "	C 2	= 50 000 "
R 3	= 0,8 " " "	C 3	= 50 000 "
R 4	= 0,1 " " "	C 4	= 20 µF
R 5	= 0,1 " " "	C 5	= 20 "
R 6	= 5000 Ω od. 1000 Ω 0,5 W	C 6	= 20 "
R 7	= 5000 " od. 2000 " 0,5 "	C 7	= 8 " 850 V
R 8	= 350 " 2 W	C 8	= 6 " 650 "
R 9	= 1000 " 0,5 "	C 9	= 32 " 350 "
R 10	= 1 MΩ 0,5 "	C 10	= 32 " 350 "
R 11	= 4000 Ω 60 mA reg.		
R 12	= 10000 " 0,5 W		
R 13	= 0,8 MΩ 0,5 "		
R 14	= 0,1 " 2 "		



Tr. = Netztrafo Ne 275 B
Dr = Drossel D 23
P = Potentivmeter 50 KΩ

ATr. = Ausgangstrafo
Th.U = Thermo-Umformer
U = Umschalter

Blatt 2
849

I.G. Farbenindustrie A.G.
Ludwigshafen am Rhein a. Rh.

Zum Bericht Nr. 449 vom 27. Febr. 1941.

TPr. St. 1053

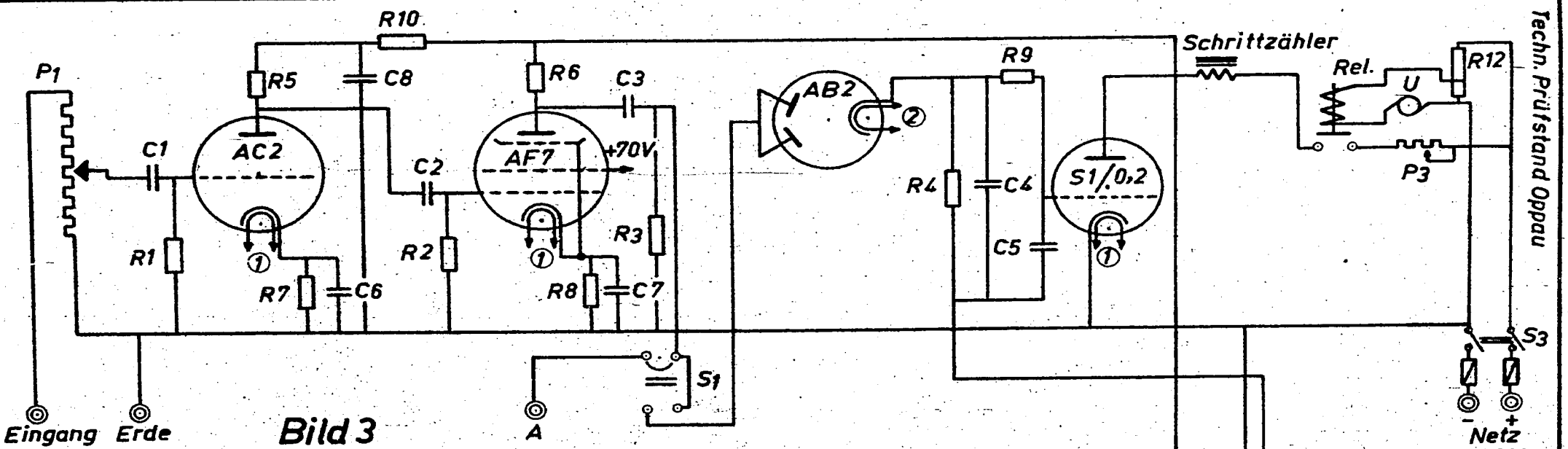
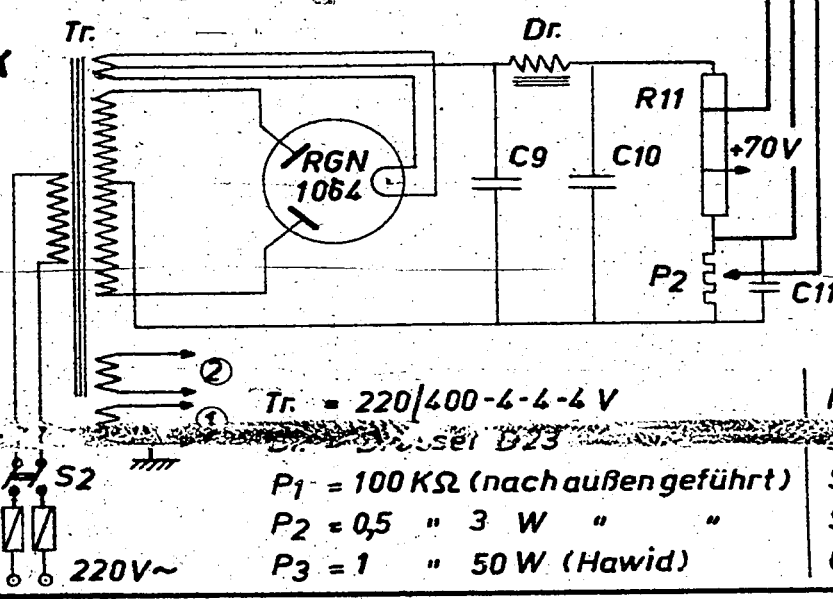


Bild 3

Schaltbild zum Klopfmeßgerät m. elektro-magnetischem Zählwerk

R1 = 0,8 MΩ	0,5 W	C1 = 50000 pF	
R2 = 0,8 "	0,5 "	C2 = 50000 "	
R3 = 1,5 "	0,5 "	C3 = 50000 "	
R4 = 1,0 "	0,5 "	C4 = 5000 "	
R5 = 0,2 "	1,0 "	C5 = 10000 "	
R6 = 0,1 "	0,5 "	C6 = 20 µF (Elektrolyt)	
R7 = 5,0 KΩ	0,5 "	C7 = 20 " " "	
R8 = 2,0 "	0,5 "	C8 = 1 " 650 V	
R9 = 1,0 MΩ	0,5 "	C9 = 8 " 500 V (Elektrolyt)	
R10 = 30 KΩ	0,5 "	C10 = 8 " 500 V " "	
R11 = 10 "	25 "	C11 = 8 " 500 V " "	
R12 = 5,0 "	25 "		



Tr. = 220/400-4-4-4 V
Dr. = Drossel D23
P1 = 100 KΩ (nach außen geführt)
P2 = 0,5 " 3 W " "
P3 = 1 " 50 W (Hawid)

Rel. = Relais
S2 = " Schalter
S3 = "
U = Unterbrecher

Techn. Prüfstand Oppau

Blatt 3

BA 7

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh.

348

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau
Nr. 464.

Bezugskraftstoffe und Meßgenauigkeit bei der Oktanzahlbestimmung.

Übersicht: Bei der Oktanzahlbestimmung bietet das Arbeiten mit dem Eichstoff Z verschiedene Vorteile, die in einem früheren Bericht Nr.440 bereits beschrieben worden sind.

Die gegen die Verwendung des Eichstoffes Z bei der Untersuchung von Benzolgemischen geäußerte Ansicht, wonach bei Oktanzahlbestimmungen das Meßergebnis umso genauer wird, je ähnlicher im Aufbau Benzinprobe und Bezugsmischung sind, wird durch die Ergebnisse von Vergleichsmessungen nicht bestätigt. Weiter ist es bisher nicht gelungen, durch eine einzige Untersuchung mit ausgewählten, sehr verschiedenartigen Eichmischungen das Wärmeverhalten des Klopfmotors zu überprüfen. Auch hieraus ergibt sich die Zulässigkeit der Verwendung einer einzigen Art Bezugskraftstoffe für alle Arten Proben.

Abgeschlossen am: 23.6.1941.

Bearbeiter: Ing. E. Singer. Singer

Die vorliegende Ausfertigung 61 enthält
Textblätter 10
Bildblätter

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1-49		Versuchsteilnehmer	58		Schaffgotsche Berlin G.m.b.H.,Odertal
50		H.W.A.,Berlin			
51		R.L.M.,Berlin	59		Abt.Öle, Berlin
52		Wifo, Berlin	60		Deurag, Hannover
53		Z.B.Berlin	61		Herrn Dir.Dr.Pier
54		T.H.Braunschweig	62		Herrn Dr.Kuhn übe
55		Ethyl G.m.b.H.,Berlin			Herrn Dir.Dr.Müll r-Cunrad
56		Erprobungsstelle,Rechlin			
57		Intava, Hamburg	63		Herrn Dr.Schunk,Leuna-Werke
			64-70		Techn.Prüfstand Oppau.

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 19. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

Bezugskraftstoffe und Meßgenauigkeit bei der Oktanzahlbestimmung.

Aufgrund seiner Vorteile gegenüber Benzol als Unterbezugskraftstoff zur Oktanzahlbestimmung, nämlich geringere Streuungen beim Aufstellen der Eichkurve, gradliniger Verlauf der Eichkurve, leichte Überwachung der Eichkurve, leichtes Messen von Oktanzahlen bis zu OZ 98, leichte Verlängerung der Eichkurve über OZ 100 hinaus und der günstigen Lage des Gefrierpunktes wird der Eichstoff Z in steigendem Maße zur Klopfwertbestimmung herangezogen. Da er in Mischung in dem I.G.-Eichbenzin stets einen rein paraffinischen Bezugskraftstoff darstellt, wie es in gleicher Weise auch Oktan/Heptangemische sind, wurde schon der Vermutung Ausdruck gegeben, daß seine Verwendung auf die Untersuchung von paraffinischen Benzinen beschränkt sein könnte und daß Benzolgemische mit Benzin/Benzol als Bezugsmischung genauer untersucht werden könnten. Daß dem nicht so ist, zeigen die Ergebnisse einer großen Zahl von Prüfstellen.

Es ist bekannt, daß die Benzine unterschiedlich auf Änderungen in den Betriebsbedingungen des Motors ansprechen. Diese Eigenschaft bezeichnet man als "Wärmeempfindlichkeit"; sie steigt in der Reihenfolge Paraffine - Naphtene - Aromaten - Olefine an. In der Regel wird die Wärmeempfindlichkeit eines Kraftstoffes angegeben als der Unterschied zwischen den Oktanzahlen nach den Bestimmungen nach der Research- und Motor-Methode. Sie beträgt beispielsweise bei einem unvermischten Hydrierbenzin etwa 1 bis 2 OZ, und bei einem Benzin-Benzol-

Gemisch etwa 6 bis 8 OZ.

Vielfach wird nun angenommen, daß Oktanzahlbestimmungen umso zuverlässiger durchgeführt werden könnten, je ähnlicher im Aufbau sich Benzinprobe und Bezugskraftstoff sind. Es wird hierbei vermutet, daß etwaige Störungen im Wärmezustand des Motors (z.B.Glühstellen) sich auf Probe und Bezugskraftstoff in ähnlicher Weise auswirken und damit aufheben werden, während umgekehrt, wenn diese beiden Stoffe eine verschieden große Wärmeempfindlichkeit aufweisen, je nach dem zufälligen Wärmezustand des Motors verschiedene und damit streuende Meßwerte zu erwarten wären. Aus diesem Grunde wurde schon vorgeschlagen, Reinbenzine mit paraffinischen Eichstoffen, Benzolgemische dagegen mit aromatischen Eichmischungen zu vergleichen und im Interesse einer Verringerung der Streugrenze die Umständlichkeit und neue Fehlermöglichkeit bei der Verwendung von verschiedenartigen Eichstoffen in Kauf zu nehmen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß bei der Verwendung von Eichstoffen mit gleichem Aufbau wie die Benzinprobe keine Gesetzmäßigkeit der Meßgenauigkeit vorhanden ist, denn es sind sowohl Fälle mit größeren als auch mit kleineren Streugrenzen als bei artungleichen Stoffen beobachtet worden. Im Folgenden sollen von den vielen, in der Praxis vorkommenden Möglichkeiten nur die paraffinischen und aromatischen Kraftstoffe betrachtet werden.

Versuchsergebnisse.

Zur Überprüfung dieser Annahmung war es nicht notwendig, besondere Versuche anzustellen, da auf die schon vorhandenen Meßergebnisse zurückgegriffen werden konnte. (Vergl.besonders Bericht Nr.420

vom 27.4.1940). Diese Meßwerte wurden bei den Vergleichsversuchen, die halbjährlich unter der Führung des Technischen Prüfstandes Oppau seit vier Jahren von vielen deutschen Prüfstellen durchgeführt werden, erhalten. Durch die große Teilnehmerzahl wird erreicht, daß etwaige einzelne Fehlmessungen als solche sofort erkannt und somit Fehlschlüsse weitgehend vermieden werden.

a.) Meßergebnis mit gleichartigen Stoffen.

Bei der Versuchsreihe 75 arbeitete die Mehrzahl der Teilnehmer mit Eichbenzin/Eichbenzol als Unterbezugskraftstoff. Sie konnten deshalb bei der Versuchsauswertung als "Benzolgruppe" gesondert zusammengefaßt werden.

Unter den zu untersuchenden Kraftstoffproben befand sich eine Benzin-Benzolmischung 5c, deren Klopfwert durch diese "Benzolgruppe" mit einer Meßgenauigkeit von ± 1,0 ROZ bestimmt werden war gegenüber ± 1,0 ROZ bei der Untersuchung von Reinbenzin, Spritbenzin, Bleibenzin und Benzolgemisch. Man erkennt, daß bei diesem Versuch keine Steigerung der Meßgenauigkeit erreicht werden ist.

Bei der Versuchsreihe 92 wurde u.a. das vorwiegend paraffinische Benzin 7a untersucht durch paraffinische Eichmischungen aus Benzin und Eichstoff Z. Hierbei betrug die Meßgenauigkeit ± 0,3 ROZ gegenüber sonst ± 0,7 ROZ bei den Untersuchungen an 4 verschiedenartigen Benzinproben. Auch hier konnte bei Messungen durch artverwandte Kraftstoffe keine besonders günstige Streugrenze erhalten werden.

Ähnliche Ergebnisse wurden bei der Versuchsreihe Nr.82 bei der Untersuchung des Paraffinbenzines 6a durch den paraffinischen Eichstoff Z erhalten. Während die Meßgenauigkeit bei allten Benzinen ± 0,9 ROZ betrug, wurde der Klopfwert der Probe 6a mit ± 1,0 ROZ, also etwas schlechter ermittelt.

Hingegen wurde bei der Aufstellung der Eichlinie Oktan/ Eichstoff Z bei der gleichen Untersuchungsreihe Nr.82 mit beträchtlich geringeren Streugrenzen gearbeitet. Zwar betrug diese bei der Messung des reinen Eichbenzins noch ± 0,8 ROZ, sank jedoch mit steigendem Zusatz an Eichstoff bis zu ± 0,3 ROZ beim unvermischten Eichstoff.

Zusammenfassend läßt sich also über die Streugrenze beim Messen durch artgleiche Bezugskraftstoffe sagen, daß, mit Ausnahme des Sonderfalles der Aufstellung der Z-Eichkurve, die Streugrenze gegenüber sonst beobachteter Meßgenauigkeit sich nicht verringert hat.

b.) Meßergebnis mit ungleichartigen Steffen.

In den bisher erwähnten Versuchsreihen finden sich auch Beispiele, wonach Probe und Bezugskraftstoff verschiedenartig sind. So untersuchte im Zuge der Versuche Nr.75 die schon erwähnte "Benzolgruppe" den vorwiegend paraffinischen Kraftstoff 5a mit einer aromatischen Eichmischung und erzielte Hierbei eine Meßgenauigkeit von ± 0,8 ROZ, also ein besseres Ergebnis als beim Messen der Benzolmischung 5c mit ± 1,0 ROZ.

In der Versuchsreihe 92 wurde beim Untersuchen des Benzolgemisches 70 durch die paraffinische Z-Mischung eine Meßgenauigkeit von ± 0,7 ROZ erhalten, während, wie schon erwähnt, bei der artgleichen Probe 7a nur eine solche von 0,8 ROZ erhalten werden konnte.

Zu dem gleichen Ergebnis gelangten die Versuche Nr.6c, ebenfalls mit Eichstoff Z durchgeführt. Hierbei wurde das Benzolgemisch 6c auf ± 0,8 ROZ genau gemessen im Gegensatz zu der ähnlich aufgebauten Probe 6a, bei deren Klopfwertbestimmung eine Streuungenze von ± 1,0 ROZ ermittelt werden ist.

Zusammenfassend läßt sich also sagen, daß beim Messen von Kraftstoffproben durch artverschiedene Bezugskraftstoffe durchaus keine Verschlechterung der Meßgenauigkeit beobachtet werden konnte, sondern das Gegenteil häufiger der Fall war.

Das interessanteste Ergebnis der Versuche über den Zusammenhang zwischen der Meßgenauigkeit einerseits und der artgleichen Zusammensetzung von Probe und Eichmischung andererseits wurde bei den Messungen mit Oktan / Heptan (paraffinisch) gegenüber Benzol/Heptan VV 92 (hocharomatisch) erhalten. Auch diesen Messungen lag der eingangs erwähnte Gedanke zu Grunde, daß sich ein etwaiges unterschiedliches Wärmeverhalten der Prüfmotoren äußern müßte, in einem verschieden großen Benzolwert gegenüber einer festbleibenden Oktanzahl. Demzufolge ermittelte jeder Klopfprüfstand das Benzol-Heptan-Gemisch, das sich mit einer Mischung aus 80 Vol % Oktan und 20 Vol % Heptan als klopfgleich zeigte. Die erhaltenen Werte nach der Research-Methode sind in der Zahlentafel 1 angegeben, in die auch der Mittelwert und die jeweiligen Streugrenzen mit aufgenommen sind.

Zahlentafel 1.

Meßwerte und Streugrenzen nach der Research-Methode.

Benzolwerte für ROZ 80.

I.G.-Prüfmotoren			CFR-Motoren.		
Prüfstand	Bo-Wert	Δ Bo	Prüfstand	Bo-Wert	Δ Bo
1	66,0	- 2,3	1a	68,5	+ 0,1
5	67,0	- 1,3	1b	68,5	+ 0,1
6	67,5	- 0,8	3	68,2	- 0,2
8	69,5	+ 1,2	4	69,0	+ 0,6
10	67,8	- 0,5	5	67,0	- 1,4
12a	68,0	- 0,3	9	67,8	- 0,6
12b	68,0	- 0,3	11	68,0	- 0,4
13	67,9	- 0,4	17	68,6	+ 0,2
16	68,5	+ 0,2	21	68,5	+ 0,1
17a	67,4	- 0,9	27	69,2	+ 0,8
17b	68,6	+ 0,3	31	69,1	+ 0,7
18	68,0	- 0,3	34	69,4	+ 1,0
19	68,3	+ 0	37	70,0	+ 1,6
20	69,3	+ 1,0	39	65,9	- 2,5
21	68,0	- 0,3			
29a	68,0	- 0,3			
29b	67,5	- 0,8			
31	69,2	+ 0,9			
32	70,0	+ 1,7			
33	68,5	+ 0,2			
34	67,5	- 0,8			
36	68,0	- 0,3			
41	69,5	+ 1,2			
43	70,0	+ 1,7			
44	(74,2)	(+ 5,9)			
46	68,2	- 0,1			
49	68,2	- 0,1			
Mittelwert	68,3	± 0,8		68,4	± 0,7

Mittelwert aus beiden Motoren: Benzolwert = 68,4 BO.

Streugrenze = ± 0,8 ROZ.

Die bei diesem Versuch erhaltene mittlere Meßgenauigkeit ist m = ± 0,8 Benzoleinheiten = etwa 0,8 ROZ außerordentlich gut; vergleichsweise betrug bei den Untersuchungen an allen Kraftstoffen die Meßgenauigkeit, wie schon erwähnt, ± 0,7 ROZ. Es hat also auch der Vergleich von so ganz verschiedenartigen Kraftstoffen wie hier es nicht vermocht, die Meßgenauigkeit wesentlich zu verändern, und gerade dieses Beispiel dürfte mit geeignet sein, die weit verbreitete und zunächst sehr einleuchtende Ansicht über eine Wechselwirkung zwischen der Art des Bezugskraftstoffes und der Art der Kraftstoffprobe, soweit beide für die Oktanzahlbestimmung in Frage kommen, richtigzustellen. Es mag in diesem Zusammenhang noch erwähnt werden, daß bereits bei ähnlichen früheren Versuchen, bei welchen der Benzelwert auf die Oktanzahl 65 abgestimmt werden sollte, das gleiche negative Ergebnis erhalten worden ist.

Zur besseren Übersicht sind die erwähnten Versuchsergebnisse in der Zahlentafel 2 zusammengestellt.

Auch nach der Motor-Methode wurden mit den gleichen oder ähnlichen Proben und Bezugskraftstoffen die sinngemäß gleichen Messungen durchgeführt mit der Einschränkung, daß im Falle der Verbleiung der Probe die Bezugsmischung unverbleit geblieben ist. Auch nach diesen Ergebnissen, die in der Zahlentafel 3 angeführt sind, konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Meßgenauigkeit und der Art des Bezugskraftstoffes festgestellt werden. Ergänzend sei noch mitgeteilt, daß bei der Abstimmung der Benzel/Heptan-Mischung auf OZ 80 ein Benzolwert von 77,8 nach der Motor-Methode erhalten wurde gegenüber einem solchen von 68,4 nach der Research-Methode, was die Wärmeempfindlichkeit der gewählten Mischung beweist.

Zahlentafel 2.

Streugrenzen beim Untersuchen von gleichen und verschiedenartigen Kraftstoffen.

Research-Methode.

Kraftstoff-Bez.	Probe	Eich-stoff	Messgenauigkeit bei der Probe allein	Messgenauigkeit bei allen Messungen	Bemerkungen
Probe 5c	A	A	1,0	1,0	gleichartige Stoffe
Probe 7a	P	P	1,8	0,7	" "
Probe 6a	P	P	1,0	0,9	" "
Eichkurve Z	P	P	0,8-0,3	0,9	" "
Probe 5a	P	A	0,8	1,0	ungleichartige Stoffe
Probe 7c	A	P	0,7	0,7	" "
Probe 6c	A	P	0,8	0,9	" "
80% Oktan	P	A	0,8	0,7	" "

A = aromatisch
P = paraffinisch.

Zahlentafel 3.

Streugrenzen beim Untersuchen von gleichen und verschiedenartigen Kraftstoffen.

Motor-Methode.

Kraftstoff-Bez.	Probe	Eich-stoff	Messgenauigkeit bei der Probe allein	Messgenauigkeit bei allen Messungen.	Bemerkungen
Probe 5c	A	A	0,9	1,2	gleichartige Stoffe.
Probe 71	P	P	0,5	0,7	" "
Probe 61	P	P	0,7	0,8	" "
Eichkurve Z	P	P	0,7-0,5	0,8	" "
Probe 5a	P	A	0,9	1,2	ungleichartige Stoffe.
Probe 72	A	P	0,9	0,7	" "
Probe 63	A	P	0,8	0,8	" "
80% Oktan	P	A	0,9	0,7	" "

Folgerungen .

Aus den Versuchsergebnissen ergibt sich, daß die Meßgenauigkeit bei der Oktanzahlbestimmung nicht abhängig ist von der Gleichartigkeit des Bezugskraftstoffes mit der Kraftstoffprobe. Die Brauchbarkeit der paraffinischen Unterbezugskraftstoffe Eichstoff Z / Eichbenzin auch zu Messungen von Benzolmischungen ist damit erwiesen.

~~Anlage: Tabelle 1.~~

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh.

858

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau Nr. 488

Wärmeübergang und Temperaturverteilung in einem Kontaktrohr von 250 mm ∅

Übersicht: An einem Kontaktofen von 258 mm ∅ und 1 m Länge wurden Wärmeübergangsmessungen durchgeführt. Der Ofen hatte einen mit Dampf beheizten Mantel (100°C) und wurde innen von Luft (20°C am Eintritt) durchströmt. Untersucht wurde ein Kohlekontakt in Form zylindrischer Pillen. - Für verschiedene Luftmengen wurden die Erwärmungskurven an mehreren Stellen im Kontaktraum gemessen und die Wärmeübergangszahlen sowie die Widerstandsbeiwerte der Strömung bestimmt.

Abgeschlossen am: 29.1.1942 Gr.

Bearbeiter: Dr.-Ing.G.Kling

G. Kling.

Die vorliegende Ausfertigung enthält

7 Textblätter

9 Bildblätter

1 Tabelle

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1		Herrn Dir.Dr.Lappe			
2		Herrn Dir.Dr.Pier			
3		Herrn Obering.Raichle			
4		Herrn Dipl.Ing.Müller			
5		Herrn Dr.Andres			
6		Herrn Ing.Raeder			
7		Herrn Dr.-Ing.Kling			
8		Techn.Prüfstand			
9					
10					
11					
12					

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 19. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

Wärmeübergang und Temperaturverteilung in einem Kontaktrohr von 250 mm ∅

1.) Einleitung:

Für den Entwurf und die Weiterentwicklung neuer Kontaktaufbereitungsöfen waren Unterlagen erforderlich über Wärmeübergangszahlen von der Ofenwand an das Kontaktgut, über die Wärmeeindringung abhängig von der Zeit und über die Temperaturverteilung im Ofen bei Beharrungszustand. In der Weisserdefabrik, Bau Lu 35, sollten ursprünglich diese Messungen an einem Versuchsofen von 300 mm ∅ und 1,2 m Höhe durchgeführt werden. Dieser Ofen hatte eine grössere Zahl von Thermoelementen im Kontaktraum. Innen strömte N_2 hindurch; die Rohrwand war aussen von einer elektrischen Strahlungsheizung umgeben. Die Messungen zeigten jedoch, dass an diesem Ofen keine Versuche möglich waren. In dem weiten Zwischenraum von dem Heizband der Strahlungsheizung zur Ofenwand traten starke Luftströmungen auf. Die aufsteigende warme Luft heizte nur den obersten Teil des Ofens, während der untere Ofenteil ganz kalt blieb. Auch die Wandung des N_2-Ableitungsrohres wurde von der Mantelluft so erhitzt, dass eine viel zu hohe Austrittstemperatur gemessen wurde. Es wurden daher keine weiteren Messungen an diesem Ofen durchgeführt, zumal er für andere Zwecke benötigt wurde. Die Versuche wurden statt dessen in einer geeigneteren Apparatur im Technischen Prüfstand Op.471 durchgeführt, die in dem folgenden Bericht niedergelegt sind.

2.) Beschreibung der Apparatur:

Der Versuchsofen besteht aus einem Rohr von 258 mm ∅, das aussen mit einem Heizmantel umgeben ist. Die Kontaktmasse ist im Innern zwischen zwei Sieben gelagert und wird von unten nach oben von Gas durchströmt (s.Abb.1).

Die Gaseintrittstemperatur t_1 [°C] wird unter dem Kontaktraum, die Gasaustrittstemperatur t_2 [°C] in der Verengung der seitlichen Abgasleitung mit Hg-Thermometern gemessen. Die Gasmenge wird bei kleinen Mengen in einer Gasuhr, bei grossen Mengen in einer geeichten Blende ermittelt. Die Wandtemperatur t_w [°C] des Ofens wird als Mittelwert aus den Anzeigen von 6 Wandthermoelementen bestimmt. Im Kontaktgut sind in zwei Ebenen, je 250 mm vom oberen und vom unteren Sieb entfernt, jeweils vier Thermoelemente eingelegt. Dabei sind die Elemente in eine Bohrung des Kontaktkornes hin - eingesteckt (s.Abb.1, Nebenfigur). Die Drähte sind durch zwei Richtungen des Deckels nach aussen geführt. - Für Strömungsmessungen sind zur genauen Druckentnahme unter und über dem Kontaktraum ringsum eine Reihe von Bohrungen angebracht, die je über einen Ringkanal verbunden sind und eine exakte Messung des Druckverlustes Δp (mm WS) ermöglichen. - Der ganze Apparat ist aussen mit Matten isoliert, der Raum über dem oberen Sieb ist auch von innen mit einer Stopfisolierung versehen.

3.) Versuchsdurchführung und Ergebnisse:

Der untersuchte Kontakt bestand aus kleinen Zylindern von 12,4 mm ∅ und 13,3 mm Höhe (Mittel aus 100 Einzelmessungen), die Trägersubstanz war Kohle. Das Raumgewicht wurde zu 625 kg/m^3 bestimmt.

Die vorliegenden Messungen konnten nur bei niederen Temperaturen durchgeführt werden, da kein N_2 sondern nur Druckluft zur Verfügung stand. Zur Mantelheizung wurde Niederdruckheizdampf von 1 at abs. benützt.

Einige Zeit bevor der Mantel mit Dampf beheizt war, wurde die Luft angestellt, sodass der ganze Kontaktraum die gleiche Temperatur annahm. Dann erst wurde der Dampf angestellt und der Temperaturverlauf im Kontaktgut verfolgt. Nach erreichtem Beharrungszustand wurden noch einige Ablesungen zur Bestimmung des eigentlichen Wärmeüberganges durchgeführt. Das Mittel aus letzteren Werten ist in der Tabelle angegeben.

Die Erwärmungskurven sind in den Abbildungen 2 - 6 für verschiedene Luftmengen aufgetragen. Die Erwärmung ohne Luftdurchgang (Abb.2) benötigt

ca. 14 Stunden bis zur Erreichung einer überall gleichen Kontaktraum - temperatur. Die Kurven zeigen den typischen Verlauf einer e^x-Funktion, wie sie für Erwärmung bezw. Abkühlung von Körpern bekannt sind. Dabei ist naturgemäss die Beharrungstemperatur in Nähe der Gefässwand schnell erreicht, während die Erwärmung in der Rohrmitte viel länger dauert. - Mit steigendem Luftdurchtritt wird die radiale Wärmeleitzahl des Kontaktgutes erhöht, sodass der Beharrungszustand sehr viel früher erreicht werden kann, z.B. bei einem Luftdurchsatz von 10,9 kg/h schon nach ~ ½ Stunden (Abb.3), bei 104 kg/h nach ~ 1 Stunde (Abb.6). - Im Beharrungszustand bei Luftdurchtritt bildet sich jedoch keine überall gleiche Temperatur im Kontaktraum aus, vielmehr bleibt ein starkes radiales Temperaturgefälle bestehen. Die Temperaturmessungen in den beiden Schnittebenen in 250 mm Abstand vom oberen und unteren Sieb sind für kleinste, mittlere und grösste Luftmenge in Abbildung 7 (abhängig vom Radius r) aufgezeichnet. Bemerkenswert an allen drei Bildern ist die Erhaltung des kalten Strömungskernes auch in der oberen Ebene, d.h. also nach Durchlaufen von bereits 3/4 m Kontaktraum. Auch die Verbreiterung des kalten Kernes bei grösserem Luftdurchtritt ist zu beachten. Es ist natürlich zu erwarten, dass bei sehr viel höheren Kontaktschüttungen die radialen Temperaturkurven immer flacher verlaufen und bei unendlicher Höhe eine bis in die Ofenmitte gleiche Temperatur ergeben.

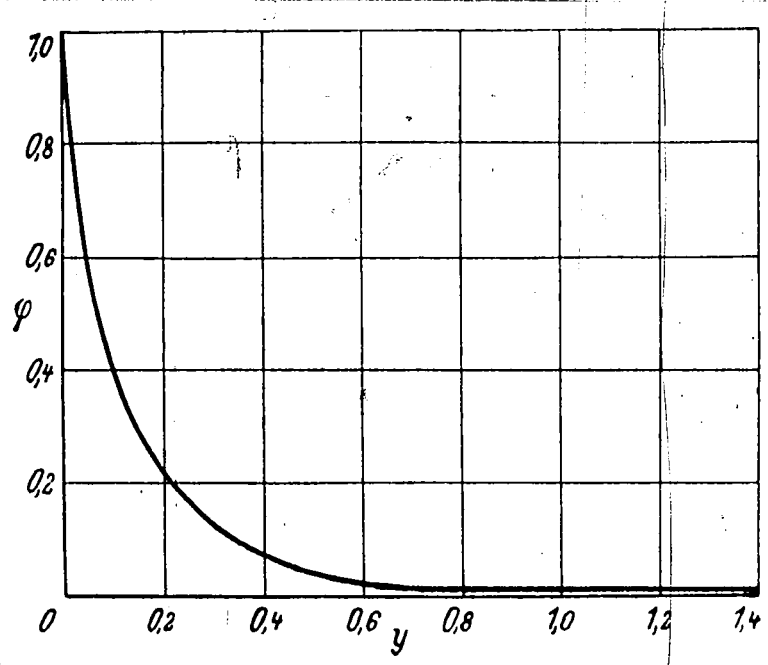
Die Schnelligkeit der Kontaktraumdurchwärmung (beim Einströmen kälteren Gases als der Wandtemperatur entspricht !) ist abhängig von der Wärmeleitzahl λ kcal/mh°C des Kontaktmaterials. Aus vorliegenden Versuchen ist diese berechenbar+) aus der Luftmenge G [kg/h], der spezifischen Wärme c_p = 0,2404 [kcal/kg°C] von Luft, der Kontakthöhe l [m] und der Temperaturen t_1, t_2 und t_w [°C] nach folgenden Gleichungen:

$$\varphi = \frac{t_2 - t_w}{t_1 - t_w} \qquad (1)$$

$$y = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot l}{G \cdot c_p} \qquad (2)$$

+) G.Kling, Foschung Geb.Ing.Wesen 9, 1938, S.82

Die dimensionslosen Werte φ und y stehen dabei in einem Zusammenhang, der in der folgenden Funktion dargestellt ist.



Die so errechneten Wärmeleitzahlen λ sind in der Abbildung 8 aufgetragen, wobei als Abszisse die Reynolds'sche Zahl

$$Re = \frac{w_m \cdot d_k \cdot \gamma_m}{\eta \cdot g} \qquad (3)$$

gewählt wurde, die gebildet ist aus spezifischem Gewicht der Luft γ_m $[kg/m^3]$, Geschwindigkeit der Luft im leer gedachten Kontaktrohr w_m $[m/sec]$, Zähigkeit der Luft $\eta [kgsec/m^2]$ sowie der Kontaktkornabmessung $d_k = 0{,}0129$ $[m]$ (s.auch Wärmeatlas I, 15 b). γ_m w_m und η beziehen sich dabei auf die mittlere Temperatur $t_m = \frac{t_w + t_m}{2}$ im Kontaktraum. Aus Abbildung 8 ist die starke Zunahme von λ mit R_e, d.h. also auch mit dem Luftdurchsatz, zu ersehen. Die λ-R_e-Funktion verläuft in logarithmischer Darstellung in einer schwach gekrümmten Kurve, die im Gebiet hohen Re allmählich in eine Gerade übergeht.

Die Kurve ist nach rechts hin ins Gebiet hoher Reynolds'scher Zahlen linear weit extrapolierbar. Nach links hin für $R_e < 100$ wird das Über-

gangsgebiet zur laminaren Strömung erreicht, in dem die λ-R_e-Kurve viel flacher verläuft, um dann bei rein laminarer Strömung einem konstanten Wert $\lambda \approx 0{,}1$ zuzustreben. (Der λ-Wert bei Re = 36,1 ist viel zu niedrig, da die Messung der Austrittstemperatur t_2 bei diesen kleinen Luftmengen fehlerhaft war.) - Für andere Gasarten oder für ein anderes Temperaturniveau wird sich der linke Kurvenast verändern und zwar wird er sich für besser leitende Gase oder für höhere Temperaturgebiete (höhere Strahlungszahl !) noch stärker abbiegen und nach oben verlagern. Bei hohen Reynolds'schen Zahlen jedoch bleibt die vorliegende Gerade erhalten, da dort der Anteil der reinen Leitung und Strahlung gegenüber der Konvektion zurücktritt.

Im unteren Teil der Abbildung 8 sind noch die Widerstandsbeiwerte ζ gemäss der Beziehung

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\gamma_m \cdot w_m^2}{2\,g} \cdot \frac{l}{d_k} \qquad (4)$$

über Re aufgetragen. Auch diese verlaufen für hohe Reynolds'sche Zahlen linear. Für niedere Reynolds'sche Zahlen steigen sie zum Gebiet laminarer Strömung hin in einer Kurve langsam an.

Die praktische Berechnung eines Kontaktofens erfolgt vorteilhafter mittels der Wärmeübergangszahl $\alpha \left[\mathrm{kcal/m^2 h\,^\circ C}\right]$ gemäss der Beziehung

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \left(t_w - \frac{t_1 + t_2}{2}\right) \qquad (5)$$

Aus den Versuchen wurde Q durch die Lufterwärmung ermittelt:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \qquad (6)$$

und α mit der Fläche $F = 0{,}73\ m^2$ errechnet. c_p ist mit 0,2404 kcal/kg°C eingesetzt. In Abbildung 9 ist α in Abhängigkeit von Re aufgetragen.

Für eine Anwendung vorliegender Versuche auf andere Gase ist es vorteilhafter, die dimensionslose Darstellung zu benutzen, in der die Kenngrössen:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_k}{\lambda_{Gas}} \qquad (7)$$

$$Pe = \frac{w_m \cdot \gamma_m \cdot d_k \cdot c_p}{\lambda_{Gas}} \qquad (8)$$

eingeführt werden.

Die Funktion $Nu = f(Pe)$ ist ebenfalls in Abbildung 9 eingezeichnet. Innerhalb unseres Versuchsbereiches kann man hierfür die einfache Gleichung:

$$Nu = 100 \cdot Pe^{0,84} \qquad (9)$$

einführen. Sie gestattet die Berechnung von α für beliebige Gase für ein ähnlich gestaltetes Kontaktrohr im gleichen Temperaturbereich. Es ist beabsichtigt, diese wichtige Beziehung auch für höhere Temperaturgebiete und andere Kontakte zu bestimmen.

Aus diesen Versuchsergebnissen sind für die praktische Entwicklung der Kontaktaufbereitungsöfen folgende Schlüsse zu ziehen. Das Hauptziel ist eine gleichmässige Temperaturhaltung des ganzen Kontaktgutes. Bei reiner Mantelheizung wird dies wegen des geringen λ nur bei engen Öfen zu erreichen sein. (Die Anordnung der inneren Brenner in den Öfen von Lu 35 hatte ja den gleichen Zweck !) - Eine wirksame Erhöhung der Wärmeleitzahl des Kontaktgutes wäre durch Vergrösserung des N_2 - bezw. H_2O - Durchsatzes möglich (höheres R_e !). Bei kalter Gaseinströmung wäre dazu aber eine genügende Anlaufstrecke im unteren Ofenteil, der mit starker Mantelheizung zu versehen ist, erforderlich, und wobei die obere Mantelheizung nur zur Vermeidung von Wärmeverlusten diente. Bei warmer Gaseinströmung wäre alle Heizenergie allein dem Gas mitzugeben und der ganze Ofen nur mit einer Schutzheizung zu versehen. In der praktischen Entwicklung ist zwischen beiden Extremen, reiner radialer Wärmeleitung (Wandheizung) und reiner molarer Wärmezufuhr (Gasvorheizung) unter Berücksichtigung der rein chemischen Belange (Verweilzeit, Kontakt- und Gasreaktionen) und der praktischen Schwierigkeiten die geeigneteste Lösung zu wählen. Die vorliegenden Untersuchungen sollen dazu ein Hilfsmittel bieten.

Tabelle: Versuche am Kontaktrohr 250 mm ∅

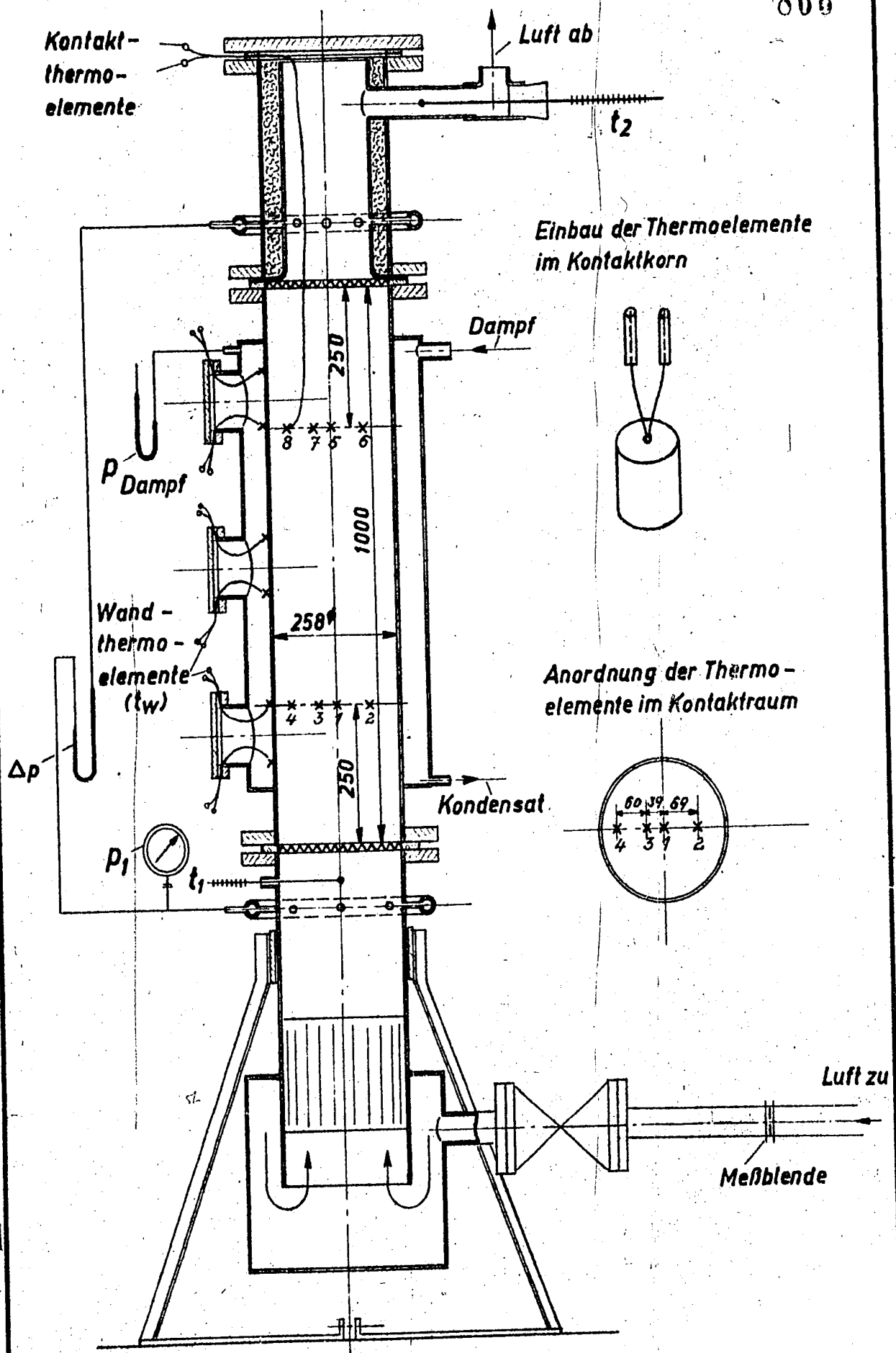
Versuch Nr.			1	2	3	4	5	
Luftmenge	G		10,92	34,2	67,18	104,0	198	kg/h
Eintrittstemperatur	t_1		23,7	18,0	21,8	20,2	17,7	°C
Austrittstemperatur	t_2		59,5	60,1	58,8	56,0	50,6	°C
Mitteltemperatur	$t_m=\frac{t_1+t_2}{2}$		41,6	39,05	40,3	38,1	34,2	°C
Wandtemperatur	t_w		99,4	99,5	98,3	98,0	98,1	°C
Mitteltemperatur	$t_m=\frac{t_w+t_m}{2}$		70,5	69,3	69,3	68,05	66,2	°C
Wärmemenge	Q		94,0	346,5	597,5	895	1564	$\frac{kcal}{h}$
Heizflächenbelastung	q		128,8	474,5	818	1227	2142	$\frac{kcal}{m^2h}$
Wärmeübergangszahl	α		2,23	7,87	14,1	20,5	33,55	$\frac{kcal}{m^2h°C}$
Wärmeleitzahl	λ		0,0511	0,2035	0,3427	0,442	0,842	$\frac{kcal}{mh°C}$
Nusselt'sche Kennzahl	Nu		1,152	4,06	7,27	10,57	18,35	
Péclét'sche Kennzahl	Pe	10^2	0,719	2,25	4,42	6,86	13,05	
Druckverlust	Δp		0,8	4,4	15,0	32,0	86	mm WS
spez.Gewicht der Luft	γ_m		1,023	1,015	1,019	1,025	1,03	kg/m^3
Widerstandsbeiwert	ζ		61,45	31,08	30,7	27,15	20,25	
Reynolds'sche Zahl	Re		36,1	113,5	222,8	347	660	

Techn. Prüfstand
Oppau

Blatt 1

Abb. 1 Schema der Versuchsapparatur

866



I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen am Rhein Tag 22.1.42 Name	Maßst. 1:10	Zum Bericht Nr. 488 vom 29.1.42 Urheberrechtsschutz nach DIN 34	TPrS 1864

Techn. Prüfstand
Dppln

Abb. 2

Erwärmungskurven im Kontakt
(ohne Luftdurchgang)

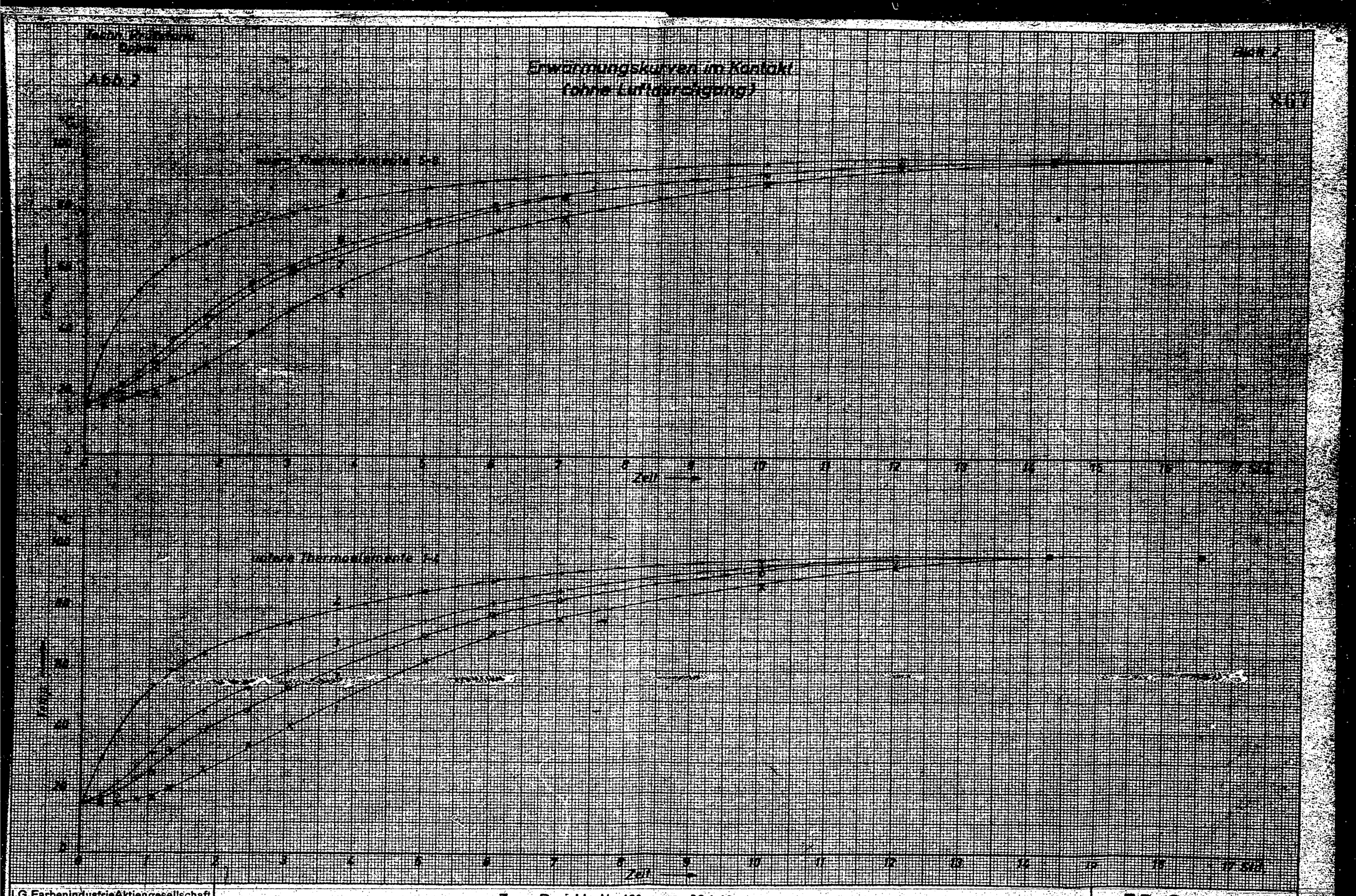
Blatt 2

Techn. Prüfstand
Dppln

Abb. 2

Erwärmungskurven im Kontakt
(ohne Luftdurchgang)

Blatt 2



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft
Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 488 vom 29.1.49

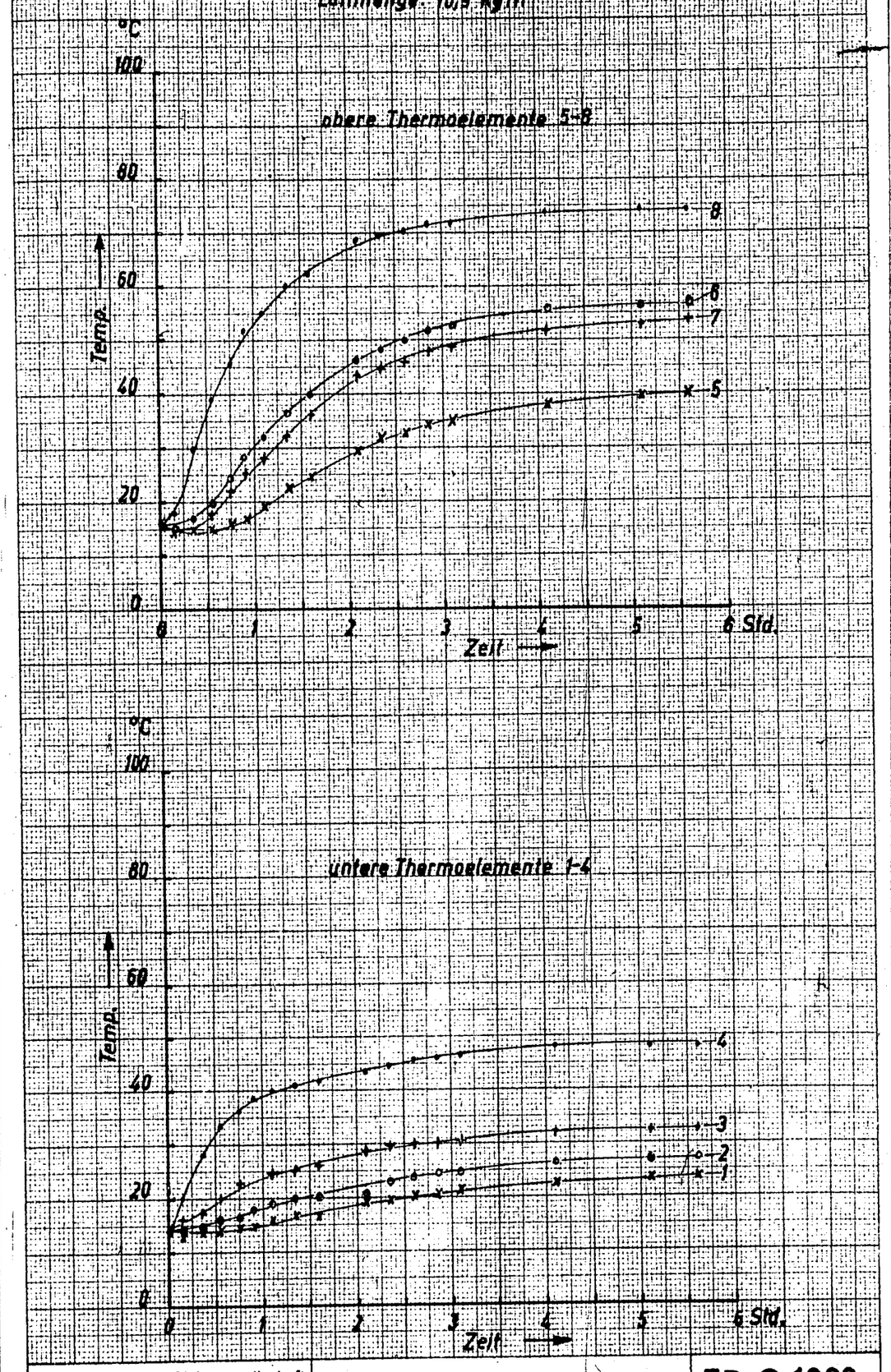
TPrS 1865

Techn. Prüfstand Oppau

Blatt 3

Abb. 3 — Erwärmungskurven im Kontakt — 868

Luftmenge: 10,9 kg/h



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 488 vom 29.1.42

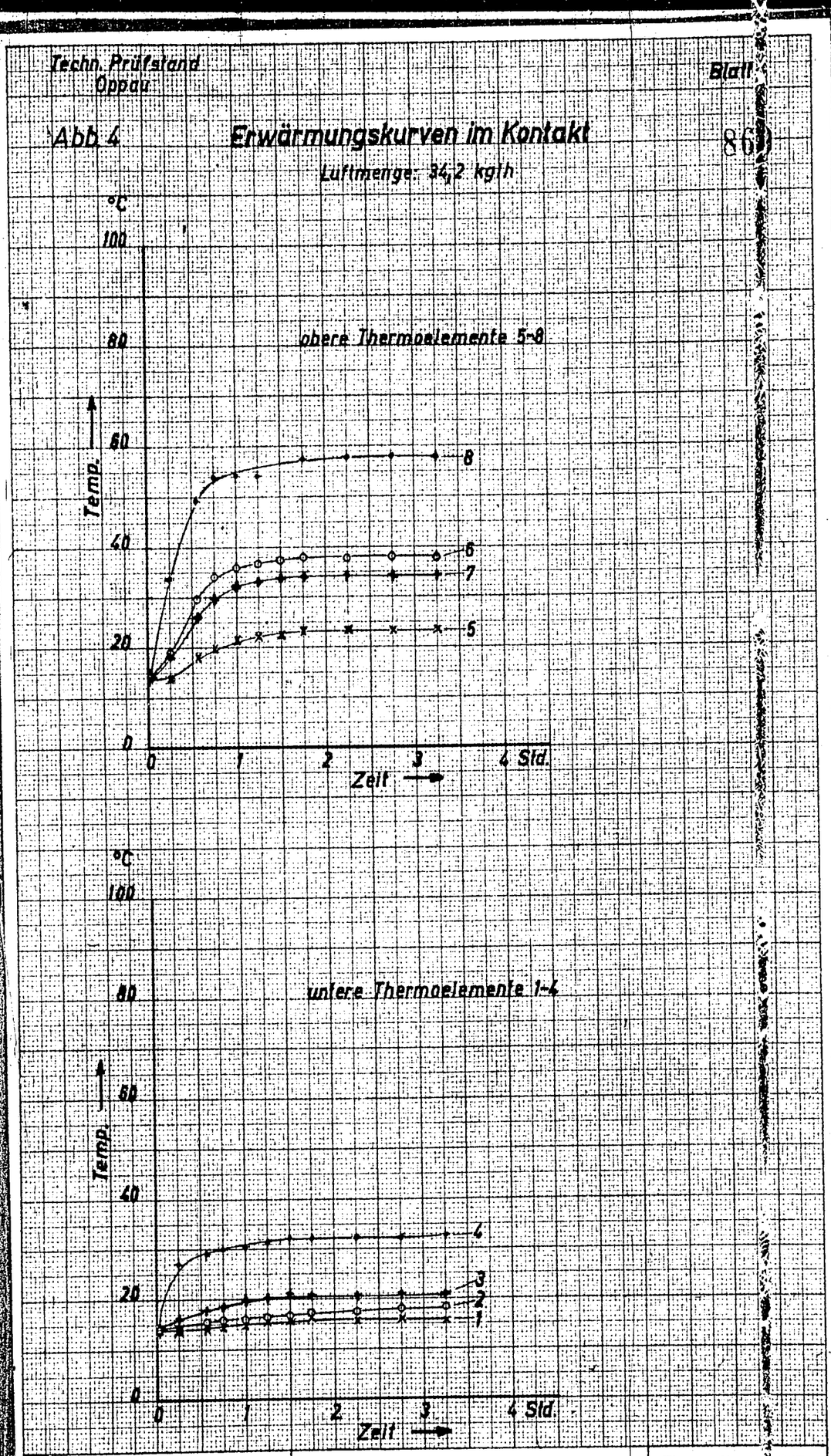
TPrS 1866

Techn. Prüfstand Oppau

Blatt 86

Abb. 4 — Erwärmungskurven im Kontakt

Luftmenge: 34,2 kg/h



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 488. vom 29.1.42

TPrS 1867

DIN-Format A 4 P (210 x 297 mm)

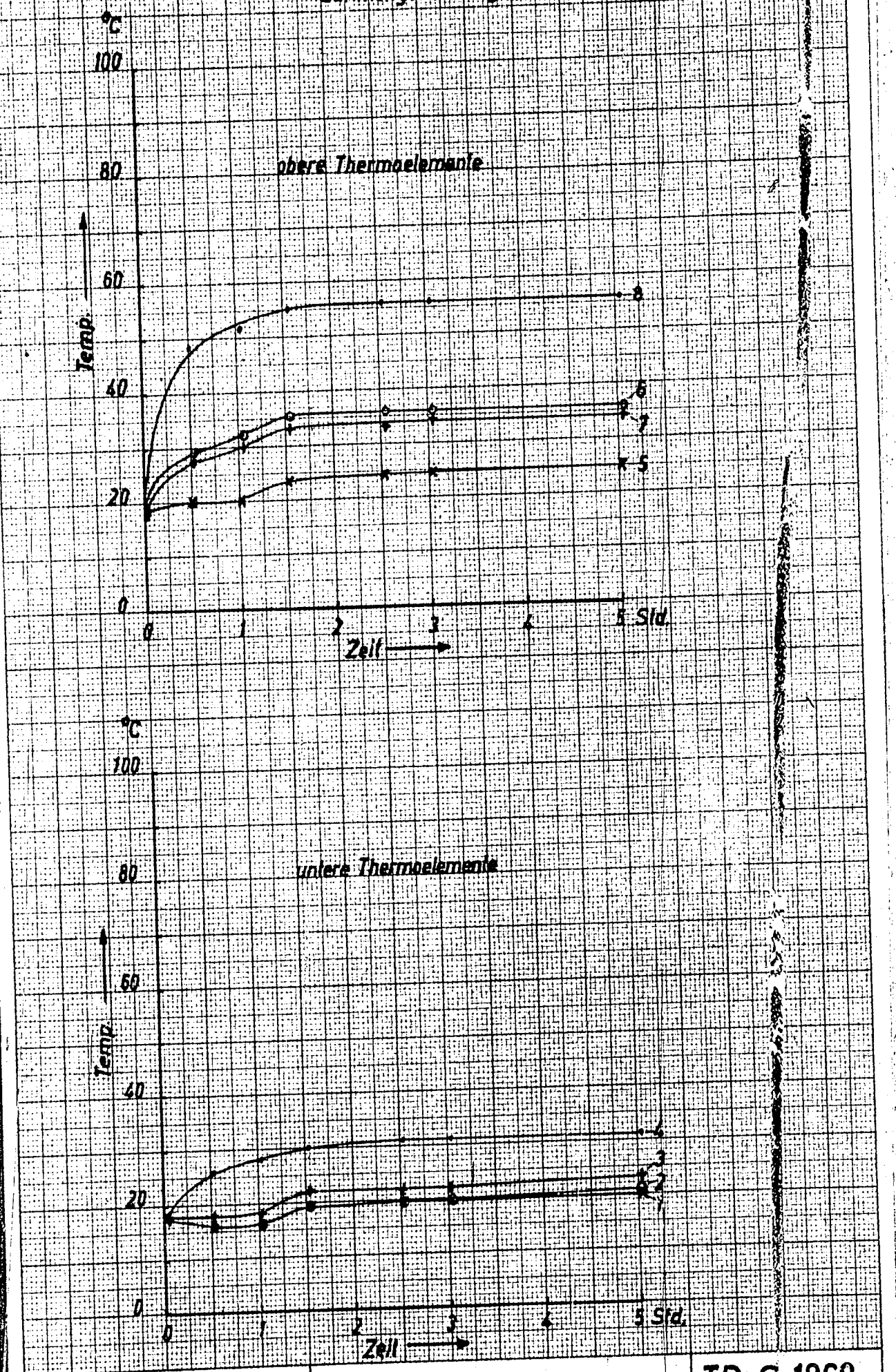
Techn. Prüfstand
Oppau

Blatt 5

Abb. 5 — Erwärmungskurven im Kontakt

87

Luftmenge: 67,2 kg/h



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft,
Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 488 vom 29.1.42

TPrS 1868

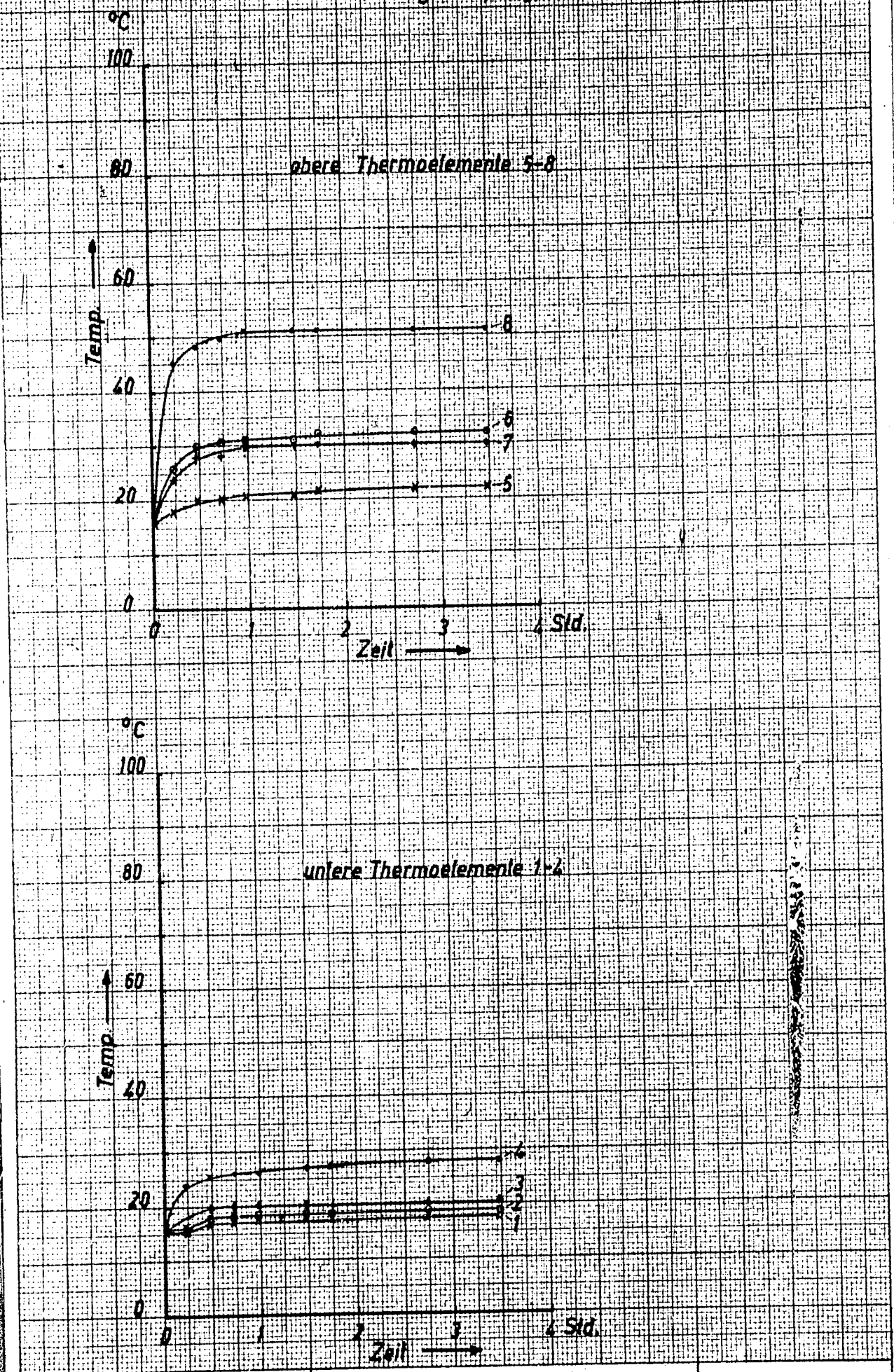
Techn. Prüfstand
Oppau

Blatt 6

Abb. 6 Erwärmungskurven im Kontakt

Luftmenge: 104,0 kg/h

871



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rhein.	Zum Bericht Nr. 488 vom 29.1.42.	TPrS 1869

DIN-Format A 4 B (210 × 297 mm)

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rhein.

DIN-Format A 4 P (210 x 297 mm)

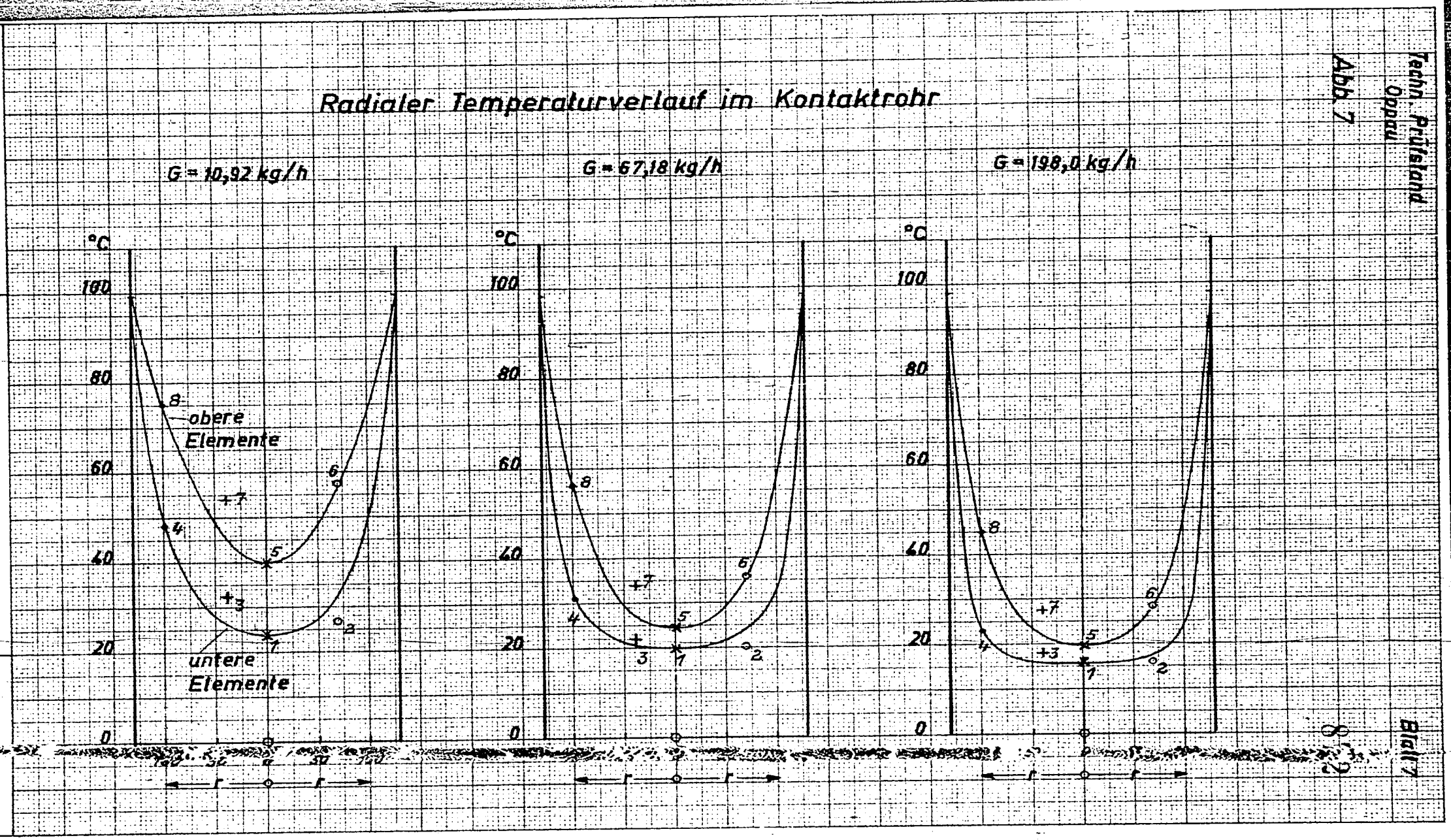
Zum Bericht Nr. 488 vom 29.1.42

TPrS 870

Techn. Prüfstand Oppau

Abb. 7

Radialer Temperaturverlauf im Kontaktrohr



Blatt 7

Techn. Prüfstand
Oppau

Abb 8

Wärmeleitzahlen λ
der Kohlekontaktschüttung

Widerstandsbeiwert ζ
der Kohlekontaktschüttung

λ

ζ

Re

0,1

10^2

10

Zum Bericht Nr 488 vom 29.1.42.

TPrS 1871

873

Blatt 8

Copyright Carl Schleicher & Schüll, Düren (Rhld.) № 369½: 2. P

Beide Achsen logar. geteilt, 1 bis 1000 u. 1 bis 100, Einheit 83,33 mm.

Zum Bericht Nr 488 vom 29.1.42.

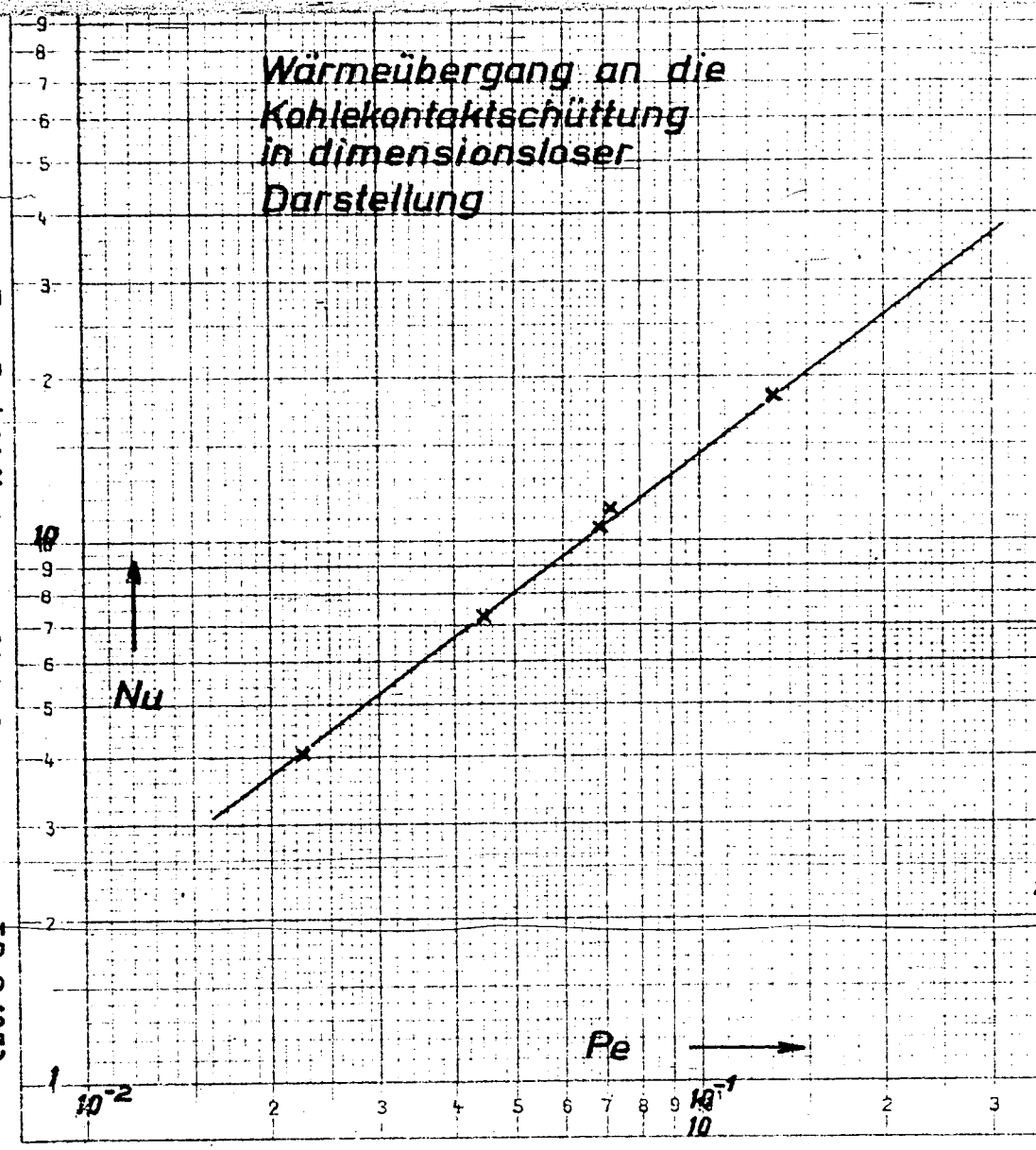
TPrS 1872

Techn. Prüfstand Oppau

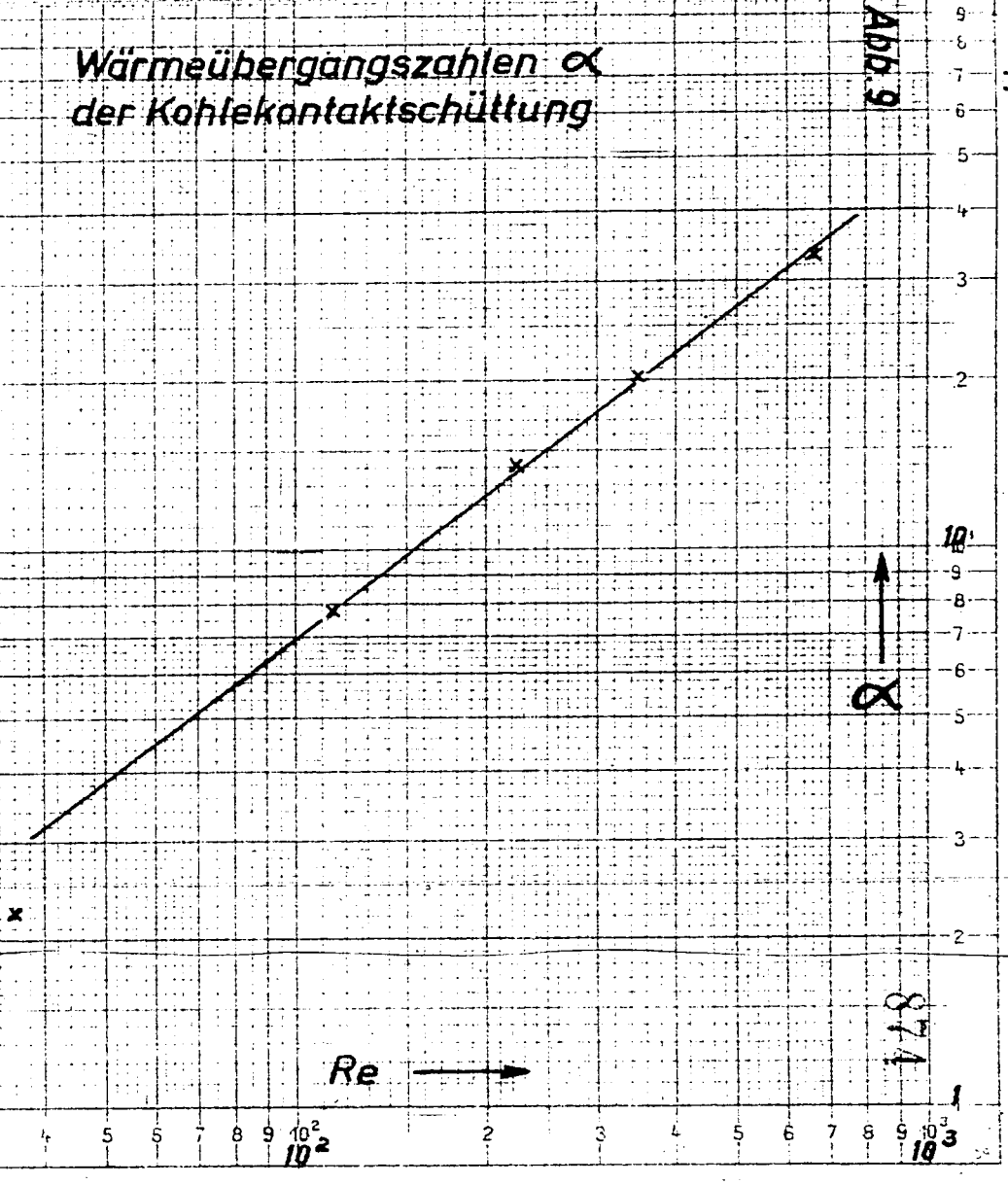
Abb. 9

Blatt 9

Wärmeübergang an die Kohlekontaktschüttung in dimensionsloser Darstellung



Wärmeübergangszahlen α der Kohlekontaktschüttung



Copyright Carl Schleicher & Schüll, Düren (Rhld.) № 369½ 2. P

Beide Achsen logar. geteilt, 1 bis 1000 u. 1 bis 100, Einheit 83,33 mm.

Verbrennungsversuche

Mitteilungen des Technischen Prüfstandes Oppau

1943 875 Heft 3

Bericht

über die

Fünfte Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung

am 16. und 17. Februar 1943 in Oppau

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.

876 *Vertraulich!*

Mitteilungen des Technischen Prüfstandes Oppau

1943 Heft 3

23

Bericht

über die

Fünfte Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung

am 16. und 17. Februar 1943 in Oppau

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.

Teilnehmerverzeichnis

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. W. Wilke

A.-G. der Kohlenwertstoff-Verbände, Gruppe BV	Dipl.-Ing. Waldmann, Ing. Möllnitz
A.-G. der Shell-Floridsdorfer Mineralölfabrik	Ing. Hahn
Ammoniakwerk Merseburg GmbH	Dipl.-Ing. Rueß, Honecker
Braunkohle-Benzin A.-G., Werk B	Dipl.-Ing. Stärk
Braunkohle-Benzin A.-G., Werk M	Dipl.-Ing. Meyer
Braunkohle-Benzin A.-G., Werk S	Dr. Kothe
Chem.-Technische Reichsanstalt, Berlin	Dipl.-Ing. Lehmann
Chem. Werke Essener Steinkohle	Dr. Thies
Daimler-Benz-Motoren GmbH	Chemiker Schmidt
Daimler-Benz A.-G., Werk G	Dipl.-Ing. Bokemüller, Ing. Hohensee
Daimler-Benz A.-G., Werk M	Ober-Ing. Eltze
Daimler-Benz A.-G., Werk U-T	Ing. Armbruster
Deutsch-Amerikanische Petroleum-Gesellschaft, Hamburg	Ing. Rexhäuser
Deutsche Erdöl A.-G., B	Ing. Weyh
Deutsche Erdöl A.-G., P	Dr. Spack
Deutsche Erdöl A.-G., R	Ing. Peterlowitz
Deutsche Gesellschaft für Mineralölforschung, Berlin	Dr. Lauffs
Deutsche Reichsbahn, Versuchsamt Berlin	Ing. Schweinoch
Deutsche Reichsbahn, Zentralamt Berlin	Oberreichsbahnrat Keßler, Techn. Oberinspektor Bauer
Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, Berlin	Dr. v. Philippovich, Dr. Seeber
Ethyl GmbH, Berlin	Ing. Morgenthaler
Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen, Stuttgart	Dr. Widmaier
Gelsenberg Benzin A.-G.	Dr. Rudolph
Gewerkschaft Deutsche Erdöl Raffinerie	Ing. Klingenberg
Gewerkschaft Mathias Stinnes	Dr. Koch
Hydrierwerke Pölitz A.-G.	Dr. Stümbke
Hydrierwerk Scholven A.-G.	Dr. Salzer, Ing. Specka
I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.	Dr. Dehn, Ing. Bauch
I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Techn. Prüfstand Oppau	Prof. Dr. Wilke, Dr. Schuch, Ing. Singer, Horrein
Intava Arbeitsgemeinschaft, Hamburg	Ing. Rexhäuser
Junkers Flugzeug- und Motorenwerke	Ing. Oertel, Dr. Müller
Kraftfahrtechn. Lehranstalt der SS.	Prof. Dipl.-Ing. Feifel
Krupp Treibstoffwerke	Dr. Stock
Oberkommando des Heeres HWA, Berlin	Dipl.-Ing. Weber, Ch. techn. Meyer
„Olex" Deutsche Benzin- und Petroleum GmbH, Berlin	Dipl.-Ing. Knaffl, Ing. Weise
Reichskraftsprit GmbH, Berlin	Dipl.-Ing. Unverhau
Rhenania-Ossag Mineralölwerke A.-G., Hamburg	Dr. Neumann
Ruhrbenzin A.-G.	Dr. Schaub
RLM Berlin	Fl.-Hpt. Ing. Adam, Fl.-St. Ing. Dietrichs
	Dipl.-Ing. Lange, Ing. Stärke
RLM E'stelle R	Dr. Kübler, Dr. Wagemann, Dipl.-Ing. Bormann
T	
U'stelle D	Dr. Schultze
LTL Dr	Dr. Rothkegel
LTL N—U	Fl.-St. Ing. Spörk, Deckwirth
LTL N—Sw	Dr. Ochmann
LTL U—Pf	Dr. Hartmann
LTL O—B	Fl.-St. Ing. Wildt, Fl.-Ing. Brandt
LTL 1/VI	Chem. techn. Nippelt
LTL 1/VII	Dipl.-Ing. Faubel
LTL 1/XVII	Dipl.-Chem. Flachsbart
LTL 2/III	Dipl.-Chem. Böttcher
Ruf Hermann, Mannheim	Ing. Olm
Steinkohlenbergwerk Rheinpreußen	Dr. Dannefelser, Ing. Kuhlmann
Techn. Hochschule Berlin V. f. K.	Dipl.-Ing. Mündler
Techn. Hochschule München, Inst. f. chem. Techn.	Dr. Kneule
Techn. Hochschule Wien, Inst. f. Phys. Chemie	Dr. Proisl
Vacuum Oil Co., Prag	Dr. Mayer
Wintershall A.-G., Werk S	Dr. Becker
Wirtschaftliche Forschungsgesellschaft Berlin	Dr. Rohrmann, Chem. techn. Roloff

Inhaltsübersicht

Begrüßung: Prof. Dr.-Ing. W. Wilke 4

Vorträge

Ing. E. Singer: Bericht über die abgeschlossenen Vergleichsversuche der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung 5

Dr. W. Dannefelser: Beobachtungen beim Untersuchen von Synthesebenzin 11

Dipl.-Ing. F. Rueß: Versuche zur Octanzahlbestimmung von Flüssiggasen 19

Ing. E. Singer: Über den Einfluß von Betriebsbedingungen auf das Klopfverhalten von Kraftstoffen 24

Dipl.-Ing. H. Unverhau: Prüfstandversuche über die Brauchbarkeit der Research- und Motor-Octanzahl im praktischen Betrieb 28

Dipl.-Ing. H. Waldmann: Motor- oder Research-Methode für Erdkraftstoffe ? 33

Dipl.-Ing. F. Rueß: Ansetzen von Bleitetraäthyl-Lösungen zum Verbleien von Benzinen im Labor 35

Ergebnis der 5. Klopftagung 38

Prof. Dr.-Ing. W. Wilke

Begrüßungsansprache

Ich eröffne hiermit die fünfte Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung und freue mich, feststellen zu können, daß diese so überaus gut besucht ist. Ich begrüße alle Anwesenden, insbesondere die Herren von der Arbeitsgemeinschaft für das Kraftfahrwesen, des RLM., des HWA sowie des Zentralbüros für Mineralöl GmbH, Berlin.

Die Vertretung dieser Stellen gibt mir die Überzeugung, daß an der Lösung der Aufgaben, die der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung ständig aus der Praxis heraus

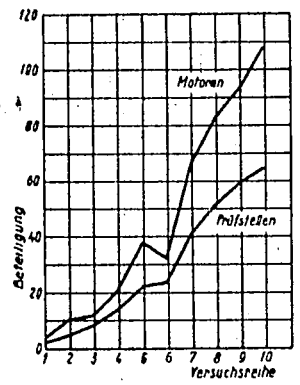


Abb. 1. Beteiligung an den Vergleichsversuchen

erwachsen, auch die zuständigen Behörden in hohem Maße interessiert sind. Waren die ersten Bemühungen dieser Arbeitsgemeinschaft vorwiegend darauf abgestellt, durch Vereinheitlichung von noch unklar gefaßten Betriebsbedingungen, von Bezugskraftstoffen und Umrechnungskurven sowie durch Schaffung von Einstellbenzinen und durch einen Erfahrungsaustausch die Meßgenauigkeit bei der Octanzahlbestimmung zu steigern, so verfolgten die Behandlungen der Fragen wie Bleiempfindlichkeit, Mischwert, OZ-Messungen über 100 u. a. das Ziel, bei den deutschen Prüfstellen zu einer einheitlichen Benennung und Bewertung dieser zusätzlichen Klopfeigenschaften der Kraftstoffe zu gelangen.

Seither sind weitere Untersuchungen über das Klopfverhalten der Synthesebenzine in Angriff genommen worden. Über das Klopfverhalten von gasförmigen Kraftstoffen herrscht vielfach Unklarheit, und die Zweckmäßigkeit von Octanzahlbestimmungen nach der Research- und Motor-Methode ist vielfach umstritten. Auch diese neuen Aufgaben werden einer Lösung zugeführt werden müssen, wozu die heutigen Ausführungen, denen sämtlich Meßergebnisse zugrunde liegen, einen wertvollen Beitrag geben dürften.

Wenn es bisher möglich gewesen ist, die angedeuteten Probleme bei der Octanzahlbestimmung zu lösen oder der Lösung nahe zu bringen, so nur, weil sich nahezu alle deutschen Prüfstellen der Industrie, der Forschung und der Überwachung zu einer freiwilligen Gemeinschaftsarbeit zusammengefunden haben, deren Rückhalt die halbjährlichen Vergleichsversuche zusammen mit den jetzt ganzjährlichen Besprechungen bilden. Die nunmehr abgeschlossene 10. Versuchsreihe gibt mir Gelegenheit, auf die Entwicklung des Teilnehmerkreises hinzuweisen *(Abb. 1)*.

Bei der 1. Versuchsreihe im August 1936 waren es drei Teilnehmer mit vier Motoren, die gemeinsam sechs Proben untersuchten. Bei der jetzigen 10. Versuchsreihe sind es 65 Teilnehmer mit 107 Motoren, die acht verschiedene Kraftstoffe bewerten. Es hatte sich im Laufe der Messungen trotz der uns dadurch erwachsenen Mehrbelastung als am zweckmäßigsten erwiesen, den einzelnen Teilnehmern nicht nur die Benzinproben, sondern auch die zugehörige Verpackung, also Kannen und Kartons zu stellen.

Manche Fragen lassen sich rascher klären, wenn in einem kleinen Kreise durch entsprechende Untersuchungen eine vorläufige Lösung gefunden worden ist, deren Richtigkeit dann im Rahmen der großen halbjährlichen Vergleichsversuche nachgeprüft wird. Aus dieser Erwägung heraus haben sich die Prüfstellen, die gleichzeitig Abnahmestellen für das Zentralbüro sind, zu einer Untergruppe zusammengeschlossen. Im Rahmen der heutigen Vorträge wird auch über das Ergebnis einer dort durchgeführten Sonderermessung berichtet werden.

Ich hoffe, daß die nunmehr beginnenden Vorträge und Aussprachen für alle Teilnehmer nutzbringend sein werden und wünsche der Tagung einen guten Verlauf.

Wilke

nsprache

...igkeit von Octanzahlbestimmungen nach der Research-...h umstritten. Auch diese ...Lösung zugeführt werden ...hrungen, denen sämtlich ...einen wertvollen Beitrag ...

...es bisher möglich gewesen ist, die angedeuteten ...Meine bei der Octanzahlbestimmung zu lösen oder ...Lösung nahe zu bringen, so nur, weil sich nahezu ...Deutschen Prüfstellen der Industrie, der Forschung ...der Überwachung zu einer freiwilligen Gemeinschaft ...zusammengefunden haben, deren Rückhalt die ...jährlichen Vergleichsversuche zusammen mit den ...jährlichen Besprechungen bilden. Die ...hsreihe gibt mir Gelegenheit, ...ilnehmerkreises hinzuweisen.

...August 1936 waren es drei ...ren, die gemeinsam mit ... der jetzigen 10. Versuchs... ...es 63 Teilnehmer mit 107 Motoren, die acht ver... ...schiedene Kraftstoffe bewerten. Es hatte sich im Laufe ...der Messungen trotz der uns dadurch erwachsenen Mehr... ...belastung als am zweckmäßigsten erwiesen, den einzelnen ...Teilnehmern nicht nur die Benzinproben, sondern auch ...die zugehörige Verpackung, also Kannen und Kanister, zu stellen.

...Manche sich rascher klären, wenn in der ...sprechende Untersuchungen ... worden ist, deren Ergebnisse ...den halbjährlichen Vergleichs... ... Aus dieser Erfolgung kann ..., die gleichzeitig ...für das Zentralbüro sind, zu einer Untergruppe ...Messen. Im Rahmen der heutigen Tagung soll ...noch über das Ergebnis einer dort durchgeführten Messung berichtet werden.

Ich bitte, daß die nunmehr beginnenden Vorträge ... Aussprachen für alle Teilnehmer ... wurden und wünsche der Tagung einen guten Verlauf.

Ing. E. Singer

Bericht über die abgeschlossenen Vergleichsversuche der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung

Als Ergebnis der Vergleichsversuche vom Oktober 1941 wurde festgestellt, daß die damals erreichte Meßgenauigkeit bei der Octanzahlbestimmung es gestattet, auch die Frage der Zuverlässigkeit der Klopfwertbestimmung von weniger lagerfesten Benzinen zu klären, die bei den bisherigen Versuchen noch nicht vertreten waren. In das Untersuchungsprogramm vom April 1942 und dann auch in die Versuchsreihe vom Oktober 1942 wurden deshalb erstmals Synthesebenzine aufgenommen. Weiter führte die Untergruppe „Prüfstellen des Zentral-Büros (ZB)" eine Meßreihe durch, bei welcher festgestellt werden sollte, ob die Art des Bezugskraftstoffes einen Einfluß auf die Höhe der Octanzahl ausübt. Da das erhaltene Meßergebnis allgemein interessieren dürfte, wird im folgenden außer über die beiden halbjährlichen Vergleichsversuche auch über die Versuchsreihe mit Bezugskraftstoffen berichtet.

I. Messen von Benzolgemischen mit verschiedenen Bezugskraftstoffen

Bei der Klopfmeßtagung im Juli 1941 hatten die damaligen Teilnehmer allen Abnahmestellen von Leichtkraftstoffen u. a. empfohlen, bei der Octanzahlbestimmung die einheitliche Anwendung der beiden Unterbezugskraftstoffe IG-Eichbenzin und Eichstoff Z vorzuschreiben. Während zu diesem Zeitpunkt die klopfschwache Komponente in der Bezugsmischung, nämlich das IG-Eichbenzin, bereits allgemein eingeführt war, bedeutete die einheitliche Anwendung des Eichstoffes Z für manche Prüfstellen eine Umstellung. Um sich Gewißheit darüber zu verschaffen, daß durch diese Umstellung die seitherige Meßhöhe der Kraftstoffe nicht beeinflußt wird, wurden auf Anregung der Zentralbüro für Mineralöl GmbH und im Auftrag des Heereswaffenamtes von drei Kraftstoffen die Octanzahl, der Z-Wert und der Benzolwert gemessen. Z-Wert und Benzolwert wurden über eine Umrechnungskurve in Octanzahlen ausgedrückt und mit den unmittelbar gemessenen Werten verglichen.

Da angenommen wurde, daß etwaige Unterschiede in der Bewertung der drei Kraftstoffproben besonders dann auftreten würden, wenn sich Probe und Bezugsmischung im chemischen Aufbau weitgehend unterscheiden, wurden drei Benzolgemische untersucht. Diese drei Proben waren bei verschiedenem Benzolgehalt nahezu klopfgleich, wie aus *Zahlentafel 1* hervorgeht.

Zahlentafel 1. Octanzahlen der Benzolgemische (Mittelwert)

Bezeichnung	Benzolgehalt	ROZ
DD	35 Vol.-%	75,1
DU	39 Vol.-%	75,7
M	25 Vol.-%	74,1

Von diesen drei Benzolgemischen sind durch 10 Prüfstellen mit insgesamt 19 Klopfmotoren die unmittelbare Octanzahl, der Z-Wert und der Benzolwert bestimmt worden. Der Z-Wert wurde von allen Prüfstellen über die einheitliche Umrechnungstafel in Octanzahlen ausgedrückt, hingegen erfolgte die Umrechnung des Benzolwertes über werkseigene Kurven, die im entsprechenden Kurvenausschnitt bis zu 2 ROZ auseinanderlagen. *Zahlentafel 2* vermittelt ein Bild von den erhaltenen Mittelwerten.

Das Ergebnis zeigt, daß im Mittel mit Benzol um 0,3 ROZ kleinere, mit Eichstoff Z um 0,2 ROZ größere Werte erhalten worden sind als bei der unmittelbaren Messung mit Octan. Dieser geringe Unterschied ist praktisch ohne jede Bedeutung und könnte durch ein besseres Angleichen der Eichkurven untereinander beseitigt werden.

Zahlentafel 2. Octanzahlen nach der Research-Methode beim Messen mit verschiedenen Bezugskraftstoffen

Probe	Benzol	Octan	Z
DD	74,8	75,1	75,3
DU	75,4	75,7	75,9
M	73,7	74,1	74,3

Wie aus *Zahlentafel 3* hervorgeht, sind auch die mittleren Streuungen bei den verwendeten drei Bezugskraftstoffen von ähnlicher Größenordnung.

Zahlentafel 3. Mittlere Streuung beim Messen mit verschiedenen Bezugskraftstoffen

Probe	Benzol	Octan	Z
DD	±0,5 ROZ	±0,4 ROZ	±0,4 ROZ
DU	±0,5 ROZ	±0,4 ROZ	±0,4 ROZ
M	±0,7 ROZ	±0,5 ROZ	±0,4 ROZ

Nach diesem Ergebnis, das für die drei Stoffe Benzol, Octan und Z die völlige Gleichwertigkeit hinsichtlich ihrer meßtechnischen Eignung als Bezugskraftstoff beweist, verfügte das Heereswaffenamt die einheitliche Anwendung des Eichstoffes Z in seinem Dienstbereich, da handhabungsmäßig der Eichstoff Z Vorteile gegenüber Benzol aufweist (bessere Frostfestigkeit, Bleiempfindlichkeit, Extrapolationsfähigkeit — Eichkurve wird zur Geraden). Durch diese Versuche sind die früher durchgeführten Vergleichsmessungen der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung sowie die daraus abgeleiteten Folgerungen bestätigt worden. Nach dem Entschluß des HWA werden heute in Deutschland alle Octanzahlbestimmungen einheitlich mit den gleichen Unterbezugskraftstoffen durchgeführt, wodurch manche Fehlerquellen beseitigt und dadurch die Meßgenauigkeit gesteigert wird.

II. Messen von Benzolgemischen nach verschiedener Laufzeit

Beim Erfahrungsaustausch der Klopfprüfstände anläßlich der Klopftagung im November 1941 war angeregt worden, die Entkohlungszeiträume der Motoren zu erhöhen. Die ZB-Gruppe benutzte nun die vorbeschriebenen Versuche mit den drei Benzolgemischen noch dazu, diese Messungen dreimal durchzuführen, und zwar etwa 20, 75 und 120 Betriebsstunden nach der vorangegangenen Entkohlung des Klopfmotors. Auch hier wurde erwartet, daß bei den temperaturempfindlichen Benzolgemischen eine Änderung im Wärmeverhalten des Motors (z. B. durch Ölkohlebelag) am ehesten beobachtet werden könnte.

Mit Octan/Heptan als Bezugskraftstoff wurden bei der dreimaligen Klopfwertbestimmung nach rd. 20, 75 und 120 Betriebsstunden die erhaltenen Octanzahlen der

einzelnen Benzolgemische für jede einzelne Prüfstelle gemittelt und hiervon die drei Streuungen errechnet. Die Zusammenfassung dieser Abweichungen aller Prüfstellen von ihrem Einzelmittelwert zeigen *Abb. 2* bis *4* für die drei Proben DD, DU und M. Man erkennt, daß bei diesen Versuchen ein Einfluß der Laufzeit des Motors seit der Entkohlung auf die Octanzahl der Kraftstoffe nicht festzustellen ist. Damit sind die auf der obenerwähnten Klopftagung mitgeteilten Beobachtungen, wonach Entkohlungszeiträume von über 100 h in vielen Fällen die Meßgenauigkeit nicht beeinträchtigen, bestätigt worden. Es bestehen also keine Bedenken, die Entkohlungszeiträume beim Untersuchen von handelsüblichen Benzinen auf etwa 150 h statt 50 h, wie vorgeschrieben, zu erhöhen.

III. Ergebnis der beiden halbjährlichen Vergleichsversuche 1942

Versuchsprogramm

Nach der Auswertung der Versuche vom April 1942 wurden die nächsten Versuche im Oktober in der gleichen

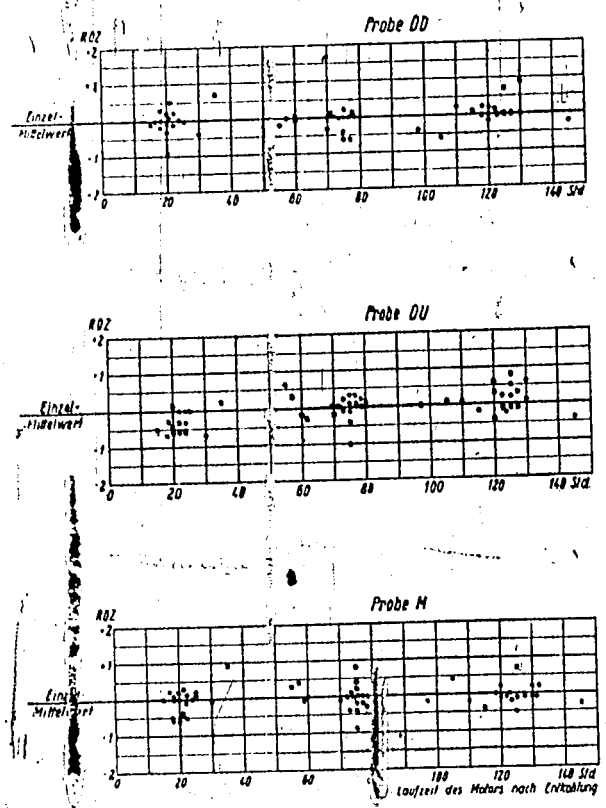


Abb. 2 bis 4. Einfluß der Laufzeit des Motors auf die Octanzahl des Kraftstoffs (Bezugskraftstoffe: Octan/Heptan)

Weise angesetzt, vor allem um das erstmals mit dem Synthesebenzin erhaltene Ergebnis nachzuprüfen. Das Ergebnis aus den beiden Meßreihen kann also zusammengefaßt werden.

Das Rückgrat aller halbjährlichen Vergleichsversuche sind die Messungen mit stabilen Benzinen, bei denen keine Änderungen im Klopfverhalten durch Harzbildung, Peroxydbildung, Änderungen im Dampfdruck oder durch Ausfallen von Bleitetraäthyl usw. zu erwarten sind. Nur mit solchen Benzinen ist es möglich, die Meßgenauigkeit bei der Octanzahlbestimmung anzugeben und die einzelnen Klopfmotoren aufeinander abzustimmen. Um den Anschluß an frühere Messungen zu sichern, wurden deshalb wieder ähnliche Benzine wie dort verwendet, zu denen erstmals ein mit Kresol als Hemmstoff versetztes Synthesebenzin kam. Da von vornherein erwartet wurde, daß dieses Benzin wesentlich ungenauer zu bestimmen sei als die stabilen Benzine, wurde bei den Versuchen im April das Synthesebenzin außer im Anlieferungszustand noch in Mischungen mit 40 Vol.-% Reinbenzol bzw. mit 50 Vol.-% Z untersucht. Von diesen beiden Mischungen hatte sich die mit Z-Zusatz als die geeignetere erwiesen, so daß dann bei den Versuchen im Oktober nur noch die Mischung mit 50 Vol.-% Z durchgeprüft wurde. Um den Prüfstellen die Möglichkeit zu geben, selbst ein benzolreiches Einstellbenzin ansetzen zu können, wurde im Oktober 1942 noch eine Mischung 50 Vol.-% Eichbenzin mit 50 Vol.-% Reinbenzol untersucht.

Demgemäß umfaßten die beiden Versuchsreihen die in *Zahlentafel 4* angeführten Proben.

Zahlentafel 4. Kraftstoffproben und mittlere Streuungen bei den halbjährlichen Vergleichsversuchen

Bezeichnung April	Bezeichnung Oktober	Probe	Mittlere Streuung ROZ April	Mittlere Streuung ROZ Okt.	Prüfweise
9a	10a	Hydrierbenzin	0,5	0,5	Research-Methode
9c	10c	Benzolgemisch	0,5	0,5	
9d	10d	Bleibenzin	0,6	0,6	
9f	10f	Synthesebenz.	1,2	1,4	
50 % 9f 50 % Z	50 % 10f 50 % Z	Paraffin-gemisch Benzolgemisch	0,6	0,8	
60 % 9f 40 % Bo	—		0,9	—	
—	50 % Eichbi 50 % Bo	Benzolgemisch	—	0,7	
91	101	Hydrierbenzin	0,5	0,5	Motor-Methode
92	102	Aromatenbenz.	0,7	0,7	
93	103	Hydr., gebleit	0,7	0,5	
94	104	Arom., gebleit	0,8	0,7	
Mittlere Streuung aus den Proben a—c—d			0,5	0,6	Res.-Methode
Mittlere Streuung aus den Proben 1—2—3—4			0,7	0,6	Motor-Methode

An den Versuchen beteiligten sich 65 Prüfstellen mit zusammen 72 IG- und 36 CFR-Motoren.

Meßgenauigkeit

Beim Untersuchen der stabilen Proben a, c und d sind in Einzelfällen Unterschiede bis zu 3,6 ROZ und bei den Proben 1, 2, 3 und 4 Unterschiede bis zu 4,6 MOZ aufgetreten. Die mittleren Streuungen sind, wie *Zahlentafel 4* zeigt, weit kleiner.

Bei der schwer meßbaren Probe f sind die Meßunterschiede beträchtlich größer als bei den vorgenannten stabilen Proben. Mischungen von Benzol und Z mit f verbessern erwartungsgemäß die Meßgenauigkeit, ohne jedoch diejenige der stabilen Proben erreichen zu können. Verlauf und Größe der Streuungen um den Mittelwert sind für die Versuchsreihe 10 nach den beiden Prüfmethoden (Research- und Motor-Methode) in *Abb. 5* dargestellt.

Wie *Zahlentafel 4* weiter zeigt, wurden bei den Messungen nach der Motor-Methode ähnlich große Streuungen erhalten wie bei den Messungen nach der Research-Methode, wenn hier die Ergebnisse der Probe f nicht berücksichtigt werden. Nach den letzten Messungen vom Oktober 1942 ist die Meßgenauigkeit bei der Research-Methode mit 0,6 OZ ebenso groß wie bei der Motor-Methode.

Bei diesen Versuchen nach der Research-Methode vom Oktober 1942 wurde im Mittel aus beiden Motorenarten die in der *Zahlentafel 5* angegebene Meßgenauigkeit erreicht. Hiernach wurde für die Probe 10a der größte Bewertungsunterschied mit 3,6 ROZ gegenüber der mittleren Streuung von nur ±0,5 ROZ festgestellt. Bei der Probe 10c sind die entsprechenden Werte 3,3 OZ gegen-

. Benzine, wurde bei den
ithesebenzin außer im An-
Mischungen mit 40 Vol.-%
bzw. mit 50 Vol.-% Z untersucht. Von diesen
hungen hatte sich die mit Z-Zusatz als die
erwiesen, so daß dann bei den Versuchen
nur noch die Mischung mit 50 Vol.-% Z
t wurde. Um den Prüfstellen die Möglichkeit
lbst ein benzolreiches Einstellbenzin ansetzen
wurde im Oktober 1942 noch eine Mischung
Eichbenzin mit 50 Vol.-% Reinbenzol unter-

umfaßten die beiden Versuchsreihen die in
1 angeführten Proben.

und mittlere Streuungen bei den
rgleichsversuchen

		Mittlere Streuung ROZ		
		April	Okt.	Prüfweise
	rbenzin	0,5	0,5	Research-Methode
10 e	Benzolgemisch	0,5	0,5	
10 d	Bleibenzin	0,6	0,6	
10 f	Synthesebenz.	1,2	1,4	
50 % 10 f 50 % Z	Paraffin-gemisch	0,6	0,8	
—	Benzolgemisch	0,9	—	
50 % Eichbi 50 % Bo	Benzolgemisch	—	0,7	
101	Hydrierbenzin	0,5	0,5	Motor-Methode
102	Aromatenbenz.	0,7	0,7	
103	Hydr., gebleit	0,7	0,5	
	gebleit	0,8	0,7	
	oben			Res.-Methode
	....	0,5	0,6	
	oben			Motor-Methode
	....	0,7	0,6	

ligten sich 65 Prüfstellen mit
72 IG- und 36 CFR-Motoren.

Meßgenauigkeit

ersuchen der stabilen Proben a, c und d sind
fällen Unterschiede bis zu 3,6 ROZ und bei
en 1, 2, 3 und 4 Unterschiede bis zu 4,6 MOZ
n. Die mittleren Streuungen sind, wie *Zahlen-*
igt, weit kleiner.

hwer meßbaren Probe f sind die Meßunterschiede
ich größer als bei den vorgenannten stabilen
n Benzol und Z mit f verbessern
Ogenauigkeit, ohne jedoch die-
n erreichen zu können. Ver-
ungen um den Mittelwert sind
ach den beiden Prüfmethoden
hode) in *Abb. 5* dargestellt.

eigt, wurden bei den Messungen
Motor-Methode ähnlich große Streuungen er-
ie bei den Messungen nach der Research-Methode,
r die Ergebnisse der Probe f nicht berücksich-
len. Nach den letzten Messungen vom Oktober
die Meßgenauigkeit bei der Research-Methode
OZ ebenso groß wie bei der Motor-Methode,

en Versuchen nach der Research-Methode vom
1942 wurde im Mittel aus beiden Motorenarten
der *Zahlentafel 5* angegebene Meßgenauigkeit
Hiernach wurde für die Probe 10a der größte
ngsunterschied mit 3,6 ROZ gegenüber der mitt-
r ±0,5 ROZ festgestellt. Bei der
prechenden Werte 3,3 OZ gegen-

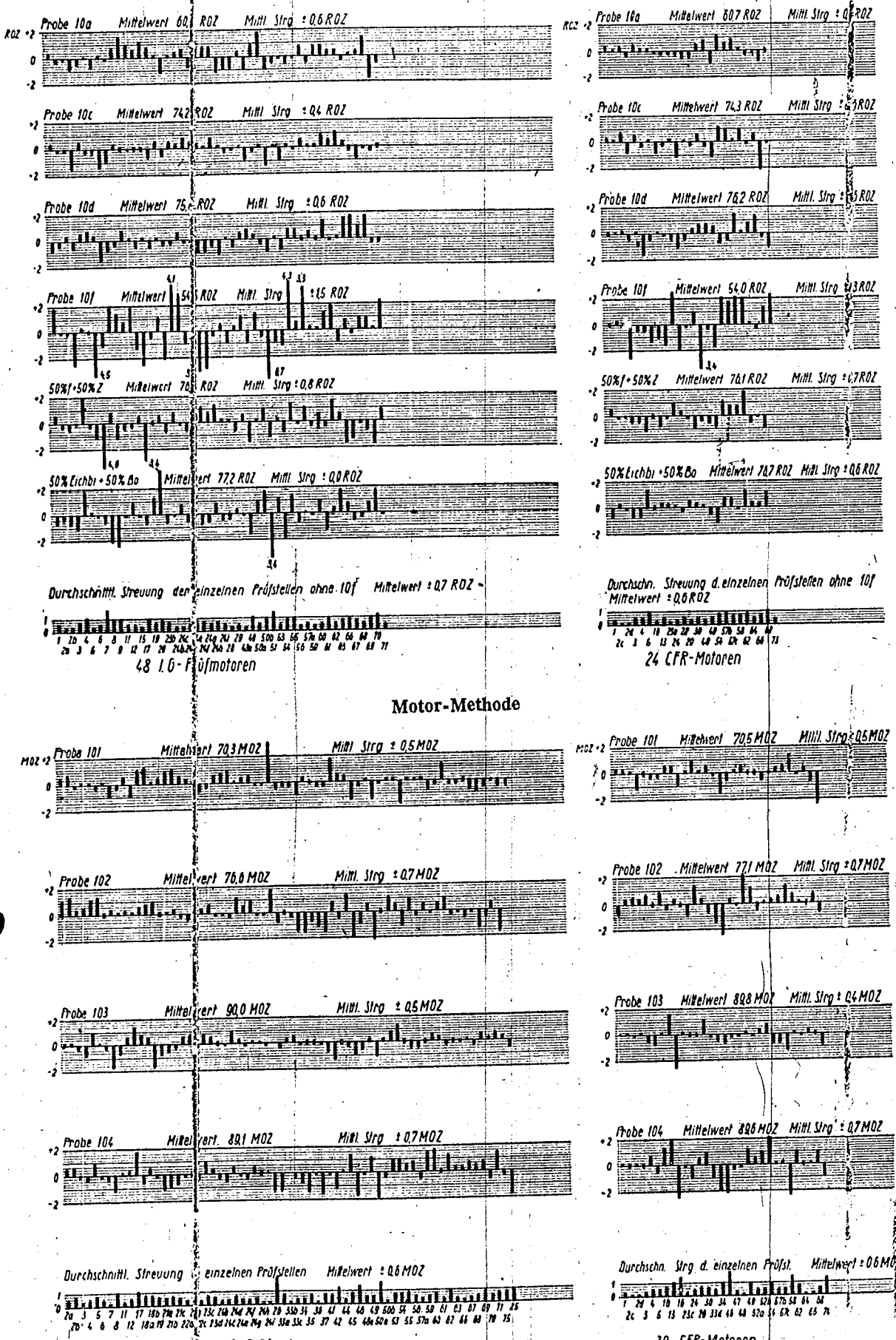


Abb. 5. Streugrenzen

über ±0,5 OZ und bei der Probe 10d wurden 3,3 OZ bzw. ±0,6 OZ gemessen. Die in *Abb. 5* aufgetragenen Streuungen um den Mittelwert der Probe 10f zeigen in der Häufigkeit der großen Abweichungen, daß von dieser Probe die Octanzahl verhältnismäßig unsicher bestimmt worden ist. Dies wird durch *Zahlentafel 5* bestätigt. Hier beträgt der größte Meßunterschied 11 ROZ bei einer mittleren Streuung von ±1,4 ROZ, also etwa das Dreifache wie bei den stabilen Proben 10a, 10c und 10d. Eine Mischung dieser Probe mit dem Eichstoff Z zu gleichen Teilen vermindert die größten Unterschiede auf 6,6 ROZ und die mittlere Streuung auf ±0,8 ROZ,

Zahlentafel 5. Meßgenauigkeit

Probe	größt. Meß-unterschied	Mittlere Streuung
10a	3,6 ROZ	±0,5 ROZ
10c	3,3 ROZ	±0,5 ROZ
10d	3,3 ROZ	±0,6 ROZ
10f	11,0 ROZ	±1,4 ROZ
50f/50Z	6,6 ROZ	±0,8 ROZ
50f/50Bo	6,8 ROZ	±0,8 ROZ
101	4,6 MOZ	±0,5 MOZ
102	4,6 MOZ	±0,7 MOZ
103	4,1 MOZ	±0,5 MOZ
104	4,6 MOZ	±0,7 MOZ

also auf rund die Hälfte der Werte für die unvermischte Probe. Auch für die als ersatzweises Einstellbenzin gedachte Benzin/Benzolmischung wurden schwankende Octanzahlen gefunden; bei einem größten Unterschied von 6,8 OZ liegt die mittlere Streuung bei ±0,8 OZ, also schlechter als dem Durchschnitt entspricht. Möglicherweise hat hier der Umstand, daß diese Probe von allen Prüfstellen selbst angesetzt werden mußte und daß hierbei verschiedene Lieferungen von Eichbenzin und Z verwendet worden sind, einen Einfluß ausgeübt. Bei den Messungen nach der Motor-Methode liegen die Verhältnisse ähnlich wie bei der Research-Methode; die Probe 10f wurde hier nicht untersucht.

Obwohl in vielen Fällen die größten Meßunterschiede von Zufälligkeiten abhängen und deshalb selten ein wahres Bild von der tatsächlich vorhandenen Meßgenauigkeit geben, so zeigen diese Werte doch, bis zu welchen äußersten Grenzen unter ungünstigen Verhältnissen die für ein Benzin erhaltenen Octanzahlen

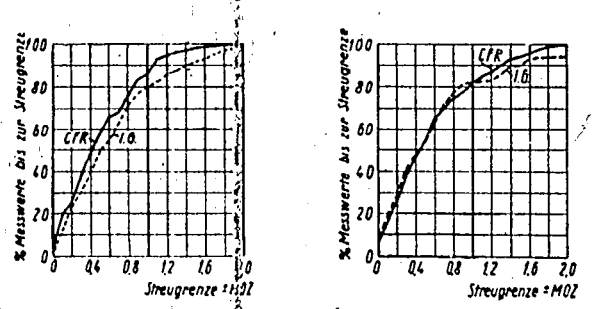


Abb. 6. Verteilung der Streugrenzen nach der Research-Methode (links) und nach der Motor-Methode (rechts) ohne Probe 10f

schwanken können. Nach den bisherigen Erfahrungen scheinen die größten Meßunterschiede etwa das Sechsfache der mittleren Streuung zu betragen; doch ist dieser Zusammenhang natürlich nur ganz lose. Zur Beurteilung der erreichten Meßgenauigkeit eignet sich besser die erzielte mittlere Streuung und die Verteilung der Streugrenzen.

Die erzielte Meßgenauigkeit ist sowohl für die einzelnen Proben als auch im Mittel für die stabilen Kraftstoffe in *Zahlentafel 4* unten angegeben. Sie beträgt jetzt rund ±0,6 OZ nach beiden Methoden und ist damit gegenüber den Versuchen vom April 1942 etwas verbessert. Die Verteilung der Streugrenzen zeigt *Abb. 6*. Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Motor- und der Research-Methode besteht nicht mehr. Nach diesen Ergebnissen wird jetzt eine Streugrenze von ±1 OZ von 82% der Klopfmotoren eingehalten und ist damit praktisch seit der letzten Tagung unverändert geblieben; hier wurde sie von 81% der Teilnehmer erreicht.

Zahlentafel 6. Mittlere Octanzahlen und Streuungen eines Benzolgemisches

Versuchsreihe	Bezeichnung	Octanzahl ROZ	Streuung ROZ
98	M	74,1	±0,5
100	9c	74,1	±0,5
101	10c	74,2	±0,5

Wiederholbarkeit

Ein Rückschluß auf die Zuverlässigkeit der Messungen eines jeden Prüfstandes ist dadurch möglich geworden, daß das Benzolgemisch „M" aus den Versuchen der ZB-Stellen bei den halbjährlichen Versuchen vom April unter der Bezeichnung „9c" und bei den Messungen im Oktober unter der Bezeichnung „10c" untersucht worden ist. Bei diesen dreimaligen, unabhängig voneinander durchgeführten Messungen sind die in *Zahlentafel 6* angeführten Mittelwerte erhalten worden.

Man sieht, daß mit Hilfe der Mittelwertbildung die Meßwerte und auch die Streugrenzen bei allen drei Versuchen praktisch unverändert geblieben sind. Demgegenüber streuten die Ergebnisse der einzelnen Prüfstellen z. T. recht merkbar, wie aus *Abb. 7* hervorgeht.

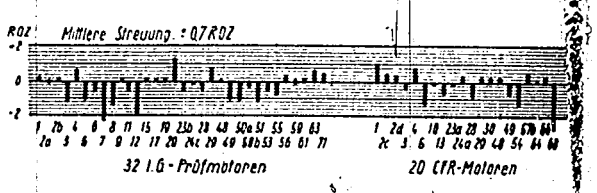


Abb. 7. Unterschied für 10c minus 9c der einzelnen Prüfstellen

Von 72 Klopfmotoren haben 52 Motoren zweimal das Benzolgemisch unter der Bezeichnung 9c und 10c untersucht. Der größte hierbei beobachtete Unterschied beträgt 2,7 ROZ und die mittlere Streuung ±0,7 ROZ. Die Wiederholung der Meßwerte an ein und demselben Motor ist also weniger genau durchgeführt worden als die OZ-Bestimmung der gleichen Probe an verschiedenen Motoren, wie ein Vergleich der entsprechenden Streugrenzen nach *Abb. 5* und *7* zeigt.

Bewertung des Synthesebenzins

Bei den Versuchen vom April und Oktober 1942 ist die Octanzahl des Synthesebenzins sehr unsicher bestimmt worden, was auch erwartet wurde. Der Ausweg, eine bessere Übereinstimmung der Meßwerte dadurch zu erzielen, daß an Stelle von Octanzahlen jetzt der Mischwert bestimmt wird, brachte keine klare Verbesserung. Nach den April-Versuchen stieg durch diese Maßnahme die Meßgenauigkeit, aber die Oktober-Versuche bestätigten dies nicht. Nach den Versuchen vom April hat sich zur Bestimmung des Mischwertes der Eichstoff Z als eine geeignetere Mischkomponente gezeigt als Benzol. Demgemäß enthielt die Mischung f/Z das Synthesebenzin f und den Eichstoff Z zu gleichen Teilen.

Es ist anzunehmen, daß die Mehrzahl der Versuchsteilnehmer die Proben unmittelbar hintereinander unter-

…en. Sie beträgt jetzt rund
…n und ist damit gegenüber
…42 etwas verbessert. Die
…zeigt *Abb. 6*. Ein wesent-
…r Motor- und der Research-
…r. Nach diesen Ergebnissen
…ne Streugrenze von ±1 OZ von 82% der
…n eingehalten und ist damit praktisch seit
…Tagung unverändert geblieben; hier wurde
… der Teilnehmer erreicht.

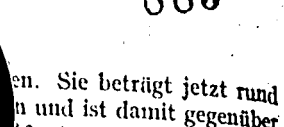
…Mittlere Octanzahlen und Streuungen eines Benzolgemisches

…ezeichnung	Octanzahl ROZ	Streuung ROZ
M	74,1	±0,5
	74,1	±0,5
	74,2	±0,5

…arkeit

…lässigkeit der Messungen
…durch möglich geworden,
… aus den Versuchen der
…halbjährlichen Versuchen vom April
…ezeichnung „9c" und bei den Messungen
…unter der Bezeichnung „10c" untersucht
Bei diesen dreimaligen, unabhängig von-
…hgeführten Messungen sind die in *Zahlen-*
…rten Mittelwerte erhalten worden.

…daß mit Hilfe der Mittelwertbildung die
…d auch die Streugrenzen bei allen drei
…aktisch unverändert geblieben sind. Dem-
…euten die Ergebnisse der einzelnen Prüf-
…echt merkbar, wie aus *Abb. 7* hervorgeht.



…chied für 10c minus 9c der einzelnen Prüfstellen

…fmotoren haben 52 Motoren zweimal das
… unter der Bezeichnung 9c und 10c unter-
…größte hierbei beobachtete Unterschied
…OZ und die mittlere Streuung ±0,7 ROZ.
…lung der Meßwerte an ein und demselben
… weniger genau durchgeführt worden als
…mung der gleichen Probe an verschiedenen
… ein Vergleich der entsprechenden Streu-
…Abb. 5 und *7* zeigt.

…nthesebenzins

…nd Oktober 1942 ist die
…sehr unsicher bestimmt
…rde. Der Ausweg, eine
… Meßwerte dadurch zu
…anzahlen jetzt der Misch-
… wird, brachte keine klare Verbesserung.
…il-Versuchen stieg durch diese Maßnahme
…igkeit, aber die Oktober-Versuche be-
… nicht. Nach den Versuchen vom April
…stimmung des Mischwertes der Eichstoff Z
…etere Mischkomponente gezeigt als Benzol.
…hielt die Mischung f/Z das Synthesebenzin f
…toff Z zu gleichen Teilen.

…hmen, daß die Mehrzahl der Versuchs-
… Proben unmittelbar hintereinander unter-

sucht hat. Es ist nun auffällig, daß weitaus die meisten Prüfstellen mit besonders großen Streuungen beim Untersuchen der Probe f die vorangegangenen Proben a, c und d innerhalb der üblichen Streugrenzen bewertet haben (vgl. IG-Prüfstelle 6 in *Abb. 5*). Dies beweist, daß diese Streuungen vorwiegend auf die Art des Benzins zurückzuführen sind und nicht auf die Handhabung bei der Klopfwertbestimmung. Bei solchen Kraftstoffen wie die Probe 10f sichert der richtig gefundene Kontrollwert der andersartigen Einstellbenzine 10a und 10c nicht unbedingt gegen gelegentliche stärkere Streuungen. Mit dieser Einschränkung soll selbstverständlich die Brauchbarkeit der Einstellbenzine nicht angezweifelt, sondern nur auf die Anwendungsgrenze hingewiesen werden.

Zahlentafel 7. Meßunterschiede zwischen dem IG- und dem CFR-Motor

Probe	IG	CFR	IG minus CFR
10a	60,8 ROZ	60,7 ROZ	+0,1 ROZ
10c	74,2 ROZ	74,3 ROZ	—0,1 ROZ
10d	75,6 ROZ	76,2 ROZ	—0,6 ROZ
10f	54,5 ROZ	54,0 ROZ	+0,5 ROZ
50f/50Z	76,2 ROZ	76,1 ROZ	+0,1 ROZ
50f/50Bo	77,2 ROZ	76,7 ROZ	+0,5 ROZ
101	70,3 MOZ	70,5 MOZ	—0,2 MOZ
102	76,6 MOZ	77,1 MOZ	—0,5 MOZ
103	90,0 MOZ	89,8 MOZ	+0,2 MOZ
104	89,1 MOZ	89,6 MOZ	—0,5 MOZ
Mittl. Streuung ROZ	±0,8	±0,7	—0,1
Mittl. Streuung MOZ	±0,6	±0,6	±0,0

Vergleich der beiden Motorenarten

Bei den Messungen im April und Oktober waren rund doppelt soviel IG-Motoren wie CFR-Motoren eingesetzt. In Übereinstimmung mit den früheren halbjährlichen Vergleichsversuchen bestätigen auch diese Messungen, daß nur ein unwesentlicher Unterschied zwischen den Ergebnissen dieser beiden Bauarten besteht. Die entsprechenden Zahlenwerte für die Versuche vom Oktober enthält *Zahlentafel 7*.

Die Ergebnisse der beiden Motorenarten stimmen gut miteinander überein, denn der größte Unterschied beträgt 0,6 ROZ bei der Probe 10d. Alle anderen Werte sind kleiner und liegen damit innerhalb der üblichen Meßgenauigkeit. Die mittlere Streuung ist an beiden Motorenarten praktisch gleich groß, d. h. ihr Unterschied ist Null.

IV. Rückblick über die bisher durchgeführten halbjährlichen Vergleichsversuche

Es sind bis jetzt 10 halbjährliche Vergleichsversuche durchgeführt worden, wobei von Versuch zu Versuch die Teilnehmerzahl und damit die eingesetzten Motoren zugenommen haben. In der *Zahlentafel 8* sind die Entwicklung und das hauptsächlichste Ergebnis der nunmehr abgeschlossenen 10 Vergleichsmessungen im Zeitraum zwischen 1936 und 1942 angegeben. Aus der 3. bis 5. Spalte

Zahlentafel 9. Meßgenauigkeit und Benzinsorte

Methode	Probe	Gegenüber dem Mittelwert ist die Streuung größer	gleich	kleiner	Beurteilung gegenüber dem Mittelwert
Res.-Methode	a	3×	2×	5×	ähnlich
	b	1×	2×	5×	besser
	c	2×	2×	7×	besser
	d	2×	3×	2×	ähnlich
	f	2×	0×	0×	schlechter
Motor-Methode	1	1×	1×	8×	besser
	2	4×	4×	1×	schlechter
	3	4×	2×	4×	ähnlich
	4	4×	0×	0×	schlechter

erkennt man die Entwicklung und den Umfang dieser Versuchsreihen. Vom 5. Arbeitsgemeinschafts-Versuch an ist der Mitarbeiterkreis möglichst umfassend gewählt worden, so daß erst von hier an von einer allgemeinen Teilnahme gesprochen werden kann. Seither ist die Teilnehmerzahl durch neu eingerichtete Prüfstellen wie auch durch Teilnahme des Auslandes weiter angestiegen. Dies äußerte sich zunächst in einem Absinken der Meßgenauigkeit, die natürlich bei den früheren Vergleichsversuchen mit wenigen, gut eingearbeiteten Prüfstellen recht hoch lag. Diese Änderung der Meßgenauigkeit kommt in den Spalten 6 und 7 zum Ausdruck.

Von den bisher untersuchten neun verschiedenen Benzinmustern a, b, c, d, f, 1, 2, 3 und 4 sind die fünf Proben a, c, 1, 2 und 3 bei allen zehn Arbeitsgemeinschafts-Versuchen eingesetzt gewesen. Sie ermöglichen deshalb einen guten Vergleich. Die Proben mit gleicher Bezeichnung, z. B. „a", sind verschiedene Lieferungen aber gleichen Erzeugerstellen. Die 7. Spalte gibt die mittlere Streuung an für die einzelnen Streuungen, die in den Spalten 8 bis 16 angeführt sind. Naturgemäß liegen diese einzelnen Streuungen teils über, teils unter diesem Mittelwert. Proben, deren mittlere Streuungen vorwiegend kleiner sind als der Mittelwert, z. B. Probe 1, können

Zahlentafel 8. Gesamtergebnis der halbjährlichen Vergleichsversuche an Klopfmotoren

Bezeichnung Agm Versreihe	Bezeichnung VV Nr.	Zeitpunkt	Anzahl der Teilnehmer	Anzahl der Motoren	Anzahl der Einzelmessung.	±1,0 OZ eingehalt. durch %	Mittlere Streuung aller Prob. OZ	der einzelnen Proben a ROZ	b ROZ	c ROZ	d ROZ	f ROZ	1 MOZ	2 MOZ	3 MOZ	4 MOZ
1	36	Aug. 36	3	4	44	85	0,7	0,5	0,5	0,3	—	—	0,5	1,0	2,0	—
2	50	Nov. 37	5	10	118	80	0,7	0,6	0,4	0,9	—	—	0,5	0,7	0,8	—
3	59	Sept. 38	8	11	126	85	0,8	0,9	0,5	0,5	—	—	0,5	0,7	0,7	—
4	65	April 39	14	21	246	70	0,9	1,0	0,7	0,7	0,9	—	1,0	—	1,1	—
5	75	Febr. 40	23	38	458	55	1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	—	0,9	1,0	1,4	—
6	82	Okt. 40	25	32	539	70	0,9	1,0	1,4	0,8	0,7	—	0,7	0,9	0,8	—
7	92	April 41	41	66	504	78	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	—	0,6	0,9	0,6	0,9
8	95	Okt. 41	52	84	634	81	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	—	0,6	0,9	0,6	0,8
9	100	April 42	60	94	670	82	0,7	0,5	—	0,5	0,6	1,2	0,5	0,7	0,7	0,8
10	101	Okt. 42	65	107	728	82	0,6	0,5	—	0,5	0,6	1,4	0,5	0,7	0,5	0,7

Probe a = Hydrierbenzin, rein, b = Hydrierbenzin + Alkohol, c = Hydrierbenzin + Motorenbenzol, d = Hydrierbenzin + Bleitetraäthyl, f = Synthesebenzin mit Inhibitor. Probe 1 = Paraffinbenzin, 2 = Aromatenbenzin, 3 = Paraffinbenzin, gebleit, 4 = Aromatenbenzin, gebleit.

deshalb hinsichtlich der Bestimmung des Klopfverhaltens als leicht bestimmbar angesehen werden und geben deshalb eine gute Meßgenauigkeit.

Um festzustellen, in welcher Weise die Meßgenauigkeit von der Benzinsorte abhängig ist, ist in *Zahlentafel 9* für jede der neun Proben angeführt, wie oft ihre in *Zahlentafel 8* angegebenen Streuungen größer, gleich oder kleiner als die mittlere Streuung aller Proben sind.

Zahlentafel 9 zeigt, daß gegenüber dem Mittelwert bei der Research-Methode das Alkohol (b)- und das Benzol (c)-Gemisch besser, das Synthesebenzin f schlechter gemessen wird, als dem Mittelwert entspricht.

Bei der Motor-Methode wird besonders das ungebleite Paraffinbenzin (1) besser und das gebleite Aromatenbenzin (4) schlechter als der entsprechende Mittelwert gemessen. *Zahlentafel 8* zeigt weiter, daß die Meßgenauigkeit, wie sie in den Spalten 6 und 7 zum Ausdruck kommt, etwa auf der gleichen Höhe gehalten werden konnte, obwohl seither die Zahl der Prüfstellen und Motoren um mehr als die Hälfte zugenommen hat. Wie früher ausgeführt wurde, dürfte jetzt eine wesentliche Steigerung der Meßgenauigkeit erst dann zu erwarten sein, wenn zuvor die Wiederholbarkeit der Untersuchungsergebnisse bei den einzelnen Prüfstellen merkbar verbessert worden ist.

V. Folgerungen

1. Wiederholte Messungen am gleichen Motor haben im Mittel keine kleinere Streuung gezeigt, als bei den Messungen an verschiedenen Motoren erhalten worden ist. Deshalb kann eine bessere Übereinstimmung der Werte aller Prüfstellen zur Zeit nur auf dem Wege einer Steigerung der Meßsicherheit eines jeden einzelnen Prüfstandes erreicht werden.

2. Wenn man als Meßgenauigkeit die Streugrenze bezeichnet, die im Mittel von allen Teilnehmern eingehalten werden kann, so schwankt diese je nach Art des untersuchten Benzins zwischen ±0,5 und ±1,4 OZ. Diese Streugrenze wird jedoch nur von rund 60% aller Teilnehmer eingehalten.

3. Die Ergebnisse zeigen, daß die übliche Angabe der Meßgenauigkeit mit ±1 OZ für Messungen an verschiedenen Prüfstellen und mit ±0,5 OZ für Wiederholungen durch die gleiche Prüfstelle von der Praxis besonders dann nicht eingehalten werden kann, wenn die Benzine ganz oder teilweise Kraftstoffe enthalten, die als unsicher meßbar bekannt sind. Je nach der Art des Benzins liegen 50 bis 90% aller Meßwerte im Streubereich von ±1 OZ.

4. Da im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen im Mittel der Mischwert der Probe 10f nicht genauer bestimmt werden konnte als die unmittelbar gemessene Octanzahl, dürfte der Mischwert als vorübergehender Ersatz der Octanzahl allgemein noch nicht in Frage kommen. In manchen Einzelfällen ist jedoch eine bessere Angleichung beobachtet worden, weshalb weitere Untersuchungen in dieser Richtung zweckmäßig sein dürften.

5. Es ist noch nichts bekannt über die Meßgenauigkeit von Synthesebenzinen verschiedener Herkunft, über den Einfluß des Inhibitors und der Prüfmethode auf die Meßgenauigkeit. Es wird deshalb vorgeschlagen, die Untersuchungen auszudehnen und dafür die Messungen der leicht bestimmbaren Benzinproben etwas einzuschränken.

[redacted]gkeit die Streugrenze be-
n allen Teilnehmern ein-
schwankt diese je nach
enzins zwischen ±0,5 und
OZ. Diese Streugrenze wird jedoch nur von
0% aller Teilnehmer eingehalten.

rgebnisse zeigen, daß die übliche Angabe der
auigkeit mit ±1 OZ für Messungen an ver-
nen Prüfstellen und mit ±0,5 OZ für Wieder-
en durch die gleiche Prüfstelle von der Praxis
rs dann nicht eingehalten werden kann, wenn
zine ganz oder teilweise Kraftstoffe enthalten,
unsicher meßbar bekannt sind. Je nach der
s Benzins liegen 50 bis 90% aller Meßwerte
ubereich von ±1 OZ.

[redacted]vorangegangenen Versuchen
r Probe 10f nicht genauer
die unmittelbar gemessene
wert als vorübergehender
nein noch nicht in Frage
nzelfällen ist jedoch eine
obachtet worden, weshalb
Untersuchungen in dieser Richtung zweck-
sein dürften.

noch nichts bekannt über die Meßgenauigkeit
nthesebenzinen verschiedener Herkunft, über
nfluß des Inhibitors und der Prüfmethode
Meßgenauigkeit. Es wird deshalb vorgeschlagen,
ntersuchungen auszudehnen und dafür die
gen der leicht bestimmbaren Benzinproben
nzuschränken.

Dr. W. Danneefelser

Beobachtungen beim Untersuchen von Synthesebenzin

Nachdem bei der letzten Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung in bezug auf die allgemeine Meßgenauigkeit die Voraussetzungen dazu gegeben waren, in die Ringversuche Benzine mit einzubeziehen, welche über das allgemeine Maß an Meßgenauigkeit hinaus ungewöhnliche Streuungen verursachen, stellte ich damals als besonders vordringlich und interessant das Problem der Klopfmessung von Synthesebenzin heraus. Bei der Kennzeichnung der Art und der Beschaffenheit des Synthesebenzins wies ich auf die rein aliphatische Natur und auf den Gehalt an ungesättigten Kohlenwasserstoffen hin, welche — abgesehen von den niedrigen Gliedern der n-Paraffinreihe — Hauptträger seiner Klopffestigkeit sind *(Abb. 8)*. Die ungesättigten Kohlenwasserstoffe führen erwiesenermaßen bei der Lagerung nicht zu Harzbildungen durch Polymerisation, weil es sich hier ausschließlich um Mono-Olefine und nicht, wie z. B. bei Spaltbenzinen, teilweise um Diolefine handelt.

Diese klopffesten Bestandteile des Synthesebenzins bleiben also bei der Lagerung erhalten. Gegen die für die Klopffestigkeit so gefährliche Bildung von Peroxyden sind jedoch auch die einfachen Olefine nicht ganz gefeit. Wir wissen, wie ich seinerzeit ausführte, daß sich auch im Synthesebenzin unter gewissen Bedingungen Peroxyde bilden können, welche bekanntlich die Octanzahl herabsetzen und als „Klopfpeitschen" wirken. Es lagen auch schon Erfahrungen darüber vor, daß bei der Lagerung großer Mengen eine wesentliche Peroxydbildung nicht zu befürchten ist, da offenbar die Bereitschaft zur Autoxydation bei den Mono-Olefinen viel geringer ist als z. B. bei den Dienen. Ich konnte jedoch Beobachtungen und Ergebnisse bekanntgeben, wonach Untersuchungsproben, d. h. also Benzinproben in kleineren Gebinden, unter gewissen Bedingungen dem Einfluß einer Peroxydbildung verfallen können. Ich wies ferner darauf hin, daß durch Verdampfung der leichter siedenden Anteile eine Änderung der Klopffestigkeit zu befürchten sei. Während aber Verdampfung und Peroxydbildung zu einem ausgesprochenen Octanzahl-Rückgang führen, konnte ich darauf hinweisen, daß außerdem bei der Klopfmessung von Synthesebenzin außerordentliche Streuungen auftreten können und zwar vor allem zwischen verschiedenen Prüfmotoren, gelegentlich aber auch bei in verschiedenen Zeitabständen wiederholten Messungen an ein und derselben Maschine. Auch diese Beobachtungen wurden in der damaligen Aussprache von verschiedenen Seiten bestätigt. Nachweislich beruht diese Erscheinung nicht auf zuvor im Benzin gebildeten Peroxyden, was schon daraus hervorging, daß bei Klopfmessungen mit ein und demselben Benzin nicht nur niedrigere, sondern auch wieder höhere Octanzahlen gefunden wurden.

Wenn dieses damals aufgezeigte Problem von den Teilnehmern der Tagung nicht unterschätzt worden ist, so kann nicht erwartet werden, daß ich heute schon eine vollständige Lösung vortragen kann. Die beiden letzten Ringversuche gaben lediglich ein Bild über die auftretenden Streuungen. Es liegen aber auch inzwischen außer eigenen Versuchen weitere Beobachtungen und Versuchsergebnisse verschiedener Prüfstellen des Zentralbüros vor, welche mir zwecks einheitlicher Auswertung zugestellt worden sind. Es erscheint daher als eine nützliche Aufgabe, alles uns bisher auf diesem Gebiet Bekannte zu einem klaren Bild zusammenzufassen, welches gestattet, daraus Schlüsse für die weitere Behandlung des Problems zu ziehen.

Bevor ich auf die neueren Erfahrungen und Versuchsergebnisse eingehe, erscheint es zweckmäßig, noch einmal ganz klar herauszustellen, daß wir bei unseren Untersuchungen über das Synthesebenzin grundsätzlich drei verschiedene Punkte zu unterscheiden und zu behandeln haben:

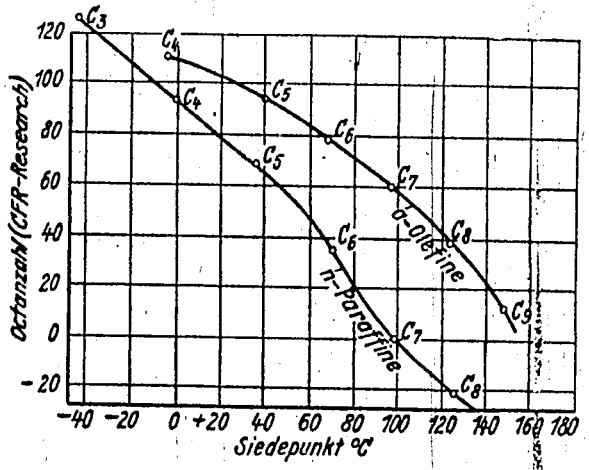


Abb. 8. Klopffestigkeit der im Benzinbereich siedender n-Paraffine und α-Olefine

1. Auswirkung einer (physikalischen) Änderung in der Zusammensetzung des Benzins auf die Klopffestigkeit (Verdampfung).

2. Octanzahländerung durch chemische Einwirkungen auf das Benzin (Peroxydbildung).

3. Streuung der motorischen Klopfmessungen, bewirkt durch Eigenheiten der einzelnen Prüfmotoren oder gewisse Umstände bei der Klopfmessung selbst, auf welche das Synthesebenzin in besonderem Maße reagiert.

Jeder dieser drei Punkte muß für sich geprüft werden, wobei jeweils die beiden anderen — und das ist besonders zu betonen — nicht außer acht zu lassen sind. So muß man bei Untersuchungen über die beiden ersten Punkte berücksichtigen, daß Streuungen der Klopfmessung das Ergebnis beeinträchtigen können. Da die Streuungen am stärksten unter verschiedenen Motoren auftreten, muß man Versuchsreihen auf ein und denselben Prüfmotor beschränken. Aber auch dann ist bei der Beurteilung der Ergebnisse auf Streumöglichkeit von in verschiedenen Zeitabständen ausgeführten Klopfmessungen Rücksicht zu nehmen. Am sichersten ist es, wenn man den Versuch so durchführt, daß mehrere in verschiedener Weise behandelte Proben zu gleicher Zeit am gleichen Prüfmotor geklopft werden. Muß man allerdings Lagerversuche in längerem Zeitraum durchführen, so ist der Einfluß einer Klopfmeßstreuung in Kauf zu nehmen, und die Versuche sind entsprechend auszuwerten. Die laufenden Kontrollmessungen mit Einstellkraftstoffen besagen dabei so gut wie nichts, da die Streuungen, wie später gezeigt wird, auch dann auftreten, wenn der Prüfmotor die Einstellkraftstoffe richtig bewertet.

Von dem Einfluß einer teilweisen Verdampfung kann man sich in jedem Fall dadurch freimachen, daß man streng auf guten Verschluß der Probe- und Standgefäße achtet.

Eine Peroxydbildung wird man bei Untersuchungen über die beiden übrigen Punkte durch entsprechende Versuchsanordnung und Beschränkung auf möglichst kurze Versuchsdauer ausschalten können, vor allem aber

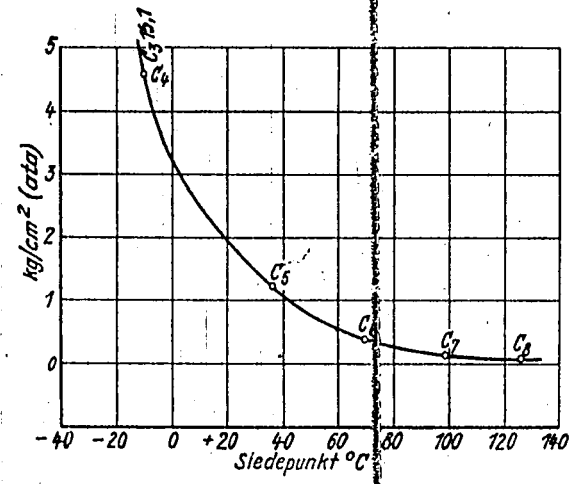


Abb. 9. Dampfdruck der n-Paraffine bei 40° C

dadurch, daß man das zu den Versuchen heranzuziehende Benzin zuvor inhibiert, was wir ja auch bei den zwei letzten Vergleichsversuchen getan haben. Daß der Inhibitor nicht auch die Streuungen unterbindet, war auf Grund von Feststellungen in der Aussprache nach meinem damaligen Vortrag zu erwarten und hat sich durch die inzwischen stattgefundenen Vergleichsversuche bestätigt. Unter diesen Gesichtspunkten möchte ich, wenn ich nun auf die genannten drei Punkte eingehe, die mir vorliegenden Versuchsergebnisse besprechen und auswerten.

I. Über den Einfluß einer Veränderung in der Zusammensetzung von Syntheseben zin durch teilweise Verdampfung

Im Zusammenhang mit den mir vorliegenden Versuchen wurde besonders in einem Fall (Versuche des BV-Labors) bei längerer Lagerung auf Veränderungen in der Zusammensetzung der Versuchsbenzine besonders geachtet. Diese Versuche wurden in 2-Liter-Kanistern mit sechs verschiedenen Syntheseb nzinen durchgeführt und erstreckten sich auf einen Zeitraum von acht Wochen. In Abständen von je 14 Tagen wurden die Benzine auf Veränderung von Klopffestigkeit Peroxydzahl und C_4-Gehalt untersucht. Die Kanister waren stets gut verschlossen, und es hat sich gezeigt, daß der C_4-Gehalt in keinem Fall merklich zurückgegangen war *(Zahlentafel 14)*, obwohl die Probekanister zu jeder Untersuchung geöffnet werden mußten.

Bei Beurteilung dieser Versuchsergebnisse hinsichtlich Peroxydbildung, worauf ich später eingehe, braucht also ein evtl. Einfluß durch Verdampfungsverluste nicht berücksichtigt zu werden. Das Ergebnis selbst bestätigt, daß bei sachgemäßer Lagerung und Behandlung von Proben ein wesentlicher Verdampfungsverlust nicht zu befürchten ist. Auch aus Lagerversuchen in größeren gut verschlossenen Fässern ist diese Tatsache bekannt. Eine gewisse, wenn auch noch so geringe Verdampfung muß aber stattfinden, wenn Proben mehrmals geöffnet, und noch vielmehr, wenn sie abgefüllt oder umgeschüttet werden. Schließlich muß sich eine damit verbundene Änderung der Zusammensetzung des Benzins doch bemerkbar machen.

Machen wir uns zunächst einmal die Verhältnisse von der theoretischen Seite her klar und betrachten wir *Abb. 8* und *9*. *Abb. 8*[1]) zeigt uns den Abfall der Klopffestigkeit mit steigendem Siedepunkt für die n-Paraffine und die einfachen Olefine. Wir sehen, daß von den n-Paraffinen C_4 und C_5, also Butan und Pentan (C_3 kommt im stabilisierten Synthesebenzin praktisch nicht vor), von den Olefinen sogar C_4 bis C_7 oberhalb einer mittleren OZ des Synthesebenzins von 50 bis 60 liegen. *Abb. 9* zeigt die Abhängigkeit des Dampfdrucks vom Siedepunkt der n-Paraffine (die entsprechende Kurve für die Olefine deckt sich etwa mit derjenigen der n-Paraffine). Da die Kohlenwasserstoffe oberhalb C_5 bei 40° keinen Überdruck mehr aufweisen, ist in *Abb. 9* der absolute Dampfdruck (ata) aufgetragen. Wir sehen, daß hier zum Unterschied von *Abb. 8* nur C_4, und zwar mit 2,55 atü ganz erheblich über einem mittleren Dampfdruck des Synthesebenzins von etwa 0,7 atü liegt.

Den Einfluß von C_4-Verlust auf Octanzahl und Dampfdruck zeigt *Abb. 10*. Bei einem Dampfdruck um 0,7 und einer OZ um 58 bewirkt 1% C_4-Verlust rechnerisch eine Dampfdruckerniedrigung um 0,055 und einen OZ-Abfall um 0,4 (dabei ist für C_4 eine mittlere OZ von 100 angenommen). 2% C_4-Verlust machen beim Dampfdruck 0,11 kg/cm² und bei der OZ etwa 0,9 aus. Bei reinem C_4-Verlust würde sich also bei dieser Betrachtung die Dampfdruckänderung viel deutlicher bemerkbar machen als die Änderung der OZ. Bei der tatsächlichen Verdampfung des Benzins wird aber dieser stark unterschiedliche Einfluß etwas herabgemindert. Bekanntlich setzt sich der Dampfdruck eines Flüssigkeitsgemisches nach Maßgabe der Mol-Brüche aus den Teildrücken der Mischungskomponenten zusammen, so daß anteilig alle Mischungskomponenten verdampfen. Den verschiedenartigen Dampfdrücken entsprechend enthält über das Dampfgemisch jeweils mehr Anteile der Komponenten mit höherem Dampfdruck, so daß im Laufe der fortschreitenden Verdampfung die Flüssigkeit und damit

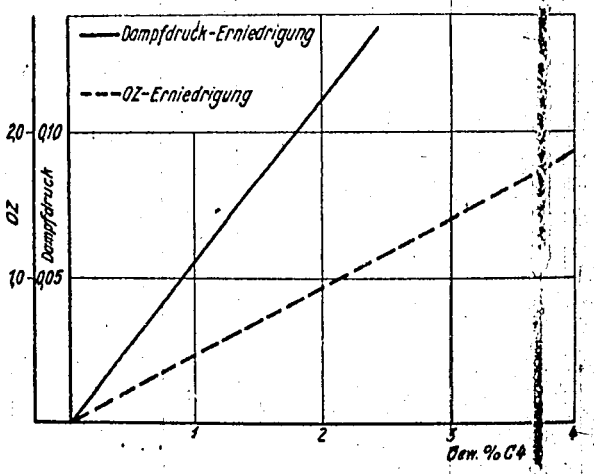


Abb. 10. Erniedrigung von Dampfdruck und Octanzahl durch C_4-Entzug bei einem Benzin mit einem Dampfdruck um 0,7 und einer Octanzahl um 58

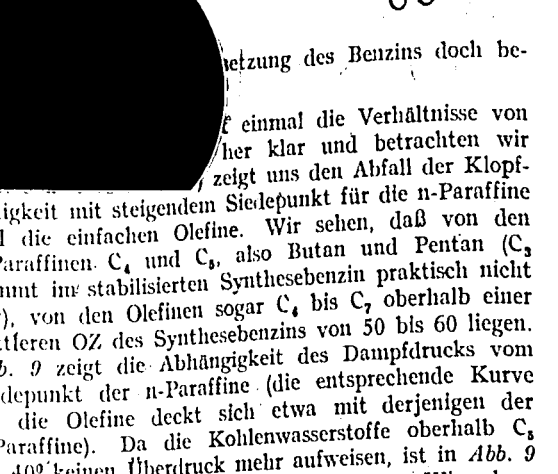
das jeweils folgende Dampfgemisch an der leichter siedenden Komponente bzw. derjenigen mit höherem Dampfdruck immer weiter verarmt. Letzteres ist in unserem Beispiel bei Butan der Fall, welches im allgemeinen in der Größenordnung von 3 bis 5% im Synthesebenzin vorliegt. Durch seinen gegenüber dem Gesamtbenzin

[1]) Einem Schaubild nach *M. Pier* in dem „Vorbericht der Dtsch. Akad. Luftfahrtforschung", Mai 1939, entnommen.

…etzung des Benzins doch be-

…f einmal die Verhältnisse von …her klar und betrachten wir … zeigt uns den Abfall der Klopf-…igkeit mit steigendem Siedepunkt für die n-Paraffine …l die einfachen Olefine. Wir sehen, daß von den …araffinen C_4 und C_5, also Butan und Pentan (C_3 …mmt im stabilisierten Synthesebenzin praktisch nicht …), von den Olefinen sogar C_4 bis C_7 oberhalb einer …tferen OZ des Synthesebenzins von 50 bis 60 liegen. …b. *9* zeigt die Abhängigkeit des Dampfdrucks vom …depunkt der n-Paraffine (die entsprechende Kurve … die Olefine deckt sich etwa mit derjenigen der …araffine). Da die Kohlenwasserstoffe oberhalb C_5 …40° keinen Überdruck mehr aufweisen, ist in *Abb. 9* …absolute Dampfdruck (ata) aufgetragen. Wir sehen, …ed von *Abb. 8* nur C_4, und zwar …ch über einem mittleren Dampf-…s von etwa 0,7 atü liegt.

…ust auf Octanzahl und Dampf-…ei einem Dampfdruck um 0,7 …wirkt 1% C_4-Verlust rechnerisch …rigung um 0,055 und einen OZ-…fall um 0,4 (dabei ist für C_4 eine mittlere OZ von 100 …genommen). 2% C_4-Verlust machen beim Dampfdruck …11 kg/cm² und bei der OZ etwa 0,9 aus. Bei reinem …-Verlust würde sich also bei dieser Betrachtung die …ampfdruckänderung viel deutlicher bemerkbar machen …s die Änderung der OZ. Bei der tatsächlichen Ver-…mpfung des Benzins wird aber dieser stark unterschied-…he Einfluß etwas herabgemindert. Bekanntlich setzt …ch der Dampfdruck eines Flüssigkeitsgemisches nach …aßgabe der Mol-Brüche aus den Teildrücken der …ischungskomponenten zusammen, so daß anteilig …e Mischungskomponenten verdampfen. Den ver-…drücken entsprechend enthält aber …ls mehr Anteile der Komponenten …ck, so daß im Laufe der fort-…ng die Flüssigkeit und damit



…n Dampfdruck und Octanzahl durch …zin mit einem Dampfdruck um 0,7 …er Octanzahl um 58

…das jeweils folgende Dampfgemisch an der leichter sie-…denden Komponente bzw. derjenigen mit höherem Dampf-…druck immer weiter verarmt. Letzteres ist in unserem Beispiel bei Butan der Fall, welches im allgemeinen in der Größenordnung von 3 bis 5% im Synthesebenzin vorliegt. Durch seinen gegenüber dem Gesamtbenzin

[1]) Einem Schaubild nach *M. Pier* in dem „Vorbericht der Dtsch. Akad. Luftfahrtforschung", Mai 1939, entnommen.

extrem hohen Dampfdruck wirkt sich auch ein geringer Verlust schon merklich aus, obwohl die Dampfdruckabnahme durch Verdampfen des reinen C_4 durch die gleichzeitige Verdampfung höherer Glieder der Paraffinreihe mit deutlich geringerem Dampfdruck als das Gesamtbenzin stark eingeschränkt wird. Anders bei der Octanzahl. Hier wirken auch die mitverdampfenden nächst höheren Glieder mit noch immer höherer Octanzahl als das Gesamtbenzin ebenfalls erniedrigend auf die Klopffestigkeit.

Ein praktisches Beispiel mag diese Überlegungen erhärten. Wir haben durch übertriebene Versuchsbedingungen die Veränderungen einiger physikalischer Konstanten sowie der Klopffestigkeit erfaßt. Es wurden aus einem Tank mit Synthesebenzin gleichzeitig drei Kanister durch Eintauchen unter die Oberfläche gefüllt und sofort gut verschlossen. Eine der Proben (I) wurde einmal in ein zweites Gefäß umgefüllt und wieder zurückgeschüttet. Bei einer weiteren Probe (II) wurde der gleiche Vorgang außerdem noch viermal wiederholt. Die Proben wurden vor und nach Behandlung genau verwogen und ebenso das Gefäß, in welches die Proben umgeschüttet wurden, um den evtl. verbleibenden Rückstand mitzuerfassen. Die Ergebnisse zeigt *Zahlentafel 10*. Man sieht, daß sich das zweimalige Umfüllen vor allem beim Dampfdruck bemerkbar gemacht hat, der um 0,02 kg/cm² deutlich gefallen ist. Die Wichte hat nicht viel zugenommen, obwohl der Gewichtsverlust 0,8% beträgt. Die Octanzahl weist keinen meßbaren Unterschied gegenüber der unbehandelten Probe auf. Bei der in fünffacher Weise so behandelten Probe (III) ist der Dampfdruck um 0,07 gefallen. Auch der Gewichtsverlust ist mit 4,1% beachtlich groß. Nun ist auch die Octanzahl deutlich abgefallen und die Wichte merklich angestiegen. In bezug auf die OZ-Messungen ist zu bemerken, daß sie an allen drei Proben gleichzeitig durchgeführt wurden, so daß mit ungewöhnlicher Streuung nicht zu rechnen ist.

Man sieht, daß bei solcher Behandlungsweise schon eine Veränderung des Benzins eintritt, die sich auch auf die Klopffestigkeit auswirkt. Praktisch bedeutsam ist die übertriebene Behandlung der dritten Probe nicht, aber ein zweimaliges Umschütten von Proben kommt gelegentlich schon vor, und man darf aus diesem Versuch den Schluß ziehen, daß die dabei auftretenden Veränderungen in der Zusammensetzung eines solchen Synthesebenzins die Octanzahl noch nicht wesentlich beeinflussen, obwohl die Verdampfungsverluste in der Hauptsache durch die leichtest flüchtigen Kohlenwasserstoffe bedingt sind, welche zugleich besonders hohe Klopffestigkeit besitzen.

Zahlentafel 10. Veränderung einiger physikalischer Konstanten und der Klopffestigkeit durch Verdampfung bei übertriebenen Versuchsbedingungen

Nr. und Gewicht der Probe	Behandlung	Wichte bei 15°	*Reid*-Dampfdruck bei 40°	ROZ	Gew.-Verlust g	Gew.-Verlust %
I	gut verschloss. kühl aufbewahrt	0,6795	0,77	60.9	—	—
II (1410,8 g)	2mal umgeschüttet	0,680	0,75	60.9	12.0	0.85
III (1392,3 g)	nach 2maligem Umschütten zwischendurch verwogen	—	—	—	11,0	0,79
	10mal umgeschüttet	0,681	0,70	58,6	57,3	4,1

Ich habe auf Grund der obigen Überlegungen das Beispiel rechnerisch überprüft. Da der Dampfdruck von Pentan nur etwa 0,2 atü beträgt, so muß ein wesentlicher Teil der Verdampfungsverluste aus Butan bestehen, um eine solche Dampfdruckerniedrigung um 0,07 bzw. 0,02 atü zu bewirken. Die Berechnung ergab, daß die Verluste zumindest zur Hälfte aus C_4, zum übrigen Teil aus höheren Kohlenwasserstoffen bestehen müssen. Das Ergebnis der weiteren Berechnungen zeigt *Zahlentafel 11*.

Zahlentafel 11. Berechnung der Verdampfungsverluste und Eigenschaften für 0,07 bzw. 0,02 at Dampfdruckabnahme

Verluste in % gesamt	Verluste in % davon für C_4 ber.	Eigenschaft	Änderung ber.	Änderung gef.
4,0	2 bis 2,5	Dampfdruck	—0,07	—0,07
	2 bis 2,5	Wichte	+0,0015	+0,0015
		ROZ	—1,2	—2,3
0,8	0,4 bis 0,5	Dampfdruck	—0,02	—0,02
		Wichte	+0,0003	<+0,0015
		ROZ	—0,2	±0

Man sieht, daß die Veränderungen der Wichte den Berechnungen für die Dampfdruckabnahme durchaus entsprechen. Die OZ-Abnahme ist bei 0,8% Verlust mit 0,2 berechnet, also innerhalb der Fehlergrenze. Bei 4% Verlust beträgt die errechnete OZ-Abnahme 1,2. Wenn sie mit 2,3 gefunden wurde, so mag dieser Unterschied für Synthesebenzin noch im Rahmen einer recht günstigen Streuung liegen.

Zahlentafel 12. Verschiedene Art der Versuchsanstellung mit einem Synthesebenzin

B.-Nr.	Gebinde	Leerraum d. Flasche
23 839	Weiße 2-l-Flasche	Luft
23 842	Weiße 2-l-Flasche	Luft
23 843	Weiße 2-l-Flasche	N_2
23 844	Braune 2-l-Flasche	Luft
23 845	Braune 2-l-Flasche	N_2
23 840	Weiße 2-l-Flasche	Luft
23 841	Weiße 2-l-Flasche	Luft
23 859	Weiße 2-l-Flasche	Luft
25 027	200-l-Faß	Luft
25 028	200-l-Faß	Luft

Wir sehen somit, daß eine teilweise Verdampfung, soweit sie durch eine merkliche Dampfdruckerniedrigung von mehr als 0,03 kg/cm³ erkennbar ist, durchaus auf die OZ einwirkt, daß aber diese Wirkung kaum merkbar zu sein braucht, wenn Proben nicht mehr als unbedingt erforderlich umgefüllt oder sonstwie behandelt und vor allem, wenn sie verschlossen und kühl aufbewahrt werden.

Zusammenfassend kann zu Punkt I gesagt werden:

1. Wenn bei gutem Verschluß des Probegefäßes nur gelegentlich Probe entnommen wird, hat die Verdampfung des Benzins keinen praktisch bedeutenden Einfluß auf die OZ.
2. Bei mehrmaligem Ab- und Umfüllen können solche Verdampfungsverluste auftreten, daß auch die OZ merklich abfällt.
3. Erst bei 2%igem Gewichtsverlust, wenn eine Dampfdruckerniedrigung um 0,04 auftritt, zeigt sich ein über die normale Streugrenze hinausgehender OZ-Abfall.

II. Versuche über die Bildung von Peroxyden im Synthesebenzin und deren Einfluß auf die Klopffestigkeit

Hierüber wurden von verschiedenen Prüfstellen eine Reihe von Beobachtungen und Versuchen gemacht. Im allgemeinen wurden Benzinproben nach mehr oder weniger langer Standzeit in verschiedenen Gefäßen, und zwar in hellen und braunen Glasflaschen, in Blechkannen und in Fässern wiederholt geklopft.

Zahlentafel 12 und *13* zeigen Versuchsanordnungen und Ergebnisse des Nitag-Labors. Nach einer Standzeit von 17 Tagen fand — und zwar unter allen Bedingungen — kein wesentlicher OZ-Abfall statt, der über die beim Synthesebenzin übliche Streugrenze hinausgeht. Nach

Zahlentafel 13. Klopfmessungen zu Zahlentafel 12 nach der Research-Methode mit einem CFR-Motor

B.-Nr.	ROZ am 1. 9.	Aufbewahrung	ROZ am 7. 9.	ROZ am 18. 9.	ROZ am 2. 12.	Gebinde
23 839	61,1	i. Dunkeln	—	60,2		weiße Fl.
23 842	61,7	i. Licht	60,8	59,4	53,8	weiße Fl.
23 843	61,7	i. Licht	—	59,7	54,7	w. Fl. m. N_2
23 844	—	i. Licht	—	61,1	57,5	braune Fl.
23 845	—	i. Licht	—	60,8	57,5	br. Fl. m. N_2
23 840	61,5	i. Dunkeln	61,5	—	55,3	weiße Fl.
23 841	61,5	i. Licht	60,6	—	53,8	weiße Fl.
23 859	—	i. Licht	—	61,4	46,2	weiße Fl.
25 027	—	—	—	—	59,4	Faß
25 028	—	—	—	—	59,5	Faß

einem Monat jedoch waren offenbar alle Proben abgefallen. Das Benzin in den Fässern wurde um 2 OZ-Einheiten niedriger bewertet, was jedoch ebenfalls noch innerhalb der Streugrenze liegt. Diese Faßlagerung hätte unter den jetzigen Gesichtspunkten und den eingangs gegebenen Voraussetzungen über einen wesentlich längeren Zeitraum beobachtet werden müssen. Die Abnahme in den braunen Glasflaschen um 4 OZ-Einheiten ist schon deutlicher und wahrscheinlicher. In anderen Fällen wurde, allerdings mit anderem Synthesebenzin, in solch kurzer Zeit praktisch kein Abfall beobachtet. Wenn auch das braune Glas weniger Licht durchläßt, so werden UV-Strahlen, zweifellos die wirksameren Bestandteile des die Peroxydbildung katalysierenden Lichts, von braunem Glas auch nicht viel stärker absorbiert als von hellem Glas. Das vom Nitag-Labor untersuchte Synthesebenzin dürfte also besonders stark zur Peroxydbildung neigen. Dies wird dadurch noch unterstrichen, daß das in heller Flasche aber im Dunkeln aufbewahrte Benzin auch ohne den beschleunigenden Einfluß des Lichts schon nach einem Monat deutlichen OZ-Abfall aufweist. Am stärksten war der Rückgang unter Einwirkung des Lichts um etwa 15 Einheiten. Bei Anwesenheit von Stickstoff, nach vorheriger Verdrängung der Luft, scheinen sich ebenfalls Peroxyde gebildet zu haben, vielleicht durch im Benzin gelöste geringe Sauerstoffmenge (Luft), worauf ich anschließend bei den BV-Versuchen noch zu sprechen komme.

Das BV-Laboratorium führte die bereits erwähnten Standversuche in Kanistern mit verschiedenen Synthesebenzinen durch, welche zum Teil mit Benzyl-p-aminophenol inhibiert waren. Das Ergebnis einer der Versuchsreihen ist in *Zahlentafel 14* wiedergegeben. Der bei der Lagerung ebenfalls verfolgte C_4-Gehalt ist, wie schon erwähnt, über die Zeit von 8 Wochen konstant geblieben. Bei den meisten Benzinen hat auch eine wesentliche Peroxydbildung nicht stattgefunden, nur bei den zwei ersten Benzinen, bei denen sie aber so gering ist, daß kein wesentlich über die Streugrenze für Synthesebenzin hinausgehender OZ-Abfall auftrat. Bei einer POZ-Zunahme um 5 bzw. 4 Einheiten (mg-Äquivalente aktiven Sauerstoffs je 1 Benzin) scheint die OZ um 3 gefallen zu sein. Andererseits zeigt das Beispiel Krupp-Benzin ohne POZ-Zunahme, daß Streuungen um fast 2 OZ in den verschiedenen Zeitabständen auftraten. Immerhin muß man befürchten, daß zumindest eine deutliche Peroxydbildung bei manchen Synthesebenzinen auch in Kanistern nach längerer Standzeit zu erwarten ist.

In einer anderen Versuchsreihe des BV-Labors wurde die Peroxydbildung durch UV-Strahlen beschleunigt. Dabei zeigte sich, daß für eine stärkere Peroxydbildung auch eine entsprechende Luft- bzw. Sauerstoffmenge vorhanden sein muß. Ist Sauerstoff in nicht genügendem Maße anwesend, so stockt die weitere Peroxydbildung. Unter anderem wurde auch bestätigt, daß sich Peroxyde bis zu einem gewissen Grad wieder entfernen lassen, und zwar durch Auswaschen mit Ferrosulfat und Ammoniumoxalat, wobei die Octanzahl wieder einen höheren Wert annimmt.

Bei den Versuchen mit der UV-Bestrahlung wurde vom BV-Labor versucht, eine zahlenmäßige Abhängigkeit zwischen POZ und OZ zu finden. Nach den vorliegenden Ergebnissen war eine solche Ableitung nicht möglich, vielleicht in der Hauptsache deshalb, weil die Streuungen bei der Klopfmessung kein klares Bild aufkommen lassen.

Inhibierte Proben zeigten sich bei normaler Lagerung unverändert. Bei UV-Bestrahlung jedoch ist je nach Stärke der Bestrahlung und Bestrahlungsdauer eine entsprechende größere Inhibitormenge erforderlich. Inhibitoren — Benzyl-p-aminophenol ist bekanntlich einer der besten — hemmen zwar, scheinen aber die Peroxydbildung nicht immer völlig zu unterbinden.

Interessant hierzu ist die Beobachtung des Technischen Prüfstandes der I. G. bei Standversuchen mit dem Synthesebenzin 10f in hellen und braunen Glasflaschen und in Blechkannen. Das Ergebnis zeigt *Zahlentafel 15*. In braunen Flaschen und in den Blechkannen war bis

Zahlentafel 14. Standversuche in Kanistern — Änderung der Research-Octanzahl, der Peroxydzahl und des C_4-Gehalts

Benzinart	Datum	ROZ	POZ	% C_4
Ruhrbenzin	2. 9. 40	47,8	1,5	4,3
	16. 9. 40	45,7	2,6	4,1
	30. 9. 40	44,7	4,5	4,0
	14. 10. 40	44,7	6,5	4,0
Veränderung vom 2. 9. bis 14. 10.		—3,0	+5,0	0,0
Bergkamen	2. 9. 40	50,6	2,1	2,4
	16. 9. 40	48,2	3,4	2,4
	30. 9. 40	48,0	6,5	2,5
	14. 10. 40	47,4	5,9	2,4
Veränderung vom 2. 9. bis 14. 10.		—3,0	+4,1	0,0
Hoesch-Benzin	2. 9. 40	51,1	0,1	4,0
	16. 9. 40	50,0	0,1	3,8
	30. 9. 40	49,8	0,1	3,5
	14. 10. 40	48,8	0,0	3,4
Veränderung vom 2. 9. bis 14. 10.		—2,0	—0,1	—1,0
Krupp-Benzin	2. 9. 40	51,4	0,1	4,7
	16. 9. 40	52,5	0,2	4,7
	30. 9. 40	53,0	0,2	4,5
	14. 10. 40	52,0	0,3	4,5
Veränderung vom 2. 9. bis 14. 10.		+1,0	+0,2	0,0
Rheinpreußen	2. 9. 40	52,0	0,1	3,5
	16. 9. 40	52,5	0,6	3,5
	30. 9. 40	52,5	0,4	3,5
	14. 10. 40	49,5	1,6	3,5
Veränderung vom 2. 9. bis 14. 10.		—2,0	+1,5	0,0
Viktor	2. 9. 40	56,6	0,0	2,2
	16. 9. 40	57,0	—	2,2
	30. 9. 40	57,2	—	2,3
	14. 10. 40	56,8	0,0	2,3
Veränderung vom 2. 9. bis 14. 10.		0,0	0,0	0,0

zum Februar 1943, also nach fünf Monaten, kein über die Streugrenze des Synthesebenzins hinausgehender Abfall zu verzeichnen, unabhängig davon, ob die Probegefäße gänzlich oder nur zur Hälfte gefüllt waren. Dasselbe trifft offenbar bis nach drei Monaten für die helle und volle Glasflasche zu.

[redacted]stärkere Peroxydbildung
[redacted] bzw. Sauerstoffmenge
[redacted]ff in nicht genügendem
[redacted]itere Peroxydbildung.
[redacted]igt, daß sich Peroxyde
[redacted]ieder entfernen lassen,
[redacted]it Ferrosulfat und Am-
[redacted]lat, wobei die Octanzahl wieder einen höheren
[redacted]mt.

[redacted]rsuchen mit der UV-Bestrahlung wurde vom
[redacted] versucht, eine zahlenmäßige Abhängigkeit
[redacted]OZ und OZ zu finden. Nach den vorliegenden
[redacted] war eine solche Ableitung nicht möglich,
[redacted] der Hauptsache deshalb, weil die Streuungen
[redacted]pfmessung kein klares Bild aufkommen lassen.

[redacted] Proben zeigten sich bei normaler Lagerung
[redacted]t. Bei UV-Bestrahlung jedoch ist je nach
[redacted]r Bestrahlung und Bestrahlungsdauer eine
[redacted]rmenge erforderlich. In-
[redacted]ol ist bekanntlich einer
[redacted]inen aber die Peroxyd-
[redacted]erbinden.

[redacted]htung des Technischen
[redacted]dversuchen mit dem
[redacted]d braunen Glasflaschen
[redacted]ebnis zeigt *Zahlentafel 15*.
[redacted] Flaschen und in den Blechkannen war bis

14. Standversuche in Kanistern — Änderung der -Octanzahl, der Peroxydzahl und des C_4-Gehalts

[redacted]art	Datum	ROZ	POZ	% C_4
[redacted].....	2. 9. 40	47,8	1,5	4,3
	16. 9. 40	45,7	2,6	4,1
	30. 9. 40	44,7	4,5	4,0
	14. 10. 40	44,7	6,5	4,0
[redacted]g vom 2. 9. bis 14. 10.		—3,0	+5,0	0,0
[redacted]		50,6	2,1	2,4
[redacted]		48,2	3,4	2,4
[redacted]		48,0	6,5	2,5
[redacted]		47,4	5,9	2,4
[redacted]		—3,0	+4,1	0,0
[redacted]		51,1	0,1	4,0
[redacted]		50,0	0,1	3,8
	30. 9. 40	49,8	0,1	3,5
	14. 10. 40	48,8	0,0	3,4
[redacted]g vom 2. 9. bis 14. 10.		—2,0	—0,1	—1,0
[redacted]zin	2. 9. 40	51,4	0,1	4,7
	16. 9. 40	52,5	0,2	4,7
	30. 9. 40	53,0	0,2	4,5
	14. 10. 40	52,0	0,3	4,5
[redacted]g vom 2. 9. bis 14. 10.		+1,0	+0,2	0,0
[redacted]en	2. 9. 40	52,0	0,1	3,5
	16. 9. 40	52,5	0,6	3,5
[redacted]		52,5	0,4	3,5
[redacted]		49,5	1,6	3,5
[redacted]		—2,0	+1,5	0,0
[redacted]		56,6	0,0	2,2
[redacted]		57,0	—	2,2
[redacted]		57,2	—	2,3
[redacted]		56,8	0,0	2,3
[redacted]		0,0	0,0	0,0

[redacted]ar 1943, also nach fünf Monaten, kein über
[redacted]grenze des Synthesebenzins hinausgehender
[redacted]verzeichnen, unabhängig davon, ob die Probe-
[redacted]zlich oder nur zur Hälfte gefüllt waren. Das-
[redacted] offenbar bis nach drei Monaten für die helle
[redacted] Glasflasche zu.

Wenn gegenüber den früheren Messungen mit dem gleichen Prüfmotor, P 36, welche gemäß *Zahlentafel 18* zwischen 56 und 58 OZ streuten, jetzt nur 54 bis 55 OZ gefunden wurden, so ist das m. E. darauf zurückzuführen, daß die Prüfmaschine das Synthesebenzin zu dieser späteren Zeit niedriger bewertete als vorher, daß es sich also um die ungewöhnliche Streuung handelt, auf die ich noch im besonderen zu sprechen komme. Zu dieser Folgerung berechtigen außerdem die recht unterschiedlichen Bewertungen nach Motor- und Research-Methode. Immerhin ist das Synthesebenzin 10f inhibiert und dürfte ohne Einfluß von Licht, besonders in Blechkannen, weitestgehend beständig sein, wie sich das auch bei den anderen Versuchen gezeigt hat. In der hellen und halbvollen Glasflache ist nach drei Monaten und in der vollen nach fünf Monaten eine OZ-Verminderung allerdings unverkennbar. Hier mag trotz Inhibitor eine Peroxydbildung stattgefunden haben, weil im Verhältnis zur Benzinmenge eine große Luftmenge vorhanden war. (Die anfangs volle Glasflasche nahm nach den ersten Untersuchungen ebenfalls Luft auf.)

Eine Beurteilung der Werte nach der Motor-Methode ist deshalb besonders schwierig, weil wir nicht wissen, ob hierbei ebenfalls Klopfmeßstreuungen in solchem Umfange auftreten wie bei der Research-Methode. Es wäre daher auch aus diesem Grunde zweckmäßig, bei einem der nächsten Vergleichsversuche das einzuschaltende Synthesebenzin zugleich nach der Motor-Methode zu untersuchen.

Zu der Frage, nach welcher Zeit unter Einwirkung von gewöhnlichem Tageslicht bereits mit einem merklichen OZ-Abfall gerechnet werden muß, kann ich kurz über eine neuerliche Beobachtung bei uns berichten. Zwei Synthesebenzine unserer laufenden Betriebsuntersuchung wurden je zur Hälfte in Blechkannen und in helle Glasflaschen gefüllt. Bereits nach drei Tagen wurden beide Benzine aus den dem Tageslicht ausgesetzt gewesenen Glasflaschen um rund 1 OZ niedriger bewertet als aus den Blechkannen. Dabei haben wir uns von dem Einfluß einer evtl. Klopfmeßstreuung dadurch freigemacht, daß wir alle Proben zur gleichen Zeit klopften, und zwar sowohl unvermischt als auch in Mischung mit Z. Bei Beurteilung dieser Zeitspanne für einen merklichen OZ-Abfall ist zu berücksichtigen, daß es sich erfahrungsgemäß bei unserem Synthesebenzin um ein weniger stark zur Peroxydbildung neigendes Benzin handelt. Bei empfindlicheren Benzinen muß also mit einer kürzeren Zeitspanne gerechnet werden.

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse über die Frage der Peroxydbildung im Synthesebenzin aufstellen:

1. Peroxyde werden in Anwesenheit von Luft bzw. von Sauerstoff gebildet. Wirksam ist offenbar vor allem die im Benzin gelöste Luft, so daß eine Aufbewahrung unter indifferentem Gas, z. B. Stickstoff, nur bis zu einem gewissen Grad schützt.

2. Die Peroxydbildung schreitet im Maße des zur Verfügung stehenden Sauerstoffs fort und erreicht im allgemeinen nur in kleinen Gebinden mit einem ungünstigen Verhältnis zwischen Oberfläche bzw. Luftraum und Benzinmenge einen die Octanzahl wesentlich beeinflussenden Grad.

3. Tageslicht, insbesondere UV-Strahlen, beschleunigen die Peroxydbildung erheblich.

4. Geeignete Inhibitoren verzögern die Peroxydbildung unter normalen Bedingungen weitestgehend, wenn sie dieselbe auch, wenigstens unter dem Einfluß wirksamer Strahlen — und vielleicht auch von ungewöhnlich langer Lagerung —, nicht ganz zu verhindern vermögen.

5. Bei der Peroxydbildung im Synthesebenzin bleibt der die Klopffestigkeit im wesentlichen bedingende Olefingehalt praktisch erhalten. Daher kann
6. die Klopffestigkeit nach Auswaschen der Peroxyde wieder erhöht werden; ob restlos, ist noch fraglich.

Zahlentafel 15. Lagerung von 10f seit dem 11. 9. 1942, Änderung der Klopffestigkeit

Untersuchung im P 36.	Helle Flasche		Braune Flasche		Blechkanne	
	voll	$^1/_2$-voll	voll	$^1/_2$-voll	voll	$^1/_2$-voll
25. 9. 1942 bis 2. 11. 1942...	OZ zwischen 56 und 58 streuend (dem Licht nicht ausgesetzt)					
ROZ 16. 12. 42 .	54,8	50,3	54,8	54,8	54,8	54,8
MOZ 18. 12. 42 .	50,8	49,2	53,4	51,5	53,1	52,1
ROZ 11. 2. 43 ..	50,6	48,0	54,8	53,2	53,9	53,1
MOZ 14. 2. 43 ..	48,8	47,8	53,9	53,5	54,0	52,5

7. Eine zahlenmäßige Abhängigkeit der OZ von der POZ ist für Synthesebenzin nach den mir vorliegenden Ergebnissen bisher nicht gefunden. Ihre Ermittlung ist erschwert durch die außergewöhnlichen Streuungen, welche bei der Klopfmessung des Synthesebenzins auftreten.
8. Verschiedene Synthesebenzine neigen offenbar nicht gleichermaßen zur Peroxydbildung.

Damit ist [redacted]ch über diesen Punkt eigentlich schon ein recht klares Bild gegeben, soweit wir ihn bei der Klopfmessung von Synthesebenzin zu berücksichtigen haben:

1. Proben dürfen in Glasflaschen auch nicht einen Tag lang dem Tageslicht ausgesetzt werden. Am besten vermeidet man Glasflaschen ganz. Auch braune Flaschen sind u. U. bedenklich, besonders auf längere Dauer, zumal sie meist nicht voll gefüllt sind. Wenn man schon Glasflaschen verwendet, dann sind sie unter allen Umständen vor Lichteinwirkung zu schützen. Am sichersten sind in jedem Fall Blechkanister.
2. Die Probegefäße müssen gut verschlossen sein, nicht nur im Hinblick auf eine Verdampfungsgefahr, sondern auch, um bei längerer Standzeit einer Auffrischung der in der Probe vorhandenen Luft keinen Vorschub zu leisten.
3. Für längere Zeit aufzubewahrende Proben von besonders empfindlichen Synthesebenzinen sollten zweckmäßig inhibiert werden, besonders wenn sie anderen Untersuchungen als über den Peroxydgehalt dienen sollen, wie z. B. in unserem Fall für die Untersuchung der Klopfmeßstreuungen. Für normalen Zeitraum aufzubewahrende Proben brauchen bei Beachtung der beiden ersteren Punkte nicht inhibiert zu werden.

Es erscheint zweckmäßig, über diese Ergebnisse hinaus zwei Fragen zu Punkt II noch zu klären:

a) Besteht eine zahlenmäßige Abhängigkeit der OZ von der POZ, wenigstens jeweils für Synthesebenzine gleicher OZ, und welche?

b) Bis zu welchem Grad lassen sich gebildete Peroxyde auswaschen und die ursprünglichen Octanzahlen regenerieren?

Bei Untersuchungen über Frage a) ist, worauf ich eingangs schon hinwies, die Streumöglichkeit bei den Klopfmessungen zu beachten. Man wird daher am zweckmäßigsten die Peroxydbildung nicht fortschreitend in ein und derselben Probe verfolgen, sondern sie in mehreren gleichartigen Proben zugleich in verschiedenem Maße bewirken, und zwar beschleunigt durch UV-Bestrahlung, so daß alle Proben mit nunmehr verschiedenem Peroxydgehalt am gleichen Tage geklopft und mit der unbehan-

delten Probe verglichen werden können. Frage b) ist besonders dafür interessant, daß man gelegentlich imstande sein muß, an Hand einer peroxydhaltig gewordenen Probe auf die ursprüngliche Beschaffenheit des betreffenden Kraftstoffes zu schließen.

III. Streuungen bei der Klopfmessung von Synthesebenzin

Dieser Punkt ist wohl der schwierigste, über den noch die wenigsten positiven Ergebnisse vorliegen. Wir können uns nach den inzwischen stattgefundenen zwei Vergleichsversuchen lediglich ein umfassenderes Bild über die Klopfmeßstreuungen machen, nachdem ich solche Streumöglichkeiten vor Jahresfrist nur aus einzelnen Fällen hatte aufzeigen können. Es liegen ferner weitere Einzelbeobachtungen verschiedener ZB-Prüfstellen vor.

Zunächst zu den Vergleichsversuchen, über deren Ergebnisse mit den Proben 9f und 10f wir durch die Oppauer Berichte Nr. 507 und 530 unterrichtet sind. Folgendes möchte ich davon herausstellen:

1. Die außerordentlichen Streuungen bei der Klopfmessung des Synthesebenzins bestätigen sich auf breitester Basis, und zwar auch bei Anwesenheit eines Inhibitors. Während die übrigen Versuchskraftstoffe in beiden Fällen mit einer mittleren Streuung von ±0,5 bis ±0,6 gefunden wurden, betrug die mittlere Streuung bei 9f ±1,2 und bei 10f ±1,4.
2. Die größten Bewertungsunterschiede für 9f und 10f betragen 7 bis 11 Octanzahlen, während sie für die Proben a bis d um 3 bis 3,5 OZ ausmachen.
3. Beim CFR-Motor sind auch die Streuungen für Synthesebenzin im Mittel fast ebenso groß wie beim IG-Prüfmotor.
4. Die Klopfmeßstreuungen treten auch unabhängig von Verdampfungsverlusten und Peroxydbildung auf.

Durch Messung in Mischung mit Z (1:1) scheint entgegen den damaligen Erwartungen eine tatsächliche Verringerung der Streuung nicht erreicht zu werden. Die Verringerung der Streuung bei VV (Vergleichsversuch) 100 und VV 101 ist nur eine scheinbare (vgl. die Anlagen 1 in den beiden Oppauer Berichten). Bei 9f/Z betrug die mittlere Streuung ±0,5 und ±0,6 für beide Motorarten, bei 10f/Z war sie mit ±0,8 und ±0,7 deutlich ungünstiger. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich diese mittleren Streuungen beim Zurückrechnen auf reines Synthesebenzin verdoppeln. Sie betragen dann im Mittel für beide Motorarten ±1,1 bei 9f und ±1,5 bei 10f. Ebenso verdoppeln sich natürlich auf diese Weise die maximalen Bewertungsunterschiede. So gesehen bedeutet also der Notbehelf, Synthesebenzin in Mischung mit Z zu klopfen, keine eigentliche Verbesserung. Die streuende Wirkung des Synthesebenzins wird entsprechend der zugesetzten Menge des andersartigen Kraftstoffes herabgemindert. An sich bleibt sie aber vorhanden.

Zahlentafel 16. Von einer Prüfstelle bei Vergl.-Vers. 101 gefundene OZ (Research-Methode)

Prüfmotor	10a	10c	10d	50/50 Bi/Bo
IGP Nr. 26	61,2	74,3	76,1	77,1
CFR Nr. 102	61,3	74,9	76,6	76,8
Differenz	+0,1	+0,6	+0,5	−0,3

Sehr instruktiv hierzu ist das Schaubild der Anlage 3 im Oppauer Bericht Nr. 530, wo die Streugrenzen für 10a, 10f und 10f/Z für die einzelnen Prüfstellen dargestellt sind. Den nach VV 100 und einer Reihe von Einzelerfahrungen zu erwartenden Verhältnissen entsprechen typisch z. B. die Abweichungen der Prüfstellen 6, 24b, 51 und 55. Am geringsten ist die Abweichung vom Mittelwert bei 10a; ungewöhnlich groß bei 10f (rein); in noch tragbarer Grenze dagegen bei 10f aus Mischung mit Z. Insbesondere bei den Prüfstellen 4, 7, 17 und 62 ist aber im krassen Gegensatz dazu die Abweichung vom Mittelwert bei 10f aus der Mischung mit Z erheblich größer als beim reinen 10f. Diese offenbar ganz ausgefallenen Werte bedingen wohl auch die gegenüber VV 100 bei VV 101 schlechtere mittlere Streuung mit 10f/Z.

Zahlentafel 17. Von der gleichen Prüfstelle bei Vergl.-Vers. 101 gefundene OZ (Research-Methode) für 10f

Prüfmotor	10f	10f/Z 50/50	10f rechnerisch
IGP Nr. 26	55,6	76,7	55,4
CFR Nr. 102	50,6	75,8	53,6
Differenz	5,0	0,9	1,8

Nicht zu Unrecht ist man aber versucht, an dieses Ergebnis nicht zu glauben, wenn man aus einer Reihe von Einzelbeobachtungen weiß, daß das Gegenteil der Fall ist, d. h., daß in Mischung mit Z die Streuungen tatsächlich vermindert werden. Ein typisches Beispiel liefert die Prüfstelle Rhenania Ossag. Dort ergaben

Zahlentafel 18. ROZ-Bestimmung der Probe 10f — Einfluß der Motoren

Untersuch.-Zeitpunkt 1942	ROZ, erhalten an den Prüfmotoren: CFR	36	37	156*)	157*)	158*)	159*)	Bemerkungen
22. 9.				53,6				
25. 9.		58,3	57,4					
26. 9.	57,5							
29. 9.				55,2				
7. 10.					54,2	51,5		
8. 10.						51,3		
14. 10.		58,1						
16. 10.		58,1	57,8					
17. 10.							51,6	
17. 10.							51,5	Zylinderkopf und Vergaser von 36
17. 10.							51,3	
17. 10.			57,5	55,2				
19. 10.		56,1						
19. 10.		56,7						Zylinderkopf und Vergaser von 159
19. 10.		56,8						
19. 10.			57,0					Zylinderkopf von 159, Vergaser von 36
19. 10.			55,1					Trichter 15 statt 16
20. 10.			57,5					Trichter 17 statt 16
21. 10.		58,1						Trichter 16-norm.
2. 11.	56,8		56,5					

*) Fabrikneue Motoren

[redacted] maximalen Bewertungs-
tet also der Notbehelf,
Z zu klopfen, keine
treuende Wirkung des
l der zugesetzten Menge
erabgemindert. An sich

6. Von einer Prüfstelle bei Vergl.-Vers. 101 gefundene OZ (Research-Methode)

or	10a	10c	10d	50/50 Bi/Bo
.....	61,2	74,3	76,1	77,1
2	61,3	74,9	76,6	76,8
.....	+0,1	+0,6	+0,5	—0,3

ktiv hierzu ist das Schaubild der Anlage 3
wo die Streugrenzen für
nzelnen Prüfstellen dar-
und einer Reihe von
n Verhältnissen ent-
lungen der Prüfstellen
n ist die Abweichung
röhnlich groß bei 10f
ze dagegen bei 10f aus
mit Z. Insbesondere bei den Prüfstellen 4,
62 ist aber im krassen Gegensatz dazu die
vom Mittelwert bei 10f aus der Mischung
ich größer als beim reinen 10f. Diese offenbar
llenen Werte bedingen wohl auch die gegen-
0 bei VV 101 schlechtere mittlere Streuung

7. Von der gleichen Prüfstelle bei Vergl.-Vers. 101 undene OZ (Research-Methode) für 10f

or	10f	10 f/Z 50/50	10f rechnerisch
		76,7	55,4
		75,8	53,6
		0,9	1,8

ersucht, an dieses Er-
an aus einer Reihe von
ungen weis, daß das Gegenteil der Fall
ß in Mischung mit Z die Streuungen tat-
rmindert werden. Ein typisches Beispiel
Prüfstelle Rheinania Ossag. Dort ergaben

Einfluß der Motoren

159*)	Bemerkungen
	d Vergaser von 36
	Zylinderkopf und Vergaser von 159
	Zylinderkopf von 159, Vergaser von 36 Trichter 15 statt 16 Trichter 17 statt 16 Trichter 16-norm.

*) Fabrikneue Motoren

die Klopfmessungen zum VV 101 am IG- und am CFR-Motor gute Übereinstimmung sowohl untereinander als auch mit den Oppauer Mittelwerten innerhalb von ±0,5 (vergl. *Zahlentafel 16*). 10f jedoch wurde, wie aus *Zahlentafel 17* hervorgeht, durch den CFR-Motor um 5 Einheiten niedriger bewertet als im IGP. Für die Mischung mit Z ergab sich aber ein Unterschied von nur 0,9, der sich

Zahlentafel 19. ROZ-Bestimmung verschiedenartiger Benzinproben — Einfluß der Motoren

Probe	ROZ, erhalten an den Prüfmotoren							ROZ max. Diff.	ROZ 36-159
	CFR	36	37	156	157	158	159		
10a	60,4	60,9	61,2	61,3	60,0	61,5	61,5	1,5	—0,6
10c	74,5	74,6	74,5	75,0	74,7	74,6	74,3	0,7	+0,3
10d	75,6	75,3	76,2	75,4	75,4	74,6	74,7	1,6	+0,6
10f	57,5	58,1	57,6	54,7	54,2	51,4	51,6	6,7	+6,5
50f/50Z	77,2	76,9	76,1	76,9	77,2	77,3	76,9	1,2	±0
50 Bi/50 Bo	76,8	77,1	77,9	76,6	77,0	76,4	76,5	1,5	+0,6

zwar bei der Rückrechnung auf reines Synthesebenzin auf 1,8 erhöht, aber auch dann noch eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen den beiden Motoren ergibt als bei reinem Synthesebenzin.

Ein weiteres, besonders typisches Beispiel liefert der Technische Prüfstand der I. G. *Zahlentafel 18* zeigt, daß die einzelnen Motore bei in verschiedenen Zeitabständen wiederholten Messungen Streuungen bis zu 2 OZ ergaben. Die verschiedenen Motoren untereinander zeigen jedoch Bewertungsunterschiede bis zu 7 Einheiten. Durch die verschiedensten Maßnahmen, wie Austausch von Zylinderkopf, Vergaser, Lufttrichter usw., wurde darin keine Änderung erzielt. Aus *Zahlentafel 19* ergibt sich, daß die Octanzahlen aus den in Mischung mit Z an den verschiedenen Motoren gefundenen Werten nur noch — man kann schon sagen — unwesentlich streuen. Das ist ebenfalls ein ganz treffender Beweis für die „adstringierende" Wirkung von Z. Wie schon gesagt, sprechen andere, besonders die vorgenannten Einzelbeispiele aus den Vergleichsversuchen der I. G. wieder dagegen, und im Mittel aller ist die Wirkung von Z offenbar nur eine „verdünnende".

Eine Gegenüberstellung möchte ich in diesem Zusammengang noch bringen; ein Vergleich der von zwei Prüfstellen aus gemeinsam gezogenen Kesselwagenproben ermittelten Octanzahlen. Dabei handelt es sich um die ständige Kontrolle unserer Ablieferungen von Synthesebenzin durch eine zweite Prüfstelle, so daß eine außerordentlich große Anzahl von vergleichbaren Werten vorliegt. Ich habe die jeweiligen Abweichungen für bestimmte Zeiträume gemittelt und dabei folgendes festgestellt:

1942	Mittlere Abweichung	Größte Abweichung
1. Drittel	±2,9	6,5
2. Drittel	±1,5	3,6
3. Drittel	±1,1	3,5
Januar 1943	±0,7	2,0

Über die genannten Zeiträume hat sich also die Übereinstimmung zwischen den beiden Prüfstellen ganz erheblich gebessert. Das mag natürlich verschiedene Gründe haben. Es kann aber durchaus, zumindest zu einem wesentlichen Teil, darauf zurückzuführen sein, daß inzwischen beide Prüfstellen dazu übergegangen sind, das Synthesebenzin in Mischung mit Z zu untersuchen. Die eine Stelle untersuchte zu Anfang 1942 in Mischung mit Benzol und ging im Laufe des Jahres

dazu über, in Mischung mit Z zu klopfen. Wir selbst gingen bei den Untersuchungen unserer Ablieferungen erst im letzten Drittel 1942 hierzu über, während wir vorher noch unvermischt geklopft hatten.

Zahlentafel 20 zeigt wiederholte Klopfmessungen mit dem Synthesebenzin 9f an unseren beiden Motoren in einem Zeitraum von 1½ Monaten. Dabei wurden die Proben ab 5. Februar 1942 jedesmal aus zwei mit dem gleichen Benzin gefüllten Fässern entnommen, wobei das eine Benzin inhibiert war. Wir sehen, daß sowohl mit dem reinen als auch mit dem inhibierten Benzin im IGP 12 zwischen 58 und 61 OZ und im IGP 84 zwischen 59 und 61 streuende Werte gefunden wurden. Der Inhibitor hatte also weder Einfluß auf die Streuungen noch auf die Höhe der Octanzahlen.

Über den heikelsten, nämlich den dritten Punkt, die Ursache der außerordentlichen Klopfmeßstreuungen bei Synthesebenzin, herrscht also noch immer völlige Unklarheit. Wir wissen lediglich

1. daß die Streuungen auch ohne Verdampfungsverluste und Peroxydbildung auftreten,
2. daß sie auch bei Anwesenheit eines Inhibitors auftreten und haben
3. ein klares Bild über den Umfang der auftretenden Streuungen.

Zahlentafel 20. Wiederholte Klopfmessungen mit Synthesebenzin 9f

Untersuchungs-Tag	IGP 12		IGP 84	
	rein	inhibiert	rein	inhibiert
30. 1. 1942	57,6			
30. 1. 1942	57,6			
1. 2. 1942			59,0	
1. 2. 1942			59,5	
2. 2. 1942			60,2	
3. 2. 1942			60,0	
3. 2. 1942	58,0			
4. 2. 1942	59,5			
5. 2. 1942			61,6	
5. 2. 1942				61,3
6. 2. 1942	59,8	58,9		
7. 2. 1942			61,4	
14. 2. 1942	60,5	59,5		
24. 2. 1942	61,1			61,4
25. 2. 1942			60,3	
26. 2. 1942	58,1	58,1		60,3
5. 3. 1942	60,3	58,1		
16. 3. 1942			60,3	
19. 3. 1942	59,7			60,3
19. 3. 1942	61,0	61,1		
10. 4. 1942				58,2
14. 4. 1942		58,7		

Es müssen also eingehende Versuche über die Ursache der Klopfmeßstreuungen angestellt und jede auch nur annähernd verdächtige Beobachtung verfolgt werden. Gemäß meiner eingangs gegebenen Definition über die Klopfmeßstreuungen (Punkt III) sind m. E. die Untersuchungen in folgenden drei Richtungen zu führen:

1. Welche Eigenheit der Prüfmotore ist es, auf die das Synthesebenzin besonders reagiert?
2. Gibt es gewisse Umstände bei der Klopfmessung, auf die das Synthesebenzin besonders reagiert und welche?
3. Welche Inhaltstoffe des Synthesebenzins bewirken diese besondere Empfindlichkeit?

Zu 1 ist zu bemerken, daß es nicht etwa Eigenheiten z. B. des IG-Prüfmotors im besonderen sind, denn auch der CFR-Motor ist nicht frei von Klopfmeßstreuungen.

Ungewöhnliche Streuungen treten ebenso zwischen den verschiedenartigen Motoren als auch zwischen mehreren gleichartigen Motoren auf.

Zu 2 ist zu bemerken, daß ungewöhnliche Streuungen bei ein und demselben Prüfmotor in verschiedenen Zeitabständen auftreten. Um nur ein Beispiel zu nennen, sei an die bekannte Erscheinung erinnert, daß Luftzug zu Streuungen führt (Änderung des Wärmezustandes). Vielleicht ist Synthesebenzin hierauf besonders empfindlich. Auf solche und ähnliche Einflüsse ist zu achten.

Zu 3 sei an Versuchsergebnisse erinnert, über welche *O. Widmaier* unter anderem berichtet hat. Dabei hatte ein Synthesebenzin in kurzer Zeitfolge wechselnde Peroxydzahlen aufzuweisen und dementsprechend höhere und niedrigere Octanzahlen. Möglicherweise handelt es sich hier um ein labiles Gleichgewicht bei der Bildung von sauerstoffreicheren Verbindungen, die keineswegs Peroxyde zu sein brauchen, aber als Peroxydzahlen ansprechen. In dieser und in ähnlicher Richtung muß versucht werden, in geringer Menge vorhandene Inhaltstoffe zu erfassen, welche die besondere Empfindlichkeit bewirken.

Nach diesen Gesichtspunkten sind m. E. die weiteren Untersuchungen durchzuführen, wobei die zu verwendenden Synthesebenzine im allgemeinen inhibiert werden müssen, abgesehen von solchen Untersuchungen, wie sie von *O. Widmaier* geschildert wurden. Es müssen ferner diese Versuche von einzelnen Prüfstellen durchgeführt werden, insbesondere von solchen, die in der Hauptsache mit Synthesebenzin zu tun haben. Im Interesse des Zentralbüros haben sich bereits einige seiner Prüfstellen hierzu bereiterklärt. Es wäre aber bei der Schwierigkeit des Problems zu wünschen, daß sich auch weitere Prüfstellen hierzu bereit fänden. Erst wenn auf diese Weise kritische Momente und — wenn auch nur vermeintliche — Ursachen gefunden werden, können diese auf der breiteren Basis unserer Arbeitsgemeinschaft erprobt oder bestätigt werden.

Einstweilen müssen wir uns bei der Untersuchung von Synthesebenzin in der Praxis mit der Notbrücke helfen, in Mischung mit Z zu klopfen, wenn es auch heute wieder unklar ist, ob dieser Notbehelf eine allgemeine Verbesserung bedeutet. Vielleicht wird man auch in dieser Hinsicht weitere Beobachtungen anstellen müssen und ein bei den nächsten Vergleichsversuchen einzubeziehendes Synthesebenzin wiederum zugleich in Mischung mit Z klopfen. Einstweilen würde ich es für richtig halten, wenn — trotz der offenbaren Zweifel — Synthesebenzin im allgemeinen in Mischung mit Z untersucht wird. Für die ZB-Prüfstellen liegt eine dahingehende Übereinkunft seit einiger Zeit bereits vor, weshalb es für Synthesewerke ohnehin zweckmäßig ist, in gleicher Weise zu verfahren, um die „gleiche Sprache zu reden" wie die Abnahmekontrolle. Was wir im Hinblick auf die Klopfmessung des reinen Synthesebenzins auf der breiten Basis der Arbeitsgemeinschaft bzw. ihrer Vergleichsversuche tun können, ist zunächst lediglich eine Überprüfung des jeweils noch auftretenden Streubildes, und zwar vorschlagsgemäß auch nach der Motor-Methode.

…che mit Synthesebenzin zu tun haben. Im …ben sich bereits einige seiner …t. Es wäre aber bei der …wünschen, daß sich auch …teit fänden. Erst wenn …lente und — wenn auch … gefunden werden, können …nserer Arbeitsgemeinschaft …en.

…ilen müssen wir uns bei der Untersuchung von …ebenzin in der Praxis mit der Notbrücke helfen, …ung mit Z zu klopfen, wenn es auch heute wieder …ist, ob dieser Notbehelf eine allgemeine Ver…g bedeutet. Vielleicht wird man auch in dieser … weitere Beobachtungen anstellen müssen und …den nächsten Vergleichsversuchen einzubeziehendes …ebenzin wiederum zugleich in Mischung mit Z

Einstweilen würde ich es für richtig halten, trotz der offenbaren Zweifel — Synthesebenzin …meinen in Mischung mit Z untersucht wird. Für … dahingehende Übereinkunft … weshalb es für Synthese…ist, in gleicher Weise zu …prache zu reden" wie die …n Hinblick auf die Klopf…ebenzins auf der breiten …ft bzw. ihrer Vergleichs…nächst lediglich eine Über… des jeweils noch auftretenden Streubildes, und …rschlagsgemäß auch nach der Motor-Methode.

Dipl.-Ing. F. Rueß

Versuche zur Octanzahlbestimmung von Flüssiggasen

Durchführung der Versuche: Werkmeister H. Honecker

I. Einleitung

Unter Flüssiggasen versteht man unter Atmosphärendruck gasförmige Kohlenwasserstoffgemische aus anteilmäßig am stärksten vertretenen Paraffinen (Äthan, Propan, Butan), Olefinen (Äthylen, Propylen, Butylen) und ihren Isomeren, Gemische, die bei Zimmertemperatur nur unter Druck verflüssigt werden können. Von diesen beiden Aggregatzuständen leitet sich die Sammelbezeichnung „Flüssiggas" ab. Auch der Name „Treibgas" hat sich eingeführt. Die Verwendung als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren ist von Jahr zu Jahr gestiegen. Trotzdem sind die Angaben über eines der wichtigsten Kennzeichen für diese seine Verwendbarkeit, nämlich des Klopfwertes, im Fachschrifttum sehr schwankend. Das dürfte davon herrühren, daß noch keine Bedingungen für seine Bestimmung festgelegt sind, im Gegensatz zur Octanzahlbestimmung von Benzinen. Und es wird auch, besonders bei den in der amerikanischen Literatur aufgeführten, in weiten Grenzen schwankenden Octanzahlen von Flüssiggasen oft nicht angegeben, ob sie nach Motor- oder Research-Methode gefunden worden sind, unter welchen Bedingungen die Gasbeigabe stattgefunden hat usw.

In *Zahlentafel 21* sind aus einigen Schrifttumsstellen Octanzahlen von Flüssiggasen und einigen anderen Gasen zusammengestellt. Sie sollen zeigen, wie gerade bei den Flüssiggasen die Angaben auseinandergehen. Nebenbei bemerkt, kann man aus der Zusammenstellung auch die naheliegende Tatsache folgern, daß die Werte verschiedener Literaturstellen aus ein und derselben Quelle, nicht aber aus eigenen Versuchen stammen, d. h. daß sie einfach übernommen worden sind. Auf die Werte im einzelnen soll später noch eingegangen werden.

II. Zweck der Versuche

Durch die Versuche war beabsichtigt,

1. festzustellen, ob und in welchen Grenzen sich bei der Klopfwertbestimmung von Flüssiggasen die erzielten Werte bei (absichtlicher) Veränderung der Fahrbedingungen ändern und ob sich die schwankenden Angaben über Flüssiggas-Klopfwerte dadurch versuchsmäßig verwirklichen lassen, daß die Gase unter ganz verschiedenen Betriebsbedingungen geklopft werden,

2. bei Bedingungen, die mit den für die Untersuchung von Benzinen vorgeschriebenen Bedingungen möglichst vollständig übereinstimmen, jederzeit reproduzierbare Klopfwerte der Flüssiggase nach Motor- und Research-Methode zu bestimmen und einheitliche Versuchsbedingungen festzulegen, um sie zur allgemeinen Einführung vorzuschlagen.

III. Versuchsanordnung

Maßgebend für die Zusammenstellung der Versuchsanordnung war das Bestreben, möglichst nur in der Praxis übliche Geräte zu verwenden. *Abb. 11* zeigt schematisch die Versuchsanordnung, deren einzelne Teile der Reihe nach beschrieben und näher erläutert seien:

1. Gasflasche. Die Eigenschaften der Flüssiggase werden als bekannt vorausgesetzt, ebenso die Sicherheitsvorschriften über Füllung, Druckbehälter usw.[1]). Einige Einzelheiten seien jedoch besonders hervorgehoben:

Das Flüssiggas wird den Flaschen nur in flüssigem Zustand entnommen. Dadurch wird vermieden, a) daß sich die Flasche allmählich abkühlt und die Gasabgabe allmählich aufhört, b) daß zuerst die Anteile mit hohem Dampfdruck und dann erst die mit niederem verdampfen, so daß z. B. bei einem Propan-Butan-Gemisch zuerst ein propanreiches, dann ein butanreiches Gas dem Motor geliefert wird, was die Klopfwertbestimmung wegen des Unterschieds im Luftbedarf und wegen der Verschiedenheit des Klopfwerts der beiden Bestandteile fälschen würde. Der Druck in der Flüssiggasflasche ist abhängig von der Temperatur und Zusammensetzung des Gases; bei konstanter Temperatur und bei Entnahme des Flüssiggases in flüssigem Zustand bleibt der Druck in der Flasche bis im Entleeren bis zuletzt konstant, im Gegensatz zu den permanenten Gasen, bei denen der Druck auch von der in der Flasche befindlichen Menge abhängt. Als Betriebsüberdruck gilt bei verflüssigten Gasen der Dampf- bzw. Gasdruck bei einer Temperatur von 40°, wobei bei verflüssigten Gasen, deren kritische Temperatur unter 40° liegt, eine Überfüllung von 5 % gegenüber der zulässigen Höchstfüllung zu berücksichtigen ist.

Die Flaschen, von deren Inhalt jeweils der Klopfwert bestimmt werden soll, liegen am besten außerhalb des Prüfraumes im Freien, jedoch vor Temperaturschwankungen möglichst geschützt.

2. Rohr- und Schlauchverbindungen. Für die Rohrleitungen im Hochdruckteil, also zwischen Flasche und Regler, werden am besten nahtlose Stahlrohre verwendet. Vor Inbetriebnahme muß der ganze Weg von der Flasche bis zum Motor auf Undichtigkeiten geprüft, am besten mit schaumbildenden Mitteln, wie Nekallösung, abgepinselt werden. Nähere Einzelheiten über die Ausführung der Leitungen sind jedem Treibgashandbuch zu entnehmen.

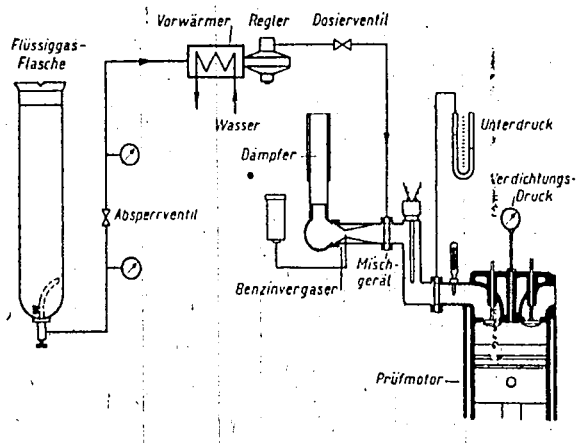


Abb. 11. Versuchsanordnung zur Klopfwertprüfung von Flüssiggasen

3. Manometer im Prüfraum zur Anzeige des Flaschendruckes.

4. Absperrventil. Bedienbar unmittelbar vom Prüfmotor aus.

5. Manometer zur Anzeige des Vordruckes zum Regler (nicht unbedingt erforderlich).

6. Vorwärmer und Regler. Der Zweck und die Arbeitsweise der Flüssiggas-Regler seien als bekannt vorausgesetzt. Das von der Flasche unter dem Flaschendruck

[1]) Genaue Angaben vgl. bei *E. Mikocki*, Druckgasverordnung. Berlin 1942.

gelieferte verflüssigte Gas muß dem Motor gasförmig und drucklos zugeführt werden. Das ist die Aufgabe des Reglers und des ihm vorgeschalteten Vorwärmers.

Bei den Versuchen wurde der sehr gebräuchliche zweistufige Solex-Unterdruck-Regler LR 3 mit Vorwärmung durch warmes Wasser verwendet. Die Vorwärmung soll etwa so sein, daß der Regler im Gaseintritt handwarm ist.

7. Regelventil. Dieses wird benötigt zum Einstellen des maximalen Klopfens, d. h. der Luftüberschußzahl λ, bei der das stärkste Klopfen auftritt, durch Dosierung des vom Regler gelieferten gasförmigen Flüssiggases. Es wurde ein Nadelventil mit sehr schlankem Kegel und einer Bohrung von etwa 5 mm verwendet, mit dem sich die Veränderung der Gasmenge und damit der Klopfstärke beim Übergang vom fetten zum mageren Gebiet und umgekehrt sehr empfindlich einstellen läßt.

8. Gas-Luft-Mischung. Im Gegensatz zum Benzinvergaser wird bei Flüssiggas-Motoren der Kraftstoff gasförmig zugesetzt; vom Motor werden also Gas und Luft, d. h. zwei Gase mit gleichen physikalischen Gesetzen angesaugt. Um über den ganzen Arbeitsbereich des Motors selbsttätig ein ausreichend konstantes Mischungsverhältnis herzustellen, genügt es also, wenn das Gas durch eine Dosierblende dem Motor zugeführt wird. Um dasselbe Ziel der Dosierung von flüssigem Kraftstoff im Benzinvergaser zu erreichen, sind bekanntlich Korrektur- und Kompensatordüsen usw. notwendig.

Bei Flüssiggasbetrieb muß in der Praxis der Motor jederzeit sofort für Benzinbetrieb umschaltbar sein; der Benzinvergaser muß daher beibehalten werden. Daher wird das Gas entweder in den Lufttrichter des Benzinvergasers eingeführt oder durch ein Vorschaltgerät der Ansaugleitung zugeführt. Das Vorschaltgerät ist ein Mischgerät, das einen Lufttrichter enthält, dem am inneren Umfang der engsten Stelle das Gas zugeführt wird. Das Gerät wird vor den Benzinvergaser geschaltet. Das Gas-Luft-Gemisch wird wie bei Benzinbetrieb durch eine Drosselklappe geregelt.

Durch beide Arten der Einführung des Gases würden aber beim genormten Klopfmotor Änderungen und zusätzliche Widerstände in der Ansaugleitung gegenüber den Verhältnissen beim Benzinbetrieb geschaffen werden. Außerdem hat der Klopfmotor keinen Arbeitsbereich in dem Sinn, daß Übergänge gefahren werden müssen, sondern er fährt praktisch mit derselben Drehzahl und Belastung, abgesehen von der Veränderung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses durch das Regelventil beim Aufsuchen des maximalen Klopfens.

Für die vorliegenden Zwecke erwies sich daher ein einfacher in die Ansaugleitung geschalteter Flansch, aus dessen innerem Umfang das Gas dem Luftstrom in der Ansaugleitung zuströmt, als geeignetste Lösung.

IV. Versuche

A. Wie oben (II.) erwähnt, war beabsichtigt, zunächst einmal festzustellen, in welchen Grenzen sich die Klopfwerte ändern, wenn absichtlich unter verschiedenen Bedingungen gefahren wird. Als Kennzeichen, wieweit

Zahlentafel 21. Klopfwerte von Flüssiggasen und einigen anderen Gasen

Prüfmethode	Research-Methode						Motor-Methode(?)		Motor-Methode				
Literaturstelle ...	Kraftstoff-handbuch[1])	*Westerkamp* [2])	Treibgas-Tasch.-buch[3])	*Rixmann* [4])	1. Techn. Prüfst. der I.G.	2. Techn. Prüfst. der I.G.	*Nash* u. *Howes* [5])	*Francis* [6])	*Egloff* [7])	*Rixmann* [4])	*Ferretti* [8])	Techn. Prüfst.	Benzin-prüfungs-betrieb
Methan					>108			125	125		103	>115	
Äthan					>108			125	125			102,5	
Propan	~125	~125	~125		109	108[15])		125	125	125[16])	95[18])	96,5	98[15])
Butan	~ 95		~ 95		95					90[17])	92[18])	90,5	
n-Butan		~ 91				95[15])	96	94	91				90,5[15])
i-Butan		~ 99				102[15])	99	100	99				97,5[15])
n-Pentan							60	63	64		76		
i-Pentan								90	90				
Propylen			~115			105							84,5
Butylen			~105		99,5[13])							83 [13])	
Isobutylen					104,5							87	
Treibgas[21])		95 bis 100		105 bis 110[9])	100 [13])	105[15])						83,5[13])	95 [15])
Propan/Butan = 50/50	>100		105 bis 110										
Propan-Propylen (Gemisch)					108,5							93	
PropanIsobutylen (Gemisch)					101,5							89	
70 % Isobutylen, Rest hauptsächl. Propylen					103,5							85,5	
Motorenmethan ..	>100		~122	122[10])									
Ruhrgasol		<100											
CO											100		
H_2											66[18])	62,5[14])	
Diisopropyläther .									101				
Dimethyläther ...					<0	~—40						<0	~—40
Generatorgas											105[20])		
Kokereigas											95[20])		
Stadtgas											89[20])		
Leuchtgas			100										
Klärgas (gereinigt)	>100												
Stadtgas (Berlin) .	~ 90			100[11])									
NH_3					klopft nicht[14])							klopft nicht[14])	

rgaser muß daher beibehalten werden. Daher wird
s Gas entweder in den Lufttrichter des Benzinvergasers
geführt oder durch ein Vorschaltgerät der Ansaug-
tung zugeführt. Das Vorschaltgerät ist ein Misch-
rät, [redacted] Lufttrichter enthält, dem am inneren
[redacted]lle das Gas zugeführt wird. Das
[redacted]enzinvergaser geschaltet. Das
[redacted]wie bei Benzinbetrieb durch
[redacted].
[redacted]Einführung des Gases würden
[redacted]opfmotor Änderungen und zu-
[redacted]n der Ansaugleitung gegenüber
n Verhältnissen beim Benzinbetrieb geschaffen werden.
ßerdem hat der Klopfmotor keinen Arbeitsbereich in
n Sinn, daß Übergänge gefahren werden müssen,
ndern er fährt praktisch mit derselben Drehzahl und
lastung, abgesehen von der Veränderung des Brennstoff-
ft-Verhältnisses durch das Regelventil beim Aufsuchen
s maximalen Klopfens.

r die vorliegenden Zwecke erwies sich daher ein ein-
her in die Ansaugleitung geschalteter Flansch, aus
sen innerem Umfang das Gas dem Luftstrom in der
saugleitung zuströmt, als geeignetste Lösung.

[redacted] **Versuche**

[redacted]t, war beabsichtigt, zunächst
[redacted]chen Grenzen sich die Klopf-
[redacted]chtlich unter verschiedenen
[redacted]d. Als Kennzeichen, wieweit

Gasen

Motor-Methode(?)		Motor-Methode				
Nash u. *Howes* [5]	*Francis* [6]	*Egloff* [7]	*Rixmann* [4]	*Ferretti* [8]	Techn. Prüfst.	Benzin-prüfungs-betrieb
	125	125		103	>115	
	125	125			102,5	
	125	125	125[16])	95[18])	96,5	98[18])
			90[17])	92[18])	90,5	
[redacted]						90,5[15])
						97,5[15])
				76		
						84,5
					83 [12])	
					87	
					83,5[13])	95 [15])
					93	
					89	
					85,5	
				100		
[redacted]				66[19])	62,5[14])	
					<0	~40
				105[20])		
				95[20])		
				89[20])		
					klopft nicht[14])	

Zahlentafel 22. Klopfwerte von Flüssiggasen und einigen anderen Gasen

Prüfstelle	Benzinprüfungsbetrieb						Techn. Prüfstand		
Prüfmethode	ROZ		MOZ		Unterschied		ROZ	MOZ	Untersch.
Prüfmotor	CFR	IG	CFR	IG	CFR	IG	IG	IG	IG
Propan	>110[15])	>108	98	98	>12	> 10	109	96,5	12,5
n-Butan	95[15])	94,5	90,5	90,5	4,5	4	95	90,5	4,5
i-Butan	103[15])	102	98	97	5	5			
Propylen	105		84	85	21				
Butylen							99,5	83	16,5
Isobutylen							104,5	87	17,5
Treibgas[21])	104[15])	105	95	95	9	10			
Treibgas[21])							100[13])	83,5[13])	16,5
Propan-Propylen							108,5	93	15,5
Propan-Isobutylen							101,5	89	12,5
70 % Isobutylen, Rest Propylen							103,5	85,5	18
Dimethyläther	~40						<0	<0	
Wasserstoff								62,5[14])	
Ammoniak								klopft nicht[14])	

die jeweils eingestellten Bedingungen von denen für die Bestimmung von Benzin vorgeschriebenen abweichen, wurden benutzt: a) der Unterdruck, gemessen an ein und derselben Stelle der Ansaugleitung des Motors mit einem flachen Flansch mit seitlicher Bohrung, der in die Leitung eingebaut werden konnte, ohne daß die Schrauben oder die Leitung verändert werden mußten, b) der Verdichtungsdruck im Zylinder bei den jeweiligen Versuchsbedingungen, jedoch bei abgestellter Zündung und einem Verdichtungsverhältnis 1:7.
Die Versuche wurden nach Motor- und Research-Methode an zwei IG- und zwei CFR-Motoren durchgeführt. Der Verdichtungsdruck wurde mit dem sehr gut arbeitenden amerikanischen Verdichtungsmesser des CFR-Motors gemessen, die Temperatur mit dem am CFR-Motor im Vorheizer, am IG-Motor im Zylinderkopf eingebauten Thermometer.

Die Fahrbedingungen wurden durch Änderung der Gaseinführung geändert, indem gefahren wurde

1. mit Vorschaltgerät ohne Vergaser und ohne Geräuschdämpfer,
2. mit Vorschaltgerät vor dem Vergaser mit und ohne Geräuschdämpfer,
3. mit direkter Einführung an der engsten Stelle des Vergaser-Lufttrichters,
4. mit Einführung hinter dem Vergaser an einer eingebauten Mischvorrichtung in Form eines Flansches.

Bei der Fahrweise 2 bis 4 konnte zur Feststellung der Octanzahl unmittelbar auf das Vergleichsbenzin-Gemisch umgeschaltet werden, bei der Fahrweise 1, ebenso bei OZ über 100, wurde der Klopfwert des Gases über die bei jeder Versuchsreihe vorher und nachher neu geeichte

[1]) *F. Jantsch*, Kraftstoff-Handbuch. Stuttgart 1941.
[2]) *L. Westerkamp*, Der Flüssiggasbetrieb bei Kraftfahrzeugen. Berlin 1942.
[3]) *H. G. Bock*, Treibgas-Taschenbuch. Berlin 1940.
[4]) *W. Rixmann*, Leistung und Wirtschaftlichkeit gasbetriebener Fahrzeugmotoren, Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 3, 1938.
[5]) *A. E. Nash* u. *R. T. Howes*, Brennstoff- u. Wärmewirtsch. **22**, [1941].
[6]) *A. W. Francis*, Relations between Physical Properties of Paraffin Hydrocarbons, Ind. Engng. Chem. **33**, Nr. 4, S. 554 [1941].
[7]) *G. Egloff*, J. Instn. Petrol. Technologists **23**, 645 [1937]; *G. Egloff*, Moderne Kohlenwasserstoffsynthesen, Brennstoff-Chem. **18**, 115 [1937].
[8]) *P. Ferretti*, Die Klopffestigkeit einiger Gase, Kraftstoff **17**, 71, 107 [1941].
[9]) Treibgas: Propan 47 bis 55 %, Butan 42 bis 36 %, Rest 11 bis 9 %.
[10]) Motorenmethan: Methan rd. 64 %, Äthylen rd. 16 %, Äthan rd. 14 %, Rest 6 %.
[11]) Leuchtgas: H_2 49,8 %, CO 14,8 %, CH_4 17,9 %, C_nH_m 2,1 %.
[12]) Butylen 70 bis 90 %.
[13]) Enthält verhältnismäßig viele Ungesättigte.
[14]) Infolge des geringen Gemischheizwertes ist bei den Versuchen mit Wasserstoff und Ammoniak die Motorenleistung zurückgegangen. Probe und Vergleichsmischung sind deshalb bei verschiedener Belastung gefahren worden.
[15])

Bezeichnung	Zusammensetzung in Vol.-%			Rest
	C_3H_8	i-C_4H_{10}	n-C_4H_{10}	
Propan	86,6	5,2	—	C_2H_6, i-C_4H_{10}
i-Butan	—	93,5	3,1	i-C_4H_8, n-C_4H_8
n-Butan	—	8,4	86,3	i-C_4H_8, n-C_4H_8
Treibgas	45,7	12,2	30,0	C_2H_6, C_2H_4, C_3H_6, C_4H_8

[16]) Propan: C_3H_8 100 %.
[17]) Butan: C_4H_{10} 100 % (?).
[18]) Propan: Äthan-Äthylen 13 %, Propan-Propylen 86 %, Butan 1 %.
Butan: Propan-Propylen 17 %, i-Butan 31,5 %, n-Butan 41,8 %, Rest 9,7 %.
[19]) Ohne die vorgeschriebene Vorwärmung des Gemisches von 149°, wegen der großen Neigung des Gemisches zur vorzeitigen Entflammung.
[20]) Generatorgas (Holzkohle): H_2 8 %, CO 28 %, CO_2 3 %, N_2 61 %.
Kokereigas: H_2 56,8 %, CO 5,5 %, CH_4 26,35 %, C_nH_m 2 %, N_2 7,4 %, CO_2 1,8 %, O_2 2 %.
Stadtgas: H_2 54 %, CO 16 %, CH_4 18 %, C_nH_m 1,8 %, N_2 6,2 %, CO_2 4 %.
[21]) Unter „Treibgas" im engeren Sinn versteht man Gemische von Flüssiggasen, der Hauptsache nach Propan und Butan, deren Zusammensetzung sehr verschieden sein kann je nach dem Hersteller und nach dem gewünschten Dampfdruck, abhängig davon, ob das Treibgas zur Sommer- oder Winterzeit verwendet werden soll. Da von den meisten in *Zahlentafel 21* angegebenen Treibgasen die Zusammensetzung nicht bekannt ist, ist auch ein unmittelbarer Vergleich der Klopfwerte nicht ohne weiteres möglich, und es können beachtliche Verschiedenheiten im Klopfwert der Treibgase auftreten (vgl. auch 13).

Kurve: Octanzahl—Verdichtungsverhältnis, also über das Verdichtungsverhältnis bei gleichem Klopfmesser-Ausschlag bei maximalem Klopfen des Gases und des Vergleichsbenzin-Gemisches gemessen, wobei die Kurve über OZ 100 extrapoliert wurde.

Im Vorschaltgerät wurden verschiedene Lufttrichter eingesetzt; dadurch wurden sehr verschiedene Ansaug-Unterdrücke und Verdichtungsdrücke und damit verschiedene Füllungen im Zylinder erhalten.

Abb. 12 zeigt für CFR-Motor-Methode und für i-Butan, n-Butan, Propan und Propylen die so gemessenen Octanzahlen aufgetragen, geordnet einmal nach dem jeweils gemessenen Unterdruck und einmal nach dem Verdichtungsdruck, unabhängig von der Art, wie diese Änderungen des Unter- und Verdichtungsdruckes erzielt worden sind. Dabei kommt man mit zunehmendem Unterdruck und dementsprechend abnehmendem Verdichtungsdruck durch den (in der Abbildung schraffierten) Bereich der beim normalen Benzinbetrieb auftretenden Werte hindurch. In diesem Bereich, in dem die Bedingungen für die Bestimmung des Klopfwertes der Flüssiggase mit denen für das Vergleichsbenzin übereinstimmen, müssen die wahren Klopfwerte der Flüssiggase liegen. Es zeigt sich nun, daß die Veränderung des Trichter-Durchmessers im Vorschaltgerät von 18 auf 9 mm eine Octanzahländerung von 20 OZ (von OZ 80 bis OZ 100) an ein und demselben Flüssiggas bewirkt, wonach also verständlich ist, daß die Schwankungen der Werte in den Schrifttumsangaben von verschiedenen Fahrbedingungen herrühren dürften. Vor allem dürften die hohen amerikanischen Werte bei niederem Verdichtungsdruck und hohem Unterdruck, also mit geringer Zylinderfüllung, bestimmt worden sein.

Die bei ein und demselben Verdichtungsverhälrnis 1:7 bei abgestellter Zündung und fremd angetriebenem Motor gefundenen Grenzwerte betragen am CFR-Motor

bei der geringsten Füllung (also kleinstem Trichter) bei n = 900 U/min:

Verdichtungsdruck 8,4 kg/cm², Unterdruck 380 mm WS,

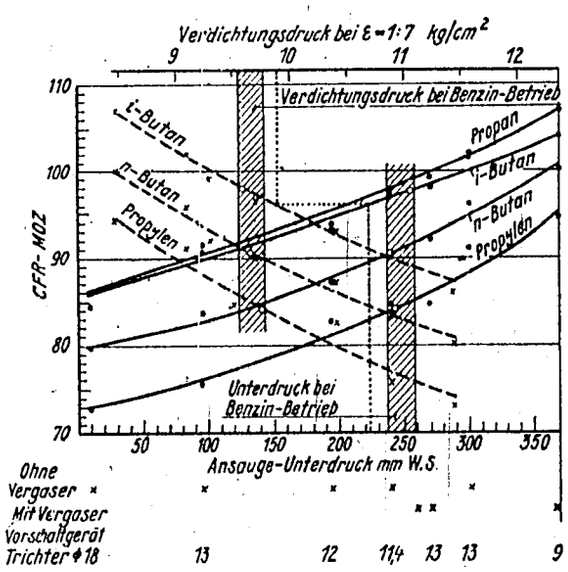


Abb. 12. Octanzahlen von Flüssiggasen in Abhängigkeit:
——— vom Ansaug-Unterdruck
— — — vom Verdichtungsdruck

bei der größten Füllung (also größtem Trichter) bei n = 600 U/min:

Verdichtungsdruck 11,4 kg/cm², Unterdruck 12 mm WS.

Am IG-Motor nach Motor-Methode und bei beiden Motoren nach Research-Methode sind diese Unterschiede bedeutend geringer.

B. Der letzte Zweck der Versuche war, geeignete Bedingungen festzulegen, die es erlauben, jederzeit reproduzierbare Klopfwerte der Flüssiggase nach Research-

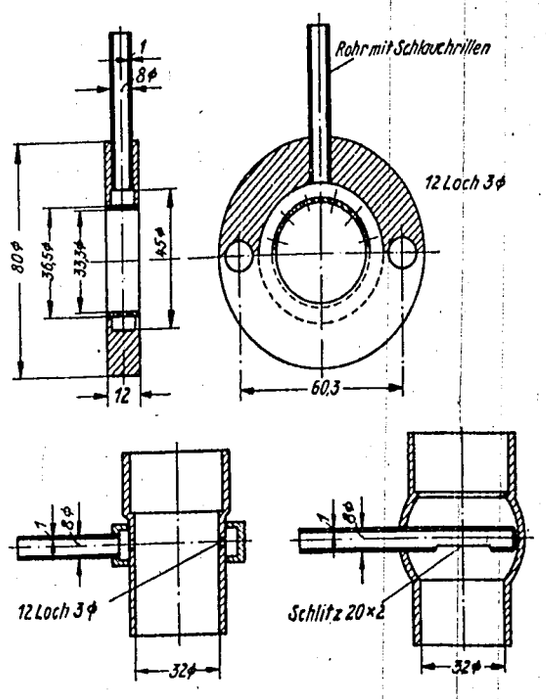


Abb. 13. Mischgeräte für Gas und Luft

und Motor-Methode zu bestimmen. Die Voraussetzungen hierfür müssen sein:

1. Betriebsbedingungen des Motors beim Fahren mit Gas genau so wie beim Fahren mit Vergleichsbenzin, letzten Endes mit Octan-Heptan-Gemisch (Vorwärmung, Drehzahl, Ansaugdruck, maximales Klopfen, Kühlung usw.).

2. Keine apparativen Änderungen am Motor und an seinem Zubehör für das Zubringen des Gases.

3. Umschaltbarkeit auf Vergleichsbenzin, ohne daß irgendeine sonstige Änderung notwendig ist.

Als einfachste und praktisch keine Änderung an der äußeren Motor-Apparatur bewirkende Gaszugabe ergab sich ein in der Ansaugleitung eingebauter einfacher flacher Flansch *(Abb. 13)*, der innen eine Kreisnut besitzt, von dem aus das Gas durch am Umfang verteilte Löcher von dem Unterdruck der durch die Ansaugleitung strömenden Luft angesaugt wird. Das Gas wird dieser Kreisnut von oben durch ein eingelötetes Rohr zugeführt. Eine dünnwandige, mit am Umfang gleichmäßig verteilten Löchern versehene Büchse vom selben lichten Durchmesser wie die Ansaugleitung war im Außendurchmesser so gedreht, daß sie nach Abkühlung in einem Kältemittel gerade in den lichten Durchmesser des mit der Nut versehenen Flansches hineinpaßte, so daß dieser nach dem Temperaturausgleich fest auf die Büchse aufgeschrumpft war.

Bei den Versuchen war daher bei Motor-Methode das Mischgerät (Flansch) zwischen Vergaser und Vorheizer unmittelbar am Vorheizereingang, bei Research-Methode zwischen Vergaser und Zylinder unmittelbar am Zylinder eingebaut. Die naheliegende Befürchtung, daß das Gas sich auf dem nur kurzen gemeinsamen Weg mit der Luft nicht vollkommen mischt, wenn es zu nahe am

Research-Methode sind diese Unterschiede bedeutend

Versuche war, geeignete Be-
es erlauben, jederzeit repro-
Flüssiggase nach Research-,

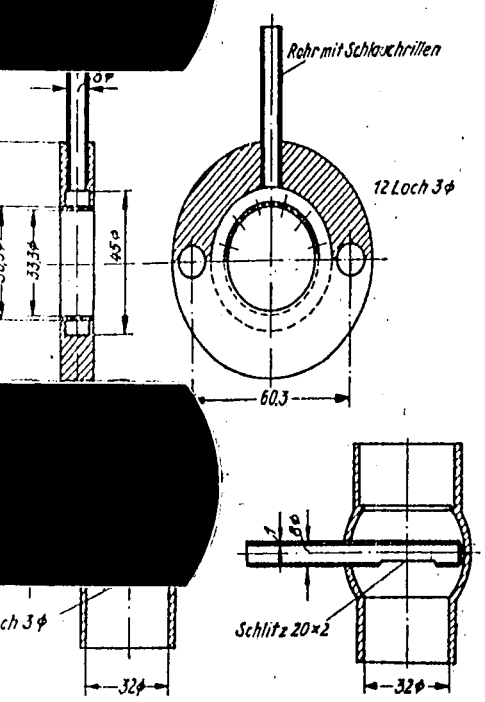


Abb. 13. Mischgeräte für Gas und Luft

Motor-Methode zu bestimmen. Die Voraussetzungen
r müssen sein:

triebsbedingungen des Motors beim Fahren mit
genau so wie beim Fahren mit Vergleichsbenzin,
Heptan-Gemisch (Vorwärmung,
maximales Klopfen, Kühlung

rungen am Motor und an
bringen des Gases.

Vergleichsbenzin, ohne daß
eine sonstige Änderung notwendig ist.

einfachste und praktisch keine Änderung an der
en Motor-Apparatur bewirkende Gaszugabe ergab
ein in der Ansaugleitung eingebauter einfacher
r Flansch *(Abb. 13)*, der innen eine Kreisnut be-
von dem aus das Gas durch am Umfang verteilte
r von dem Unterdruck der durch die Ansaug-
g strömenden Luft angesaugt wird. Das Gas wird
Kreisnut von oben durch ein eingelötetes Rohr
ührt. Eine dünnwandige, mit am Umfang gleich-
g verteilten Löchern versehene Büchse vom selben
die Ansaugleitung war im Außen-
daß sie nach Abkühlung in
in den lichten Durchmesser
nen Flansches hineinpaßte,
emperaturausgleich fest auf
war.

daher bei Motor-Methode das
gerät (Flansch) zwischen Vergaser und Vorheizer
telbar am Vorheizereingang, bei Research-Methode
hen Vergaser und Zylinder unmittelbar am Zylinder
baut. Die naheliegende Befürchtung, daß das Gas
auf dem nur kurzen gemeinsamen Weg mit der
nicht vollkommen mischt, wenn es zu nahe am

Zylinder eingeführt wird, hat sich bei den Versuchen nicht bestätigt. *Abb. 13* zeigt noch zwei Ausführungsformen von Mischgeräten, die bei den Versuchen zwischen Dämpfer und Vergaser eingeschaltet worden waren. Wesentliche Unterschiede waren nicht festzustellen, so daß letzten Endes die einfache Ausführung des Mischflansches verwendet wurde.

V. Versuchsergebnisse

Mit diesen beschriebenen Bedingungen wurden Octanzahlen von Flüssiggasen gemäß *Zahlentafel 22* bestimmt. Zum Vergleich sind die vom Technischen Prüfstand der I. G. gefundenen Werte danebengestellt, ebenso die auf beiden Prüfständen festgestellten jeweiligen Unterschiede zwischen ROZ und MOZ.

Dazu ist folgendes zu sagen:

Die OZ der Flüssiggase sind etwas niedriger als, besonders in der amerikanischen Literatur, ursprünglich zum Teil angegeben war; sie liegen aber über denen der handelsüblichen Benzine.

Die Flüssiggase sind zum Teil verhältnismäßig temperaturempfindlich, wie die Unterschiede zwischen MOZ und ROZ zeigen.

Die Übereinstimmung zwischen IG- und CFR-Motor und zwischen den völlig unabhängig voneinander gewonnenen Werten von zwei I. G.-Prüfständen ist als sehr gut zu bezeichnen.

Was die Reproduzierbarkeit anbelangt, so hatten praktisch die gleichen Proben bereits 1939 auf unserem Prüfstand mit den jetzigen überraschend gut übereinstimmende Werte ergeben.

Eine ganz interessante Gegenüberstellung und eine Bestätigung der gefundenen Octanzahlen zeigen die nach dem DVL-Verfahren am BMW-Motor aufgenommenen Überladekurven der *Abb. 14*, die uns zur Verfügung gestellt worden sind. Sowohl die Reihenfolge des untersuchten Propans, n-Butans und i-Butans als auch die absoluten Vergleichswerte beim theoretischen Luftverhältnis mit einem verbleiten Flugbenzin, einem technischen Octan und einem gebleiten technischen Octan stellen eine recht befriedigende Bestätigung der gefundenen Octanzahlen dar.

Neben der Weiterführung der Untersuchungen von Flüssiggasen und anderen Gasen am Klopfmotor und der Bestimmung von Octanzahlen sollen auch Überladekurven nach dem I. G.-Verfahren am I. G.-Prüfmotor aufgenommen werden.

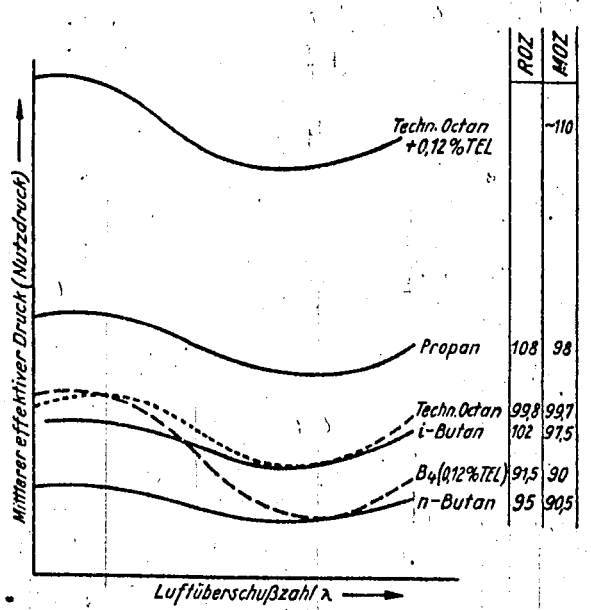


Abb. 14. Klopfgrenzkurven nach dem DVL-Überladeverfahren (Vereinfachte Bedingungen, BMW 132 N, 1500 U/min, Zündung 30° konstant, Ladelufttemperatur 130°)

Es wäre nun wünschenswert, daß auch andere Prüfstände Klopfwerte von Flüssiggasen mitteilten, entweder aus Versuchen, die wohl an manchen Stellen auch schon angestellt worden sind, oder aber daß die Prüfstände, angeregt durch die vorhergehenden Ausführungen, die Bestimmung von Flüssiggasklopfwerten in ihr Versuchsprogramm aufnähmen. Dadurch ergäbe sich eine Ansammlung von Erfahrungswerten sowohl in bezug auf die zahlenmäßige Höhe der Klopfwerte und ihre Genauigkeit als auch in bezug auf die Einheitlichkeit und Geeignetheit der geschilderten Versuchsanordnung.

Ing. E. Singer

Über den Einfluß von Betriebsbedingungen auf das Klopfverhalten von Kraftstoffen

Es ist bekannt, daß das Klopfverhalten der Kraftstoffe von den Betriebsbedingungen des Motors abhängig ist. Am Klopfmotor können daher verschiedenartige Kraftstoffe durch entsprechende Wahl der Betriebsbedingungen in der Bewertungsfolge beeinflußt werden. So sind verschiedene Prüfmethoden entstanden, von denen sich vor allem die Motor- und die Research-Methode durchgesetzt haben. Hier soll nicht auf den besonderen Vorzug der einen oder anderen Prüfweise oder auf ihre Kopplung untereinander eingegangen werden. Es ist jedoch festzustellen, daß ein Bestehen von mehreren Prüfmethoden nebeneinander immer eine gewisse Unsicherheit in die Bewertung der Kraftstoffe hineinträgt.

Im Zuge von Untersuchungen, bei denen ein Klopfmotor auf einen großen Motor abgestimmt werden sollte, sind auf dem Technischen Prüfstand die Betriebsbedingungen des Klopfmotors noch weitgehender geändert worden, als dies zwischen der Motor- und Research-Methode üblich ist. Die Auswirkung dieser Änderungen wurde an Benzinen mit hohem Paraffin-, Benzol- und Alkoholgehalt, und zwar gebleit und ungebleit, beobachtet. Die erhaltenen Ergebnisse können als Richtlinien bei etwaigen künftigen Abstimmversuchen dienen.

I. Versuchsdurchführung

Die Zusammensetzung der verwendeten sechs Grundbenzine ist in der *Zahlentafel 23* angegeben. Durch Bleien der Proben 2 bis 5 kommen weitere vier Benzine hinzu.

Zahlentafel 23. Zusammensetzung und Octanzahlen der Proben

	Tel-Gehalt cm³/l	Zusammensetzung in Vol.-%	MOZ	ROZ	Temp. Empf. ΔOZ	Bleiwirkzahl
1a	1,2	Benzin	89,1	91,5	2,4	12,2
2a	0	75 % Octan	88,1	91,3	3,2	10,6
b	1,2	25 % Benzin	101,0	102,1	1,1	
3a	0	75 % Benzol	88,6	102,7	14,1	4,4
b	1,2	25 % Benzin	93,9	>105	>11	
4a	0	47 % Alkohol ...	87,4	105,8	17,7	2,3
b	1,2	53 % Benzin	90,2	>105	>13	
5a	0	Octan	96,7	98,0	1,2	13,5
b	1,2		111,6	>105	—	
6a	1,2	Bl. m. 35 % Octan	95,0	103,5	8,5	—

Von diesen zehn Proben sind nur die Benzine 1 und 6 handelsübliche Kraftstoffe. Die Proben 2, 3 und 4 enthalten außerordentlich hohe Zusätze an Octan, Benzol und Alkohol, damit der unterschiedliche Einfluß der Betriebsbedingungen klar ersichtlich wird. Die Probe 5 ist techn. Octan. Da es als Unterbezugskraftstoff Z bei der Octanzahlbestimmung weitgehend verwendet wird, ist auch sein Verhalten von großem Interesse. In *Zahlentafel 23* sind weiterhin die Motor- und Research-Octanzahlen dieser zehn Benzine angegeben.

Die Messungen wurden an einem IG-Prüfmotor durchgeführt, der mit einer Zusatzanlage für Überladeversuche, mit einem Heizeinsatz zum Vorwärmen der Ansaugeluft sowie mit einer Riemenscheibe für n = 1200/min zusätzlich ausgerüstet ist. Folgende Betriebsbedingungen wurden geändert:

1. Temperatur des Kühlmittels t_K von 100 auf 150°,
2. Temperatur des Kraftstoff-Luft-Gemisches t_a von 125 auf 150°,
3. Temperatur der Ansaugeluft t_A von 20 auf 125°,
4. Art der Vorheizung (von Gemisch auf Luft),
5. Luftverhältnis λ von 0,8 auf 1,0,
6. Vorzündung Z von 15 auf 30°,
7. Drehzahl n von 600 auf 1200 min⁻¹,
8. Einlaßdruck p von 1000 auf 1400 mm QS abs.,
9. Verdichtungsverhältnis ε von 6,0 auf 6,8,
10. Einstellen der Klopfstärke (statt Verdichten durch Laden).

Unverändert bei diesen Versuchen blieb lediglich die Klopfstärke. Sie wurde, wie üblich, so gewählt, daß bei allen Einzelmessungen der Zeiger des Klopfmessers den Ausschlag A = 50 Teilstriche an der Klopfskala erreichte. Die anderen Betriebsgrößen, die in der *Zahlentafel 24* aufgeführt sind, wechselten von Versuchsreihe zu Versuchsreihe. So wurde z. B. die Reihe 2 nach *Abb. 16* mit 600 U/min, die Reihe 3 nach *Abb. 17* mit 1200 U/min gefahren. Bei beiden Versuchsreihen zeigte der Klopfmesser den Ausschlag A = 50 an. Bei der Reihe 2 wurde diese Anzeige durch Ändern des Verdichtungsverhältnisses ε, bei der Reihe 3 durch Ändern des Ladedruckes p eingestellt. Entsprechend sind in der letzten Spalte der *Zahlentafel 24* für die Reihen 2 und 3 diese Größen ε bzw. p als Klopfveränderliche angegeben. Da die Betriebsbedingungen von Versuchsreihe zu Versuchsreihe gewechselt haben, sind die erhaltenen Klopfwerte nur innerhalb der einzelnen Reihe in ihrem absoluten Wert vergleichbar. Deshalb ist auch der Klopfmaßstab der *Abb. 15* bis *27*, die das Ergebnis enthalten, nicht einheitlich. Je nach den gewählten Betriebsbedingungen wurde bald das erreichte Verdichtungsverhältnis (z. B. bei Reihe 2), bald der erreichte Ladedruck (z. B. bei Reihe 3) als Maßstab gewählt, da es ja bei diesen Versuchen nicht auf einen absoluten Vergleich der einzelnen Meßreihen untereinander, sondern nur auf eine Bewertung innerhalb der gleichen Meßreihe ankam. Auf diese Weise konnte auf das zeitraubende Eichen des Klopfmotors bei jeder neuen Prüfbedingung verzichtet werden.

II. Versuchsergebnisse

Die Meßwerte, die in *Abb. 15* bis *27* dargestellt sind, stellen nur einen kleinen Teil des erhaltenen Gesamtergebnisses dar. Bei diesem interessierte vor allem die Bewertungsreihenfolge und die Bleiempfindlichkeit. Als Maßstab für die Bleiempfindlichkeit der Kraftstoffe 2 bis 5 wird der senkrechte Abstand in den Darstellungen zwischen den gebleiten und ungebleiten Stoffen genommen.

Abb. 15: Beim Übergang von der Research- auf die Motor-Methode werden das Benzol- und Alkoholgemisch, gebleit und ungebleit, in der Bewertung sehr stark zurückgesetzt. Die Bleiempfindlichkeit ist nach beiden Methoden schlecht.

Abb. 16: Die Steigerung der Kühltemperatur von 100° auf 150° setzt das Klopfverhalten der Benzol- und Alkoholmischungen stark herab. Die Bleiempfindlichkeit bleibt unverändert schlecht.

Abb. 17: Die Steigerung der Gemischtemperatur von 125° auf 150° vermindert den Klopfwert von Benzol und Alkohol gleichmäßig stark. Die Bleiempfindlichkeit bleibt unverändert.

[redacted]ungen
[redacted]fen

emperatur des Kraftstoff-Luft-Gemisches
von 125 auf 150°,
emperatur der Ansaugeluft t_A von 20 auf 125°,
rt der Vorheizung (von Gemisch auf Luft),
uftverhältnis λ von 0,8 auf 1,0,
orzündung Z von 15 auf 30°,
rehzahl n von 600 auf 1200 min^{-1},
inlaßdruck p von 1000 auf 1400 mm QS abs.,
erdichtungsverhältnis ε von 6,0 auf 6,8,
instellen der Klopfstärke (statt Verdichten durch
aden).

[redacted]ersuchen blieb lediglich die
üblich, so gewählt, daß bei
eiger des Klopfmessers den
an der Klopfskala erreichte,
die in der *Zahlentafel 24* auf-
n Versuchsreihe zu Versuchs-
he 2 nach *Abb. 16* mit 600 U/min,
he 3 nach *Abb. 17* mit 1200 U/min gefahren. Bei beiden
hsreihen zeigte der Klopfmesser den Ausschlag A = 50
i der Reihe 2 wurde diese Anzeige durch Ändern des
htungsverhältnisses ε, bei der Reihe 3 durch Ändern
dedruckes p eingestellt. Entsprechend sind in der
Spalte der *Zahlentafel 24* für die Reihen 2 und 3
Größen ε bzw. p als Klopfveränderliche angegeben.
Betriebsbedingungen von Versuchsreihe zu Ver-
eihe gewechselt haben, sind die erhaltenen Klopf-
nur innerhalb der einzelnen Reihe in ihrem ab-
Wert vergleichbar. Deshalb ist auch der Klopf-
[redacted]07, die das Ergebnis enthalten,
den gewählten Betriebs-
erreichte Verdichtungsver-
er erreichte Ladedruck (z.B.
ählt, da es ja bei diesen
soluten Vergleich der ein-
der, sondern nur auf eine
gleichen Meßreihe ankam.
ese Weise konnte auf das zeitraubende Eichen
opfmotors bei jeder neuen Prüfbedingung ver-
werden.

II. Versuchsergebnisse

Bwerte, die in *Abb. 15* bis *27* dargestellt sind,
nur einen kleinen Teil des erhaltenen Gesamt-
ses dar. Bei diesem interessierte vor allem die
ngsreihenfolge und die Bleiempfindlichkeit. Als
für die Bleiempfindlichkeit der Kraftstoffe 2
rd der senkrechte Abstand in den Darstellungen
ungebleiten Stoffen ge-

Research- auf die Motor-
Alkoholgemisch, gebleit und
ark zurückgesetzt. Die Blei-
Methoden schlecht.

Die Steigerung der Kühltemperatur von 100° auf
das Klopfverhalten der Benzol- und Alkohol-
en stark herab. Die Bleiempfindlichkeit bleibt
ert schlecht.

Die Steigerung der Gemischtemperatur von 125° auf
indert den Klopfwert von Benzol und Alkohol gleich-
ark. Die Bleiempfindlichkeit bleibt unverändert.

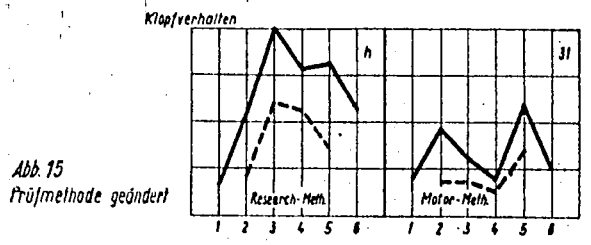


Abb. 15
Prüfmethode geändert

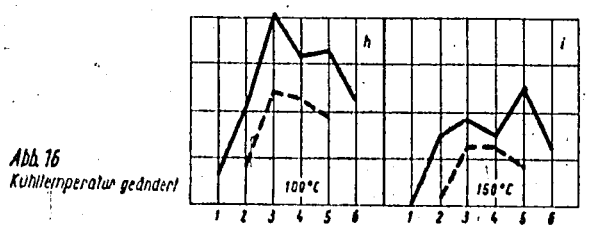


Abb. 16
Kühltemperatur geändert

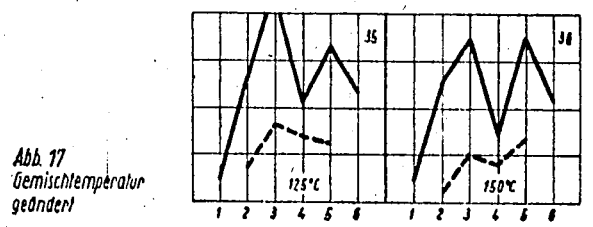


Abb. 17
Gemischtemperatur geändert

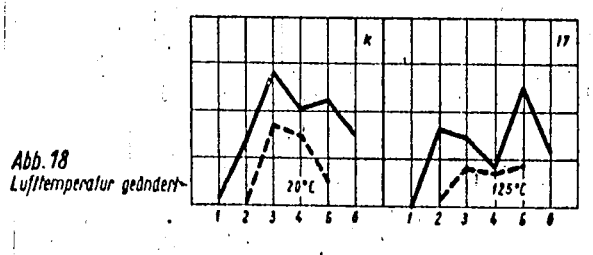


Abb. 18
Lufttemperatur geändert

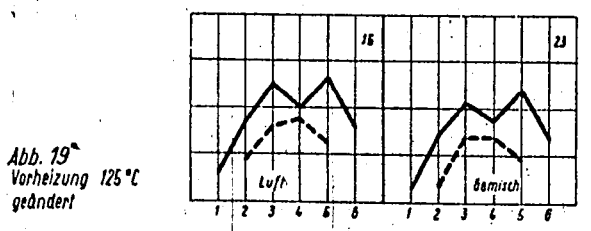


Abb. 19
Vorheizung 125 °C geändert

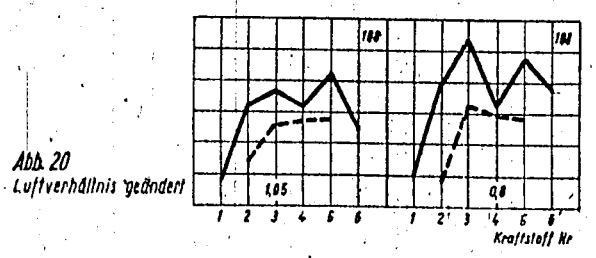
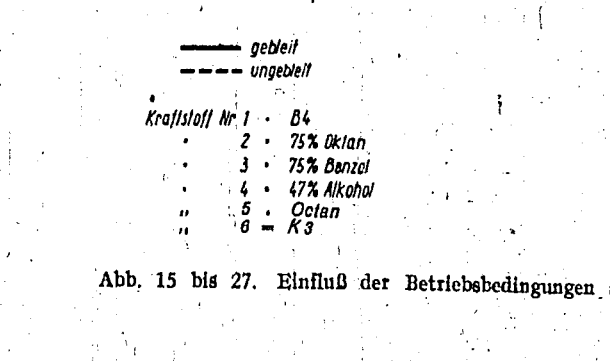


Abb. 20
Luftverhältnis geändert



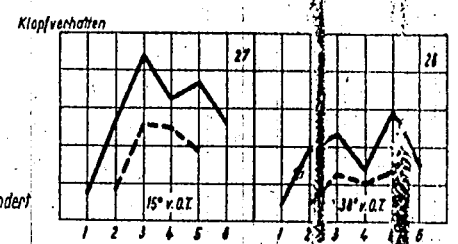


Abb. 21
Vorzündung geändert

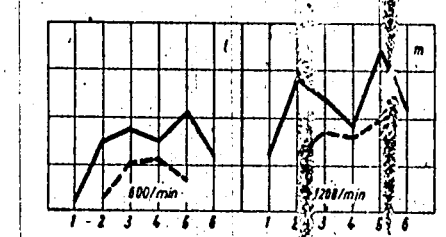


Abb. 22
Drehzahl geändert

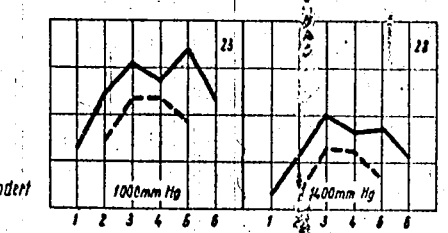


Abb. 23
Einlaßdruck geändert

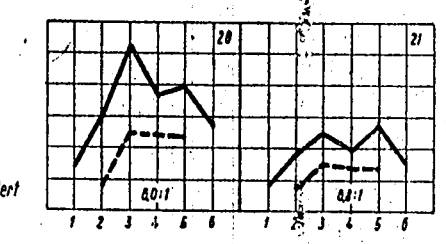


Abb. 24
Verdichtung geändert

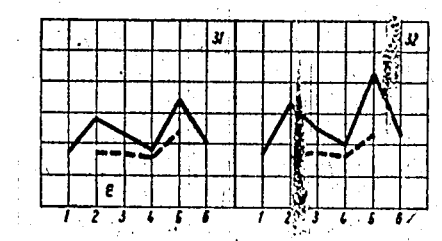


Abb. 25
Klopfveränderliche

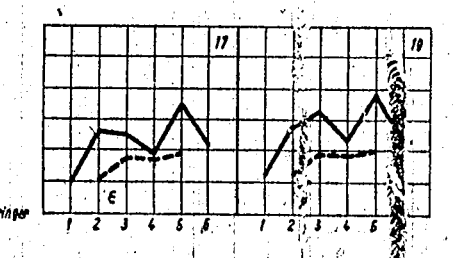


Abb. 26
Klopfveränderliche Gemischtemperatur geringer als bei Bild 25

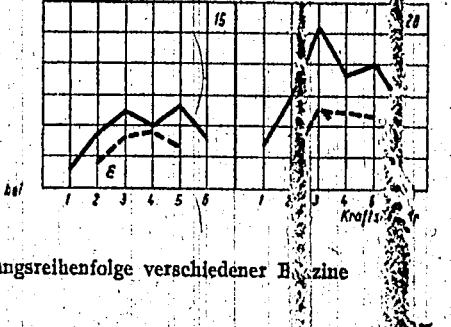


Abb. 27
Klopfveränderliche Drehzahl geringer als bei Bild 25

Abb. 15 bis 27. Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Bewertungsreihenfolge verschiedener B[redacted]zine

Abb. 18: Die Erhöhung der Lufttemperatur von 20° auf 125° mindert das Klopfverhalten der Benzol- und Alkoholmischung sehr stark. Die Bleiempfindlichkeit besonders des Alkoholgemisches wird schlechter.

Abb. 19: Der Übergang von der Luft- auf die Gemischvorheizung ist bei gleichbleibender Gemischtemperatur ohne Einfluß auf die Bewertung.

Abb. 20: Eine Minderung des Luftverhältnisses erhöht die Klopffestigkeit, vor allem des gebleiten Benzolgemisches. Das ungebleite Benzolgemisch wird nur wenig geändert. Damit wird die Bleiempfindlichkeit gebessert.

Abb. 21: Die Klopffestigkeit beider Benzol- und Alkoholgemische wird durch die Erhöhung der Vorzündung von 15° auf 30° Kurbelwinkel stark vermindert. Auch die Bleiempfindlichkeit wird zurückgesetzt.

Abb. 22: Die Drehzahlsteigerung mindert stark das Klopfverhalten der beiden Benzol- und Alkoholgemische, besonders des gebleiten Alkoholgemisches. Dadurch wird die Bleiempfindlichkeit des Alkoholgemisches vermindert. Die Bleiempfindlichkeit der Paraffinmischungen wird erhöht.

Abb. 23: Die Erhöhung des Einlaßdrucks von 1000 auf 1400 mmQS absol. mindert in erster Linie das Klopfverhalten der Paraffingemische. Deren Bleiempfindlichkeit wird dadurch etwas geringer.

Abb. 24: Ein niederes Verdichtungsverhältnis beurteilt besonders das gebleite Benzolgemisch weitaus besser als ein hohes Verdichtungsverhältnis. Eine Steigerung des Verdichtungsverhältnisses bedeutet für Benzolmischungen eine Herabsetzung der Bleiempfindlichkeit.

Abb. 25: Regelt man die Klopfstärke statt durch das Verdichtungsverhältnis durch den Einlaßdruck, so zeigt sich bei den hier gewählten Betriebsbedingungen keinerlei Umbewertung.

Wie vorsichtig man beim Ziehen von Schlußfolgerungen aus diesen Versuchen sein muß und wie irreführend eine kritiklose Anwendung der vorgenannten Teilergebnisse sein kann, zeigt ein Vergleich der Meßwerte nach *Abb. 25, 26* und *27*. Wohl wurde in diesen drei Beispielen die Verdichtungsmethode einheitlich durch die Überladungsmethode ersetzt, aber unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Durch Überlagerung der verschiedenartigen Einflüsse der Betriebsbedingungen sind ganz unterschiedliche Ergebnisse erhalten worden.

Abb. 26, deren Ergebnisse bei geringerer Kühl- und Gemischtemperatur als bei Abb. 25 erhalten worden sind, zeigt gegenüber dieser eine nur untergeordnete Bewertungsänderung durch Laden anstatt Verdichten.

Abb. 27, deren Ergebnisse bei den gleichen Temperaturen, aber bei geringerer Drehzahl erhalten worden sind als bei Abb. 26, zeigt eine erhebliche Umbewertung, vor allem des gebleiten Benzol- und Alkoholgemisches und in Verbindung damit eine gebesserte Bleiempfindlichkeit dieser Kraftstoffe.

III. Zusammenfassung

An Hand von *Zahlentafel 25* kann zusammenfassend festgestellt werden:

Gegenüber den gebleiten Paraffingemischen 2 und 5 wird das gebleite Benzolgemisch 3 mit sink nder Kühl- Gemisch- bzw. Lufttemperatur, mit Vergasereinstellung

Zahlentafel 24. Betriebsdaten des I. G.-Prüfmotors

Abbildung Nr.	t_K °C	t_G °C	t_L °C	Heizung °C	λ	Zdg ° KW	n min	p mmQS	ε	Klopfveränd.
15	Research-Methode gegen Motor-Methode									
16	$\frac{100}{150}$	15	30	G	max	22	600	748	A=50	ε
17	100	$\frac{125}{150}$	28	G	max	15	1200	A=50	7,0	p
18	100	$\frac{20}{125}$	?	L	max	22	900	1000	A=50	ε
19	100	125	?	$\frac{L}{G}$	max	22	600	1000	A=50	ε
20	100	125	30	G	$\frac{\sim 1{,}05}{\sim 0{,}80}$	22	600	1000	A=50	ε
21	100	125	28	G	max	$\frac{15}{30}$	900	A=50	6,5	p
22	100	125	29	G	max	22	$\frac{600}{1200}$	1000	A=50	ε
23	100	125	31	G	max	22	600	$\frac{1000}{1400}$	A=50	ε
24	100	125	29	G	max	22	600	A=50	$\frac{6{,}0}{6{,}8}$	p
25	150	150	32	G	max	22	900	$\frac{800}{A=50}$	$\frac{A=50}{8{,}0}$	$\frac{\varepsilon}{p}$
26	100	125	28	L	max	22	900	$\frac{100}{A=50}$	$\frac{A=50}{7{,}0}$	$\frac{\varepsilon}{p}$
27	100	125	30	L	max	22	600	$\frac{1000}{A=50}$	$\frac{A=50}{6{,}0}$	$\frac{\varepsilon}{p}$

Zahlentafel 25. Klopfwertänderung von Benzol- und Alkoholgemisch gegenüber Octangemisch bei Erhöhung der Werte der nachstehend angeführten Bedingungen

	t_K	t_G	t_L	Gem. statt Luft	λ	Z	n	p	ε	p statt ε
75 % Benzol	—	—	—	=	—	— —	—	=	=	=
47 % Alkohol	—	—	—	=	=	— —	—	=	=	=
75 % Bleibenzol	— —	— —	— —	=	— —	— —	=	+ +	— —	+
47 % Bleialkohol ...	— —	—	— —	=	=	— —	— —	+	—	=

Es bedeuten: = unverändert; — geringe Verschlechterung; — — starke Verschlechterung; + geringe Verbesserung; + + starke Verbesserung } gegenüber Octan/Heptan

hier gewählten Betriebsbedingungen keinerlei Um-
tung.

vorsichtig man beim Ziehen von Schlußfolgerungen
ein muß und wie irreführend
der vorgenannten Teilergebnisse
h der Meßwerte nach *Abb. 25*,
n diesen drei Beispielen die
tlich durch die Überlade-
ter verschiedenen Betriebs-
erlagerung der verschieden-
etriebsbedingungen sind ganz
schiedliche Ergebnisse erhalten worden.

26, deren Ergebnisse bei geringerer Kühl- und Gemisch-
ratur als bei Abb. 25 erhalten worden sind, zeigt gegen-
dieser eine nur untergeordnete Bewertungsänderung durch
anstatt Verdichten.

27, deren Ergebnisse bei den gleichen Temperaturen, aber
ringerer Drehzahl erhalten worden sind als bei Abb. 26,
eine erhebliche Umbewertung, vor allem des gebleiten
l- und Alkoholgemisches und in Verbindung damit eine
serte Bleiempfindlichkeit dieser Kraftstoffe.

III. Zusammenfassung

5 kann zusammenfassend fest-

raffingemischen 2 und 5 wird
sch 3 mit sinkender Kühl-,
atur, mit Vergasereinstellung

... I. G.-Prüfmotors

	Zdg ° KW	n min	p mmQS	ε	Klopf-veränd.
gegen Motor-Methode					
	22	600	748	A=50	ε
	15	1200	A=50	7,0	p
	22	900	1000	A=50	ε
		600	1000	A=50	ε
			1000	A=50	ε
			A=50	6,5	p
			1000	A=50	ε
	22	600	1000/1400	A=50	ε
	22	600	A=50	6,0/6,8	p
	22	900	800/A=50	A=50/8,0	ε/p
	22	900	100/A=50	A=50*/7,0	ε/p
	22	600	1000/A=50	A=50/6,0	ε/p

über Octangemisch bei Erhöhung der Werte der nachstehend

	p	ε	p statt ε
	=	=	=
	=	=	=
ge Verbesserung	+ +	— —	+
e Verbesserung	+	—	=

gegenüber Octan/Heptan

auf Luftmangel, mit großer Vorzündung, mit geringem Einlaßdruck und damit hohem Verdichtungsverhältnis sowie durch die Verdichtungsmethode bevorzugt bewertet. Geringen Einfluß haben die Art der Vorwärmung und die Art der Klopfstärkeregelung (p statt ε).

Bei dem gebleiten Alkoholgemisch 4 sind, im Vergleich zu den gebleiten Benzolgemischen, die Vergasereinstellung, die Höhe des Verdichtungsverhältnisses und des Lade- druckes sowie die Art der Klopfstärkeregelung von geringerem Einfluß auf die relative Bewertung.

Für das gebleite Aromatenbenzin 6 gilt das gleiche wie für das gebleite Benzolgemisch, jedoch wegen des geringeren Aromatengehaltes in wesentlich geringerem Umfange.

Die an sich geringe Bleiempfindlichkeit des Benzolgemisches wird bei geringem Luftverhältnis, geringer Vorzündung und geringem Verdichtungsverhältnis sowie beim Laden statt Verdichten, verbessert. Besonders stark ist der Einfluß der Vergasereinstellung.

Bis auf den Einfluß des Luftverhältnisses gilt das gleiche auch für das Alkoholgemisch.

Bei der endgültigen Auswahl der Betriebsbedingungen ist man natürlich gebunden an das Klopfvermögen des Motors, an den möglichen Verstellbereich hinsichtlich des Verdichtungsverhältnisses und des Ladedruckes, an die Aussonderung des Klopfgeräusches durch Gehör oder Instrument sowie an die mechanische Festigkeit des Motors überhaupt. In manchen Fällen werden es diese Einschränkungen sein, die das Abstimmen des Klopfmotors besonders schwierig machen. Um jeder möglichen Entwicklung im Klopfmeßwesen weitgehend Rechnung tragen zu können, ist beim I.G-Prüfmotor, Baumuster 1944, auf diese Umstände Rücksicht genommen worden.

Dipl.-Ing. H. Unverhau

Prüfstandversuche über die Brauchbarkeit der Research- und Motor-Octanzahl im praktischen Betrieb

Vom Heereswaffenamt wurde die Aufgabe gestellt, zunächst auf Grund von Prüfstandversuchen die für verschiedene Motoren notwendige Research-Octanzahl bei normalen und tropischen Betriebsbedingungen zu ermitteln.

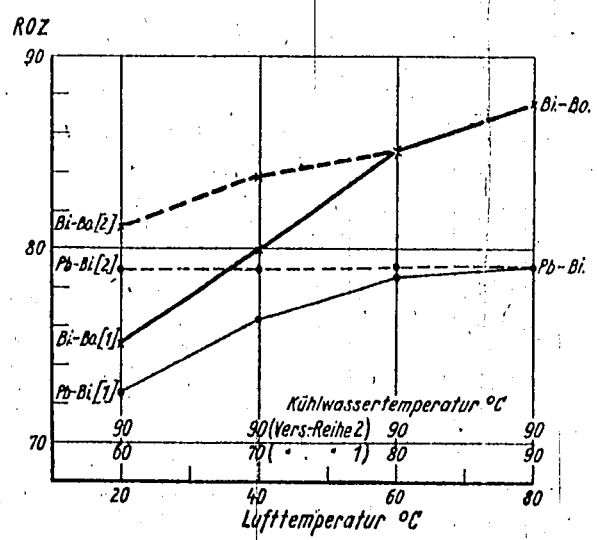


Abb. 28. Für klopffreien Betrieb mit Grundbenzin 1 bei einem 2,5-l-Motor (1) erforderliche Research-Octanzahl

I. Versuchsmethode

Für die Versuche fanden zehn verschiedene Motoren von 1,0 bis 12,0 l Gesamthubraum Verwendung.

Für die Kraftstoffmischungen stand zunächst ein Braunkohlenbenzin zur Verfügung, das besonders zur Verwendung in tropischen Gebieten vorgesehen war. Dieses Benzin sollte einmal mit Bleitetraäthyl und zum anderen mit Motorenbenzol auf die für klopffreien Betrieb notwendige Octanzahl gebracht werden.

Die Motoren wurden in üblicher Weise auf einem Prüfstand aufgebaut und mit einer Wasserbremse gekuppelt. Zur Überwachung der Betriebsbedingungen wurden die notwendigen Meßinstrumente angebaut.

Die Ansaugluft wurde durch elektrische Heizkörper in Verbindung mit Kontaktthermometer und Relais auf der gewünschten Höhe gehalten.

Jeder Motor wurde nach dem Aufbau und gründlicher Säuberung, sofern er nicht fabrikneu war, einer 2-stündigen Einlaufzeit unterzogen, um einen Ölkohleansatz zu bekommen.

Nach diesen Vorbereitungen begannen die eigentlichen Versuche. Der Motor wurde bei einer Drehzahl von 3000 bis 3200 je Minute unter Vollast 2 min lang warm gefahren, nachdem vorher die festgelegten Luft- und Kühlwassertemperaturen erreicht waren, und anschließend bis auf 800 U/min innerhalb etwa 2 min abgebremst. Hierbei durfte nur leichtes Klopfen auftreten. Die Klopfstärke wurde in 4 Graden durch das Gehör beurteilt.

Für die Versuche waren Kraftstoffmischungen aus dem Grundbenzin mit Zusatz von 4, 8, 12, 16 usw. Gew.-% Motorenbenzol bzw. mit 0,2, 0,4, 0,6 usw. cm³ Äthylfluid je Liter Benzin angefertigt. Für jeden Motor wurden außerdem zwei Versuchsreihen durchgeführt, und zwar:

1. Ansaugluft 20, 40, 60 und 80° und Kühlwasseraustrittstemperatur 60, 70, 80 und 90° veränderlich.
2. Ansaugluft 20, 40, 60 und 80° veränderlich, Kühlwasseraustrittstemperatur 90° konstant.

Auf diese Weise konnte sowohl der Einfluß der Kühlmitteltemperatur als auch der Ansaugluftemperatur festgestellt werden.

Wurde nun bei den beschriebenen Klopfprüfungen z. B. mit 40° Luft- und 70° Kühlwassertemperatur festgestellt, daß eine Mischung mit 20 Gew.-% Benzol zu stark klopfte, dann wurde die Mischung mit 24 Gew.-% Benzol versucht usw., bis die Mischung gefunden wurde, die in dem jeweiligen Motor gerade noch einwandfrei arbeitete. Hierbei wurde, wie schon gesagt, leichtes Klopfen über einem kleinen Drehzahlbereich zugelassen.

Entsprechend wurden die Versuche mit Zusatz von Äthylfluid durchgeführt.

Um die Witterungseinflüsse soweit wie möglich auszuschalten, wurden die Messungen für einen Motor mit Zusatz von Benzol und Äthylfluid zu einem Grundbenzin und für beide Versuchsreihen, veränderliche und konstante Kühlwasseraustrittstemperatur, jeweils an einem Tage durchgeführt. Sämtliche Versuche wurden außerdem von dem gleichen Personal gefahren, um eine möglichst gleichmäßige Beurteilung der Klopfstärke zu bekommen.

II. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse, die auf diese Weise z. B. in einem 2,5-l-Motor mit Benzin 1 gefunden wurden, sind in *Abb. 28* aufgetragen worden. Man erkennt, daß der Motor z. B. bei 20° Luft- und 60° Kühlwasseraustrittstemperatur für Benzolgemisch eine Research-Octanzahl von 75 benötigt, während bei Bleibenzin eine Octanzahl von 72,5 genügt. Je höher nun die Betriebstemperaturen wurden, je größer

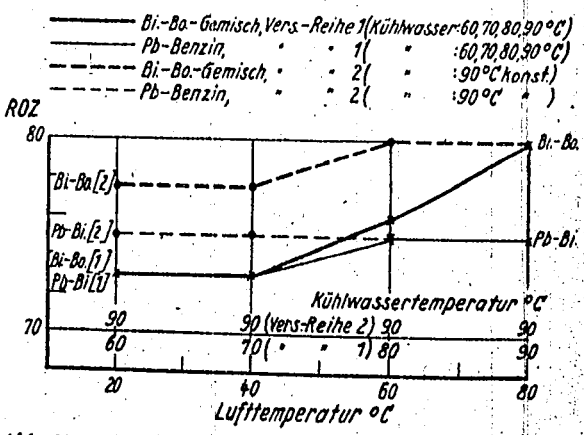


Abb. 29. Für klopffreien Betrieb mit Grundbenzin 1 bei einem 1,7-l-Motor (4) erforderliche Research-Octanzahl

wurde der Unterschied zwischen Benzolgemisch und Bleibenzin, so daß für 80° Luft- und 90° Kühlwasseraustrittstemperatur für Benzolgemisch eine Octanzahl von 87,5 und bei Bleibenzin von 79 benötigt wurde. Entsprechend liegen die Werte für die Versuchsreihe 2 mit konstanter Kühlwasseraustrittstemperatur von 90°

hbarkeit der Research- und

[redacted]

4, 0,6 usw. cm³ Ethylfluid
Für jeden Motor wurden
durchgeführt, und zwar:
80° und Kühlwasseraustritts-
peratur 60, 70, 80 und 90° veränderlich.
augluft 20, 40, 60 und 80° veränderlich, Kühl-
seraustrittstemperatur 90° konstant.

ese Weise konnte sowohl der Einfluß der Kühl-
emperatur als auch der Ansauglufttemperatur
tellt werden.

nun bei den beschriebenen Klopfprüfungen z. B.
° Luft- und 70° Kühlwassertemperatur festgestellt,
e Mischung mit 20 Gew.-% Benzol zu stark klopfte,
urde die Mischung mit 24 Gew.-% Benzol versucht
is die Mischung gefunden wurde, die in dem je-
nwandfrei arbeitete. Hierbei
chtes Klopfen über einem
ssen.
rsuche mit Zusatz von

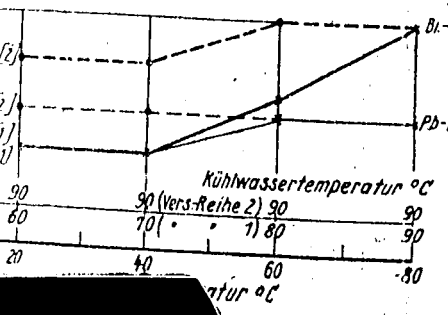
oweit wie möglich aus-
ngen für einen Motor mit
thylfluid zu einem Grundbenzin
beide Versuchsreihen, veränderliche und konstante
sseraustrittstemperatur, jeweils an einem Tage
führt. Sämtliche Versuche wurden außerdem von
eichen Personal gefahren, um eine möglichst
ißige Beurteilung der Klopfstärke zu bekommen.

II. Versuchsergebnisse

ebnisse, die auf diese Weise z. B. in einem 2,5-l-
it Benzin 1 gefunden wurden, sind in *Abb. 28*
gen worden. Man erkennt, daß der Motor z. B.
Luft- und 60° Kühlwasseraustrittstemperatur für
tanzahl von 75 benötigt,
tanzahl von 72,5 genügt.
aturen wurden, je größer

[redacted]

he 7 (Kühlwasser 60, 70, 80, 90 °C)
" 1 (" :60, 70, 80, 90 °C)
" 2 (" :90 °C konst.)
" 2 (" :90 °C ")



[redacted]

Grundbenzin 1 bei einem
esearch-Octanzahl

[redacted]

h Benzolgemisch und
- und 90° Kühlwasser-
gemisch eine Octanzahl
Bleibenzin von 79 benötigt wurde.
und liegen die Werte für die Versuchsreihe 2
unter Kühlwasseraustrittstemperatur von 90°.

Der etwas eckige, z. T. auch unregelmäßige Verlauf der Kurven ist auf die verhältnismäßig grobe Meßmethode durch Abhören wie auch auf die Abstufung der Kraftstoffmischungen von 4 zu 4% Motorenbenzol bzw. von 0,2 zu 0,2 cm³ Ethylfluid zurückzuführen.

Auch *Abb. 29* mit den Werten für einen 1,7-l-Motor zeigt ähnliche Ergebnisse. Die Unterschiede zwischen Benzolgemisch und Bleibenzin waren jedoch nicht ganz so groß. Bei niedriger Temperatur liegen beide Kurven zusammen.

Auch für alle übrigen Motoren wurden auf diese Weise ähnliche Ergebnisse gefunden. Die Unterschiede zwischen der notwendigen Octanzahl bei Benzolgemisch und Bleibenzin waren teils größer, teils geringer.

Eine Zusammenstellung dieser Werte für die Versuchsreihe 1 mit veränderlicher Luft- und Kühlwasseraustrittstemperatur zeigt *Abb. 30*. Die starken Kurven gelten jeweils für Benzolgemische und die dünnen für Bleibenzin, während die verschiedenen Nummern jeweils einen Motor bezeichnen.

Abb. 31 gibt die Ergebnisse für konstante Kühlwasseraustrittstemperatur von 90° wieder. Man sieht, daß für die gleiche Nummer, d. h. für einen bestimmten Motor im allgemeinen die dünne Kurve für Bleibenzin niedriger liegt.

Nach diesen Ergebnissen *(Abb. 30* und *31)* war es natürlich unmöglich, eine für alle Motoren gültige Mindestoctanzahl anzugeben, ohne in den Anforderungen zu hoch zu gehen.

Die einzelnen Motoren stellten schon ganz verschiedene Ansprüche, die bis zu 15 und mehr Octanzahleinheiten auseinanderlagen, und außerdem bestanden zwischen Benzolgemischen und Bleibenzin ebenfalls beträchtliche Unterschiede.

Auf Grund dieser Ergebnisse sollte nun festgestellt werden, ob der gleiche Motor bei Verwendung verschiedener

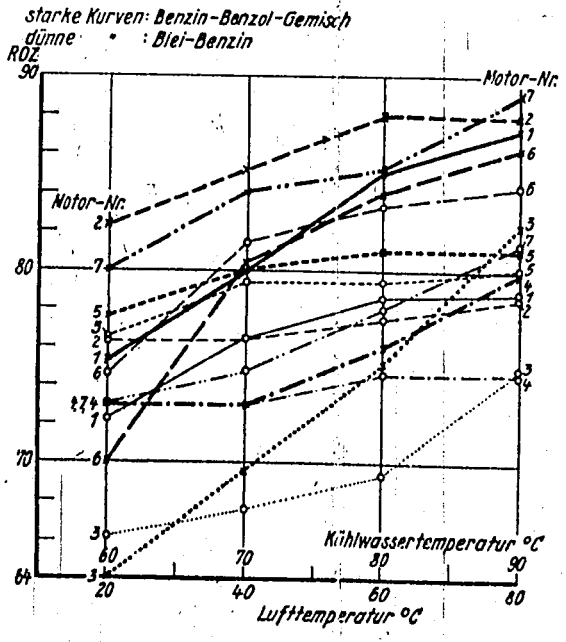


Abb. 30. Für klopffreien Betrieb mit Grundbenzin 1 bei verschiedenen Motoren erforderliche Research-Octanzahl. — Versuchsreihe 1: Kühlwassertemp. veränderlich 60°, 70°, 80°, 90°

Benzine ebenfalls noch andere Octanzahlansprüche stellen würde. Es wurden daher in einem 2,5- und einem 4,2-l-Motor noch weitere 6 Benzine mit Zusatz von Benzol und Ethylfluid in der gleichen Weise untersucht.
Die Ergebnisse für den 2,5-l-Motor mit 7 verschiedenen Benzinen sind in *Abb. 32* und *33* aufgetragen worden.

Abb. 32 zeigt die Kurven für veränderliche Kühlwasseraustrittstemperatur. Die Nummern an den Kurven bezeichnen hier die verschiedenen Benzine. Man sieht,

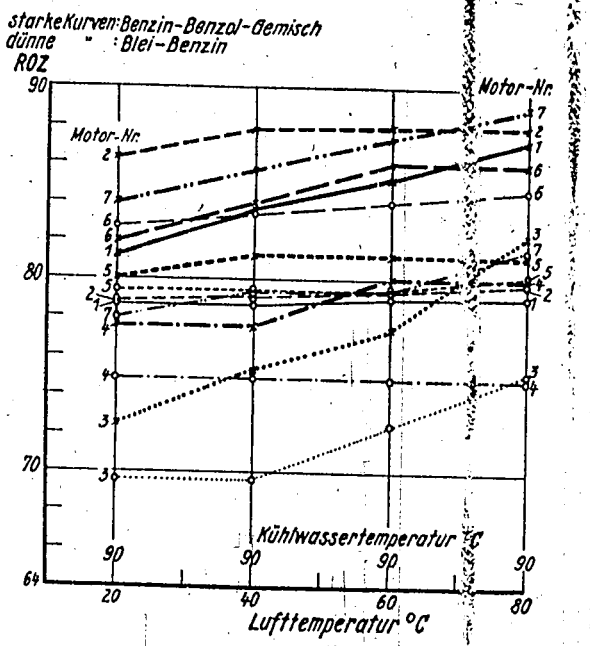


Abb. 31. Für klopffreien Betrieb mit Grundbenzin 1 bei verschiedenen Motoren erforderliche Research-Octanzahl. — Versuchsreihe 2: Kühlwassertemp. 90°

daß für den gleichen Motor bei Verwendung verschiedener Grundbenzine Unterschiede von 10 und mehr Octaneinheiten festgestellt wurden. Auch hier zeigt sich wieder,

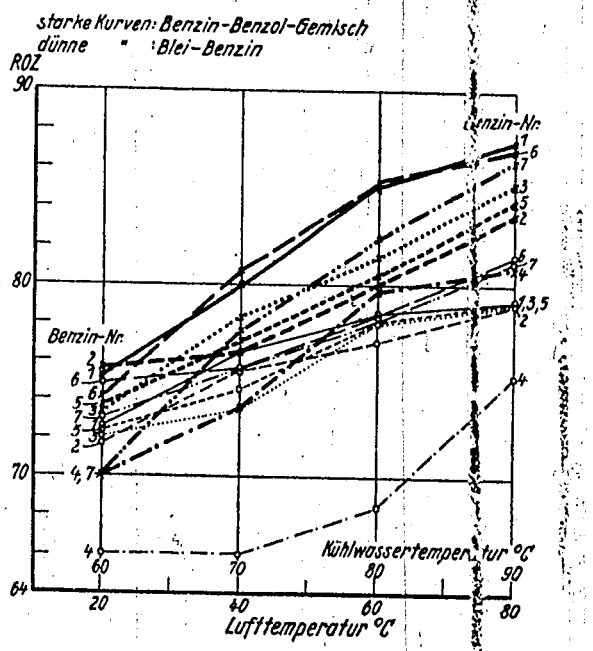


Abb. 32. Für klopffreien Betrieb mit Motor Nr. 1 (2,5 l) bei verschiedenen Grundbenzinen erforderliche Research-Octanzahl. — Versuchsreihe 1: Kühlwassertemp. 60°, 70°, 80°, 90°

daß die Benzolgemische allgemein eine höhere Research-Octanzahl aufweisen müssen als Bleibenzine. Wenn auch jedes Benzin an einem anderen Tag gefahren werden mußte, so können die Witterungseinflüsse doch nicht so groß sein, daß dadurch die Unterschiede zu erklären wären.

Die gleichen Ergebnisse zeigt *Abb. 33* für die Versuchsreihe 2 mit konstanter Kühlwasseraustrittstemperatur, wobei die Kurven allgemein flacher verlaufen. Hieraus geht hervor, daß die Kühlwassertemperatur einen stärkeren Einfluß auf das Klopfen des Motors ausübt als die Erhöhung der Lufttemperatur, denn mit Erhöhung der Lufttemperatur sinkt gleichzeitig die angesaugte Luftmenge.

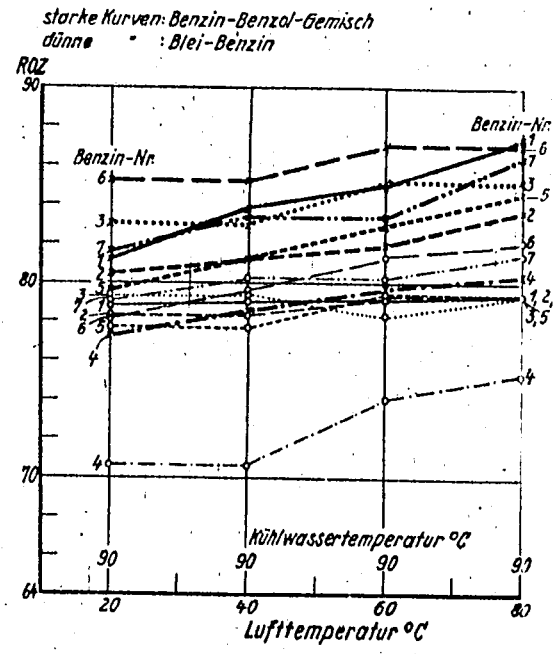


Abb. 33. Für klopffreien Betrieb mit Motor Nr. 1 (2,5 l) bei verschiedenen Grundbenzinen erforderliche Research-Octanzahl. — Versuchreihe 2: Kühlwassertemp. 90°

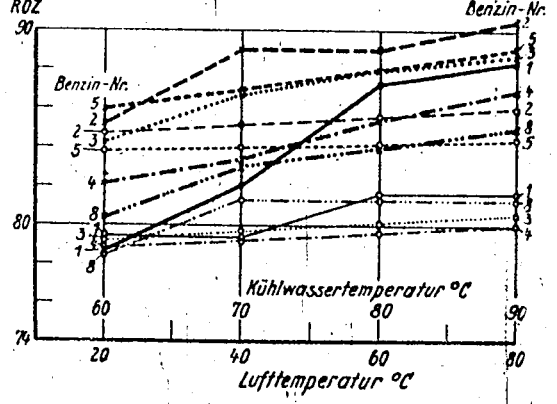


Abb. 34. Für klopffreien Betrieb mit Motor Nr. 8 (4,2 l) bei verschiedenen Grundbenzinen erforderliche Research-Octanzahl. — Versuchreihe 1: Kühlwassertemp. 60°, 70°, 80°, 90°

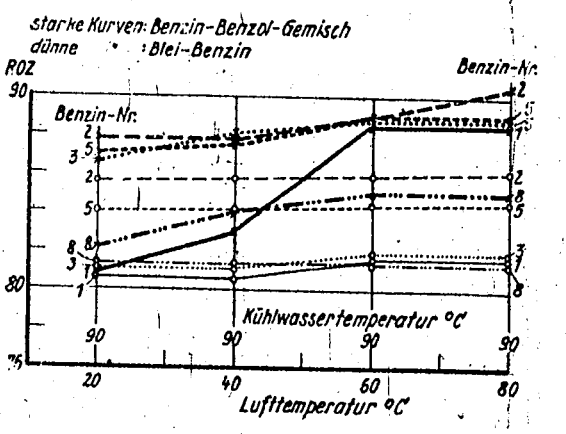


Abb. 35. Für klopffreien Betrieb mit Motor Nr. 8 (4,2 l) bei verschiedenen Grundbenzinen erforderliche Research-Octanzahl. — Versuchreihe 2: Kühlwassertemp. 90°

Abb. 34 zeigt die Kurven für einen 4,2-l-Motor mit veränderlicher Kühlwassertemperatur für 6 verschiedene Benzine. Die Ergebnisse sind grundsätzlich wieder dieselben.

Abb. 35 gilt für den gleichen Motor und die gleichen Benzine bei konstanter Kühlwassertemperatur von 90°.

Nach diesen Ergebnissen war es, wie schon gesagt, unmöglich, eine bestimmte notwendige Octanzahl für alle Motoren anzugeben. Es wurde daher nun versucht, ob die Motor-Methode eine bessere Übereinstimmung der Klopfansprüche lieferte. Sämtliche Mischungen, die für einen Motor bei bestimmten Betriebsbedingungen gerade noch einwandfrei arbeiteten, wurden nach der Motor-Methode geklopft. Die gefundenen Werte wurden wieder in der gleichen Weise aufgetragen.

Abb. 36 zeigt die Ergebnisse für den 2,5-l-Motor für beide Versuchsreihen mit veränderlicher und konstanter Kühl-

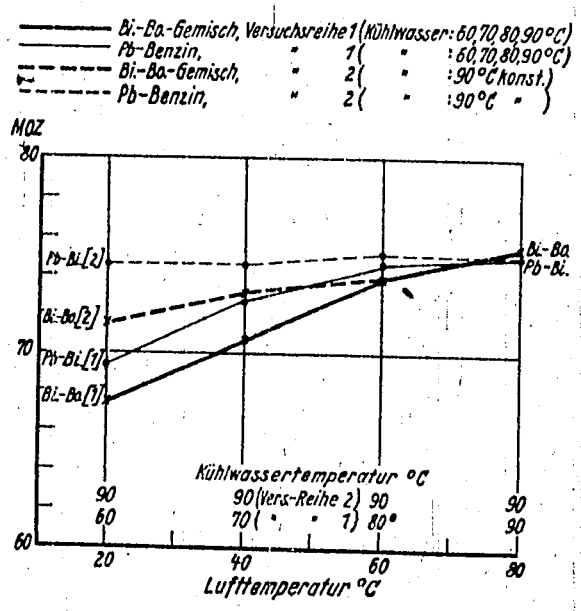


Abb. 36. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 28

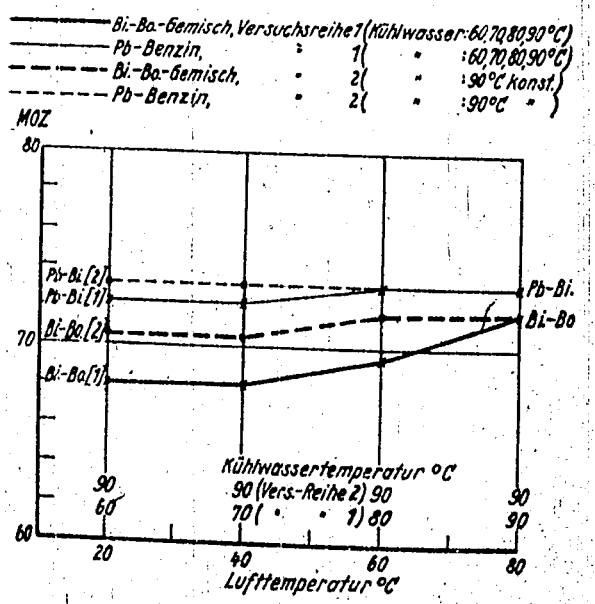


Abb. 37. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 29

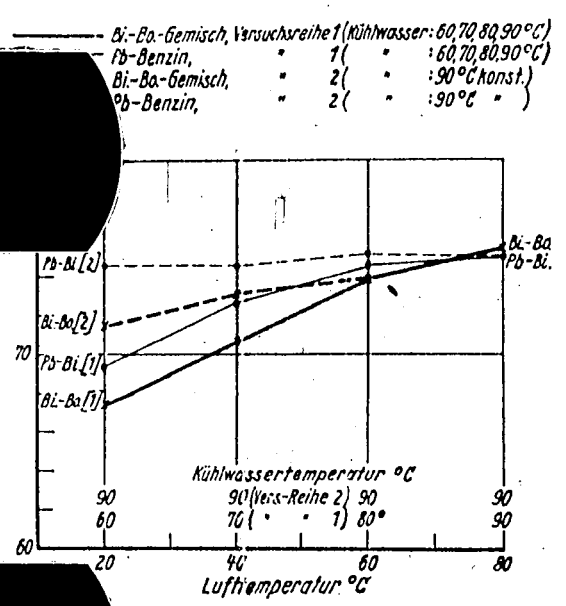
geht hervor, daß die Kühlwassertemperatur einen stärkeren Einfluß auf das Klopfen des Motors ausübt als die Erhöhung der Lufttemperatur, denn mit Erhöhung der Lufttemperatur sinkt gleichzeitig die angesaugte Luftmenge.

Abb. 34 zeigt die Kurven für einen 4,2-l-Motor mit ver- r Kühlwassertemperatur für 6 verschiedene Die Ergebnisse sind grundsätzlich wieder

für den gleichen Motor und die gleichen konstanter Kühlwassertemperatur von 90°.

n Ergebnissen war es, wie schon gesagt, un- eine bestimmte notwendige Octanzahl für alle Motoren anzugeben. Es wurde daher nun versucht, ob die Motor-Methode eine bessere Übereinstimmung der Klopfansprüche lieferte. Sämtliche Mischungen, die für einen Motor bei bestimmten Betriebsbedingungen gerade noch einwandfrei arbeiteten, wurden nach der Motor-Methode geklopft. Die gefundenen Werte wurden wieder in der gleichen Weise aufgetragen.

Abb. 36 zeigt die Ergebnisse für den 2,5-l-Motor für beide Versuchsreihen mit veränderlicher und konstanter Kühl-



Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 28

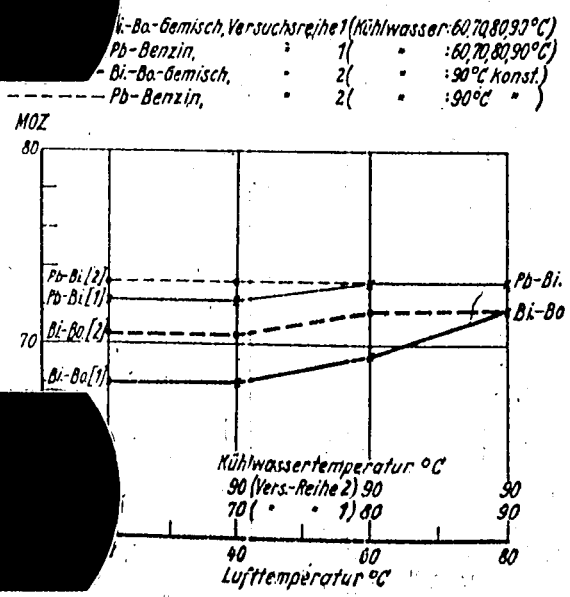


Abb. 37. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 29

wassertemperatur. Die ausgezogenen und gestrichelten Kurven gehören jeweils zusammen. Zunächst sieht man, daß die Kurven wesentlich näher beieinanderliegen. Andererseits ist zu bemerken, daß jetzt die Kurven für Benzolgemisch etwas niedriger liegen, und zwar in diesem Fall bis zu etwa 2 Octanzahleinheiten. Das heißt, bei der Research-Methode fand für Benzolgemische eine Überbewertung, bei der Motor-Methode eine geringere Unterbewertung statt. Bei höheren Betriebstemperaturen fallen die Kurven praktisch zusammen, was sich auch bei den anderen Motoren fast immer bestätigte.

Abb. 37 zeigt die Ergebnisse für den 1,7-l-Motor nach der Motor-Methode. Auch hier sind die Unterschiede zwischen Benzolgemisch und Bleibenzin geringer als bei Bewertung nach der Research-Methode.

Abb. 38 zeigt nun wieder die Zusammenstellung für die Motoren bei Betrieb mit Benzin 1 und Bewertung nach der Motor-Methode und veränderlicher Kühlwassertemperatur. Man sieht, daß die Kurven für die einzelnen Motore im allgemeinen wesentlich näher beieinanderliegen. Das Kurvenband, das von den verschiedenen Motoren gebildet wird, ist jedoch noch ziemlich breit. Bei der Research-Methode betrug die Breite 15 bis 17, bei der Motor-Methode 16 bis 8 Octanzahleinheiten.

Abb. 39 gibt die Werte für verschiedene Motoren bei konstanter Kühlwassertemperatur mit Benzin 1. Das Gesamtbild der Ergebnisse ist das gleiche wie das der *Abb. 38*.

Abb. 40 gilt für den 2,5-l-Motor mit 7 verschiedenen Benzinen bei Bewertung nach der Motor-Methode. Hier ist das Kurvenband nur etwa 7 Octanzahleinheiten breit, während es bei der Research-Methode zwischen 10 und 12 Octanzahleinheiten lag.

Abb. 41 zeigt die Ergebnisse für den gleichen Motor und die gleichen Benzine bei konstanter Kühlwassertemperatur von 90°. Die Kurven für jedes einzelne Grundbenzin liegen auch hier sehr nahe zusammen, wie das durch die Kurven gleicher Nummern gekennzeichnet ist.

Abb. 42 gilt mit 6 verschiedenen Benzinen für den 4,2-l-Motor bei veränderlicher Kühlwassertemperatur.

Abb. 43 zeigt die Werte für den gleichen Motor und die gleichen Benzine bei konstanter Kühlwassertemperatur.

Bei allen Kurven, die nach der Motor-Methode ausgewertet wurden, konnte also eine wesentlich bessere Übereinstimmung sowohl zwischen Benzolgemisch und Bleibenzin als auch zwischen den verschiedenen Benzinen und Motoren erreicht werden.

Um die gefundenen Werte zahlenmäßig übersehen zu können, wurden sämtliche Ergebnisse für die Research- und Motor-Methode in *Zahlentafel 26* und *27* zusammengestellt.

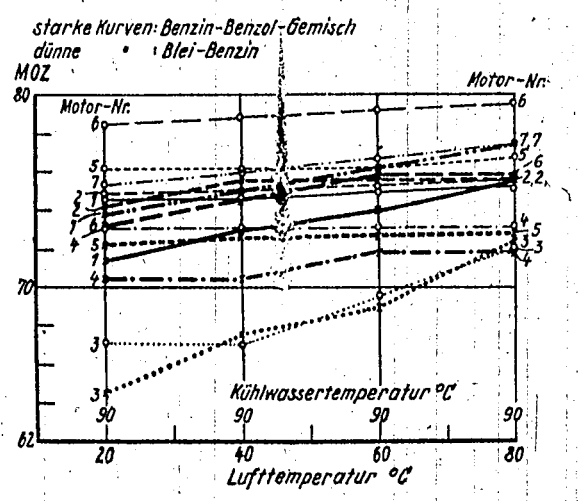


Abb. 39. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 31

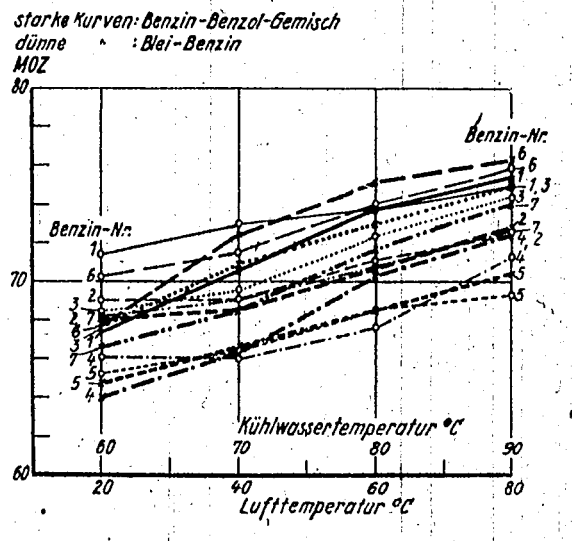


Abb. 40. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 32

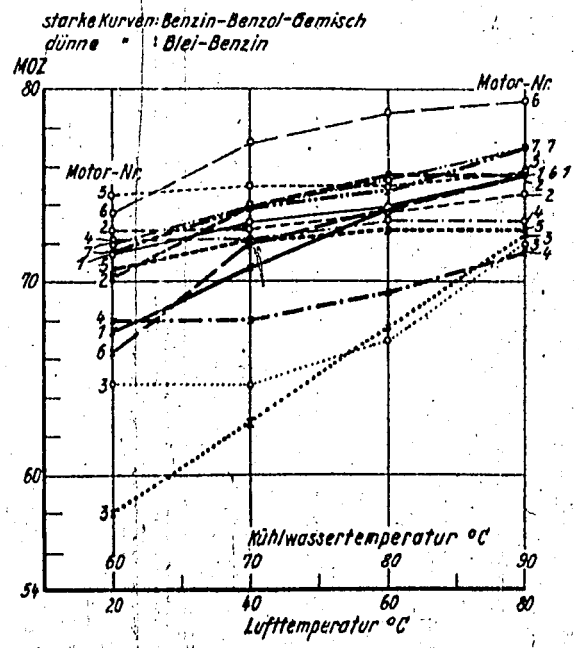


Abb. 38. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 30

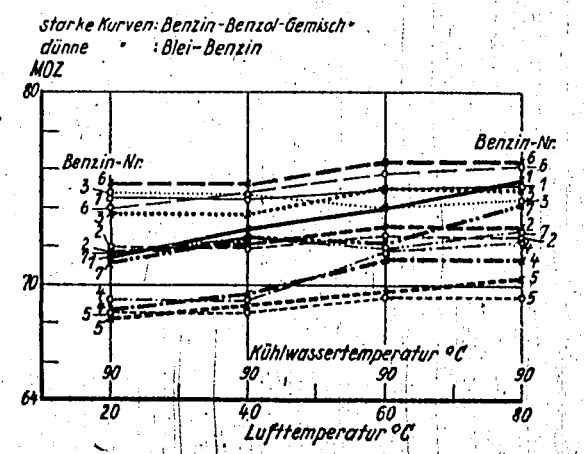


Abb. 41. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 33

Zahlentafel 26 gibt die Zahlwerte für die Research-Methode wieder. + bedeutet notwendige Mehr-Octaneinheiten von Benzolgemisch gegenüber Bleibenzin, — gleich notwendige Minder-Octaneinheiten.
Man sieht, daß fast nur +-Werte bei der Research-Methode zu finden sind. Die Mittelwerte zeigen mit zunehmenden Betriebstemperaturen größere Plus-Werte. D. h., je höher die Betriebstemperaturen des Motors sind, desto größer ist die Überbewertung von Benzolgemisch gegenüber Bleibenzin bei der Research-Methode.

Zahlentafel 26. Abweichungen der benötigten Octanzahl zwischen Blei-Benzin und Benzol-Gemischen bei verschiedenen Motoren und Benzinen bei Bewertung der Kraftstoffe nach der Research-Methode

+ = notwendige Mehr-, — = notwendige Minder-Octaneinheiten von Bo-Gem. gegenüber Pb-Benzin

Motor Nr.	Benzin Nr.	Temperatur der Luft und des austretenden Kühlwassers 20° 60°	20° 90°	40° 70°	40° 90°	60° 80°	60° 90°	80° 90°
2	1	+6,0	+7,0	+8,7	+8,8	+10,2	+8,5	+8,5
3	1	—2,0	+2,0	+2,0	+5,5	+ 5,7	+5,0	+8,6
4	1	±0,0	+2,7	±0,0	+2,7	+ 1,2	+5,0	+5,0
5	1	+1,2	+0,6	+0,7	+1,7	+ 1,7	+1,7	+0,8
6	1	—1,8	—1,0	—1,0	+0,6	+ 0,8	+2,0	+1,6
7	1	+7,0	+6,0	+9,2	+6,2	+ 7,0	+8,0	+7,6
9	8	+5,8	—	+4,2	—	+ 2,5	—	+1,0
10	8	—7,5	+4,7	+1,8	+1,8	+ 4,0	+5,5	+2,0
8	1	—0,7	+0,3	+2,6	+2,4	+ 5,8	+6,9	+6,9
8	2	+0,4	+2,2	+3,8	+2,1	+ 3,4	+3,0	+4,6
8	3	+4,9	+5,5	+7,2	+6,9	+ 8,0	+6,9	+6,9
8	4	+3,4	+4,5	+4,3	+5,0	+ 6,0	+5,5	+6,0
8	5	+2,0	+3,0	+3,0	+3,3	+ 3,8	+4,6	+4,5
8	8	+1,8	+0,8	+1,8	+2,8	+ 2,7	+3,7	+3,7
1	1	+2,7	+2,5	+3,6	+5,0	+ 6,5	+6,0	+8,5
1	2	+3,8	+3,4	+1,0	+3,1	+ 2,8	+2,8	+4,7
1	3	+1,4	+3,7	+4,8	+3,7	+ 3,8	+6,9	+6,0
1	4	+4,0	+6,6	+7,5	+8,0	+11,5	+5,8	+5,1
1	5	+0,5	+1,8	+2,3	+3,4	+ 2,7	+3,6	+5,2
1	6	—0,6	+7,0	+5,0	+5,6	+ 7,0	+5,8	+5,0
1	7	—3,0	+2,5	+1,8	+3,1	+ 4,5	+3,1	+5,0
Mittelwerte:		+1,25	+3,30	+3,54	+4,08	+4,83	+5,00	+5,11

Bei *Zahlentafel 27*, welche die Werte für die Motor-Methode wiedergibt, liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt. Wir finden fast nur Minus-Werte, d. h. eine Unterbewertung der Benzolgemische. Die gefundenen Mittelwerte liegen hier zwischen 2,56 und 0,37 Octanzahl-

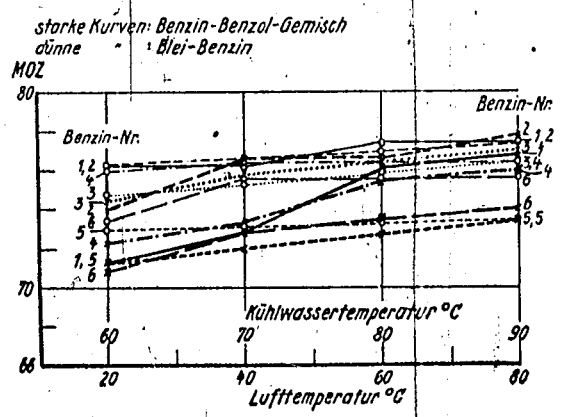


Abb. 42. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 34

einheiten, im Vergleich zu 1,25 bis 5,11 bei der Research-Methode.

III. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorliegenden Versuche zeigen, daß die Bewertung der Klopffestigkeit unserer Kraftstoffe im Klopfmotor noch sehr stark vom praktischen Betrieb abweicht. Das Abbremsen des Motors in der kurzen Zeit von 2 min ändert an der unterschiedlichen Bewertung der Benzolgemische und der Bleibenzine nichts, sondern verschiebt nur die Höhenlage der einzelnen Kurven.

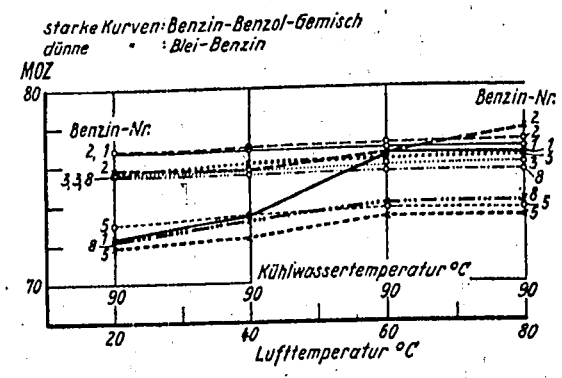


Abb. 43. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 35

Auch die gewählten Betriebsbedingungen von 60° Luft- und 80° Kühlwassertemperatur sind z. B. Werte, wie sie in der Praxis während der warmen Jahreszeit und besonders bei stark beanspruchten Motoren nicht selten sind, während so niedrige Temperaturen von 20° Luft- und 60° Wassertemperatur nur bei kälterem Wetter auftreten, wo sowieso seltener Klopfen der Motore beobachtet wird. Aber gerade bei den hohen Bedingungen scheint die Motor-Methode die besseren Werte zu liefern, denn die Unterbewertung der Benzolgemische liegt hier im

Zahlentafel 27. Abweichungen der notwendigen Octanzahl zwischen Blei-Benzin und Benzol-Gemischen bei verschiedenen Motoren und Benzinen bei Bewertung der Kraftstoffe nach der Motor-Methode

+ = notwendige Mehr-, — = notwendige Minder-Octaneinheiten von Bo-Gem. gegenüber Pb-Benzin

Motor Nr.	Benzin Nr.	Temperatur der Luft und des austretenden Kühlwassers 20° 60°	20° 90°	40° 70°	40° 90°	60° 80°	60° 90°	80° 90°
2	1	—0,5	—0,2	+1,2	+0,7	+1,8	+0,4	+0,8
3	1	—6,0	—2,3	—1,0	+0,6	+0,8	—0,5	+0,6
4	1	—4,2	—2,7	—4,2	—2,7	—3,8	—1,4	—1,4
5	1	—4,0	—4,0	—4,0	—3,4	—3,4	—3,4	—4,0
6	1	—7,0	—5,4	—5,2	—4,6	—4,8	—3,6	—3,9
7	1	—0,5	—1,4	+0,4	—1,0	—1,0	—0,6	—0,3
9	8	+3,2	—	+2,4	—	+1,2	—	+0,3
10	8	—7,4	—1,0	—1,9	—3,0	—1,4	±0,0	—2,2
8	1	—5,2	—4,5	—3,4	—3,2	—1,3	—0,4	—0,7
8	2	—2,2	—1,0	±0,0	—1,0	—0,4	—0,6	+0,4
8	3	—0,2	±0,0	—0,5	+0,2	+0,6	+0,3	+0,6
8	4	—3,7	—	—3,0	—	—0,8	—	—0,3
8	5	—1,6	—1,1	—1,0	—1,2	—0,5	—0,5	±0,0
8	8	—2,4	—3,4	—2,8	—2,2	—2,2	—1,6	—1,6
1	1	—4,0	—3,0	—2,4	—1,5	±0,0	—1,3	+0,5
1	2	—0,8	—0,3	—0,4	+0,2	—0,3	+0,6	+0,6
1	3	—0,8	—0,9	+1,4	—0,9	+0,7	+1,0	+0,5
1	4	—2,0	—0,5	+0,2	+0,3	+2,7	—0,3	—1,1
1	5	—0,4	—0,3	+0,3	+0,5	±0,0	+0,3	+1,0
1	6	—2,5	+1,3	+0,9	+0,3	+1,2	+0,6	+0,3
1	7	—1,5	—0,4	—0,5	±0,0	+0,9	+0,2	+1,7
Mittelwerte:		—2,56	—1,55	—1,07	—1,10	—0,48	—0,54	—0,37

Mittel bei nur etwa 0,5 Octaneinheiten, während die Überbewertung nach der Research-Methode hierfür etwa 5 Octaneinheiten beträgt.

Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit den Erfahrungen, die man in den Vereinigten Staaten von Nordamerika gemacht hat.

abweicht. Das Abbremsen des Motors in der kurzen Zeit von 2 min ändert an der unterschiedlichen Bewertung der Benzolgemische und der Bleibenzine nichts, sondern verschiebt nur die Höhenlage der einzelnen Kurven.

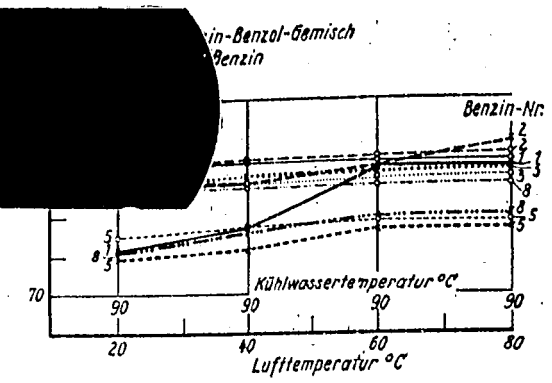


Abb. 43. Erforderliche Motor-Octanzahl entspr. Abb. 35

Auch die gewählten Betriebsbedingungen von 60° Luft- und 80° Kühlwassertemperatur sind z. B. Werte, wie sie [redacted]end der warmen Jahreszeit und be[redacted]anspruchten Motoren nicht selten [redacted]irige Temperaturen von 20° Luft[redacted]atur nur bei kälterem Wetter auf[redacted]mer Klopfen der Motore beobachtet [redacted]ei den hohen Bedingungen scheint [redacted]ie besseren Werte zu liefern, denn [redacted]g der Benzolgemische liegt hier im

Zahlentafel 27. Abweichungen der notwendigen Octanzahl zwischen Blei-Benzin und Benzol-Gemischen bei verschiedenen Motoren und Benzinen bei Bewertung der Kraftstoffe nach der Motor-Methode

+ = notwendige Mehr-, — = notwendige Minder-Octaneinheiten von Bo-Gem. gegenüber Pb-Benzin

Motor Nr.	Benzin Nr.	Temperatur der Luft und des austretenden Kühlwassers 20° 60°	20° 90°	40° 70°	40° 90°	60° 80°	60° 90°	80° 90°
[redacted]			[redacted]2	+1,2	+0,7	+1,8	+0,4	+0,8
			[redacted]3	—1,0	+0,6	+0,8	—0,5	+0,6
				—4,2	—2,7	—3,8	—1,4	—1,4
				—4,0	—3,4	—3,4	—3,4	—4,0
				—5,2	—4,6	—4,8	—3,6	—3,9
			[redacted]4	+0,4	—1,0	—1,0	—0,6	—0,3
			[redacted]–	+2,4	—	+1,2	—	+0,3
			-1,0	—1,9	—3,0	—1,4	±0,0	—2,2
8	1	—5,2	—4,5	—3,4	—3,2	—1,3	—0,4	—0,7
8	2	—2,2	—1,0	±0,0	—1,0	—0,4	—0,6	+0,4
8	3	—0,2	±0,0	—0,5	+0,2	+0,6	+0,3	+0,6
8	4	—3,7	—	—3,0	—	—0,8	—	—0,3
8	5	—1,6	—1,1	—1,0	—1,2	—0,5	—0,5	±0,0
8	8	—2,4	—3,4	—2,8	—2,2	—2,2	—1,6	—1,6
1	1	—4,0	—3,0	—2,4	—1,5	±0,0	—1,3	+0,5
1	2	—0,8	—0,3	—0,4	+0,2	—0,3	+0,6	+0,6
1	3	—0,8	—0,9	+1,4	—0,9	+0,7	+1,0	+0,5
1	4	—2,0	—0,5	+0,2	+0,3	+2,7	—0,3	—1,1
1	5	—0,4	—0,3	+0,3	+0,5	±0,0	+0,3	+1,0
1	6	—2,5	+1,3	+0,9	+0,3	+1,2	+0,6	+0,2
1	7	—1,5	—0,4	—0,5	±0,0	+0,9	+0,2	+1,7
[redacted]			[redacted]55	—1,07	—1,10	—0,48	—0,54	—0,37

[redacted] 0,5 Octaneinheiten, während die [redacted]er Research-Methode hierfür etwa [redacted]agt.

[redacted]ht in Übereinstimmung mit den [redacted]rfahrungen, die man in den Vereinigten Staaten von Nordamerika gemacht hat.

Dipl.-Ing. H. Waldmann

Motor- oder Research-Methode für Erdkraftstoffe?

Daß im Prüfmotor infolge seiner besonderen Bauart niemals die Betriebsbedingungen der Praxis, unter denen der Gebrauchsmotor arbeiten muß, getreu wiederholt werden können, ist allerseits anerkannt. Nach dem heutigen Stand der Prüfverfahren muß man sich unter diesen Umständen damit begnügen, zwischen den im Prüfmotor erhaltenen Klopfwerten und dem Durchschnittsverhalten der Kraftstoffe im praktischen Fahrbetrieb unter Inkaufnahme erheblicher Streuwerte eine annähernde Übereinstimmung zu erzielen. Daß auch im Ausland, und gerade in den USA, dem Mutterland der international eingeführten Klopfmethoden, diese Grenzen der bisherigen Entwicklung klar erkannt werden, zeigt eine Reihe von Veröffentlichungen der letzten Jahre. Sie sind charakteristisch für das Bemühen, falsche Messungen des Prüfmotors durch Bildung von Mittelwerten aus verschiedenen Prüfmethoden, durch Einsatz von regional und klimatisch bedingten Konstanten oder durch Einführung von Berichtigungswerten oder durch Zusatz-Octanziffern im Interesse einer gerechten Kraftstoffbewertung auszugleichen.

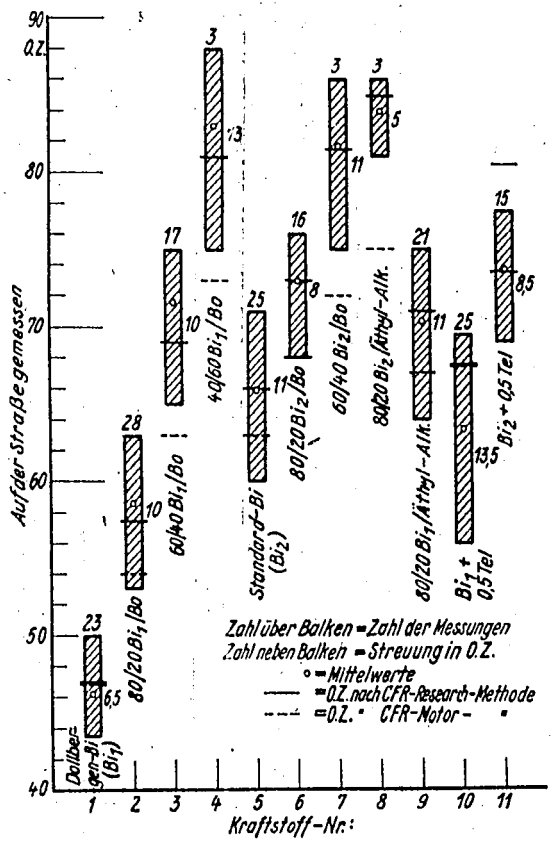


Abb. 44. Straßenklopfwerte 1935

Anders als in den USA oder anderen Ländern bedeutenderen Kraftstoffverbrauches ist ein sehr großer Teil der deutschen Kraftstoffe benzol- oder aromatenhaltig. Diese erleiden unter den Bedingungen der Motor-Methode (150° Temperatur des angesaugten Kraftstoff-Luftgemisches) einen scharfen Abfall ihrer Bewertung in Octanzahlen im Gegensatz zu der Bewertung aromatenfreier oder gebleiter Benzine.

Die A.-G. der Kohlenwertstoff-Verbände — Benzol-Verband — hat in den letzten Jahren verschiedene umfangreiche Versuchsreihen zur Überprüfung des Klopfverhaltens von Benzol-Gemischen in normalen Kraftfahrzeugen der Wirtschaft durchgeführt.

1935 wurden 38 Fahrzeuge mit je elf verschiedenen Kraftstoffen auf ihr Straßenklopfverhalten hin untersucht. Die Octanzahlen der Kraftstoffe im Fahrzeug auf der Straße wurden in Anlehnung an die Union-Town-Methode so bestimmt, daß bei vollkommen durchwärmter Maschine unter Gleichhaltung der normalen Betriebs-Temperaturen von Kühlwasser, Öl und Ansaugluft, ferner bei normaler bzw. der größten Klopfstärke entsprechender Düse sowie normaler Zündeinstellung der Wagen mit Vollgas beschleunigt und die Klopfneigung des Versuchs- mit der Klopfneigung des Bezugs-Kraftstoffes bei den verschiedenen, während der Beschleunigung durchfahrenen Geschwindigkeiten gehörmäßig verglichen wurde. So ergeben sich dann Klopfstärkegrade, von denen jedoch nur die größten Werte, unabhängig von der Geschwindigkeit, bei der sie auftraten, für den Vergleich von Versuchs- und Bezugs-Kraftstoffen herangezogen wurden. Die Octanzahl des Fahrzeugmotors war dann der Isooctangehalt derjenigen n-Heptan-Isooctan-Mischung, welche der gleichen Kurvenhöchstwert wie der Versuchskraftstoff aufwies.

Das in jedem Balken *(Abb. 44)* befindliche Zeichen ○ bedeutet — als Mittelwert gebildet — die Heptan-Octan-Mischung (Ordinate), die sich im Fahrzeug klopfgleich verhält wie der dem jeweiligen Balken zugeordnete Kraftstoff. In jedem Balken sind dann noch die Octanzahlen nach der Research- und der Motor-Methode eingetragen, die der betreffende Kraftstoff im CFR-Prüfmotor zeigt. Man sieht, daß die Octanzahlen nach der Motor-Methode bei den Alkohol- und besonders bei den Benzol-Gemischen vielfach noch unter dem niedrigsten gemessenen Wagenwert und bis zu 10 Octanzahlen unter dem Wagenmittelwert liegen. Die Octanzahlen nach der Research-Methode liegen durchweg günstiger, und zwar bis auf das eine Bleibenzin sämtlich innerhalb des Streubereiches, meist in unmittelbarer Nähe des Mittelwertes.

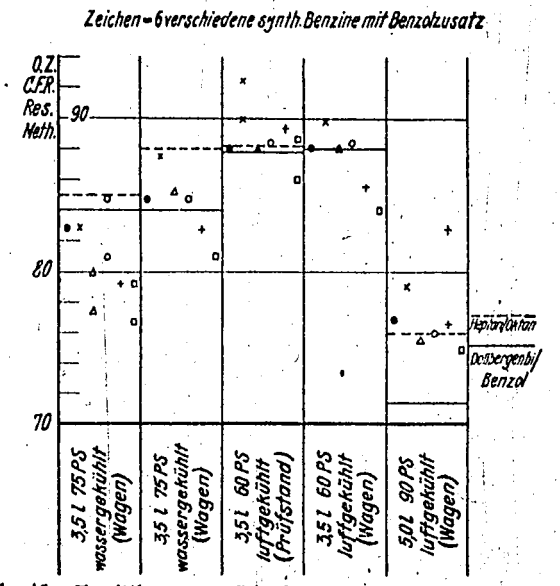


Abb. 45. Ermittlung von Klopfgrenzmischungen heimischer Kraftstoffe

1937 wurden einige Fahrzeugtypen zwischen 3,5 und 5 Liter Hubvolumen, wasser- und luftgekühlt, mit 6 verschiedenen Benzinen deutscher Erzeugung, denen jeweils Benzol, Monopol-Sprit oder Blei zugegeben wurde, auf dem Prüfstand sowie auf der Straße auf ihr Klopfverhalten

untersucht *(Abb. 45)*. Die Ansaugluft temperatur betrug bei den Versuchen 45° bis 55°, die Kühlmitteltemperatur 90°, die Öltemperatur 90° bis 95°. Auch bei diesen Fahrzeugen wurde die Klopfgrenze des betreffenden Fahrzeuges unmittelbar mit Heptan und Octan gemessen. Darüber hinaus wurde aber auch die Klopfgrenze mit Dollbergen-Benzin/Reinbenzol, also mit den im Klopfprüfmotor seinerzeit verwendeten Substandards, festgestellt. Auch diese beiden Klopfgrenzpunkte sind auf *Abb. 45* vermerkt. Dabei entspricht die für die Substandards abzulesende Octanzahl der Research-Octanzahl die im Klopfprüfmotor gemessen wurde, also der Eichkurve. Wenn sich die Substandards im jeweiligen Fahrzeugmotor gegenüber Heptan/Octan genau so verhalten würden wie im Prüfmotor, so müßten bei jedem Fahrzeug die waagerechten Linien für Heptan-Octan und Dollbergen-Benzin/Reinbenzol aufeinanderliegen. Es treten aber Abweichungen bis zu 4 Octanzahlen auf, und zwar im Sinne eines besseren Verhaltens des aromatenreichen Substandardgemisches im Fahrzeugmotor als im CFR-Prüfmotor.

Abb. 45, welche die Ergebnisse für die Gemische mit Benzol enthält, zeigt, daß ebenfalls die Research-Werte der in den verwendeten Motoren ermittelten Klopfgrenzmischungen eine befriedigende Übereinstimmung mit ihrem tatsächlichen Verhalten im Motor haben, wenn man die unvermeidlichen Streuungen bei derartigen Versuchen in Rechnung setzt. Die Werte nach der CFR-Motor-Methode sind nicht bestimmt, aber es ist bei der bekannten Octanzahl-Absenkung, die für Benzolgemische nach der Motor-Methode eintritt, ohne weiteres abzulesen, daß diese Octanwerte nach der Motor-Methode unterhalb der mit Heptan-Octan oder der mit den Substandards festgestellten Klopfgrenze des betreffenden Fahrzeuges liegen würden, daß diese Motor-Octanwerte also eine Unterbewertung darstellen würden.

Während die bisher geschilderten Ergebnisse der Arbeiten des Benzol-Verbandes sich bis auf eine Ausnahme auf Landstraßenversuche bezogen, wurden etwa gleichzeitig

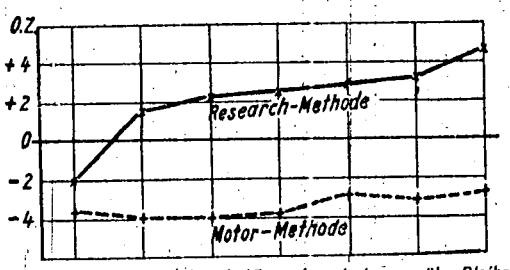


Abb. 46. Prüfstandswerte 1942. Herunterbremsen von 3000 auf ca. 1000 U/min in 2 min.

mit den Versuchen, die Dipl.-Ing. *Unverhau* an anderer Stelle dieses Berichts schildert, Prüfstandsversuche mit variiertem Wärmezustand der untersuchten Motoren durchgeführt. Nach der Untersuchungsmethode, die bereits Dipl.-Ing. *Unverhau* ausführlich darstellt, ergab sich als Mittel aller untersuchten Kraftstoffe und Motoren *Abb. 46*. Es sind hier über den jeweiligen Temperaturbedingungen von Kühlwasser und Ansaugluft die bei Anwendung der Research-Methode erforderlichen Mehr-Octanzahlen von Benzolgemisch gegenüber Bleibenzin und die bei Anwendung der Motor-Methode erforderlichen Minder-Octanzahlen von Benzolgemisch gegenüber Bleibenzin aufgetragen. Der Kurvenzug über der waagerechten Null-Linie bedeutet also eine Überbewertung des Benzol-Gemisches gegenüber Bleibenzin nach der Research Methode, der Kurvenzug unter der Null-Linie zeigt die Unterbewertung nach der Motor Methode.

Um nachzuprüfen, in welcher Weise durch Abänderung der Prüfstandsbedingungen andere Werte entstehen,

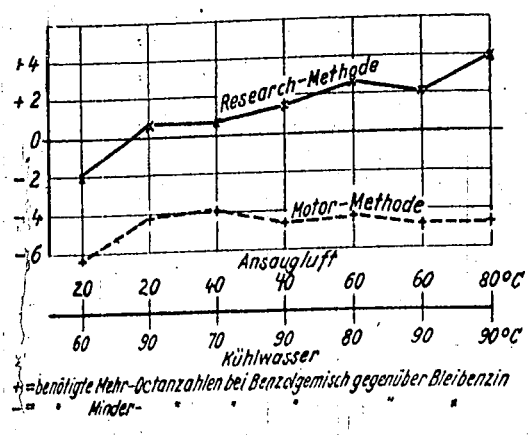


Abb. 47. Prüfstandswerte 1942. Drehzahl im Klopfgebiet konstant

wurde neben der Methode des Herunterbremsens noch so gefahren, daß der jeweilige Motor bei seiner klopffreudigsten Drehzahl konstant mit Vollast gefahren und dabei auf die gewünschten Temperatur-Bedingungen eingestellt wurde. Das Ergebnis, in gleichem Sinne wie *Abb. 46* aufgetragen, zeigt *Abb. 47*.

Inwieweit die geschilderten Versuchsbedingungen und Versuchsergebnisse, die auf dem Prüfstande erhalten wurden, auf die Fahrpraxis übertragbar sind und damit Abweichungen gegenüber den früheren Straßenklopfwerten zu erklären sind, wurde nicht festgestellt, wie dies auch bei den von Dipl.-Ing. *Unverhau* berichteten Versuchen nicht erfolgte.

Die Frage Motor- oder Research-Methode — wenn man überhaupt bei einer Einpunkt-Methode bleibt — ist gleichbedeutend mit der Frage nach der Wärmebelastung der Motoren, die bei Kriegsfahrzeugen wesentlich höhere Werte als bei Fahrzeugen der Wirtschaft annehmen kann. Für die weitere Zukunft wäre eine Klopfmessung anzustreben, die den mittleren klimatischen Verhältnissen und später den vermutlich einheitlich ausgerichteten Motorenkonstruktionen in dem neuen europäischen Raum entspricht. Die hierzu erforderlichen Arbeiten können aber erst nach dem Kriege begonnen werden. Erst dann kommt die Zeit, wo wesentliche Änderungen in der Bauart der Motoren und eine Stabilität in der Kraftstoffverteilung eintreten und damit die Frage, ob die Methodik der Bewertung der Kraftstoff-Klopffestigkeit beibehalten oder geändert werden muß, neu aufgeworfen und behandelt werden kann. Es sind Anzeichen dafür vorhanden, daß in der Zwischenzeit motorische Untersuchungsmethoden gefunden werden, welche einmal eine Beurteilung des Klopfverhaltens eindeutiger als bisher in Richtung größerer Genauigkeit gestatten und andererseits dazu beitragen können, daß bei der Entwicklung der Motorenkonstruktionen Wege beschritten werden, welche die Klopfstreuungen, die heute die Messungen so wesentlich stören, in geringerem Umfange auftreten lassen als heute.

rechten Null-Linie bedeutet also eine Überbewertung des Benzol-Gemisches gegenüber Bleibenzin nach der Research Methode, der Kurvenzug unter der Null-Linie zeigt die Unterbewertung nach der Motor Methode.

Um nachzuprüfen, in welcher Weise durch Abänderung der Prüfstandsbedingungen andere Werte entstehen,

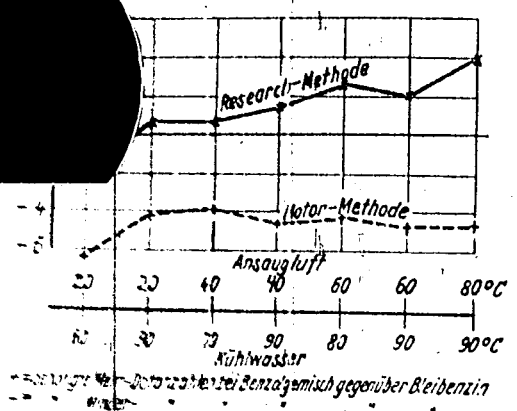


Abb. 47. Prüfstandswerte 1942. Drehzahl im Klopfgebiet konstant

...r Methode des Herunterbremsens noch ... der jeweilige Motor bei seiner klopf... zahl konstant mit Vollast gefahren und ...ünschten Temperatur-Bedingungen ein... Das Ergebnis, in gleichem Sinne wie ...gen, zeigt *Abb. 47*.

Inwieweit die geschilderten Versuchsbedingungen und Versuchsergebnisse, die auf dem Prüfstande erhalten wurden, auf die Fahrpraxis übertragbar sind und damit Abweichungen gegenüber den früheren Straßenklopfversuchen zu erklären sind, wurde nicht festgestellt, wie dies auch bei den von Dipl.-Ing. *Unverhau* berichteten Versuchen nicht erfolgte.

Die Frage Motor- oder Research-Methode — wenn man überhaupt bei einer Einpunkt-Methode bleibt — ist gleichbedeutend mit der Frage nach der Wärmebelastung der Motoren, die bei Kriegsfahrzeugen wesentlich höhere ...ahrzeugen der Wirtschaft annehmen kann. ...Zukunft wäre eine Klopfmessung anzu... mittleren klimatischen Verhältnissen und ...lich einheitlich ausgerichteten Motoren... dem neuen europäischen Raum ent... zu erforderlichen Arbeiten können aber ...ege begonnen werden. Erst dann kommt ...esentliche Änderungen in der Bauart der ...otoren und eine Stabilität in der Kraftstoffverteilung ...ntreten und damit die Frage, ob die Methodik der Bewertung der Kraftstoff-Klopffestigkeit beibehalten oder ...ändert werden muß, neu aufgeworfen und behandelt ...erden kann. Es sind Anzeichen dafür vorhanden, daß ...n der Zwischenzeit motorische Untersuchungsmethoden ...gefunden werden, welche einmal eine Beurteilung des Klopfverhaltens ...ndartiger als bisher in Richtung größerer ...enauigkeit gestatten und andererseits dazu beitragen ...können, daß bei der Entwicklung der Motorenkonstruk... neue Wege beschritten werden, welche die Klopfstreuun...gen, die heute die Messungen so wesentlich stören, in ...nge auftreten lassen als heute.

Dipl.-Ing. F. Rueß

Ansetzen von Bleitetraäthyl-Lösungen zum Verbleien von Benzinen im Labor

Das Bleitetraäthyl ist bekanntlich handelsmäßig nicht in reiner, sondern nur in verdünnter Form unter der Bezeichnung „Ethyl-Fluid" erhältlich, das etwa 62 Gewichtsprozent reines Bleitetraäthyl $Pb(C_2H_5)_4$ enthält. Zur Handhabung auf dem Klopfprüfstand wird das Fluid weiter mit Benzin verdünnt und dadurch eine „Bleilösung" hergestellt. Diese Bleilösung dient dann zum Vermischen mit dem zu verbleienden Benzin, wobei 1 cm³ „Bleilösung", auf eine bestimmte Menge Benzin (z. B. 200 cm³) gegeben, einem ganz bestimmten Volumprozentsatz Bleitetraäthyl in der fertigen Mischung der 200 cm³ entspricht.

Vergleichsversuche zwischen einigen Prüfständen über Klopfwerte aufgebleiter Benzine und ihrer Grundbenzine haben gezeigt, daß die zunächst mangelhafte Übereinstimmung der Ergebnisse dieser Bestimmungen zufriedenstellend geworden ist, nachdem folgende drei Punkte geregelt waren, die bis jetzt noch nicht so in den Betriebsvorschriften für die Klopfwertbestimmung festgelegt sind, daß alle Prüfstände eindeutig und einheitlich die „Bleilösung" und damit dann das gebleite Benzin-Endgemisch herstellen können:

I. Konzentration der „Bleilösung";
II. Octanzahl des zur Herstellung der „Bleilösung" verwendeten Verdünnungsbenzins;
III. Anwendung der „Bleilösung".

Die Notwendigkeit, für diese gesamte Handhabung eine einheitliche Regelung für alle Prüfstände durchzuführen, ist damit begründet, daß durch die Vorschriften für die Klopfwertbestimmung alle, auch die unscheinbarsten Fehlermöglichkeiten ausgeschaltet werden sollen.

I. Konzentration der „Bleilösung"

Das „Ethyl-Fluid" wird als

blaugefärbtes 1-T-Fluid für Fliegerkraftstoffe

und

rotgefärbtes Q-Fluid für Autokraftstoffe

geliefert.

Bei dem hier in Frage kommenden 1-T-Fluid ist das Volumenverhältnis Fluid:Bleitetraäthyl = 1,53:1; d. h. z. B. die im Originalgefäß gelieferten 918 cm³ Ethyl-Fluid enthalten 600 cm³ Bleitetraäthyl.

Die „Bleilösung" aus diesem Ethyl-Fluid stellen nun beispielsweise drei Prüfstellen in ganz verschiedenen Konzentrationen her, wie *Zahlentafel 28* zeigt.

Zu *Zahlentafel 28* ist folgendes zu bemerken:
Die Angaben der Mischvorschrift des Prüfstandes I rühren davon her, daß bei Zugabe von 1 cm³ „Bleilösung" auf 200 cm³ Benzin diese Mischung 1 cm³ Bleitetraäthyl je USA-Gallone Gemisch enthält. Die Konzentration ist verhältnismäßig gering, die Berechnung der Lösung und des Gemisches umständlich; die Vorschrift dürfte heute überholt sein.

Prüfstand II arbeitet nach der Mischvorschrift der Ethyl-GmbH vom Dezember 1936: „Herstellung von verdünntem Ethyl-Fluid 1-T-Blau und Beschreibung einer Meßapparatur zum Vermischen von kleinen Benzinproben mit Ethyl-Fluid". Es heißt darin: „Die Verdünnung erfolgt am günstigsten so, daß in dem verdünnten Ethyl-Fluid das Verhältnis

verdünntes Fluid:Bleitetraäthyl = 10:1

beträgt.

Hierdurch ergibt sich eine einfache Rechnung, und man kann leicht das für die betreffende Benzinprobe notwendige verdünnte Fluid, welches die gewünschte Menge cm³ Bleitetraäthyl enthält, bestimmen und abmessen."

Prüfstand III arbeitet nach der in der „Anleitung und Betriebsvorschrift für die Klopfwertbestimmung am I. G.-Prüfmotor" vom Technischen Prüfstand der I. G., Ausgabe C, angegebenen Vorschrift, die auf eine Konzentration von 5:1 hinausläuft.

Die Arbeitsweisen der Prüfstände II und III haben den Vorteil, daß die Lösungen einfach zu berechnen und anzusetzen sind; die Konzentration der „Bleilösung" nach der I. G.-Vorschrift ist doppelt so hoch wie nach der Ethyl-Vorschrift.

Es ist anzunehmen, daß andere Prüfstände vielleicht wieder nach anderen Vorschriften ihre „Bleilösungen" herstellen.

Fehlermöglichkeiten sind beim Ansetzen der „Bleilösung" gegeben: 1. bei der Herstellung aus dem Ethyl-Fluid; 2. beim Abmessen der zur Verbleiung notwendigen cm³ „Bleilösung" je nach der Konzentration.

Vorschlag: „Die Vorschrift für das Ansetzen der ‚Bleilösung' aus dem Ethyl-Fluid soll in bezug auf Konzentration nach den in der ‚Anleitung und Betriebsvorschrift für die Klopfwertbestimmung am I. G.-Prüfmotor', Ausgabe C, vom Technischen Prüfstand der I. G., S. 39 und 56 enthaltenen Angaben festgelegt werden (vgl. *Zahlentafel 28*, Prüfstand III)."

Begründung: 1. Die Bleilösung ist hiernach besonders einfach anzusetzen und zu berechnen; Beispiel: für 0,1 Vol.-% Verbleiung 1 cm³ Lösung in 200 cm³ Gemisch.

2. Von den bestehenden Anwendungsvorschriften dürfte die I. G.-Vorschrift die größte Verbreitung besitzen; es ist deshalb wahrscheinlich, daß sie jetzt schon am meisten angewendet wird.

3. Zur Unterstützung für diese Vorschrift sind Hilfsmittel entwickelt worden. So sind die Meßbüretten und Meßkugeln nach Bild 17 und 18 der „Anleitung und Betriebsvorschrift" an rund 20 Stellen ausgeliefert worden. Inzwischen sind diese Meßgeräte auch in einem Laborschrank zusammengefaßt worden *(Abb. 48)*.

Zahlentafel 28. Vorschrift dreier Prüfstände zur Herstellung der Bleilösung

Prüfstand	I	II	III
Vorschrift	Amerikanische	Ethyl-GmbH	Techn. Prüfstand der I. G. I. G.-Prüfmotor
Ethyl-Fluid, cm³	81,276	153	92
+ Benzin, cm³	918,724	847	208
= Bleilösung, cm³	1000,000	1000	300
Die beigegebene Menge Fluid enthält Bleitetraäthyl, cm³	53,087	100	60
In der Bleilösung beträgt das Verhältnis $\frac{\text{verdünnt. Fluid}}{\text{Bleitetraäthyl}}$	18,8:1	10:1	5:1
Zu einer Verbleiung von 0,1 Vol.-% werden benötigt	3,785 cm³ Bleilösung	2 cm³ Bleilösung	1 cm³ Bleilösung
	auf 200 cm³ Gemisch		

III. (Oct

Zur Eichung
soll nach der „
standes der I. G.
verwendet werden
Ethyl-GmbH verl
Fluid verwende ma
nur Benzin mit J
chemisch reines Be
und Crackbenzin d
wendet werden."

Es ist also den einz
freigestellt, mit w
zahl sie ihre „
sich nun und s
gerechnet wer
wendeten Benz
mäßig, geringe
des herzustellende
wenig, aber imme
bei Vergleichsver

Abb. 46

Es soll ein B
verbleit weiche
vom Klopf
10:1, wie
bleinng
Fluid –
aufgem
etwa 0,3
Die Frage
ohne Blei, den
2 cm³ „Bleilösung" auf (0,1

(ohne Blei):

70 OZ
10 OZ

beiden Prüfständen kann der
ten Fall sogar 1,2 OZ betragen,
ren, daß der eine Prüfstand
anderem Benzin und in etwas

...ne sind auf j...

...n Anforderungen in b...

...mittlerer Bereich der unverbleiten
...die Ausgangsbenzine für die ver-
...ine darstellen, und verändert so durch
...z den Klopfwert des Endgemisches im
...nitt nur sehr wenig.

...9. Klopfveränderung der Eichkraftstoffe durch den ... beim Verbleien auf 0,1 Vol.-% TEL mit Blei-...chbenzin, Z oder Benzol, berechnet ohne Berück-...sichtigung der Bleiwirkung

	... zugesetzt dem		dann wird der Klopf...
		I.G.-Benzin	Z
1.	I.G.-Benzin	—	...
2.	I.G.-Benzin	I.G.-Benzin	...
3.	Z	Z	...
4.	Z	I.G.-Benzin	...
5.	Benzol	Benzol	...

III. Anwendung d...

Um bei dem Beispiel des ...
zu bleiben:
sollen 3,78 cm³ Blei...
so daß nach der ...
vorhanden ...
oder ...

II. Octanzahl des zur Herstellung der „Bleilösung" verwendeten Verdünnungsbenzins

Zur Herstellung der „Bleilösung" aus dem Ethyl-Fluid soll nach der „Betriebsvorschrift" des Technischen Prüfstandes der I. G. für den I. G.-Prüfmotor I. G.-Eichbenzin verwendet werden. Die obenerwähnte Vorschrift der Ethyl-GmbH verlangt: „Zum Verdünnen von Ethyl-Fluid verwende man wegen der Beständigkeit der Lösung nur Benzin mit Jodzahl 0 (straight-run-Benzin) oder chemisch reines Benzol. Motoren- oder Handelsbenzol und Crackbenzin dürfen für diesen Zweck nicht verwendet werden."

Es ist also den einzelnen Prüfständen in gewissen Grenzen freigestellt, mit welchem Benzin in bezug auf die Octanzahl sie ihre „Bleilösung" herstellen wollen. Es zeigt sich nun und soll auch an einem kleinen Beispiel nachgerechnet werden, daß der Klopfwert des hierzu verwendeten Benzins, obwohl es sich nur um verhältnismäßig geringe Beimengungen handelt, den Klopfwert des herzustellenden Benzingemisches beeinflußt, zwar sehr wenig, aber immerhin in einer Größenordnung, wie sie bei Vergleichsversuchen von Klopfwertbestimmungen wohl zu beachten ist:

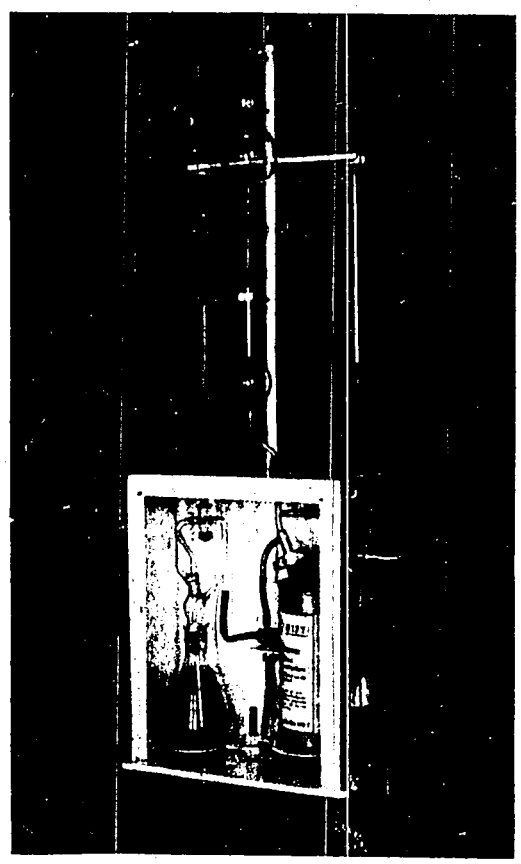


Abb. 48 TP-Laborgerät zum Abmessen von Bleilösungen

Es soll ein Benzin vom Klopfwert A mit 0,1 Vol.-% verbleit werden. Die „Bleilösung" soll mit einem Benzin vom Klopfwert B hergestellt werden in einer Konzentration 10:1, wie sie der Ethyl-Vorschrift entspricht. Die Verbleiung findet so statt, daß 2 cm³ „Bleilösung" (Ethyl-Fluid + Benzin B) auf 200 cm³ zu verbleiendes Benzin A aufgemischt werden; in diesen 2 cm³ „Bleilösung" sind etwa 0,3 cm³ Ethyl-Fluid und 1,7 cm³ Benzin B enthalten. Die Frage ist nun, wie diese 1,7 cm³ Benzin B allein, ohne Blei, den Klopfwert des Benzins A, das durch die 2 cm³ „Bleilösung" auf 0,1 % verbleit werden soll, beeinflussen. Unter der Annahme der Gültigkeit der linearen Mischungsregel ergibt sich als Klopfwert x des Benzins A nach Zusatz des Benzins B (ohne Blei):

$$x = \frac{198{,}3 \cdot A + 1{,}7 \cdot B}{200}$$

Wenn Benzin A beispielsweise die OZ 70 hat, so wird

x = 69,7 OZ bei B = 40 OZ (I.G.-Eichbenzin)
x = 70,0 OZ bei B = 70 OZ
x = 70,3 OZ bei B = 110 OZ (Benzol).

Das heißt also: wenn zwei Prüfstände Vergleichsversuche über Aufbleiung von Grundbenzinen machen und der eine Prüfstand verwendet ein OZ 40-Benzin, der andere Benzol (mit 110 OZ angenommen) zum Herstellen der „Bleilösung", was ja nach den Vorschriften gestattet ist, so kommt dadurch allein schon ein Fehler von 0,6 OZ herein.

Noch größer wird der Unterschied, wenn die Prüfstände noch eine geringere Konzentration der „Bleilösung" verwenden, z. B. die in *Zahlentafel 28* angeführte Konzentration 18,8:1; wenn also für eine 0,1%ige Verbleiung auf 200 cm³ Benzin 3,785 cm³ „Bleilösung", die demnach etwa 3,5 cm³ Benzin B enthalten, gegeben werden müssen; dann lauten die entsprechenden Werte (wieder ohne Blei):

x = 69,5 OZ bei B = 40 OZ
x = 70,0 OZ bei B = 70 OZ
x = 70,7 OZ bei B = 110 OZ

Das heißt also: bei diesen beiden Prüfständen kann der Unterschied im ungünstigsten Fall sogar 1,2 OZ betragen, nur dadurch hervorgerufen, daß der eine Prüfstand seine „Bleilösung" mit anderem Benzin und in etwas anderer Konzentration ansetzt als der andere Prüfstand.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen müßte man im Idealfall fordern: „Es soll zum Ansetzen der ‚Bleilösung' ein Benzin vom selben Klopfwert wie dem des zu verbleienden Grundbenzins verwendet werden." Andernfalls bedingt dieses Verdünnungsbenzin eine Veränderung des durch den Bleizusatz gewünschten Klopfwertes des zu verbleienden Benzins.

Ein Anwendungsbeispiel für die geschilderten Verhältnisse tritt beim Arbeiten mit verbleiten Unterbezugskraftstoffen Z und I. G.-Benzin auf.

Diesen Unterbezugskraftstoffen wird bekanntlich von vornherein ein Bleizusatz von je 0,1 Vol.-% zugegeben, wenn gebleite Benzine untersucht werden sollen. 0,1 Vol.-% mögen wieder 2 cm³ „Bleilösung" (mit 1,7 cm³ Verdünnungsbenzin) auf 200 cm³ zu verbleiendes Benzin, in dem Fall Z oder I. G.-Benzin, entsprechen. Man kann nun auch hier wieder verschiedene Verdünnungsbenzine zur Herstellung der „Bleilösung" verwenden und unter Vernachlässigung des Bleigehaltes und Annahme der Gültigkeit der linearen Mischungsregel berechnen, wie sich die Klopfwerte x der Gemischkomponenten Z und I. G.-Benzin durch Zugabe von 1,7 cm³ Benzin (ohne Blei) ändern. Und zwar soll als Verdünnungsbenzin einmal I. G.-Benzin, zum anderen Z und drittens Benzol genommen werden, deren Grund-OZ mit 40 bzw. 100 bzw. 110 angenommen seien. Dann erhält man die Ziffern der *Zahlentafel 29*.

Auch hier wäre das Folgerichtigste, wenn dem I. G.-Benzin eine „Bleilösung" mit I. G.-Benzin, dem Z eine solche mit Z zugesetzt würde.

Die Notwendigkeit, mehrere „Bleilösungen" aus Benzinen verschiedenen Klopfwertes ansetzen zu müssen, ist natürlich ein Nachteil, der wohl nicht gern in Kauf genommen werden dürfte.

Vorschlag: „Zur Herstellung der ‚Bleilösung' wird einheitlich ein Gemisch aus 50 Vol.-% I. G.-Benzin und 50 Vol.-% Eichstoff Z verwendet, das dann ungefähr eine MOZ 70 hat."

Begründung: 1. Die beiden Benzine sind auf jedem Prüfstand vorhanden.

2. Beide Benzine genügen den Anforderungen in bezug auf die Jodzahl.

3. OZ 70 liegt im mittleren Bereich der unverbleiten Grundbenzine, die die Ausgangsbenzine für die verbleiten Flugbenzine darstellen, und verändert so durch seinen Zusatz den Klopfwert des Endgemisches im Durchschnitt nur sehr wenig.

Zahlentafel 29. Klopfveränderung der Eichkraftstoffe durch Kraftstoffzusatz beim Verbleien auf 0,1 Vol.-% TEL mit Bleilösungen in Eichbenzin, Z oder Benzol, berechnet ohne Berücksichtigung der Bleiwirkung

	Es wird zugesetzt dem		dann wird der Klopfwert von	
	Z	I.G.-Benzin	Z	I.G.-Benzin
1.	—	—	100	40
2.	I.G.-Benzin	I.G.-Benzin	99,5	40
3.	Z	Z	100	40,5
4.	Z	I.G.-Benzin	100	40
5.	Benzol	Benzol	100,1	40,6

III. Anwendung der „Bleilösung"

Um bei dem Beispiel des Prüfstandes I *(Zahlentafel 28)* zu bleiben:

sollen 3,78 cm³ Bleilösung auf 200 cm³ aufgemischt werden, so daß nach der Mischung 200 cm³ verbleites Gemisch vorhanden sind,

oder sollen, wie es manche Prüfstände machen, die 3,78 cm³ Bleilösung zu 200 cm³ Benzin zugegeben werden, so daß nach der Mischung 203,78 cm³ verbleites Gemisch vorhanden sind?

Es sind hier zu unterscheiden:

a) Der Einfluß des Klopfwertes des zur „Bleilösung" verwendeten Verdünnungsbenzins auf den endgültigen Klopfwert des Gemisches, in dem Sinn, wie in dem Vorhergehenden untersucht. Die Durchrechnung eines Beispiels, wieder unter der Annahme der Gültigkeit der linearen Mischungsregel, wenn 3,5 cm³ Benzin OZ 40 mit 200 cm³ Benzin OZ 70 auf beide Arten gemischt werden:

196,5·70 + 3,5·40 = 200 ·x x = 69,475
200 ·70 + 3,5·40 = 203,5·x x = 69,484

zeigt, daß der Einfluß weit innerhalb der Grenzen der Genauigkeit liegt und die Art der Mischung in bezug auf den Klopfwert des verwendeten Verdünnungsbenzins unter diesen Umständen gleichgültig ist.

...er Annahme der Gültigkeit der linearen ...gibt sich als Klopfwert x des Benzins A ...nach Zusatz des Benzins B (ohne Blei):

$$x = \frac{198{,}3 \cdot A + 1{,}7 \cdot B}{200}$$

Wenn Benzin A beispielsweise die OZ 70 hat, so wird

x = 69,7 OZ bei B = 40 OZ (I.G.-Eichbenzin)
x = 70,0 OZ bei B = 70 OZ
x = 70,3 OZ bei B = 110 OZ (Benzol).

Das heißt also: wenn zwei Prüfstände Vergleichsversuche über Aufbleiung von Grundbenzinen machen und der eine Prüfstand verwendet ein OZ 40-Benzin, der andere ...10 OZ angenommen) zum Herstellen der ... ja nach den Vorschriften gestattet ...rch allein schon ein Fehler von 0,6 OZ

...ler Unterschied, wenn die Prüfstände ...re Konzentration der „Bleilösung" ...die in *Zahlentafel 28* angeführte Kon-...; wenn also für eine 0,1%ige Verbleiung auf 200 cm³ Benzin 3,785 cm³ „Bleilösung", die demnach etwa 3,5 cm³ Benzin B enthalten, gegeben werden müssen; dann lauten die entsprechenden Werte (wieder ohne Blei):

x = 69,5 OZ bei B = 40 OZ
x = 70,0 OZ bei B = 70 OZ
x = 70,7 OZ bei B = 110 OZ

Das heißt also: bei diesen beiden Prüfständen kann der Unterschied im ungünstigsten Fall sogar 1,2 OZ betragen, nur dadurch hervorgerufen, daß der eine Prüfstand seine „Bleilösung" mit anderem Benzin und in etwas anderer Konzentration ansetzt als der andere Prüfstand.

...er Untersuchungen müßte man im Ideal-...soll zum Ansetzen der ‚Bleilösung' ein ...Klopfwert wie dem des zu verbleienden ...wendet werden." Andernfalls bedingt ...gsbenzin eine Veränderung des durch ...ewünschten Klopfwertes des zu ver-...s.

Ein Anwendungsbeispiel für die geschilderten Verhältnisse tritt beim Arbeiten mit verbleiten Unterbezugskraftstoffen Z und I. G.-Benzin auf.

Diesen Unterbezugskraftstoffen wird bekanntlich von vornherein ein Bleizusatz von je 0,1 Vol.-% zugegeben, wenn gebleite Benzine untersucht werden sollen. 0,1 Vol.-% mögen wieder 2 cm³ „Bleilösung" (mit 1,7 cm³ Verdünnungsbenzin) auf 200 cm³ zu verbleiendes Benzin, in dem Fall Z oder I. G.-Benzin, entsprechen. Man kann nun auch hier wieder verschiedene Verdünnungsbenzine zur Herstellung der „Bleilösung" verwenden und unter ...ng des Bleigehaltes und Annahme der ...linearen Mischungsregel berechnen, wie ...rte x der Gemischkomponenten Z und ...h Zugabe von 1,7 cm³ Benzin (ohne ...d zwar soll als Verdünnungsbenzin ...in, zum anderen Z und drittens Benzol ...en, deren Grund-OZ mit 40 bzw. 100 ...nommen seien. Dann erhält man die Ziffern der *Zahlentafel 29*.

Auch hier wäre das Folgerichtigste, wenn dem I. G.-Benzin eine „Bleilösung" mit I. G.-Benzin, dem Z eine solche mit Z zugesetzt würde.

Die Notwendigkeit, mehrere „Bleilösungen" aus Benzinen verschiedenen Klopfwertes ansetzen zu müssen, ist natürlich ein Nachteil, der wohl nicht gern in Kauf genommen werden dürfte.

Vorschlag: „Zur Herstellung der ‚Bleilösung' wird einheitlich ein Gemisch aus 50 Vol.-% I. G.-Benzin und 50 Vol.-% Eichstoff Z verwendet, das dann un-...OZ 70 hat."

Begründung: 1. Die beiden Benzine sind auf jedem Prüfstand vorhanden.

2. Beide Benzine genügen den Anforderungen in bezug auf die Jodzahl.

3. OZ 70 liegt im mittleren Bereich der unverbleiten Grundbenzine, die die Ausgangsbenzine für die verbleiten Flugbenzine darstellen, und verändert so durch seinen Zusatz den Klopfwert des Endgemisches im Durchschnitt nur sehr wenig.

Zahlentafel 29. Klopfverminderung der Eichkraftstoffe durch den Kraftstoffzusatz beim Verbleien auf 0,1 Vol.-% TEL mit Bleilösungen in Eichbenzin, Z oder Benzol, berechnet ohne Berücksichtigung der Bleiwirkung

	Es wird zugesetzt dem		dann wird der Klopfwert von	
	Z	I.G.-Benzin	Z	I.G.-Benzin
1.	—	—	100	40
2.	I.G.-Benzin	I.G.-Benzin	99,5	40
3.	Z	Z	100	40,5
4.	Z	I.G.-Benzin	100	40
5.	Benzol	Benzol	100,1	40,6

III. Anwendung der „Bleilösung"

Um bei dem Beispiel des Prüfstandes I *(Zahlentafel 28)* zu bleiben:

sollen 3,78 cm³ Bleilösung auf 200 cm³ aufgemischt werden, so daß nach der Mischung 200 cm³ verbleites Gemisch vorhanden sind,

oder sollen, wie es manche Prüfstände machen, die 3,78 cm³ Bleilösung zu 200 cm³ Benzin zugegeben werden, so daß nach der Mischung 203,78 cm³ verbleites Gemisch vorhanden sind?

Es sind hier zu unterscheiden:

a) Der Einfluß des Klopfwertes des zur „Bleilösung" verwendeten Verdünnungsbenzins auf den endgültigen Klopfwert des Gemisches, in dem Sinn, wie in dem Vorhergehenden untersucht. Die Durchrechnung eines Beispiels, wieder unter der Annahme der Gültigkeit der linearen Mischungsregel, wenn 3,5 cm³ Benzin OZ 40 mit 200 cm³ Benzin OZ 70 auf beide Arten gemischt werden:

$196{,}5 \cdot 70 + 3{,}5 \cdot 40 = 200 \cdot x \qquad x = 69{,}475$
$200 \cdot 70 + 3{,}5 \cdot 40 = 203{,}5 \cdot x \qquad x = 69{,}484$

zeigt, daß der Einfluß weit innerhalb der Grenzen der Genauigkeit liegt und die Art der Mischung in bezug auf den Klopfwert des verwendeten Verdünnungsbenzins unter diesen Umständen gleichgültig ist.

b) Die veränderte Bleikonzentration:

Die beigegebenen 3,785 cm³ „Bleilösung" enthalten etwa 0,2 cm³ Bleitetraäthyl. Das verbleite Endgemisch enthält nach der ersten Art

$$\frac{0{,}2 \cdot 100}{200} = 0{,}1\,\%\ \text{Blei}$$

nach der zweiten Art

$$\frac{0{,}2 \cdot 100}{203{,}785} = 0{,}098\,\%\ \text{Blei},$$

was einem Unterschied von

$$\frac{(0{,}1 - 0{,}098) \cdot 100}{0{,}1} = 2\,\%$$

der gewünschten Verbleiung entspricht!

Oder wenn man über die Octanzahl rechnet, wieder unter der Annahme der Gültigkeit der linearen Mischungsregel und unter der Annahme, daß die Octanzahl des Benzins durch 0,1 Vol.-% Blei bei einem Endgemisch von 200 cm³ beispielsweise um 20 erhöht wird:

im ersten Fall erhöhen die 0,2 cm³ Blei die Octanzahl von (200—0,2) ≙ 199,8 cm³ Benzin laut Annahme um 20 Einheiten,

im zweiten Fall müssen die 0,2 cm³ Blei die Octanzahl von (203,785—0,2) = 203,585 cm³ Benzin erhöhen, die demnach rechnungsmäßig nur um

$$20 \cdot \frac{199{,}8}{203{,}585} = 19{,}62\ \text{Einheiten}$$

gesteigert wird.

Das heißt also: ein Benzin mit OZ 70 zum Beispiel erhält in einem Fall OZ 90, im anderen OZ 89,6, ein in der Praxis bei den gestellten Anforderungen durchaus zu beachtender Unterschied.

Vorschlag: „Anwendung der Bleilösung zum Verbleien des Grundbenzins:

a cm³ Bleilösung + (200—a) cm³ zu verbleiendes Benzin = 200 cm³ verbleites Benzin."

Die Ausführung kann z. B. so stattfinden, daß eine 200 cm³-Meßbürette etwa halb voll mit dem zu verbleienden Benzin gefüllt wird, dann die a cm³ Bleilösung beigegeben werden und dann die Bürette mit dem zu verbleienden Benzin auf 200 cm³ vollgefüllt wird.

Die Verwirklichung und Durchführung der drei genannten Vorschläge, durch die die Verbleiung von Benzinproben auf dem Klopfprüfstand einheitlich geregelt wird, soll einen weiteren Schritt zur Steigerung der Meßgenauigkeit der Octanzahlbestimmung bedeuten.

Ergebnis der 5. Klopfmeßtagung

1. Die Arbeitsgemeinschaft kam überein, die halbjährlichen Vergleichsversuche fortzusetzen. Bei den nächsten Versuchen im April 1943 soll wieder ein Synthesebenzin, aber von anderer Herkunft, in die Versuchsreihe einbezogen werden.

2. Nach einem Vorschlag des Zentral-Büros, Berlin, soll bis auf weiteres von den Synthesebenzinen der Mischwert an Stelle der Octanzahl angegeben werden. Der Mischwert errechnet sich aus dem Klopfverhalten der Mischung von Synthesebenzin und Eichstoff Z zu gleichen Raumteilen. In einem kleinen Kreis werden weitere Untersuchungen mit Synthesebenzinen durchgeführt; über das Ergebnis dürfte bei der nächsten Tagung berichtet werden.

3. Ein Heraufsetzen der Entkohlungszeiträume auf etwa 150 Betriebsstunden wird beim Untersuchen von üblichen Kraftstoffproben empfohlen.

4. Die Mehrzahl der Teilnehmer ist der Ansicht, daß bei den Fahrbenzinen die Motor-Methode geeigneter zur OZ-Angabe sei als die jetzt gebräuchliche Research-Methode. Über die zahlenmäßige Auswirkung einer etwaigen Umstellung von der Research-Methode auf die Motor-Methode gibt *Zahlentafel 30* Auskunft.[1])

5. Die Vorrichtung zur Klopfwertbestimmung von Gasen gemäß *Abb. 13* oben soll als Normanlage gelten.

6. Zum labormäßigen Bleien von Benzinproben sollen
   a) als Verdünnungsmittel eine Mischung von IG-Eichbenzin mit Eichstoff Z zu gleichen Raumteilen verwendet werden,
   b) in 100 cm³ Bleilösung 20 cm³ reines Bleitetraäthyl enthalten sein,
   c) die angegebenen Prozentsätze Bleitetraäthyl sich auf eine Mischung in 100 Raumteilen Bleibenzin beziehen.

7. Zur Schmierung der Klopfmotoren soll einheitlich das von der Intava, Hamburg, herausgebrachte „Intava-Klopfmotorenöl" verwendet werden.

8. Zur Prüfung der Klopfmotoren hat das Zentralbüro, Berlin, für seine Abnahmestellen, der Technische Prüfstand der I. G. für die anderen Stellen einen Überwachungsdienst eingerichtet.

Zahlentafel 30. Bewertungsunterschied in OZ (ROZ minus MOZ)

Vergleichsvers. Reihe	Zeitpkt.	Benzinprobe a	b	c	d	1	3
1 36	Aug. 36	1,7	3,2	10,7	—	4,8	3,5
2 50	Nov. 37	1,7	4,0	7,7	—	4,1	2,3
3 59	Sept. 38	1,4	3,0	8,8	—	4,4	4,0
4 65	April 39	1,3	3,3	6,2	—0,9	2,8	2,1
5 75	Febr. 40	1,5	3,0	10,9*)	—0,6	3,2	2,8

a = Hydrierbenzin, b = Spritbenzin, c = Benzolgemisch, d = Bleibenzin; 1 = Flugbenzin,rein, 3 = Flugbenzin, geblei t. *) = 1/3 Eichbi + 2/3 Reinbo.

[1]) Inzwischen ist die Motor-Methode anstelle der Research-Methode zur Bewertung von Fahrbenzinen durch das Heereswaffenamt vorgeschrieben worden.

Märkische Druckenstalt W. Hentschel o.H.

Hochdruckversuche

Mitteilungen des Technischen Prüfstandes Oppau

1943 Heft 2

9 1 4

Bericht

über die

Sechste Wärmetagung Oppau

am 18. und 19. Mai 1942 in Oppau

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.

6. 1943

915

Mitteilungen des Technischen Prüfstandes Oppau

1943 Heft 2

87

Bericht

über die

Sechste Wärmetagung Oppau

am 18. und 19. Mai 1942 in Oppau

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.

Teilnehmerverzeichnis

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. W. Wilke

Teko:	Dir. Dr. Sauer
	Dir. Dr. Eymann
Gast:	Reg.-Rat Dr. Justi, Berlin
Bitterfeld:	Dr.-Ing. Starck
Höchst:	Dipl.-Ing. Frank
	Dr.-Ing. Kiesskalt
	Dr.-Ing. Kraussold
	Dipl.-Ing. Matz
	Dr. Patat
Hüls:	Dipl.-Ing. Lehmann
Leuna:	Dipl.-Ing. Keinke
	Dipl.-Ing. Schwab
	Dr.-Ing. Wirth
Leverkusen:	Dr.-Ing. Burbach
	Dr.-Ing. Haltmeier
Ludwigshafen a. Rh.:	Dr. Binkele
	Dr.-Ing. Brümmerhoff
	Dr.-Ing. Frank
	Dipl.-Ing. Futterer
	Dr.-Ing. Kautz
	Ing. Lauer
	Dr.-Ing. Lüder
	Dipl.-Ing. Raeithel
	Dipl.-Ing. Schaurer
	Dipl.-Ing. Schmid
	Dr. Weißweiler
Oppau:	Prof. Dr.-Ing. Wilke
	Dr.-Ing. Beckmann
	Dr. Bückert
	Dipl.-Ing. Enderlein
	Dr.-Ing. Graf
	Dipl.-Ing. Gutzer
	Dipl.-Ing. Hahn
	Dr. Hecht
	Dr.-Ing. Hegelmann
	Dr. Helms
	Dr. Hermann
	Dr.-Ing. Kling
	Dipl.-Ing. Knobloch
	Dipl.-Ing. Markert
	Dr. Reinhard
	Dr. Sachsse
	Ing. Schenker
	Dr. Schlüter
	Dr. Schulz
	Dipl.-Ing. Schweizer
	Dr.-Ing. Speyerer
	Dr. Timm
	Dr. Wietzel
	Dr. Wilde
Wolfen-Film:	Dipl.-Ing. Nauck

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Prof. Dr.-Ing. Wilke:	Einführung	3
Dr.-Ing. Kling:	Bericht über den Fortgang der Arbeiten am Wärmeatlas	3
Dipl.-Ing. Matz:	Überschlagsberechnungen von Wärmeaustauschern	7
Dipl.-Ing. Keinke:	Diagramme zur Bestimmung der Wandrückstrahlung bei beheizten Behältern	10
Dr.-Ing. Kling:	Untersuchungen an Hochdruckrippenrohren	16
Dr.-Ing. Haltmeier:	Kipperscheinungen bei einem Dampfstrahlaggregat mit 0,1 mm Hg Endvakuum	22
Dr.-Ing. Kautz:	Bericht über die Heizflächenkonstruktion nach Kautz	24
Dipl.-Ing. Frank:	Neue korrosionsbeständige Kesselkonstruktion mit gutem Wärmedurchgang	30
Dr. Ing. Patat:	Verfahrenstechnik im Bereich des kritischen Druckes und erforderliche thermodynamische Daten	34
Dr.-Ing. Kling:	Untersuchungen über die Wärmeabteilung von Kabeln	35
Dr.-Ing. Graf:	Gipsflugaschesteine als wärmeisolierendes, wandbildendes Baumaterial	42
Dipl.-Ing. Nauck:	Explosionsgrenzen und -bereiche brennbarer Flüssigkeiten und deren Einstufungen in Gefahrenklassen	45
Dr.-Ing. Hegelmann:	Neuere Ansätze zur Weiterentwicklung grundlegender Begriffe in der reinen Thermodynamik	54
Reg.-Rat Dr. Justi, P.T.R.:	Statistische Berechnung der kalorischen Daten idealer Gase — Abhängigkeit dieser Daten vom Realzustand der Gase — Thermodynamik von Gasgemischen	63
Dr.-Ing. Speyerer:	Versuche zur Bestimmung der Zähigkeit von Wasserdampf	77

Nachdruck, auch auszugsweise, verboten

rzeichnis

-Ing. W. Wilke

Oppau: Prof. Dr.-Ing. Wilke
Dr.-Ing. Beckmann
Dr. Bückert
Dipl.-Ing. Enderlein
Dr.-Ing. Graf
Dipl.-Ing. Gutzer
Dipl.-Ing. Hahn
Dr. Hecht
Dr.-Ing. Hegelmann
Dr. Helms
Dr. Hermann
Dr.-Ing. Kling
Dipl.-Ing. Knobloch
Dipl.-Ing. Markert
Dr. Reinhard
Dr. Sachsse
Ing. Schenker
Dr. Schlüter
Dr. Schulz
Dipl.-Ing. Schweizer
Dr.-Ing. Speyerer
Dr. Timm
Dr. Wietzel
Dr. Wilde
Wolfen-Film: Dipl.-Ing. Nauck

zeichnis

Seite

. 3
er Arbeiten am Wärmeatlas 3
Wärmeaustauschern 7
hlung bei beheizten Behältern 10
. 16
mit 0,1 mm Hg Endvakuum 22
autz 24
it gutem Wärmedurchgang . 30
ckes und erforderliche thermo-
. 34
rmeabteilung von Kabeln 35
eisolierendes, wandbildendes Baumaterial . . . 42
iche brennbarer Flüssigkeiten und deren Einstu-
. 45
ntwicklung grundlegender Begriffe in der reinen
. 54
kalorischen Daten idealer Gase — Abhängigkeit
d der Gase — Thermodynamik von Gasgemischen 63
Wasserdampf 77

Einführung

Der Vorsitzende, Prof. Dr.-Ing. Wilke, begrüßt die Tagungsteilnehmer, insbesondere die Tekomitglieder Dir. Dr. Sauer und Dir. Dr. Eymann, und führt aus, daß der Grund, auch dieses Jahr im Kriege eine Wärmetagung abzuhalten, in dem großen, steigenden Interesse am Wärmeatlas liege. Der Teilnehmerkreis hat sich wesentlich erweitert. Infolge der Planung und Errichtung neuer Anlagen und Werke, zumal jetzt im Kriege, werden häufig junge Ingenieure mit Aufgaben betraut, bei deren Lösung sie sich mit bestem Nutzen auf die im Wärmeatlas gesammelten Forschungs- und Versuchsergebnisse sowie die dort niedergelegten Erfahrungen stützen, die an sich nur älteren Fachgenossen zur Verfügung stehen. Diese wiederum sind für die Vermehrung der Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen dankbar.

Wilke wiederholt dringend seine schon früher ausgesprochene Bitte, den weiteren Ausbau des Wärmeatlasses tätig zu fördern und ganz besonders durch Einsendung von Versuchs- und Betriebsmessungen zur Erweiterung der zweiten Teile der Atlasbände I und II beizutragen. Eifrigste Mitarbeit hat bisher vor allem Höchst geleistet.

Die Ausarbeitung des Wärmeatlasses muß neben den laufenden kriegswichtigen Arbeiten des technischen Prüfstandes geschehen, und es steht hierfür verhältnismäßig wenig Zeit zur Verfügung. Die Erweiterung des Wärmeatlasses kann daher nicht in dem vielfach gewünschten Maße erfolgen. So mußte insbesondere auch der dritte Atlasband, der die Trocknung, Waschung, Destillation, Rektifikation usw. behandeln soll, auf die Zeit nach dem Kriege verschoben werden.

Die Tagung soll durch Vorträge, Referate und Aussprache den Teilnehmern Erfahrungen und Anregungen vermitteln. Der erste Tag ist vorwiegend speziellen Betriebsaufgaben gewidmet, am zweiten Tag werden Fragen des Zusammenhanges und der Gewinnung thermodynamischer Größen sowie neue Anschauungen in der Thermodynamik behandelt werden.

Schließlich teilt Wilke noch mit, daß sich auch der Verein Deutscher Ingenieure veranlaßt gesehen hat, einen „Atlas für den Wärmeübergang" für die Allgemeinheit zu schaffen, und in dieser Frage an die I. G. herangetreten ist. Dieses Werk wird in Zusammenarbeit von VDI. und I. G. unter weitgehender Benutzung unseres Wärmeatlasses herausgegeben werden.

Bericht über den Fortgang der Arbeiten am Wärmeatlas[1]

Von Dr.-Ing. GEORG KLING

Seit der fünften Wärmeatlasbesprechung, die in kleinem Kreis am 25. März 1941 in Bau Op 471 stattgefunden hatte, sind den Wärmeatlasbesitzern in vier Sendungen insgesamt 42 neue Blätter zugestellt worden. Diese verteilen sich auf:

Wärmeatlas I,	theoretischer Teil	5 Blätter
„	I, Betriebsfälle	11 „
Stoffatlas I		26 „

Im folgenden sei kurz der Inhalt der Blätter angegeben sowie einige Bemerkungen zu den Bearbeitungen gegeben, sofern diese von Interesse sind:

Blatt 5c enthält ein Verzeichnis der „Wärmeleitzahlen von Baustoffen", unterteilt in Natursteine, Kunststeine, Holz, Füllstoffe und Hilfsbaustoffe. Mit den früheren Blättern der Wärmeleitzahlen von Isolierstoffen und feuerfesten Steinen sind damit alle praktischen Wärmeverlustrechnungen durchzuführen.

Blatt 9d ist ein Diagramm zur „Ermittlung der Pécletschen Zahl". Damit sind alle wichtigen dimensionslosen Kenngrößen, wie Reynolds, Prandtl, Grashof und Péclet graphisch dargestellt.

Blatt 15d bringt die „Widerstandsbeiwerte von Ventilen und Schiebern" (Bild 1). Im Schrifttum waren bisher nur wenige Angaben darüber zu finden, und diese waren meist unvollkommen und auch für den gleichen Armaturentyp sehr widersprechend. Die in den Wärmeatlas aufgenommenen ξ-Werte entstammen einer neueren russischen Arbeit von Murin, in der Geradsitz- und Schrägsitzventile sowie Parallelschieber sehr eingehend untersucht sind. Die Prüflinge sind natürlich russischen Fabrikats, stimmen aber in der Form weitgehend mit unseren deutschen Fabrikaten überein. Im untersuchten Re-Bereich, d. i. im Gebiete gewöhnlicher Wasserströmung, sind die Widerstandsbeiwerte konstant. Es muß sich also schon um hochturbulente Strömung handeln. Eine Extrapolation über den Versuchsbereich hinaus, insbesondere nach kleineren Re-Werten, ist nicht erlaubt, da hier wesentlich höhere ξ-Werte zu erwarten sind. In den rechten Figuren sind noch die Drosselkurven der Ventile angegeben, die im Schrifttum sonst nicht zu finden sind.

Blatt 16b ermöglicht die Berechnung des Wärmeüberganges bei freier Strömung um horizontale Rohre und Drähte". In den Atlas wurde die dimensionslose Darstellung aufgenommen, bei der die Nusseltsche Kenngröße abhängig vom Produkt Gr. Pr²

[1]) Die Bilder dieses Aufsatzes sind, um Platz zu sparen, in stark verkleinertem Maße wiedergegeben, da sie im Wärmeatlas in normaler Ausführung gut leserlich enthalten sind.

dargestellt ist (Bild 2). Die Gesetzmäßigkeit ist über zwölf Dekaden logarithmischer Teilung experimentell gut belegt, wie eine Zusammenstellung von Fishenden und Saunders zeigt. Eine ältere Bearbeitung der deutschen Versuche von Nusselt weicht nur wenig von den Amerikanern ab. Im Wärmeatlas wurde die amerikanische Kurve verarbeitet, nur für sehr kleine Gr. Pr²-Werte wurde die Nusseltsche

trischen Zylinder umgeben ist. Die im Bild 2 gezeigte Funktion Nu = f (Gr. Pr²) ist jetzt um eine weitere unabhängige Veränderliche, das Durchmesserverhältnis d_a/d_i beider Zylinder, vergrößert worden. Man erhält jetzt (Bild 3) das Bild einer Schar paralleler gerader Linien, die alle in eine gemeinsame Kurve einmünden. Trifft man bei einer praktischen Berechnung, ausgehend von Gr. Pr², auf

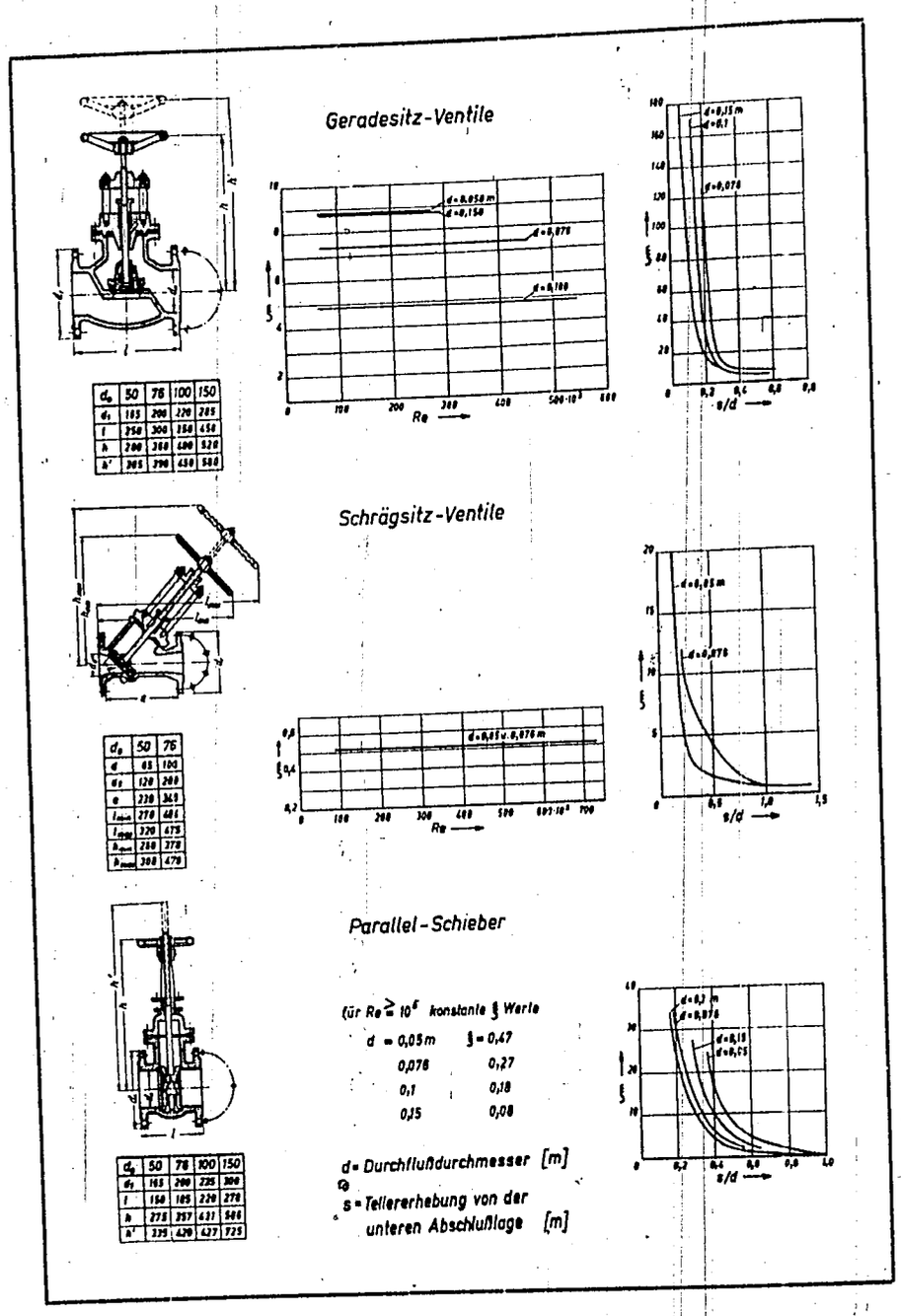


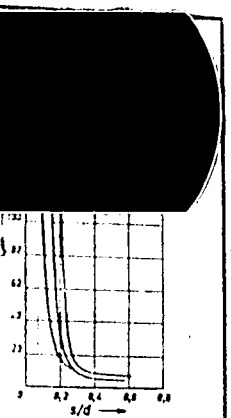
Bild 1. Widerstandsbeiwerte ζ von Ventilen und Schiebern

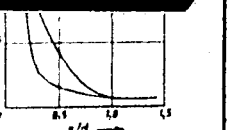
Kurve bevorzugt. Den Versuchen von Ackermann an einem horizontalen Rohr in Wasser war noch zu entnehmen, daß die Gesetzmäßigkeit auch für Flüssigkeiten gültig ist.

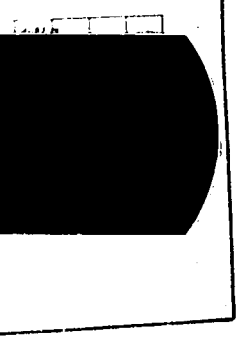
Blatt 16c zeigt die Berechnung des „Wärmeüberganges bei freier Strömung in horizontalen zylindrischen Schichten", d. i. also der Fall eines horizontalen Zylinders, der von einem zweiten konzen-

eine dieser Geraden, so weiß man, daß im Spalt nur reine Wärmeleitung vorhanden ist. Trifft man auf die Kurve, so weiß man, daß neben Leitung auch Konvektion vorhanden ist. — Das Diagramm basiert auf Versuchen von W. Beckmann. In der Originalarbeit waren die äquivalenten Wärmeleitzahlen λ für Leitung und Konvektion, abhängig von Gr, angegeben. Ich habe aus den Versuchswerten das vorliegende Diagramm entwickelt, da es mir

umgeben ist. Die im Bild 2 ge-
= f (Gr. Pr²) ist jetzt um eine weitere
derliche, das Durchmesserverhältnis
r, vergrößert worden. Man erhält jetzt
er Schar paralleler gerader Linien, die
eine Kurve einmünden. Trifft man bei
rechnung, ausgehend von Gr.Pr², auf







ebern

n, so weiß man, daß im Spalt nur reine
handen ist. Trifft man auf die Kurve,
neben Leitung auch Konvektion vor-
iert auf Versuchen von
aren die äquivalen-
und Konvektion,
us den Versuchs-
wickelt, da es mir

für die Praxis zweckmäßiger erschien. Man kann nämlich zu diesen α-Werten sehr einfach die α-Werte der parallelen Strahlung addieren.

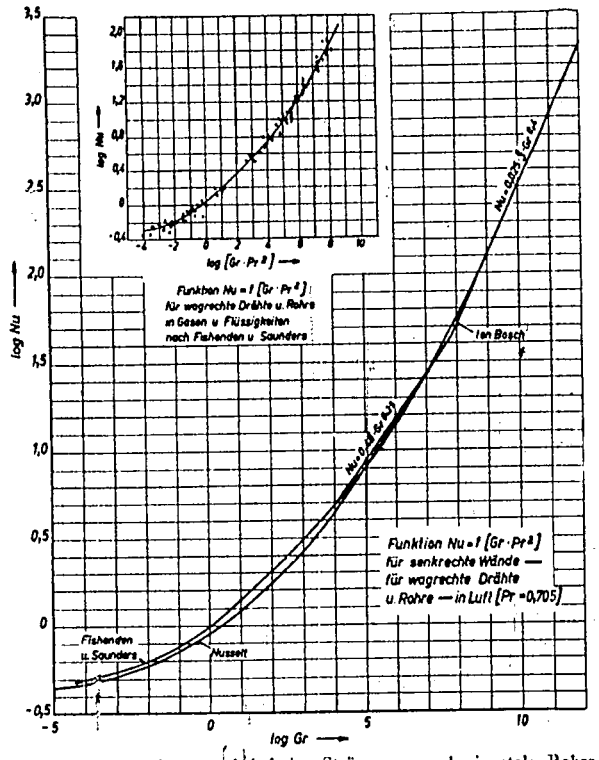
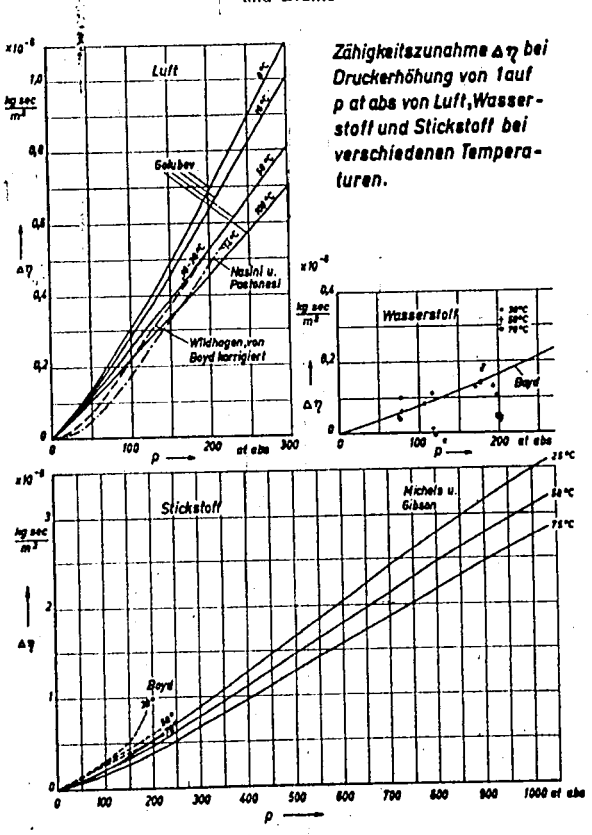


Bild 2. Wärmeübergang bei freier Strömung um horizontale Rohre und Drähte



Zähigkeitszunahme Δη bei Druckerhöhung von 1 auf p at abs von Luft, Wasserstoff und Stickstoff bei verschiedenen Temperaturen.

Bild 4.
Druckabhängigkeit der Zähigkeit von Luft, Wasserstoff und Stickstoff

Die neuen Betriebsfälle behandeln einige Röhrenwärmeaustauscher von 50, 250 und 500 m² Oberfläche in Kreuzstrom-Gegenstrom-Schaltung. Die Versuchswerte liegen vor für Ammoniak-Luft-Gemische gegen Nitrose-Gase sowie für Wasserstoff gegen Wasserstoff-Butanol. Außerdem ist noch ein Wasserdampfüberhitzer von 45 m² gegen Nitrose-Gase behandelt.

Fertiggestellt, aber noch nicht herausgegeben sind zwei Blätter über Wärmeübergang und Druckverlust am Merseburger Einheitskühler, sowie mehrere Blätter über die Gasstrahlung und Flächenstrahlung.

Die Stoffwertesammlung ist durch die folgenden Blätter ergänzt worden:

Blatt IB5. „Dynamische Zähigkeit von Luft, Wasserstoff und Stickstoff". In einer Neubear-

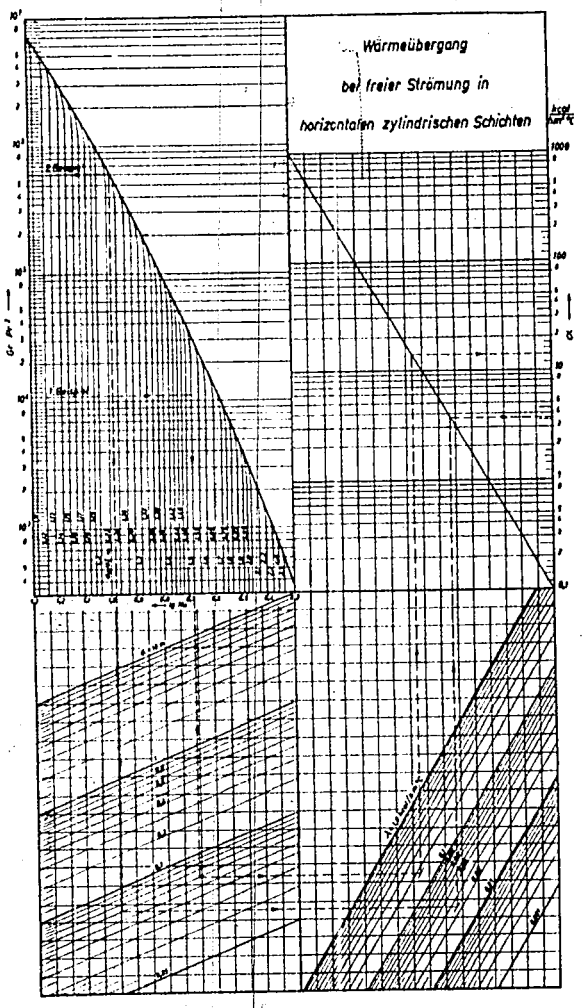


Bild 3. Wärmeübergang bei freier Strömung in horizontalen zylindrischen Schichten

beitung verschiedener Forschungsarbeiten konnte hier vor allem das Gebiet sehr hoher Drücke dargestellt werden. In Bild 4 ist die Druckabhängigkeit von η für verschiedene Temperaturen dargestellt. — Bei Stickstoff konnten die Versuche von Michels u. Gibson bis zu 1000 at verwertet werden, während die Boyd'schen Meßwerte, vor allem bei 30° C, zweifelsohne fehlerhaft sind. Die Ungenauigkeit der Meßwerte von Boyd ist auch beim Wasserstoff zu erkennen, wo für das Atlasdiagramm eine Mittelkurve durch alle Temperaturen angenommen wurde. — Bei Luft konnten die neueren russischen Messungen von Golubev als Grundlage verwertet werden, die eine wesentliche Erweiterung gegenüber den älteren Messungen von Nasini u. Pastonesi sowie von Wildhagen darstellen.

Blatt IB11 bringt die „Dynamische Zähigkeit von Wasser" im flüssigen, gesättigten und überhitzten Gebiet. Während die Zähigkeit im flüssigen Zustand seit langem gut bekannt ist, war das Gebiet des überhitzten Dampfes bis vor kurzem noch völlig ungeklärt. Eine neue amerikanische Arbeit von Hawkins, Solberg und Potter scheint jetzt endlich zuverlässige Werte bis zu 500° C und bis zu 100 at ergeben zu haben. Sie wurde daher auch dem neuen Stoffatlasblatt zu Grunde gelegt. In Bild 5 sind die Meßwerte der früheren Arbeiten vergleichsweise eingezeichnet. In guter Übereinstimmung mit den Amerikanern stehen nur die Werte von Speyerer, alle übrigen Forscher weichen weitgehendst voneinander ab, ohne daß eine Einordnung nach Meßverfahren möglich wäre. Herr Dr. Speyerer selbst wird morgen über dieses interessante Gebiet der Stoffgrößenforschung einen Vortrag halten.

Die Blätter IC7 und IC8 (Bild 6) geben eine Zusammenstellung der „Spezifischen Wärme von Elementen und anorganischen Stoffen". Die Kurven sind als beste Werte aus zahlreichen Literaturangaben zusammengestellt. Nach Möglichkeit wurde für jeden Stoff die spezifische Wärme im idealen Gaszustand, an der Grenzkurve gasförmig — fest und an der Grenzkurve gasförmig — flüssig eingezeichnet. An den Schmelzpunkten weisen die Grenzkurven Sprünge auf, ebenso sind an den Umwandlungspunkten Unendlichkeitsstellen. Die spezifischen Wärmen sind teilweise kalorimetrisch bestimmt, teilweise aus spektroskopischen Messungen berechnet. Über das letztere Verfahren wird Herr Regierungsrat Dr. Justi eingehend berichten.

Blatt IH1 umfaßt in einer Tabelle alle anorganischen Stoffe, die für den Wärmeübergang von Interesse sind. Darin sind die Molekulargewichte, Schmelz- und Siedepunkte sowie die kritischen Daten angegeben. Alle Zahlen sind als wahrscheinlich zuverlässigste Werte aus zahlreichen Literaturquellen ausgesucht. Die Blätter IF1 bis IF12 enthalten die „Kompressibilitätsbeiwerte von Sauerstoff, Stickstoff, Luft, Wasserstoff, Kohlenoxyd, Koh-

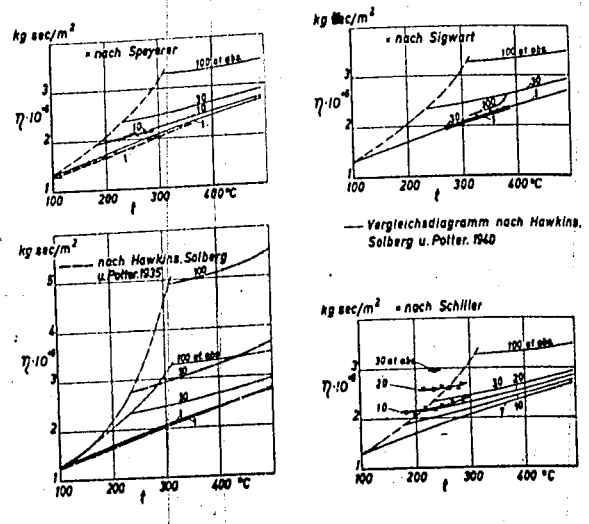


Bild 5.
Zähigkeit von Wasserdampf (nach Messungen verschiedener Forscher)

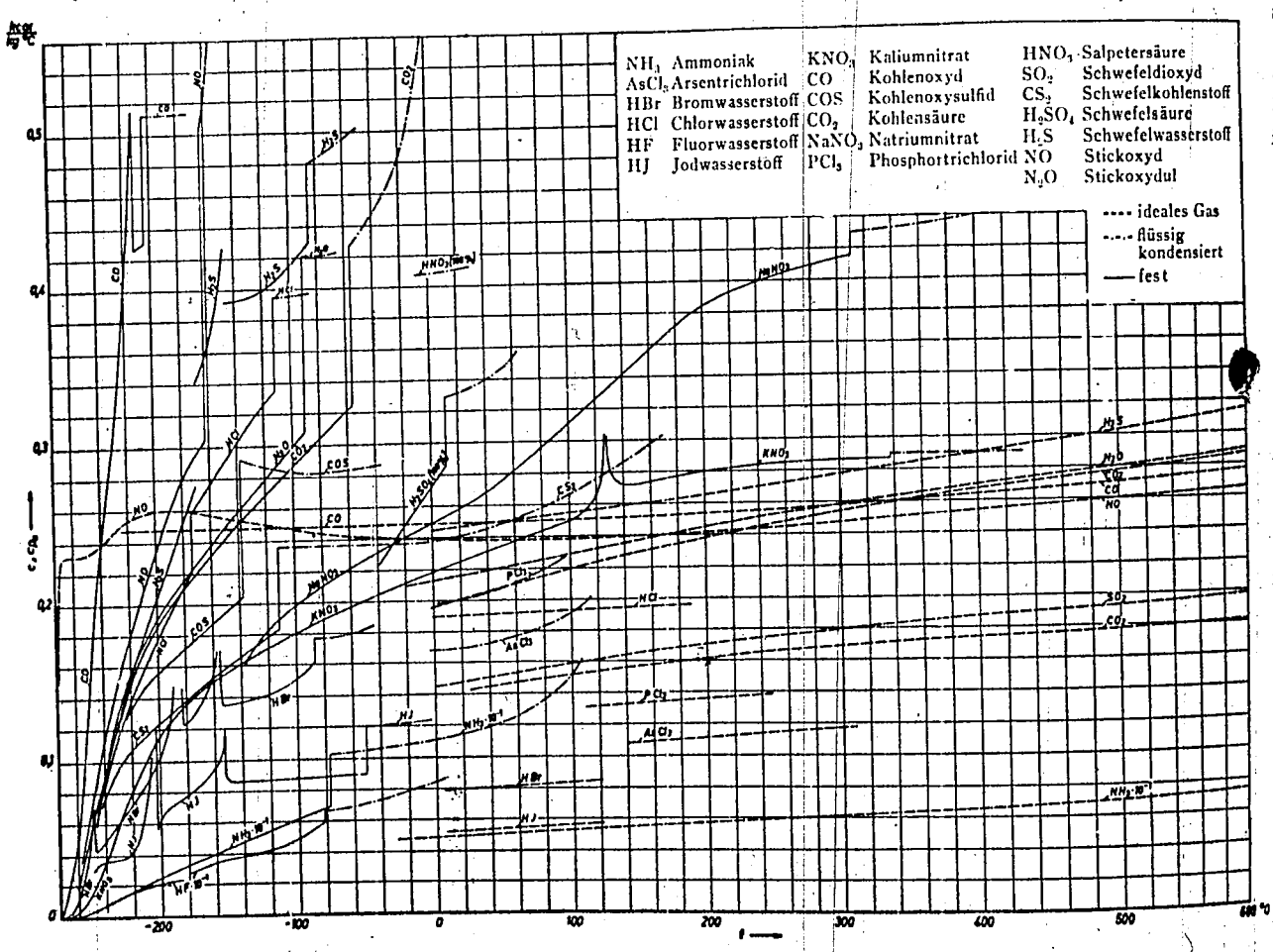
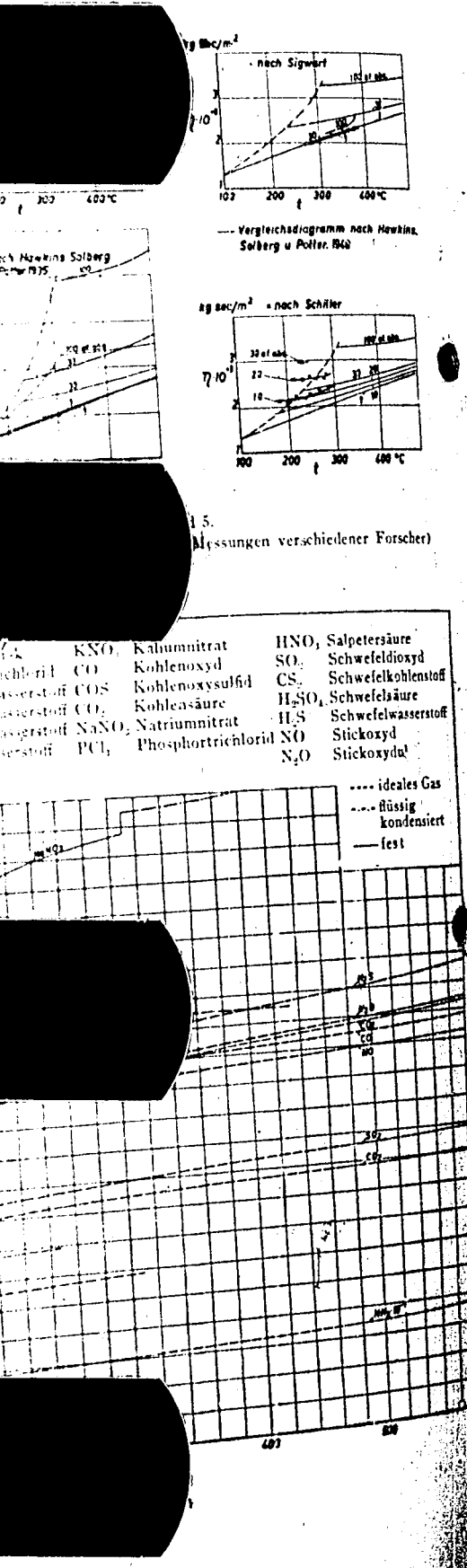


Bild 6. Spezifische Wärme von anorganischen Verbindungen

H1 umfaßt in einer Tabelle alle anorga-
toffe, die für den Wärmeübergang von
ind. Darin sind die Molekulargewichte,
d Siedepunkte sowie die kritischen Daten an-
lle Zahlen sind als wahrscheinlich zuver-
erte aus zahlreichen Literaturquellen ausge-
Blätter IF1 bis IF12 enthalten die „Kom-
itätsbeiwerte von Sauerstoff, Stick-
ft, Wasserstoff, Kohlenoxyd, Koh-



1 5.
Messungen verschiedener Forscher)

	KNO_3	Kalumnitrat	HNO_3	Salpetersäure
chlorid	CO	Kohlenoxyd	SO_2	Schwefeldioxyd
sserstoff	COS	Kohlenoxysulfid	CS_2	Schwefelkohlenstoff
sserstoff	CO_2	Kohlensäure	H_2SO_4	Schwefelsäure
sserstoff	$NaNO_3$	Natriumnitrat	H_2S	Schwefelwasserstoff
erstoff	PCl_3	Phosphortrichlorid	NO	Stickoxyd
			N_2O	Stickoxydul

lensäure, Ammoniak, Methan, Acetylen, Aethylen, Propylen und Wasserdampf". Die Diagramme sind dem „Handbuch der praktischen Betriebskontrolle", einer Neuauflage des „Chemie-Ingenieur", entnommen worden und wurden uns im Original von Herrn Dr. Witte zur Verfügung gestellt. In einem Fall, für Stickstoff, konnte das Diagramm bis in das Gebiet höchster Drücke von uns erweitert werden (Bild 7) und auch eine Extrapolation weit über die experimentell erfaßten Temperaturgrenzen hinaus durchgeführt werden. Die Extrapolation erfolgte graphisch aus den Auftragungen der P-V-Werte sowohl über dem Druck wie über der Temperatur. Berücksichtigt wurden alle Versuchspunkte der Isothermenmessungen von Kammerlingh-Onnes und von Urk, Amagat, Bartlett und Mitarbeitern und von Michels und Mitarbeitern. Eine Isotherme von Bridgman reichte sogar bis zu 16 000 at hinauf. Es wurde erst ein vollständiges P-V-Diagramm entwickelt und daraus dann das im Bild dargestellte Diagramm der Kompressibilitätsbeiwerte K errechnet, das jetzt in seiner einfachen Form nichts mehr von den langwierigen Vorarbeiten und Zwischenrechnungen erkennen läßt. Ich habe diese Bearbeitung gerade für Stickstoff durchgeführt, da hierfür im Höchstdruckgebiet innerhalb der I. G. ein besonderes praktisches Interesse vorhanden ist.

Zum Schluß möchte ich noch die Blätter IK1 bis IK9 erwähnen, die die „Dampftabellen von Ammoniak, Äthan, die Freone 11, 12 und 13, Kohlensäure, Methyl- und Methylenchlorid, Quecksilber, Wasser und Schweflige Säure" enthalten. Die Tabellen wurden vollständig aus der Literatur übernommen, nur in einigen Fällen wurden aus den spezifischen Volumen die Wichten errechnet, so daß alle Tabellen in einheitlicher Form zusammengestellt sind.

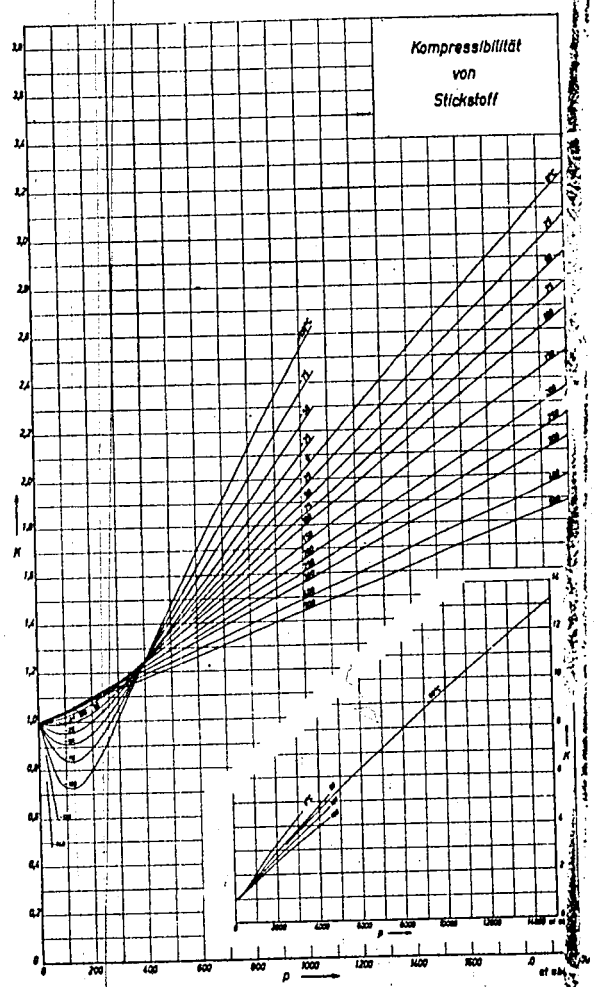


Bild 7. Kompressibilität von Stickstoff

Überschlagsberechnungen von Wärmeaustauschern

Von Dipl.-Ing. WERNER MATZ

Für Überschlagsberechnungen von Wärmeaustauschern, wie sie stets bei Aufstellung von Kostenvoranschlägen und häufig im praktischen Betrieb durchgeführt werden müssen, ist ein schnelles Auffinden der Gesamtwärmedurchgangszahl k [kcal/m²hgrad] Haupterfordernis. Der durch Verkrustung oder Verschleimung der Kühlwasserrohre erhöhte Wärmeleitwiderstand ist häufig erheblich größer als der Wärmeübergangswiderstand der beiden Flüssigkeiten, so daß die Berechnung eines einzigen mittleren Wärmedurchgangswiderstandes für verschiedene Verhältnisse oft genügt. Ferner bringen der wählbare mittlere Temperaturunterschied, die Wahl der Flüssigkeitsgeschwindigkeit, die Rücksichtnahme auf Reserve und Normalisierung eine gewisse Freizügigkeit in die Größenbestimmung von Wärmeaustauschflächen, so daß die Benutzung einer gröberen Methode für Überschlagsberechnungen berechtigt erscheint.

I. Zugrundegelegte Annahmen

A. Temperaturen

a) Kühlwasser

Kühlwassertemperatur beim Eintritt $t_e = 25°$ C.
Kühlwassertemperatur beim Austritt $t_a = 50°$ C.

Bei Gas- und Flüssigkeitskühlern soll die Temperatur der gekühlten Flüssigkeit $t_k = 35°$ C betragen.

Zur Berechnung des mittleren Temperaturunterschiedes ϑ_m aus den beiden Grenzwerten ϑ_a und ϑ_e, wobei $x = \vartheta_a : \vartheta_e > 1$, verwendet man die Formel:

$(\vartheta_m)_{log} = \varphi \cdot (\vartheta_m)_{ar}$ logarithmischer Mittelwert

$(\vartheta_m)_{ar} = \frac{\vartheta_a + \vartheta_e}{2}$ arithmetischer „

φ kann der beiliegenden zeichnerischen Darstellung entnommen werden. Bis zu einem Wert von $x = \vartheta_a : \vartheta_e = 2$ kann ohne großen Fehler $\varphi = 1$ gesetzt und das arithmetische Mittel $(\vartheta_m)_{ar}$ benutzt werden. Bei $x = 2$ wird ϑ_m dann ϑ_m um 4% zu groß ermittelt.

b) Kältesole

Die kühlende Kältesole geht mit — 12° C dem Wärmeaustauscher zu und verläßt ihn mit — 6° C.

B. Geschwindigkeiten

Als mittlere Geschwindigkeit für das Kühlwasser in den Rohren wird angenommen w = 0,5 [m/sec].

Die senkrecht zu den Rohren strömende Flüssigkeit wird als ruhende Flüssigkeit angesehen.

C. Wärmeübergangszahl α für strömendes Wasser in den Rohren

Für die turbulente Strömung des Wassers mit w = 0,5 [m/sec] durch die Rohre und einer Wärmeströmung von der Wand zur Flüssigkeit gilt nach Wärmeatlas 1. Band Teil I „zu Blatt 1a und 1b" Formel 2b:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = 0{,}032 \cdot \left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}8} \cdot \left(\frac{\eta g c}{\lambda'}\right)^{0{,}37} \left(\frac{d}{L}\right)^{0{,}054}$$

Für Wasser zwischen 25° C und 50° C mit w = 0,5 [m/sec] und normalen Rohrdurchmesser d = 25 mm wird hiernach

$$\alpha = 2500 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

D. Wärmeübergangszahl α für langsam senkrecht zu den Rohren strömendes Wasser

α wird hierfür nach der Formel für ruhendes Wasser nach Hütte 26. Aufl. Band I S. 500:

$$\alpha = 0{,}468 \sqrt[4]{G \cdot \lambda/d} \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}$$

mit $G = b_w \, d^3 (\vartheta_w - \vartheta_f)$ (G = Grashofsche Zahl)

ϑ_w = Wandtemperatur

ϑ_f = Flüssigkeitstemperatur.

Für mittlere Werte von $\vartheta = \frac{\vartheta_w + \vartheta_f}{2}$ von 50° ist $b_w = 7{,}20 \cdot 10^{10}$. Man errechnet für $\vartheta_w - \vartheta_f = 20°$ C einen Wärmeübergangswert von

$$\alpha = 630 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

E. Annahmen über Verkrustungen

Eine 0,5 mm starke gallertartige Schicht in den Wasserrohren wird angenommen. Diese Schicht hat ein $\lambda = 0{,}3$ [kcal/m h grad]. Bei Kältelauge wird die Schicht 0,75 mm mit $\lambda = 0{,}4$ [kcal/m h grad] angenommen.

F. Verdampfapparate

Als brauchbarer Mittelwert wird nach Nusselt, Jakob und Kirschbaum innerhalb der Grenzen für Temperaturen und Geschwindigkeiten, die in den Dampfräumen der Verdampfer obwalten, bei Hautkondensation gewählt für die Dampfseite:

$$\alpha_a = 5500 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

Da für den Wärmeübergang von der Wand an die siedende Flüssigkeit keine vollkommen gesicherte Formel besteht, wird als Mittelwert für die chemische Industrie geschätzt:

$$\alpha_i = 1000 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

II. Berechnung der Wärmedurchgangszahlen k

1. Verdampfer

Mit Rohrwandstärke δ = 2,5 mm der Eisenrohre ($\lambda = 50$ [kcal/m h grad]), $\alpha_a = 5500$ [kcal/m² h grad] und $\alpha_i = 1000$ [kcal/m² h grad] wird:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{1000} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{5500}$$

$$k = 800 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

Verkrustungen der Rohre durch Auskristallisieren müssen gesondert berücksichtigt werden.

2. Kondensator mit Wasser

Für Wärmeübergang auf der Dampfseite:

$$\alpha_a = 4000 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]},$$

für Wärmeübergang auf der Wasserseite:

$$\alpha_i = 2500 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

Rohre werden als 2,5 mm dicke Eisenrohre ($\lambda = 50$) mit 0,5 mm dicker Gallerteschicht ($\lambda = 0{,}3$) angenommen.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \Sigma \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2500} + \frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{4000}$$

Hieraus k = 500 [kcal/m² h grad].

3. Flüssigkeitskühler mit Wasser

Wärmeübergang auf der Wasserseite

$$\alpha_i = 2500 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]},$$

Wärmeübergang auf der Flüssigkeitsseite mit langsamer Strömung $\alpha_a = 630$ [kcal/m² h grad].

Eisenrohre δ = 2,5 mm, $\lambda = 50$, Gallerteschicht 0,5 mm mit $\lambda = 0{,}3$ [kcal/m h grad]:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2500} + \frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{630}$$

Hieraus k = 270 [kcal/m² h grad];
gerechnet wird mit k = 250 [kcal/m² h grad].

4. Gaskühler mit Wasser

Beim Gaskühler muß der Wärmeübergang auf der Gasseite nach Wärmeatlas, 1. Band, Teil I, Blatt 5a, gerechnet werden:

$$\alpha_a = 0{,}131 \cdot \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}69}$$ senkrecht zu den Rohren.

Für die Wasserseite ist $\alpha_i = 2500$ [kcal/m² h grad] in den Rohren; gerechnet wird mit Eisenrohr 2,5 mm stark, $\lambda = 50$, und 0,5 mm starker Gallerteschicht mit $\lambda = 0{,}3$ [kcal/m h grad]:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2500} + \frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{\alpha_a} = \frac{1}{470} + \frac{1}{\alpha_a};$$

hieraus muß k errechnet werden.

5. Doppelrohrkühler für Flüssigkeiten

Wärmeübergang auf der Wasserseite

$$\alpha_a = 2500 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

Wärmeübergang auf der Flüssigkeitsseite

$$\alpha_i = 2500 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]}.$$

Eisenrohre ($\lambda = 50$, δ = 2,5 mm), Gallerteschicht 0,5 mm mit $\lambda = 0{,}3$:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2500} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{1}{2500};$$

hieraus k = 400 [kcal/m² h grad].

6. Wärmeaustauscher für Flüssigkeiten

Für Strömung um die Rohre $\alpha_a = 630$ [kcal/m² h grad]; für Strömung durch die Rohre nach Wärmeatlas 1. Band, Teil I, „zu Blatt 1a und 1b", Formel 2b:

$$\alpha_i = \cdot\, 0{,}032 \, \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}8} \cdot \left(\frac{\eta g c}{\lambda'}\right)^{0{,}37} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0{,}054}$$

Eisenrohre δ = 2,5 mm, $\lambda = 50$:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{630} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{615}.$$

Temperaturunterschiede ϑ_a und ϑ_e zur Vermeidung von Nichtumkehrbarkeiten klein, praktische Werte 15—25°C.

[redacted]

...erseite:

...h grad].

...als 2,5 mm dicke Eisenrohre ($\lambda = 50$) mit ...Gallerteschicht ($\lambda = 0{,}3$) angenommen.

$$\frac{1}{\alpha_i} + \Sigma\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}$$

$$\frac{1}{500} + \frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{4000}$$

...500 [kcal/m² h grad].

...ssigkeitskühler mit Wasser

...Wasserseite

...cal/m² h grad],

...sigkeitsseite mit lang-

...m² h grad].

... 50, Gallerteschicht

...d]:

$$\frac{1}{2500} + \frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{630}$$

...270 [kcal/m² h grad];

...l mit k = 250 [kcal/m² h grad].

...3. Gaskühler mit Wasser

...kühler muß der Wärmeübergang auf der ...Wärmeatlas, 1. Band, Teil I, Blatt 5a, ge-...:

$\lambda \left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}69}$ ...enkrecht zu den Rohren.

... = 2500 [kcal/m² h grad] ...mit Eisenrohr 2,5 mm ...Gallerteschicht mit λ =

$$\frac{1}{\alpha_i} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{\alpha_a} = \frac{1}{470} + \frac{1}{\alpha_a};$$

$$\frac{1}{0{,}3}$$

... errechnet werden.

...elrohrkühler für Flüssigkeiten

...ergang auf der Wasserseite

...a = 2500 [kcal/m² h grad].

...bergang auf der Flüssigkeitsseite

...i = 2500 [kcal/m² h grad].

...e (λ = 50, δ = 2,5 mm), Gallerteschicht

$$\frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{1}{2500};$$

...r Flüssigkeiten

α_a = 630 [kcal/m² h grad];

... durch die Rohre nach Wärmeatlas 1. Band, ...latt 1a und 1b", Formel 2b:

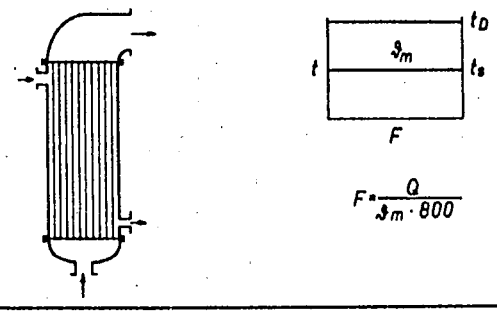
$$\ldots 032\ \frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}8}\cdot\left(\frac{\eta gc}{\lambda'}\right)^{0{,}37}\cdot\left(\frac{d}{L}\right)^{0{,}054}$$

... = 2,5 mm, λ = 50:

$$\frac{1}{\alpha_i} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{630} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{615}.$$

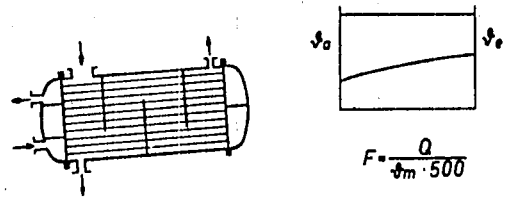
...turunterschiede ϑ_a und ϑ_e zur Vermeidung ...chbarkeiten kleine praktische Werte 15—25°C.

1 Verdampfer



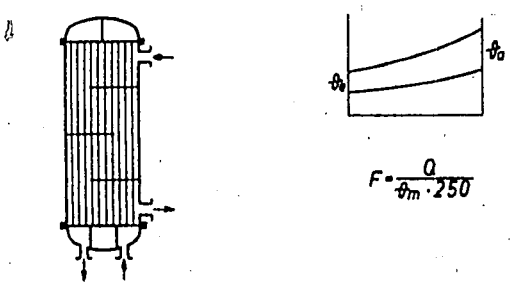
$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot 800}$$

2 Kondensator mit Wasser



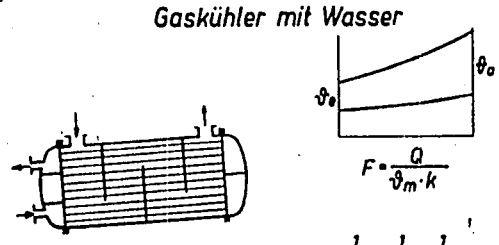
$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot 500}$$

3 Flüssigkeitskühler mit Wasser



$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot 250}$$

4 Gaskühler mit Wasser

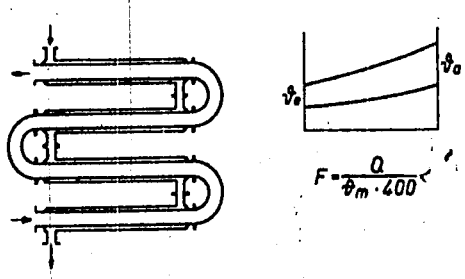


$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot k}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{470} + \frac{1}{\alpha_a}$$

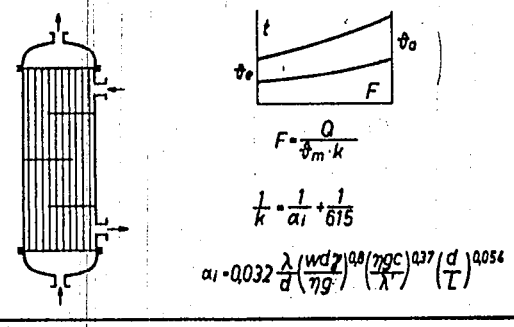
$$\alpha_a = 0{,}131\,\frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}69}$$

5 Doppelrohrkühler mit Wasser



$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot 400}$$

6 Wärmeaustauscher für Flüssigkeiten

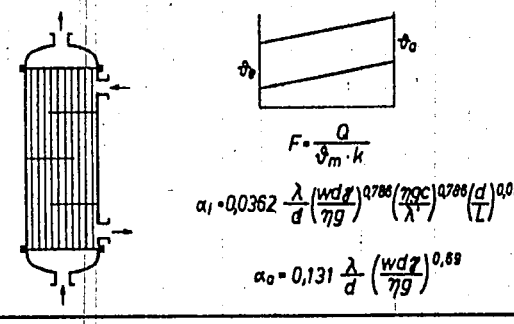


$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot k}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{615}$$

$$\alpha_i = 0{,}032\,\frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}8}\left(\frac{\eta gc}{\lambda'}\right)^{0{,}37}\left(\frac{d}{L}\right)^{0{,}054}$$

7 Wärmeaustauscher für Gase

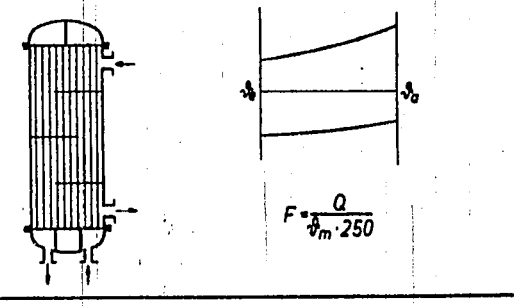


$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot k}$$

$$\alpha_i = 0{,}0362\,\frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}788}\left(\frac{\eta gc}{\lambda'}\right)^{0{,}788}\left(\frac{d}{L}\right)^{0{,}054}$$

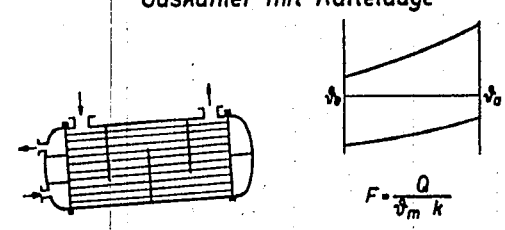
$$\alpha_a = 0{,}131\,\frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}69}$$

8 Flüssigkeitskühler mit Kältelauge



$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot 250}$$

9 Gaskühler mit Kältelauge

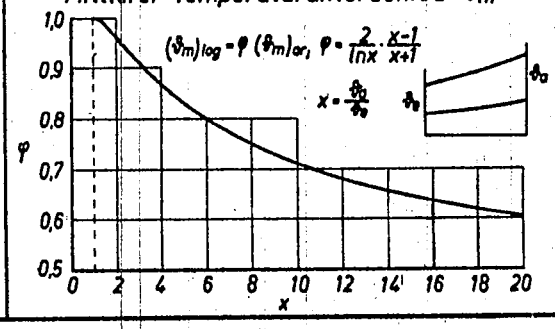


$$F = \frac{Q}{\vartheta_m \cdot k}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{400} + \frac{1}{\alpha_a}$$

$$\alpha_a = 0{,}131\,\frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}69}$$

Mittlerer Temperaturunterschied ϑ_m



Überschlagsberechnung von Wärmeaustauschern

7. Wärmeaustauscher für Gase

Für Strömung um die Rohre nach Wärmeatlas, 1. Bd., Teil I, Blatt 5a:

$$\alpha_a = 0{,}131 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}69};$$

für Gasströmung durch die Rohre nach Wärmeatlas, 1. Bd., Teil I, Blatt 2, Formel 1a:

$$\alpha_i = 0{,}0362 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}786} \cdot \left(\frac{\eta g c}{\lambda'}\right)^{0{,}786} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0{,}054}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{20000} + \frac{1}{\alpha_a}.$$

8. Flüssigkeitskühler mit Kältelauge

Für Strömung der Kältelauge durch die Rohre kommt in Betracht Wärmeatlas, 1. Band, Teil 1, Blatt 1a und 1b, Formel 2b; gerechnet wird mit

$w = 0{,}5$ [m/sek], $\nu = 3{,}54 \cdot 10^{-6}$ [m²/sek],

$\lambda = 0{,}9$ [kcal/mh grad], $d = 0{,}025$, $d : L = 25:3000$,

$\gamma = 1150$ [kg/m³], $c = 1{,}19$ [kcal/kg grad]:

$$\alpha_i = 1900 \text{ [kcal/m² h grad]}.$$

Für Flüssigkeitsströmung um die Rohre: $\alpha_a = 630$ [kcal/m² h grad].

Wegen der Verwendung der Kältelauge ist die Gallerteschicht dicker, 0,75 mm, die Wärmeleitung etwas besser, $\lambda = 0{,}4$. Hieraus errechnet sich k:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{1900} + \frac{0{,}00075}{0{,}4} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{630}$$

$$k = 250 \text{ [kcal/m² h grad]}.$$

9. Gaskühler mit Kältelauge

Für Strömung innerhalb der Rohre ist wie unter 8)

$$\alpha_i = 1900 \text{ [kcal/m² h grad]}.$$

Für Gasströmung um die Rohre muß nach Wärmeatlas, 1. Band, Teil I, Blatt 5a, gerechnet werden:

$$\alpha_a = 0{,}131 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd\gamma}{\eta g}\right)^{0{,}69}.$$

Auf der Flüssigkeitsseite muß mit Gallerteschicht von 0,75 mm Dicke mit $\lambda = 0{,}4$ gerechnet werden:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{1900} + \frac{0{,}00075}{0{,}4} + \frac{0{,}0025}{50} + \frac{1}{\alpha_a}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{400} + \frac{1}{\alpha_a}.$$

Aussprache:

Wilke befürchtet, daß bei Aufnahme des Merkblattes in den Wärmeatlas nach den angenäherten Angaben dieses Blattes auch dort gerechnet wird, wo eine genauere Rechnung am Platze ist. Der Sinn des Wärmeatlasses, die Rechnungen möglichst genau durchzuführen, kann hierdurch leicht gestört werden.

Kießkalt führt aus, daß der Kreis der Benutzer solcher Unterlagen größer geworden sei. Für Vorprojekte und Entwürfe seien die Höchster Merkblätter von Vorteil. Auch bestände in der Größe der Austauscher eine gewisse Normung.

Sauer weist auf den Einfluß der Leitbleche, ihrer Abschnitte und Abstände hin.

Matz erklärt, daß außen meist ohnehin eine kleine Geschwindigkeit herrsche und daher der Einfluß der Leitbleche nicht allzu groß sei. Auf die durch die Leitbleche erzeugten Wirbelgebiete wird hingewiesen.

Sauer betont, daß Wasser von 60° C bereits zu aggressiv sei.

Hahn ergänzt dies dahin, daß bei 60° C schon Verkrustungen eintreten. Wichtig sei, wie oft der Austauscher gereinigt werden könne bzw. werde. Er schlägt ferner vor, die Wassergeschwindigkeit einzuschreiben.

Hahn erklärt es ferner für vorteilhaft, keine zu langen Wasserwege anzuwenden und überhaupt lieber kleinere Austauschereinheiten zu benutzen, um die Betriebsausfälle zu verringern.

Hegelmann unterscheidet zwei Möglichkeiten der Austauscherberechnung: entweder die Berechnung nach der Theorie mit beträchtlichen Zuschlägen oder die Hereinnahme der Sicherheiten in die einzelnen Annahmen ohne nachherige größere Zuschläge. Die zweite Art hält er für vorteilhafter.

Kling betont, daß die Höchster Blätter eingehende Berechnungen nach dem Wärmeatlas nicht ersetzen können. Sie sind jedoch sehr zweckmäßig für schnelle Überschlagsrechnungen. Begrüßenswert ist auch die klare und übersichtliche Zusammenstellung der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der Röhrenwärmeaustauscher, die sonst nirgends zu finden ist.

Kraussold hält die Blätter für vorteilhaft bei Voranschlägen, wo es mehr auf Größenordnungen ankommt, während bei der Ausführung die genaue Rechnung einzutreten habe.

Matz stimmt dem bei und führt noch aus, daß auch bei Versuchen und Messungen immer genau vorgegangen werde.

Diagramme zur Bestimmung der Wandrückstrahlung bei beheizten Behältern

Von Oberingenieur Dipl.-Ing. RUDOLF KEINKE

Inhalt:

Die Wandrückstrahlung darf bei beheizten Gefäßen selbst bei niedrigen Temperaturen für eine genaue Berechnung der Wärmeübertragung nicht vernachlässigt werden.

Die vom Verfasser entwickelten Diagramme zur Bestimmung der Wandrückstrahlung werden beschrieben und ihre Anwendung durch einige Beispiele gezeigt.

Vor etwa zwölf Jahren stellte ich mir die Aufgabe, eine Gasspaltretorte in bezug auf ihre Spaltleistung vorauszuberechnen. Hierbei stellte ich zu meiner Überraschung fest, daß bei mit Gasen beheizten Gefäßen, die von Wänden umgeben sind, wie es die fragliche Retorte darstellte, schon bei Wandtemperaturen, die weit unter sichtbarer Glut liegen, durch die Wandstrahlung ein sehr stark erhöhter Wärmeübergang auftritt. Die Wärme-

strahlung fester Körper bei tiefen Temperaturen wird vielfach beim Entwurf technischer Öfen als unerheblich abgetan. Daß dies nicht zulässig ist, zeigt Ihnen Bild 1. In ihm ist als Ordinate die Gesamt-Wärmestrahlung des absolut schwarzen Körpers gegen den absoluten Null-

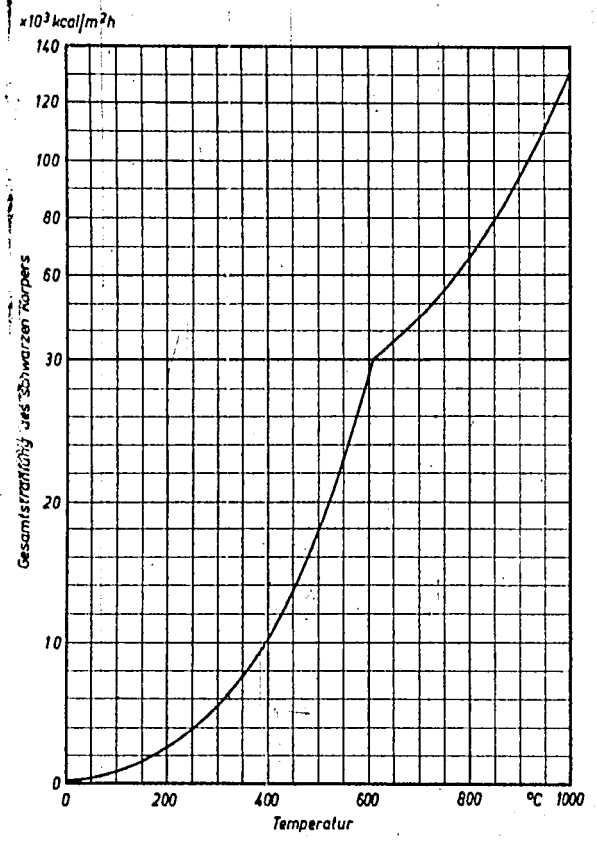


Bild 1. Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers

punkt aufgetragen. Die technischen Werte liegen etwa 25 bis 30 % niedriger. Sie sehen, daß z. B. die Gesamtstrahlung bei 500° C 17 700 kcal/m² Std. beträgt. Steht nun einer Wand, die diese Temperatur von 500° C hat, eine solche von 400° C mit einer Gesamtstrahlung von 10 100 kcal/m² Std. gegenüber, so strahlt der Differenzbetrag von 7600 kcal/m² Std. und bei technischen Wänden etwa 70 % davon, das sind 5400 kcal/m² Std., von der heißeren Wand auf die kältere. Sie sehen, daß schon bei diesen niedrigen, also erst recht nicht bei höheren Temperaturen die Wandstrahlung vernachlässigt werden darf. Kurz hinweisen möchte ich noch, daß diese Wandstrahlung, die man in der technischen Apparatur besser als „Wandrückstrahlung" bezeichnet, nichts mit der Gasstrahlung, die man bei der Berechnung von Reaktionsgefäßen meist, wenn man die Wandrückstrahlung einrechnet, vernachlässigen kann, zu tun hat.

Wir wollen uns nun ganz kurz ins Gedächtnis zurückrufen, wie diese Wandrückstrahlung zustande kommt, ehe wir an die Berechnung derselben gehen und ich Ihnen das in Leuna entwickelte Diagramm erläutere, das zur schnellen Ermittlung derselben führt.

Betrachten Sie die linke Seite von Bild 2. Es stellt beispielsweise ein mit Kontakt gefülltes Rohr dar, in dem ein endothermer Prozeß stattfinden soll; dieses Rohr wird in einem gewissen Abstand von der Heizraumwand umgeben. Durch den leeren Raum zwischen den beiden Wänden strömt das Heizgas. Das Ganze soll nach außen ein adiabatisches System darstellen. Die Rauchgase, die natürlich heißer als das zu beheizende Gefäß sein müssen, heizen durch direkte Berührung die Reaktionsgefäßwand, gleichzeitig natürlich auch die Schamottewand auf. Da das System adiabatisch ist, kann nach außen keine Wärme abfließen. Die Wand will sich also auf die Gastemperatur aufheizen. Sowie nun die Feuerraumwand heißer als die Gefäßwand wird, gibt sie durch Strahlung — in Zukunft als Wandrückstrahlung bezeichnet — Wärme an die Gefäßwand ab. Die Größe dieser Wandrückstrahlung hängt also von der Wandübertemperatur, die die Feuerraumwand gegen die Rohrwand hat, ab. Die Feuerraumwandtemperatur ist unbekannt; es läßt sich nur aussagen, daß sie niedriger als die Heizgastemperatur, aber höher als die Reaktionsgefäßwandtemperatur sein muß, eine Überlegung, die nicht zum Ansatz einer Gleichung zu benutzen ist. Eine Aussage jedoch über die Größe der Wandrückstrahlung führt zur Aufstellung von Gleichungen, mit Hilfe deren diese berechnet werden kann. Die von der Feuerraumwand zurückgestrahlte Wärme kann im

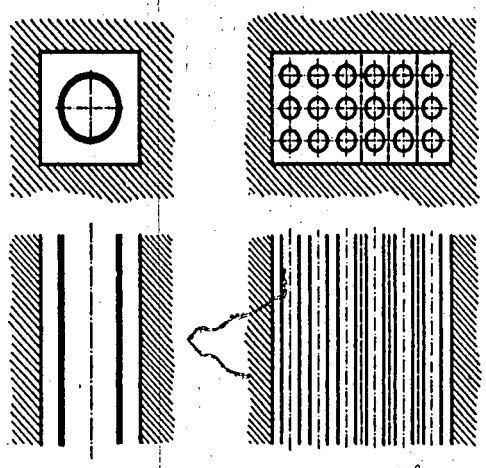


Bild 2. Einbau von beheizten Rohren in technischen Öfen

Beharrungszustand nur so groß sein, wie die durch Berührung aufgenommene. Diese Beziehung habe ich benutzt, um ein Diagramm aufzustellen, aus dem in wenigen Sekunden die Größe der Wandrückstrahlung abgelesen werden kann.

Bevor ich Ihnen dieses und seine Entstehung aufzeige, gestatten Sie mir eine kurze Zwischenschaltung über die Frage, ob diese Wandrückstrahlung unter allen Umständen durch Erhöhung des Berührungswärmeüberganges erwünscht ist, in welcher Größenordnung sie bei technischen Apparaten liegt und von welchen Faktoren sie in erster Linie abhängig ist.

In vielen Fällen ist die Wärmemenge, die durch eine Reaktionsgefäßwand hindurchgedrückt werden darf, durch die Art der Reaktion begrenzt. Steigt die Wärmebelastung der Reaktionsgefäßwand, so muß zwangsläufig bei sonst demselben Prozeß auch die Gefäßwandtemperatur steigen. Dies kann aber z. B. bei der katalytischen oder auch thermischen Dehydrierung oder Krackung von leichten Kohlenwasserstoffen, wie Äthan, Propan oder Butan, zu Kohlenstoffabscheidungen an der Wand führen, die in kurzer Zeit den normalen Ofengang zum Erliegen bringen. Die vorausberechnete Wandtemperatur muß also an allen Stellen des Ofens genau eingehalten werden. Über diese Vorausberechnung von mit festen Körpern, wie mit Kontakt

gefüllten Gefäßen, speziell wenn endotherme Reaktionen stattfinden, ist noch wenig festgelegt. Ich würde es begrüßen, wenn die Wärmeatlaskommission, nachdem die Übergangszahlen in leeren Gefäßen weitgehend geklärt sind, dieses wichtige und hochinteressante Gebiet in ihr Arbeitsprogramm aufnehmen würde. In Leuna haben wir auf diesem Gebiet bereits einige Werte gesammelt, die uns das Vorausberechnen einigermaßen sicher erlauben.

Wir sahen, daß durch die Wandrückstrahlung der Gesamtwärmeübergang auf die Gefäßwand nicht in allen Fällen über eine gewisse Größe hinaus erhöht werden darf. Man kann in diesem Fall die Wandrückstrahlung ausnutzen, um die Gastemperaturen zu senken, was erwünscht sein kann, wenn die Feuerraumwände z. B. aus Eisen bestehen oder mit eisernen Wälzgasgebläsen gearbeitet wird, man kann aber auch die Rauchgasgeschwindigkeit senken und damit die Arbeitsleistung der Gasgebläse herabsetzen. Die Wandrückstrahlung hat aber auch leider ihre unangenehmen Seiten, die manchesmal dafür verantwortlich zu machen sind, wenn ein technischer Ofen keinen einwandfreien Gang hat.

Betrachten Sie Bild 2 rechts. Sie sehen, daß nur die äußeren Rohre des aus einzelnen Reaktionsrohren bestehenden Bündels benachbarte Heizraumwände haben und somit eine zusätzliche Beheizung auch nur einseitig durch Wandrückstrahlung erhalten; die inneren Rohre sind dagegen vollständig gegen Strahlung abgeschirmt. Die vier Eckrohre erhalten besonders viel Wandstrahlung. Bei temperaturempfindlichen Reaktionen kann dies, wie leicht einzusehen ist, zu unangenehmen Erscheinungen führen. Ist dieses zu befürchten, kann man sich helfen, indem man in die Rohrgassen „Strahlungsbleche" stellt, wie rechts auf dem rechten Bild angedeutet. Diese Bleche können natürlich sehr dünn werden, da ja nur ihre Oberfläche zu reflektieren hat.

In dem nächsten Bild (3) habe ich Ihnen für häufig

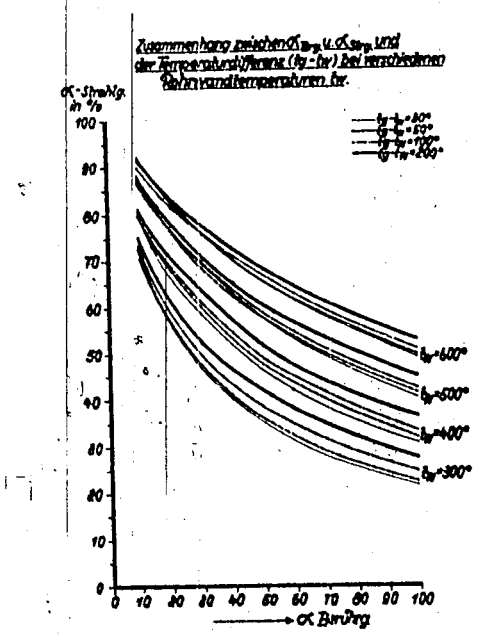


Bild 3. Wärmeübergang durch Strahlung in Abhängigkeit vom Wärmeübergang durch Berührung

vorkommende Wärmeverhältnisse aufgetragen, um wieviel scheinbar das α-Berührung durch die Wandrückstrahlung vergrößert wird. Die prozentuale Wandrückstrahlung ist ausgedrückt als α-Strahlung; dies ist rechnerisch sehr bequem, da ich beim Rechnen nur mein α-Berührung um den auf der Ordinate angeschriebenen %-Betrag zu vergrößern brauche, um den Wandrückstrahlungsbetrag mitzuberücksichtigen. Die Werte gelten unter der Voraussetzung, daß das α-Berührung an der Gefäßwand und Feuerraumwand gleich, die beiden Wände eben, parallel und gleich groß sind, und daß der Strahlungskoeffizient den Wert von 3,5 hat. Sie sehen, daß unter den genannten Bedingungen durch die Wandrückstrahlung der nach den üblichen Formeln ohne Berücksichtigung derselben errechnete Wärmeübergang um 80% und darüber vergrößert werden kann, und das nicht einmal bei den landläufigen „Glühtemperaturen". Ein Beispiel am Schluß meines Aufsatzes, das aus der Praxis genommen ist, zeigt sogar, daß die Wandrückstrahlung den „normalen" Wärmeübergang um über 100% vergrößern kann.

Über den Charakter der Kurven läßt sich folgendes sagen: t_w sei die Gefäßwandtemperatur. Die prozentuale Wandrückstrahlung hängt wenig von der Temperaturdifferenz $t_g - t_w$ zwischen Heizgas und Gefäßwand, stärker von der absoluten Höhe der Gefäßwandtemperatur t_w ab. Nach diesen ist von allerstärkstem Einfluß die Höhe des α-Berührung.

Diese Art der Beeinflussung ist für die Rechnung sehr angenehm. Das α-Berührung wird sich in einem vorgegebenen technischen Ofen im allgemeinen am wenigsten ändern, in größeren Ofenbereichen fast konstant bleiben. Ändert sich nun auch die Wandtemperatur des Gefäßes nicht, was häufig aus Gründen, deren Erläuterung hier zu weit vom Thema abführen würde, ebenfalls der Fall ist, so kann man für den ganzen Ofen bzw. für große Bereiche desselben die Wandrückstrahlung einfach durch einen konstanten prozentualen Zuschlag zum α-Berührung in Rechnung stellen. Der erfahrene Konstrukteur, der häufiger derartige Rechnungen durchführt, kennt meistens in den bekannteren Bereichen diese Zuschläge, die sich in Bereich von 60 bis 80% bewegen, auswendig und kann so schnell und recht genau Vorausberechnungen durchführen.

Wie wird nun die Wandrückstrahlung berechnet? Im nächsten Bild (4) soll die Wand W die Gefäßwand mit de

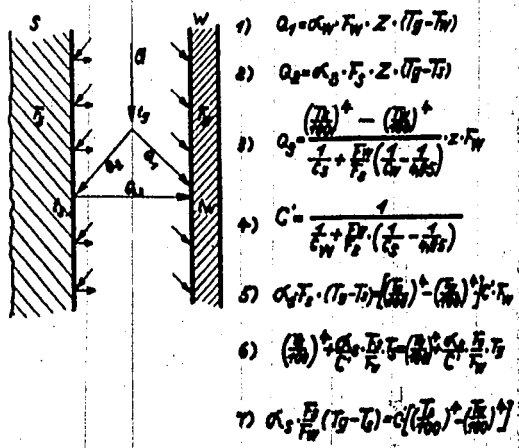


Bild 4. Gleichung für die Wandrückstrahlung

Temperatur T_W und der Fläche F_W sein, S die Feuerraumwand mit der Wandtemperatur T_S und der Fläche F_S; das Rauchgas hat die Temperatur T_g und gibt an die Wand S mit α_S und an die Wand W mit α_W seine Berührungswärme ab.

Auf die Gefäßwand F_W geht nach Gl. 1 die normale Berührungswärme Q_1 über, auf die Feuerraumwand F_S nach demselben Gesetz nach Gl. 2 die Berührungswärme Q_2. Die Feuerraumwand strahlt nun nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz nach Gl. 3 die Wärmemenge Q_3 auf die zu beheizende Gefäßwand zurück. Da im Strahlungsgesetz bekanntlich mit den absoluten Temperaturen gerechnet werden muß, habe ich in allen Gleichungen auch für die Berührungswärme die absolute Temperatur eingesetzt. Wie oben bereits erläutert tritt, wenn die Apparatur wieder adiabatisch angenommen wird, an der Feuerraumwand Gleichgewicht ein, wenn $Q_2 = Q_3$ ist. Der leichteren Übersicht halber ist in Gl. 4 der Strahlungskoeffizient gleich C' gesetzt. In Gl. 5 sind Q_2 und Q_3, die unbekannt sind, durch Gleichsetzen eliminiert und Gleichung 5 in Gl. 6 nach der einzigen Unbekannten T_S aufgelöst. Diese ist, da vierten Grades, exakt nicht, sondern nur durch Probieren lösbar. Ist T_S so errechnet, kann man nach Gleichung 2 einfach die Wandrückstrahlung ermitteln.

Die Lösung der Gleichung 6 für T_S durch Probieren ist, zumal wenn man sich in noch nicht durch frühere Berechnungen bekannten Gebieten bewegt, etwas zeitraubend und auch unerfreulich wegen der ständigen Bildung der vierten Potenzen, die außerdem sehr genau gerechnet werden müssen, da nur die Differenzen dieser auftreten. Ich entwickelte daher ein Diagramm; diesem liegt zugrunde die Gleichung 7. Sie erkennen, daß die Wandrückstrahlung abhängig ist, wenn sie von der unbekannten Wandtemperatur T_S der Feuerraumwand absehen, die aber durch die Art des Diagramms eliminiert wird, von der Temperaturdifferenz Rauchgas gegen die Feuerraumwand, dem Berührungs-α zwischen Rauchgas und Feuerraumwand, den Flächenverhältnis der beiden Wände und dem Strahlungskoeffizienten. Diese Werte sind alle entweder aus der vorhergegangenen Rechnung des Konstrukteurs bekannt oder lassen sich wie das Flächenverhältnis aus der Zeichnung ermitteln. Nur der Strahlungskoeffizient muß ausgerechnet werden. Ich bin überzeugt, daß, wenn die Wärmeatlaskommission diese Frage in die Hand nimmt, sie auch für die Ermittlung der Strahlungskonstanten ein Diagramm entwickeln wird.

Da im allgemeinen die Feuerraumwandtemperatur nicht interessiert, sondern die rückgestrahlte Wärme, wurde in dem vorliegenden Diagramm (Bild 5) die Anordnung so getroffen, daß die letztere direkt abgelesen werden kann. Auf der Abszisse ist aufgetragen eine Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und den beiden Wänden, als Ordinate ein Wärmeinhalt je ein Quadratmeter und Stunde und als Parameter Strahlungswärmemengen je ein Quadratmeter und Stunde zwischen einer Wand mit der Temperatur T_W und einer um den Abszissenwert heißeren Wand mit der Strahlungskonsante $C' = 3{,}5$. Ziehen wir jetzt eine Gerade A — B, so stellt diese die Gleichung $\alpha \cdot dT$, also eine Wärmemenge dar in einem Koordinatensystem, das mit dem Nullpunkt in B von rechts nach links zählt. Der Schnittpunkt mit einer Strahlungsparabel ist die Lösung einer Gleichung

$$C'\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] = \alpha \cdot dT.$$

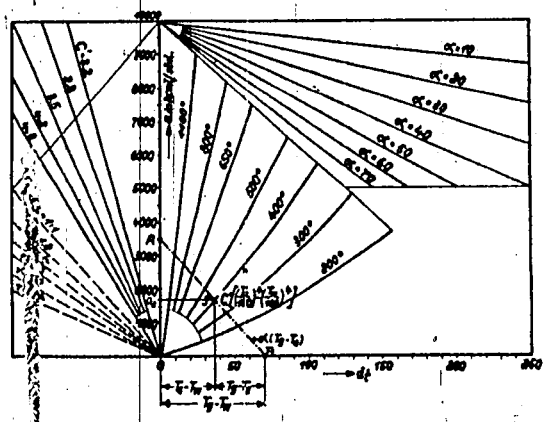


Bild 5. Wandrückstrahlung für ebene parallele Flächen und C = 3,5

Wählen wir nun den Abszissenwert gleich der dem Konstrukteur aus seinen vorherigen Wärmeübergangsrechnungen bekannten Temperaturdifferenz zwischen Heizgas und Gefäßwand, also $T_g - T_W$, und die Ordinate zu $\alpha_S \cdot (T_g - T_W)$, so ist der Schnittpunkt S die Lösung unserer Gleichung der Wandrückstrahlung und lesen wir auf der Ordinate bei Q_2 die Wandrückstrahlung in kcal/m² Std. ab.

Ist das Berührungs-α der Feuerraumwand gleich dem der Gefäßwand, so tragen wir auf der Ordinate den berechneten und somit schon bekannten normalen Wärmeübergang durch Berührung zwischen Heizgas und Wand auf. In unserem Beispiel ist angenommen, wenn dieser Wert 3500 kcal haben soll, daß die Heizgastemperatur minus Gefäßwandtemperatur einen Wert von 70° C haben soll. Man verbindet nun den Punkt A mit dem Wert 70° C auf der Abszisse. Der Schnittpunkt z. B. mit der Kurve für 400° C Gefäßwandtemperatur ergibt links auf der Ordinate die gesuchte Wandrückstrahlung im Betrag von 1680 kcal/m² Std. Unter dem Schnittpunkt kann man noch, falls benötigt, die Temperaturdifferenz zwischen Heizraumwand und Gefäßwand ablesen und hat damit auch die Temperatur der rückstrahlenden Wand, in unserem Beispiel 438° C. Diese einfache Lösung gilt jedoch nur, wenn, wie schon gesagt, das α-Berührung an beiden Wänden gleich, der Strahlungskoeffizient gleich 3,5 und das Flächenverhältnis zwischen rückstrahlender und angestrahlter Wand gleich 1 ist, Verhältnisse, wie sie allerdings in technischen Öfen häufig vorkommen. Um das Diagramm allgemein benutzbar zu machen, ohne noch Nebenrechnungen durchführen zu müssen, habe ich neuerdings noch oben eine Multiplikationstafel für das α-Berührung der Feuerraumwand, links Mitte eine Umrechnungstafel für einen anderen Strahlungskoeffizienten als 3,5 und unten links eine Korrekturtafel für ein anderes Flächenverhältnis als 1:1 anbringen lassen. Nötig wären diese Tafeln nicht, denn auch die rechnerischen Korrekturen für die drei genannten Fälle sind sehr leicht und schnell durchzuführen.

Die einzelnen Korrekturen werden wie folgt berücksichtigt:

1. Das α-Feuerraumwand ist von dem der Gefäßwand verschieden. Bei der rechnerischen Lösung multipliziere ich den Ordinatenwert A der Berührungswärme (Bild 6) mit dem Quotienten aus α-Feuerraumwand: α-Gefäßwand, oder ich rechne mir die Berührungswärme aus mit den Werten Temperaturdifferenz zwischen Heizgas und Gefäßwand multipliziert mit dem α-Berührung der Feuerraumwand, ziehe meine Gerade nach dT und verfahre wie vor. Will ich nicht rechnen, gehe ich von der Temperaturdifferenz Heizgas gegen Gefäßwand als Abszisse nach oben auf die Multiplikationstafel zu dem entsprechenden

α-Feuerraumwand, dann nach links, spiegele an der Geraden D nach unten auf den Strahlungskoeffizienten 3,5, gehe nach rechts wieder auf meine Wärmeinhaltordinate und verfahre wie vor.

2. Die Strahlungskonstante hat einen von 3,5 verschiedenen Wert. Für diesen Fall müßten eigentlich neue Strah-

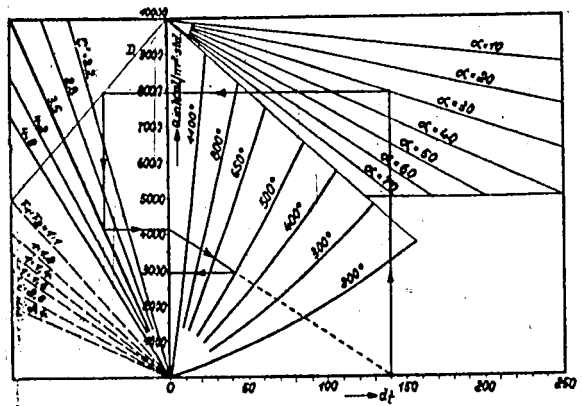


Bild 6. Wandrückstrahlung für ebene parallele Wände und C = 3,5, wenn die Wärmeübergangszahlen an den Wänden einander nicht gleich sind

lungsparabeln mit der neuen Konstante gezeichnet werden. Dies kann man aber vermeiden. Man läßt die Strahlungsparabel und denkt sich an die Ordinate einen neuen Maßstab geschrieben (Bild 7). Die Umrechnung erfolgt mit dem Quotienten: Alter Strahlungskoeffizient 3,5 dividiert durch den neuen. Mit diesem Quotienten multipliziert man den Berührungswärmeübergang, trägt den so umgerechneten Ordinatenwert O—B auf, verfährt wie vorher und dividiert die an der Ordinate abgelesene Wandrückstrahlung durch den obigen Quotienten.

Daß dieses Verfahren richtig ist, zeigt Ihnen Bild 8.

Der neue Strahlungskoeffizient sei z. B. 2,8. Ich hätte dann die Strahlungsparabeln O—B mit dem Quotienten aus 2,8:3,5 zu multiplizieren und bekäme die neue Strahlungsparabel O—B_1. Bei 20 000 kcal Berührungswärmeübergang ergäbe sich eine Wandrückstrahlung entsprechend Schnittpunkt S_1 von 12 500 kcal/m² Std. Statt dessen

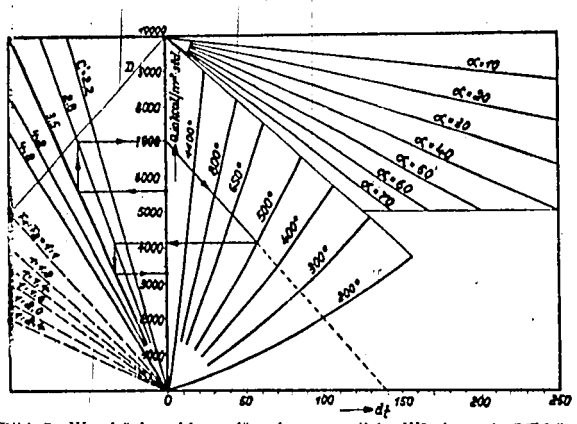


Bild 7. Wandrückstrahlung für ebene parallele Wände und C = 3,5

wird nun der Wert 20 000 kcal mit dem Quotienten 3,5:2,8 multipliziert und vom umgerechneten Wert 25 000 aus die Gerade D—C gezogen. Dies ergibt mit der alten Strahlungsparabel den Schnittpunkt S auf der Ordinate 15 600 Kal., diese multipliziert mit dem umgekehrten Verhältnis der Strahlungskonstanten 2,8:3,5 ergibt wieder wie vor 12 500 kcal/m² Std. Sie sehen also, daß die Umrechnungsmethode auf einen neuen Maßstab wieder richtige Werte ergibt. Dieselbe Rechenoperation kann man auch mit der Strahlungsleitertafel, wie auf dem Bild 7 dargestellt, durchführen.

3. Das Flächenverhältnis zwischen Feuerraumwand und Gefäßwand ist größer als 1 (Bild 9). Kleiner als 1 kann es nicht sein, da die Strahlungsberechnung immer auf die

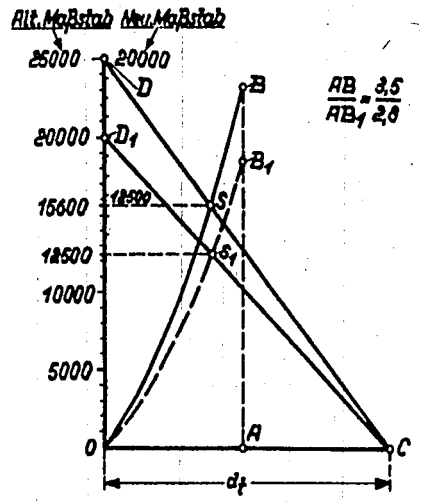


Bild 8. Ableitung der Umrechnung auf C = 3,5

innere kleinere Wand bezogen werden muß. Das richtige Einsetzen des richtigen Flächenverhältnisses ist überhaupt die einzige Klippe bei der richtigen Ermittlung der Wandrückstrahlung; hierbei kann man leicht Fehler machen, die das Ergebnis stark fälschen können. Es wird sich hier empfehlen, für alle möglichen Fälle ein Beispiel anzuführen, wie ich es in Leuna auch gemacht habe. Es ist nämlich zu berücksichtigen, daß immer, wenn eine Fläche in dem Strahlungsteil der Gleichung 7 auftaucht, nicht mit der wahren Fläche, sondern mit der Projektion auf die andere zu rechnen ist, während bei dem Berührungsteil im allgemeinen (jedoch nicht immer) mit der wahren Fläche zu rechnen ist. Das letztere ist der Fall, wenn die Gefäßwand Rippen, Nadeln oder Vertiefungen usw. hat. Als einfache Regel können Sie sich jedoch merken: Die Gefäß-

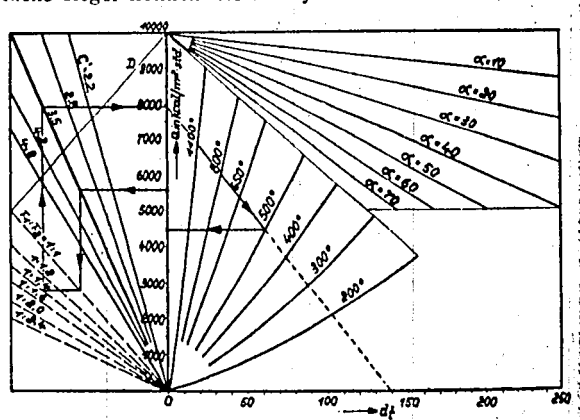


Bild 9. Wandrückstrahlung für Flächenverhältnisse > 1

wand wird immer mit ihrer projizierten Fläche, die Feuerraumwand in der Strahlungskonstante mit ihrer projizierten, sonst mit ihrer wahren Fläche eingesetzt. Rechnerisch geht man wieder von der Berührungswärme aus, multipliziert sie mit dem Flächenverhältnis, trägt den neuen Ordinatenwert auf und verfährt wie vor. Man kann diese Rechenoperation sich auch sparen und löst die Aufgabe wie auf dem Bild 9 gezeichnet.

Auf dem nächsten Bild (10) habe ich Ihnen die Lösung einer Aufgabe eingezeichnet, bei der sämtliche Korrekturen durchzuführen sind. Unten stehen die gegebenen Werte, und durch Linienzug ist die Lösung im Diagramm eingetragen.

Auch andere schwierigere Aufgaben, z. B. innenbeheizte Behälter mit Verdränger und verrippten Heizflächen, können mit dem Diagramm richtig gelöst werden. Ein zweites Diagramm ist jedoch erforderlich, wenn es sich um folgenden Fall handelt:

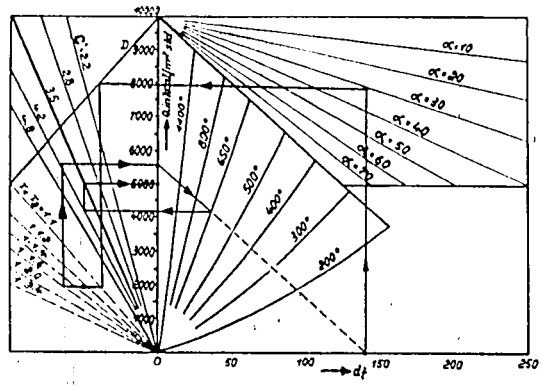


Bild 10. Wandrückstrahlung, allgemeiner Fall
Beispiel:
Gefäßwandtemp. $t_W = 650°C$ Strahlungskoeff. $C' = 4,2$
α Feuerraumw. 30 kcal/m²std.°C Flächenverhältnis = 1,6
Rauchgastemp. $t_g = 790°C$

Ein innen leeres Gefäß wird von außen beheizt, und in dem Gefäß, z. B. einem Vorheizerrohr, steckt zur Erhöhung der Gasgeschwindigkeit ein Verdränger (Bild 11). Dieser Fall ist grundsätzlich dadurch gekennzeichnet, daß das im Gefäß strömende Gas kälter ist als jede der beiden Wände; beim zuerst betrachteten hingegen war das Gas heißer

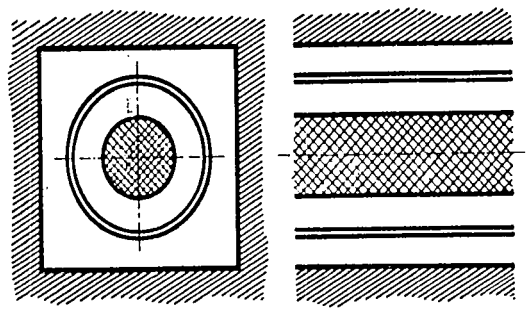


Bild 11. Gefäß mit Außenheizung und innerem Verdränger

als jede der beiden Wände. Der Verdränger verbessert nicht nur den Wärmeübergang dadurch, daß er die angenommene Gasgeschwindigkeit erhöht und damit auch das α-Berührung; er wird auch von der äußeren Gefäßwand angestrahlt und gibt durch Berührung die durch Strahlung aufgenommene Wärme an das Gas ab, vergrößert also auch durch den Strahlungseffekt den Wärmeübergang über den des leeren Gefäßes hinaus.

Die Grundgleichungen zur Berechnung der Wandrückstrahlung bleiben natürlich dieselben wie vor. Es ändert sich in dem Diagramm (Bild 12) lediglich der Verlauf der Strahlungsparabeln. Nur die Berücksichtigung des Flächenverhältnisses ist hier anders vorzunehmen. Grundsätzlich ändert sich jedoch gegen vorher nichts. Lediglich beim Flächenverhältnis muß man wieder gut aufpassen. Für das richtige Arbeiten mit den Diagrammen sind einige Beispiele in Form von Arbeitsblättern zusammengestellt.

Ich hoffe, Ihnen in der kurzen, mir zur Verfügung

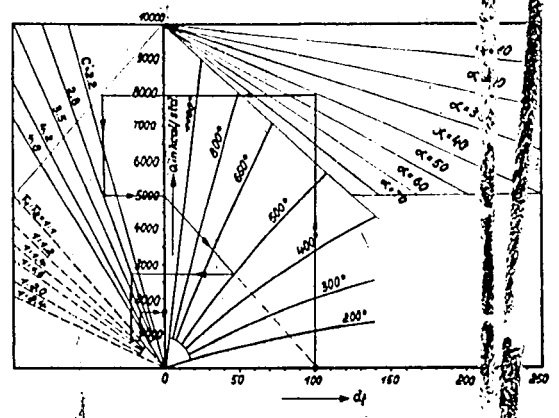


Bild 12. Wandrückstrahlung, wenn die Gase kälter als die Wände sind, allgemeiner Fall
Beispiel:
Gefäßwandtemp. $t_W = 500°C$ Strahlungskoeff. $C' = 4,2$
α Berührg. = 40 kcal/m²std.°C Flächenverhältnis = 1,6
Gastemperat. $t_g = 400°C$

stehenden Zeit gezeigt zu haben, daß die Wandrückstrahlung bei beheizten Gefäßen, selbst bei sogenannten niedrigen Temperaturen, für eine genaue Berechnung der thermischen Daten nicht vernachlässigt werden darf. Die von mir in Leuna entwickelten Diagramme erleichtern das Berechnen dieser Wandrückstrahlung ungemein.

Sie stellen jedoch keineswegs eine jeder wissenschaftlichen Kritik standhaltende Arbeit dar. Es ist z. B. die Gasstrahlung vernachlässigt; wir haben da meist aus den sicher nicht immer ganz haltbaren Standpunkt getreten, daß die Wärmemenge, die vom Gas auf die Feuerraumwand gestrahlt wird, rückwärts vom Gas auch wieder absorbiert wird, also bei der Wandrückstrahlung nicht zu berücksichtigen ist. Dann ist vernachlässigt der Einfluß der Feuerraumwandabkühlung durch Wärmeverluste nach außen; ebenso ist es nicht unter allen Umständen richtig, bei der Feuerraumwand, abgesehen vom Strahlungsteil der Gleichung, mit der wahren Fläche zu rechnen. Es sind Fälle denkbar, bei denen dies falsch ist, z. B. wenn Feuerraumwandflächen senkrecht zu der zu beheizenden Gefäßwand angeordnet sind und so keine Möglichkeit haben, auf die Gefäßwand zu strahlen. Immerhin haben die Tafeln in Leuna nun eine zehnjährige Bewährung hinter sich und im Ganzen gesehen bei Berechnung von technischen Öfen zu genügend richtigen Werten geführt.

Ich würde mich freuen, wenn diese Arbeitstafeln, gegebenenfalls nach Überarbeitung durch die Wärmeatlaskommission, in den Wärmeatlas aufgenommen würden.

Untersuchungen an Hochdruckrippenrohren

Von Dr.-Ing. GEORG KLING

Inhalt:

Es werden vergleichende Messungen an Hochdruckrohren mit aufgeschweißten, rechteckigen Rippen besprochen. Untersucht wurden drei Typen von Rippen sowie die Wirkung von Verdrängern. Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung geben Einblick in den Wärmestrom der Rippen.

In den Hydrieranlagen muß der zu verarbeitende Kohlebrei mit Wasserstoffgas unter hohem Druck auf Reaktionstemperatur vorgeheizt werden. Diese Vorheizung kann zu einem großen Teil aus der Regeneration gegen das abziehende Produkt gewonnen werden, der Rest muß in den Spitzenvorheizern zugeführt werden.

Die Spitzenvorheizer bestehen aus einem Rohrbündel hintereinandergeschalteter Hochdruckrohre, durch die innen der Kohlebrei fließt und die außen im Querstrom von heißen Verbrennungsgasen umspült werden. Ein Gebläse wälzt die Gase um, die durch Zusatz frischer Heizgase auf gleicher Eingangstemperatur gehalten werden. Die Rohre stehen senkrecht in einer gemauerten Gasse. Zum Ausgleich des schlechten Wärmeüberganges der Gasseite sind außen zahlreiche Rippen aufgeschweißt.

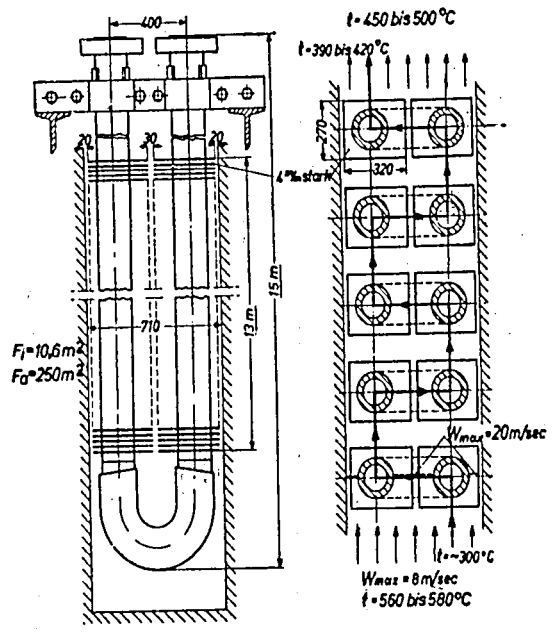


Bild 1. Ansicht einer Haarnadel, Schaltung des Spitzenvorheizers

In Bild 1 ist ein Schnitt durch die Gasse eines solchen Spitzenvorheizers gezeigt. Zwei Hochdruckrohre sind jeweils nebeneinander angeordnet und durch den unten angeschweißten Bogen zur sogenannten „Haarnadel" verbunden. Die Haarnadeln werden von oben in die Gasse eingehängt und die oberen Flansche durch Bogenstücke mit der vorhergehenden und folgenden Haarnadel verbunden.

Über die Abmessungen von Haarnadeln und Gasse bestehen bestimmte Normen. Diese sind z. B. für die 325 at-Hochdruckrohre von 120/171 mm Ø, die von uns meist untersucht wurden, im Bild eingetragen:

Länge der Haarnadel	15 100 mm
Berippung	13 400 mm
Rippenteilung	14 mm
Rippenstärke	4 mm
Rohrabstand	400 mm
Gassenbreite	710 mm.

Für die Rippenabmessung war bisher 270 × 320 [illegible] als normales Maß üblich.

Einige Betriebswerte, wie sie zum Beispiel im [illegible]mischteil eines Vorheizers dieser Art für Steinkohle a[illegible] treffen sind, sind im Grundriß rechts eingetragen:

Wälzgasseite:

Gasgeschwindigkeit:	
vor den Haarnadeln	8 m
im engsten Querschnitt der 1. Haarnadel	20 m
Eintrittstemperatur	560 — 58[illegible]
Austrittstemperatur	400 — 45[illegible]

Produktseite:

Eintrittstemperatur	~ 30[illegible]
Austrittstemperatur	400 — 42[illegible]

Die Wärmeaustauschflächen sind beispielsweis[illegible] die gezeigte Haarnadel:

Innere Rohroberfläche F_i	10[illegible]
Äußere Rohr- und Rippenoberfläche F_a	250 [illegible]

Recht beachtlich ist auch das Gewicht einer so[illegible] Haarnadel von 7,5 t, das sich aufteilt in 3 t für die R[illegible] aus legiertem Stahl N 8 oder N 10 und in 4,5 t fü[illegible] Rippenbleche aus gewöhnlichem Stahl St 00. Am [illegible] einer Haarnadel machen die Herstellungskosten den [illegible] aus größten Anteil gegenüber den Materialkosten aus.

Diese Angaben sollen veranschaulichen, daß auc[illegible]ringe prozentuale Verbesserungen der Wärmelei[illegible] einer Haarnadel bereits erhebliche Materialmengen [illegible] Werkstattarbeiten einzusparen gestatten. Beispiels[illegible] würde eine 5%ige Verbesserung in einem Vorwärme[illegible] 20 Haarnadeln die Einsparung einer ganzen Haa[illegible] bedeuten. Andererseits könnte für einen bestehe[illegible] Vorheizer durch einen höheren k-Wert die Gastemp[illegible] gesenkt und damit die Betriebssicherheit erhöht w[illegible]. Gleichzeitig ist auch eine Produktionsreserve ge[illegible] sowie ein Ausgleich für Verkrustung, Verzunderu[illegible] Rippen usw.

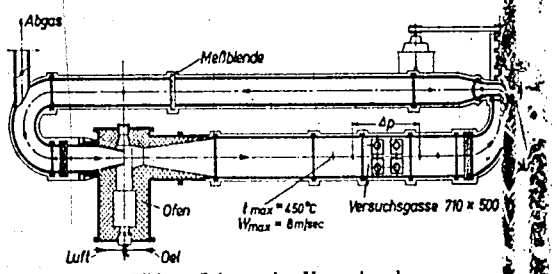


Bild 2. Schema der Versuchsanlage

Es war nun die Aufgabe unserer Versuche, [illegible]sätzlich einmal die Vorgänge der Wärmeübertrag[illegible] einem berippten Hochdruckrohr eingehend zu [illegible] suchen. Darüber hinaus lagen zahlreiche Verbesse[illegible] vorschläge von seiten der Konstruktionsbüros u[illegible] Werkstätten vor, die auf ihr wärmetechnisches Ver[illegible] hin zu prüfen waren.

[redacted]ohren

[redacted] der Haarnadel	15 100 mm
Berippung	13 400 mm
Rippenteilung	14 mm
Rippenstärke	4 mm
Rohrabstand	400 mm
Gassenbreite	710 mm.

Für die Rippenabmessung war bisher 270 × 320 mm als normales Maß üblich.

Einige Betriebswerte, wie sie zum Beispiel im Gemischteil eines Vorheizers dieser Art für Steinkohle anzutreffen sind, sind im Grundriß rechts eingetragen:

[redacted]

[redacted]n	8 m/sec
[redacted]nitt der 1. Haarnadel	20 m/sec
	560 — 580° C
	400 — 450° C

[redacted]Produktseite:

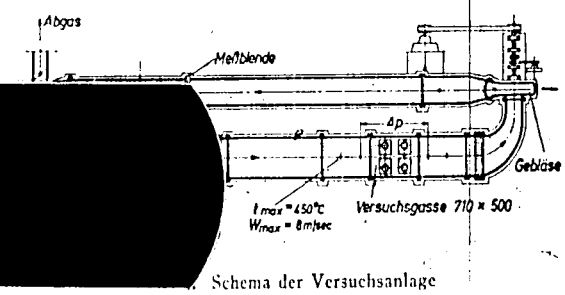
Eintrittstemperatur	~ 300° C
Austrittstemperatur	400 — 425° C

Die Wärmeaustauschflächen sind beispielsweise für die gezeigte Haarnadel:

Innere Rohroberfläche F_i	10,6 m²
Äußere Rohr- und Rippenoberfläche F_a	250 m².

Recht beachtlich ist auch das Gewicht einer solchen Haarnadel von 7,5 t, das sich aufteilt in 3 t für die Rohre aus legiertem Stahl N 8 oder N 10 und in 4,5 t für die Rippenbleche aus gewöhnlichem Stahl St 00. Am Preis [redacted]hen die Herstellungskosten den weit[redacted]renüber den Materialkosten aus.

[redacted]llen veranschaulichen, daß auch ge[redacted]rbesserungen der Wärmeleistung [redacted]ts erhebliche Materialmengen und [redacted]nzusparen gestatten. Beispielsweise [redacted] [redacted]erbesserung in einem Vorwärmer von 20 Haarnadeln die Einsparung einer ganzen Haarnadel bedeuten. Andererseits könnte für einen bestehenden Vorheizer durch einen höheren k-Wert die Gastemperatur gesenkt und damit die Betriebssicherheit erhöht werden. Gleichzeitig ist auch eine Produktionsreserve gegeben sowie ein Ausgleich für Verkrustung, Verzunderung der Rippen usw.



Schema der Versuchsanlage

Es war nun die Aufgabe unserer Versuche, grundsätzlich einmal die Vorgänge der Wärmeübertragung in einem berippten Hochdruckrohr eingehend zu untersuchen. Darüber hinaus lagen zahlreiche Verbesserungsvorschläge von seiten der Konstruktionsbüros und der Werkstätten vor, die auf ihr wärmetechnisches Verhalten hin zu prüfen waren.

Bei der Planung einer Versuchsanlage lag nun der Gedanke zu Grunde, möglichst die gleichen Betriebsbedingungen nachzuahmen, die auch in einem Spitzenvorheizer anzutreffen sind. Eine schematische Darstellung ist in Bild 2 gegeben. In einem Ofen wird Öl verbrannt, und die Heizgase durch eine Düse in den Gaskreislauf angesaugt. Mit etwa 420° C und maximal 8m/sec strömen die Verbrennungsgase durch die Versuchsgasse von 710 mm Breite und 500 mm Höhe. Der Gasumlauf wird von einem Ventilator bewirkt. Die Gasmenge wird in einer Blende von 400/500 mm Ø gemessen. In der Gasse können jeweils vier Rohre im Gruppeneinbau untersucht werden.

Die Versuchsrohre (Bild 3) haben 750 mm Länge und sind auf 450 mm Länge berippt. Sie wurden in denselben

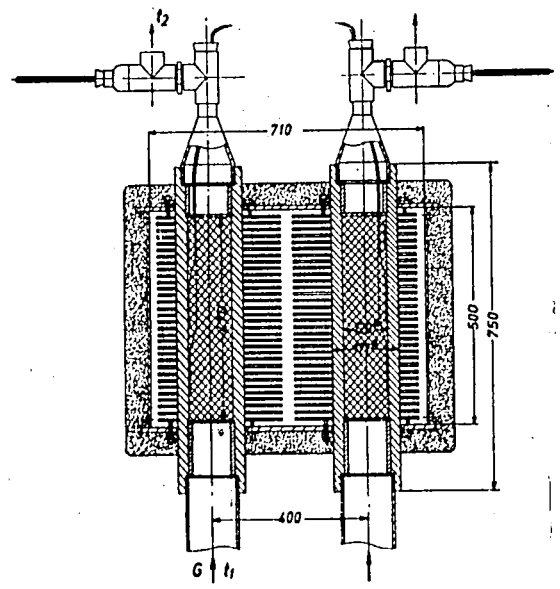


Bild 3. Einbau der Versuchsrohre

Werkstätten geschweißt, in denen auch die Haarnadeln angefertigt werden. Die Versuchsrohre mit etwa 30 Rippen stellen somit ein naturgetreues Probestück in normaler Werkstattausführung dar. Die Verminderung der Gassenhöhe von 15 m auf ½ m ist ohne Einfluß auf das eigentliche Wärmeübergangsproblem. Der gasseitige Einbau der Versuchsrohre entspricht genau den wirklichen Verhältnissen in einer Gasse. Auf der Produktseite war es uns natürlich nicht möglich, Kohlebrei unter 300 at durchzupressen. Statt dessen wurde kalte Druckluft innen durch die Rohre geschickt und die erforderlichen hohen α-Werte durch eine Füllung von Stahlkugeln erzielt. Die Endeneinflüsse der Rohre wurden durch isolierende Porzellanrohre ausgeschaltet, die zugleich auch als Stütze für zwei Siebe dienten.

Zur meßtechnischen Ausrüstung gehörten 6 Thermoelemente, mit denen an verschiedenen Stellen der Rohrinnenwand die mittlere Temperatur der Rohroberfläche gemessen wurde. Die Austrittstemperatur der Luft zeigte ein starkes radiales Gefälle, so daß ihr Mittelwert erst nach Durchmischung in den oberen T-Stücken richtig zu messen war. Weiter wurde noch die Luftmenge mit Blenden gemessen und die Eintrittstemperatur der Luft. Aus diesen Messungen war sehr genau für jedes Versuchsrohr die vom Gas an die Luft übertragene Wärme zu bestimmen als:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1).$$

Eine nähere Erläuterung erfordert noch der Begriff der äußeren Wärmeübergangszahl α_a; diese ist

$$\alpha_a = \frac{Q}{F_a \cdot (t_R - t_w)}$$

In Bild 4 ist der Schnitt durch Wand und Rippe eines Hochdruckrohres dargestellt. Die Wärmeflußlinien sind eingezeichnet, wie sie schätzungsweise unter Berücksichtigung der radialen Flächenvergrößerung und der abnehmenden Temperaturdifferenz Gas gegen Rippenoberfläche verlaufen könnten. Zu beachten ist vor allem der starke Wärmefluß im Rippenfuß, d. h. also an der Verbindungsstelle zwischen Hochdruckrohr und Rippenblech.

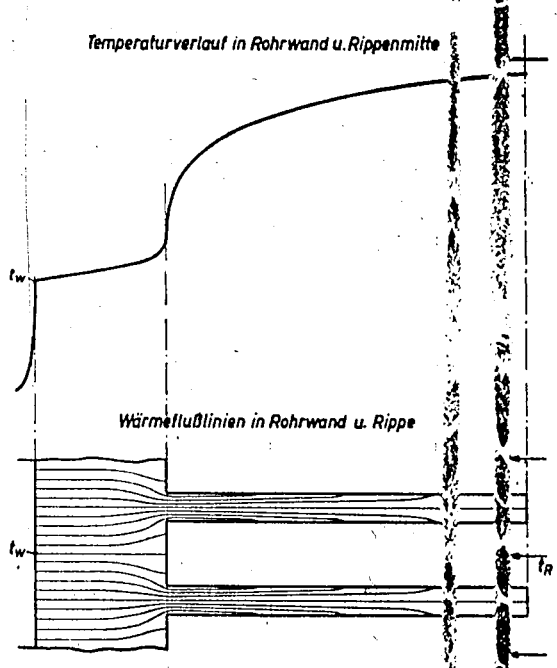


Bild 4. Temperatur und Wärmefluß im Hochdruck-Rippenrohr

Während nun die äußere Wärmeübergangszahl α_a sinngemäß auf die äußere Oberfläche F_a bezogen wird, so ist dies nicht sinngemäß mit der Temperatur möglich. Längs der äußeren Oberfläche, insbesondere längs der langen Rippen ist die Temperatur sehr unterschiedlich, so daß man nicht wüßte, welcher Wert einzusetzen ist. Auch an der äußeren Rohroberfläche selbst ist keine gleiche Temperatur vorhanden. Nach allgemeiner Gepflogenheit wird daher die innere Wandtemperatur t_w als Bezugstemperatur gewählt, da diese einem gleichmäßigen Wärmefluß zugeordnet ist.

Der α_a-Wert enthält demgemäß alle Wärmewiderstände des Hochdruckrohres, d. i. Wärmewiderstand der Rohrwand, der Schweißstelle am Rippenfuß, der Rippe selbst und des Wärmeüberganges von den Oberflächen an das Gas durch Strahlung und Konvektion. Rechnungsmäßig sind diese Werte nicht zu unterteilen, da sie teils hintereinander, teils parallel geschaltet sind, teils auch mit dem Radius veränderlich sind. Durch geeignete Versuchsführung lassen sich jedoch aus den Ergebnissen oft wichtige Erkenntnisse über die Einflüsse bestimmter Wärmewiderstände folgern.

Bei unseren Versuchen wurde im allgemeinen nur die Wälzgasgeschwindigkeit in weitem Bereich verändert, während Wälzgastemperatur und Kühlluftmenge sowie Kühlufttemperatur konstant blieben. Für einige bestimmte Fälle wurde auch die Gastemperatur variiert.

Eine Änderung der Kühlluftmenge war ohne Einfluß auf die Wärmeübergangszahl α_a.

Das zahlreiche vorliegende Versuchsmaterial kann nicht alles im Rahmen eines Vortrages gebracht werden. Es wird daher ein Spezialfall, der Wärmeübergang an Hochdruckrohre mit aufgeschweißten Rechteckrippen, herausgegriffen und dieser im folgenden ausführlicher behandelt, zumal dieser Fall der für die Praxis im Augenblick bedeutendste und wichtigste ist.

Betrachtet sei ein Grundriß der üblichen Haarnadelanordnung in einer Gasse, wobei die Rippen die Abmessung 270 × 320 haben (Bild 5).

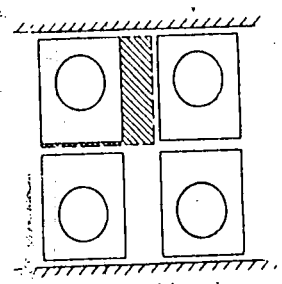


Bild 5. Haarnadelanordnung in einer Gasse

Es liegt nun der Gedanke nahe, den gesamten freien Raum mit Rippenblech auszufüllen, um durch vergrößerte Oberfläche F_a die Wärmeleistung Q zu erhöhen gemäß der Formel:

$$Q = \alpha_a \cdot F_a \cdot \Delta t$$

Bezogen auf konstantes Δt würde dabei Q linear mit F_a zunehmen, wenn α_a gleich bliebe oder sich nur wenig ändierte. Die größte Rippe, die als Mammutrippe bezeichnet sei, würde die Abmessung 380 × 325 haben. Sie würde die ganze freie (im Bild schraffierte) Fläche ausfüllen bis auf die Spalte von 20 mm gegen Gassenwand und Nachbarrippen, die für den Einbau der Haarnadeln unbedingt erforderlich sind. Die Rippen wurden einseitig in Richtung der Gasströmung verlängert, da hier der schlechtere Wärmeübergang infolge des Windschattens vom Rohr her ist. Das ist nicht ganz richtig, da ja auch der Rippenwirkungsgrad mit längerer Rippe schlechter wird (worauf später noch eingegangen wird).

Die Meßergebnisse sind in Bild 6 dargestellt, wo

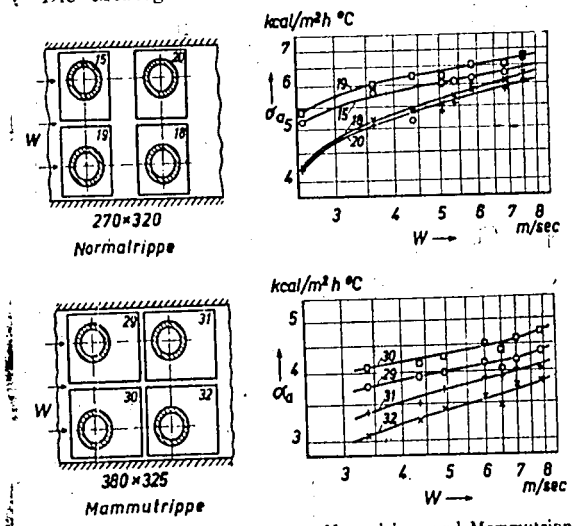


Bild 6. Wärmeübergangszahlen von Normalrippe und Mammutrippe

die äußere Wärmeübergangszahl α_a in Abhängigkeit von der Rauchgasgeschwindigkeit w in der Gasse aufgetragen ist. Die Zahlen an den vier Kurven entsprechen den Nummern der vier Versuchsrohre. Die Kurven der beiden hinteren Rohre liegen niedriger als die der vorderen Rohre. Das hat einen rein rechnerischen Grund, da die α_a-Werte aller Rohre auf die Rauchgastemperatur vor den Rohren bezogen sind. In Wirklichkeit ist aber das Gas am vorderen Rohr schon etwas abgekühlt, wenn es zum hinteren Rohr kommt. Berücksichtigt man diese Abkühlung, die ja aus der Wärmeaufnahme des vorderen Rohres zu errechnen ist, so ergeben sich praktisch die gleichen α_a-Werte. Im Rahmen der Versuchsgenauigkeit könnte man für die hinteren Rohre evtl. um einige % niedrigere α_a-Werte herauslesen; aber das ist zu unsicher.

Der flache Verlauf der Kurven weist auf einen geringen Geschwindigkeitsexponenten hin, sofern man die Meßwerte formelmäßig ausdrücken wollte als:

$$\alpha = K \cdot w^n, \qquad (1)$$

wie das bei der Beurteilung solcher Messungen gern getan wird. — Würde man einen quer angeströmten Zylinder vom äußeren Rohrdurchmesser, aber ohne Rippen betrachten, so würde man für 8 m/sec eine Reynoldssche Zahl von 40 000 und danach nach Hilpert ein n von 0,62 bis 0,80 zu erwarten haben. Rechnet man in Anlehnung an die Rippen mit einer längs angeströmten ebenen Platte, so wäre Re = 60 000 und nach Jürges n = 0,78. Demgegenüber ergeben die Rippenrohr-Kurven wesentlich niedrigere Geschwindigkeitsexponenten. Betrachtet man nun allgemein ein Koordinatensystem mit logarithmischer Teilung (Bild 7), so würde eine Funktion der angegebenen

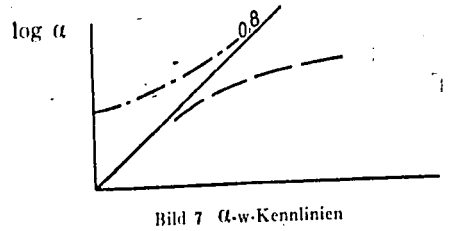


Bild 7 α-w-Kennlinien

Art als Gerade unter dem Winkelverhältnis des Exponenten, z. B. 0,8, erscheinen. Die Rippenrohrversuche ergeben aber nach rechts hin gekrümmte Kurven ⌒, d. h. also, daß mit zunehmender Rauchgasgeschwindigkeit sowohl der gasseitige Wärmeübergang besser wird, oder auch, anders gesprochen, der Wärmewiderstand von Rippenoberfläche ans Gas kleiner wird, daß aber auch gleichzeitig die Wärmewiderstände im Rippen- und Rohrmaterial immer stärker zur Geltung kommen. Mathematisch ausgedrückt ist danach:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{K \cdot w^n} + K_M}$$

wo K_M die Summe aller Materialwärmewiderstände bedeutet. K_M ist also der Hemmschuh, der einer α-Verbesserung durch höhere Geschwindigkeit im Wege steht. Natürlich wird K_M größer bei langen und vielen Rippen, ebenso bei schlechter Schweißverbindung am Rippenfuß. Für sehr hohe Geschwindigkeiten muß α_a einem Konstanten Wert, nämlich $1/K_M$, zustreben. Rechnet man nun für die zylindrische Rohrwandung den Wärmewiderstand aus, so erhält man den Wert 0,001. Unsere α_a-Werte streben aber Werten zu, deren Wärmewiderstände etwa hundert mal größer sind. Daraus muß gefolgert werden, daß der wesentliche Anteil von K_M im Rippenfuß und in der Rippe selbst zu suchen ist, während der Anteil im Hochdruckrohr gering ist.

Neben dem Wärmefluß in den Rippen ist noch ein parallel geschalteter Wärmefluß vom Gas an die freien Rohroberflächen zwischen den Rippen vorhanden. Die Parallelschaltung zweier Wärmeübergänge muß sich in der

zum hinteren Rohr
kühlung, die ja aus
Rohres zu errechnen
leichen α_a-Werte. Im
Versuchsgenauigkeit könnte man für die hin-
evtl. um einige % niedrigere α_a-Werte her-
r das ist zu unsicher.

e Verlauf der Kurven weist auf einen ge-
windigkeitsexponenten hin, sofern man die
melmäßig ausdrücken wollte als:

$$\alpha = K \cdot w^n \qquad (1)$$

er Beurteilung solcher Messungen gern getan
rde man einen quer angeströmten Zylinder
Rohrdurchmesser, aber ohne Rippen betrach-
ine Reynoldssche Zahl
ein n von 0,62 bis 0,80
n Anlehnung an die
n ebenen Platte, so
ges n = 0,78. Dem-
ir-Kurven wesentlich
enten. Betrachtet man
in ein Koordinatensystem mit logarithmischer
l 7), so würde eine Funktion der angegebenen

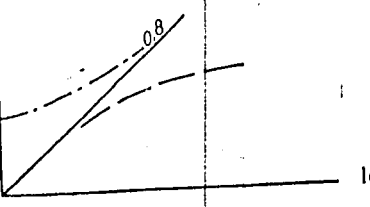


Bild 7 α-w-Kennlinien

erhältnis des Exponen-
rohrversuche ergeben
urven ---, d. h.
sgeschwindigkeit wohl
esser wird, oder auch,
widerstand von Rippen-
prochen, daß aber auch gleichzeitig
ns Gas kleiner wird,
ewiderstände im Rippen- und Rohrmaterial
ker zur Geltung kommen. Mathematisch aus-
t danach:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{K \cdot w^n} + K_M} \qquad (2)$$

ie Summe aller Materialwärmewiderstände be-
f ist also der Hemmschuh, der einer α-Ver-
durch höhere Geschwindigkeit im Wege steht.
ngen und vielen Rippen,
bindung am Rippenfuß.
muß α_a einem kon-
eben. Rechnet man nun
den Wärmewiderstand
l. Unsere α_a-Werte stre-
rmewiderstände etwa hun-
größer sind. Daraus muß gefolgert werden, daß
ntliche Anteil von K_M im Rippenfuß und in
selbst zu suchen ist, während der Anteil im
krohr gering ist.

n dem Wärmefluß in den Rippen ist noch ein
geschalteter Wärmefluß vom Gas an die freien
flächen zwischen den Rippen vorhanden. Die
chaltung zweier Wärmeübergänge muß sich in der

ogarithmischen Darstellung durch aufwärts gekrümmte Kurven ⌒ bemerkbar machen, die allmählich dem Exponenten n = 0,8 zustreben würden. Mathematisch wäre die Gleichung 2, deren α jetzt mit α_{Rippe} bezeichnet sei, noch um den Summanden α_{Rohr} zu erweitern zu:

$$\alpha = \alpha_{Rippe} + \alpha_{Rohr}$$

In übertriebener Darstellung ist also für die Hochdruck-Rippenrohre folgender Kurvenverlauf zu erwarten (Bild 8):

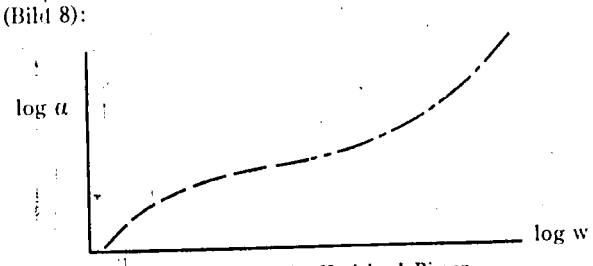


Bild 8. Kennlinie der Hochdruck-Rippen

Tatsächlich ist in den logarithmischen Auftragungen unserer Versuche bei hohen Geschwindigkeiten, bei denen das Gas das eigentliche Rohr besser bespült, eine Umkehr der Kurven nach oben festzustellen. Bei der Mammutrippe ist diese Tendenz ausgeprägter als bei der Normalrippe, da ja bei der langen Rippe K_M größer ist und α_{Rippe} viel früher einen konstanten Wert erreicht.

Der rechte ansteigende Kurvenast könnte nun dazu verleiten, eine weitere Geschwindigkeitssteigerung zu verlangen. Für die Rippe ist dadurch nichts gewonnen, lediglich die Wärmeübergangszahl α_{Rohr} ist steigerungsfähig, aber nicht sehr weit. Denn bald müßte sich das erste Spiel wiederholen, indem die Reihenschaltung des Wärmewiderstandes der Rohrwand jetzt wirksam wird. Die Kurve würde wieder nach rechts umbiegen und endgültig einem konstanten α_a-Wert zustreben.

Die Darlegungen sollten veranschaulichen, welche Grenzen der Wärmeübergangszahl durch Erhöhung der Geschwindigkeit gesetzt sind. Aus den Versuchsergebnissen ist zu ersehen, daß der erste Wendepunkt im allgemeinen erreicht oder überschritten ist, d. h. also, daß die Wirksamkeit der Rippen durch höhere Gasgeschwindigkeit nicht mehr verbessert werden könnte. Für die kleinere Steghöhe der Normalrippe tritt der Wendepunkt natürlich bei viel höheren Geschwindigkeiten als bei der längeren Mammutrippe auf.

Die Absolutwerte von α_a sind bei der Mammutrippe um 1/3 kleiner als bei der Normalrippe. Der Grund liegt in der schlechteren Wärmeleistung der Rippe.

Die Theorie der Wärmeübertragung in Rippen ist bereits eingehend von E. Schmidt, Hausen, Bogaerts u. Meyer und anderen bearbeitet worden. Dabei hat sich allgemein der Begriff des Rippenwirkungsgrades eingeführt, der definiert ist durch das Verhältnis von wirklich übertragener Wärmemenge Q zur möglichen Wärmemenge Q_o, wenn die Rippe überall die Temperatur des Rippenfußes hätte:

$$\eta_R = \frac{Q}{Q_o}$$

In Bild 9 ist η_R dargestellt in Abhängigkeit von einer dimensionslosen Größe $b \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot y_o}}$ worin bedeutet: α = Wärmeübergangszahl in der Rippenfläche, λ = Wärmeleitzahl des Rippenmaterials, y_o = halbe Rippenstärke und b = Rippenbreite. Für die drei Rippenabmessungen, die im Bild 9 gezeichnet sind, wurden für die Rippenstege von 50, 100 und 160 mm die Werte $b \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot y}}$ errechnet und im Bild durch Pfeile angedeutet. Aus

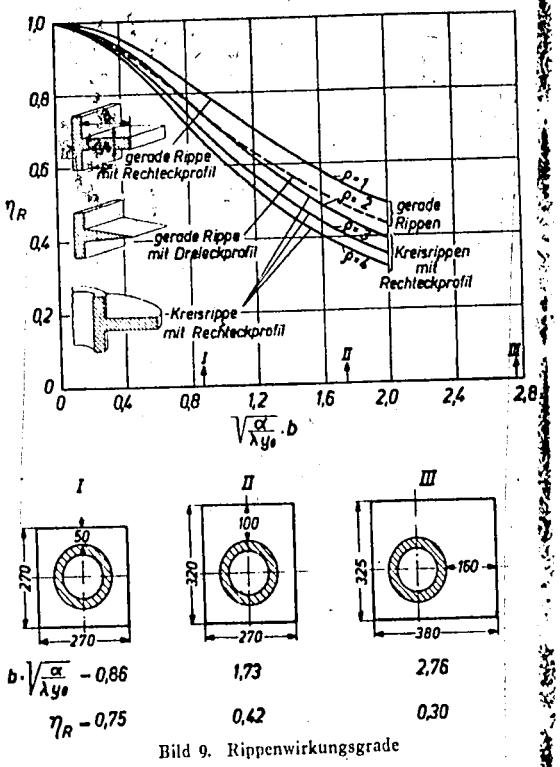
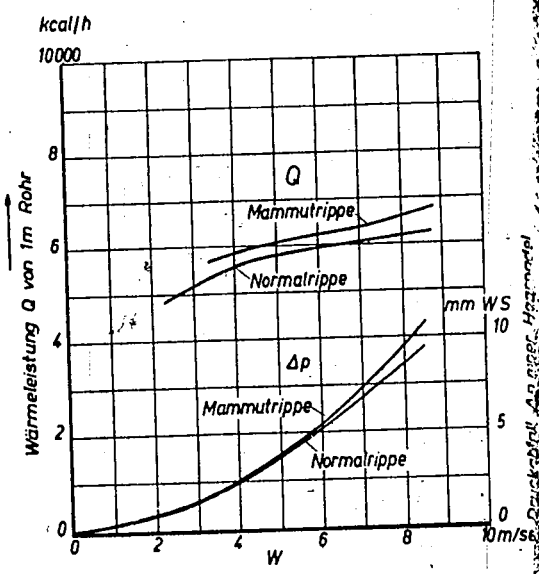


Bild 9. Rippenwirkungsgrade

dem Mittel des Kurvenbündels erhält man die unten geschriebenen η_R-Werte. Von Fall II auf III sinkt η_R um etwa 1/3, d. i. größenordnungsmäßig derselbe Betrag wie die α_a-Verringerung beider Rippenrohrtypen nach den im vorigen Bild gezeigten Versuchen. Würde der Rippensteg auf 50 mm verkleinert, wie z. B. im Fall I mit der quadratischen Rippe 270 × 270, so steigt η_R auf 75% an.



Für 1m Rohr ist bei der

	Normalrippe 270 × 320	Mammutrippe 380 × 325
Fa =	9,34	14,65 m²
G =	212,9	295,4 kg

Bild 10. Wärmeleistung von Mammutrippe und Normalrippe

Der Vergleich zwischen Mammutrippe und Normalrippe wäre unvollständig, würde man nicht die übertragbaren Wärmemengen als Produkt von α_a und der Fläche F_a miteinander vergleichen. Im Bild 10 sind die pro 1 m berippter Rohrlänge übertragbaren Wärmemengen Q, bezogen auf ein Temperaturgefälle von 100° C und unter Benutzung mittlerer α_a-Werte, dargestellt. Der Vergleich bei w = 8 m/sec zeigt eine 8% höhere Wärmeleistung der Mammutrippe, die allerdings auf Kosten einer 57% größeren Fläche und eines 39% höheren Gewichtes erkauft ist. Ebenfalls ist der Druckabfall um 13% höher.

Es bleibt jetzt noch die Frage zu klären, wie sich eine Verkleinerung der Rippe auf die Wärmeleistung des Vorheizers auswirkt. Hierzu sei nochmals der Grundriß einer normalen Haarnadel skizziert (Bild 11):

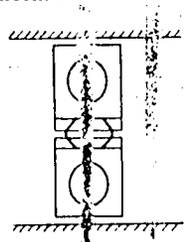


Bild 11. Grundriß einer normalen Haarnadel

Es ist verständlich, hier zuerst die innere Rippe abzuschneiden bis zur quadratischen Rippe 270 × 270. Nach einem Vorschlag von Herrn Dipl.-Ing. Schappert und Herrn Dr. Wilde muß der freie Querschnitt durch einen Verdränger ausgefüllt werden, sonst würden die Rauchgase unbehindert durch die Gassenmitte strömen, ohne in die Rippenzwischenräume einzutreten. Diese Maßnahme erhöht nicht nur den Wirkungsgrad des inneren Rippenteiles, sondern nutzt gleichzeitig auch seine bessere Wärmeaufnahmefähigkeit durch die Erhöhung der Gasgeschwindigkeit zwischen den Rippen aus.

Als Übergang von der Normalrippe 270 × 320 zur quadratischen Rippe 270 × 270 wurde noch die Rippe 270 × 300 untersucht. Die Ergebnisse aller Messungen sind in Bild 12 dargestellt. Als Abszisse ist hier

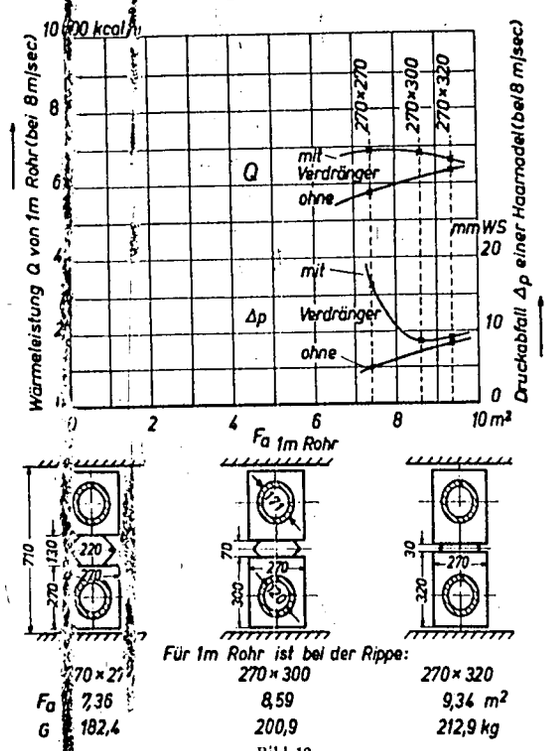


Bild 12.
Einfluß des Verdrängers auf die Wärmeleistung von Rechteckrippen

die äußere Oberfläche Fa für 1 m Rohrlänge aufgetragen. Als Ordinaten sind die pro 1 m Rippenrohrlänge übertragbaren Wärmemengen Q aufgetragen, wobei für alle Fälle die α_a-Werte bei einer Rauchgasgeschwindigkeit von 8 m/sec vor den Rohren gewählt wurden. Man erkennt die außerordentliche Überlegenheit der Verdrängeranordnung, die gegenüber dem Normalrohr eine maximale Mehrleistung von etwa 12% ergibt. Von den beiden gleichwertigen Rippen 270 × 270 und 270 × 300 ist letztere wegen ihres wesentlich kleineren Druckabfalles zu bevorzugen. Die Gewichtsersparnis gegenüber der Normalrippe würde 6% betragen. Auf Grund dieser Ergebnisse wurde die Rippe 270 × 300 mit Verdränger als günstigste Rechteckrippe erkannt und für die Spitzenvorheizer einiger neuer Werke, insbesondere Oberschlesien, eingeführt.

Einen Einblick in die Wärmeströmungen der Rippe bieten auch die Messungen der Rippentemperaturen. Ein solches Temperaturbild sei für die Rippe 270 × 300 mit Verdränger im Bild 13 gezeigt. Die Messungen erfolgten mittels eines Thermoelementes, das auf einem Kupferplättchen aufgelötet war. Das Element war durch ein Röhrchen gelegt und konnte seitlich durch einen Spalt in die Gasse eingeführt werden. Im Bild ist über den jeweiligen Meßpunkten die Rippentemperatur von 200° C ab gerechnet als senkrechte Strecke abgetragen. Vor dem ersten Rohr (Nr. 26) ist die Gastemperatur über dem Gassenquerschnitt konstant. Denselben Temperaturver-

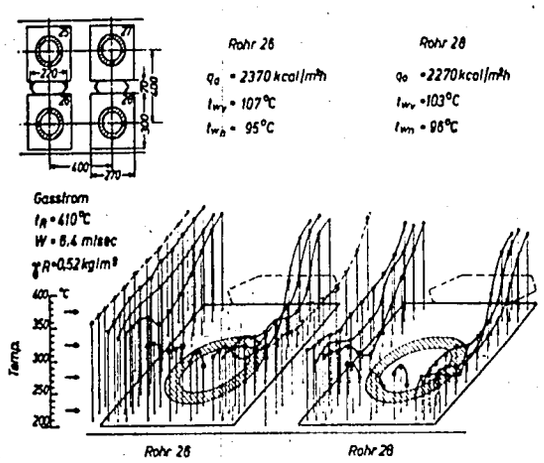


Bild 13. Temperaturfeld auf der Rippe 270×300 mm mit Verdränger

lauf zeigt auch die vordere Rippenkante. Hinter dem ersten Rohr ist das Gas im Rohrschatten stärker abgekühlt als an den seitlichen Durchgängen, die noch unabgekühlte heiße Gase durchlassen. Einen entsprechenden Verlauf zeigt wieder die Vorderkante des zweiten Rohres. Auf der Rippe selbst ist natürlich von allen Seiten her ein starkes Temperaturgefälle zum Hochdruckrohr hin zu beobachten. — Zu beachten ist noch das Temperaturfeld auf den Rippenecken. Die vordere innere Ecke des ersten Rohres ist eine Fläche fast gleicher Temperatur, d. h. also ohne Anteil an der Wärmeübertragung. Die hintere innere Ecke dagegen zeigt ein starkes Temperaturgefälle senkrecht zur Gasströmung. Dasselbe gilt für die vordere und hintere Ecke des zweiten Rohres. Die Ecken*) sind also als seitliche Wärmefühler anzusehen, die die Wärme aufnehmen und seitlich den Rippenflächen vor und nach dem Rohr zuleiten, von wo aus der radiale Wärmefluß zum Rohr einsetzt. Es wäre demnach nicht statthaft, die Rippenecken abzuschneiden. Vielmehr bilden diese einen wertvollen Anteil an der Wärmeübertragungsfläche.

*) Ausgenommen die vordere innere Ecke

Es wäre nun eigentlich zu erwarten gewesen, daß der Wärmefluß von den Ecken aus direkt radial zum Rohr strömen würde. Eine Erklärung für das abweichende Verhalten lieferte die Kenntnis der Gasströmung in der Gasse. Mit einem dünnen Pitotrohr wurde die Gasgeschwindigkeit zwischen den Rippen in verschiedenen Querschnitten gemessen. Die Ergebnisse seien im Bild 14 gezeigt.

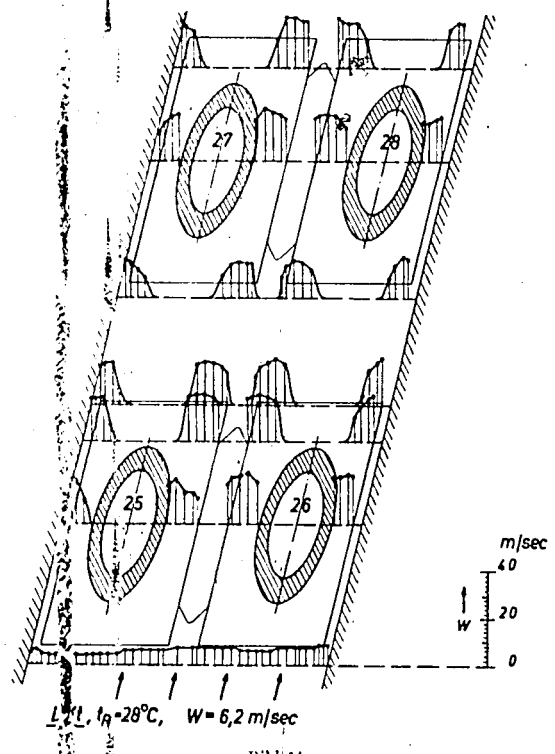


Bild 14.
Gasgeschwindigkeit zwischen den Rippen 270×300 mit Verdränger

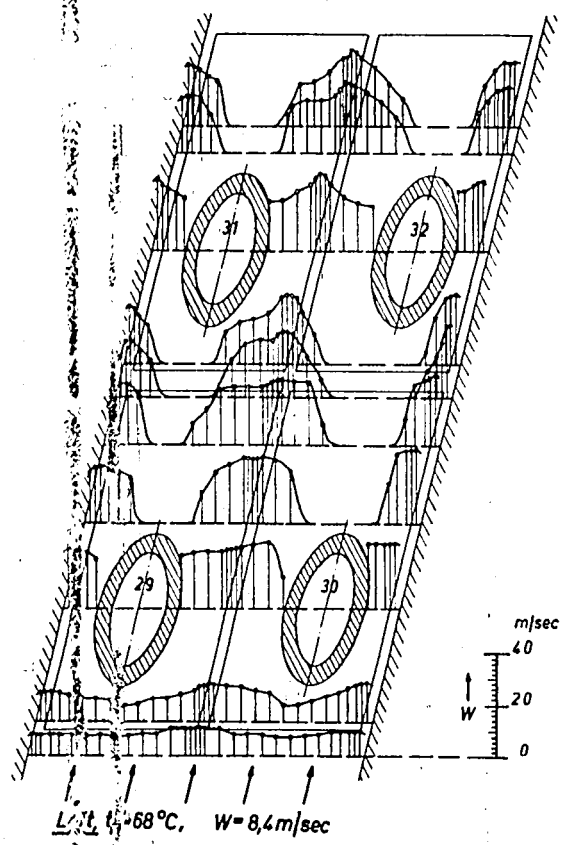


Bild 15. Gasgeschwindigkeit zwischen den Rippen 380/325 mm

Die Rippenrohre sind in parallelperspektivischer Darstellung gezeichnet, wobei das Tiefenmaß verdoppelt ist. Die Rauchgasgeschwindigkeiten sind an jeder Meßstelle als senkrechte Geraden eingezeichnet. Die ankommenden Rauchgase zeigen im Gassenquerschnitt einige kleine Unterschiede in der Geschwindigkeit, die bei solch einer Apparatur unvermeidlich sind. In den engsten Stellen zwischen Verdränger und Rohr erhöhen sich die Geschwindigkeiten auf den etwa dreifachen Betrag, entsprechend der Querschnittsverringerung. Diese Geschwindigkeitsspitzen bleiben nun auch nach den Rohren trotz der großen Querschnittserweiterung bestehen, so daß die ganze Rippenfläche hinter den Rohren nicht von Gas bespült wird und natürlich daher einen schlechten Wärmeübergang aufweist. Diese Flächen werden vom Rohr gekühlt, dagegen die seitlichen Flächen von den nebenan durchgeströmten heißen Gasen intensiv erwärmt, wodurch der merkwürdige Wärmefluß quer zur Gasströmung entsteht.

Grundsätzlich dasselbe Bild ist auch bei den verdrängerlosen Haarnadeln, z. B. der Mammutrippe, vorhanden (Bild 15). Hier erweitern sich die Geschwindigkeitsprofile etwas nach den Rohren, ein breiter Strömungsschatten bleibt aber trotzdem erhalten. Beachtenswert ist noch die Geschwindigkeitsspitze im mittleren Spalt zwischen den Rippen. Um die Geschwindigkeitsmessungen zu kontrollieren, wurden die einzelnen Profilflächen planimetriert und unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur die jeweilige Gasmenge errechnet. Diese stimmte in allen Querschnitten sehr gut mit unserer Blendenmessung überein.

Schließlich seien noch einige Bilder (Bild 16) gezeigt, bei denen die Gasströmung in einem Glas-Modell von 3,6-

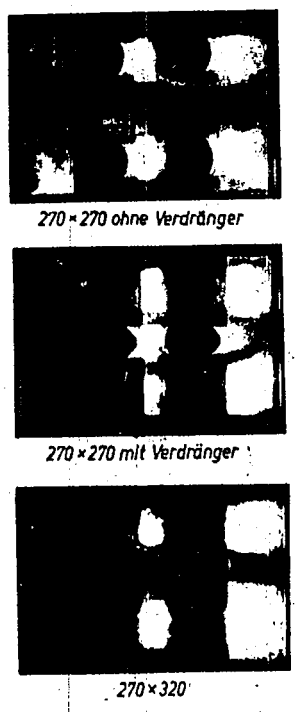


Bild 16. Wasserströmung durch gläserne Modellrippenrohre

facher Verkleinerung mit gefärbter Wasserströmung veranschaulicht ist. Die Ähnlichkeit in bezug auf gleiche Reynoldssche Zahlen ist allerdings nicht vorhanden, da die Wassermenge zu klein war. Im obersten Lichtbild ist das

quadratische Rippenrohr 270×270 ohne Verdränger photographiert. Man erkennt sehr gut den mittleren Gasstrom, der im zweiten Rohrpaar garnicht mehr richtig in die Rippen eindringt. Mit Verdrängern bilden sich beiderseits die Gasstrahlen kräftig aus. Im untersten Bild ist die Strömung am normalen Rippenrohr gezeigt. In allen drei Fällen erkennt man als helle Stellen die Doppelwirbel hinter den Rohren als Flächen schlechter Gasbespülung.

Ich habe in meinen Ausführungen nur einen Teil aus unserem umfangreichen Versuchsprogramm vortragen können. Neben den Rechteckrippen wurden noch spiralförmig aufgewickelte und verschweißte Rippen bei verschiedener Spiralensteigung, verschiedener Rippenstärke und verschiedener Schweißung untersucht. Ferner kamen Konstruktionen zur Prüfung, bei denen das Schweißen ganz vermieden werden sollte, z. B. Rippen, deren Loch einen ungebördelten, federnd geschlitzten Rand besitzt, oder auch Rippen, die mittels eines Weicheisenringes auf das Rohr aufgestemmt sind. Schließlich wurden noch unberippte Hochdruckrohre mit Führungsblechen sowie unberippte Hochdruckrohre in der Anordnung eines versetzten Rohrbündels hinsichtlich ihres Wärmeüberganges geprüft. Insgesamt wurden 32 verschiedene Hochdruckrippenrohre untersucht.

Auf alle diese Versuche konnte aus Zeitmangel nicht näher eingegangen werden. Es liegen jedoch hierüber mehrere Berichte von mir vor. — Ich hatte mich hier auf die geschweißte Rechteckrippe beschränkt, um diese Versuche in genügender Ausführlichkeit besprechen zu können. Dabei hoffe ich, Ihnen den Eindruck vermittelt zu haben, daß auch ein einfach erscheinendes Wärmeübergangsproblem mancherlei interessante Vorgänge in sich birgt und daß auch aus einem langjährig praktisch erprobten und als gut befundenen Wärmeaustauscher durch intensive Untersuchung noch einige kostbare Prozente mehr Wärmeleistung herauszuholen sind.

Aussprache:

Wilke: Die Rippenrohrvorheizer der Hydrierungsanlagen stellen in jeder Beziehung große Objekte dar, und es war deshalb schon seit längerer Zeit angestrebt, durch systematische Untersuchung die Möglichkeit von Verbesserungen, sei es konstruktiver, sei es betrieblicher Art, zu klären. Vereinzelte, in primitiver Weise ausgeführte Versuche hatten zu falschen Schlüssen geführt. Eine Übertragung der Arbeit an eine Technische Hochschule wurde als nicht zweckmäßig bzw. wegen Mangel an Assistenten als nicht durchführbar erkannt. Die besondere Förderung der Arbeiten geschah durch Herrn Dir. Josenhans, der diesmal leider nicht an der Tagung teilnehmen konnte. Wenn auch die Erstellung einer umfangreichen, kostspieligen Apparatur nötig war, so können doch mit dieser in sehr lehrreicher, gründlicher und genauer Weise alle Einflüsse studiert werden, wie z. B. verschiedene Rippenformen, Arten der Rippenbefestigung u. a. m. Auch ist die Apparatur für andere Versuche der Wärmeübertragung bei hohen Rauchgastemperaturen verwendbar.

Kraussold schneidet die Frage des Strömungsschattens an und fragt nach der Untersuchung größerer Rippenabstände.

Kling: Versuche hierüber haben zur Zeit noch nicht stattgefunden.

Beckmann fragt, warum die Führung der Rauchgase im Gleichstrom erfolgte.

Kling: Das im Vortrag gezeigte Bild stellt nur einen Zug im Spitzenvorheizer dar, nämlich den heißesten. Andere Züge haben Kreuzstrom-Gegenstrom-Schaltung. Die Möglichkeiten der Gassenschaltung sind in der Praxis vielseitig, worauf aber im Vortrag nicht eingegangen werden konnte.

Kipperscheinungen bei einem Dampfstrahlaggregat mit 0,1 mm Hg Endvakuum

Von Dr.-Ing. ALFRED HALTMEIER

Inhalt:

Bei einem Hochvakuum-Dampfstrahlaggregat amerikanischer Herkunft wurden auf dem Versuchsstand sprunghaft auftretende Vakuumverschlechterungen bzw. Aussetzen der Förderung beobachtet. Die Erscheinung konnte auf das mangelhafte Arbeiten der Treibdüse der Hochvakuumstufe zurückgeführt werden. Durch eine von der ursprünglichen wesentlich abweichende Bemessung der Treibdüse wurden stabile Vakua erreicht.

Günstige Berichte über die Leistungsfähigkeit amerikanischer Strahlapparate waren Veranlassung, daß Leverkusen sich einen von der Firma Worthington gebauten Strahlsauger beschaffte (Schaltungsschema Bild 1). Nach Angabe der Lieferfirma sollte der Apparat imstande sein, stündlich 2 kg Luft aus einem Vakuum von 0,5 mm Hg abzusaugen. Zur Nachprüfung dieser Leistungszusage wurde das Strahlaggregat vor seiner Verwendung im Betrieb auf dem Versuchsstand untersucht.

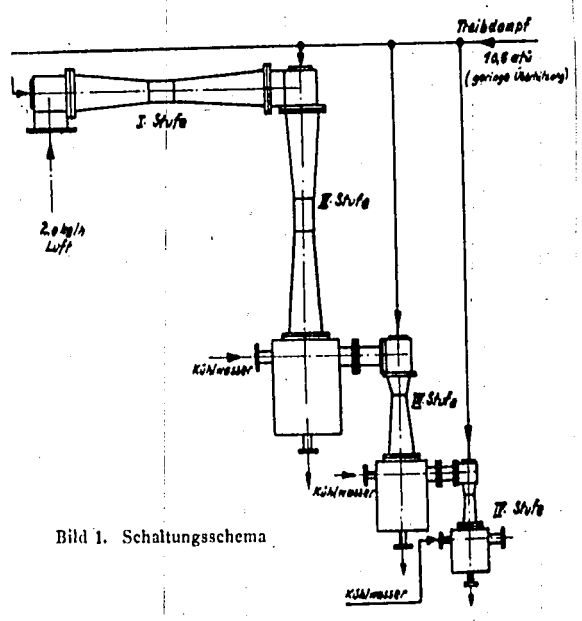


Bild 1. Schaltungsschema

…rohrvorheizer der Hydrierungs-
…eziehung große Objekte dar, und
… längerer Zeit angestrebt, durch
…ung die Möglichkeit von Ver-
…truktiver, sei es betrieblicher Art
…, in primitiver Weise ausgeführte
…suche hatten zu falschen Schlüssen geführt. Eine
…ertragung der Arbeit an eine Technische Hochschule
…rde als nicht zweckmäßig bzw. wegen Mangel an Assi-
…enten als nicht durchführbar erkannt. Die besondere
…rderung der Arbeiten geschah durch Herrn Dir. Josen-
…hns, der diesmal leider nicht an der Tagung teilnehmen
…onnte. Wenn auch die Erstellung einer umfangreichen,
…tsprechenden Apparatur nötig war, so können doch mit
…ieser in sehr lehrreicher, gründlicher und genauer Weise
…lle Einflüsse studiert werden, wie z. B. verschiedene
… der Rippenbefestigung u. a. m. Auch
… andere Versuche der Wärmeüber-
…Rauchgastemperaturen verwendbar.

…heidet die Frage des Strömungs-
…gt nach der Untersuchung größerer

Klug: Versuche hierüber haben zur Zeit noch nicht stattgefunden.

Beckmann fragt, warum die Führung der Rauchgase im Gleichstrom erfolgte.

Klug: Das im Vortrag gezeigte Bild stellt nur einen Zug im Spitzenvorheizer dar, nämlich den heißesten. Andere Züge haben Kreuzstrom-Gegenstrom-Schaltung. … der Gassenschaltung sind in der Praxis … aber im Vortrag nicht eingegangen wer-

…rahlaggregat mit 0,1 mm Hg Endvakuum

…RED HALTMEIER

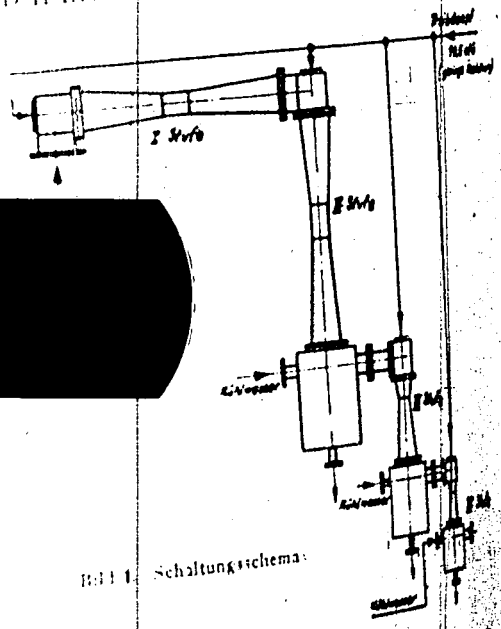


Bild 1. Schaltungsschema

Die Messungen erstreckten sich in der Hauptsache auf die Fördereigenschaften. Kurve a in Bild 2 zeigt den Zusammenhang zwischen Vakuum und Fördermenge, wie er bei dem ursprünglichen Zustand des Aggregates aus

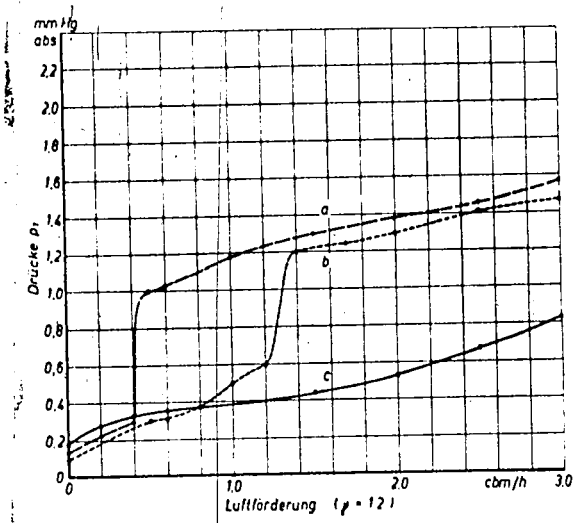


Bild 2. Zusammenhang zwischen Vakuum und Fördermenge

…mehrfachen Messungen mit wenig voneinander abweichendem Ergebnis ermittelt wurde. Bei der Fördermenge Null ergaben sich Saugraumdrucke zwischen 0,08 und 0,15 mm Hg. Mit zunehmender Förderleistung stieg der Druck relativ langsam auf annähernd 0,3 mm Hg bei etwa 0,4 cbm/h Förderung an. Mit weiterer Steigung der Fördermenge trat ein plötzliches Heraufschnellen des Druckes auf etwa 1 mm Hg ein. Beim Rückwärts-Durchfahren der Kurve ist der Sprung etwas weniger scharf. Wie die Kurve zeigt, wird die Leistungsgarantie, 2 kg Luft bei 0,5 mm Hg, nicht erfüllt. Bei dem der Sollförderung von 2 kg Luft entsprechenden Volumen von 1,67 cbm/h ist der Druck im Saugraum nicht 0,5, sondern 1,34 mm Hg.

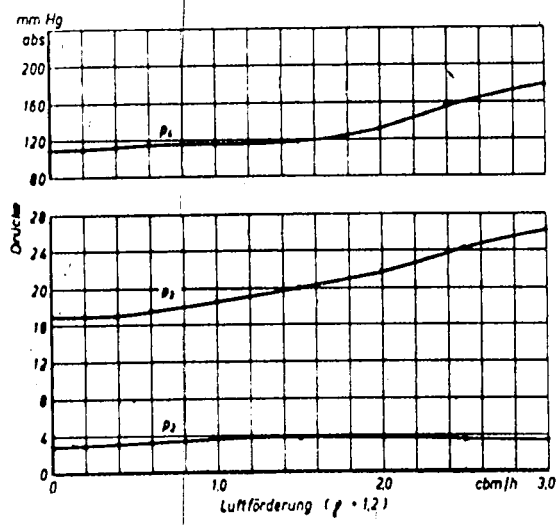


Bild 3. Zwischendrücke

Um festzustellen, welche der vier Düsenstufen für das eigenartige Verhalten des Aggregates verantwortlich sei, wurden auch die Drucke der drei anderen Stufen gemessen (Bild 3). Wie man erkennt, ist der Verlauf dieser Kurven der Zwischendrucke durchaus stetig, so daß als Urheber des sprunghaften Verlaufes des Enddruckes nur die Endstufe in Frage kommen konnte. Diese wurde daher etwas genauer unter die Lupe genommen. Hierzu wurden Schauglässer am Saug- und am Druckstutzen dieser Stufe angebracht, so daß das Arbeiten der Düse beobachtet werden konnte. Dabei ergaben sich recht interessante Einblicke. Wenn das Treibdampfventil des Strahlers geöffnet wurde, bildete sich in dem erweiterten Teil der Treibdampfdüse sehr schnell ein Kranz von nadelförmigen Eiskristallen, die von der Peripherie strahlenförmig nach innen gerichtet waren. Aus dem Vorhandensein dieser Kristalle wurde geschlossen, daß in der Nähe der Düsenwand keine wesentliche Geschwindigkeit bestanden haben konnte. Der Treibdampfstrahl mußte sich also von der Düsenwand abgelöst haben und konnte nur den flächenmäßig vielleicht ⅓ der Düsenöffnung ausmachenden kristallfreien Raum im Innern ausgefüllt haben. An sich sollte man erwarten, daß bei diesem ungünstigen Strömungszustand in der Treibdüse die Förderleistung dieser Stufe sehr schlecht gewesen wäre. Das Gegenteil war jedoch der Fall. Solange der Kristallkranz die Düsenöffnung verengte, arbeitete die Düse ausgezeichnet und lieferte Drucke bis herab zu 0,08 mm Hg. Leider war dieser Zustand nur von kurzer Dauer. Bereits wenige Minuten nach dem Öffnen des Treibdampfventiles konnte man die Bruchstücke des Kristallkranzes gegen das Schauglas fliegen sehen und auch hören. Dann war die Treibdüse frei, aber gleichzeitig war auch der Druck im Saugraum auf etwa 1 mm Hg (von vorher 0,2 bis 0,4 mm Hg) heraufgeschnellt. Um die Lebensdauer des offenbar günstig wirkenden Kristallkranzes in der Treibdüse zu erhöhen, wurde die vor der Treibdüse befindliche Dampfkammer vor dem Ansetzen der Düse mit Wasser gefüllt. Hiermit gelang es, den Zeitpunkt des Wegfliegens der Eiskristalle um etwa 10 bis 15 Minuten hinauszuschieben. Einen gewissen Erfolg erbrachte auch das Isolieren der Treibdampfzuleitung.

Nachdem die soeben geschilderten Beobachtungen vorlagen, ging das Bestreben dahin, die Strahlablösung von der Düsenwand zu verhindern. Ein geeignetes Mittel dazu schien die in der Hydrodynamik vielfach mit Erfolg angewendete Absaugung der Grenzschicht zu sein, die im vorliegenden Fall in besonders einfacher Weise zu verwirklichen war, da erwartet werden konnte, daß der im Saugraum herrschende tiefere Druck ohne weiteres die notwendige Saugwirkung liefern würde. Zur Ausführung dieser Maßnahme wurde von der Treibdüse auf der Austrittsseite ein tüchtiges Ende abgeschnitten und dieses mit einer Muffe unter Offenlassung eines Spaltes wieder angefügt. Der Erfolg war gleich Null, einerlei, ob der Spalt breiter oder schmäler gestellt oder an einer dem engsten Querschnitt der Treibdüse näheren oder entfernteren Stelle angeordnet wurde. Erst wenn man das abgeschnittene Endstück ganz wegließ, ergab sich überraschenderweise ein unverkennbarer Erfolg. Die Förderkurve einer solchen abgeschnittenen Treibdüse ist in Bild 2 als Kurve b wiedergegeben. Wie man sieht, ist nicht die Sprungstelle des Druckes weiter nach rechts verschoben. Kurve c im gleichen Bild zeigt die Förderkurve einer noch stärker gestutzten Treibdüse. Hier ist keine Sprungstelle mehr sichtbar. Diese Kurve genügt auch der eingangs genannten Garantie, denn bei 2 kg = 1,67 cbm/h stündlicher Förderung wird ein Saugraumdruck von 0,45 mm Hg erreicht.

Zum Schluß sei noch erwähnt, daß die abgeschnittene Düsenlänge nicht unbeträchtlich ist. Die Treibdüse der Kurve c ist nur etwa noch halb so lang wie die ursprüngliche Düse, welche die Kurve a lieferte.

Aussprache:

Endlein fragt nach Form und Abmessungen der Treibdüse der ersten Stufe.

Haltmeier skizziert die Düse, eine Lavaldüse mit 1,2 mm engstem, 31 mm Austrittsdurchmesser und etwa 150 mm Länge.

Kiesskalt weist darauf hin, daß bei erweiterten Düsen unter gewissen Bedingungen nur bis zu einer bestimmten Düsenlänge Expansion besteht und darüber hinaus ein Verdichtungsstoß eintritt (Überschallschwingungen, Sinken des Wirkungsgrades).

Matz teilt mit, daß der Stoß bei Düsenwinkeln über 15° auftritt.

Haltmeier gibt als üblichen Winkel 10° an. Bei höheren Drücken tritt das Kippen nicht ein. Der Verlauf der Zwischendrücke ist, wie Bild 3 zeigt, durchaus stetig.

Bericht über die Heizflächenkonstruktion nach Kautz

Von Dr.-Ing. KURT KAUTZ

Inhalt:

Es wird eine neue Heizflächenkonstruktion beschrieben. Diese besteht aus einer unmittelbar auf die zu beheizende Fläche aufgelegten und mit ihr punktweise verschweißten Blechummantelung. Sie ist zunächst für Dampf bis 3 atü ausgeführt und kann bei Kesseln, Pfannen, Verdampfern u. a. angewendet werden. Die Konstruktion wird nach Leistung und Kosten mit anderen Beheizungsarten verglichen.

In der chemischen Industrie erfordern die meisten Prozesse zu ihrer Durchführung die Zufuhr von Wärme. Diese Aufgabe erfüllt der Apparatebau durch eine Reihe bekannter Konstruktionen. Die vorgeschlagene neue Heizflächenbauweise dient dem gleichen Zweck. In Bild 1 sind die gebräuchlichsten Konstruktionen mit der neuen Heizflächenbauweise vergleichsweise dargestellt.

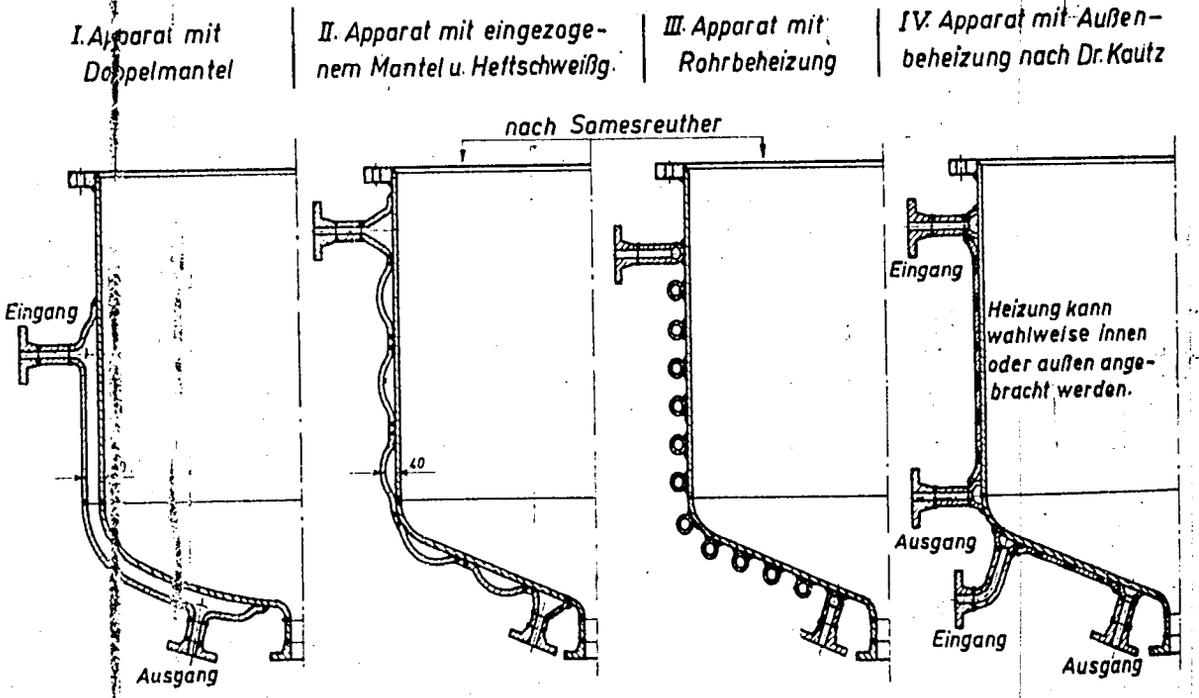


Bild 1. Verschiedene Konstruktionsformen von beheizten Apparaten

Auf dem Bilde ist an erster Stelle der Doppelmantelkessel schematisch wiedergegeben, der in unseren Betrieben ja in zahlreichen Exemplaren vorhanden ist. Seine Bemessung muß bekanntlich den gesetzlichen Vorschriften für Dampffässer entsprechen. Der Heizdampfdruck wirkt auf die gesamten nicht abgestützten Flächen des Innen- und Außenkessels. Dabei ergibt die Berechnung des Innenkessels auf äußeren Überdruck noch größere Wandstärken, als sie der auf Innendruck beanspruchte Außenkessel erfordert. Infolgedessen kommt diese Bauweise im allgemeinen nur für geringe Heizdampfdrücke in Frage.

Die nächste Ausführungsform stellt den Doppelwandkessel mit der sogenannten Warzenschweißung nach Samesreuther dar. Durch die Einbeulungen des Außenkessels, die in ihrem Grunde an den Innenkessel angeschweißt sind, wird die Innen- und Außenwand gegeneinander verankert, so daß die Wandstärke bereits wesentlich schwächer als beim gewöhnlichen Doppelmantelgefäß bemessen werden bzw. der Kessel auch für mittlere Drücke benützt werden kann. Ein Nachteil dieser Ausführung sind die hohen Kosten für die schwierige Verformungs- und Anpaßarbeit.

Kresskalt weist darauf hin, daß bei erweiterten Düsen unter gewissen Bedingungen nur bis zu einer be- [redacted] länge Expansion besteht und darüber [redacted] chtungsstoß eintritt (Überschallschwin- [redacted] s Wirkungsgrades).

[redacted], daß der Stoß bei Düsenwinkeln über [redacted]

[redacted] gibt als üblichen Winkel 10° an. Bei [redacted] tritt das Kippen nicht ein. Der Verlauf der Zwischendrücke ist, wie Bild 3 zeigt, durchaus stetig.

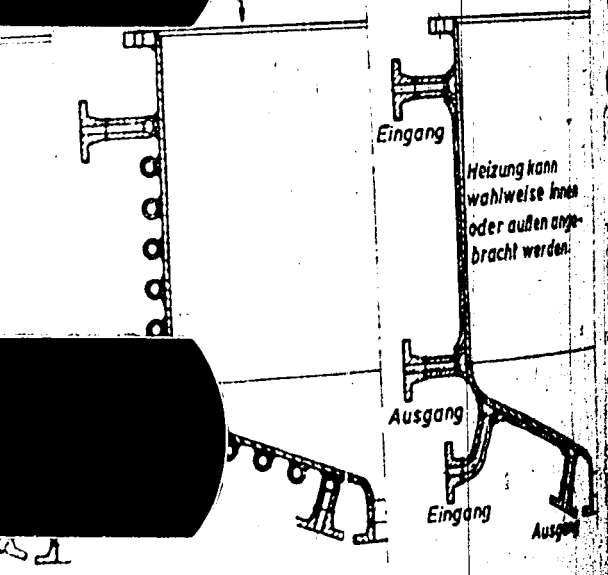
chenkonstruktion nach Kautz

KURT KAUTZ

[redacted] essung muß bekanntlich den gesetzlichen [redacted] ir Dampffässer entsprechen. Der Heiz- [redacted] kt auf die gesamten nicht abgestützten [redacted] en- und Außenkessels. Dabei ergibt die [redacted] Innenkessels auf äußeren Überdruck noch [redacted] tärken, als sie der auf Innendruck bean- [redacted] enkessel erfordert. Infolgedessen kommt diese Bauweise im allgemeinen nur für geringe Heizdampfdrücke in Frage.

Die nächste Ausführungsform stellt den Doppelwand-kessel mit der sogenannten Warzenschweißung nach Samesreuther dar. Durch die Einbeulungen des Außenkessels, die in ihrem Grunde an den Innenkessel angeschweißt sind, wird die Innen- und Außenwand gegeneinander verankert, so daß die Wandstärke bereits wesentlich schwächer als beim gewöhnlichen Doppelmantelgefäß [redacted] werden bzw. der Kessel auch für mittlere

[redacted] rat mit [redacted] heizung | IV. Apparat mit Außenbeheizung nach Dr. Kautz



[redacted] ktionsformen von beheizten Apparaten

[redacted] pel- Drücke benützt werden kann. Ein Nachteil dieser [redacted] n un- Ausführung sind die hohen Kosten für die schwierige [redacted] nden Verformungs- und Anpaßarbeit.

An dritter Stelle folgt die „Samesreuther-Berohrung", die bei entsprechender Rohrbemessung auch für hohe Drücke geeignet ist. An sich ist das Anbringen von spiralig gewundenen Rohren schon länger bekannt. Da die Rohre auf dem Mantel nur auf einer verhältnismäßig schmalen Fläche aufliegen, ist der Wärmedurchgang schlecht. Samesreuther hat durch Kupferleisten zwischen Rohr und Mantel diesem Mangel abzuhelfen versucht. Trotzdem bleibt der Wärmeübergang auch bei seiner Ausführung in bescheidenen Grenzen.

Auf weitere Sonderbauweisen, wie die von Neubäcker-Danzig oder von Frey-Eßlingen, die durch Aufschweißen von Halbrohren oder irgendwelcher Blech- oder Winkelprofile Leitkanäle für den Heizdampf erzeugen wollen, soll hier nicht näher eingegangen werden.

Demgegenüber ist die neue Heizflächenbauweise, die im Bild rechts dargestellt ist, außerordentlich einfach. Die neue Heizfläche besteht aus zwei ebenen oder gleichartig gekrümmten Wandungen — im allgemeinen Blechen —, die ohne besondere Oberflächenbearbeitung einfach aufeinander gelegt sind. Die Bleche werden an ihren Rändern und durch über die ganze Fläche regelmäßig verteilte Heftlöcher druckdicht miteinander verschweißt. Durch den sich dabei ergebenden natürlichen Spalt wird der Heizdampf hindurchgeleitet. Die Zuführung des Dampfes erfolgt durch besondere Dampfverteilungskanäle, ebenso die Abführung des Kondenswassers. Mit dieser Konstruktion können die verschiedensten Heizdampfdrücke bewältigt werden. Die Wandstärke des aufgeschweißten Heizmantels schwankt dabei höchstens um 1 bis 2 mm. Sie beträgt bei Eisen im Durchschnitt 3 mm, bei V2A 2 mm. Die Anzahl und der Abstand der einzelnen Heftlöcher richtet sich nach dem vorgesehenen Heizdampfdruck. Da es rechnungsmäßig sehr schwer ist, die erforderliche Wandstärke und Lochteilung exakt zu ermitteln, wurden zunächst zahlreiche Versuchsstücke angefertigt, die dann durch Wasserdruck geprüft bzw. zerstört wurden. Die Abmessungen der Versuchsstücke sowie die Prüfbedingungen und die Befunde sind in nachstehender Tabelle, Bild 1, zusammengestellt.

Lfd. Nr.	Versuch vom	Blechdicke mm	Material	Abstände der Lochreihen u. Löcher mm	Ohne Beschädigung ertragener Druck atü	Sprengdruck	Form des Probestückes
1	Okt. 1937	3	V 2 A	70×70	25		eb. Platte
2	Sept. 1938	2	Eisenbl.	70×70	10	22	eb. Platte
3	Sept. 1938	3	Eisenbl.	70×70	20	32	eb. Platte
4	Mai 1938	1,5	V 2 A	70×70	10		Rohrinnenauskleidung
5	Sept. 1938	2	Eisen	70×70	10		
6	Febr. 1939	3	V 2 A	42×42	250 [1]		eb. Platte
7		3	V 2 A	36×36	200 [2]		eb. Platte
8	März 1939				245 [3]		
9	April 1939				245 [4]		eb. Platte
10	Nov. 1939	2	Eisen	50×50	28		eb. Platte
11	Dez. 1939	4	V 2 A	36×36	200		
12	Nov. 1940	2,5	Eisen	42×42	50		
13	Jan. 1941	2,5	Eisen	70×70	35		

Tabelle 1. Heizflächenkonstruktion. Abmessungen, Werkstoffe, Heftloch-Teilung und Drücke der bisherigen Versuchsstücke

[1]) später bei 200 atü undicht im Heftpunkt.
[2]) später auch bei 200 atü undicht in Randnaht. Entfernung der Punkte vom Rande zu groß.
[3]) Das Versuchsstück Nr. 7 wurde wieder gedichtet und in der zu schwachen Randpartie einige zusätzliche Heftpunkte angebracht. Bei 600 °C im Ofen geglüht und mehrfach auf 350 °C erhitzt und mit Wasser abgeschreckt, undicht im Heftpunkt.
[4]) Das Versuchsstück Nr. 8 (7) wurde nochmals nachgeschweißt.

Weiter wurden auch im Materialprüfungsbereich zu Modell-Platten untersucht, wobei die bleibende und federnde Dehnung des aufgeschweißten Mantelbleches bei verschiedenen Druckstufen gemessen wurde. Die Ergebnisse sind in dem nachfolgenden Innendruck-Dehnungs-Diagramm, Bild 2, wiedergegeben. Die erste meßbare bleibende Dehnung trat an der ungünstigsten Stelle

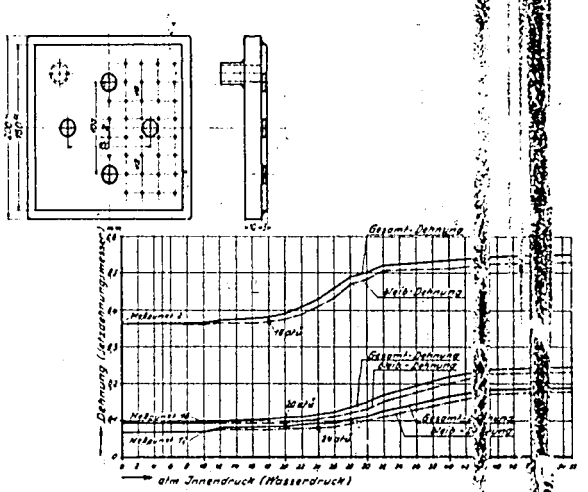
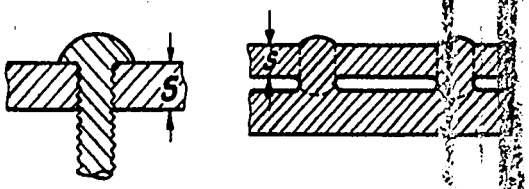


Bild 2. Dehnungsmessungen an einer lichtbogengeschweißten Modellplatte

bei etwa 18 atü auf, während ein Undichtwerden erst bei 55 bzw. 80 atü beobachtet wurde.

Als überschläglicher Anhalt für die Bemessung der Wandstärke der Heizmäntel kann die Formel von Bach für Stehbolzenkesselwände gemäß den Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel, die in Bild 3 wiedergegeben ist, dienen. Aus dieser Formel ergibt sich rückwärts gerechnet für die Abmessungen der untersuchten



$$S = c \sqrt{p\,(a^2 + b^2)}$$

Koeffizient $c = 0{,}017 \div 0{,}011$

a = Abstand der Heftlöcher in einer Reihe.

b = Abstand der Lochreihen

Bild 3. Berechnung der Heizmantelstärke nach der Stehbolzenformel

Modellplatten bei Einsetzen der günstigsten Koeffizienten ein zulässiger Heizdampfdruck von 7 atü. Beim Vergleich der empirisch gefundenen Werte von 18 atü für die erste bleibende Verformung mit dieser Rechnungsgröße erkennt man die große Sicherheit, wenn man bei der konstruktiven Bemessung nach dieser Formel rechnet. Bei der Stehbolzenverbindung müssen die Kräfte durch Gewinde und Kopf übertragen werden. Bei der Heftlochschweißung handelt es sich dagegen entsprechend dem Bindungsbild der

Schweißung um eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Ober- und Unterblech zu einer Einheit. Es ist daher berechtigt, hierfür die günstigsten Koeffizienten einzusetzen.

Wer zum erstenmal mit der neuen Heizflächenausführung zu tun bekommt, hat regelmäßig zunächst die größten Bedenken, ob überhaupt ein ausreichender Dampfdurchgang und damit eine befriedigende Heizleistung gesichert ist. Die beste Entkräftung dieser Bedenken sind die praktischen Ergebnisse der verschiedenen Wärmedurchgangsversuche, die im Laufe der Zeit in der technischen Versuchsgruppe Lu 104a mit freundlicher Unterstützung und Beratung durch die Herren Dr. Simon, Dr. Lüder, Schläfer und John durchgeführt worden sind.

Bereits die ersten im Jahre 1938 durchgeführten Wasserverdampfungsversuche ergaben trotz mancher Mängel der Apparaturen Wärmeübergänge bis zu 2700 kcal/m² h °C, bezogen auf die gesamte Heizfläche.

Zunächst wurde damals ein mantelbeheiztes und anschließend ein bodenbeheiztes Kochgefäß untersucht, worüber im Januar 1939 berichtet wurde. In Bild 4 ist die Ausführung und Versuchsanordnung der Bodenheizung wiedergegeben.

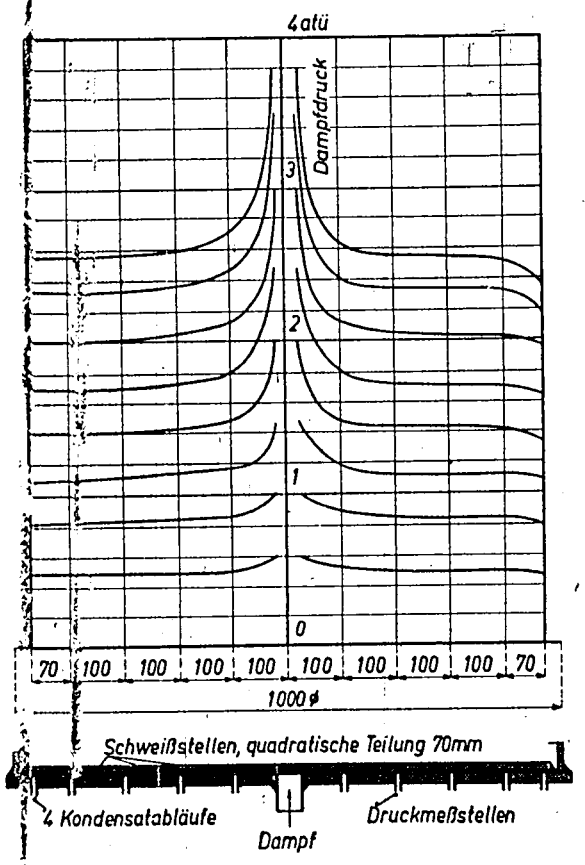


Bild 4. Druckverteilung in einem beheizten Boden

Die für verschiedene Dampfdrücke gemessene Druckverteilung in dem Boden gibt einen guten Einblick in die Heizvorgänge. Bei Eintritt des Dampfes in die Heizfläche tritt stets ein merkbarer Druckabfall ein, während dann anschließend der Druck praktisch bis zum Ende der Heizfläche konstant bleibt. Dabei konnte aus dem Aufkochen des Wassers in dem Gefäß beobachtet werden, daß von einem Mindesteingangsdampfdruck von 2½ atü ab die gesamte Heizfläche an der Wärmeübertragung beteiligt war. Bei diesem Druck wurde also das sich bildende Kondensat noch soweit aus dem Spaltraum verdrängt, daß bis in die letzten Felder des Bodens noch Dampf, wenn auch vielleicht schon in sehr nasser Form, gelangte und hier seine Kondensationswärme abgeben konnte. Noch deutlicher wird das ganze Verhalten der Heizfläche aus den Versuchen, die im Jahre 1940/41 ebenfalls in der Versuchsgruppe Lu 104a durchgeführt wurden. Während bei den früheren Versuchsapparaten die Dampfzuführung durch senkrecht oder auch tangential einmündende Dampfzuführungsstutzen im wesentlichen punktförmig nur an einzelnen Stellen der Heizflächen erfolgte, wobei jeweils ein langer, aber schmaler Dampfweg in der Heizfläche erstrebt wurde, besaß das neue Modell, Bild 5a, eine reichlich bemessene Eintritts-Dampfverteilungskammer und eine ebensolche Kondensat-Sammelkammer über die ganze Breite der Heizfläche von ca. 1½ m. Die Länge des Dampfweges, also der Abstand zwischen Dampfverteilungs- und Kondensat-Sammelrohr, betrug dabei ungefähr 1 m.

Durch Umschlagfarbenanstriche konnte nun festgestellt werden, daß die ganze Heizfläche über ihre gesamte Breite gleichmäßig wirksam war, wenn mit einem Eintrittsdampfdruck von mindestens 3½ atü gefahren wurde. Nachdem es so gelungen war, eine gleichmäßige Beaufschlagung der Heizfläche zu erreichen, konnten bei Verdampfungsversuchen für Eintrittsdampfdrücke von 4 bis 8 atü gleich gute K-Werte von 2800 kcal/m² h °C ermittelt werden. Dabei stellte sich ein Druckabfall von etwa 10% ein, Bild 5b. Bei der Berechnung der Wärmemengen wurde mit der zu diesem reduzierten Druck gehörigen Sattdampftemperatur über die ganze Fläche gerechnet, d. h. also eher zu ungünstig als zu günstig.

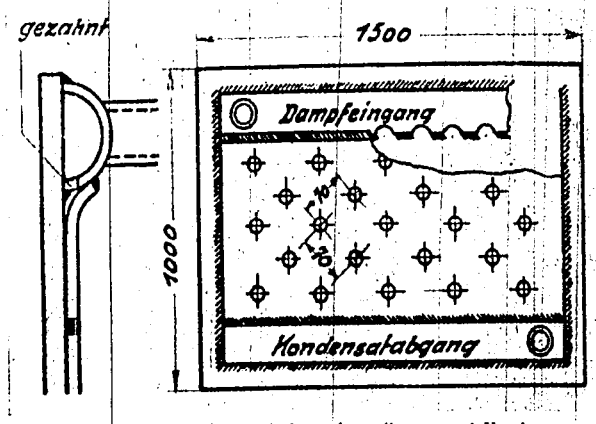


Bild 5a. Versuchsheizplatte mit Dampfverteilungs- und Kondensatsammelrohr

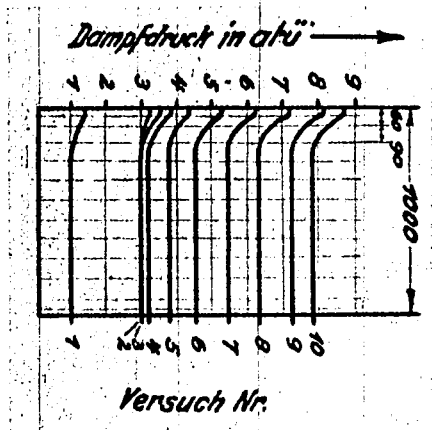
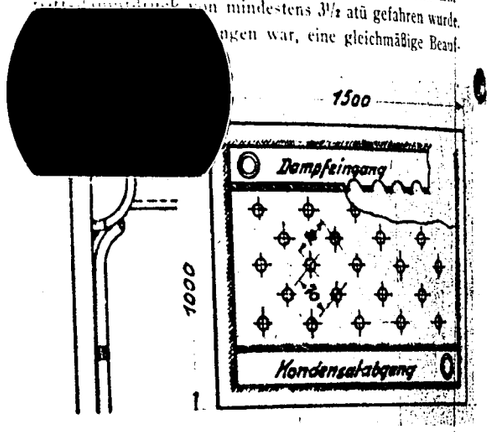


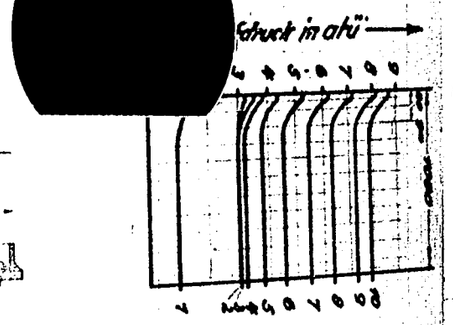
Bild 5b. Versuchsheizplatte: Verlauf des Heizdampfdruckes zwischen Ein- und Austrittskammer in der Mitte der Heizfläche

ietzten Felder des Bodens noch Dampf, wenn auch viel-
leicht schon in sehr nasser Form, gelangte und hier seine
Kondensationswärme abgeben konnte. Noch deutlicher
wird das ganze Verhalten der Heizfläche aus den Ver-
[redacted] 1940/41 ebenfalls in der Versuchs-
geführt wurden. Während bei den
aten die Dampfzuführung durch
tangential einmündende Dampf-
wesentlichen punktförmig nur an
Heizflächen erfolgte, wobei jeweils
[redacted] maler Dampfweg in der Heizfläche er-
sucht wurde, besaß das neue Modell, Bild 5a, eine reichlich
bemessene Eintritts-Dampfverteilungskammer und eine
ebensolche Kondensat-Sammelkammer über die ganze
Breite der Heizfläche von ca. 1½ m. Die Länge des Dampf-
weges, also der Abstand zwischen Dampfverteilungs- und
Kondensat-Sammelrohr, betrug dabei ungefähr 1 m.

Durch Umschlagfarbenanstriche konnte nun festge-
stellt werden, daß die ganze Heizfläche über ihre gesamte
Breite gleichmäßig wirksam war, wenn mit einem Ein-
[redacted] mindestens 3½ atü gefahren wurde.
ngen war, eine gleichmäßige Beauf-



platte mit Dampfverteilungs- und Kondens-
sammelrohr



Versuch Nr.

platte: Verlauf des Heizdampfdruckes
ttskammer in der Mitte der Heizfläche

fläche zu erreichen, konnten bei Ver-
en für Eintrittsdampfdrücke von
K-Werte von 2800 kcal/m² h °C ermit
werden. Dabei stellte sich ein Druckabfall von etwa
ein, Bild 5b. Bei der Berechnung der Wärmemengen wurde
mit der zu diesem reduzierten Druck gehörigen Sattdampf-
temperatur über die ganze Fläche gerechnet, d. h. also
eher zu ungünstig als zu günstig.

Wenn man diesen Wert von 2800 kcal/m² h °C mit den Wärmedurchgangszahlen der anderen bekannten Konstruktionen vergleicht, die für den Doppelmantelkessel bei ungefähr 1200 und für die Berohrung etwa bei 400 kcal/m² h °C liegen, dürften alle Bedenken hinsichtlich mangelhaften Dampfdurchganges zerstreut sein. Im Gegenteil ist das außerordentlich günstige wärmetechnische Verhalten der neuen Heizflächenausführung nur durch die gute Dampfverteilung und hohe Strömungsgeschwindigkeit in den engen Spalträumen zu erklären.

Für die Projektierung neuer Heizflächen kann bei richtiger Ausführung ein K-Wert von 2500 bis 2800 angenommen werden. Die wirksame Dampftemperatur in der Heizfläche kann für eine Überschlagsrechnung gegenüber der Temperatur des ankommenden Dampfes entsprechend dem etwa 10%igen Druckabfall reduziert eingesetzt werden.

Bislang war es praktisch noch nicht notwendig, die Genauigkeit der Vorausberechnung auf das Äußerste zu treiben, da die bisher ausgeführten Heizflächen meist als Ersatz für solche alter Konstruktionen gebaut wurden. Außerdem ist es möglich, ohne wesentlichen Kostenaufwand die Heizung von vornherein gleich für einen größeren Druckbereich vorzusehen, so daß man gegebenenfalls durch eine Regelung des Eintrittsdampfdruckes alle nur gewünschten Primärtemperaturen beliebig einstellen kann. Dieses Vorgehen hat vor allen Dingen bei neuen chemischen Verfahren den Vorteil, daß man sich praktisch noch alle Möglichkeiten offen hält.

Nachstehende Bilder stellen ausgeführte Heizungen dar, die inzwischen bereits in praktische Verwendung gekommen sind.

Bild 6 stellt einen Stahlguß-Autoklaven dar, der nachträglich mit einer Beheizung versehen wurde.

Bild 6. Seitenansicht von einem Stahlgußautoklaven mit Boden- und teilweiser Mantelbeheizung

Die zu beheizenden Apparate brauchen also nicht immer unbedingt aus Blech zu bestehen. Die einzige Voraussetzung für das Anbringen des Heizmantels ist lediglich, daß es sich um schweißbare Werkstoffe handelt. Aber auch in dem Fall, daß man aus gewissen Gründen von einem festen Anschweißen Abstand nehmen möchte, kann auf die neue Beheizung zurückgegriffen werden. In Bild 7 sind geteilte Heizschalen wiedergegeben, die um einen Hochdruckautoklaven aus legiertem Stahl gespannt werden.

Dabei ist ein stärkeres Außenblech mit einem dünneren Innenmantel verkleidet. Bei Beaufschlagung mit Hochdruckdampf kommt das dünne Innenblech an zahlreichen Stellen zur festen metallischen Anlage mit der Autoklavenwand und damit zur Wärmeübertragung. Selbstverständlich wird in diesem Fall der Wärmeübergang wesentlich geringere Werte annehmen. Ähnliche Heizschalen, die ab-

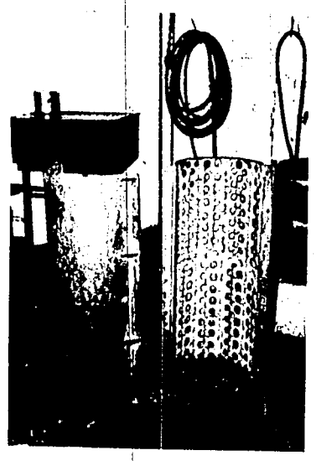


Bild 7. Heizschalen für Hochdruckautoklaven

rein durch Wärmestrahlung wirken, wurden schon mehrfach zur Beheizung von Absperrventilen und dergl. angewendet.

Daß sich die neue Heizflächenkonstruktion nicht nur in Eisen, sondern auch in Metallen ausführen läßt, zeigt Bild 8. Es handelt sich um einen Aluminium-Apparat mit Außenbeheizung. Gerade in Aluminium lassen sich die

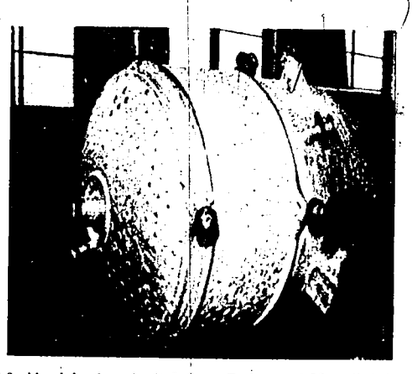


Bild 8. Aluminiumkessel mit äußerer Boden- und Mantelbeheizung

Eintritts- und Austrittskanäle sehr schön unmittelbar aus dem Heiz-Mantelblech herausdrücken.

Den größten Vorteil bietet die neue Beheizung, wenn gleichzeitig ein Korrosionsschutz damit verbunden ist. Bild 9 zeigt einen Eindampfkessel, der innen mit V2A ausgekleidet und unter dieser Auskleidung gleichzeitig beheizt ist. Lediglich der obere Rand ist unbeheizt, ferner ein Teil der Mantelheizung abschaltbar, um ein Festbrennen des Eindampfgutes zu verhindern.

Sehr vorteilhaft hat sich die Beheizung eines Wendelverdampfers erwiesen, die in Gemeinschaft mit Herrn Dr. Fischer und Herrn Dipl.-Ing. Köhler Lu entwickelt wurde. Durch die Zuführung der Wärme an der Stelle, wo

sie tatsächlich benötigt wird, nämlich auf der Ablaufwendel selbst, konnte eine Leistungssteigerung um ein Vielfaches gegenüber den bisherigen Apparaten erzielt

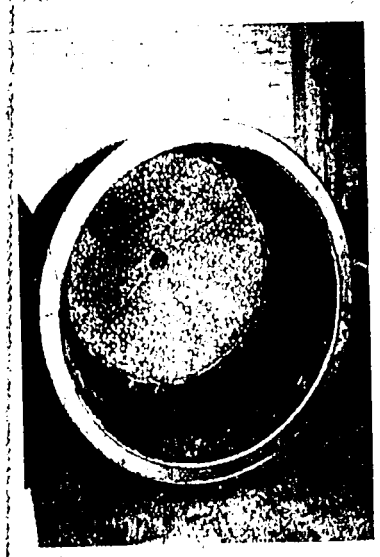


Bild 9. Blick in einen Eindampfkessel mit beheizter V2A-Korrosionsschutzauskleidung

werden. In Bild 10 sind die Einzelteile des Wendelverdampfers wiedergegeben.

Von einer z. Zt. in Bau befindlichen beheizten Schüttelrinne, die zum kontinuierlichen Trocknen dienen soll, kann leider noch kein Bild gezeigt werden. Bei dieser Anwendung sind die leichte Bauweise und der enge Dampfraum infolge der Verringerung der schwingenden Masse sehr günstig.

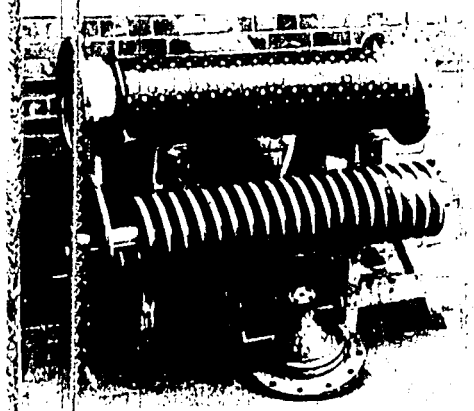


Bild 10. Wendelverdampfer. Wendel, Außenmantel und Bodenkonus beheizt

Das nächste Bild 11 beantwortet die Frage, wie sich die neue Heizfläche im Dauerbetrieb verhält. Es war vermutet worden, daß die engen Spalträume zukrusten oder durosten würden. Auf dem Bild ist der Ausschnitt einer Heizung wiedergegeben, die nach 10monatigem Betrieb durch Aufbiegen freigelegt wurde. Es wurden keinerlei Verschmutzungen beobachtet. Im übrigen war der Wärmedurchgang nach zehn Monaten noch genau so gut als am ersten Tag.

Die vorstehend gezeigten Ausführungen der neuen Heizflächenkonstruktion haben den Beweis für ihre mechanische Widerstandsfähigkeit und wärmetechnische Eignung im praktischen Betrieb erbracht. Insgesamt handelt es sich bis heute um etwa 70 m² Heizfläche.

Die chemischen Prozesse konnten in den neuen Apparaturen im Vergleich zu den früheren Konstruktionen z. T. in wesentlich kürzeren Zeiten durchgeführt werden.

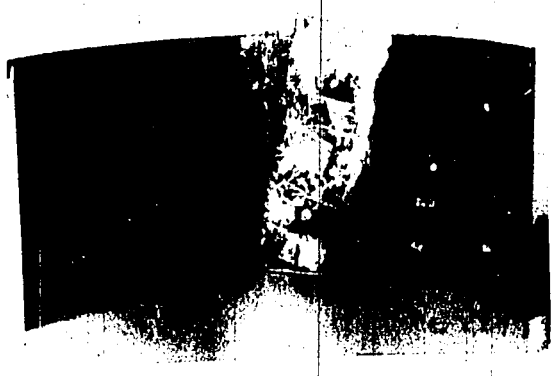


Bild 11. Ausschnitt aus einem beheizten Gefäß. Nach 10 Monaten Betriebsdauer Heizraum freigelegt

Die Einfachheit der Konstruktion und die Wirtschaftlichkeit im Betrieb sind aber nicht die einzigen Vorteile, die die neue Bauweise mit sich bringt. Ein Vergleich der Herstellungskosten und des Werkstoffbedarfes eines Kessels in der alten und der neuen Bauweise läßt erkennen, daß diese auch außerordentliche fabrikatorische Vorteile bringt (s. Bild 12). Die Gegenüberstellung zeigt, daß der Werkstoffbedarf in der alten Konstruktion 1670 kg betrug und die Herstellungskosten bei 3100 RM. lagen, während derselbe Apparat mit der neuen Heizung mit einem Werkstoffaufwand von 650 kg und zu einem Preise von 2200 RM. gebaut wurde. Insbesondere die große Materialersparnis dürfte in der heutigen Zeit außerordentlich wichtig sein.

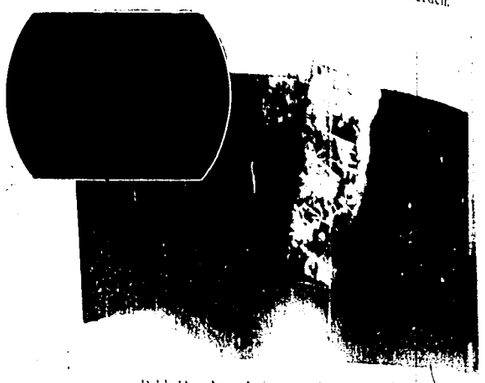
Auf Grund all dieser Vorteile hat die I. G. auf die neue Heizfläche Patentschutz beantragt. Das Ergebnis der Vorprüfung durch das Reichspatentamt ist positiv. Mit der Bekanntmachung ist in nächster Zeit zu rechnen. Allerdings sind wir nach Ansicht unseres Patentbüros abhängig von einem älteren Schutzrecht DRP. 615446 der Firma Krupp, das ich im Jahre 1931 als Krupp'scher Angestellter eingebracht hatte. Es handelt sich dabei um ein Verfahren zur Herstellung von Auskleidungen zu Korrosionsschutzzwecken, welches dieselben konstruktiven Merkmale wie die neue Heizfläche aufweist. Um klare Verhältnisse zu schaffen, wurde mit der Firma Krupp ein Abkommen getroffen, wonach wir Krupp für jeden m² Heizfläche eine einmalige Lizenzgebühr von 20 RM. bezahlen, während umgekehrt Krupp uns die gleiche Summe zu zahlen hat, wenn er unsere neue Heizfläche anwendet oder für Dritte baut.

Zum Schluß möchte ich noch bemerken, daß die neue Beheizung als solche nicht abnahmepflichtig im Sinne der Dampffaßverordnung ist. Aus Sicherheitsgründen müssen jedoch alle Konstruktionszeichnungen von mir vorgeprüft werden. Die Abnahmeprüfung der fertigen Apparate mit dem höchst zulässigen Probedruck sowie die Bauprüfung ist dem Revisionsbetrieb übertragen worden.

Zur Vermeidung von Irrtümern wird der höchst zulässige Betriebsdruck auf einem stets deutlich sichtbaren Schild festgehalten.

Nachdem die neue Heizfläche bei Beschickung mit Dampf einen hohen Wärmedurchgang erbracht hat, lag

Die chemischen Prozesse konnten in den neuen Appa- ... ren im Vergleich zu den früheren Konstruktionen z. T. ... wesentlich kürzeren Zeiten durchgeführt werden.



B/M II. Ausschnitt aus einem beheizten Gefäß. Nach 10 Monaten Betriebsdauer Heizraum freigelegt

... der Konstruktion und die Wirtschaft- ... sind aber nicht die einzigen Vorteile, ... mit sich bringt. Ein Vergleich der ... und des Werkstoffbedarfes eines ... und der neuen Bauweise läßt erkennen, ... außerordentliche fabrikatorische Vorteile ... Bild 12. Die Gegenüberstellung zeigt, daß der Werkstoffbedarf in der alten Konstruktion 1670 kg be- ... und die Herstellungskosten bei 3100 RM. lagen, wäh- ... derselbe Apparat mit der neuen Heizung mit einem Werkstoffaufwand von 650 kg und zu einem Preise von 2200 RM gebaut wurde. Insbesondere die große Material- ... dürfte in der heutigen Zeit außerordentlich wich- ...

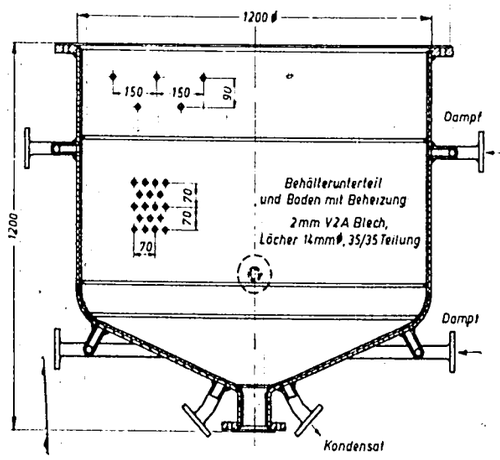
Auf Grund all dieser Vorteile hat die I.G. auf die neue ... Patent-schutz beantragt. Das Ergebnis der Vor- ... des Reichspatentamt ist positiv. Mit der ... ist in nächster Zeit zu rechnen. Allerdings in Ansicht unseres Patentbüros abhängig ... Schutzrecht DRP. 615446 der Firma ... Jahre 1931 als Krupp'scher Angestellter ... Es handelt sich dabei um ein Verfahren ... von Auskleidungen zu Korrosionsschutz- ..., welches dieselben konstruktiven Merkmale wie ... Heizfläche aufweist. Um klare Verhältnisse zu ..., wurde mit der Firma Krupp ein Abkommen ge- ..., wonach wir Krupp für jeden m² Heizfläche eine ... Lizenzgebühr von 20 RM. bezahlen, während ... Krupp uns die gleiche Summe zu zahlen hat, ... er unsere neue Heizfläche anwendet oder für Dritte ...

Zum Schluß möchte ich noch bemerken, daß die neue ... solche nicht abnahmepflichtig im Sinne der ... lnung ist. Aus Sicherheitsgründen müssen ... struktionszeichnungen von mir vorgeprüft ... nahmeprüfung der fertigen Apparate mit ...assigen Probedruck sowie die Bauprüfung ...onsbetrieb übertragen worden.

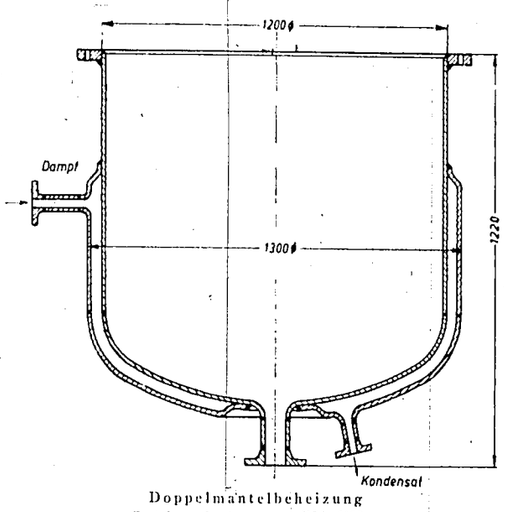
Zur Vermeidung von Irrtümern wird der höchst zu- ... Betriebsdruck auf einem stets deutlich sichtbaren ... Schild festgehalten.

Nachdem die neue Heizfläche bei Beschickung mit ... Dampf einen hohen Wärmedurchgang erbracht hat, ...

der Gedanke nahe, bei umgekehrter Arbeitsweise durch den Spaltraum kaltes Wasser zu drücken und durch Beheizung von außen her zu erhitzen.



Flächenbeheizung nach Dr. Kautz
Gestehungskosten RM. 2200.—
Werkstoffrohbedarf kg 650



Doppelmantelbeheizung
Gestehungskosten RM. 3100.—
Werkstoffrohbedarf kg 1670

Bild 12. Gestehungskosten und Werkstoffbedarf eines Eindampfkessels

Entsprechende Versuche werden z. Zt. auf dem Technischen Prüfstand Oppau bei Herrn Dr. Kling durchgeführt.

Falls auf Grund dieser Anregung Projekte für ihre weitere Anwendung auftauchen sollten, so bin ich gern bereit, bei der Gestaltung beratend mitzuwirken.

Aussprache:

Matz teilt mit, daß mit Dampfmänteln nicht nur 1200, sondern bis 2200 kcal/hm² °C erreicht werden.

Futterer fragt nach der erreichten bzw. erreichbaren Heizflächenleistung (q in kcal/m²h).

Kautz: Diese kann im Augenblick nicht angegeben werden, ist aber auf Grund der Versuchsergebnisse für ein bestimmtes Temperaturgefälle jederzeit ohne weiteres zu berechnen.

Futterer fragt nach der Möglichkeit, die Kautz'sche Konstruktion für Beheizung mit warmem Wasser zu verwenden.

Kautz erwidert, daß Dr. Lüder solche Versuche ausgeführt habe. Es seien dabei Wärmedurchgangszahlen von 500 bis 600 kcal/hm² °C erhalten worden, also wesentlich kleinere als mit Dampf. Der Druckverlust sei dabei sehr hoch gewesen.

Kling weist auf Versuche hin, die Schweißplatte nach Kautz als Hochdruckwassererhitzer zu verwenden. Bei 100 at wurde Wasser durch eine mit elektrischer Strahlungsheizung versehene Platte gepreßt. Der Druckabfall betrug ungefähr 20 at. Sobald innerhalb der Spalte Verdampfung eintrat, stieg bei gleicher Fördermenge G der Druckabfall Δp auf ~ 100 at. Laminare Strömung vorausgesetzt, läßt sich nachweisen, daß

$$p = \text{konst. } G \frac{\eta}{\gamma}$$

ist. Bei 100 at vergrößert sich η/γ im Verdampfungsintervall um das 4,2fache, was etwa den beobachteten Druckverlusten entspricht. Eine Verwendung als Druckwassererhitzer wäre daher wegen der Bildung von Dampfpolstern nur bei Verwendung einer Druck- und Mengenregulierung möglich.

Kling führt schriftlich zum Vergleich der verschiedenen Heizflächenkonstruktionen folgendes aus:

Der von Dr. Kautz angegebene Vergleich

Mantelkessel	k = 1200 kcal/hm² °C
Samesreutherberohrung	400 „
Kautzplatte	2800 „

ist nicht richtig und wie folgt zu erklären. Die Angaben für Mantelkessel und Rohrbeheizung sind dem Prospekt der Firma Samesreuther entnommen und beziehen sich auf erwärmtes Wasser als Versuchsstoff, die Angaben für die Kautzplatte beziehen sich auf Versuche der Versuchsgruppe mit verdampfendem Wasser.

Der gesamte Wärmedurchgangswiderstand ist aber aus den Wärmewiderständen des kondensierenden Heizdampfes, der Plattenwand und des Wärmeüberganges an der inneren Kesselfläche zusammengesetzt. Die beiden ersten Glieder dürften für Mantelkessel und Kautzplatte nur wenig verschieden sein, so daß k hauptsächlich vom inneren α abhängt. Bei gleichem Zustand der Badflüssigkeit dürften Kautzplatte und Mantelkessel wärmetechnisch ziemlich gleichwertig sein; dagegen überragt natürlich erstere hinsichtlich Werkstoffersparnis und Herstellungskosten.

Futterer betont nochmals, daß die Heizflächenbelastung eigentlich wichtiger sei als die Wärmeübergangszahl.

Kautz weist darauf hin, daß man sich hier durch verschiedene Schaltung der Heizflächen bzw. Heizflächenteile helfen kann.

Dr. Kautz (Nachschrift).

In einem Prospekt von Samesreuther wird für Samkaberohrte Kessel eine Wärmedurchgangszahl von 270 und für Doppelmantelkessel eine solche von 1150

kcal/m² h °C angegeben. Diese Zahlen wurden von mir auf 400 bzw. 1200 kcal/m²h°C aufgerundet. Wie Herr Dr. Kling nachträglich aufmerksam macht, beziehen sich die Angaben des Prospektes auf das Erwärmen von Wasser, so daß ein Vergleich mit den bei Verdampfung gefundenen Wärmedurchgangszahlen der neuen Heizflächenkonstruktion nicht möglich ist.

Aus einer Veröffentlichung von Kramer über „Neuere Konstruktionen wärmeübertragender Apparatewände" in den VDI.-Beiheften für Verfahrenstechnik Jg. 36, S. 27 bis 33, die mir inzwischen zugänglich wurde, können Werte auch für den Fall der Wasserverdampfung für die verschiedenen Konstruktionsformen entnommen werden. An dieser Stelle wird für Samkaberohrung ein Wärmedurchgang von 450—850 und für Doppelmantelkessel ein solcher von 1200—1600 kcal/m²h°C angegeben.

Selbst wenn man diese höheren Werte zum Vergleich heranzieht, ergibt sich immer noch ein erheblicher Vorteil der neuen Heizflächenkonstruktion, wobei es für den praktischen Effekt an sich gleichgültig ist, ob dieser Vorteil, wie von mir vermutet, auf eine Verbesserung des Wärmeüberganges durch hohe Dampfgeschwindigkeit auf der Primärseite, oder, wie von anderer Seite angeführt, durch Heranziehung der rückseitigen Begrenzungswand als Heizfläche unter Wärmetransport über die Schweißstellen auf den Innenkessel oder vielleicht durch die Möglichkeit, äußerst dünne Wandstärken verwenden zu können, begründet wird.

Neue korrosionsbeständige Kesselkonstruktion mit gutem Wärmedurchgang

Von Dipl.-Ing. KARL FRANK

Inhalt:

Ein neuer Werkstoff, 65- bis 70%iges Ferrosilicium, wird mit zinnfreien Loten als Säureschutz auf der Innenseite von Kesseln verlötet und die Fugen werden mit dichten säurebeständigen Kitten geschlossen. Eigenschaften der 65- bis 70%igen Ferrosiliciumplatten für sich allein und in Verbindung mit Lot und Stahl. Vergleiche mit anderen Säureschutzverfahren, Erfahrungen und Einsatzmöglichkeit bei dem neuen Verfahren.

Bei einer durch starken Wärmefluß bedingten chemischen Umsetzung in Gegenwart starker Salzsäure mußte bisher der Betriebschemiker einen Emailkessel mit Dampfmantel verwenden. Ein solcher ist aber im Gebrauch mechanisch empfindlich und läßt sich nach Inbetriebnahme örtlich mit Email nicht mehr ausbessern. Metallische Werkstoffe, die starke Salzsäure in der Hitze vertragen, kommen praktisch für Europa nicht in Betracht. Kessel, die mit keramischen Platten und Kitten ausgemauert sind, haben aber einen nur geringen Wärmedurchgang.

Ich berichte Ihnen nun von einem neuen Säureschutzverfahren für schmiedeeiserne Kessel mit Außenheizung oder Außenkühlung, bei dem 65- bis 70%ige in Kokillen gegossene Ferrosiliciumplatten mit zinnfreien Loten metallisch auf der ganzen Innenseite der Kessel befestigt sind. Die Temperatur der Heizquelle muß hierbei genau begrenzt sein, und der Schmelzpunkt des verwendeten Lotes muß über dieser Grenze liegen, was bei Heißwasser-, Dampf- und Ölheizung möglich ist. Im allgemeinen sind die Platten so mit einem etwas breiteren Fuß geformt, daß sie Fuß an Fuß liegend verlötet werden können und über diesen dünnen Lötfugen breitere Fugen verbleiben, die mit dichtem säurefestem Kitt ausgefüllt werden. Dieser Kitt hat dann nur eine schmale an sich schon edle Lötfuge zu schützen. Kommen im Betrieb rasche und starke Temperaturveränderungen vor, so verlötet man besser fußlose Platten mit entsprechendem Fugenabstand, damit die Auslötung in den Fugen nachgeben kann. Die mechanische Widerstandsfähigkeit bei diesem Verfahren ist erheblich höher als bei dem Email, eine nachträgliche Ausbesserung ist jederzeit ohne Ausbau möglich, und der Wärmedurchgang ist bei der metallischen Verbindung besser als bei emaillierten Kesseln.

Die Eigenschaften des 65- bis 70%igen Ferrosiliciumgusses sind sowohl chemisch als auch mechanisch von denen des bekannten 15%igen Ferrosiliciumgusses erheblich verschieden. Auffallend ist die hohe Wärmeleitzahl des hochprozentigen FeSi-Gusses von 40 kcal/, h, °C, gleich der von Gußeisen, ferner die geringe Wärmeausdehnung von $0{,}5 \cdot 10^{-5}$, die bei Stahl $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ beträgt, und der große Elastizitätsmodul von 1 : 400000, bei Stahl 1 : 2100000.

Hochprozentige FeSi-Platten wurden in Schwefel-, Salz- und Salpetersäure der verschiedensten Konzentration bei Siedetemperatur mit und ohne Gußhaut, sowie in den verschiedensten Flüssigkeiten, auch in Königswasser, Brom und Chlor geprüft, wobei sich immer dasselbe Bild

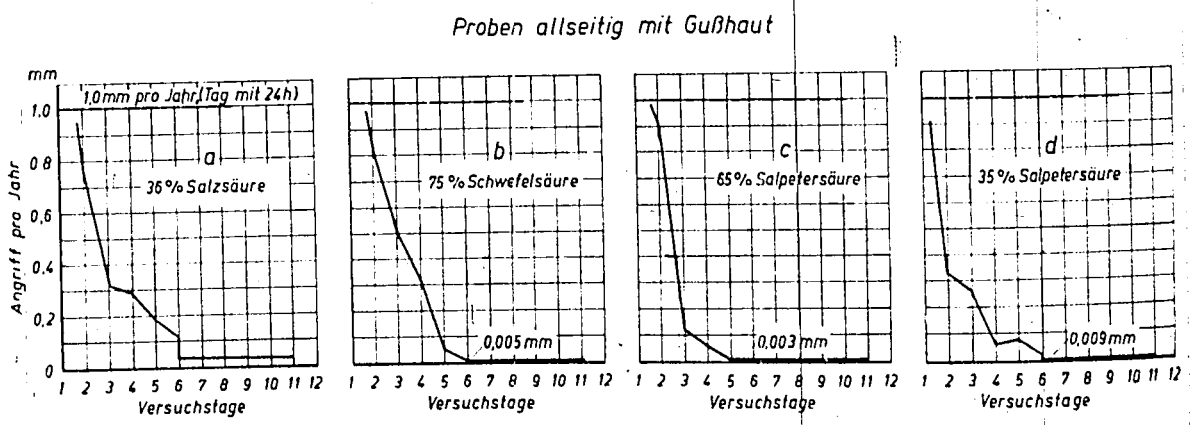


Bild 1. Korrosionsversuche mit 65prozentigen Ferrosiliciumplatten gegen konzentrierte und verdünnte Säuren.

…ktig von 450 — 850 und für Doppelmantelkessel ein sol…
…cher von 1200 — 1600 kcal·m²h°C angegeben.

Selbst wenn man diese höheren Werte zum Vergleich …
…bei rechnet, ergibt sich immer noch ein erheblicher Vor… der neuen Heizflächenkonstruktion, wobei es für den pr… …ckt an sich gleichgültig ist, ob dieser Vor… …vermutet, auf eine Verbesserung des Wärme… …durch hohe Dampfgeschwindigkeit auf der … …oder, wie von anderer Seite angeführt, durch … …ng der rückseitigen Begrenzungswand …unter Wärmetransport über die Schweißstelle … …nenkessel oder vielleicht durch die Möglichkeit, … …sehr dünne Wandstärken verwenden zu können, be… …kannt wird.

…lkonstruktion mit gutem Wärmedurchgang

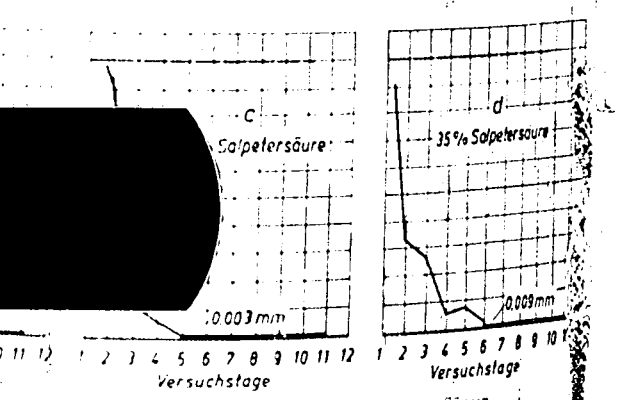
Ing. KARL FRANK

…Dampf- und Ölheizung möglich ist. Im allgemeinen s… …e Platten so mit einem etwas breiteren Fuß geformt, d… …Fuß liegend verlötet werden können und üb… …en Lötfugen breitere Fugen verbleiben, … …säurefestem Kitt ausgefüllt werden. Dieses … …nur eine schmale an sich schon edle Lötfuge … …Kommen im Betrieb rasche und starke T… …nderungen vor, so verlötet man besser fußl… …mit entsprechendem Fugenabstand, damit … …Auslötung in den Fugen nachgeben kann. Die mechanisch… …Widerstandsfähigkeit bei diesem Verfahren ist erheb… …höher als bei dem Email, eine nachträgliche Ausbesseru… …ist jederzeit ohne Ausbau möglich, und der Wärmedurc… …gang ist bei der metallischen Verbindung besser als b… …emaillierten Kesseln.

Die Eigenschaften des 65- bis 70%igen Ferrosilicium… …gusses sind sowohl chemisch als auch mechanisch von … …denen des bekannten 15%igen Ferrosiliciumgusses erh… …heiden. Auffallend ist die hohe Wärmeleitz… …zentigen FeSi-Gusses von 40 kcal/.h/… …n Gußeisen, ferner die geringe Wärmea… …1,5 · 10⁻⁵, die bei Stahl 1,2 · 10⁻⁵ beträgt, … …stizitätsmodul von 1 : 400000, bei Stahl …

…zentige FeSi-Platten wurden in Schwefel… …Salz- und Salpetersäure der verschiedensten Konzen… …von bei Siedetemperatur mit und ohne Gußhaut, sowi… …den verschiedensten Flüssigkeiten, auch in Königswas… …Brom und Chlor geprüft, wobei sich immer dasselbe …

…lisertig mit Gußhaut



…sicherungsplatten gegen konzentrierte und verdünnte Säuren.

ergab: am Anfang war ein kleiner Angriff zu verzeichnen, der aber schon nach einigen Tagen abklang. Nur bei Flußsäure und starken Alkalien war der Angriff so, daß hier höchstens kurze Zwischenoperationen in Betracht kommen können. In Bild 1a ist die Beständigkeit gegen 36%ige kochende Salzsäure, in Bild 1b die gegen 75%ige kochende Schwefelsäure gezeigt. Bei der Salzsäure ergibt sich hiernach nach sechs Tagen eine Haltbarkeit von dreißig Jahren pro mm Schicht und bei der Schwefelsäure nach sechs Tagen eine solche von 200 Jahren pro mm Schicht. In Bild 1c ist die Beständigkeit gegen 65%ige kochende Salpetersäure und in Bild 1d die gegen 35%ige kochende Salpetersäure angegeben, in beiden Fällen errechnet sich nach sechs Tagen eine Haltbarkeit von 300 Jahren pro mm Schicht.

Das Verlöten erfolgt mit einem zinnfreien Lot, in der Hauptsache Blei neben Cadmium und ganz geringe Mengen Zink, mit einem eutektischen Schmelzpunkt von 245° C, oder mit Blei allein. Mit dem Lot werden sowohl das Kesselinnere als auch die Platten vorbehandelt, um das Einlöten zu erleichtern. Die Haftung der verlöteten Platten an Stahl ist so hoch, daß, wie aus Bild 2 zu sehen ist, beim Zerreißversuch einer solchen Verlötung bei gewöhnlicher oder 45° C unter dem Lotschmelzpunkt liegender Temperatur die Platten zerrissen, ohne daß die Lötstellen nachgaben. Die Bruchfestigkeit bei der gezeigten bei 200° C zerrissenen Probe war 60 kg/cm². Mit Blei verlötete Proben ergaben bei gewöhnlicher Temperatur eine Bruchfestigkeit von 55 kg/cm² und bei 180° C eine solche von 20 kg/cm², wobei allerdings der Bruch in der Verlötung eintrat.

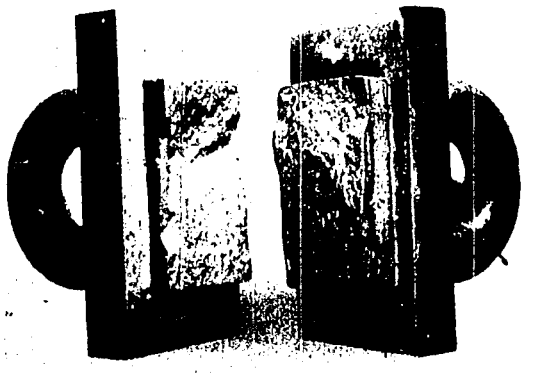


Bild 2. Abreißprobe einer verlöteten 65prozentigen Ferrosiliciumplatte

Bei der Abkühlung nach dem Löten zwingt nun die hohe Haftfestigkeit des Lotes am Stahl und an den Platten beide Materialien sich in gleicher Weise zusammenzuziehen. Da sich der Stahl aber mehr zusammenziehen möchte als die aufgelöteten Platten, so entstehen im Stahl Zug- und in den Platten Druckspannungen, die bei der 12 mm starken Auslötung nicht nur nicht gefährlich sind, sondern im Gegenteil die hohe Schlagfestigkeit der aufgelöteten Platten bedingen. Bei einer durch Verlöten hergestellten Verbindung — Stahl, Ferrosiliciumplatten — werden die von äußeren Kräften veranlaßten Längenveränderungen spezifische Spannungsveränderungen hervorrufen, die in den Ferrosiliciumplatten immer nur 1/5 derjenigen im Stahl sind. Dies beruht auf dem Verhältnis der Elastizitätsmodule Stahl zu Ferrosilicium wie 1 : 5. Da nun vom Verlöten her in den Platten gemäß den bei Kesseln üblichen gegenseitigen Materialstärken schon Druckspannungen von ca. 400 kg/cm² vorhanden sind, so ergibt eine zusätzliche Zugbeanspruchung des Stahls von 1000 kg/cm² z. B. durch inneren Überdruck eine restliche Beanspruchung der Platten von ca. 200 kg/cm² auf Druck. Bei der Erwärmung geht diese Druckbeanspruchung wieder zurück, wird aber erst in der Nähe des Lotschmelzpunktes wieder gleich Null.

An Sonderproben konnten wir diese Vorgänge nachweisen. Bild 3 zeigt ein Prüfstück zur Feststellung der Verlötungsspannungen. An dem längeren, vorher verzinnten Stahlstück waren Meßmarken angebracht. Nach dem Ausmessen dieser Marken wurden auf den Breitseiten zwei Ferrosiliciumplatten aufgelötet und die Meßmarken nach Erkalten wieder ausgemessen. Durch das Auflöten war der Stahl nun länger geworden und stand rechnerisch unter 500 kg/cm² Zugbeanspruchung.

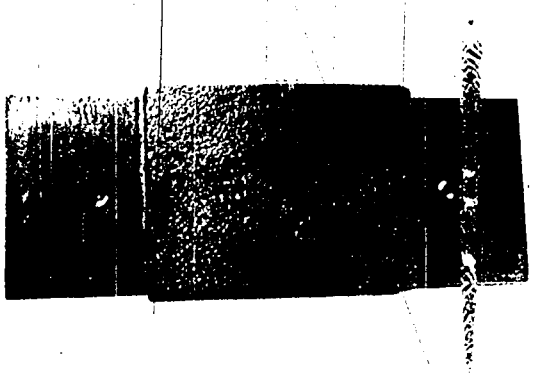


Bild 3. Meßstück für Verlötungsspannungen zwischen Stahl und 70prozentigem Ferrosilicium

Bild 4 zeigt einen Stahlflachstab, der auf beiden Seiten aufgelötete Ferrosiliciumplatten trägt. Der Stab konnte beim Zugversuch mit 2650 kg/cm², d. h. bis zur Streckgrenze und dem Auftreten von Fließfiguren im Stahl, beansprucht werden, ehe die Platten den ersten Riß erhielten. Ein bei 200° C geprüfter zweiter Stab wurde erst bei 2000 kg/cm² Belastung schadhaft.

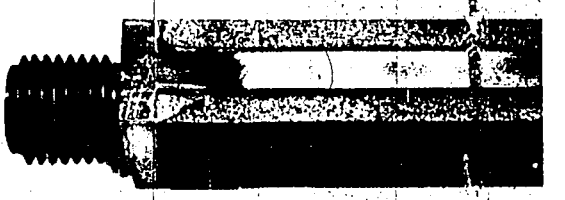


Bild 4. Belastungsprobe eines mit 70prozentigem Ferrosilicium belöteten Stahlstabes

Die beiden nächsten Bilder lassen die Erhöhung der Schlagbeständigkeit beim Auflöten der Platten erkennen. Es wurden von sechs gleichen Platten zwei genau auf den Amboß eines Fallwerkes durch Schleifen aufgepaßt, zwei wurden mit einem hochwertigen Säurekitt auf Stahl aufgekittet und zwei wurden auf Stahl aufgelötet. Mit 0,2 mkg Schlagkraft wurden dann Schlagversuche auf die Mitte der sechs Platten ausgeführt. Die aufgepaßten Platten zersprangen beim ersten Schlag, die aufgekitteten beim

zweiten bzw. vierten Schlag in mehrere Stücke. Bild 5 zeigt die beim vierten Schlag zersprungene aufgekittete Platte. Bild 6 zeigt den Zustand einer aufgelöteten Platte nach 150 Schlägen; es ist ein kleiner Haarriß eingetreten, die Platte haftet aber noch fest.

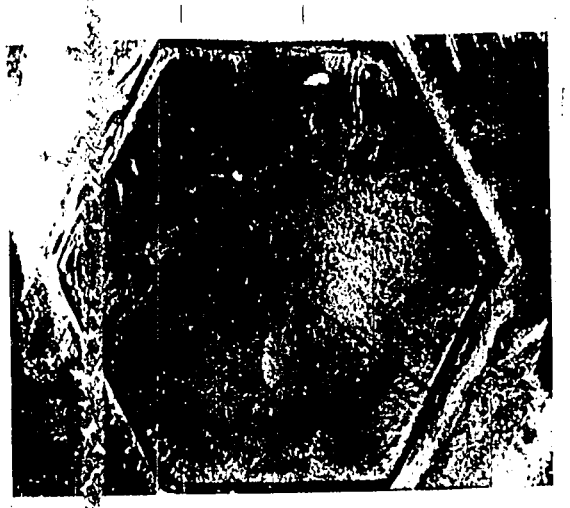


Bild 5. Aufgekittete 70prozentige Ferrosiliciumplatte nach 4 Schlägen zu 0,2 mkg

Für die Behälterwände gilt folgende Überlegung: erwärmt man ein dünnes Blech auf größerer Fläche, so wird es sich ausbeulen. Verlötet man auf einer so ausgebeulten Fläche ein sprödes, steifes Material, so wird dieses bei der Abkühlung brechen oder abspringen, da die Ausbeulung

Bild 6. Aufgelötete 70prozentige Ferrosiliciumplatte nach 150 Schlägen zu 0,2 mkg

zurückgehen will. Ist das Blech aber stark und die erwärmte Fläche klein, so tritt eine solche Ausbeulung nicht auf, die Verlötung haftet sicher. Die Wandstärke wird deshalb unter 1 m Durchmesser mit 10 mm, zwischen 1 und 2 m Durchmesser mit mindestens $= \frac{D}{100}$ mm gewählt, da man ja mit der Plattengröße nicht unter und nicht über ein bestimmtes Maß gehen kann. Bei größeren Gefäßen ist die Mindestwandstärke 20 mm.

Die hochprozentigen Ferrosiliciumplatten können mit Hartwerkzeugen durch Hobeln, Bohren, Drehen, Sägen und durch Schleifen bearbeitet werden. Am Boden der Gefäße verwendet man Sechskantplatten in Wabenanordnung und ergänzt sie am Rand durch Teilstücke zu einem Kreis. In der Krempe werden doppelt gekrümmte Platten und an der Wand einfach gekrümmte Rechteckplatten eingelötet. Der obere Flansch wird mit Platten überlötet, die noch in den Kessel über den Rand herabragen und an die Wandplatten mit einer Ringfuge anschließen. Durchbrüche der Wand werden durch Einlöten besonderer Formstücke, die an die Innenwand mit Fugen anschließen, hergestellt. Bei Loten mit einem Schmelzpunkt über 350° C und beim Auftreten plötzlicher sehr starker Temperaturveränderungen im Betrieb besteht die Gefahr, daß die Platten wegen zu hoher Druckspannungen am Fuß schiefrig abspringen. Bei starker Temperaturbeanspruchung im Betrieb ist deshalb die Verlötung ohne Fuß richtiger. Außerdem empfiehlt sich die Isolierung des über dem Dampfmantelflansch noch ausgelöteten Kesselteils, weil sonst die Platten an dieser Übergangsstelle bei plötzlichen Temperaturveränderungen reißen können. Wenn man zur Erhöhung der Nachgiebigkeit die Fugen bis zum Stahl mit Blei auslöten will, da dieses chemisch auch noch beständig genug erscheint, so ist zu bedenken, daß das hochprozentige elektrisch leitende Ferrosilicium in Salzsäure um 0,4 Volt edler ist als Blei und daß dann das Blei zerstört wird, wenn ein Elektrolyt vorhanden ist, auch wenn Blei an sich gegen diesen Elektrolyten beständig genug wäre.

Neben den 65%igen Ferrosiliciumplatten kann man nach den erteilten Patenten noch andere hochwärmeleitende Platten, wie z. B. solche aus FM-Material, Kohlenstoffplatten, keramische Silicium- und Siliciumkarbidplatten, sowie emaillierte Metallplatten auflöten. Man kann damit nach dem Verfahren auch Beanspruchungen mit starken Alkalien und Flußsäure, auch bei höheren Temperaturen, auf die Dauer beherrschen. Erfahrungen liegen allerdings bis jetzt nur mit den 65%igen Ferrosiliciumplatten vor. Eine Auslötung mit emaillierten Platten ist natürlich nicht mehr schlagfest, kann aber nach Entfernen des Dampfmantels ausgebessert werden.

Die Prüfung der Verlötung erfolgt durch Abklopfen oder durch Beobachtung des Farbumschlags nach Überstreichen mit einer geeigneten Thermokolorpaste und Erwärmen.

Die Wahl des richtigen Kittes für die Fugen ist für die Verwendung und Haltbarkeit eines ausgelöteten Gefäßes ausschlaggebend. Bei den bis jetzt ausgelöteten Gefäßen gegen Salz- und Schwefelsäure sowie gegen Salzschmelzen wurden die bekannten Säurekitte Asplit mit Erfolg benützt. Eine Verfugung mit Kunstharzen ist aber nur bei nicht oxydierenden Säuren und bei Temperaturen bis 180° C möglich. Sollte das Auslötverfahren noch allgemeiner anwendbar sein, so mußte erst noch ein anorganischer Kitt geschaffen werden, der auch bei geringer Verfugungsstärke dauernd sicher abdichtet. Die bis jetzt üblichen anorganischen Kitte, Wasserglaskitte, sind nicht dicht genug.

Der von dem I. G.-Werk Höchst neu gefundene Silicatkitt ist selbsterhärtend und sehr dicht. Seine volle chemische Beständigkeit erhält er allerdings erst nach Erwärmen auf ca. 120° C. Die Festigkeit einer vierzehn Tage alten nicht erwärmten Kittprobe war ca. 800 kg/cm². Nach Erwärmen einen Tag auf 100° C und einen Tag auf 150° C wurden Festigkeitswerte über 2000 kg/cm² erzielt, während die Festigkeit guter Wasserglaskitte im Endzustand nur 200 bis 500 kg/cm² beträgt. Nach dem Erhitzen auf 150° C waren die Proben wasser- und säurefest. Nach zehn-

Kreis. In der Krempe werden doppelt gekrümmte Platten
rde an der Wand einfach gekrümmte Rechteckplatten
ngelötet. Der obere Flansch wird mit Platten überlötet,
die noch in den Kessel über den Rand herabragen und
an die Wandplatten mit einer Ringfuge anschließen.
Wand werden durch Einlöten besonde-
die an die Innenwand mit Fugen an-
lt. Bei Loten mit einem Schmelzpunkt
eim Auftreten plötzlicher sehr starker
erungen im Betrieb besteht die Gefahr,
wegen zu hoher Druckspannungen am
bspringen. Bei starker Temperaturbean-
spruchung im Betrieb ist deshalb die Verlötung ohne Fuß
richtiger. Außerdem empfiehlt sich die Isolierung des über
dem Dampfmantelflansch noch ausgelöteten Kesselteils,
weil sonst die Platten an dieser Übergangsstelle bei plötz-
lichen Temperaturveränderungen reißen können. Wenn
man zur Erhöhung der Nachgiebigkeit die Fugen bis zum
Stahl mit Blei auflöten will, da dieses chemisch auch noch
beständig genug erscheint, so ist zu bedenken, daß das
hochprozentige elektrisch leitende Ferrosilicium in Salz-
säure um 0,4 Volt edler ist als Blei und daß dann das Blei
kann ein Elektrolyt vorhanden ist, auch
ch gegen diesen Elektrolyten beständig

5%igen Ferrosiliciumplatten kann man
en Patenten noch andere hochwärme-
, wie z. B. solche aus FM-Material, Kohlen-
stoffplatten, keramische Silicium- und Siliciumkarbid-
platten, sowie emaillierte Metallplatten auflöten. Man
kann damit nach dem Verfahren auch Beanspruchungen
mit starken Alkalien und Flußsäure, auch bei höheren
Temperaturen, auf die Dauer beherrschen. Erfahrungen
liegen allerdings bis jetzt nur mit den 65%igen Ferrosili-
ciumplatten vor. Eine Auslötung mit emaillierten Platten
ist natürlich nicht mehr schlagfest, kann aber nach Ent-
fernen des Dampfmantels ausgebessert werden.

Die Prüfung der Verlötung erfolgt durch Abklopfen,
obachtung des Farbumschlags nach Über-
einer geeigneten Thermokolorpaste und

es richtigen Kittes für die Fugen ist für
g und Haltbarkeit eines ausgelöteten Ge-
ggebend. Bei den bis jetzt ausgelöteten
Gefäßen gegen Salz- und Schwefelsäure sowie gegen Salz-
schmelzen wurden die bekannten Säurekitte Asplit mit
Erfolg benützt. Eine Verfugung mit Kunstharzen ist aber
nur bei nicht oxydierenden Säuren und bei Temperaturen
bis 180° C möglich. Sollte das Auslötverfahren noch allge-
meiner anwendbar sein, so mußte erst noch ein anorgani-
scher Kitt geschaffen werden, der auch bei geringer Ver-
fugungsstärke dauernd sicher abdichtet. Die bis jetzt übli-
chen anorganischen Kitte, Wasserglaskitte, sind nicht
dicht genug.

dem I. G.-Werk Höchst neu gefundene Stif
terhärtend und sehr dicht. Seine volle Fe
igkeit erhält er allerdings erst nach Er-
120° C. Die Festigkeit einer vierzehn Tage
ärmten Kittprobe war ca. 800 kg/cm². Nach
ten Tag auf 100° C und einen Tag auf 150° C
wurden Festigkeitswerte über 2000 kg/cm² erzielt, während
die Festigkeit guter Wasserglaskitte im Endzustand nur
200 bis 500 kg/cm² beträgt. Nach dem Erhitzen auf 400° C
waren die Proben wasser- und säurefest. Nach zehn-

ständigem Kochen in 20%iger blaugefärbter Salzsäure mit anschließender Abkühlung über Nacht in der Säure waren die Proben wohl außen blau angefärbt, nach Zerschlagen der Proben war aber nur eine Eindringtiefe von 0,2 mm zu erkennen. Die Höchsttemperatur wird voraussichtlich 200° C betragen.

Der Silicatkitt ist vorerst ganz auf die Verfugung beim Auslötverfahren eingestellt und zum Vermauern nicht geeignet. Er wird deshalb nur an die Lizenzinhaber des Verfahrens geliefert.

Trotz den bisher vorliegenden guten Erfahrungen empfehlen wir doch, vor Anfertigung eines auszulötenden Apparates entsprechend verlötete und verfugte Proben in den in Betracht kommenden Flüssigkeiten im normalen Arbeitsprozeß zu prüfen, um für alle Fälle sicher zu gehen. Sonderproben hierfür sind ausgearbeitet.

Ich zeige Ihnen nun in Tab. 1 eine Zusammenstellung üblicher Säureschutzverfahren in bezug auf deren Wärme-

Apparat	Wärmedurchgang kcal/m² h °C	Verhältniszahl
Ungeschützter Kessel 100 l mit 7 mm Wandst. und 2 mm V2A-plattierter Kessel 100 l	1200	100
6 mm homogen verbleiter Kessel und mit 65%ig. FeSi-Platten ausgelöteter Kessel	900	75
Mit Kunstharz 0,3 mm stark bakelisierter Kessel 100 l	750	62
Gußkessel mit Puderemail und emaillierter schmiedeeiserner Kessel	600	50
Gußkessel mit Sintergrund und Naßemail	300	25
Mit wärmeleitenden Steinen und wärmeleitenden Kitten 12 mm stark ausgemauerter 100 l-Kessel	200	16,6
Mit gewöhnlichen keramisch. Platten und säurefesten Kitten 20 mm stark ausgemauerter 100 l-Kessel	75	6,2
100 l-Kessel 4 mm stark gummiert	36	3,2

Tabelle 1. Wärmedurchgangszahlen bei verschiedenen gegen Säure geschützten Kesseln
Außen Dampf 4 atü, innen kochendes Wasser 100° C

durchgang. Die Versuchsbedingungen waren immer dieselben, außen Dampfmantel mit 4 atü, innen bei 100° C verdampfendes Wasser. Setzt man den verhältnismäßigen Wärmedurchgang beim ungeschützten schmiedeeisernen Kessel mit 100 wie beim plattierten Kessel, so sind die entsprechenden Zahlen beim homogen verbleiten Kessel und dem mit FeSi-Platten ausgelöteten Kessel 75, beim Gußkessel mit Puderemail und beim emaillierten schmiedeeisernen Kessel 50 und beim Gußkessel mit Naßemail sogar nur 25. Bei der Ausmauerung und der Gummierung sind die Zahlen noch geringer. Dabei ist zu bedenken, daß bei starkem Wärmefluß die Schwierigkeit der Wärmeführung mit der Behältergröße anwächst, denn der Inhalt z. B. einer Kugel nimmt mit der dritten Potenz des Durchmessers zu, die wärmeleitende Oberfläche aber nur in der zweiten Potenz.

Bei manchen Säureschutzverfahren, z. B. beim Emaillieren und beim Bakelisieren, hat man mit Erfolg die säurebeständige Schicht mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit sehr dünn gehalten im Interesse eines guten allgemeinen Wärmedurchgangs. Bei den an sich stabilen Ausmauerungen haben diese Versuche aber nicht zum erwünschten Ziel geführt. Die Gründe hierfür sind folgende: Die Ausmauerung der Gefäße und die Erhärtung des Kittes erfolgt bei gewöhnlicher Temperatur. Nun ist aber die Wärmeausdehnung der zu Ausmauerungen verwendeten keramischen Materialien nur ca. 1/2mal so groß wie die von Stahl. Außerdem ist bei Außenheizung die Stahlwand immer heißer als die Auskleidung. Die Ausmauerung wird also beim Erwärmen von außen leicht von der Gefäßwand abgehoben und damit locker und undicht, wenn es nicht gelingt, derselben eine genügende Vorspannung z. B. durch Anwendung treibender Kitte zu geben. Die Ausmauerungsstärke wählt man deshalb so groß, daß das Mauerwerk sich selbst tragen kann. Bei Kühlmänteln liegen die Verhältnisse etwas günstiger, da hier der Stahl kälter als die Ausmauerung ist.

Die wesentlichen Vorteile des neuen Auslötverfahrens gegenüber Email sind außer der größenmäßig unbegrenzten Herstellbarkeit die höhere Schlagfestigkeit, der bessere Wärmeübergang und die leichte Ausbesserungsmöglichkeit eines so ausgelöteten Kessels. Gegenüber metallplattierten Kesseln benötigt das neue Verfahren nur noch heimische Werkstoffe, und die Verwendungsmöglichkeit ist ganz erheblich breiter. Ein ausgelöteter Kessel kostet etwa ebenso viel wie ein säurebeständig emaillier-

Bild 7. Überprüfung eines mit 65prozentigen Ferrosiliciumplatten ausgelöteten 6000 Liter-Kessels

ter Kessel. Wegen der erforderlichen Kokillen werden mehrere gleiche Stücke verhältnismäßig billiger kommen als ein einzelnes abnormales Stück. Bis jetzt wurden Kessel von 40 bis 6000 Liter mit Erfolg angefertigt und benützt. Mehrere dieser Kessel sind teilweise über zwei

Jahre regelmäßig gegen Salzsäure und Schwefelsäure in Betrieb, ohne daß sich ein erheblicher Anstand ergeben hätte. Trotzdem empfiehlt es sich, den jeweiligen Zustand der Kittfugen regelmäßig zu überwachen und allzu rasche Temperaturveränderungen in den Kesseln zu vermeiden. Bild 7 zeigt einen ausgelöteten 6000-Liter-Kessel bei Überprüfung der Fugen.

Das neue Auslötverfahren ist von den Reichsstellen als ein Säureschutzverfahren mit heimischen Werkstoffen anerkannt. Das Eisenwerk Kaiserslautern hat eine einfache Lizenz von der I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft erworben. Drei weitere Firmen stellen Platten für das Verfahren her. Die Beschaffung dieser Platten macht zur Zeit wegen mangelnden Arbeitskräften gewisse Schwierigkeiten.

Ein völliger Ersatz für Email und plattierte Kessel soll das Auslötverfahren nicht sein. Wie weit es sich durchsetzt, wird von der Bewährung in der Zukunft abhängen. Die chemische Industrie wird es aber auch begrüßen, wenn das neue Verfahren der Emailindustrie einen Ansporn gibt, die Haftfestigkeit des Emails zu erhöhen und die Leichtverletzlichkeit desselben zu überwinden.

Aussprache:

Hegelmann fragt nach der chemischen Widerstandsfähigkeit der Konstruktion.

Frank erklärt, daß sie bei einem geeigneten Kitt selbst gegen Königswasser fest sein müsse. Die Bestrebung gehe dahin, die Konstruktion mit der Zeit gegen alle Säuren mit Ausnahme von Flußsäure fest zu machen; bisher liege Beständigkeit gegen Salzsäure und Schwefelsäure mittlerer Konzentration vor, nicht aber gegen Salpetersäure.

Matz weist auf die Bedeutung der Konstruktion für die Zellstoffindustrie hin.

Verfahrenstechnik im Bereich des kritischen Druckes und erforderliche thermodynamische Daten

Von Dr. FRANZ PATAT

Wir haben in letzter Zeit eine Reihe von Versuchen knapp über dem kritischen Gebiet verschiedener Flüssigkeiten durchgeführt, um auf diese Weise das erhöhte Lösevermögen der Dämpfe auszunützen. Als Beispiel, das über den speziellen Fall hinaus Bedeutung besitzen dürfte, sei die Hydrolyse von Anilin zu Phenol erwähnt, die zur Zeit bei uns im Versuchsmaßstab durchgeführt wird. Anilin kann durch Wasser zu Phenol umgesetzt werden, wobei Wasserstoffionen katalytisch wirken:

$$C_6H_5NH_2 + H_2O = C_6H_5OH + NH_3.$$

Die Hydrolyse läuft bis zu einem Gleichgewicht, das mit steigender Temperatur nach der Phenolseite verschoben wird. Auch die Umsatzgeschwindigkeit wächst wie üblich mit steigender Temperatur, so daß das Arbeiten bei möglichst hoher Temperatur verfahrenstechnisch anzustreben ist. Freilich scheint einer beliebigen Temperatursteigung dadurch eine Grenze gesetzt zu sein, daß die Reaktion durch Wasserstoffionen katalysiert wird und die Löslichkeit für Säureionen mit dem Herankommen an die kritische Temperatur stark absinkt. Eine genauere Untersuchung hat aber gezeigt, daß noch bei 440° C, also 60° C über der kritischen Temperatur, Wasserdampf erhebliche Mengen Säureionen, beispielsweise Phosphorsäure lösen kann, mehr sogar als unmittelbar unter der kritischen Temperatur, da ja der Wasserdampfdruck über der kritischen Temperatur beliebig gesteigert und damit eine Dichte erreicht werden kann, die größer als die kritische Dichte ist. Dadurch nun, daß die Reaktionsgeschwindigkeit auch noch proportional der Wasserkonzentration zunimmt, erreicht man bei den erwähnten hohen Drucken noch eine zusätzliche Umsatzsteigerung, die bei 600 atü Wasserdampfdruck und 440° C etwa den Faktor, gegen den Umsatz im unterkritischen Gebiet ausmacht.

Mit dieser Schilderung sind aber auch gleichzeitig die Probleme und Wünsche umrissen, die diesen Kreis interessieren: Dichte, Kompressibilitätsfaktor, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme von hochgespannten Dämpfen fehlen zwar, sind aber zur Not noch aus Näherungsformeln (Theorien der korrespondierenden Zustände) berechnen oder zu extrapolieren. Das folgende Bild zeigt

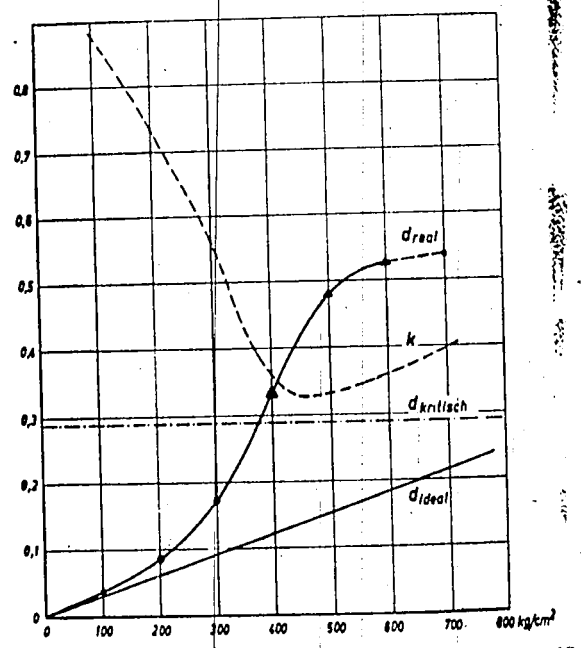


Bild 1. Dichte und Kompressibilitätszahl von Wasserdampf bei 440° C

beispielsweise den zum Teil extrapolierten Verlauf der Dichte von Wasserdampf bei 440° C bis 700 atü und den des entsprechenden Kompressibilitätsfaktors K. Wie man sieht, sind die Abweichungen vom idealen Verhalten beachtlich, und im überkritischen Gebiet können bei genügend hohen Drucken Dichten erreicht werden, die weit

grüßen, wenn das neue Verfahren der Emailindustrie einen Ansporn gibt, die Haftfestigkeit des Emails zu erhöhen und die Leichtverletzlichkeit desselben zu überwinden.

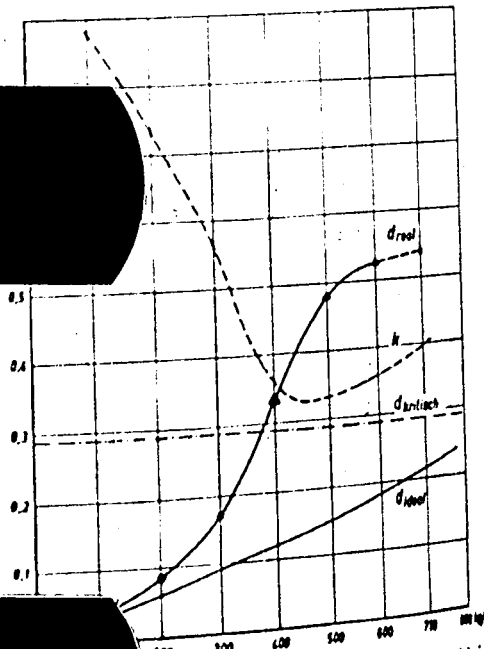
[redacted]n fragt nach der chemischen Widerer Konstruktion.

[redacted]lärt, daß sie bei einem geeigneten Kitt [redacted] Königswasser fest sein müsse. Die Bestrebung gehe dahin, die Konstruktion mit der Zeit gegen alle Säuren mit Ausnahme von Flußsäure fest zu machen; bisher liege Beständigkeit gegen Salzsäure und Schwefelsäure mittlerer Konzentration vor, nicht aber gegen Salpetersäure.

Matz weist auf die Bedeutung der Konstruktion für die Zellstoffindustrie hin.

[redacted]uckes und erforderliche [redacted]

[redacted]essieren: Dichte, Kompressibilitätsfaktor, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme von hochgespannten Dämpfen fehlen zwar, sind aber zur Not noch aus Näherungsformeln (Theorien der korrespondierenden Zustände) zu berechnen oder zu extrapolieren. Das folgende Bild zeigt



[redacted]d Kompressibilitätszahl von Wasserdampf bei 440° C

[redacted]den zum Teil extrapolierten Verlauf der Wasserdampf bei 440° C bis 700 atü und den [redacted]des entsprechenden Kompressibilitätsfaktors K. Wie man sieht, sind die Abweichungen vom idealen Verhalten beachtlich, und im überkritischen Gebiet können bei genügend hohen Drucken Dichten erreicht werden, die weit

über der kritischen Dichte, die in der Abbildung rot eingezeichnet ist, liegen.

Alle Anhaltspunkte fehlen aber für die Löslichkeit von Säuren, Laugen und Salzen im überkritischen Gebiet, sowie über Ionenaktivität, die übrigens mit dem auch unbekannten Verlauf der Dielektrizitätskonstante in Abhängigkeit von der Dampfdichte parallel laufen dürfte. Ferner fehlen Anhaltspunkte über gegenseitige Löslichkeit von Dämpfen und über die gegenseitige Beeinflussung ihrer Aktivitäten, die nicht nur für die reaktionskinetischen und Gleichgewichtsfragen, sondern auch für Destillationsaufgaben interessant werden kann; als in dieser Beziehung typisches Beispiel kann das Stoffpaar Wasser-Ammoniak angeführt werden.

Unsere Wünsche im Hinblick auf den Wärmeatlas können also dahingehend zusammengefaßt werden, die wichtigsten Daten von Dämpfen, Wasser, Alkohol, Benzol, Benzin, Anilin knapp über dem kritischen Gebiet bis zu Drucken bis 1000 atü zu sammeln, bzw. da wenig zu sammeln sein wird, experimentell zu bestimmen.

Untersuchungen über die Wärmeableitung von Kabeln

Von Dr.-Ing. GEORG KLING

Inhalt:

Theoretische Darlegung der Wärme- und Feuchtigkeitsbewegung um erdverlegte Hochspannungskabel. Anlage eines Versuchsfeldes. Versuche mit vier verschiedenen Kabelbettungserden. Ergebnisse, Schlußfolgerungen.

A. Einleitung

Die Untersuchungen über die Wärmeableitung von Kabeln waren durch verschiedene Störungen im Oppauer Kabelnetz veranlaßt, die in zwei Fällen sogar zu mehrstündigem Ausfall des gesamten Werkes geführt hatten. In der Hauptenergieleitung von der Zentrale Op 99 zur Kompressorenstation Op 1 waren im Winter 1938/39 Kurzschlüsse aufgetreten. Als Ursache wurde eine übermäßige Kabelerwärmung festgestellt, obgleich die Belastung der 6 KV Al-Kabel noch unterhalb der von VDE angegebenen Grenze lag. Die Untersuchung ergab, daß die Isoliermasse flüssig geworden war, was dann zum Spannungsdurchschlag geführt hatte. In einem Fall hatten sich die Kabel infolge Wärmeausdehnung sogar in den Verbindungsmuffen gegeneinander verschoben und dadurch einen Berührungskurzschluß erzeugt. Die Kabelerwärmung wiederum war die Folge einer ungenügenden Wärmeableitung der Jouleschen Stromwärmeverluste an das umgebende Erdreich.

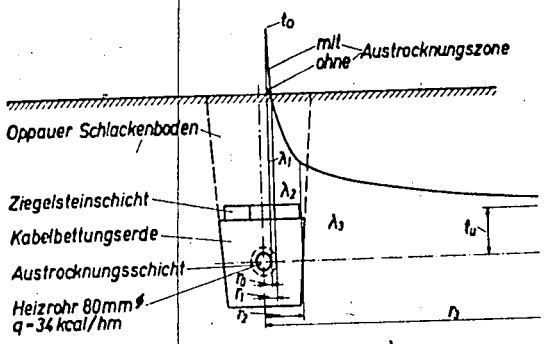
Die ersten Versuche erstreckten sich auf thermoelektrische Temperaturmessungen an den Betriebskabeln von Op 99 nach Op 1. Die starken Betriebsstromschwankungen und verschiedenste örtliche Einflüsse, wie wechselnde Bodenart, Regenschatten der Gebäude, Temperatureinwirkungen von Rohrleitungen usw. erschwerten die Beobachtungen derart, daß wir uns zur Anlage eines besonderen Kabelversuchsfeldes entschlossen.

An vier verschiedenen Kabelerden: Sand, lehmiger Sand, Ton sowie Filterkies vom Wasserwerk Oppau wurde hier die Wärmeableitung während eines Jahres im Freien beobachtet. Bevor jedoch auf diese Messungen selbst eingegangen wird, seien noch einige grundsätzliche theoretische Erläuterungen über die Vorgänge der Wärmeleitung im Erdreich gegeben.

B. Theorie der Wärmeleitung um ein Kabel

1. Wärmeentwicklung im Kabel

Im Bild 1 ist ein Kabelgraben mit einem Kabel dargestellt, wie wir es für unsere Versuchszwecke in strenger Anlehnung an die Kabelpraxis einbauten. Das 300 mm² Dreileiterkabel wurde durch ein 5 m langes Stahlrohr von 80 mm Ø ersetzt, das innen mit einer elektrischen Heizung versehen war. Das Kabel liegt in der Kabelbettungserde, praktisch meist Sand, der eine weiche Lagerung des empfindlichen Kabels gewährleistet und zugleich



$$t_o - t_u = \frac{q}{2\pi} \cdot \left[\frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\lambda_1} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda_2} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\lambda_3} \right]$$

r_0 Radius des Kabels
r_1 Radius der Austrocknungszone
r_2 Radius des unteren Kabelgrabens
r_3 Radius des Wirkungskreises der Erwärmung
λ_1 Wärmeleitzahl der ausgetrockn. Kabelbettungserde
λ_2 Wärmeleitzahl der nassen Kabelbettungserde
λ_3 Wärmeleitzahl der nassen Umgebungserde
t_o Temperatur der Kabeloberfläche
t_u Temperatur der Umgebung
q Wärmeentwicklung des Kabels

Bild 1. Schnitt durch Versuchskabelgraben Temperaturverlauf

Schutz bietet vor chemischen Angriffen der Oppauer Schlackenböden. Die Ziegelsteinschicht schützt gegen Hackenschläge bei Erdarbeiten. Die Verlegungstiefe der Kabel war 70 cm.

Die Wärmeentwicklung q eines Dreileiterkabels ist nach dem Ohmschen Gesetz genau bekannt zu:

$$q = 3 \cdot 0{,}86 \cdot i^2 \cdot R_o \cdot (1 + \alpha t_L)$$

wobei i der Strom pro Phase, R_o der Leiterwiderstand pro 1 m Kabel, α der Temperaturkoeffizient des Widerstandes und t_L die Leitertemperatur ist.

Es liegt nun der Gedanke nahe, den Temperaturverlauf im Erdreich um das Kabel nach der Zylinderformel

zu errechnen. Entsprechend den verschiedenen Wärmeleitzahlen ist das Erdreich in drei Zonen aufgeteilt: Schlackenboden, Bettungserde normal feucht und Bettungserde ausgetrocknet am Kabel. (Über letzteren Fall werde ich noch eingehend sprechen). Der Temperaturverlauf ist danach eine zweimal geknickte logarithmische Kurve. Bemerkenswert daran ist der beträchtliche Temperaturanstieg in der Trockenzone am Kabel mit kleiner Wärmeleitzahl. Ohne Austrocknung würde die Temperaturspitze wesentlich niedriger liegen.

Dieses Bild soll nur grundsätzlich den Temperaturverlauf um ein Kabel zeigen und die Bedeutung der dem Kabel nächstgelegenen Erdschichten auf die Bildung der Temperaturspitze t_0 veranschaulichen. Geringe λ-Änderungen können hier außerordentlich gefährlich werden. Praktisch scheitert eine derartige Berechnung der Temperaturkurve an der Unkenntnis der Austrocknungszone und der Wärmeleitzahlen des Erdreiches.

2. Wärmeleitvermögen von Erde

Über die Wärmeleitzahlen der verschiedenen Bodenarten sind in der Literatur im allgemeinen nur spärliche Werte vorhanden, die zudem noch meist unvollkommen in der Angabe der verschiedenen Einflußgrößen: Körnung, Bodenart, Feuchtigkeit, Temperatur sind. Sie schwanken zwischen $\lambda = 0{,}5$ bis 2,0. Wir haben nun zahlreiche Messungen an Oppauer Kabelbettungserden durchgeführt. Als Meßmethode wurde ein Plattenverfahren benutzt. (Bild 2.)

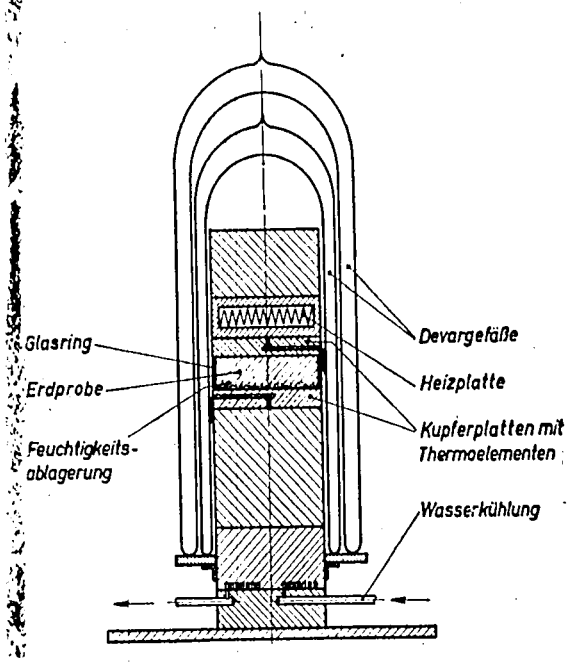


Bild 2. Plattenapparatur zur Messung der Wärmeleitzahl von Erden

Die Bodenproben lagen innerhalb eines Glasringes zwischen zwei Kupferplatten mit Thermoelementen. Über der oberen Platte liegt eine elektrische Heizplatte und ein Bleiklotz zur Beschwerung. Das Ganze ruht auf einem Stahlblock mit Wasserkühlung. Die seitlichen Wärmeverluste sind durch zwei Dewargefäße abgeschirmt. Die restlichen kleineren Verlustwärmen verschiedener Art sind durch Eichungen festgelegt.

Einige Meßwerte sind im Bild 3 für Filterkies, für Sand und für lehmhaltigen Sand aufgetragen. Bei normalen Erdfeuchtigkeiten von 10 bis 20% haben danach Kies und Sand hohe λ-Werte, der lehmige Sand dagegen niedere λ-Werte. Mit verringerter Feuchtigkeit, d. h. bei Austrocknung der Kabelerde, verlieren Kies und Sand ihr gutes Wärmeleitvermögen immer mehr, um im trockenen

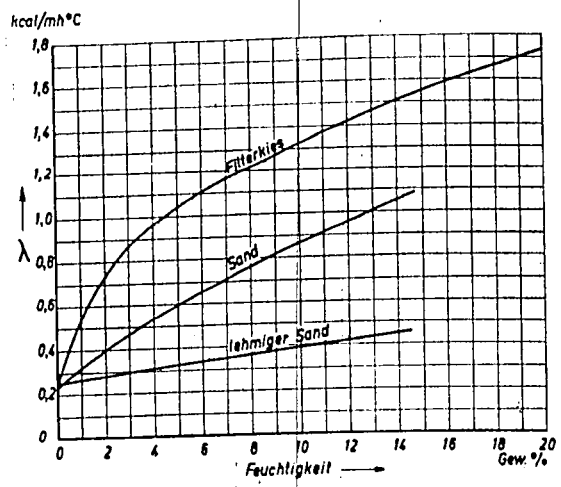


Bild 3. Wärmeleitzahl von feuchten Kabelerden bei ~ 20°C

Zustand, ebenso wie lehmiger Sand, die niederen Wärmeleitzahlen von Isolierstoffen, $\lambda = 0{,}2$ bis 0,3, anzunehmen. Diese Kurven wurden bei Temperaturen von ~ 20° C gemessen.

Interessant sind nun Messungen von Watzinger, Kindem und Michelsen an Sand bei verschiedenen Temperaturen und Feuchtigkeiten (Bild 4). Der Kurvenanstieg ist bei höheren Temperaturen, wesentlich steiler als bei niederen Temperaturen, das heißt also, daß eine erwärmte Kabelbettungserde weit mehr ausgetrocknet werden muß, um wärmeisolierend zu wirken, als eine kältere Kabelerde. Bemerkenswert ist noch die Beobachtung, daß sich alle Kurven mit steigender Feuchtigkeit einem konstanten

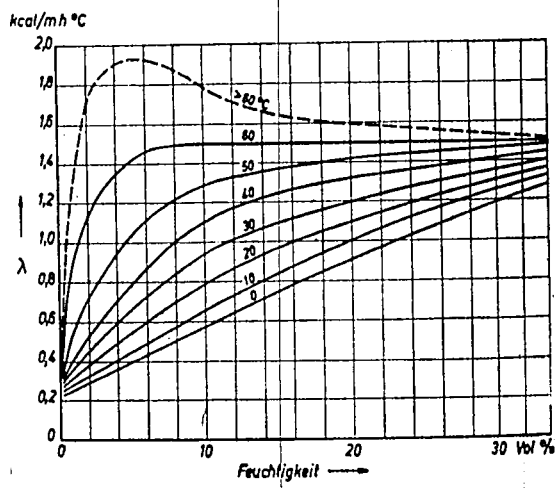
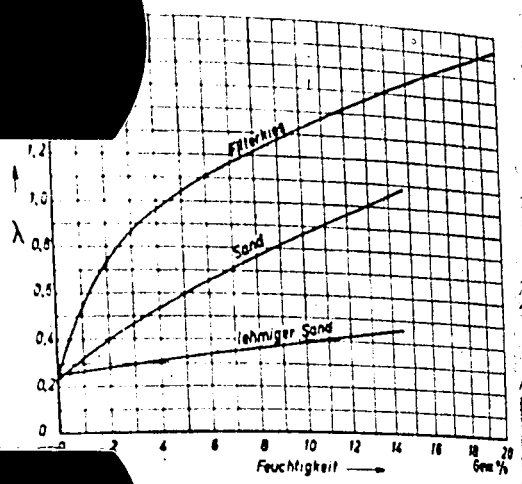


Bild 4. Wärmeleitzahl von Sand

Wert, dem λ-Wert bei 60° C, anschmiegen. Bei völliger Austrocknung streben alle Kurven den Schnittpunkten mit der Ordinatenachse zwischen $\lambda = 0{,}2$ und 0,3 zu, das heißt, daß die Wärmeleitzahl von trockenem Erdreich nur geringfügig mit der Temperatur ansteigt.

maten Erdfeuchtigkeiten von 10 bis 20% haben danach Kies und Sand hohe λ-Werte, der lehmige Sand dagegen niedere λ-Werte. Mit verringerter Feuchtigkeit, d. h. bei Austrocknung der Kabelerde, verlieren Kies und Sand ihr gutes Wärmeleitvermögen immer mehr, um im trockenen



...rmeleitzahl von feuchten Kabelerden bei ≈ 20°C

...so wie lehmiger Sand, die niederen Wärme... ...n Isolierstoffen, λ = 0,2 bis 0,3, anzunehmen... ...Diese Kurven wurden bei Temperaturen von ≈ 20° C ge... messen.

Interessant sind nun Messungen von Watzinger, Kir... dem und Michelsen an Sand bei verschiedenen Temper... turen und Feuchtigkeiten (Bild 4). Der Kurvenanstieg ist bei höheren Temperaturen, wesentlich steiler als bei n... deren Temperaturen, das heißt also, daß eine erwärm... Kabelbettungserde weit mehr ausgetrocknet werden m... um wärmeisolierend zu wirken, als eine kältere Kabelerde. Bemerkenswert ist noch die Beobachtung, daß sich ... mit steigender Feuchtigkeit einem konstan...

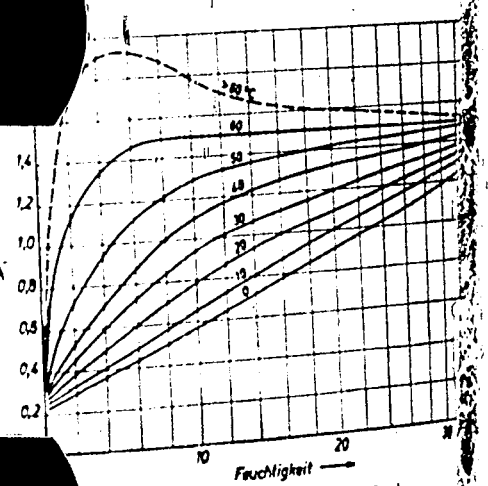


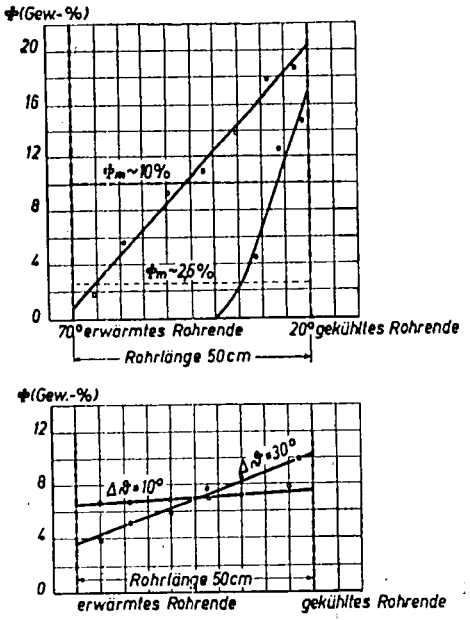
Bild 4. Wärmeleitzahl von Sand

...m λ-Wert bei 60° C, anschmiegen. Bei v... ...trocknung streben alle Kurven den Schnittpunkt... der Ordinatenachse zwischen λ = 0,2 und 0,8 zu, das... daß die Wärmeleitzahl von trockenem Erdreich u... ...rungfügig mit der Temperatur ansteigt.

3. Feuchtigkeitswanderung im Erdreich

Die verschiedenen Messungen zeigen also, daß die Wärmeleitzahlen feuchter Erden sowohl von Temperatur wie von Feuchtigkeit stark verändert werden. Hinzu tritt eine weitere Feststellung, die wir beim Aufgraben zahlreicher Kabel im Oppauer Leitungsnetz machten. Dabei wurde nämlich häufig beobachtet, daß direkt um das Kabel herum eine vollkommen ausgetrocknete Sandschicht lag, trotzdem das Erdreich sonst gut durchfeuchtet war. Wie nun das Bild 1 veranschaulichte, ist gerade diese wärmeisolierende Trockenschicht so außerordentlich gefährlich wegen der Bildung hoher Spitzentemperaturen am Kabel.

Dies führte daher zu der weiteren Aufgabe, die Feuchtigkeitsverteilung um ein Kabel näher zu studieren. Unter Einwirkung eines Temperaturgefälles tritt bekanntlich bei feuchten Stoffen eine Feuchtigkeitswanderung ein. Diese erfolgt derart, daß auf der wärmeren Seite einer mit Wasser benetzten Pore der Partialdruck des Wassers größer ist als auf der kälteren Seite und damit Wasser überdiffundiert zur kalten Seite und dort kondensiert. Mit Erhöhung der Temperaturdifferenz wird auch das Konzentrationsgefälle vergrößert und mehr Wasser transportiert. Diesen Vorgang zeigen sehr schön die Versuche von Krischer und Rohnalter (Bild 5) an einem mit Sand



oberes Bild: Sand Korngröße 0,2 mm
Temperaturgefälle Δϑ = 50°
Gesamtfeuchtigkeitsgehalt Φm = 10% und 2,5%
unteres Bild: Sand Korngröße 0,7 mm
Temperaturgefälle Δϑ = 10° und 30°
Gesamtfeuchtigkeitsgehalt Φm = 7%

Bild 5. Feuchtigkeitsverteilung in Sand

gefüllten Rohr, dessen eines Ende erwärmt und dessen anderes Ende gekühlt wurde. Im Beharrungszustand stellt sich ein lineares Feuchtigkeitsgefälle ein, das umso steiler ist, je höher die Feuchtigkeit ist (unt. Bild). Wird andererseits das Temperaturgefälle konstant gehalten, z. B. von 70 auf 20° C Differenz, aber Sand von verschiedener Feuchtigkeit, z. B. 2,5% und 10%, in das Rohr eingebracht, so ergeben sich die Kurven im oberen Bild. Der Sand von nur 2,5% Anfangsfeuchtigkeit ist hier in breiter Zone völlig ausgetrocknet, während der anfangs 10% feuchte Sand auch am erwärmten Rohrende noch 1% Feuchtigkeit aufweist. Das heißt also, eine sehr feucht eingebrachte Kabelerde (z. B. durch Einschlämmen!), wird unter Einwirkung der thermischen Diffusion an der Kabeloberfläche nicht bis zur völligen Trockenheit austrocknen können, da die umliegende vollgesättigte Erde gar keinen Raum mehr frei hat für die Dampfbewegung. Dagegen kann eine mäßig feucht eingeschüttete Kabelerde leicht in einer weiten Schicht um das Kabel völlig austrocknen und die Wärmeabfuhr stark verringern.

Die Bildung dieses Konzentrationsgefälles ist nun wiederum die Ursache einer rückläufigen Feuchtigkeitswanderung zum Kabel hin, womit sich ja im Beharrungszustand eine stetige Feuchtigkeitsverteilung im Erdreich einstellt. Krischer versucht für diesen Vorgang analog der Diffusion und Wärmeleitung den Begriff der Feuchtigkeitsleitzahl einzuführen. Ohne näher darauf einzugehen, sei nur erwähnt, daß die Feuchtigkeitsleitzahl wesentlich mit steigender Temperatur zunimmt, da ja die Zähigkeit von Wasser dabei fällt.

4. Konvektion um ein Kabel

Bei den Kabelgrabungen hatten wir noch eine weitere Feststellung gemacht. Die Trockenzone, die einige Millimeter bis zu einigen Zentimetern betragen kann, war über dem Kabel wesentlich stärker als unter dem Kabel. Der Grund hierfür liegt in einer starken natürlichen Konvektion der im Erdreich eingeschlossenen Luft. Die gleiche Erscheinung trat auch bei unseren ersten Messungen nach der Kugelmethode auf.

Dabei ist im Mittelpunkt einer Hohlkugel eine elektrisch geheizte Kugel gelagert. Der Zwischenraum beider Kugeln ist mit Erde ausgefüllt. Wir konnten diese Messungen nicht durchführen, da allmählich die ganze obere Erdschicht austrocknete und sich in der unteren Kugelschale das Wasser absetzte, womit die Versuchsbedingung eines radialen Wärmeflusses gestört ist.

Auf die Wirksamkeit der natürlichen konvektiven Wärmeleitung hatten wir nach diesen Beobachtungen große Hoffnungen gesetzt, zumal es sich ja praktisch gezeigt hatte, daß sich Kabel völlig frei im Luftraum kaum erwärmten. Es wurden daher zwei 15 m lange Kabelstrecken in der Leitung von Op 99 nach Op 1 einmal mit Kies von Kirschengröße, andermal mit Backsteinschotter von Faustgröße ausgelegt. Der Erfolg war negativ. Die Kabel wurden nach kurzer Zeit so heiß, daß sofort aufgegraben werden mußte und die alte nasse Sandbettung wiederhergestellt wurde. Übrigens wäre auch die mechanische Beanspruchung des Kabels durch die groben Steine praktisch nicht tragbar gewesen. Der Versuch lehrte uns jedoch, daß die Konvektion im Erdreich für die Wärmeabfuhr vom Kabel ohne Bedeutung ist. Beachtlich ist dagegen ihre schädliche Wirkung der Feuchtigkeitswegführung, indem die warme, am Kabel aufsteigende Luft sich mit Wasserdampf sättigt und diesen am umliegenden kalten Erdreich wieder auskondensiert.

5. Zusammenstellung.

Die verschiedenen Vorgänge der Wärmeleitung und der Feuchtigkeitswanderung um ein erdverlegtes Kabel seien

jetzt nochmals als schematisch zusammengestellt (Bild 6) wobei die ausgezogenen Linien einen Wärmetransport, die gestrichelten Linien einen Feuchtigkeitstransport veranschaulichen sollen.

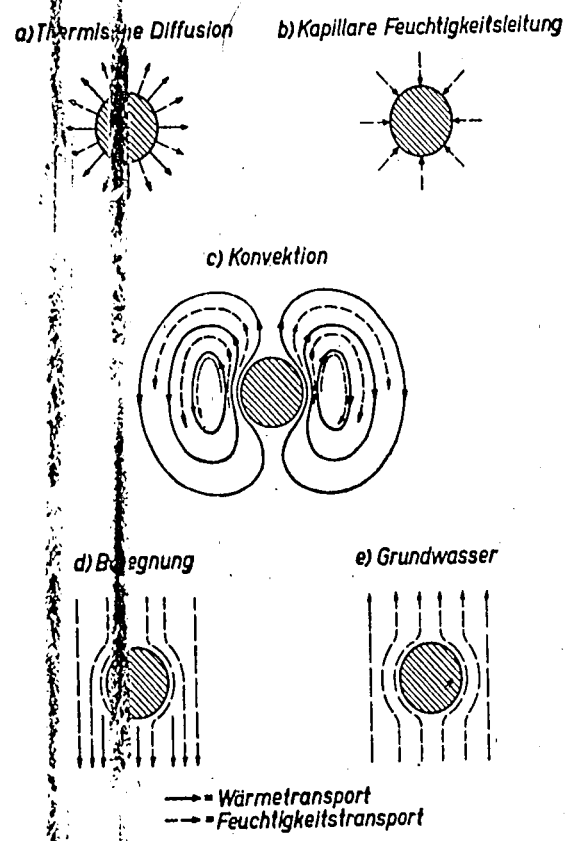


Bild 6.
Vorgänge der Feuchtigkeitswanderung im Erdreich um ein Kabel

Es ist

der Fall der thermischen Diffusion, bei der sowohl Wärme wie Feuchtigkeit vom Kabel wegtransportiert werden;

die kapillare Feuchtigkeitsleitung, die Feuchtigkeit zum Kabel zurückführt und zusammen mit Fall a) ein stetiges Feuchtigkeitsgefälle gleichmäßig um das Kabel herum einstellt;

die Konvektion der Luft in den Erdporen und -kanälen, die infolge ihrer Dichteverminderung am Kabel emporsteigt und Wärme wegführt, gleichzeitig durch ihr erhöhtes Sättigungsvermögen Feuchtigkeit transportiert;

die Beregnung, die das Erdreich durchfeuchtet, zugleich infolge Erwärmung des unten absickernden Wassers das Kabel kühlt (auf die Wirksamkeit der Berechnung komme ich später noch zu sprechen);

die Einwirkung des Grundwassers, die natürlich eine hervorragende Befeuchtung gewährleistet. Für unsere Oppauer Kabelverlegung kommt dies allerdings nicht in Frage.

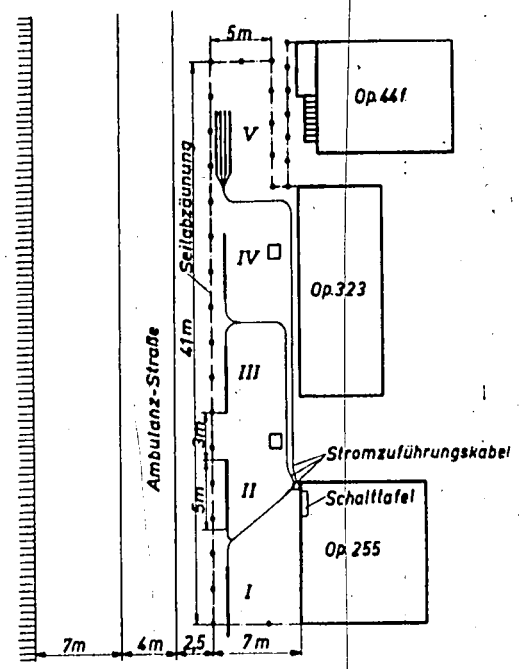
Ich habe diese theoretischen Vorgänge der Feuchtigkeits- und Wärmeströmung um ein Kabel etwas eingehender geschildert, um Ihnen zu zeigen, wie wenig aussichtsreich es wäre, etwa aus Laboratoriumsuntersuchungen von Kabelerden die Kabelerwärmung errechnen zu wollen.

Hier können nur jahrelange praktische Beobachtungen und Messungen Aufschluß über die Eignung dieser oder jener Kabelbettungserde geben. Ein wesentlicher Beginn in dieser Richtung sind die Versuche in unserem Kabelversuchsfeld, die ich Ihnen jetzt kurz schildern möchte.

C. Messungen am Kabelversuchsfeld

1. Beschreibung

Das Kabelversuchsfeld lag zwischen der Ambulanzstraße und dem Kälteraum Op 255 des Technischen Prüfstandes (Bild 7). Der Boden bestand aus frischer Oppauer Schlakkenschüttung, die vorher nochmals mit Wasser



Meßstrecke	I	a	Filterkies	1	Rohr
"		b	lehmiger Sand, feucht	1	"
"	II		Sand	1	"
"	III		lehmiger Sand	1	"
"	IV		Tonerde	1	"
"	V		lehmiger Sand	4	"

Bild 7. Lageplan des Kabelversuchsfeldes

reichlich eingeschlämmt wurde und mehrere Tage von einer Straßenwalze festgewalzt wurde. Im ganzen wurden fünf Meßstrecken angelegt mit Filterkies, Sand, lehmigem Sand und Tonerde. Die Heizrohre waren 5 m lang, hatten 80 mm Ø (entsprechend einem 300 mm² Aluminiumkabel) und lagen 70 cm tief im Erdreich. Bei vierfacher Verlegung betrug der Kabelabstand 20 cm. Die einzelnen Meßstrecken hatten 3 m Zwischenraum, so daß keine gegenseitige Beeinflussung möglich war. Die Heizleistung jedes Rohres betrug 200 Watt, d. s. 34 kcal/h und pro m Rohrlänge; diese Leistung entspräche den Stromwärmeverlusten eines 300 mm² Al-Kabels bei ~ 330 Amp. Damit ist in den Heizrohren der Betriebszustand eines mäßig belasteten Kabels nachgeahmt worden. Die Meßstrecke 5 hatte vier Kabel nebeneinander im Kabelgraben, um den gegenseitigen Einfluß mehrerer Kabel zu studieren.

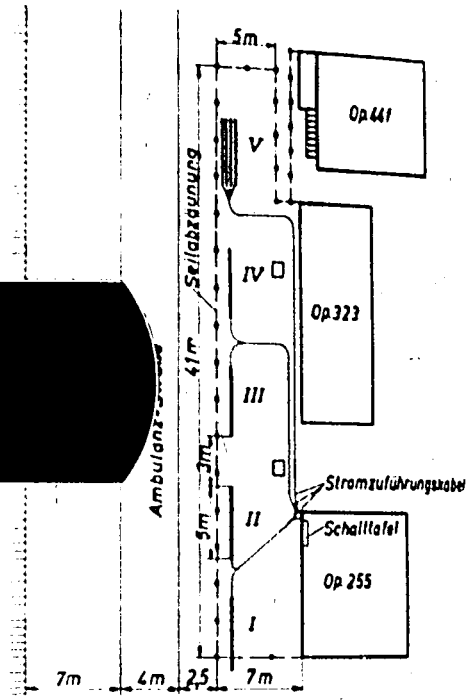
Im Erdreich wurden nun eine größere Anzahl von

Hier können nur jahrelange praktische Beobachtungen und Messungen Aufschluß über die Eignung dieser oder jener Kabelbettungserde geben. Ein wesentlicher Beginn in dieser Richtung sind die Versuche in unserem Kabelversuchsfeld, die ich Ihnen jetzt kurz schildern möchte.

C. Messungen am Kabelversuchsfeld

1. Beschreibung

Das Versuchsfeld lag zwischen der Ambulanz- und dem Kälteraum Op 255 des Technischen Prüf- Der Boden bestand aus frischer Oppauer ung, die vorher nochmals mit Wasser



Meßstrecke				
	I	a	Filterkies	1 Rohr
		b	lehmiger Sand, feucht	1 "
	II		Sand	1 "
	III		lehmiger Sand	1 "
	IV		Tonerde	1 "
	V		lehmiger Sand	4 "

7. Lageplan des Kabelversuchsfeldes

reichlich eingeschlämmt wurde und mehrere Tage von einer Straßenwalze festgewalzt wurde. Im ganzen wurden fünf Meßstrecken angelegt mit Filterkies, Sand, lehmigem Sand und Tonerde. Die Heizrohre waren 5 m lang, hatten 80 mm Ø (entsprechend einem 300 mm² Aluminiumkabel) und lagen 70 cm tief im Erdreich. Bei vierfacher Verlegung betrug der Kabelabstand 20 cm. Die einzelnen Meßstrecken hatten 3 m Zwischenraum, so daß keine gegenseitige Beeinflussung möglich war. Die Heizleistung jedes Rohres betrug 200 Watt, d. s. 34 kcal/h und pro m Rohrlänge; das entspräche den Stromwärmeverlusten eines Kabels bei ~ 330 Amp. Damit ist in den Heizkabeln der Betriebszustand eines mäßig belasteten Kabels nachgebildet worden. Die Meßstrecke 5 hatte vier Kabel im Kabelgraben, um den gegenseitigen Einfluß der Kabel zu studieren.

Im Erdreich wurden nun eine größere Anzahl von

Thermoelementen (Bild 8), bei Einfachverlegung 23 Stück, eingegraben. Alle Elemente lagen in einer Ebene senkrecht zur Heizrohrachse und waren in vier Strahlen, seitlich, nach oben und nach unten, angeordnet. Zwei Elemente, Nr. 7 und 8, waren auf ein Kupferplättchen gelötet und auf das

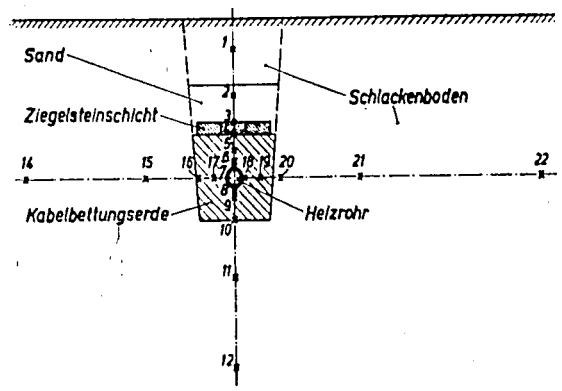


Bild 8. Anordnung der Temperaturmeßstellen im Versuchsfeld bei Einfachverlegung

Rohr festgebunden. Die Anzeigen dieser beiden Elemente waren die wichtigsten, da sie ja die Kabeloberflächentemperaturen angaben. Wichtig sind noch die Anzeigen der Elemente 18, 6, 9 und 17, in 2, 3, 5 und 6 cm Abstand vom Rohr, die den Vorgang der Wasserdampfdiffusion im Erdreich zu beobachten gestatten. Die äußeren Thermoelemente zeigen im Mittel die ungestörte Erdtemperatur an. Das Element 1 unter der Erdoberfläche zeigt die Eindringung der täglichen Lufttemperaturschwankungen ins Erdreich an.

Bei Vierfachverlegung der Kabel (Bild 9) ist der Einbau entsprechend. Hier liegen zwischen den Rohren noch

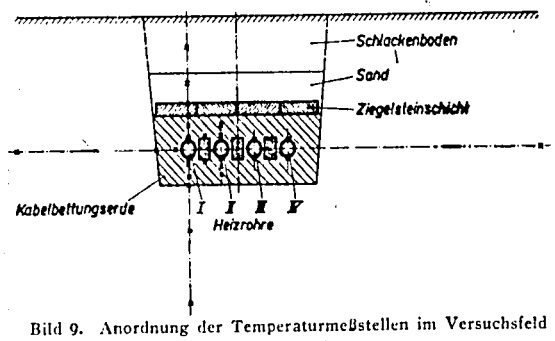


Bild 9. Anordnung der Temperaturmeßstellen im Versuchsfeld bei Vierfachverlegung

die Schutzreihen aus Ziegelsteinen. Auf alle vier Rohre ist jeweils oben und unten ein Element festgebunden. Die Heizstärke aller vier Rohre war wiederum 200 Watt.

2. Zeitliche Temperaturmessungen

Die Zusammenstellung der Versuchsergebnisse aller fünf Meßstrecken zeigt nun das Bild 10. Hier sind für jeden Tag die Temperaturen einiger wichtiger Meßstellen aufgetragen. Die Kurven beginnen an dem Tag, an dem das Heizrohr eingeschaltet wurde, und sind dann über den ganzen Sommer 1939 in zwei- bis dreitägigem Abstand geführt worden. Mit Kriegsausbruch trat eine dreimonatige Pause ein. Dann liegen noch einige Meßwerte vom Dezember und Januar 1940 vor. Im unterSten Abschnitt des Bildes sind die Lufttemperatur und die Niederschlagsmenge an jedem Tag aufgetragen, um die Wettereinflüsse erkennen zu können.

Zur Beurteilung der Temperaturaufschreibungen seien jeweils der Verlauf der untersten Kurven, die die Erdtemperaturen darstellen, und der obersten Kurve, die die höchste Kabeltemperatur zeigt, betrachtet. Die Meßstrecke I, Filterkies, wurde am 3. April 1939 eingeschaltet. Die Oberflächentemperaturen stiegen innerhalb der ersten

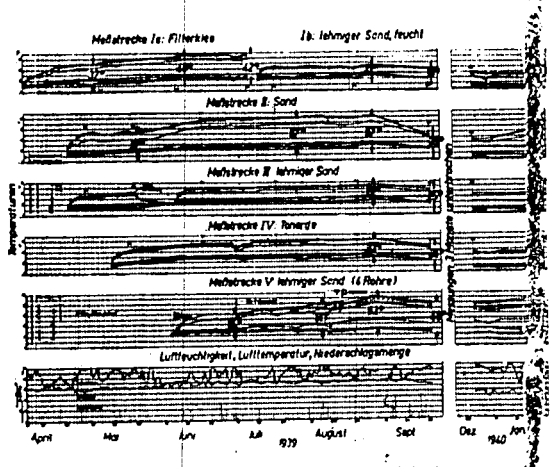


Bild 10. Temperaturverlauf in verschiedenen Kabelbettungserden

vier Wochen langsam an, bis zum Beharrungszustand, der mit ca. 37° C gegeben ist. Im Verlauf der folgenden Wochen erreicht dann die Übertemperatur 40° C, schließlich 42° C. Der Versuch wurde hier abgebrochen, da Filterkies nach diesen Messungen wegen zu hoher Temperaturen ungeeignet als Kabelbettungserde war. Die Meßstrecke II, Sand, erreichte in erster Beharrung auch 37° C. In den folgenden Wochen stieg jedoch die Übertemperatur ganz allmählich bis zu 57° C an. Diese Temperatur blieb einige Zeit, bis Ende August, konstant. Interessant ist dann der Temperaturabfall auf 23° C im September nach einer Regenperiode mit starken Niederschlägen. Im Winter steigt die Temperatur jedoch wieder, um zuletzt 51° C zu erreichen. Es ist hier ohne Zweifel eine sehr starke Beeinflussung durch die Regenperiode festzustellen. Beim lehmigen Sand in Meßstrecke III stellte sich im August eine höchste Übertemperatur von 29° C ein, die durch die Regenfälle auf 25° C herabgedrückt wurde. Im Winter stieg die Übertemperatur allerdings nochmals auf 31° C. Derselbe lehmige Sand wurde auch in der Meßstrecke I nach dem Filterkies untersucht. Hier war der Sand jedoch mit Wasser eingeschlämmt worden. Diese Maßnahmen erwiesen sich als sehr vorteilhaft. Gegenüber Meßstrecke III mit 29° C im August stellt sich jetzt nur 21° C ein, nach der Regenperiode anstelle 25° C nur 18° C, im Januar anstelle 31° C nur 22° C. Das Einschlämmen der Kabelbettungserde ist also auf jeden Fall als vorteilhaft zu empfehlen. Die Meßstrecke IV mit Tonerde zeigte ein ähnliches Verhalten wie lehmiger Sand. Auch hier wäre durch feuchtes Einbringen eine noch niedrigere Temperatur zu erwarten. Allerdings ist diese Tonerde sehr teuer. Sie wird von den Kabelmeistern an den Stellen verlegt, wo etwa herabtropfende Säuren oder Laugen die Kabel zerstören könnten.

Die Meßstrecke V zeigt die Einwirkung nebeneinander liegender Kabel. Die Anordnung der Vierfachverlegung war schon in Bild 9 gezeigt worden. Zuerst wurde ein äußeres Rohr allein eingeschaltet, das im Beharrungs-

zustand 34° C erreichte. Dann wurde das danebenliegende innere Rohr dazugeschaltet, wodurch 51° C höchste Übertemperatur erreicht wurde. Schließlich wurden noch die beiden letzten Rohre zugeschaltet, die im August 62° C als höchste Sommertemperatur ergaben. Die Regenperiode war von geringem Einfluß, scheinbar durch die breite, überliegende Ziegelsteinschicht. In der niederschlagarmen Winterzeit stieg dann die Übertemperatur der beiden mittleren Kabel sogar auf 83° C, eine Temperatur, die in der Kabeltechnik natürlich untragbar ist.

3. Örtliche Temperaturmessungen

Zum Schluß möchte ich Ihnen noch einige Schaubilder zeigen, aus denen das Temperaturfeld um das Kabel zu ersehen ist (Bild 11). Die Abzisse zeigt die Entfernung von

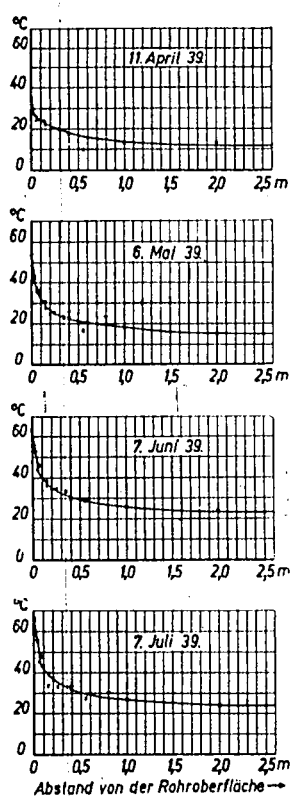


Bild 11. Temperaturfeld um das Kabel
Meßstrecke I: Filterkies

der Kabeloberfläche in m. Als Ordinaten sind die Temperaturen der verschiedenen Thermoelemente im Erdreich aufgetragen. Wenngleich der Wärmefluß um das Kabel nicht radialsymmetrisch ist, insbesondere zur Erdoberfläche hin anders ist als ins Erdinnere, so wurde doch durch alle Punkte eine Temperaturkurve gelegt. Dies ist vor allem dann berechtigt, wenn man nur die engere Umgebung des Kabels betrachtet, wo der Wärmefluß noch gleichmäßig nach allen Seiten wegströmt. Am Beispiel des Filterkieses ist nun sehr schön die allmähliche Austrocknung zu beobachten. Die Kurven zeigen von rechts nach links zum Kabel hin ansteigend den typischen logarithmischen Verlauf. Kurz vor der Oberfläche ist der Temperaturverlauf wesentlich steiler. Der Knick in der Kurve gibt die Breite der Austrocknungsschicht an. Diese beträgt für Filterkies z. B. am 7. Juli 1939 etwa 6 bis 8 cm.

Interessant ist noch die Meßstrecke II mit Sandbettung (Bild 12). Hier ist die Austrocknungsschicht anfangs noch sehr klein, z. B. am 29. April im ersten Beharrungszustand nach dem Einschalten etwa 3 bis 4 cm. Im Laufe der nächsten vier Monate trocknete der Sand bis 15 cm im August aus, wodurch eine Temperaturspitze von 77° C am Kabel auftrat. Zwischen August und September lag dann die starke Regenperiode, wodurch die Austrock-

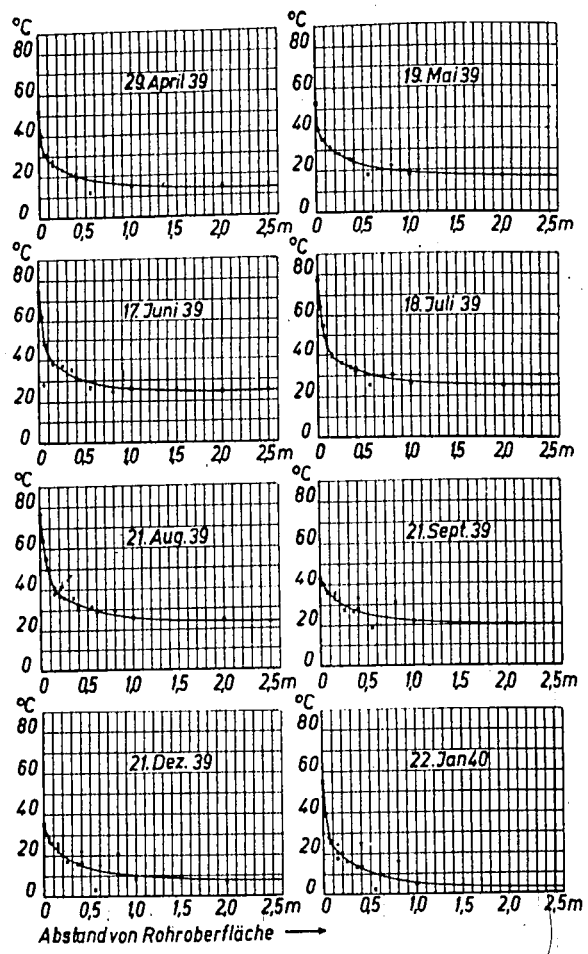


Bild 12. Temperaturfeld um das Kabel
Meßstrecke II: Sand

nungsschicht gänzlich verschwand und sofort die Temperaturspitze auf 42° C absank. Vom Dezember 1939 zum Januar 1940 trocknete der Sand wieder langsam aus.

Das Temperaturfeld an den gleichen Tagen zeigte bei lehmigem Sand (Bild 13) keinerlei Austrocknung. Hier sind als höchste Kabeltemperaturen im August 1939 nur 52° C beobachtet worden, eine Temperatur, die für ein Kabel gerade noch tragbar ist. Als Wirkungskreisradius des warmen Kabels sind bei allen Messungen etwa 2 m beobachtet worden.

D. Ergebnisse für die Praxis

Zum Schluß meiner Ausführungen möchte ich nochmals kurz die wichtigsten Ergebnisse zusammenfassen. Die Schilderung der theoretischen Vorgänge um ein erdverlegtes Hochspannungskabel zeigte die wechselseitigen Einflüsse von Wärmeleitung, Diffusion, Kapillarkräften, Konvektion, Beregnung und Grundwasserbefeuchtung. Die Kenntnis dieser einzelnen Vorgänge ist für den Praktiker grundsätzlich von Wert. Er kann danach bei der Kabelverlegung günstige Umstände beachten und fördern, ungünstige vermeiden. Ein allgemein wirksames Heil-

noch sehr klein, z. B. am 29. April im ersten Behar-
rust und nach dem Einschalten etwa 3 bis 4 cm. Im
der nächsten vier Monate trocknete der Sand bis
im August aus, wodurch eine Temperaturspitze von
am Kabel auftrat. Zwischen August und September
nun die starke Regenperiode, wodurch die Austrock-

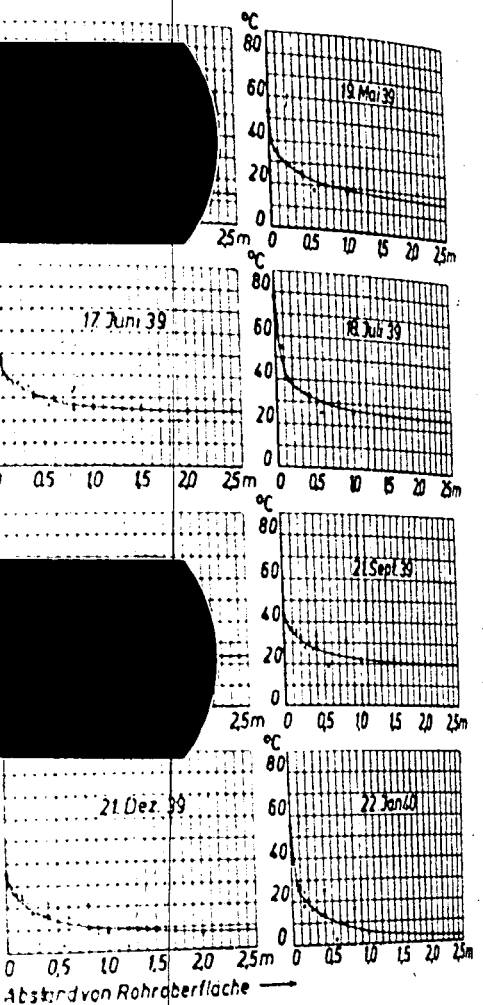


Bild 12. Temperaturfeld um das Kabel
Meßstrecke II: Sand

verschwand und sofort die Tem-
absank. Vom Dezember 1939 zum
der Sand wieder langsam aus.

eld an den gleichen Tagen zeigte bei
d 13) keinerlei Austrocknung. Hier
Kabeltemperaturen im August 1939 nur
worden, eine Temperatur, die für ein
gerade noch tragbar ist. Als Wirkungskreisradius
warmen Kabels sind bei allen Messungen etwa 2 m
beobachtet worden.

Ergebnisse für die Praxis

Zum Schluß meiner Ausführungen möchte ich noch-
mals kurz die wichtigsten Ergebnisse zusammenfassen.
der theoretischen Vorgänge um ein erd-
mungskabel zeigte die wechselseitigen
meleitung, Diffusion, Kapillarkräfte,
ung und Grundwasserbefeuchtung.
einzelnen Vorgänge ist für den Prak-
von Wert. Er kann danach bei der
nstige Umstände beachten und fördern,
vermeiden. Ein allgemein wirksames Heil-

für die vorhandenen Schwierigkeiten ist nicht dar-
abzuleiten. Insbesondere ist es nicht möglich, etwa
Vorausberechnung auf Grund von Wärmeleitzahl-
ungen im Labor durchzuführen, wie es häufig von
erlangt wurde.

Über das Verhalten von Kabeln können nur lang-
e Messungen und Beobachtungen Klarheit ergeben.

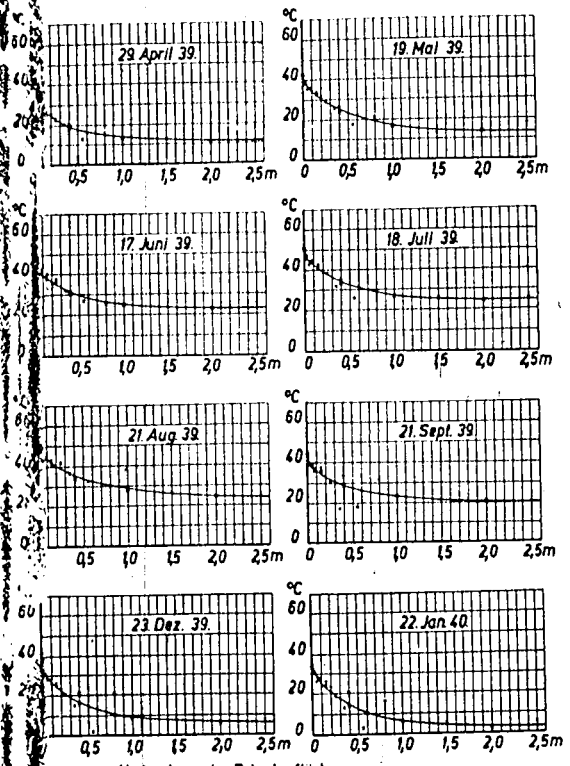


Bild 13. Temperaturfeld um das Kabel
Meßstrecke III: lehmiger Sand

Nach den Erfahrungen in unserem Versuchsfeld ist bei der Kabelverlegung folgendes zu beachten:

1. Maßgebend für die Kabelerwärmung ist die Erdschicht bis zu 15 cm um das Kabel herum, d. i. die Kabelbettungserde.
2. Geeignete Kabelbettungserden sind lehmiger Sand und Ton, d. h. wasserhaltende Erden.
3. Ungeeignete Kabelbettungserden sind Sand und Kies, d. h. wasserdurchlässige Erden.
4. Die Kabelbettungserde ist feucht in den Graben einzuwerfen, am besten mit Wasser einzuschlämmen.

5. Die Kabelgräben sollen der Beregnung zugänglich sein, also nicht unter Straßendecken verlaufen und nicht von Bauhütten und dergleichen überdeckt sein. (Dieser letztere Fall, nämlich die Abschirmung durch eine Bauhütte, war auch als Ursache des Kabeldurchschlags an der Kabelstrecke Op 1 im Winter 1938/39 erkannt worden.)
6. Hochbelastete wichtige Kabel dürften nur in Abständen von mindestens 1 m verlegt werden.

Derartige Forderungen sind allerdings in modernen Industrieanlagen mit ihren gewaltigen Energieflüssen auf engem Raum schwer zu erfüllen. Hier muß sich eben doch allmählich die bittere Erkenntnis durchsetzen, daß die billige und einfache Stromleitung in Erdkabeln in der Anwendung begrenzt ist. Ein vorläufiger Ausweg wäre die Verwendung größerer Kabelquerschnitte oder mehrerer paralleler Kabel. Eine unbedingt wirksame Maßnahme wäre die Verlegung der Kabel im Freien auf Rohrbrücken oder in künstlich belüfteten Kabelkanälen. Beide Anordnungen würden eine ausreichende Wärmeableitung gewährleisten; sie haben den Nachteil, daß sie sehr teure Lösungen sind, zu denen man sich natürlich nicht gerne entschließt.

Kürzlich ist auch ein Bericht der Herren Stahl u. Seibert der Gelsenberg-Benzin A. G. über das gleiche Thema erschienen. Da dieser Bericht in vielen Punkten eine Ergänzung meiner Ausführungen ist, möchte ich abschließend darauf hinweisen, zumal beide Berichte meines Wissens die einzigen eingehenderen experimentellen Arbeiten der letzten Jahre sind.

Aussprache:

Kießkalt beantragt, daß diese Arbeit wegen ihrer aktuellen Bedeutung durch die Teko der gesamten I.G. bekannt gemacht wird.

Stark fragt nach der Übertemperatur der Kabeloberfläche gegen die Bettung.

Kling antwortet, daß diese höchstens 70° C betragen soll, bei uns aber meist überschritten wurde. Bei 100° C Übertemperatur brannten die Kabel durch. Sie werden daher jetzt statt mit 350 A nur noch mit 250 A belastet.

Haltmeier fragt nach dem Temperaturunterschied zwischen Draht und Hülle.

Kling: Dieser beträgt 10° C, 30° C und mehr. Der Übelstand ist, daß bei der Schlackenauffüllung im Oppauer Werk kein Grundwasser vorhanden ist und daher die Bettungen wenig Wärme ableiten.

Gipsflugaschesteine als wärmeisolierendes, wandbildendes Baumaterial

Von Dr. phil. nat. FRITZ GRAF

Inhalt:

Der bis zu 30% in Flugasche enthaltene Kohlenstoff ist nur sehr schwer verbrennbar. Es werden deshalb andere Wege für die Verwendung von Flugasche gesucht. Es wird gezeigt, daß mit gutem Erfolg Leichtsteine aus der Flugasche herstellbar sind, wenn diese zusammen mit Gips als Bindemittel verarbeitet wird. Gips beansprucht mit Rücksicht auf die großen anfallenden Mengen, seine leichte, Energie sparende Erzeugung und seine günstigen Eigenschaften besonderes Interesse. Seine Verarbeitung zusammen mit Flugasche zu großformatigen Bausteinen ist sehr einfach und erfordert nur geringen Aufwand an Holz für die Herstellung der Gießformen. Das aus den großformatigen Steinen hergestellte Mauerwerk ist billiger als eine doppelwandige mit Schlackenwolle ausgefüllte Barackenwand. Die Wärmeisolation einer Wand aus Flugaschesteinen ist sehr gut. 25 cm starkes Gipsflugaschesteinmauerwerk entspricht beispielsweise einer 98 cm starken Ziegelsteinmauer.

Wie Ihnen bekannt ist, sind mit Flugasche bereits sehr viele Versuche angestellt worden, um irgendeine Verwertung für dieses Material zu finden. Wenn auch der verhältnismäßig große Gehalt an verbrennbaren Substanzen bis zu 30% zunächst dazu anregt, das Material in irgendeiner Weise noch zur Wärmegewinnung auszunutzen, so ist doch zu bedenken, daß bei der außerordentlich feinen Verteilung des Kohlenstoffs ein Verbrennen nur sehr schwer möglich ist. Man ist deshalb gezwungen, eine andere Verwendung für die Flugasche zu suchen.

Als Asche enthält das Produkt naturgemäß zum allergrößten Teil die in Aschen überhaupt vorkommenden Bestandteile. Es ist Eisen enthalten, ferner Aluminium; außerdem sind eine ganze Reihe von Spurenelementen anwesend, die evtl. eine Verwertung aussichtsreich erscheinen lassen. Als derartige Spuren wurden vom Analytischen Laboratorium in Oppau Mangan, Chrom und Kupfer in Mengen von etwa 0,01%, Nickel, Blei und Titan in geringerer Konzentration, Vanadin, Kobalt, Cadmium, Antimon in Mengen unter 0,001% festgestellt. Außerdem enthält die Flugasche Zink und Barium. Die Anwesenheit dieser Spurenelemente läßt an eine Verwendung für Düngezwecke denken, zumal das Produkt, wie durch Versuche festgestellt worden ist, als Auflockerung für fette Böden ähnlich der Wirkung des Torfes in Frage kommen könnte. Es sind ferner Versuche gemacht worden, Flugasche als Zusatz zu Düngemitteln zu verwenden, um das Backen zu verhindern, jedoch sind alle diese Verwendungsmöglichkeiten bisher nicht so erfolgversprechend gewesen, daß auf diese Weise an eine Verwertung der riesigen Mengen Flugasche zu denken ist. Die Versuche, die in größeren Mengen darin enthaltenen Metalle, wie Eisen oder Aluminium, zu gewinnen, sind bei uns bisher ebenfalls gescheitert, sowohl wenn man das Eisen durch chlorierende Röstung als auch auf mechanischem Wege entfernen will. Wie der Vorredner schon betont hat, sind zwar Ansätze für eine Verwendung als Isolationsmaterial vorhanden, jedoch sind die Ergebnisse auch nicht so ermutigend, daß mit dem Verbrauch eines wesentlichen Teiles der anfallenden Mengen zu rechnen ist. In Hüls sind Versuche gemacht worden, das Aluminium aus der Flugasche als Sulfat zu gewinnen und den Rückstand zusammen mit Gips dem Gips-Schwefelsäure-Prozeß zu unterwerfen, wobei einerseits Zement und andererseits Schwefelsäure gewonnen würden. Hierüber liegen Berichte von Hüls vor, aus denen hervorgeht, daß man nach diesem Verfahren in Hüls etwa 100 000 Tonnen 15%ige Aluminiumsulfat-Lösung gewinnen könnte. Diese Verwertungsmöglichkeit für Flugasche würde auf jeden Fall sehr große Mengen des bisher lästigen Abfallmaterials, das mit zusätzlichen Kosten beseitigt werden muß, verbrauchen. Es dürfte jedoch, wie wir aus früheren Versuchen mit anderen Schlacken wissen, nicht leicht sein, das Aluminium so weitgehend von Eisen zu befreien, wie es für die meisten Verwendungszwecke des Aluminiumsulfats nötig ist.

Wir haben nun eine Verwendungsmöglichkeit für Flugasche ausgearbeitet, bei der es bis zu einem gewissen Grade darauf ankommt, wärmetechnisch hochwertige Materialien zu erzielen. Insofern sind die Mitteilungen, die ich Ihnen im folgenden machen will, zweifellos für eine Wärmetagung interessant.

Wenn ein so ausgesprochenes Massenprodukt wie Flugasche, das infolge der Entwicklung der Großkessel in immer größeren Mengen anfällt, einer Verwertung zugeführt werden soll, so muß diese in einem Gebiet erfolgen, das große Mengen daraus herzustellender Materialien aufnehmen kann. Ein solches Gebiet ist in ausgesprochenem Maße die Baustoffindustrie. Diese hat schon in den letzten Jahren, wie Ihnen bekannt ist, unter großem Materialmangel gelitten, der sich nach Beendigung des Krieges erst recht außerordentlich steigern wird. Die Verwendung von Flugasche in der Baustoffindustrie hätte somit gute Aussichten für die Unterbringungsmöglichkeit sehr großer Mengen.

Hierfür ist jedoch Voraussetzung, daß die Herstellung von Baumaterialien mit Hilfe von Flugasche technisch überhaupt möglich ist. Man braucht nicht von vornherein daran zu denken, riesige Hochbauten mit Hilfe von aus Flugasche hergestellten Baumaterialien zu errichten. Bei der Anwendung von Flugasche in der Bauindustrie wurde auch von uns zunächst nur an den Einsatz für Barackenbauten gedacht, wofür augenblicklich riesige Mengen Holz, das zur Zeit das allerknappste Baumaterial ist, verwendet werden. Auch für derartige Bauten würde schon ein großer Teil der Flugasche untergebracht werden können.

Wenn die Flugasche in die Baustoffindustrie gehen soll, muß zunächst geklärt werden, ob die für die Weiterverarbeitung nötigen Hilfsstoffe ebenfalls in großen Mengen vorhanden sind. Das ist für eine ganze Reihe von Stoffen in der Bauindustrie der Fall. Es ist hier zu denken an Zement, Gips und ähnliche Bindemittel, die in Deutschland rohstoffmäßig praktisch in beliebiger Menge zur Verfügung stehen. Es ist zunächst am naheliegendsten, Flugasche zusammen mit Zement als Bindemittel auf Bausteine zu verarbeiten, weil Zement das gegebene Bindemittel für die Bauindustrie überhaupt ist. Unsere diesbezüglichen Versuche schlugen jedoch fehl, was seinen Grund in dem

...olierendes, ...wandbildendes Baumaterial

... mit FRITZ GRAF

...mutigend, daß mit dem Verbrauch eines wesentlichen Tei-...les der anfallenden Mengen zu rechnen ist. In Hüls sind ...Versuche gemacht worden, das Aluminium aus der Flug-...asche als Sulfat zu gewinnen und den Rückstand zusam-...men mit Gips dem Gips-Schwefelsäure-Prozeß zu unter-...ziehen, bei einerseits Zement und andererseits Schwe-...felsäure gewonnen würden. Hierüber liegen Berichte von ...Hüls vor, aus denen hervorgeht, daß man nach diesem ...Verfahren in Hüls etwa 100 000 Tonnen 15%ige Alumi-...niumsulfatlösung gewinnen könnte. Diese Verwertungs-...möglichkeit für Flugasche würde auf jeden Fall sehr große ...Mengen des bisher lästigen Abfallmaterials, das mit zu-...sätzlichen Kosten beseitigt werden muß, verbrauchen. Es ...dürfte jedoch, wie wir aus früheren Versuchen mit anderen ...Schlacken wissen, nicht leicht sein, das Aluminium so ...weitgehend von Eisen zu befreien, wie es für die meisten ...Verwendungszwecke des Aluminiumsulfats nötig ist.

Wir haben nun eine Verwendungsmöglichkeit für Flugasche ausgearbeitet, bei der es bis zu einem gewissen Grade darauf ankommt, wärmetechnisch hochwertige Materialien zu erzielen. Insofern sind die Mitteilungen, ...die wir im folgenden machen will, zweifellos für eine ...weitere Kreise interessant.

...Ein so ausgesprochenes Massenprodukt wie ...Flugasche, das infolge der Entwicklung der Großkessel in ...immer größeren Mengen anfällt, einer Verwertung zuge-...führt werden soll, muß diese in einem Gebiet erfolgen, ...in dem die Mengen daraus herzustellender Materialien auf-...nehmen kann. Ein solches Gebiet ist in ausgesprochenem ...Maße die Baustoffindustrie. Diese hat schon in den letzten ...Jahren, wie Ihnen bekannt ist, unter großem Material-...mangel gelitten, der sich nach Beendigung des Krieges ...erst recht außerordentlich steigern wird. Die Verwendung ...von Flugasche in der Baustoffindustrie hätte somit gute ...Aussichten für die Unterbringungsmöglichkeit sehr großer ...Mengen.

Hierfür ist jedoch Voraussetzung, daß die Herstellung ...von Baumaterialien mit Hilfe von Flugasche technisch ...möglich ist. Man braucht nicht von vornherein ...zu denken, riesige Hochbauten mit Hilfe von aus ...Flugasche hergestellten Baumaterialien zu errichten. Bei ...der Verwendung von Flugasche in der Bauindustrie wurde ...es sich zunächst nur an den Einsatz für Baracken-...bauten gedacht, wofür augenblicklich riesige Mengen ...Holz, das zur Zeit das allerknappste Baumaterial ist, ver-...wendet werden. Auch für derartige Bauten würde schon ...ein großer Teil der Flugasche untergebracht werden ...können.

Wenn die Flugasche in die Baustoffindustrie gehen ...soll, muß zunächst geklärt werden, ob die für die Weiter-...verarbeitung nötigen Hilfsstoffe ebenfalls in großen Men-...gen vorhanden sind. Das ist für eine ganze Reihe von ...Stoffen in der Bauindustrie der Fall. Es ist hier zu denken ...an Zement, Gips und ähnliche Bindemittel, die in Deutsch-...land ziemlich praktisch in beliebiger Menge zur Ver-...fügung stehen. Es ist zunächst am naheliegendsten, Flug-...asche in Gemischen mit Zement als Bindemittel auf Bausteine ...zu verarbeiten, weil Zement das gegebene Bindemittel für ...die Industrie überhaupt ist. Unsere diesbezüglichen ...Versuche schlugen jedoch fehl, was seinen Grund in dem

großen Gehalt der Flugasche an äußerst fein verteiltem Kohlenstoff hat. Die Abbindung des Zementes, der bekanntlich chemisch ein sehr labiler Stoff ist, wird durch die große Menge des fein verteilten Kohlenstoffs, der in der Flugasche durchschnittlich etwa 25 % betragen dürfte, gestört, so daß zu geringe Festigkeiten in den Endprodukten entstehen. Ob die Verwendung von Zement unter anderen Bedingungen, beispielsweise bei der Erzeugung von Leichtbetonsteinen mit Hilfe von schaum- oder gaserzeugenden Stoffen, möglich ist, haben wir noch nicht untersucht. Es werden in der Literatur Verfahren beschrieben, die eine Verwendung für diesen Zweck vorsehen. Für Steine, bei denen die an sich leichte Flugasche als voluminöses Füllmaterial wirkt und dadurch die gute Wärmeisolation des Steines erzeugt, kommt die Verwendung von Zement nach unseren Versuchen nicht in Frage.

Ein weiteres Produkt der Baustoffindustrie, das in sehr großen Mengen erzeugt wird und wofür riesige Rohstofflager in Deutschland zur Verfügung stehen, liegt im Gips vor. Gips ist in Deutschland in größten Mengen vorhanden. Die Herstellung des in der Bauindustrie gebräuchlichen Halbhydrates, das hydraulische Eigenschaften aufweist, ist sehr einfach und preisgünstig. Die für die Erzeugung dieses Produktes nötigen Wärmemengen sind verhältnismäßig klein, da das Brennen des hier in Rede stehenden Baugipses nur bei Temperaturen bis zu etwa 180° C vorgenommen wird. Wenn auch der Gips schon in bedeutenden Mengen angewendet wird, so ist doch aus den oben geschilderten Gründen eine noch größere Anwendung durchaus erwünscht, zumal man die nicht leichte Verarbeitung von Gips jetzt besser beherrscht als früher. Zweifellos hat Gips Nachteile, jedoch ist zu bedenken, daß es praktisch kein Produkt gibt, dem keine wie auch geartete Nachteile anhaften. Die größten Bedenken bei Verwendung von Gips gehen immer wieder auf seine verhältnismäßig hohe Wasserlöslichkeit zurück. Man geht dabei von der Tatsache aus, daß bei genügend langer Einwirkungsdauer einer genügenden Menge Wasser der Gips vollständig aufgelöst werden kann und die damit gebundenen Materialien in ihren Festigkeitseigenschaften vollkommen zerstört werden und hat die Vorstellung, daß tatsächlich so viel Wasser in unsere Bauten eindränge, daß dieser Zustand auch praktisch erreicht würde. Dies ist jedoch nie der Fall. Es ist zu bemerken, daß Gips bereits in sehr großen Mengen auch für Außenwände in Form von Leichtbauplatten, die Gips als Bindemittel enthalten, seit Jahrzehnten angewendet wird. Diese auch für umfangreiche Hochbauten benutzten Materialien sind heute noch in genau so einwandfreiem Zustand wie beim Einbau. Selbstverständlich müssen die Gips enthaltenden Baustoffe gegen die Einwirkung von Feuchtigkeit geschützt werden. Dies geschieht zweckmäßigerweise durch einen Putz, der die Anforderung, die Feuchtigkeit von den unter ihm liegenden Bauteilen abzuhalten, vollkommen erfüllt. Ein handwerksgerecht aufgebrachter Putz wird somit verhüten, daß die dem Gips anhaftende unangenehme Eigenschaft der zu großen Wasserlöslichkeit seine Anwendung als wandbildendes Material unmöglich macht.

Auf der anderen Seite hat Gips zweifellos sehr große Vorteile, die seine verstärkte Verwendung in der Bauindustrie anregen. Er zeichnet sich vor allem durch sehr schnelles Abbinden aus, was die Aufstellung von nur geringen Mengen Formmaterial nötig macht. Das Arbeiten mit Gips ist im Gegensatz zu Zement außerordentlich sauber. Bei seiner neutralen Reaktion hat er keinerlei aggresive Eigenschaften, was bei dem stark alkalischen Zement nicht der Fall ist. Gips zeichnet sich ferner durch einen sehr niedrigen Preis aus, der naturgemäß sogar noch unter dem des Zementes liegt.

Die genannten Eigenschaften haben uns veranlaßt, Versuche anzustellen, Flugasche mit Hilfe von Gips als Bindemittel zu Bauelementen zu verarbeiten. Wir dachten dabei, wie oben schon zum Ausdruck gebracht, zunächst nur an die Verwendung dieses neuen Baustoffes anstelle von zur Zeit schwer zu beschaffender Rohmaterialien wie beispielsweise Holz für den Barackenbau. An diesen verhältnismäßig kleinen Bauten, in denen die Baumaterialien keinen großen statischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, wollen wir die sich in der Praxis ergebenden Eigenschaften beobachten und daraus weitere Schlüsse ziehen.

Von jedem Baumaterial sind zunächst genügende Festigkeiten zu fordern. Die von uns hergestellten Gipsflugaschesteine zeigten im Durchschnitt eine Druckfestigkeit von etwa 35 kg/cm² bei einem Raumgewicht von nur 0,93. Es ist hier zu bemerken, daß die Druckfestigkeiten unserer üblichen Baumaterialien, die bedeutend höher liegen, auch in den Hochbauten nur zum geringsten Teil ausgenutzt sind. Eine Druckfestigkeit von effektiv kg in den am höchsten beanspruchten Bauteilen ist bereits ein sehr hoher Wert. Es kommen selbstverständlich die von den Zulassungsbehörden geforderten Sicherheitszuschläge hinzu, so daß eine gemessene Druckfestigkeit von etwa 20 kg zulassungsmäßig vorhanden sein muß. Bezüglich der Druckfestigkeit sind die Gipsflugasche... somit durchaus genügend. Beim Raumgewicht von 0,93 gilt der Gipsflugaschestein als ausgesprochenes Leichtbaumaterial. Als Vergleich sei angeführt, daß Ziegelsteine beispielsweise ein Raumgewicht von mindestens 1,6 aufweist, bei Beton rechnet man mit einem Raumgewicht von etwa 2,0, Naturstein liegt noch höher. — Für ein wandbildendes Baumaterial muß ferner eine genügende Wärmedämmfähigkeit gefordert werden. Diese ist im fertigen Bau bedingt durch die Wandstärke, die ihrerseits naturgemäß wiederum die Kalkulation beeinflußt. Die Wärmeleitfähigkeit von Gipsflugaschesteinen wurden im Techn. Prüfstand Oppau im Mittel zu $\lambda = 0{,}191$ bei 20° C bestimmt. Setzt man hierzu im Vergleich die Wärmeleitfähigkeit von Barackenwänden, wie sie in unseren verschiedenen Gemeinschaftslagern beispielsweise vorliegen und welche die Anregung zu den in Rede stehenden Arbeiten gaben, und die aus zwei in 4 cm Abstand voneinander angebrachten, je 20 mm starken Holzverschalungen bestehen, deren Zwischenraum mit Glaswolle ausgefüllt ist, so errechnet sich bei der genannten Wärmeleitzahl von $\lambda = 0{,}$... für die wärmetechnisch gleichwertige Wand aus Gipsflugaschesteinen eine Stärke von rund 20 cm. Hierbei ist die Wärmeleitzahl des Holzes auf der dem Regen ausgesetzten Außenfläche in der üblichen Weise zu 0,18, für die von Feuchtigkeit geschützte Innenfläche zu 0,12 und die Wärmeleitzahl von Glaswolle zu 0,05 angenommen worden. Das rund 20 cm starke Mauerwerk aus Gipsflugaschesteinen würde somit die Barackenwand wärmetechnisch ersetzen können. Dabei ist zu berücksichtigen, daß noch ein Innen- und Außenputz hinzukommt, der ebenfalls noch eine zusätzliche Wärmeisolation ergibt.

Es entsteht nun die Frage nach dem Preis einer derartigen 20 cm starken Wand. Eine Kostenaufstellung bei Selbstherstellung der Gipsflugaschesteine, also mit den

verhältnismäßig hohen I. G.-Zuschlägen, ergibt, daß der Quadratmeter 20 cm starkes Mauerwerk mit einem beiderseitigen Verputz auf etwa 9,43 RM. zu stehen kommt, wenn die Flugasche mit einem Preis von 1.— RM./m³ eingesetzt wird. Das ist ungefähr der Preis, der für den Abtransport jetzt auch gezahlt werden muß. Hierbei sind schon verhältnismäßig hohe Zuschläge gemacht worden, da die Herstellung in eigenen Betrieb, die Vermauerung jedoch als durch fremde Firmen ausgeführt angenommen wurde. An Hilfsstoffen ist nur ein Abbindeverzögerer für Gips nötig, der in geringer Menge von etwa 0,05%, bezogen auf den Gips, zugesetzt werden muß, um die unangenehme Eigenschaft des Gipses, schon nach sehr kurzer Zeit hart zu werden, zu kompensieren. Als derartiges Produkt wurde das von uns als Abbindeverzögerer für Gips in den Handel gebrachte Retardan benutzt.

Die Herstellungseinrichtung für die Gipsflugaschesteine ist denkbar einfach. Sie besteht aus einem Intensiv-Mischer, der nach je etwa 5 bis 6 Minuten Mischdauer etwa 300 Liter fertig gemischtes Material auswirft. Die Verformung geschieht in Gießfeldern, die aus Holz aufgebaut und in einfachster Weise zusammengekeilt sind. Es sind nicht viele derartige Felder nötig, da sich die zuzusetzende Menge Retardan so einstellen läßt, daß die fertigen Steine schon nach kurzer Zeit ausgeschalt und die Gießfelder sofort wieder zusammengesetzt werden können. Mit den in Oppau zur Zeit anfallenden Flugaschemengen können etwa 40 bis 50 m³ Gipsflugaschesteine hergestellt werden. Das ist etwa die Menge, die in dem zur Verfügung stehenden Mischer in acht Stunden aufgearbeitet werden kann. Nun ist zu bedenken, daß aus 50 m³ Steinmaterial 200 m² Wandfläche hergestellt werden. Wir rechnen nicht mit 250 m², wie das eigentlich bei 20 cm Wandstärke herauskäme, weil 20 cm starkes Mauerwerk neuerdings nicht mehr zugelassen ist. Durch diese Maßnahme ergibt sich zunächst eine Verteuerung des Mauerwerks. Dieses stellt sich bei einer Ausführung und Vermauerung der fertigen Steine durch fremde Firmen auf etwa 11,53 RM. einschließlich des üblichen Innen- und Außenputzes. Der m² der früher genannten Barackenwand mit Glaswolleisolierung ergibt sich aber zu etwa 14.— RM. Bei Verwendung der Gipsflugaschesteine zeigt sich also noch eine bedeutende Einsparung. Was für Sie als Wärmefachleute besonders interessant sein dürfte, ist die Gegenüberstellung der Wärmedämmfähigkeit der neuen Gipsflugaschesteine und der bisher üblichen Baumaterialien. Aus der obengenannten A-Zahl von 0,191 errechnet sich für die 25 cm starke unverputzte Wand eine Wärmedurchlaßzahl $\Lambda = 0{,}667$. Auf dieser Basis erhält man folgende Reihe:

25 cm Gipsflugaschestein vom R. G. 0,93 ist wärmetechnisch gleichwertig (in runden Zahlen):

10 cm Barackenwand (wie oben beschrieben)
= 20 cm Holzwand
= 60 cm Schwemmsteinwand:

98 cm Ziegelmauer = 144 cm Stampfbeton
= 197 cm Sandstein.

Man erreicht somit mit dem neuartigen Leichtstein gleichzeitig mehrere Ziele. Es wird einmal ein lästiges, Kosten verursachendes Abfallmaterial einer Verwertung zugeführt. Auf der anderen Seite wird schwer zu beschaffendes Baumaterial, wie Holz, eingespart. Das neue Baumaterial ist auf Grund seiner einfachen Herstellungsweise leicht verfügbar. Schließlich wird bei Verwendung der Gipsflugaschesteine gegenüber dem Holzbarackenbau noch Geld eingespart.

Aussprache:

Futterer fragt nach der Verwendung des Gipsflugaschensteines für Siedlungsbauten und weist auf die Notwendigkeit der Vermeidung von Schwitzwasser hin.

Graf legt dar, daß man, nachdem sich z. B. Hohlbetonsteine nicht durchweg bewährt hätten, wohl an verschiedene Verwendungen denke, aber erst im Barackenbau Erfahrungen sammeln wolle. Feuchtigkeit vergrößere die Wärmeleitfähigkeit.

Futterer: Größere Wärmeleitfähigkeit besitzen auch die Fugen.

Enderlein fragt nach der Dauerfestigkeit gegen Straßenschwankungen. Bei Kalksandstein waren anfänglich Befürchtungen in dieser Richtung vorhanden. Ist eine Zermürbung denkbar? Es kommt also hier nicht auf die reine Festigkeit an, sondern auf die Dauerfestigkeit. Es sollten hierüber Versuche gemacht werden.

Graf erwidert, daß solche Versuche von ihm noch nicht durchgeführt wurden, auch nicht bei anderen Gelegenheiten. Gegen Schall entspreche der Stein den Anforderungen, die an ein wandbildendes Material gestellt werden können. Auch gegen Feuer sei der Stein günstig.

Nauck teilt mit, daß in Wolfen Steine mit Braunkohlenflugasche hergestellt werden. Braunkohlenflugasche mit Sand gibt gute Zementeigenschaften.

stärke unverputzte Wand eine Wärmedurchlaßzahl
A 0,667. Auf dieser Basis erhält man folgende Reihe:
25 cm Gipsflugaschestein vom R.G. 0,93 ist wärmetechnisch gleichwertig (in runden Zahlen):

10 cm Barackenwand (wie oben beschrieben)
20 cm Holzwand
60 cm Schwemmsteinwand:
98 cm Ziegelmauer = 144 cm Stampfbeton
197 cm Sandstein.

...cht somit mit dem neuartigen Leichtstein
...ere Ziele. Es wird einmal ein lästiges,
...endes Abfallmaterial einer Verwertung
...der anderen Seite wird schwer zu be-
...material, wie Holz, eingespart. Das neue
...auf Grund seiner einfachen Herstellungs-
...erfügbar. Schließlich wird bei Verwendung
der Gipsflugaschesteine gegenüber dem Holzbarackenbau noch Geld eingespart.

Aussprache:

Futterer fragt nach der Verwendung des Gipsflugaschensteines für Siedlungsbauten und weist auf die Notwendigkeit der Vermeidung von Schwitzwasser hin.

Graf legt dar, daß man, nachdem sich z. B. Hohl...steine nicht durchweg bewährt hätten, wohl an verschiedene Verwendungen denke, aber erst im Barackenbau Erfahrungen sammeln wolle. Feuchtigkeit vergrößere die Wärmeleitfähigkeit.

... Größere Wärmeleitfähigkeit besitzen ...n.

Enderlein fragt nach der Dauerfestigkeit gegen Straßenschwankungen. Bei Kalksandstein waren anfänglich Befürchtungen in dieser Richtung vorhanden. Ist eine Zermürbung denkbar? Es kommt also hier nicht auf die reine Festigkeit an, sondern auf die Dauerfestigkeit. Es sollten hierüber Versuche gemacht werden.

Graf erwidert, daß solche Versuche von ihm noch nicht durchgeführt wurden, auch nicht bei anderen Gelegenheiten. Gegen Schall entspreche der Stein den Anforderungen, die an ein wandbildendes Material gestellt ...nen. Auch gegen Feuer sei der Stein günstig.

...teilt mit, daß in Wolfen Steine mit Braun...he hergestellt werden. Braunkohlenflugasche ...t gute Zementeigenschaften.

Explosionsgrenzen und -bereiche brennbarer Flüssigkeiten und deren Einstufungen in Gefahrenklassen

Von Dipl.-Ing. FRITZ NAUCK

Inhalt:

Die Explosionsgrenzen und -bereiche sind die Grundlage für die Erforschung der Brennbarkeit von Gasen und Lösungsmitteldämpfen. Explosionsgrenzen sind keine eindeutigen Werte; sie hängen von den Versuchsbedingungen ab, die zum Teil auch Betriebsbedingungen angepaßt werden müssen. In gewissen Grenzen können die Prüfbedingungen genormt werden. Die amtlichen Einstufungen für brennbare Flüssigkeiten nach den „Polizeilichen Vorschriften" und „VDE.-Norm" sind leider gegensätzlich. Die VDE.-Norm kann für die Wahl einer trockenen Explosionssicherung herangezogen werden.

A. Veranlassung zur Erstellung des Prüfstandes

In unseren lösungsmittelverarbeitenden Betrieben wurden die Fragen der Sicherung für die Lagerung und die Explosionssicherheit der Betriebsverarbeitungsmaschinen bei den sich immer mehr ausdehnenden Betrieben immer dringlicher, so daß die auftretenden Fragen mit betrieblichen Mitteln nicht mehr einwandfrei zu lösen waren. Die in geringem Maße aus der Literatur bekannt gewordenen Angaben über Explosionsgrenzen und -drücke stammten zum Teil aus der amerikanischen Literatur, die zu der Zeit auf diesem Gebiet führend war. Die Angaben waren außerordentlich widerspruchsvoll. Dabei gehörte es zu der Eigenschaft der amerikanischen Literatur jener Zeit, daß zwar zahlreiche Versuchsergebnisse und Erfahrungswerte veröffentlicht wurden, doch fehlten regelmäßig die Angaben über die Versuchsbedingungen und Betriebsbedingungen, unter denen jene Erfahrungen erzielt worden waren.

Um die effektive Sicherheit in den eigenen Betrieben festzustellen, sah ich mich genötigt, die Widersprüche in den einzelnen Angaben zu klären und Lücken in den Angaben zu schließen. In den Anfang unserer Versuchszeit fiel die erste mir bekannte deutsche maßgebliche Arbeit auf diesem Gebiet von Berl und Barth, in welcher extrem hohe Werte für die Explosionsgrenzen das Chaos vervollständigten. Ferner bestand auf dem Gebiet der Explosionssicherungen vollkommene Unklarheit. In unseren Lösungsmittellagern waren eine größere Anzahl Sicherungen eingebaut, welche mit den damals neuen Ausführungsbestimmungen zu den polizeilichen Vorschriften im Widerspruch standen, obgleich sie von namhaften Firmen geliefert worden waren.

Unsere erste Arbeit bestand darin, eine Sicherung nach diesen Angaben zu bauen und sie für Äther- und Schwefelkohlenstoff-Dämpfe zu prüfen. Wir stellten fest, daß diese Sicherungen (Kiestöpfe) in beiden Fällen restlos versagten. Es mußten demzufolge für diese Stoffe neue Sicherungen entwickelt werden. Als wir unsere ersten Erfahrungen in einer Veröffentlichung zum besten gaben, stellte es sich heraus, daß die Reichsanstalt alle Sicherungen mit Benzol prüfte und die Forderung gestellt hatte, daß dieser Umstand mit dem Vermerk „Von der Reichsanstalt geprüft" in Verbindung stehen mußte. Später konnten wir mit der Forderung durchdringen, daß die Sicherungen nur für die Stoffe freizugeben sind, für die sie geprüft wurden, oder für weniger gefahrvolle.

Im Zusammenhang mit diesen Sicherungen mußte eine neue Form der Einstufung gefunden werden, um nicht gezwungen zu sein, jede Sicherung mit jedem Gebrauchsstoff getrennt zu prüfen. Eine derartige Einstufung wurde gleichzeitig vom VDE. vorgenommen. Diese soll ein Kriterium für die verschiedenen Bauarten der elektrischen Apparate sein, welche in explosionsgefährdeten Räumen zur Aufstellung kommen sollen.

Bei der Festlegung dieser Einstufung hat sich wiederum ein gewisses Durcheinander nicht vermeiden lassen. Die seit langen Jahren bestehenden Polizeiverordnungen setzen für brennbare Flüssigkeiten die Gefahrenklasse A I als die Stufe der höchsten Gefahr. Nach der VDE.-Norm ist die Klasse A I die Stufe der geringsten Gefahr. Was dieser Widerspruch an Gefahren mit sich bringen kann, muß jedem Fachmann klar sein, da es kaum anzunehmen ist, daß man beide Einstufungen vornehmen wird.

Wir haben bereits den Versuch gemacht, hier einzugreifen.

Ich habe Ihnen einen kurzen Überblick über die Veranlassungen zu unseren Arbeiten gegeben. Sie wissen selbst, meine Herren, wie es mit solchen Untersuchungen geht. Viele Ergebnisse, die uns als Ziel vorschwebten, waren nur noch Richtlinien für die weitere Arbeit, wenn wir sie erzielten.

B. Explosionsgrenzen und -bereiche

Für alle obenangegebenen Versuchsarbeiten sind die ausführlich vorgenommenen Explosionsversuche die Grundlage; daher haben wir uns mit diesen in erster Linie auseinanderzusetzen.

I. Die ersten Explosionsversuche

Die ersten Explosionsversuche wurden in einem Glaskolben von 1 Liter Inhalt durchgeführt. Der Einsatz an Lösungsmitteln wurde in Glasröhrchen eingeschmolzen, die später innerhalb des Kolbens zerschlagen wurden. Die Zündung besorgte eine Influenzmaschine. Zu Beginn wurden reproduzierbare Werte nicht erreicht, bis eine ganze Anzahl von Nachteilen beseitigt wurden, wie Einfluß von Gummiteilen, mangelhafte Durchmischung des Dampf-Luft-Gemisches, Abblasen durch den Pfropfen des Kolbens bei höheren Einsätzen.

Der im Bild 1 gezeigte Kolben war bereits etwas zweckentsprechender. Das Durchmischen des Einsatzes erfolgte durch leichte, dünne Aluminiumplatten, die sich beim Schütteln des Kolbens in diesem bewegten. Obgleich ein Manometer den Explosionsdruck anzeigen könnte, gelang dies nur in manchen Fällen, denn bei intensiven Explosionen blies der Stopfen ab, oder aber das Glas zersprang in tausend Stücke, was trotz des umgebenden Siebes für die Beteiligten eine gewisse Gefahr bedeutete.

So entstand die erste Stahlbombe (5 Liter Inhalt) mit einem normalen Federindikator. Die Zündung erfolgte durch die etwas zuverlässigere Tesla-Apparatur.

Insbesondere durch diese Änderung, nach der es nicht mehr möglich war, die entstehende Explosion in allen Stadien zu verfolgen — auch die angebrachten Schaugläser genügten für die Sicht nicht vollkommen — mußte die Frage geklärt werden, wann eine Explosion stattgefunden hat. Im Dunkel der Stahlbombe war bei jeder Zündung, auch wenn sie in reiner Luft erfolgte, ein schöner Flammenbogen zu sehen. Vor allen Dingen mußte untersucht werden, ob die Explosionsgrenzen einwandfrei durch Druckmessung ermittelt werden können. Nach verschiedenen Versuchen ergab sich, daß bei Einbringung der Funkenstrecke im unteren Drittel der Bombe die untere wie auch die obere Explosionsgrenze einwandfrei durch Druckmessung festzustellen war.

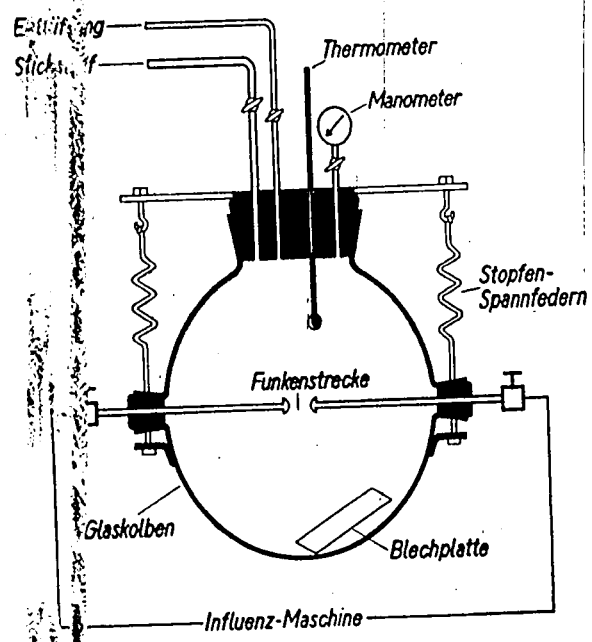


Bild 1. Kolben für Explosionsversuche

Bild 2 zeigt die Explosionsdruckkurve von Äther. Dort, wo die Kurve die untere Koordinatenachse schneidet, sind die Explosionsgrenzen. Die punktierte Linie zeigt die Entwicklung der Druckkurve, als die Zündung, wie im vorigen Bild gezeigt, sich noch in der Mitte der Explosionsbombe befand. Man sah ohne weiteres, daß die punktierte Linie im oberen Teil mit der Horizontalen zusammenläuft. Eine Feststellung der oberen Grenze war daher mit Schwierigkeit verbunden. Nach dem Versetzen des Zündpunktes in den unteren Teil wurde der Unterschied in den entstehenden Drücken außer- und innerhalb des Explosionsbereiches außerordentlich kraß (ausgezogene Linie). Im Lichtbogen zwischen den Elektroden verbrennen stets Teilchen der brennbaren Dämpfe, auch wenn die untere Explosionsgrenze noch nicht erreicht oder die obere überschritten ist. Versuche haben gezeigt, daß bei der unteren Grenze diese Drücke 15 bis 20 mm Quecksilbersäule betragen bei einer Konzentration von 1 bis 2 g unter der unteren Grenze. Beim Überschreiten der Grenze treten sofort 1 bis 2 Atm. auf. Etwas weniger kraß, aber absolut eindeutig, ist die Bestimmung der oberen Grenze. 5 bis 10 g oberhalb der oberen Grenze treten Drücke von höchstens 30 bis 40 mm Quecksilbersäule auf. Nach dem Unterschreiten der oberen Grenze verzehnfacht sich der Druck sofort. Es ist hieraus ohne weiteres ersichtlich, daß die Grenzen durch eine Druckmessung bestimmt werden können.

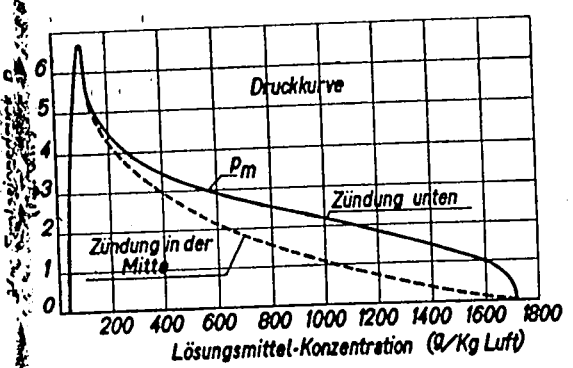


Bild 2. Explosionsdruckkurve von Äther

C. Das Versuchsprogramm für die Ermittlung der Explosionsbereiche

Durch unsere Arbeiten und durch nunmehr häufiger erscheinende Veröffentlichungen wurde uns klar, daß die Explosionsgrenzen nicht etwas Feststehendes darstellen, sondern daß sie von einer Anzahl von Einflüssen und Versuchsbedingungen abhängen und wesentlichen Änderungen unterworfen sein können. Es zeigte sich bei diesen Versuchen, daß die Explosionsgrenzen bei den Dämpfen mancher brennbaren Flüssigkeiten sehr erheblich (Äther), andere nur ganz unerheblich beeinflußbar sind (Aceton).

Auf Grund unserer Untersuchungen wurden folgende wichtige Einflußgrößen gefunden:

1. Gaszusammensetzung, Stoffreinheit der Ursprungsflüssigkeit und Gastemperatur vor der Zündung.
2. Form und Größe der Explosionsgefäße.
3. Art, Energie, Lage und Dauer der Zündung.
4. Bewegung im Gasgemisch.
5. Schutzgase und Wasserdämpfe.

Reproduzierbare Werte wurden von uns nur gefunden, wenn die obenangegebenen Punkte in gewissen Grenzen eindeutig eingehalten wurden. Es gehörte zu unserem Arbeitsprogramm, daß wir uns in bezug auf die Bezeichnung der Konzentration in bestimmter Weise festlegten. Da bei uns Gasuntersuchungen nur ausnahmsweise durchgeführt wurden und wir den Einsatz in die Bombe durch Wägung festlegten, war es naheliegend, die Bezeichnung

g Lösungsmittel/kg Luft

festzulegen. Die Bezeichnung

g/m^3

haben wir der Temperaturabhängigkeit wegen abgelehnt. In der von uns gewählten Bezeichnung haben sich besonders bei der Feststellung der unteren Grenze manche Vereinfachungen ergeben.

Wir führen als Beispiel an:

unt. Grenze Schwefelkohlenstoff 30 g/kg Luft = 0,8 Vol%,
„ „ Äthylalkohol 40 g/kg Luft = 3,3 Vol%.

Wir haben die Beobachtung gemacht, daß bei allen gut brennbaren Flüssigkeiten die untere Explosionsgrenze sich auf die Werte

30 — 50 g/kg Luft

beschränkt. Dem steht gegenüber, daß unter gleichen Bedingungen die Werte in Vol% ausgedrückt eine sehr

…ied in den entstehenden Drücken außer- und inner-
…b des Explosionsbereiches außerordentlich kraß (aus-
…ogene Linie). Im Lichtbogen zwischen den Elek-
…den verbrennen stets Teilchen der brennbaren Dämpfe,
…h wenn die untere Explosionsgrenze noch nicht er-
…cht oder die obere überschritten ist. Versuche haben
…eigt, daß bei der unteren Grenze diese Drücke 15 bis
… mm Quecksilbersäule betragen bei einer Konzentration
…n 1 bis [illegible] unter der unteren Grenze. Beim Überschreiten
…[illegible]fort 1 bis 2 Atm. auf. Etwas weniger
…[illegible]indeutig, ist die Bestimmung der
…10 g oberhalb der oberen Grenze
…hstens 30 bis 40 mm Quecksilber-
…Unterschreiten der oberen Grenze
…Druck sofort. Es ist hieraus ohne
…daß die Grenzen durch eine Druck-
…essung bestimmt werden können.

Das Versuchsprogramm für die Ermittlung der Explosionsbereiche

Durch unsere Arbeiten und durch nunmehr häufiger …erscheinende Veröffentlichungen wurde uns klar, daß die …Explosionsgrenzen nicht etwas Feststehendes darstellen, …sondern daß sie von einer Anzahl von Einflüssen und Ver-…suchsbedingungen abhängen und wesentlichen Änderun-…[illegible]sein können. Es zeigte sich bei diesen …Explosionsgrenzen bei den Dämpfen …Flüssigkeiten sehr erheblich (Äther), …erheblich beeinflußbar sind (Acetat …rer Untersuchungen wurden folgende …ößen gefunden:

1. Gaszusammensetzung, Stoffreinheit der Ursprungsflüssigkeit und Gastemperatur vor der Zündung.
2. Form und Größe der Explosionsgefäße.
3. Art, Energie, Lage und Dauer der Zündung.
4. Bewegung im Gasgemisch.
5. Schutzgase und Wasserdämpfe.

Reproduzierbare Werte wurden von uns nur gefunden, …wenn die obenangegebenen Punkte in gewissen Grenzen …eindeutig eingehalten wurden. Es gehörte zu unseren Ar-…[illegible] daß wir uns in bezug auf die Bezeichnung …[illegible]n in bestimmter Weise festlegten. Da …[illegible]ungen nur ausnahmsweise durchgeführt …[illegible]en Einsatz in die Bombe durch Wägung …naheliegend, die Bezeichnung

…[illegible]g Lösungsmittel/kg Luft

…[illegible]e Bezeichnung

g/m³

Haben wir der Temperaturabhängigkeit wegen absicht… In der von uns gewählten Bezeichnung haben sich bei …ers bei der Feststellung der unteren Grenze manche V… einfachungen ergeben.

Wir führen als Beispiel an:

…unt Grenze Schwefelkohlenstoff 30 g/kg Luft = …
Äthylalkohol 40 g/kg Luft = …

…n die Beobachtung gemacht, daß bei …Flüssigkeiten die untere Explosions…

…erte

30 — 50 g/kg Luft

…um steht gegenüber, daß unter …
…e Werte in Vol% ausgedrückt …

große Spanne ausmachen: 0,7 bis 6,5 Vol%. Daß das Auffinden der Grenzen durch diese Festlegung vereinfacht wird, ist offensichtlich.

D. Die Ermittlung der Explosionsbereiche

Bei der Feststellung der Explosionsgrenzen ist der wesentlichste Punkt die Gaszusammensetzung. Die übrigen in dem Programm angegebenen Punkte sind zwar zum Teil von großem Einfluß, können jedoch als von uns beeinflußbare Apparatewerte bezeichnet werden.

I. Gaszusammensetzung, Gastemperatur usw.

Bei unseren Explosionsversuchen arbeiten wir ausschließlich mit überhitzten Dämpfen, die mit Luft oder Luft und anderen Gasen gemischt werden. Der Einfachheit halber können wir daher diese Mischungen der Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten mit Luft als Gas bezeichnen. Für nachstehende Ergebnisse der Explosionswerte ist in den meisten Fällen die Lösung der übrigen Fragen aus dem Versuchsprogramm die Voraussetzung. Es wird daher nicht möglich sein, die einzelnen Programmpunkte voneinander zu trennen.

Zu unserer Arbeitsweise ist folgendes zu sagen: für die Beurteilung des einzelnen Explosionsvorganges war das Indikatordiagramm ausschlaggebend. Dieses zeigt einen langsamen Druckanstieg im Augenblick der Zündung, welcher dann anschließend in einem mehr oder weniger steilen Winkel zunimmt. Abgesehen von einigen Apparatewerten hängt der Winkel davon ab, wie schnell das gesamte Gasvolumen in der Bombe erfaßt wird, und von der Wärmeentwicklung bei der Verbrennung.

Wir bezeichnen den Druckanstiegwinkel im steilsten Teil des Indikatordiagramms als die Brisanz der Explosion, ausgedrückt in Δp at/0,01 sek. Den höchsten Druck nennen wir Enddruck, aus dem Indikatordiagramm für die einzelne Explosion tragen wir als Punkt in einer Kurve auf, welche den Explosionsbereich (den Raum zwischen beiden Explosionsgrenzen) umfaßt, und nennen die so entstehende Kurve die Explosionsdruckkurve (Bild 3); diese charakterisiert die ganzen Vorgänge bei der Verbrennung verschiedener Konzentrationen eines Lösungsmittels.

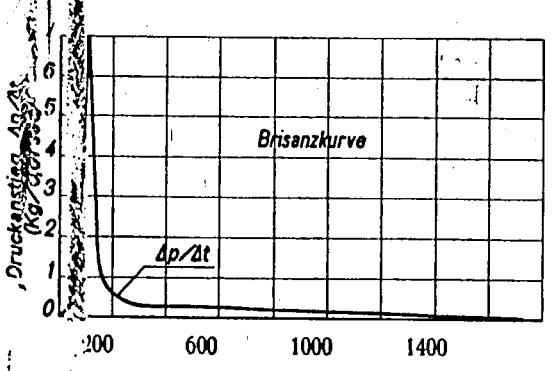


Bild 3. Druckanstiegkurve von Äther

Auf Grund der Versuche ist die Tatsache zu erwähnen, daß die Konzentration mit der höchsten Brisanz auch den Punkt mit dem höchsten Enddruck für die Explosionsdruckkurve liefert. Dieses Gemisch zeigt bei der Explosion die höchste Durchschlagskraft und ist gleichzeitig am leichtesten zur Zündung zu bringen. Aus diesem Grunde ist die Feststellung der Punkte mit der höchsten Brisanz für bestimmte Prüfungen: Kontrolle von Explosionssicherungen, Klassifizierung der Lösungsmittel nach VDE.-Norm von besonderem Interesse.

Für die Kritik des gesamten Explosionsbereiches ist demnach das Indikatordiagramm der Ausgangspunkt. Für laufende Untersuchungen des Explosionsbereiches verwenden wir jetzt einen fast trägheitslosen Stabfederindikator. Dies hat den Vorteil, daß im allgemeinen die Drücke genau aufgezeichnet werden und diese Aufzeichnung sofort sichtbar wird. Für besonders brisante Explosionen, bei denen auch der Stabfederindikator zu viel Masse hat, haben wir einen Piezoindikator zu dem mechanischen Indikator parallel geschaltet. Dies dient dazu, die brisanten Punkte auf ihren Enddruck zu untersuchen. Leider läßt sich der Piezoindikator bei der Zündung mit Hochfrequenzfunken (Tesla-Apparatur) nur bedingt verwenden, weil uns die restlose Abschirmung nicht gelungen ist.

Das Bild (4) der Explosionsbombe zeigt die Anordnung der beiden Indikatoren, welche durch elektrische Schaltung miteinander gekuppelt sind, so daß beide vor Eintreten einer Zündung eingeschaltet sind. Der Vorgang bei der Prüfung einer brennbaren Flüssigkeit in dieser

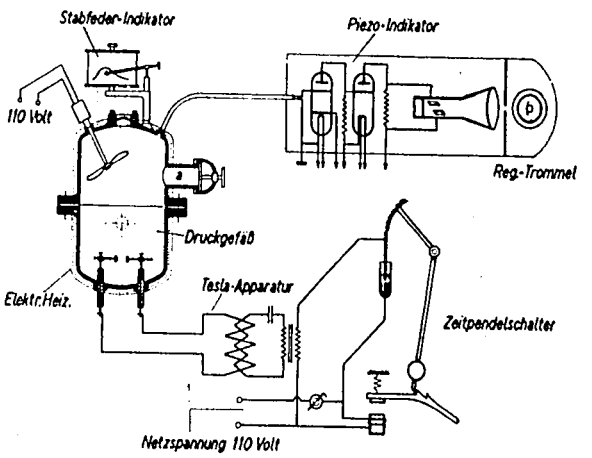


Bild 4. Einrichtung für Explosionsversuche

Bombe ist folgender. Die Prüfflüssigkeit wird in einem Einsatzglas genau gewogen und mit Deckglas geschlossen. Die Bombe wird um ihre Achse um 90° geneigt, so daß der Einsatzstutzen a senkrecht nach unten zeigt. Das Glas mit dem Einsatz wird in den Stutzen eingeschoben, der sich dann schnell und halbautomatisch schließt. Durch eine leichte Feder wird das Glas in seiner Stellung festgehalten. Die Bombe wird nunmehr um einen stumpfen Winkel gedreht, so daß die Flüssigkeit aus dem Einsatzglas in die vorgeheizte Bombe fließt und verdunstet. Ein Ventilator sorgt für die Homogenisierung des Gases, da ohne diese Vorrichtung die gefundenen Werte nicht reproduzierbar sind. Wenn die gesamte Flüssigkeit verdunstet ist und genügend durchgemischt wurde, wird der Überdruck durch ein Ventil mit kleinem Querschnitt abgeblasen, so daß bei allen Versuchen ein einheitlicher Anfangsdruck gegeben ist. Die Temperatur in der Bombe wird schon zu Beginn des Versuches möglichst genau eingestellt.

Die Temperatur des Gases vor der Zündung spielt, wie Bild 5 zeigt, eine wesentliche Rolle. Die untere Explosionsgrenze wird hier, wie auch bei verschiedenen anderen apparativen Änderungen, nur wenig beeinträchtigt.

Wie aus dem Bild ersichtlich, verschiebt sich die obere Grenze von 1005 g/kg Luft bei 50° bis auf 2370 g/kg Luft bei 125°. Daß es sich nicht um Zufallswerte handelt, zeigt die schöne gleichmäßige, fächerartige Ver-

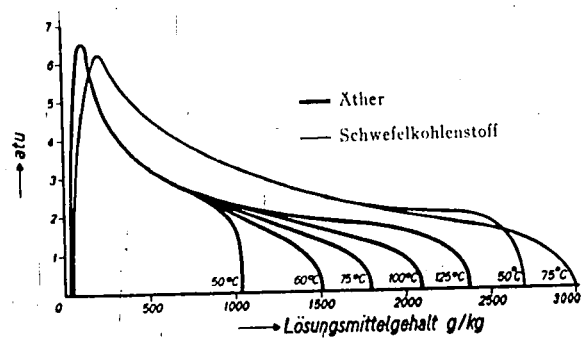


Bild 5. Abhängigkeit der Explosionsgrenzen von der Temperatur

teilung des oberen Grenzgebietes für die einzelnen Temperaturen von 50, 60, 75, 100 und 125°. In allen Fällen ist der Explosionsdruck von 1 atü bereits nach 100 Gramm unter der oberen Explosionsgrenze erreicht. Die scharf ausgebildete Spitze neben der unteren Explosionsgrenze ist für Äther besonders charakteristisch. Die starke Verschiebung der oberen Grenze durch die hohe Eingangstemperatur ist nicht für alle Dämpfe zutreffend, sondern hängt anscheinend mit der Entzündungstemperatur der Gase zusammen, die bei Äther 180° C beträgt. Bei Benzol wurde als einzige Beeinträchtigung der geringere Explosionshöchstdruck bei höheren Temperaturen festgestellt.

Erhebliche Verschiebungen, insbesondere der oberen Explosionsgrenze, kommen auch durch manchmal geringfügige Beimischungen zu den brennbaren Flüssigkeiten zustande. So haben wir festgestellt, daß bei Schwefelkohlenstoff, wie er normalerweise in der Fabrikation Verwendung findet, die obere Grenze bei gleicher Temperatur vor der Zündung zwischen 1700 und 3000 g/kg Luft schwankt. Ein weiteres Beispiel wesentlicher Änderung beider Explosionsgrenzen zeigt Styrol rein (stabilisiert). Wir haben in diesem Fall folgende Abweichungen festgestellt:

untere Grenze 30 bis 150 g/kg Luft
obere „ 220 „ 1060 „ „

In beiden Fällen war das Styrol dünnflüssig und wasserhell. Weitere Abweichungen stellten wir bei reinem Styrol fest, das bereits die Konsistenz von Rizinusöl hatte und wohl teilweise polymerisiert war. Hier waren die Verschiebungen noch etwas größer.

Bild 6 zeigt Explosionsdruckkurven von verschiedenen brennbaren Stoffen. Ich weise darauf hin, daß sämtliche Kurven im gleichen Maßstab gezeichnet sind. Wir sehen daraus, wie verschiedenartig die Ausdehnung des Explosionsbereiches sein kann. Wenn wir von den beiden gezeigten chlorierten Stoffen Dichloräthylen und dem vielumstrittenen Methylenchlorid absehen, können wir feststellen, daß sämtliche unteren Explosionsgrenzen in die Spanne von 30 bis 50 g/kg Luft fallen. Für die oberen Explosionsgrenzen gibt es recht starke Schwankungen. Bei Schwefelkohlenstoff erreicht sie zum Beispiel 3000 g/kg Luft, bei dem obengezeigten Äther ca. 1600 g/kg Luft. Auch hier kann man, abgesehen von einigen Ausnahmen, annehmen, daß die obere Grenze sich zwischen 250 bis 300 g/kg Luft bewegt. Jedenfalls zeigen 60 bis 70% aller von uns untersuchten Stoffe diese obere Explosionsgrenze.

Schwer brennbare Stoffe mit hohem Flammpunkt, wie auch die chlorierten Kohlenwasserstoffe, haben durchweg hochgelegene untere Explosionsgrenzen und meistens hohe Entzündungstemperaturen. Zu dem Verlauf der Explosionsdruckkurve, die, wie man aus diesem Bild sieht, sehr verschiedenartig sein kann, ist immer wieder charakteristisch der scharfe Anstieg im Anschluß an die untere Explosionsgrenze. Der höchste Punkt der Druckkurve entspricht, wie früher bereits erwähnt, auch der höchsten Brisanz und fällt meist zusammen mit den stöchiometrischen Verhältnissen der Dämpfe zum Luftsauerstoff.

II. Größe und Form der Explosionsgefäße

Mir sind Fälle bekannt, in denen zur Feststellung der Explosionsgrenzen Glasbehälter von 100 cm³ Inhalt Verwendung fanden. Stellt man sich hier noch einen Funken von 2 bis 3 cm Strecke vor, so ist schwer zu beurteilen, wie sich das Gas außerhalb der Wandungseinflüsse und des Bereiches der Funkenstrecke verhalten würde.

Um den Wandungseinfluß und andere Störungen, die mit der Größe der Explosionsbombe zusammenhänger zu

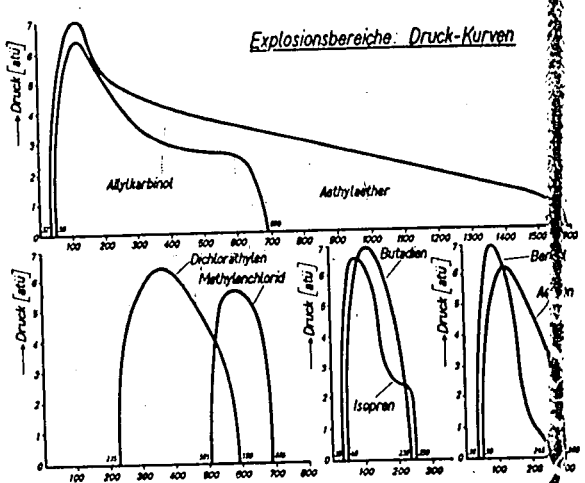


Bild 6. Explosionsdruckkurven brennbarer Stoffe

studieren, haben wir Explosionsversuche in Behältern von 0,5, 1, 2, 3, 5, 6, 10 und 20 Liter Inhalt durchgeführt. Bis auf die etwas längliche 20-Liter-Bombe waren die Behälter alle angenähert kugelförmig (zylindrisch mit kugelförmigem Boden gleichen Durchmessers und gleicher Höhe), zum Teil aus Glas. In allen Fällen wurden Zündung, Konzentration der Dämpfe und Temperatur des Gases vor der Zündung gleichgehalten.

Die Ergebnisse der Versuche mit Gefäßen verschiedenen Rauminhaltes sind aus dem Bild 7 zu ersehen. Um die Veränderungen besser darstellen zu können, wurden nur die obere und die untere Explosionsgrenze dargestellt, und zwar in verschiedenen Maßstäben. Folgende Stoffe wurden in allen Gefäßen untersucht:

Äthyläther, Benzol und Aceton.

In der Senkrechten sind die verschiedenen Behältergrößen aufgetragen, ganz oben die Werte für den 20-Liter-Behälter. Zieht man in Betracht, daß die untere Explosionsgrenze in einem größeren Maßstab gezeichnet ist, so sieht man auch hier, daß die untere Grenze durch äußere Ein-

untersuchten Stoffe diese obere Explosions-

grenze.

Schwer brennbare Stoffe mit hohem Flammpunkt, wie auch die chlorierten Kohlenwasserstoffe, haben durchweg hochgelegene untere Explosionsgrenzen und meistens hohe Entzündungstemperaturen. Zu dem Verlauf der Explosionsdruckkurve, die, wie man aus diesem Bild sieht, sehr verschiedenartig sein kann, ist immer wieder charakteristisch der scharfe Anstieg im Anschluß an die untere Explosionsgrenze. Der höchste Punkt der Druckkurve entspricht, wie früher bereits erwähnt, auch der höchsten [illegible] fällt meist zusammen mit den stöchiometrischen Mischungsverhältnissen der Dämpfe zum Luftsauerstoff.

[illegible]nd Form der Explosionsgefäße

[illegible]d Fälle bekannt, in denen zur Feststellung der Explosionsgrenzen Glasbehälter von 100 cm³ Inhalt Verwendung fanden. Stellt man sich hier noch einen Funken von 2 bis 3 cm Strecke vor, so ist schwer zu beurteilen, wie sich das Gas außerhalb der Wandungseinflüsse und des Bereiches der Funkenstrecke verhalten würde.

Um den Wandungseinfluß und andere Störungen, die mit der Größe der Explosionsbombe zusammenhängen, zu

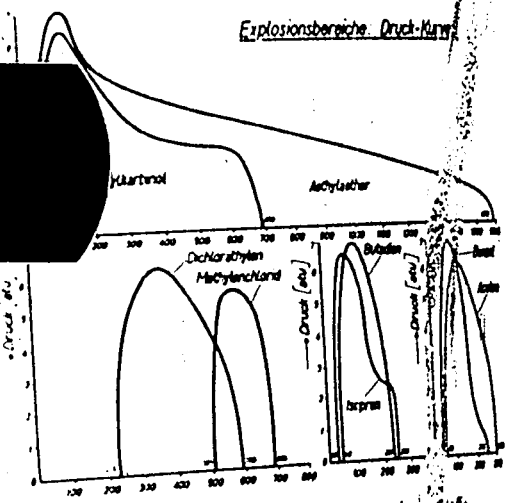


Bild 6. Explosionsdruckkurven brennbarer Stoffe

[illegible]n, haben wir Explosionsversuche in Behältern von [illegible]3, 5, 6, 10 und 20 Liter Inhalt durchgeführt. Bis auf [illegible]s längliche 20-Liter-Bombe waren die Behälter [illegible]nähert kugelförmig (zylindrisch mit kugelförmigen [illegible]oden gleichen Durchmessers und gleicher Höhe). [illegible]eil aus Glas. In allen Fällen wurden Zündung, Konzentration der Dämpfe und Temperatur des Gases vor der Zündung gleichgehalten.

Die Ergebnisse der Versuche mit Gefäßen verschiedenen Rauminhaltes sind aus dem Bild 7 zu ersehen. Um die Veränderungen besser darstellen zu können, wurden nur die obere und die untere Explosionsgrenze dargestellt, und zwar in verschiedenen Maßstäben. Folgende Stoffe wurden in allen Gefäßen untersucht:

Äthyläther, Benzol und Aceton.

In der Senkrechten sind die verschiedenen Behälter aufgetragen, ganz oben die Werte für den 20-Liter. Zieht man in Betracht, daß die untere Explosion in einem größeren Maßstab gezeichnet ist, so sieht auch hier, daß die untere Grenze durch [illegible]

flüsse weniger beeinflußt wird als die obere Grenze, abgesehen von Benzol. Die Versuche mit Äther ergeben, daß die untere Grenze bei dem 0,5-Liter-Gefäß 53 g/kg Luft beträgt, bei 7 bis 8 Liter 32 g/kg Luft. Der Wert ist weiter hinauf keinen Änderungen mehr unterworfen. Die obere Grenze liegt für das 0,5-Liter-Gefäß bei 1100 g/kg Luft, für

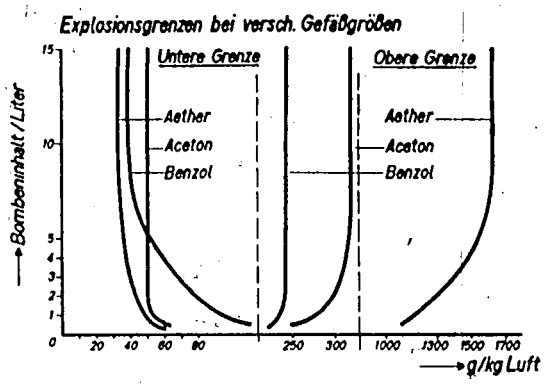


Bild 7. Abhängigkeit der Explosionsgrenzen von der Gefäßgröße

10 bis 12 Liter bei 1630 g/kg Luft, und ist gleichfalls weiter keinen wesentlichen Änderungen unterworfen. Für Aceton beträgt die untere Grenze im 0,5-Liter-Gefäß 60 g/kg Luft, bei 2 Liter 50 g/kg Luft. Die obere Grenze zeigt bei 0,5 Liter 250 g/kg Luft, bei 8 Liter 320 g/kg Luft, und bleibt weiter unverändert. Bei Benzol zeigt die untere Grenze die stärkeren Änderungen. Sie beträgt im 0,5-Liter-Gefäß 110 g/kg Luft, bei 10 bis 11 Liter 38 bis 39 g/kg Luft, also eine recht beachtliche Änderung. Die obere Grenze beträgt 225 g/kg Luft bei 0,5 Liter und 240 bei 7 bis 8 Liter, und bleibt weiter unverändert.

Aus diesen Ausführungen geht hervor, daß in allen Fällen bei einer fast kugeligen Bombe von 8 bis 10 Liter Inhalt die Wandungseinflüsse so stark zurückgehen, daß eine wesentliche Vergrößerung des Inhaltes keine größeren Änderungen mit sich bringt.

Weiter wurden Versuche mit Behältern verschiedener Form durchgeführt. Da Veröffentlichungen über weitgehende Versuche mit einem Rohr von 50 mm l. W. vorliegen, haben wir uns dazu entschlossen, Versuche mit ähnlichen Vorrichtungen zu machen. Bei einem 50-mm-Rohr waren die Wandungseinflüsse außerordentlich stark. Einige Versuchsreihen wurden von uns mit einem Rohr von 150 mm ∅ und ca. 1,2 m Länge durchgeführt. Es lag die Vermutung nahe, daß auf diese Weise eine Druckerhöhung durch die berüchtigte angelaufene Explosion sich bemerkbar machen würde. Dies war nicht der Fall. Es zeigte sich weder eine Erweiterung des Explosionsbereiches, noch eine Erhöhung des Höchstdruckes. Bei verschiedenen Versuchen mit brisanten Gemischen wurden zum größten Teil die Höchstdrücke der 10-Liter-Bombe nicht erreicht. Wir haben angenommen, daß dies darauf zurückzuführen war, daß es schwierig ist, in einem hohen zylindrischen Gefäß eine einwandfreie Durchmischung des Gases zu bewerkstelligen.

Aus diesem Versuch geht hervor, daß eine 10-Liter-Bombe von angenähert gleichem Durchmesser und gleicher Höhe in den meisten Fällen zufriedenstellende Ergebnisse erwarten läßt. Diese Bombe hat noch ein handliches Format, was für ein schnelles Arbeiten wesentlich ist, weil für jede Untersuchung eine große Anzahl von Einzelversuchen erforderlich ist.

III. Die Zündung

Die Frage der Zündung bei der Feststellung des Explosionsbereiches ist eines der schwierigsten Kapitel und kann im Rahmen dieses Vortrages nicht erschöpfend behandelt werden. Viel Interessantes über die Vorgänge bei den verschiedenen Arten von Zündungen ist in dem Buch von Jost „Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen" enthalten, wo auch der theoretischen Seite breiter Raum gewährt wird, und neuerdings in der Zusammenfassung von Müller-Hillebrand.

Für eine einwandfreie Feststellung der Explosionsgrenzen muß, ähnlich wie bei der Gastemperatur, der Zweck der Untersuchung bekannt sein, um die geeignete Zündung feststellen zu können.

Eine große Rolle bei der Zündung von brennbaren Dampf-Luft-Gemischen spielen die elektrostatischen Funken. Unser Dr. Nitka hat eine Sonderuntersuchung durchgeführt, die sich hauptsächlich mit der Entstehung statischer Aufladung beschäftigt (Sonderheft „Chemische Fabrik"), in welcher aber auch, gestützt auf die Untersuchung von Jost, wesentlich über die Zündfähigkeit von brisanten Gemischen mit statischen Funken, insbesondere über die Mindestenergie zündfähiger Funken, berichtet wird.

Wir haben umfangreiche Vergleichsversuche durchgeführt zwischen der Zündung mit elektrostatischen Funken und anderen Zündmethoden. Obgleich wir elektrostatische Funken von 10000 bis 20000 Volt Spannung bei 2000 bis 4000 cm Kapazität benutzten, wie sie im prakti-

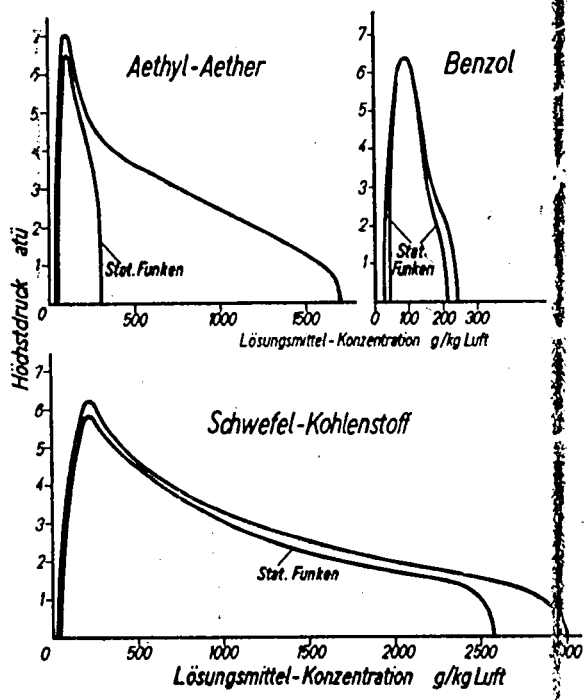


Bild 8. Abhängigkeit der Explosionsgrenzen von der Zündung

schen Fall selten erreicht werden, ergaben sich folgende wesentlichen Unterschiede. Die Explosionsgrenzen von Äther betrugen bei statischen Funken 45 bis 260 g/kg Luft (Explosionsbereich) gegen 32 bis 1750 g/kg Luft bei anderen Zündarten, bei Aceton 60 bis 250 g/kg Luft gegen 50 bis 300 g/kg Luft, bei Benzol 45 bis 225 gegen 40 bis 240 g/kg Luft. Die zweite Vergleichszahl bezieht sich auf Zündungen mit 10 mm Schmelzdraht und 8 mm Funken

der Teslaapparatur. Die Ergebnisse mit statischen Funken zeigen somit in allen Fällen einen kleineren Explosionsbereich als die mit anderen Zündungen (Bild 8).

Wir haben uns auf den Standpunkt gestellt, daß sich der Schutz normalerweise auf Zündung explosiver Gemische durch Kurzschlußfunken einer Niederspannungsleitung oder durch das Durchschlagen einer Schmelzdrahtsicherung beziehen soll und daß der Explosionsbereich im allgemeinen von diesem Standpunkt aus zu wählen ist.

Wir haben festgestellt, daß bei der Hochfrequenzfunkenreihe einer Teslaapparatur ab 8 mm Funkenstrecke die Explosionsgrenzen sich bei einer Anzahl von untersuchten Dämpfen nicht mehr merklich ändern und ferner, daß mit einem Schmelzdraht von 0,2 mm Ø, 10 mm freier Länge und 110 Volt Spannung die gleichen Werte erreicht werden, wie bei obiger Funkenstrecke. Diese Art der Zündung entspricht am ehesten den praktischen Forderungen und ist an Wirkung mit den obengenannten Schäden im elektrischen Leitungsnetz gut vergleichbar. Versuche mit geringeren Funkenstrecken haben kleinere Explosionsbereiche ergeben.

Dies ist auch die Zündart, die den obengenannten größeren Explosionsbereichen entspricht, also die durch elektrostatische Funken festgestellten Explosionsbereiche in allen Fällen übertrifft. Wir halten uns daher für berechtigt, diese Art der Zündung als die normale zu betrachten, und beabsichtigen, nur dann eine andere Zündart heranzuziehen, wenn Explosionsgrenzen für einen ganz bestimmten Zweck angefordert werden.

IV. Einfluß von Schutzgas

Es handelt sich hierbei meist um spezielle Untersuchungen, die auf bestimmte Fabrikationsverfahren hinzielen. Die Benutzung von Schutzgas bei sonst explosionsgefährlichen Gasen ist wegen der hohen Kosten nur bei geschlossenen Apparaturen möglich. Es soll der Zweck des Schutzgases sein, bei Fabrikationsprozessen, in denen explosionsgefährdende Dämpfe entwickelt werden, zu verhindern, daß bei Luftzutritt der Explosionsbereich erreicht wird oder bei Arbeiten mit Trockenluft, diese Luft soweit zu ersetzen, daß für eine Explosion nicht mehr genügend Sauerstoff vorhanden ist. In Frage kommen folgende Formen der Benutzung von Schutzgasen:

Das Schutzgas soll das Eindringen von Luft in den Apparat vollkommen verhindern. Hierzu eignen sich Stickstoff, Kohlensäure und Verbrennungsgase. Die beiden ersteren eignen sich auch gut dazu, wie oben erwähnt, die Luft an Sauerstoff zu verarmen. Bei Verbrennungsgasen ist diese Art etwas riskanter, da häufig noch Restsauerstoff in den Verbrennungsgasen vorhanden ist. Ferner besteht die Möglichkeit, durch Zusätze zu Lösungsmitteln von nicht brennbaren Stoffen, wie Tetrachlorkohlenstoff, Methylenchlorid oder Wasser, den Explosionsbereich weitgehend zu erhöhen oder vollkommen zu beseitigen. In unserer Fabrikation findet meist Stickstoff als Schutzgas Verwendung. Bei zunehmendem Stickstoffgehalt in der Luft zieht sich der Explosionsbereich nach unten zusammen, d. h. die untere Explosionsgrenze ändert sich wenig, während sich die obere stark senkt (s. Bild 9). Wir haben festgestellt, daß bei den meisten brennbaren Flüssigkeiten die Sauerstoffgrenze bei 90% Sauerstoff liegt, d. h. bei höheren Stickstoffkonzentrationen als 9% kann eine Verpuffung nicht mehr auftreten, unabhängig davon, wie hoch die Konzentration an Lösungsmitteldämpfen liegt. Auch hier bildet der heimtückische Schwefelkohlenstoff eine Ausnahme. Es liegt die Sauerstoffgrenze bei 4,5% O_2. Bis dahin sind also noch keine Verpuffungen möglich.

Vielfach wird auch Kohlensäure als Schutzgas verwendet (Bild 9). Explosionstechnisch liegt CO_2 etwas günstiger als Stickstoff, was wohl mit der hohen spezifischen Wärme von CO_2 zusammenhängt, d. h. es ist bei CO_2-Gehalt im Gas eine größere Menge an Wärme erforderlich, um die Entzündungstemperatur der benachbarten Gasteile zu erreichen, als bei gleichen Volumenteilen von

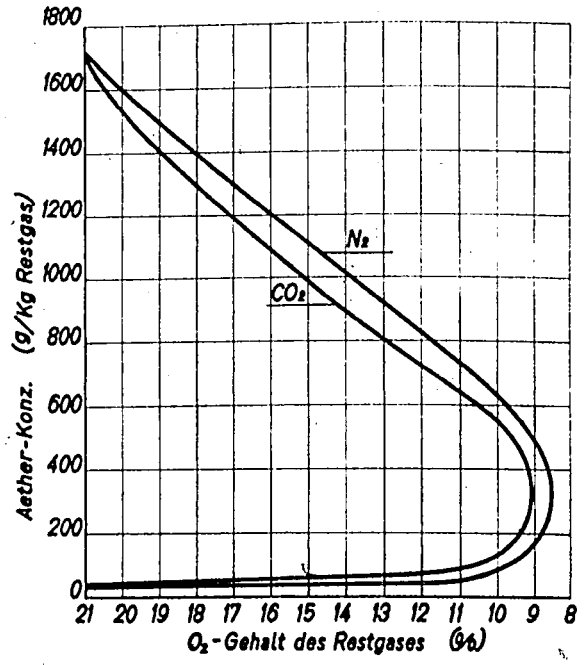


Bild 9. Einfluß von Schutzgas auf die Explosionsgrenzen

Stickstoff. Einen Vergleich der Sauerstoffgrenzen (% Sauerstoff im lösungsmittelfreien Gemisch) zeigt folgende Aufstellung. Die O_2-Grenze verschiebt sich bei

Aceton	von	10,5%	mit	N_2	auf	12,5%	mit	CO_2
Benzol	„	10 %	„	„	„	12 %	„	„
Äther	„	8,5%	„	„	„	10 %	„	„
Schwefelkohlenstoff	„	4,5%	„	„	„	6,5%	„	„

CO_2 wird also mengenmäßig etwas weniger gebraucht als N_2, um die Sauerstoffgrenze zu erreichen, d. h. jede Explosionsmöglichkeit auszuschalten.

Über den Verbrauch von Verbrennungsgasen liegen keine Ergebnisse vor.

Als Zusätze zu Lösungsmitteln resp. als Befeuchtung für Luft, um die Explosionsfähigkeit zu vermindern, wird häufig Wasser angewendet. Aus Bild 10 ist zu ersehen, daß bei Schwefelkohlenstoff, aber auch bei anderen Lösungsmitteln, eine Befeuchtung der Luft in normalen Grenzen (bis zu 25 g/kg Luft) keinerlei Einfluß auf die untere Explosionsgrenze hat. Der Zweck dieser Luftbefeuchtung ist auch meistens nur darauf gerichtet, die statische Aufladung von isolierten Stoffen zu entfernen, die elektrostatische Funken bilden könnte. Das Bild zeigt ferner, daß erst ein Gehalt von 800 g Wasserdampf/kg Luft die Explosionsgefahr vollkommen beseitigt, was einer Sättigungstemperatur von 85° C bei Wasserdampf entspricht. Bei Toluol ist die Sicherheit bei 450 g Wasser/kg Luft, entsprechend 75° C Sättigung, erreicht. Das Hin-

hier bildet der heimtückische Schwefelkohlenstoff eine Ausnahme. Es liegt die Sauerstoffgrenze bei 4,5% O_2. Bis dahin sind also noch keine Verpuffungen möglich.

Vielfach wird auch Kohlensäure als Schutzgas verwendet (Bild 9). Explosionstechnisch liegt CO_2 etwas günstiger als Stickstoff, was wohl mit der hohen spezifischen Wärme von CO_2 zusammenhängt, d. h. es ist bei CO_2-Gehalt im Gas eine größere Menge an Wärme erforderlich, um die Entzündungstemperatur der benachbarten Gasteile zu erreichen, als bei gleichen Volumenanteilen von

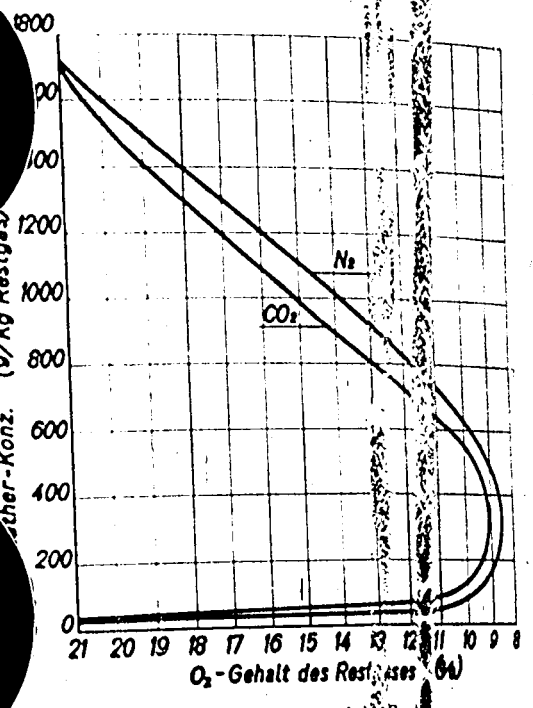


Bild 9. Einfluß von Schutzgas auf die Explosionsgrenzen

Stickstoff. Einen Vergleich der Sauerstoffgrenzen (% Sauerstoff im lösungsmittelfreien Gemisch) zeigt folgende Aufstellung. Die O_2-Grenze verschiebt sich bei

Aceton	von 10,5% mit N_2 auf	12,5% mit CO_2
Benzol	„ 10 % „ „	12 % „ „
Äther	„ 8,5% „ „	10 % „ „
Schwefelkohlenstoff	„ 4,5% „ „	6,5% „ „

CO_2 wird also mengenmäßig etwas weniger gebraucht als N_2, um die Sauerstoffgrenze zu erreichen, d. h. jede Explosionsmöglichkeit auszuschalten.

Über den Verbrauch von Verbrennungsgasen liegen eine Ergebnisse vor.

Als Zusätze zu Lösungsmitteln (usw. als Befeuchtung für Luft, um die Explosionsfähigkeit zu vermindern, wird häufig Wasser angewendet. Aus Bild 10 ist zu ersehen, daß bei Schwefelkohlenstoff, aber auch bei anderen Lösungsmitteln, eine Befeuchtung der Luft in normalen Grenzen (bis zu 25 g/kg Luft) keinerlei Einfluß auf die untere Explosionsgrenze hat. Der Zweck dieser Luftbefeuchtung ist auch meistens nur darauf gerichtet, die statische Aufladung von isolierten Stoffen zu entfernen, die elektrostatische Funken bilden können. Das Bild zeigt ferner, daß erst ein Gehalt von 800 g Wasserdampf/kg Luft die Explosionsgefahr vollkommen beseitigt, was einer Sättigungstemperatur von 85° C entspricht. Bei Toluol ist die Sicherheit bei 450 g Wasser erreicht. Das Hö- kg Luft, entsprechend 75° C Sätti-

zufügen von Tetrachlorkohlenstoff und Methylenchlorid wurde nur bei Gemischen geprüft und ergab meistens ein starkes Ansteigen der unteren Explosionsgrenze, das jedoch jeweils nur auf die Anreicherung mit dem Zusatz zurückzuführen war, insbesondere bei Methylenchlorid.

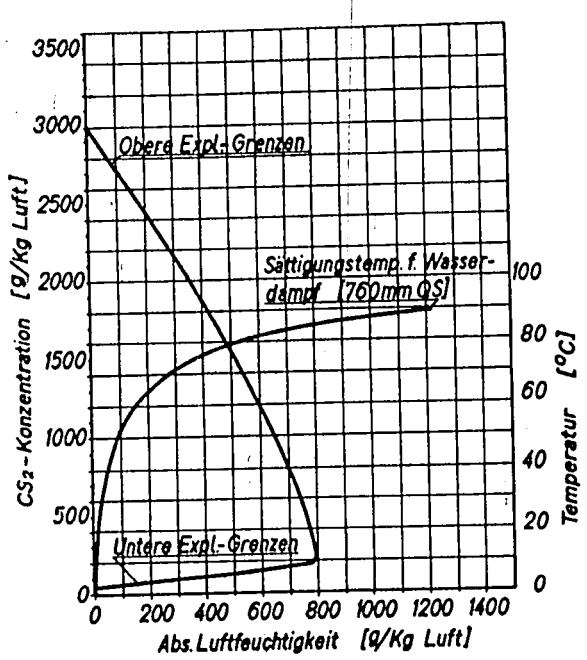


Bild 10. Einfluß von Wasserdampf auf die Explosionsgrenzen

V. Versuche mit verschiedenen Ausgangsdrücken

Diese wurden bei uns noch nicht durchgeführt, da die vorhandene Apparatur den erhöhten Ansprüchen nicht gewachsen ist. Bekanntlich ist der Enddruck mit dem jeweiligen Ausgangsdruck in ata zu multiplizieren. Wir würden demnach Prüfungen von höchstens 2 ata Anfangsdruck durchführen können. Ob es uns möglich sein wird, noch vor dem Ende des Krieges die hierfür geplante Apparatur zu bauen, bleibt dahingestellt.

Zusammenfassend ist über die Untersuchungen der Explosionsgrenzen und -bereiche zu sagen, daß einheitliche Werte nur unter Bedingungen festgestellt werden können, die in gewissen Grenzen gleich sind.

Unter gleichartigen Bedingungen sind die Ergebnisse stets reproduzierbar.

Es lassen sich allgemeingültige Explosionsgrenzen feststellen, die aber in gewissem Sinne Höchstwerte sind und auf alle Fälle für normale Bedingungen ausreichen. Für abnormale Bedingungen: in der Richtung der Ausweitung der Grenzen, hohe Ausgangsdrücke, hohe Temperaturen und im Sinne der Einengung der Grenzen sowie Zündung mit statischer Elektrizität unter besonderen Bedingungen, sind die Versuchsreihen noch nicht abgeschlossen.

E. Explosionssicherungen.

Mit der Notwendigkeit und Verwendung von Explosionssicherungen brauchen wir uns in diesem Kreise nicht mehr aufzuhalten. Der Stoff, der zu bändigen ist, wurde Ihnen im bisherigen Teil des Vortrages in dieser Richtung nahegebracht.

Über den Weg, der uns zur Prüfung von Sicherungen führt, habe ich in der Einleitung gesprochen. Wir legten besonderen Wert auf trockene Explosionssicherungen, da sie sehr viel Vorzüge haben und zu jener Zeit bestenfalls nur benzolgeprüfte Sicherungen vorhanden waren. Der Weg führte uns über die Prüfung von vorhandenen trockenen Sicherungen zur Entwicklung von neuen Vorrichtungen.

Die Versuchsvorrichtung zur Prüfung von Sicherungen zeigt Bild 11 schematisch. Die chlorkalziumgetrocknete Luft geht in einem Teilstrom durch mit Lösungsmitteln gefüllte und temperierte Waschflaschen. In der Mischdüse wird die reine Luft mit Lösungsmitteldämpfen gemischt und im Interferometer die richtigen Zusätze geprüft. Der Topf über dem Explosionsgefäß ist die zu prüfende Sicherung. Das Gas tritt zuerst in die Prüfkugel und steigt von dort durch die Sicherung in dem Krümmer A oder dem 4 m langen Rohr mit Krümmer B auf, je nach der vorgesehenen Prüfung, ob End- oder Zwischensicherung. Letztere wird durch das lange Rohr auf angelaufene Explosion geprüft. Die Zündung erfolgt dauernd bei A oder B, wobei die Flamme bis zur Sicherung herunterschlägt, wenn ein brisantes Gemisch Verwendung findet. Die verbrannten Gase werden dann aus dem Rohr durch das nachdringende Frischgas herausgeschoben, und eine neue Explosionswelle prüft die Sicherung. Die Prüfung dauert eine vorgeschriebene Zeit. Die wechselnde Gaszusammensetzung wird von uns so gewählt, daß sie nur wenig über und gar nicht unter das Brisanzgebiet reicht. Schlägt die Sicherung während die Prüfzeit durch, so ist die Prüfung damit beendet. Schlägt die Sicherung nicht

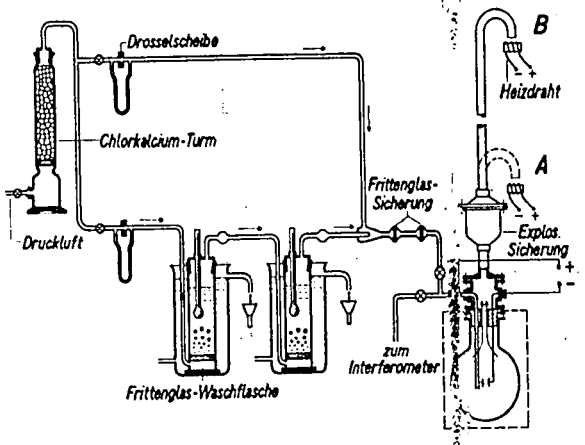


Bild 11. Prüfanordnung für Explosionssicherungen

durch, so wird das Gas in der Prüfkugel auf Zündfähigkeit kontrolliert und die Prüfung nach einigen Stunden wiederholt, weil die Sicherung sich bei dieser Prüfung sehr stark erwärmt (bei Äther bis zur Rotglut des Deckels). Die ganze Apparatur ist heizbar eingerichtet, so daß es möglich ist, die Prüfung unabhängig von der Temperatur der Umgebung durchzuführen, außerdem bei höheren Temperaturen.

Es sind folgende Sicherungen geprüft worden:
einfache und mehrere Davy-Siebe untereinander,
Metallroste, Zylinder mit verschiedenen Füllkörpern,
einfache Kiestöpfe und Sicherungen neuer Art.

Von allen diesen Sicherungen haben nur die Metallroste (Kito-Siebe), die Kiestöpfe mit Glaskugeln und die neuen Lamellen-Sicherungen unseren Beifall gefunden. Bis auf die letzteren lassen sich die käuflichen Sicherungen durch kleine Änderungen oder eine Vervielfältigung

für Äther herrichten. Nicht möglich war dieses bei Schwefelkohlenstoff. Wir nehmen an, daß in erster Linie die leichte Entzündlichkeit — Entzündungstemperatur 100 bis 120° C — uns diese Schwierigkeit bereitet hat. Bei unseren Wärmeberechnungen, welche die Grundlage für die Konstruktion der doppelten Lamellensicherung bildeten (12c), zeigte sich immer wieder, daß gerade die niedrige Entzündungstemperatur sich sicherungstechnisch besonders ungünstig auswirkte.

Einige dieser Sicherungen sind in den Bildern 12a bis 12c dargestellt. Für welche brennbaren Flüssigkeiten bestimmte Sicherungen geeignet sind, kann am besten auf Grund der weiter unten angegebenen VDE.-Norm-Klassifizierung angegeben werden. Im allgemeinen halten wir uns an folgende Regel:

Für Äther, Benzol und die meisten anderen Stoffe kommt die Glaskugelsicherung (12a) oder die kleine Lamellensicherung (12b) in Frage. Die Lamellensicherung hat einen geringen Widerstand und ist leichter sauber zu halten. Die Glaskugelsicherung ist billiger und kann im Kriege leichter beschafft werden, weil die Lamellen aus

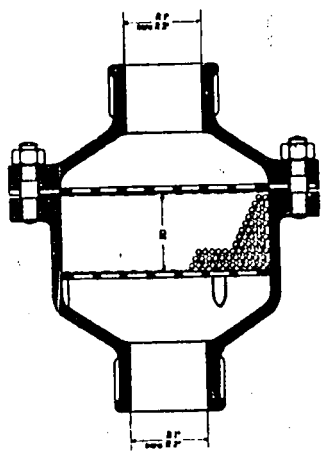


Bild 12a. Kiestopf-Sicherung als End- und Zwischensicherung

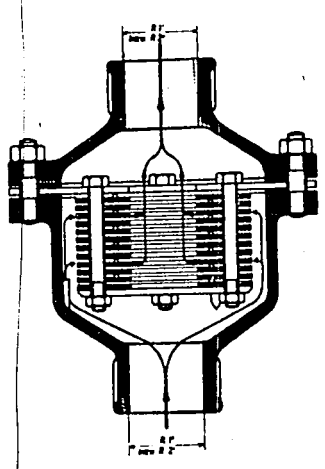


Bild 12b. Einfach-Lamellen-Sicherung als End- und Zwischensicherung

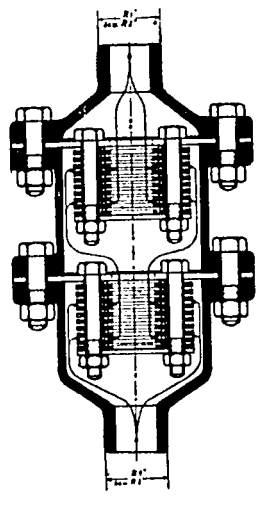


Bild 12c. Zweifach-Lamellen-Sicherung als End- und Zwischensicherung

Bronze oder Edelstahl hergestellt werden müssen. Für große Rohrquerschnitte (200 mm Ø und darüber) benutzten wir bei Äther dreifache Kitosiebe, welche sich für diesen Zweck besonders gut eignen; für CS_2 wird noch eine solche entwickelt.

F. Einstufung der brennbaren Flüssigkeiten

Die Einstufung brennbarer Flüssigkeiten nach Gefahrenklassen, die wir am Schluß als Tabelle bringen, geschieht nach zwei verschiedenen Gesichtspunkten:

a) Auf Grund polizeilicher Verordnung

Der Geltungsbereich bezieht sich auf die Lagerung, die Verarbeitung und den Transport der brennbaren Flüssigkeiten (Bahn und Schiff). Hierzu gehören auch die Ausführungsbestimmungen mit den Explosionssicherungen für Lagerkessel.

Die Klassifizierung geht:

1. Nach der Mischbarkeit mit Wasser

Man ging hier von dem Standpunkt aus, daß Flüssigkeiten, die sich nicht mit Wasser in jedem Verhältnis mischen, bei einem Brand nicht mit Wasser zu löschen sind. Die Feststellung der Mischbarkeit ist im Laboratorium einfach.

2. Nach dem Flammpunkt

Der Flammpunkt ist die niedrigste Temperatur, bei welcher sich die Dämpfe über dem Flüssigkeitsspiegel entzünden können. Ein hoher Flammpunkt erschwert die Möglichkeit einer Entzündung. Für die Feststellung des Flammpunktes ist der Apparat von Abel u. Pensky, der auch bei uns in Benutzung ist, vorgeschrieben.

b) Nach der VDE.-Norm für brennbare Flüssigkeiten

Der Geltungsbereich bezieht sich auf die Auswahl und Schutzkonstruktionen elektrischer Apparate, Schalter und Motoren, welche in Räumen Aufstellung finden sollen, in denen die eingestuften brennbaren Flüssigkeiten verarbeitet werden.

Die Einstufung geht:

1. Nach den Entzündungstemperaturen der Dämpfe

Das hängt damit zusammen, daß die elektrischen Apparate bei ihrer Funktion gewissen Erwärmungen unterworfen sind, welche dann um eine Sicherheitsspanne unter der Entzündungstemperatur bleiben müssen.

Der vorgeschriebene Apparat ist bei uns im Bau. Die Entzündungstemperaturen konnten wir vorläufig mit ausreichender Genauigkeit in einem Röhrenofen feststellen.

Wie oben erwähnt, sind auch für die Explosionssicherung die Entzündungstemperaturen von großer Wichtigkeit.

2. Nach Löschspalten

Es werden verschiedene Spaltbreiten geprüft, die nach einer Zündung durch die Explosionsflamme nicht durchschlagen werden dürfen. Das bezieht sich auf die Spaltbreiten von Durchführungsachsen und -lagern von Gehäusen von Apparaten, in denen Kurzschluß- oder Öffnungsfunken entstehen können.

Diese Einstufung findet bei unseren Sicherungen ebenfalls eine wesentliche Verwendung.

einem Brand nicht mit Wasser zu löschen
ststellung der Mischbarkeit ist im Laborato-
n.

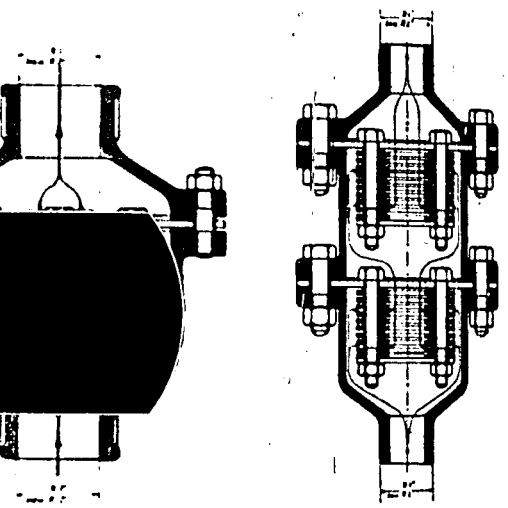
2. Nach dem Flammpunkt

Der Flammpunkt ist die niedrigste Temperatur, bei welcher sich die Dämpfe über dem Flüssigkeitsspiegel entzünden können. Ein hoher Flammpunkt erschwert die Möglichkeit einer Entzündung. Für die Feststellung des Flammpunktes ist der Apparat von Abel u. Pensky, der auch bei uns in Benutzung ist, vorgeschrieben.

3. Nach der VDE.-Norm für brennbare Flüssigkeiten

ungsbereich bezieht sich auf die Auswahl und
uktionen elektrischer Apparate, Schalter und
che in Räumen Aufstellung finden sollen, in
ngestuften brennbaren Flüssigkeiten verarbei-

Die Einstufung geht:



fach Lamellen-Sicherung
und Zwischensicherung

Bild 12c. Zweifach-Lamellen-Sicherung als End- und Zwischensicherung

1. Nach den Entzündungstemperaturen der Dämpfe

Das hängt damit zusammen, daß die elektrischen
bei ihrer Funktion gewissen Erwärmungen
sind, welche dann um eine Sicherheitsspanne
tzündungstemperatur bleiben müssen.
geschriebene Apparat ist bei uns im Bau. Die
temperaturen konnten wir vorläufig mit ausGenauigkeit in einem Röhrenofen feststellen.
oben erwähnt, sind auch für die Explosionssicherung die Entzündungstemperaturen von großer Wichtigkeit.

2. Nach Löschspalten

Es werden verschiedene Spaltbreiten geprüft, die nach einer Zündung durch die Explosionsflamme nicht durchschlagen werden dürfen. Das bezieht sich auf die Spaltbreiten von Durchführungsachsen und -lagern von Gehäusen von Apparaten, in denen Kurzschluß- oder Öffnungsfunken entstehen können.

Einstufung findet bei unseren Sicherungen
e wesentliche Verwendung.

Bild 13 zeigt das Schema der Prüfapparatur. Die Gasaufbereitung ist die gleiche wie bei der Prüfung unserer Sicherungen.

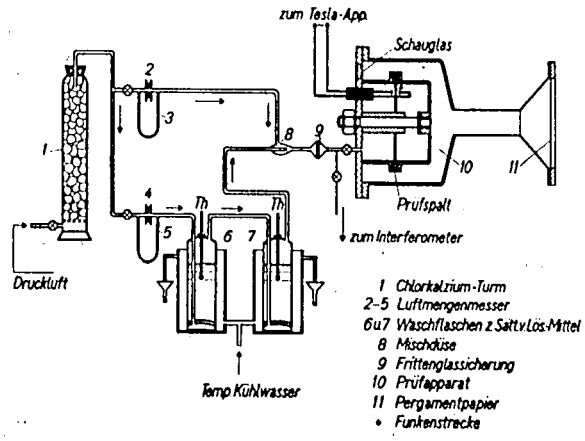


Bild 13. Prüfanordnung für Löschspalte

Auf Grund der Interferometermessung wird auch hier ein brisantes Gemisch eingestellt, das laut Vorschrift variiert wird.

Das Gas tritt in den Prüfkörper durch die Leitung 1 und wird dort durch den Prüfspalt in das äußere Gehäuse geleitet. Der Prüfspalt besteht aus Edelstahl und ist genau geschliffen; der Abstand wird durch vier genaue kleine Einsatzbleche festgelegt und durch die Spannungsschraube fixiert. Zuletzt tritt das Gas durch eine kleine Öffnung im Pergamentpapier 11 aus. An der Funkenstrecke wird gezündet und festgestellt, ob der Spalt durchschlagen wurde (Schauglas). War dieses nicht der Fall, so wird das Gas durch einen Funken im äußeren Gehäuse zur Kontrolle gezündet. Wurde dieser Versuch laut Vorschrift wiederholt, so gilt der Spalt als nicht durchgeschlagen. Nach einem Durchschlag wird die nächstengere Spaltbreite geprüft.

3. Nach Explosionshöchstdrücken

Dies bezieht sich auf die Festigkeit der Gehäusekonstruktionen für die elektrischen Apparate und wird bei uns durch die Explosionsdruckkurve festgestellt.

So begrüßenswert die Einstufung nach VDE.-Norm, insbesondere für die Klassifizierung der Flüssigkeiten für unsere Sicherungen, sein mag, so halte ich es dennoch für sehr verfehlt, daß man z. B. die Kennzeichnung A I oder A 1 das eine Mal für die höchste, das andere Mal für die geringste Gefahrenklasse gewählt hat.

Einstufung brennbarer Flüssigkeiten nach Gefahrenklassen

1. Polizeiliche Verordnung

Gruppen

A Mit Wasser nicht mischbar
B Mit Wasser unbegrenzt mischbar

Gefahrenklassen

I Flammpunkt unter 21° C
II Flammpunkt 21 — 55° C
III Flammpunkt 55 — 100° C

Bemerkung: A I höchste Gefahr (CS_2)

2. Gefahrenklassen nach VDE.-Norm

Kennbuchstaben nach Entzündungstemperaturen

A Zündtemperatur über 450° C
B Zündtemperatur 300 — 450° C
C Zündtemperatur 175 — 300° C
D Zündtemperatur 120 — 175° C

Kennzahlen entsprechend den Spaltbreiten

1 Spaltbreite 0,8 mm kein Durchschlag
2 Spaltbreite 0,5 — 0,8 mm kein Durchschlag
3 Spaltbreite 0,5 mm Durchschlag

Bemerkung: A 1 geringste Gefahr
D 3 höchste Gefahr (CS_2)

Aussprache:

Wilke führt aus, daß sich Ergebnisse von Explosionsversuchen sehr übersichtlich darstellen lassen, wenn man als willkürliche Veränderliche nicht den Gehalt an Brennbarem benutzt, sondern das Luftverhältnis (Sauerstoffverhältnis) $\lambda = L:L_0$. Es zeigt sich dann, daß die höchsten Explosionsdrücke immer bei $\lambda < 1$, ungefähr bei 0,7 bis 0,8, auftreten, und ferner, daß die Explosionsbereiche der meisten Stoffe zwischen $\lambda = 0{,}5$ und $\lambda = 1{,}5$ liegen. So ergeben sich bei Benutzung des Luft- bzw. Sauerstoffverhältnisses λ wesentlich einheitlichere Verhältnisse, und man ist in gewissem Maße vom Molekulargewicht unabhängig.

Nauck wirft ein, daß das erst hinterher berechnet werden müsse.

Wilke entgegnet, daß man es ja bei der Arbeit noch nicht zu kennen brauche, sondern erst bei der Auftragung anwenden könne (im Technischen Prüfstand Oppau wurde es schon früher bereits beim Ansetzen der Versuche benutzt).

Wilke fragt, ob die Versuchsapparaturen genormt seien.

Nauck erklärt, man sei sich noch nicht ganz einig, ob hier eine Vorschrift das Richtige sei. Jeder solle aber angeben, unter welchen Bedingungen er seine Ergebnisse erhalten habe.

Wilke: Bei Kraftstoffuntersuchungen sind Normen geschaffen worden; ohne solche wäre keine Verständigung möglich.

Nauck: Es war der Zweck des Vortrages, zu zeigen, wie weit man ist und was man vorschlagen kann, z. B. bezüglich Apparaturen, Zündung, Bombengröße usw.

Hegelmann fragt, ob Sicherheitstöpfe mit Schüttstoffen wirksam seien.

Nauck antwortet, das sei z. B. bei CS_2 nicht der Fall; Kieskörnungen von 3 — 4 mm seien hier die gröbste Füllung, die jedoch noch keinen einwandfreien Schutz bietet.

Matz fragt nach der Bewährung von Explosionsplatten.

Nauck erklärt, Klappen und Reißbleche seien gut bei langen Leitungen, vorzugsweise in Ecken, gegen aufgelaufene Explosionen; hingegen nützen sie alle nichts bei brisanten Explosionen.

Neuere Ansätze zur Weiterentwicklung grundlegender Begriffe in der reinen Thermodynamik

Von Dr.-Ing. EMIL HEGELMANN

Inhalt:

Die Aussagen von drei neuen Anschauungsarten in der Thermodynamik werden der herkömmlichen Betrachtungsweise gegenübergestellt und kritisch besprochen.

Der Versuch, der Temperatur die Dimension einer Energie beizulegen (Bodea), wodurch die Entropie als reine statistische Zahl erscheint, wird abgelehnt, da ein Übergang zu der logarithmischen Temperaturskala ein Umschlagen der Dimension von Temperatur und Entropie herbeiführen müßte. Bei der Beurteilung der neuen Anschauungen wird davon ausgegangen, daß die Arbeit bei allen übrigen Energiearten durch einen Transport einer der betreffenden Energie eigentümlichen Quantität über ein Potentialgefälle erfolgt. Nur die Wärme macht in der herkömmlichen Thermodynamik hierin eine Ausnahme. J. N. Brønsted, sowie die Anschauungsart IV bringen die Thermodynamik mit dieser Forderung in Einklang. Bei den beiden letztgenannten Anschauungen wird dementsprechend die Vorstellung der Verwandlung von Wärme in Arbeit und umgekehrt aufgegeben, weil man bei umkehrbarer Expansion eines Gases eine Verwandlung von Wärme in Arbeit, bei nichtumkehrbarer Expansion aber eine Verwandlung von Arbeit in Reibungswärme annehmen müßte, während doch in beiden Fällen der Gasdruck als Ursache der Gasarbeit angesehen werden muß und die Wärme nur eine sekundäre Rolle spielt. Bei der Anschauungsweise IV führt die Betrachtung im Gegensatz zur herkömmlichen Thermodynamik zur Annahme einer latenten Expansionswärme, die der Zunahme der Entropie des Gases entspricht. Die Anschauungsarten III und IV sind hinsichtlich ihrer Aussagen eng verwandt und unterscheiden sich nur durch die Dimension der Entropie.

Da das Produkt aus der absoluten Vergleichstemperatur und der Entropiezunahme des Systems auch schon nach der üblichen Auffassung eine Wärmemenge sein muß, die erst infolge der Entropiezunahme entstanden ist, wird der Schluß gezogen, daß ein folgerichtiges Zuendedenken der Aussagen der traditionellen Thermodynamik von selbst zur Anschauungsart IV hinführen muß. Die von allen übrigen Energiearten abweichende traditionelle Auffassung der Wärme wird zum Schluß durch eine geschichtliche Betrachtung erläutert.

Wenn ich dieses theoretisch erscheinende Thema während des Krieges im Rahmen einer auf die praktische Anwendung eingestellten Tagung gewählt habe, so geschah dies hauptsächlich deshalb, weil in den letzten Jahren bemerkenswerte Vorschläge von namhaften Fachleuten des Auslandes ausgegangen sind und dort z. T. auch diskutiert wurden, ohne daß zu diesen wichtigen und grundlegenden Fragen in Deutschland Stellung genommen worden ist. Außerdem habe ich die Überzeugung, daß auch die nutzbringende praktische Anwendung der Thermodynamik und Thermochemie bei größerer Klarheit und Überschaubarkeit besonders des Entropiebegriffes und des Nernst'schen Theorems eine größere Ausbreitung finden wird.

Wie es mit einigen unserer alltäglichsten Begriffsgrundlagen in der thermodynamischen Grundwissenschaft steht, wird treffend gekennzeichnet durch das, was ein so ausgezeichneter Fachmann wie H. Hausen in der Einleitung eines Aufsatzes sagt: „Die Thermodynamik liefert für die durch den ersten und zweiten Hauptsatz definierten Begriffe der inneren Energie und der Entropie zwar die Gleichungen, aus denen sich ihre Zahlenwerte in bestimmten Fällen berechnen lassen, sie gibt aber keinerlei Anhaltspunkte dafür, was man sich unter diesen Begriffen physikalisch vorzustellen hat."[1]) Die Erklärung solcher Begriffe sucht man dann nicht mehr in der thermodynamischen Grundwissenschaft, sondern in der statistischen Mechanik. Die statistische Mechanik kann selbstverständlich die reine Thermodynamik auf das wertvollste ergänzen, wie wohl in dem folgenden Vortrag von berufener Seite (Reg.-Rat Dr. Justi) erörtert wird. Aber die Thermodynamik als Grundwissenschaft muß doch, — wenn sie die richtigen begrifflichen Grundlagen besitzt — selbst schon in der Lage sein, z. B. von dem Entropiebegriff eine genügend klare anschauliche physikalische Vorstellung zu bilden. Dies ist jedoch z. Zt. nicht der Fall.

Aus der in weiten Kreisen der Praxis und der Theorie bekannten Unzufriedenheit mit der begrifflichen Gestaltung der Thermodynamik, die man gut mit einer ganzen Reihe von Einzelheiten belegen könnte, ist das Bedürfnis hervorgegangen, Ansätze zur Weiterentwicklung der Grundbegriffe der Thermodynamik aufzustellen.

Zur zusammenfassenden Beurteilung dieser Ansätze kann man an die Eigentümlichkeit aller Energien anknüpfen, die darin besteht, daß sie sich in die beiden Faktoren der Intensität und Extensität oder des Potentialgefälles und der Quantität aufspalten lassen, z. B.

mechanische Energie	in Weg und Kraft oder Höhe und Gewicht
elektrische Energie	in Spannung und Ladung
chemische Energie	in chemische Potentialdifferenz und Stoffmenge
Wärme-Energie	in absol. Temperatur und Entropie bzw. in Temp.-Differenz und Entropie.

Der Sinn dieser beiden Elementarbegriffe zeigt sich bei den genannten drei ersten Energiearten darin, daß es damit möglich ist, eine Bewegung oder einen Transport von Quantität über ein Potentialgefälle mathematisch wiederzugeben. Nur bei der Wärme ist man merkwürdigerweise nicht gewohnt, auf einen solchen Transport von Entropie über ein Temperaturgefälle zu achten und hält ihn wegen der von Clausius eingeführten Dimension der Entropie sogar für unmöglich. Hier setzt J. N. Brønsted mit seinen Vorschlägen ein. Aber auch Carnot hat bereits vor etwa 120 Jahren die Arbeitsleistung der Wärme als „chute du calorique", d. i. als „Absinken der Wärme über ein Temperaturgefälle", aufgefaßt. Nur weil Carnot bei dem damaligen Stande der Erkenntnis nicht in der Lage war, das irreversible Absinken der Wärme hiervon streng auszu-

r reinen Thermodynamik

HEGELMANN

Wie es mit einigen unserer alltäglichsten Begriffs-
rundlagen in der thermodynamischen Grundwissen-
chaft steht, wird treffend gekennzeichnet durch das, was
n so ausgezeichneter Fachmann wie H. Hausen in
er Einleitung eines Aufsatzes sagt: „Die Thermodynamik
etzt für die durch den ersten und zweiten Hauptsatz
efinierten Begriffe der inneren Energie und der Entropie
war die Gleichungen, aus denen sich ihre Zahlenwerte in
n berechnen lassen, sie gibt aber keine
dafür, was man sich unter diesen Be-
h vorzustellen hat."[1]) Die Erklärung
cht man dann nicht mehr in der thermo-
dwissenschaft, sondern in der statis-
Die statistische Mechanik kann selbst-
verständlich die reine Thermodynamik auf das wertvollste
ergänzen, wie wohl in dem folgenden Vortrag von be-
rufener Seite (Reg.-Rat Dr. Justi) erörtert wird. Aber die
Thermodynamik als Grundwissenschaft muß doch
wenn sie die richtigen begrifflichen Grundlagen besitzt –
selbst schon in der Lage sein, z. B. von dem Entropie-
begriff eine genügend klare anschauliche physikalische
Vorstellung zu bilden. Dies ist jedoch z. Zt. nicht der Fall.

Aus der in weiten Kreisen der Praxis und der Theorie
kannten Unzufriedenheit mit der begrifflichen Gestal-
modynamik, die man gut mit einer ganzen
lheiten belegen könnte, ist das Bedürfnis
Ansätze zur Weiterentwicklung der
Thermodynamik aufzustellen.

menfassenden Beurteilung dieser
man an die Eigentümlichkeit aller Ener-
gien anknüpfen, die darin besteht, daß sie sich in die beiden
Faktoren der Intensität und Extensität oder des Potential-
gefälles und der Quantität aufspalten lassen, z. B.

mechanische Energie	in Weg und Kraft oder Höhe und Gewicht
elektrische Energie	in Spannung und Ladung
chemische Energie	in chemische Potentialdifferenz und Stoffmenge
Wärme-Energie	in absol. Temperatur und Entropie bzw. in Temp.-Differenz und Entropie

Dieser beiden Elementarbegriffe zeigt sich
den drei ersten Energiearten darin, daß
ist, eine Bewegung oder eine
von Quantität über ein Potential-
gefälle mathematisch wiederzugeben. Nur bei der
Wärme ist man merkwürdigerweise nicht gewohnt, in
einem solchen Transport von Entropie über ein Tempe-
raturgefälle zu achten und hält ihn wegen der von Clau-
sius eingeführten Dimension der Entropie sogar für un-
möglich. Hier setzt J. N. Brønsted mit seinen Vorstel-
lungen ein. Aber auch Carnot hat bereits vor etwa 130 Jah-
ren die Arbeitsleistung der Wärme als „chute de calo-
rique", d. i. als „Absinken der Wärme über ein Tempera-
turgefälle", aufgefaßt. Nur weil Carnot bei dem damaligen
Erkenntnis nicht in der Lage war, das
inken der Wärme hiervon streng unter

derzuhalten, mußte Clausius die Carnot'sche Betrach-
ng als Mißgriff ansehen. Wir wollen hier versuchen, die
rnot'sche Betrachtung unter der Anschauungsart
folgerichtig zu Ende zu denken.

Es soll noch bemerkt werden, daß wir es in unseren
trachtungen mit den Ansätzen, also den sachlichen
d logischen Voraussetzungen der thermodynamischen
echnungen zu tun haben. Mathematische Beweise und
ntwicklungen können uns verständlicherweise bei dieser
fgabe wenig helfen, sie würden unsere Probleme mehr
erschleiern als klären.

Beginnen wir unter diesen Gesichtspunkten damit, zu-
chst einmal kritiklos die wesentlichsten Kennzeichen
r zu besprechenden Anschauungen an Hand der unten-
henden schematischen Übersicht einander gegenüber zu
llen. Natürlich können wir in diesem Rahmen nur einige
r wesentlichsten Grundzüge nennen, was aber umso
eher möglich ist, als ausreichende Darstellungen im
Schrifttum vorliegen.

Anschauungsart I. Zum Vergleich sei die gegen-
wärtige Grundanschauung der Thermodynamik
unter I vorangestellt, wobei wir als ihren Begründer
Clausius nennen. Die physikalischen und rechnerischen
Unterlagen dieser Grundanschauung können als bekannt
vorausgesetzt werden und es genügt auf die Angaben in
der Übersichtstafel hinzuweisen. Unter dieser Grund-
anschauung ist in diesem Zusammenhang auch die von
C. Caratheodory mathematisch weiterentwickelte
Form der Thermodynamik zu erfassen.

Die Anschauungsart II von Bodea[2]) unterschei-
det sich von I nur in rein formaler Hinsicht durch Einfüh-
rung der Dimension der Energie für die absolute Tem-
peratur, indem sie sich dabei ausschließlich auf Betrach-
tungen der Kinetik stützt. Dadurch wird die Entropie zu
einer reinen statistischen Zahl und die Wärmemenge er-
hält wie die Temperatur die Dimension einer Energie. Auf
den Gedanken einer Energie-Verwandelung braucht man
dabei gar nicht zu kommen, da man ja die Wärme schon
vor der sogen. Energieverwandelung nur als eine Form
der mechanischen Energie anzusehen hat. Wenngleich da-
durch manches Unbefriedigende, das aus der zusammen-
gesetzten Dimension kcal/°K kommt, beseitigt wird, so
entfernt sich diese Anschauung infolge ihrer Begründung
mit Unterlagen aus der Kinetik von der reinen Thermo-
dynamik, die als Grundwissenschaft noch unabhängig von
jeder speziellen Vorstellung über die Natur der Wärme
und der Entropie ist.[3])

Man kann die Bodea'sche Darstellung auch bereits

Übersichtstafel zur Weiterentwicklung thermodynamischer Grundbegriffe

Hauptsächlichste Kennzeichen	I Clausius	II Bodea	III Brønsted	IV nach Carnot (weiterentwickelt)
Potential	T °K	T (mit Dimension der Energie)	T °K	T/T_0 dimensionslos (bzw. wie log. Temp.)
Thermische Quantität	Entropie $dS = \frac{dQ}{T}$ kcal/°K	dS dimensionslos	dS kcal/°K	$d\Omega = \frac{T_0}{T} dQ$ kcal = „Carnotsche Wärme"
Eigenschaften der Entropie	Zustandsgröße bzw. Eigenschaft d. Körper	Zustandsgröße rein statistische Zahl	Zustandsgröße „reversibel übertragbar"	Körper haben bestimmte Kapazität für Carnotschen Wärmeinhalt $\Omega = T_0 \int dS$
Energie AL des Carnot-Prozesses	$dS\ (T - T_0)$	$dS\ (T - T_0)$	$dS\ (T - T_0)$	$d\Omega \left(\frac{T}{T_0} - \frac{T_0}{T_0}\right)$ (chute du calorique)
Entropiezunahme des Systems bei irrev. Proz.	Π kcal/°K zunehmend	Π, reine Zahl zunehmend	Π kcal/°K wird „produziert"	$\Pi T_0 = \Delta\Omega$ (Wärmeproduktion) = AL
Thermisch übertragbar	Energie (Q)	Energie	Entropie	Ω strömt wie Wärme
Sonstige Kennzeichen	„Verwandlung" oder „Umsetzung" von Wärme in Arbeit u. umgekehrt	Verwandlung fällt weg, da „Wärme" von vornherein nur mechan. Energie	Keine Verwandlung! Kompensation von Arbeitsverlust durch Entropieerzeugung	Keine Verwandlung! Ω bleibt stets Wärme, fühlbar oder latent, auch bei Expansion. Ω ist kalorische Zustandsgröße und eindeutig durch (p v T) bestimmt.

durch einen sehr einfachen Einwand entkräften. Die Temperatur darf nämlich nicht in ihrer Art (Dimension) variieren, wenn man eine andere Gradskala wählt. Die Frage der Verwendung einer anderen Temperaturskala wurde sehr häufig diskutiert[4]) und der logarithmischen Temperatur grundsätzlich eine gleiche Berechtigung wie der absoluten Temperatur zuerkannt. Im Gebiet der tiefen Temperaturen hat die logarithmische Temperatur sogar unbestreitbare praktische Vorzüge. Den absoluten Nullpunkt, der bei $\tau = -\infty$ liegt, erreicht man mit dieser Skala niemals, wie es auch dem Nernstschen Satz von der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes entspricht. Um eine weitere wichtige Eigenschaft dieser Skala zu nennen ist zu erwähnen, daß der thermodynamische Wirkungsgrad zwischen gleichen Gradintervallen gleich ist.

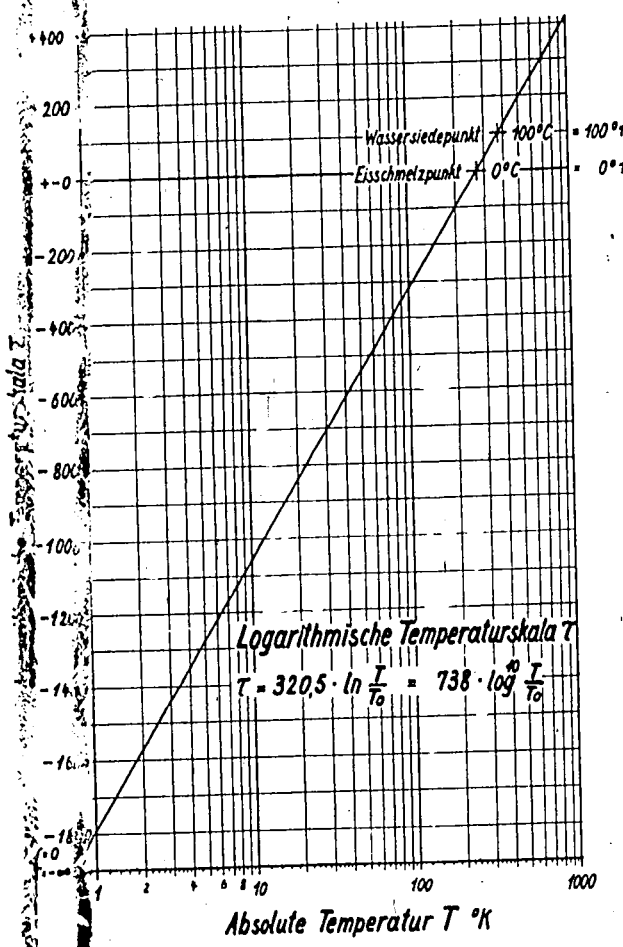


Bild 1. Logarithmische Temperaturskala

Die thermodynamischen Gleichungen werden zwar mit der absoluten Temperatur einfacher, was aber nur für die Bequemlichkeit der Rechnung von Bedeutung ist. Behält man den Eisschmelzpunkt bei 0° C ($T_0 = 273{,}1$) und den Wassersiedepunkt bei 100° C bei, so lautet die Gleichung der logarithmischen Temperatur:

$$\tau = 320{,}5 \ln \frac{T}{T_0} = 738 \log \frac{T}{T_0} \qquad (1)$$

In diese Temperatur geht also nur das Verhältnis zweier absoluter Temperaturen ein. Die logarithmische Temperatur ist somit gegenüber der absoluten Temperatur T dimensionslos. Mit dem von Bodea gemachten Vorschlag würde die Temperatur beim Übergang zur logarithmischen Temperatur in Dimensionslosigkeit umschlagen. Sie widerlegt sich also durch eine logische Analyse selbst und wir brauchen uns hier auch aus diesem Grunde nicht weiter mit ihr zu befassen.

Nebenbei sei bemerkt, daß wir für die Anschauungsart IV gleich jetzt die Schlußfolgerung ziehen wollen und dort von vornherein das Verhältnis T/T_0 als dimensionslose absolute Temperatur einführen. Hierauf müssen wir noch zurückkommen.

Die Anschauungsart III von J. N. Brønsted[5]) geht von der schon genannten Zergliederung der Wärmeenergie in seine beiden Elementarbegriffe aus. Brønsted will weder in den äußeren Formen noch in den Dimensionen von der herkömmlichen seit Clausius gebräuchlichen Grundform der Thermodynamik (Spalte I, s. oben) abweichen, sondern die Thermodynamik nur in strengen Einklang mit den Forderungen bringen, die sich aus einer folgerichtigen Anwendung der Elementarbegriffe, insbesondere der „thermischen Quantität", ergeben.

Aus dem Vergleich mit anderen Energiearten schließt er, daß auch bei der Wärme das Verhalten der „Quantität" keine Ausnahme machen kann und die „thermische Quantität" — wie er die Entropie nennt — bei reversiblen Vorgängen einen „Transport über ein Potentialgefälle" durchmachen muß. In dieser wesentlichen Aussage, die zwar nicht den Gleichungen, aber den Vorstellungen und einzelnen Aussagen der herkömmlichen Thermodynamik auf das entschiedenste widerspricht, haben wir eine Handhabe um seine Anschauungen im Gedankenexperiment durchzuprüfen.

Die nichtumkehrbaren Vorgänge zeichnen sich in diesem System gegenüber umkehrbaren Vorgängen durch eine Erzeugung von Entropie aus, während man in der herkömmlichen Darstellung I in diesem Falle weniger verpflichtend nur von der Entropievermehrung II eines abgeschlossenen Systems spricht.

Theoretisch stützt Brønsted sein System auf Energiebetrachtungen, wobei er, was besonders betont sei, in sehr gründlicher logischer Denkarbeit stets gleichzeitig auf die Kompensation durch parallel sich vollziehende Entropievorgänge achtet. Dadurch stellt er fest, daß die übliche Auffasung der Gewinnung von Arbeit auf Kosten der „Substanz" der Wärmemenge unhaltbar ist. Er kommt so zu drei mathematisch formulierbaren Grundprinzipien:

1. dem auf dem Potentialbegriff aufgebauten Arbeitsprinzip,
2. dem für irreversible Prozesse geltenden Wärmeprinzip,
3. dem auf die Entropievermehrung des Systems aufgebauten Aequivalenzprinzip.

Da das Verständnis seiner Betrachtungen nicht aus mathematischen Prinzipien zu gewinnen ist, soll die weitere Untersuchung an die anschaulichere Betrachtung des Carnotschen Kreisprozesses angeschlossen werden. Dabei können infolge der großen Verwandtschaft der Systeme III und IV beide gemeinsam behandelt werden.

Die Brønsted'sche Anschauung ist von dem Amerikaner Mc. Dougall[6]) angegriffen worden, ohne daß aber von ihm der einzig mögliche und berechtigte Angriffspunkt bemerkt worden wäre. Wenn Brønsted aus dem völlig richtigen Vergleich mit anderen Energiearten mit Recht

e Temperatur beim Übergang zur loga-
ratur in Dimensionslosigkeit umschla-
sich also durch eine logische Analyse
achen uns hier auch aus diesem Grunde
hr zu befassen.

Nebenbei sei bemerkt, daß wir für die Anschauungs-
rt IV gleich jetzt die Schlußfolgerung ziehen wollen und
dort von vornherein das Verhältnis T/T_0 als dimensions-
lose absolute Temperatur einführen. Hierauf müssen wir
noch zurückkommen.

Die Anschauungsart III von J. N. Brønsted[6])
geht von der schon genannten Zergliederung der Wärme-
energie in seine beiden Elementarbegriffe aus. Brønsted
will weder in den äußeren Formen noch in den Dimen-
von der herkömmlichen seit Clausius gebräuch-
der Thermodynamik (Spalte I, a oben)
n die Thermodynamik nur in strengen
Forderungen bringen, die sich aus einer
wendung der Elementarbegriffe, inde-
mischen Quantität", ergeben.
ergleich mit anderen Energiearten schließt
er, daß auch bei der Wärme das Verhalten der „Quantität"
keine Ausnahme machen kann und die „thermische
Quantität" — wie er die Entropie nennt — bei rever-
siblen Vorgängen einen „Transport über ein Potential-
gefälle" durchmachen muß. In dieser wesentlichen
Aussage, die zwar nicht den Gleichungen, aber den Vor-
stellungen und einzelnen Aussagen der herkömmlichen
Thermodynamik auf das entschiedenste widerspricht,
haben wir eine Handhabe um seine Anschauungen im Ge-
dankenexperiment durchzuprüfen.

umkehrbaren Vorgänge zwischen
stem gegenüber umkehrbaren Vorgängen
eugung von Entropie aus, während
ämmlichen Darstellung I in diesem Fall
ntend nur von der Entropievermehrung des
ossenen Systems spricht.

Theoretisch stützt Brønsted sein System auf Energie-
betrachtungen, wobei er, was besonders betont sei, in sehr
gründlicher logischer Denkarbeit stets gleichzeitig auf die
Kompensation durch parallel sich vollziehende Entropie-
vorgänge achtet. Dadurch stellt er fest, daß die übliche
Auffassung der Gewinnung von Arbeit auf Kosten der
„Substanz" der Wärmemenge unhaltbar ist. Er kommt so
zu drei mathematisch formulierbaren Grundprinzipien:

1 dem auf dem Potentialbegriff aufgebauten Ar-
prinzip,

irreversible Prozesse geltenden Wärme-

die Entropievermehrung des Systems als
Aequivalenzprinzip.

Verständnis seiner Betrachtungen nicht zu
mathematischen Prinzipien zu gewinnen ist, soll die we-
tere Untersuchung an die anschaulichere Betrachtung des
Carnotschen Kreisprozesses angeschlossen werden. Da
bei konnten infolge der großen Verwandtschaft der System
III und IV beide gemeinsam behandelt werden.

Die Brønsted'sche Anschauung ist von dem Ame-
kaner Mc. Dougall[8]) angegriffen worden, ohne daß ihr
von ihm der einzig mögliche und berechtigte Angriffs-
punkt bemerkt worden wäre. Wenn Brønsted aus dem Ver-
gleich mit anderen Energiearten auf die

nen reversiblen „Transport von thermischer Quan-
tät" fordert, so muß derselbe auch physikalisch möglich
in. Die Entropie von der Dimension kcal/° K ist aber,
ie die mit ihr dimensionsgleiche Wärmekapazität, ein
ustand oder eine Eigenschaft der Stoffe, die unmöglich
on einem Körper auf einen anderen übergehen kann.
ndererseits ist nicht zu leugnen, daß bei umkehrbaren
orgängen mit Entropieveränderungen stets der wärme-
gebende Körper genau soviel an Entropie verliert als
r mit ihm in Wärmeaustausch stehende Körper an En-
opie gewinnt. Außer dem Wärmeaustausch (und
waigen in die Entropie nicht eingehenden Arbeiten) geht
ber dabei physikalisch überhaupt sonst nichts vor.

Es liegt deshalb geradezu auf der Hand, daß die
ntropie in ihrer physikalischen Art und da-
it ihrer Dimension in Wirklichkeit nicht von
er übergehenden Wärme verschieden sein
ann, was auch sonst mit allen physikalischen
nd mathematischen Forderungen verträg-
ch ist. Hierdurch ist bereits der wesentlichste Unter-
hied zwischen der Brønstedsthen Anschauung III und
er folgenden Darstellung IV gekennzeichnet.

Die Anschauungsart IV wurde im Keim schon
on Carnot vor etwa 120 Jahren veranlagt, konnte aber
it dem Wissen der damaligen Zeit noch nicht in Über-
nstimmung mit dem auf nichtumkehrbare Vorgänge auf-
ebauten Wärmemengenbegriff Q gebracht werden. Mit
en nach den heutigen Erkenntnissen über die Entropie
möglichen Ergänzungen[7]) nimmt die Carnotsche Auf-
assung die in der Übersichtstafel Spalte IV skizzierte
orm an.

Carnot nahm an, daß eine Wärmemenge, die wir
um Unterschied von der Wärmeenergie Q mit $\mathfrak{Q}$ bezeich-
en wollen und die er unter dem Eindruck der damals
och herrschenden Phlogiston-Lehre „calorique" d. i.
Wärmestoff" nannte, seinen Kreisprozeß vom heißen bis
um kalten Wärmebehälter unverändert durchläuft und
chließlich der Menge nach unverändert an das Kühlwasser
bgeliefert wird. Er ließ sich dabei von der Vorstellung
eiten, daß die Arbeit der Wärme ganz ähnlich betrachtet
erden könne, wie die Arbeit einer Wassermenge, die z. B.
n einem Wasserrade über ein Höhengefälle herabsinkt
chute d'eau). Es war ihm daher ein naheliegender Ge-
anke, die Arbeit der Wärme auf ihrem Wege vom Dampf-
essel durch den Arbeitszylinder zum Kondensator sich
n dem Bilde des „Absinkens des Wärmestoffes" (chute
u calorique) über das Temperaturgefälle $T—T_0$ zwischen
essel und Kondensator zu vergegenwärtigen.

Würde man Carnots „Wärmestoff" als Wärme-
nergie (Q) auffassen, so wäre seine Vorstellung natürlich
nhaltbar. Aber der Begriff der Wärme als „Energie"
urde ja erst etwa 20 Jahre später im Anschluß an Julius
obert Mayers Entdeckungen entwickelt. Wenn auch
arnot mit dem Wissen seiner Zeit noch keinen klaren
nterschied zwischen reversiblen und irreversiblen Vor-
ängen machen konnte, so ist doch seine „Wärmestoff"-
orstellung von der einer Energie grundverschieden, denn
selbst sagt bei der Erläuterung seiner Vorstellungen:

„Der in der Feuerung durch die Verbrennung entwik-
elte Wärmestoff durchdringt die Wände des Kessels und
zeugt den Dampf, indem er sich sozusagen demselben
nverleibt. Dieser nimmt ihn mit sich, führt ihn zum Zy-
nder, wo er irgend einen Dienst tut und von dort in den
ondensator, wo er sich in Berührung mit dem dort vor-
handenen kalten Wasser verflüssigt. In letzter Linie be-
mächtigt sich daher das kalte Wasser des Kondensators
des durch die Verbrennung entwickelten Wärmestoffes."[8])

Man muß Carnots „Wärmestoff" daher als Ab-
wärme seines Kreisprozesses ansehen, den er sich aber
durch den ganzen Prozeß hindurch als gleichbleibend
vorstellt. Diese Wärmemenge ist also unserer heutigen
Entropie proportional, die bekanntlich beim Carnotschen
Kreisprozeß ungeändert bleibt. Wir können den Carnot-
schen Kreisprozeß deshalb, wie Abb. 2 zeigt, geradezu als
ein „Verfahren zur „Messung" der Entropie auf-
fassen."

Den heute überholten „Stoffbegriff" der Wärme wollen
wir mit unseren Ausführungen keineswegs verteidigen,
sondern nur nachweisen, daß Carnots Wärmebegriff
schon nach seinem Aufbau im „chute du calorique" in
strengstem Einklang mit den Anforderungen steht, die
nach den allgemeinen Gesetzen der Energetik an einen
„thermischen Quantitätsbegriff" gestellt werden müssen.
Die Carnot'sche Wärmemenge $\mathfrak{Q} = T_0 \cdot S$ kann des-
halb unseren heutigen Entropiebegriff vollwertig ersetzen,
wenn man nur die entsprechenden Folgerungen aus der
Änderung der Dimension zieht.

Die Temperatur T_0 hat dabei den Sinn einer an sich
willkürlichen einheitlichen Vergleichstemperatur für die
Wärmemengen, die auch bei dem Entropiebegriff S un-
ausgesprochenerweise vorhanden ist und dort bei 1° K
liegt. Carnots Anchauung wird verständlich, wenn man
T_0 als Temperatur seines kalten Wärmereservoirs an-
nimmt.

Carnot war noch nicht in der Lage, eine der wesent-
lichsten Folgerungen aus seiner Anschauung zu ziehen,
er konnte nicht den Unterschied in seine Rechnungen ein-
beziehen, der sich zwischen der umkehrbaren und nicht
umkehrbaren Durchführung seines „chute du calorique"
ergibt.

Dieser Unterschied liegt in der Entropievermehrung
des Systems, wie wir sie heute bezeichnen. Wir ergänzen
daher in diesem Punkte Carnots Anschauung und benutzen
dabei zur Erläuterung seinen Kreisprozeß, der sich zwi-
schen den Temperaturen T und T_0 abspielen möge. Um
dabei zugleich die „Messung" der Entropie zu demon-
strieren, wählen wir im besonderen $T_0 = 1°$ K. Da dieser
Kreisprozeß zu den geläufigen Elementen der Thermo-
dynamik gehört, brauchen wir das an sich Bekannte nur
unter den neuen Gesichtspunkten summarisch zu er-
läutern.

Es ist nicht grundsätzlich notwendig, die Meß- oder
Vergleichstemperatur auf 1° K zu legen. Bei einer belie-
bigen Temperatur T_0 mißt man statt der Entropie S ein
Vielfaches (das T_0-fache) davon.

Die beiden Wärmebehälter (s. nachfolgende Abb. 2
linke Seite!) müssen wir nach Brønsted eigentlich En-
tropiebehälter nennen, was dem Sinne nach auch
mit der Auffassung IV nach Carnot übereinstimmt. Da
wie bekannt, die Entropie bei umkehrbaren Vorgängen
gleichbleibt, ist nach dem II. Hauptsatz:

im System I und III: $\dfrac{dQ}{T} = \dfrac{dQ_0}{T_0} = \dfrac{dQ_0}{1}$ in kcal /° K

im System IV: $d\mathfrak{Q} = dQ_0 = dS$ in kcal.

Der Strich über dem Buchstaben S soll auf die geänderte
Dimension hinweisen. Im kalten Wärmebehälter, der zu-

gleich als Kalorimeter I angesprochen werden kann, möge sich verdampfendes Helium von 1° K befinden, so daß jede Wärmeaufnahme durch die Verdampfungswärme des verdampfenden Heliums unmittelbar im Wärmemaß gemessen wird. Jeder Wärmeentzug des heißen Wärmebehälters bzw. des Versuchskörpers wird also unmittelbar als Wärmemenge $dQ_0 = d\mathfrak{Q}_0$ von der Größe der Entropie dS gemessen. Der Sinn der Bezeichnungen geht aus der Abbildung hervor. Wir wollen also besonders beachten:

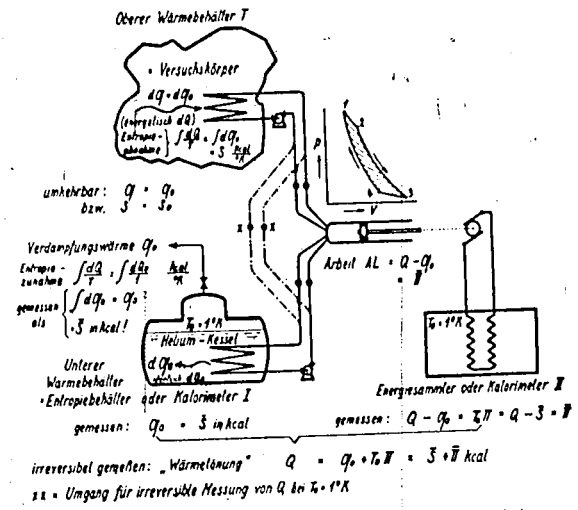


Bild 2. „Messung" der Entropie als Wärmemenge bei der Temperatur $T_0 = 1°K$

Die Natur mißt sozusagen von selbst, ohne daß wir eine Dimensionsveränderung vornehmen müssen, die Entropie im Wärmemaß, d. i. in Kalorien, nur nicht bei einer beliebigen, sondern bei einer einheitlichen Vergleichstemperatur.

Wenn die Hilfsgasmenge im Arbeitszylinder des Kreisprozesses klein genug gehalten wird, vollzieht die in der Abb. 2 angegebene Apparatur von selbst die Integration der Entropie zwischen beliebigen Temperaturgrenzen des Versuchskörpers, indem die Verdampfungswärme $\mathfrak{Q}_0$ des verdampften Heliums gemessen wird. Die Punkte 1—2 der oberen Isotherme klettern dabei mit infinitesimalen Sprüngen an den Adiabaten 2—3 und 1—4 herunter, bis die Isotherme 3—4 bei $T = 1°K$ erreicht wird. Aber der Abkühlungsprozeß kann sinngemäß weiterlaufen, wenn der Carnot-Prozeß als Kältemaschinenprozeß weiterläuft. Es können also grundsätzlich auch Absolutentropien in gleicher Weise „gemessen" werden. Bei Umwandungspunkten behält die Isotherme 1—2 solange ihre Lage bei, bis die Umwandlungswärme abgeführt ist.

Es ergibt sich nun hier die wichtige Frage: Tritt in Wirklichkeit die Wärmeenergie dQ vom oberen Wärmebehälter an das Arbeitsgas des Carnot-Prozesses über und verschwindet zugleich die Entropie dS aus dem Versuchskörper, wie es die Systeme I und II behaupten, oder tritt nur die thermische Quantität aus dem Versuchskörper und die Energie kommt erst durch das Potentialgefälle zustande, wie es die Systeme III und IV im Einklang mit den für alle übrigen Energien gültigen Gesetzen aussagen?

Die Antwort erhalten wir bei der nichtumkehrbaren Durchführung des Prozesses durch Öffnen der Ventile xx und Ausschalten der Carnotschen Arbeitsleistung. Wir messen dann im Kalorimeter I statt dQ_0 die Wärmemenge dQ wie in der gewöhnlichen Kalorimetrie, wobei natürlich dQ größer ist als die soeben bei umkehrbarem Verlauf besprochene Größe dQ_0, denn nun tritt bekanntlich die sogenannte „Entropievermehrung II des Systems" auf, die in den Systemen I bis IV in kcal/° K bzw. in dem System IV in kcal im Kalorimeter I mitgemessen wird. Es tritt also wirklich eine Wärmezunahme oder Wärmeentwicklung im Kalorimeter I gegenüber der umkehrbaren Führung des Prozesses auf, und es ist ebenso berechtigt von einer „Wärme-Produktion" zu sprechen, als wenn dieselbe etwa als Joule'sche Wärme erzeugt worden wäre. Die Energie, die zu dieser Wärmeerzeugung nötig war, ist durch den Transport der thermischen Quantität $\mathfrak{Q}$ über das thermische Potentialgefälle gegeben.

Die Entropievermehrung II bzw. Wärmeentwicklung $T_0\Pi$ kann auch getrennt gemessen werden, wenn wir mit Hilfe der Arbeit des Carnotschen Kreisprozesses im Kalorimeter II der Abb. 2 ebenfalls bei $T_0 = 1°K$ die äquivalente Reibungs- oder Joule'sche Wärme entwickeln. Bei reversibler Durchführung des Prozesses (mit Ausnahme der grundsätzlich irreversibel verlaufenden Wärmeentwicklung im Kalorimeter II) erhalten wir als Summe der Messungen in den Kalorimetern I und II ebenfalls das Ergebnis der direkten irreversiblen Messung dQ. Die Wärmeenergie Q zeigt sich auf diese Weise in einer ganz analogen Gliederung wie die Wärmetönung Q einer chemischen Reaktion:

$$Q = \mathfrak{Q} + T\Pi \qquad (2)$$

wobei in unserem Falle T den besonderen Wert T_0 annimmt. Die Temperatur T_0 hat den Sinn einer gemeinsamen Vergleichstemperatur für die Wärmemengen, wie an anderer Stelle näher erläutert ist.[7]) Sofern es uns nur auf die Gewinnung einer Erkenntnis und nicht auf ein in sich geschlossenes mathematisches System ankommt, können wir uns von Fall zu Fall T_0 auf geeignete Höhe annehmen. Natürlich ändern wir damit jedes Mal den Entropiemaßstab.

In obiger Gleichung 2 entspricht $\mathfrak{Q}$ genau der sogen. reversiblen Reaktionswärme und $T_0\Pi$ der Maximalarbeit oder Reaktionsenergie, da ja $AL = T_0\Pi$ ist. $\mathfrak{Q}/T_0$ ist eine reversible Entropieänderung und wird in der Chemie auch als Reaktionsentropie (Ulich) bezeichnet. Die Bezeichnung T_0 wurde hier im Einklang mit dem oben Erläuterten gewählt, wenngleich sie in der Chemie sinngemäß von Fall zu Fall für die Temperatur jedes isothermen Vorganges verwendet werden kann.

Als Ergebnis erhalten wir also, daß die Entropievermehrung des Systems wirklich eine Wärmemenge bedeutet, die bei 1° K zu Π kcal gemessen wird und die im oberen Wärmebehälter noch nicht vorhanden gewesen sein kann. Auf sie bezieht Brønsted sein Äquivalenzprinzip. Die Arbeit AL stammt also nicht aus der Verwandlung eines Anteils der Wärmemenge Q, die schon im oberen Behälter vorhanden gewesen wäre.

Wir sind damit an einem entscheidenden Punkte angelangt. Alle 4 thermodynamischen Systeme machen darauf Anspruch, nichts anderes als die Tatsachen der Thermodynamik beschreiben und berechnen zu wollen. Betrachtet man die Arbeitsleistung eines Carnotschen Kreisprozesses oder den Zusammenhang der Wärme-

und Ausschalten der Carnotschen Ar[beit]
ir messen dann im Kalorimeter I statt dQ die
ge dQ wie in der gewöhnlichen Kalorimetrie,
ürlich dQ größer ist als die soeben bei umkehr-
berem Verlauf besprochene Größe dQ_0, denn nun tritt bekanntlich die sogenannte „Entropievermehrung II des Systems" auf, die in den Systemen I bis [III] in kcal °K bzw. in dem System IV in kcal im Kalorimeter I mitgemessen wird. Es tritt also wirklich eine Wärmezunahme oder Wärmeentwicklung im Kalorimeter I gegenüber der umkehrbaren Führung des Prozesses auf, und es ist ebenso berechtigt von einer „Wärme-Produktion" zu sprechen, als wenn dieselbe etwa als Joule'sche Wärme erzeugt worden wäre. Die Energie, die zu dieser Erzeugung nötig war, ist durch den Transport der [entsprechenden] Quantität Q̄ über das thermische Potential gegeben.

Entropievermehrung II bzw. Wärmeentwicklung kann auch getrennt gemessen werden, wenn wir der Arbeit des Carnotschen Kreisprozesses im Kalorimeter II der Abb. 2 ebenfalls bei $T_0 = 1°K$ die äquivalente Reibungs- oder Joule'sche Wärme entwickeln. Bei reversibler Durchführung des Prozesses (mit Ausnahme der grundsätzlich irreversibel verlaufenden Wärmeentwicklung in Kalorimeter II) erhalten wir als Summe der Messungen in den Kalorimetern I und II ebenfalls das Ergebnis der direkten irreversiblen Messung dQ. Die Wärmeenergie Q zeigt sich auf diese Weise in einer ganz analogen Gliederung wie die Wärmetönung Q einer chemischen Reaktion:

$$Q = \bar{Q} + T\Pi \qquad 2)$$

In unserem Falle T den besonderen Wert T_0 an[nimmt]. Die Temperatur T_0 hat den Sinn einer gemeinsamen Vergleichstemperatur für die Wärmemengen, wie [an] einer Stelle näher erläutert ist.[3]) Sofern es uns nur um Gewinnung einer Erkenntnis und nicht um ein in sich geschlossenes mathematisches System [zu] tun kommt, können wir uns von Fall zu Fall T_0 auf geeignete Höhe annehmen. Natürlich ändern wir damit jedes Mal den Entropiemaßstab.

In obiger Gleichung 2 entspricht Q genau der sogenannten reversiblen Reaktionswärme und $T_0\Pi$ der Maximalarbeit oder Reaktionsenergie, da ja $AL = T_0\Pi$ ist. Q̄ T_0 ist eine reversible Entropieänderung und wird in der Chemie auch als Reaktionsentropie (Ulich) bezeichnet. Die Bezeichnung T_0 wurde hier im Einklang mit den [vorher] erläuterten gewählt, wenngleich sie in der [Chemie] von Fall zu Fall für die Temperatur jenes [Zustandes] des Vorganges verwendet werden kann.

Ergebnis erhalten wir also, daß die Entropievermehrung des Systems wirklich eine Wärmemenge bedeutet, die bei 1° K zu II kcal gemessen wird und die im oberen Wärmebehälter noch nicht vorhanden gewesen sein kann. Auf sie bezieht Brønsted sein Äquivalenzprinzip. Die Arbeit AL stammt also nicht aus der Verwandlung eines Anteils der Wärmemenge Q, die schon im oberen Behälter vorhanden gewesen wäre.

Wir sind damit an einem entscheidenden Punkte angelangt. Alle 4 thermodynamischen Systeme machen [Anspruch] auf Anspruch, nichts anderes als die Tatsachen der Thermodynamik beschreiben und berechnen zu wollen. Betrachtet man die Arbeitsleistung eines Carnotschen Prozesses oder den Zusammenhang der [Energie-] und Entropiegrößen, so führen alle vier thermodynamischen Systeme mathematisch zum gleichen Ergebnis. Man kann deshalb bei flüchtiger Prüfung leicht zu dem unzutreffenden Urteil kommen, daß die verschiedenen Darstellungen, sofern sie in sich folgerichtig durchgeführt sind, nur mathematische Varianten von ein und derselben Thermodynamik seien. Von fachmännischer Seite ist z. B. die Darstellung IV im Jahre 1936 und 1937 in diesem Sinne nur als eine Alternative der tradionellen Thermodynamik bezeichnet worden.

Führen aber diese Anschauungen trotz richtiger Durchführung ihrer Rechnungen in irgend einem Punkte zu gegenteiligen Behauptungen, so müssen wir entweder nachweisen, daß und warum der neue Ansatz unbrauchbar ist, oder es müßte sich zeigen, daß im Gefüge der heutigen Thermodynamik etwas nicht in Ordnung ist. Wir wollen im folgenden zeigen, daß die Darstellungsweisen III und IV auf einen solchen Punkt in unserer gegenwärtigen Thermodynamik hinweisen.

J. N. Brønsted macht auf einen schwerwiegenden Widerspruch in der herkömmlichen Thermodynamik bei der Betrachtung der Expansionsarbeit aufmerksam. Expandiert ein Gas isotherm und reversibel unter Leistung äußerer Arbeit (vergl. Abb. 3), so behauptet die tradionelle Thermodynamik nach den Angaben ihrer namhaftesten Fachleute[4]), daß die zugeführte Wärme Q vollständig in Arbeit übergeführt bzw. verwandelt werde. Dies ist aber unhaltbar, denn wie Brønsted ausführt, ist bei dieser Vorstellung der mechanische Arbeitsverlust vergessen, den das gespannte Gas durch die Druckabnahme bei der Expansion erleidet. Dieser mechanische Arbeitsverlust und nicht die Wärme liefert die äußere Arbeit. Zugleich bedenkt man nicht, daß die zugeführte Wärme der Erzeugung der Entropiezunahme $\Delta S = Q/T$ des Gases dient (reversibler „Entropietransport"). Diese Entropiezunahme und mit ihr die aufgenommene Wärme steckt aber noch in dem expandierten Gase und kann somit nicht zur „Verwandelung" in äußere Arbeit zur Verfügung stehen. (Die Bezeichnungen erläutern sich im Zusammenhang mit der Abbildung 3.)

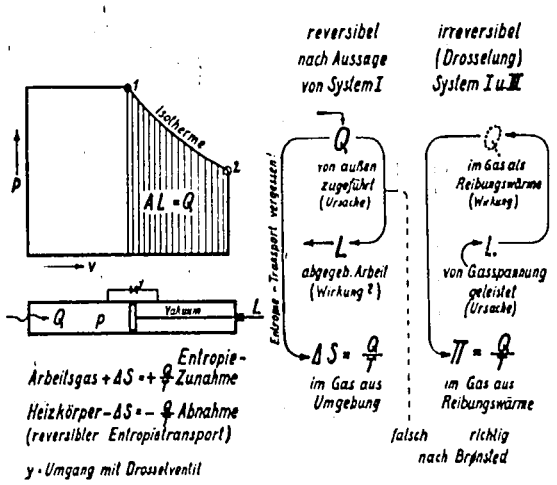


Bild 3. Mechanischer Arbeitsverlust und Entropietransport bei der isothermen Expansion (nach Brønsted)

Aber auch bei irreversibler Gasexpansion (Drosselung bei festgehaltenem Kolben über Ventil Y) gelangt man zum gleichen Endzustand und zur gleichen Entropiezunahme $\Pi = \Delta S = Q/T$, der aber diesmal keine Entropieabnahme der Umgebung gegenübersteht. Die zur Entropiezunahme erforderliche Wärme denkt man sich — und zwar diesmal richtig — durch die Gasreibung bei der Drosselung verursacht. Diese Reibungswärme Q verursacht „von innen her" die Entropievermehrung Π die, wie Brønsted sich ausdrückt, eine „Entropieproduktion" bedeutet. Während bei der umkehrbaren Expansion die Wärme Q (als Ursache) die nach außen abgeführte Arbeit L (als Wirkung) erzeugt haben soll, gibt man bei der nicht umkehrbaren Expansion (ohne Abführung der geleisteten Arbeit) umgekehrt die Gasspannung als Ursache an und betrachtet die Wärmeentwicklung als Folge. Die Ursache der Arbeitsleistung ist aber in Wahrheit in beiden Fällen dieselbe, nämlich die Gasspannung. Der Unterschied besteht nur darin, daß im ersten Falle die Arbeit nach außen abgeleitet wird und der isotherme Verlauf durch Zuführung der Wärme Q von außen her erzwungen wird. Es ist schwer zu verstehen, wie eine so krasse Unlogik, auf der man den ersten Hauptsatz mit aufgebaut hat, sich so lange in der Thermodynamik behaupten konnte. Brønsted fordert deshalb mit Recht, daß man im ersten Hauptsatz nicht wie in der traditionellen Thermodynamik umkehrbare und nicht umkehrbare Vorgänge durcheinander werfen dürfe, und löst dementsprechend die Hauptsätze in die schon genannten Prinzipien auf.

Um auf diesen Punkt nochmals von Seiten der Auffassung IV hinzuleiten, betrachten wir zunächst ein einzelnes Arbeitsspiel eines Carnotschen Kreisprozesses. Dabei achten wir in allen Einzelheiten darauf, ob wir auch in den verschiedenen Zustandsänderungen den nach den energetischen Grundvorstellungen verlangten „Transport" der Carnotschen Wärmemenge bestätigen können, oder ob wir es mit einer bloßen Theorie zu tun haben. Die vier Arbeitsstufen ergeben sich an Hand des pv-Diagramms in Abbildung 2 wie folgt:

1. Wärmeaufnahme Punkt 1—2. Das gespannte Arbeitsgas im Zylinder expandiert isotherm, wobei es durch die Heizschlange mit dem heißen Wärmebehälter (Versuchskörper) in Verbindung steht. Es nimmt dabei die Carnotsche Wärme Q̄ bei der Temperatur T auf, der wir im System I und II den Energiewert Q_1 zuschreiben. Es ist:

$$\bar{Q} = \frac{T_0}{T} Q_1 = (C_p - C_v)\, T_0 \ln \frac{V_2}{V_1} \qquad (3)$$

Da es sich bei dieser isothermen Zustandsänderung um einen Wärmeübergang mit infinitesimalem Temperaturgefälle handelt, können wir von einem Wärmeenergievorgang im eigentlichen Sinne nicht sprechen. Auf mechanische Verhältnisse übertragen ist es so, als wenn wir aus einem Hochbehälter eine Kugel auf die Plattform eines auf gleiche Höhe gebrachten Aufzuges rollen. Wenn das Gas trotzdem Arbeit leistet, so kommt dies doch einfach daher, daß es infolge einer vorherigen Kompression eine mechanische Energie, nicht anders wie in einer gespannten Feder, „gespeichert" enthält, die, wie auch Brønsted betont, heute vergessen wird. Die Wärme spielt dabei nur eine indirekte Rolle.

2. Wärmesenkung Punkt 2—3 (chute du calorique). Das Gas expandiert adiabatisch, wobei sich seine Temperatur auf T_0 des kalten Wärmebehälters senkt. Bei einem solchen Vorgang wird keine Wärme aufgenommen oder abgegeben, und seine Entropie — oder

e wir auch sagen können — sein Carnotscher Wärmeinhalt ändert sich nicht. In unserem mechanischen Vergleichsbeispiel senkt sich die Plattform des Aufzuges mit der daraufliegenden Kugel nach unten.

3. Wärmeabgabe Punkt 3—4. Während das Gas von Punkt 3 bis Punkt 4 komprimiert wird, gibt es dabei die Carnotsche Wärme bei der Temperatur T_0 an den kalten Wärmebehälter ab. Weil nun das Gefälle gegenüber der Vergleichstemperatur T_0 verschwunden ist, wird die Carnotsche Wärme $\mathfrak{Q}$ identisch mit der Abwärme Q_2 in der üblichen Auffassung.

Die abgegebene Wärme ist also:

$$\mathfrak{Q} = Q_2 = (C_p - C_v)\, T_0 \ln \frac{V_3}{V_4} \qquad (4)$$

Im mechanischen Vergleichsprozeß rollt die Kugel gefällslos in den unteren Kugelbehälter hinüber.

4. Temperaturhebung. Nach Abgabe der Carnotschen Wärme soll die Anfangstemperatur T und das Anfangsvolumen V_1 für das nächste Arbeitsspiel wieder erreicht werden. Dies geschieht wiederum adiabatisch. — Im Vergleichsbeispiel wird die Plattform des Aufzuges leer wieder auf die Höhe des Hochbehälters gehoben.

In allen Stufen des Carnotschen Kreisprozesses läßt sich also klar und eindeutig der Transport der Entropie bzw. der Carnotschen Wärmemenge verfolgen, die dabei vom heißen in den kalten Wärmebehälter gelangt. Die Arbeitsleistung beim Carnotschen Kreisprozeß ergibt sich als Produkt zwischen dieser „thermischen Quantität" und dem bereits besprochenen Potentialgefälle $\frac{T}{T_0} - \frac{T_0}{T_0}$, das als treibende Kraft den Transport selbst nicht mitmacht, zu:

$$AL = \mathfrak{Q}\left(\frac{T}{T_0} - \frac{T_0}{T_0}\right) = Q\,\eta \qquad (5)$$

Hierin bedeutet η den thermodynamischen Wirkungsgrad.

in schwarz ausgefüllten Vierecken, die mechanische Arbeit in nur umrahmten Vierecken und die Wärmeentwicklung durch irreversible Entropievermehrung in Schraffur.

Es tritt also deutlich hervor, daß sowohl die Arbeit des Carnotschen Prozesses als auch die bei dem irreversiblen Prozeß durch Entropievermehrung entwickelte Wärme $T_0 \Pi$ erst durch das Temperaturgefälle geschaffen werden, wie auch aus der Erläuterung zu Gleichung 2 hervorgeht. Zugleich wird ersichtlich, daß nicht ein Transport von „fertiger" Energie, wie nach Auffassung I und II stattfindet, sondern nur die energetische Quantität und nicht die treibende Kraft, bzw. das Potentialgefälle dem Transport unterliegt.

Demgegenüber sieht der Vorgang in der üblichen Darstellung (System I) wie folgt aus (Abb. 5), wobei die Wärmemengen schwarz und die Arbeitsleistung nur umrahmt dargestellt sind. Die diagonal durchkreuzten schwarzen Flächen stellen Wärmemengen dar, die ihr Dasein der Entropievermehrung II in Wirklichkeit verdanken.

Man nimmt also bei den Systemen I und II an, daß die Energie und nicht nur die thermische Quantität schon vor dem Durchlaufen eines Temperaturgefälles „fertig" vorhanden sei. Man wird versucht sein, die Berechtigung hierzu aus dem Begriff der potentiellen Energie herzuleiten. Dagegen sprechen aber außer den schon genannten energetischen Grundbegriffen noch mehrere Gründe, von denen hier nur einer genannt sei:

Auch schon im herkömmlichen System bedeutet $T_0 \Pi$ eine Wärmemenge. Man legt ihr nur keine Bedeutung bei, weil man auf ihren Sinn nicht wie im System IV sofort aufmerksam wird. Diese Wärmemenge tritt aber wie die Entropiegröße II erst während des nicht umkehrbaren Meßprozesses als „Wärmeproduktion" neu auf. Sie kann infolgedessen ebensowenig wie die Entropiegröße II schon im oberen Wärmebehälter auf der Temperaturstufe T bereits vorhanden gewesen sein. Die Annahme von Q_1 im oberen Wärmebehälter, in gleicher Größe wie das irreversibel bei T_0 gemessene Q_2, ist also offenbar eine irrtümliche, und man muß $T_0 \Pi$ von Q_1 erst in Abzug bringen. Damit gelangt man aber wiederum zur Carnotschen

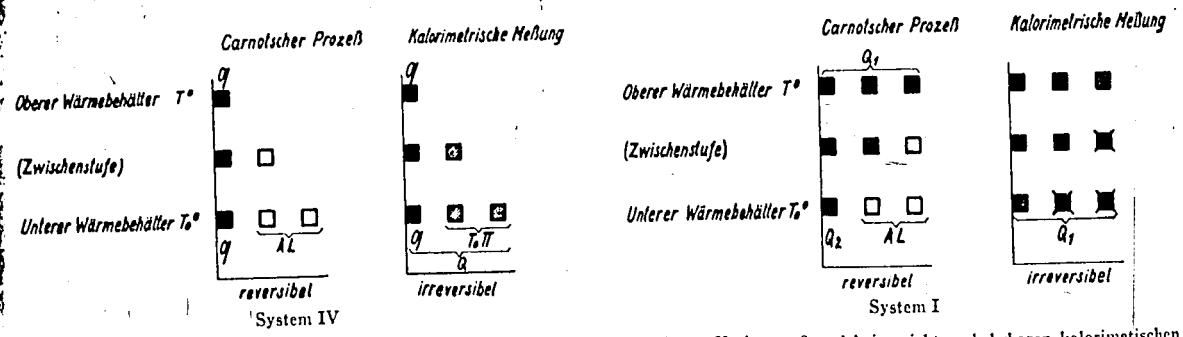


Bild 4 und 5. Wärmemengen im System IV und System I bei einem umkehrbaren Kreisprozeß und beim nicht umkehrbaren kalorimetischen Meßvorgang zwischen den Temperaturen T und To

Die gewinnbare Arbeit erscheint also in derselben Form wie bei anderen energetischen Prozessen. Trotz des gleichen Endergebnisses zeigt sich aber merkwürdigerweise ein ganz wesentlicher Unterschied darin, wie wir uns den Vorgang in den verschiedenen Systemen vorzustellen haben. Versuchen wir, uns den Vorgang schematisch zu vergegenwärtigen, so zeigt sich im Hinblick auf den bei der „Messung der Entropie" besprochenen Vorgang folgendes Bild, wenn wir zuerst System IV betrachten (Vgl. Abb. 4). Die Carnotsche Wärme erscheint dort Wärme $\mathfrak{Q}$. Das folgerichtige Zuendedenken der Aussagen der traditionellen Thermodynamik führt also ebenfalls zum System IV.

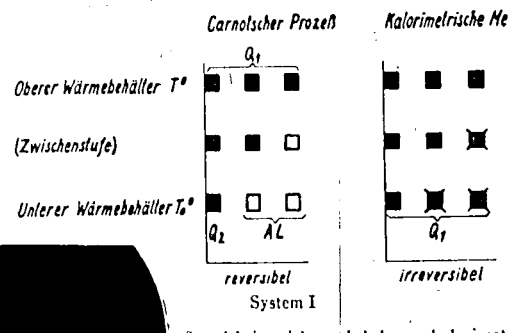
Zum Schluß ist noch eine kleine Betrachtung von besonderem Interesse, weil sie den wichtigsten tatsächlichen Unterschied der Systeme III und IV gegenüber der herkömmlichen Thermodynamik beleuchtet.

Die Abwärme Q_2 eines Carnot-Prozesses ist, da sie bei der Vergleichstemperatur T_0 auftritt, genau identisch mit der Carnotschen Wärme $\mathfrak{Q}$. Beide Systeme sagen aber

…lten Vierecken, die mechanische Ar-
…en Vierecken und die Wärmeentwick-
…ible Entropievermehrung in Schraffur.
… deutlich hervor, daß sowohl die Arbeit des Carnotschen Prozesses als auch die bei dem irreversiblen Prozeß durch Entropievermehrung entwickelte Wärme $T_0 II$ erst durch das Temperaturgefälle geschaffen werden, wie auch aus der Erläuterung zu Gleichung 2 hervorgeht. Zugleich wird ersichtlich, daß nicht ein Transport von „fertiger" Energie, wie nach Auffassung I und II stattfindet, sondern nur die energetische Quantität und nicht die treibende Kraft, bzw. das Potentialgefälle dem Transport unterliegt.

Demgegenüber sieht der Vorgang in der üblichen Dar-
… I) wie folgt aus (Abb. 5), wobei die
…hwarz und die Arbeitsleistung nur um-
… sind. Die diagonal durchkreuzten
…stellen Wärmemengen dar, die ihr Da-
…rmehrung II in Wirklichkeit verdanken.
…so bei den Systemen I und II an, daß
…d nicht nur die thermische Quanti-
tät schon vor dem Durchlaufen eines Temperaturgefälles „fertig" vorhanden sei. Man wird versucht sein, die Berechtigung hierzu aus dem Begriff der potentiellen Energie herzuleiten. Dagegen sprechen aber außer den schon genannten energetischen Grundbegriffen noch mehrere Gründe, von denen hier nur einer genannt sei:

Auch schon im herkömmlichen System bedeutet $T_0 II$ eine Wärmemenge. Man legt ihr nur keine Bedeutung bei, weil man auf ihren Sinn nicht wie im System IV sofort aufmerksam wird. Diese Wärmemenge tritt aber wie die Entropiegröße II erst während des nicht umkehrbaren …s „Wärmeproduktion" neu auf. Sie kann …nsowenig wie die Entropiegröße II schon …behälter auf der Temperaturstufe T be-…gewesen sein. Die Annahme von Q_1 im …hälter, in gleicher Größe wie das irre-…gemessene Q_2, ist also offenbar eine irr-…, man muß $T_0 II$ von Q_1 erst in Abzug bringen. Damit gelangt man aber wiederum zur Carnotschen



System I

…zeß und beim nicht umkehrbaren kalorimetischen
…To

…s folgerichtige Zuendedenken der …Aussagen der traditionellen Thermodynamik führt also ebenfalls zum System IV.

Zum Schluß ist noch eine kleine Betrachtung von be-sonderem Interesse, weil sie den wichtigsten tatsächlichen Unterschied der Systeme III und IV gegenüber der herkömmlichen Thermodynamik beleuchtet.

Die Abwärme Q_2 eines Carnot-Prozesses ist, da s… bei der Vergleichstemperatur T_0 auftritt, genau identisch mit der Carnotschen Wärme Q. Beide Systeme sagen ab…

etwas ganz verschiedenes über ihre Herkunft aus. Da die Carnotsche Wärme, wie bei Abb. 2 nachgewiesen wurde, schon bei der Isotherme 1—2 aus dem oberen Wärmebehälter aufgenommen wurde, und bei der Adiabate 2—3 der Menge nach unverändert, wenn auch latent im Gase verblieb, so ist sie nach der Aussage des Systems IV schon vor der Kompression 3—4 im Arbeitsgas vorhanden. Nach den Aussagen der traditionellen Thermodynamik soll man aber glauben, daß die auf den kalten Wärmebehälter übergehende Wärme aus der vom Arbeitskolben übertragenen, also von außen aufgenommenen mechanischen Kompressionsarbeit stamme. Man schließt dies daraus, daß die innere Energie bei einer isothermen Zustandsänderung gleichbleibt. Dabei bedenkt man aber nicht, daß die Wärme $T_0 S$ in dem Gase vor der Kompression schon latent vorhanden war. Wäre dies nicht der Fall, so könnte die Entropie des Gases im entspannten Zustand nicht größer sein als im verdichteten Zustande.

Die mechanische Kompressionsarbeit wird somit gar nicht erst in Wärme „verwandelt", sondern sie „steckt" infolge des gesteigerten Gasdruckes noch als gespeicherte mechanische Energie im Gase, nicht anders wie in einer gespannten Feder. Die infolge der Volumenverkleinerung freigewordene, vorher im Gase latent gewesene Wärme, die durch Gleichung 4 gegeben ist, strömt einfach nach außen ab. Sofern sie das, wie bei einer adiabatischen Kompression, nicht kann, verursacht sie eine Temperaturerhöhung. Der Carnotsche Wärmeinhalt eines Körpers bleibt also längs einer Adiabaten konstant.*)

Wenngleich die herkömmliche Thermodynamik ihre Definitionen so formuliert, daß man nicht zu falschen Zahlenwerten geführt wird, so verleitet sie doch zu unsachgemäßem Denken. Der Satz: „die Entropie eines geschlossenen Systems kann niemals abnehmen" kann z. B. bei der reversiblen Verdampfung einer Substanz nur den Sinn haben, daß am Ende des Vorgangs der verdampfte Körper reicher an Entropie, die aufheizende Umgebung aber um den gleichen Betrag ärmer an Entropie geworden ist. Dieser Satz ist also ein Hinweis auf den vollzogenen Entropietransport. Sucht man aber auf Grund der herkömmlichen Berechnungsweise nach dem Verbleib der Entropie, so findet man sie nur ein einziges Mal in der Größe $dS = dQ/T$ an der Übergangsstelle, d. h. man weicht dem Nachweis innerhalb des Arbeitskörper aus. Sofern sie aber wirklich eine Körpereigenschaft ist, muß die Abnahme in dem einen und die Zunahme im zweiten Körper im Zustand der betreffenden Körper zum Ausdruck kommen.

Beispiel: Die Verdampfung von 1 kg H_2O sei bei $T_0 = 273°$ K durchgeführt, wobei sich in diesem Falle besonders einfach überschaubare Verhältnisse ergeben.

Da die Verdampfungstemperatur als Vergleichstemperatur angenommen wird, sind alle Wärmemengen zugleich Carnot'sche Wärmen. Es muß daher erwartet werden, daß die Aussagen der Anschauungen I und IV in diesem Fall identisch werden, was aber infolge der Verwandelungsvorstellung bei System I nicht zum Ausdruck kommen kann.

*) Der folgende Teil mußte im Vortrag am 19. 5. 42 aus Zeitmangel gekürzt werden.

Vom Heizmittel wird abgegeben $Q = r = T_0 S$

Die aufgenommene Verdampfungswärme ist:

$T_0 S = 273 \cdot 2{,}7183 =$ 94,7 kcal

Im Dampf ist aber nach der tradionellen Auffassung nur noch enthalten

die innere Energie $U =$ 64,7 kcal

Nach System I ist die Differenz $APv =$ 30,0 kcal nicht mehr im Dampf enthalten, sondern als Volumenarbeit nach außen abgegeben.

System IV weist aber nach, daß diese Wärme von 30 kcal noch im Dampf als latente Wärme enthalten sein muß, sonst könnte sie keinen Beitrag zum entsprechenden Anwachsen der Entropie des Dampfes während des Verdampfens leisten. In der Carnotschen Wärme kommt dies klar zum Ausdruck.

Die Tatsache, daß die Entropie bereits in der herkömmlichen Thermodynamik am sichersten in der Form dQ/T erfaßt werden kann, wobei dQ die in einen Körper ein- oder austretende kalorische Wärme ist, ganz gleich ob, in welcher Form und wieviel von dQ in dem betrachteten Körper latent wird, gibt schon auf Grund der üblichen Betrachtungsweise einen wichtigen Hinweis. Er besteht darin, daß die Größe $d\mathfrak{Q} = dQ\, T_0/T$ in Wahrheit eine unzerstörbare Größe sein muß, die stets fühlbare oder latente Wärme bleibt und sich nie in eine Energie „verwandeln" kann, wie man es von einer echten thermischen Quantität auch erwarten muß.

Besonders zu erwähnen ist, daß das Nernstsche Theorem in der neuen Betrachtungsweise eine leicht verständliche und anschauliche Form gewinnt, worauf hier aber nicht eingegangen werden kann. Ferner sei nochmals ausdrücklich bemerkt, daß kinetische Betrachtungen nicht in den Rahmen unserer Erörterungen einbezogen wurden. Es sollte sich hier allein um die Begriffe der von der Kinetik noch unabhängigen thermodynamischen Grundwissenschaft handeln, die sich nur auf die Thermometrie, Kalorimetrie und auf makroskopische Arbeitseffekte stützt.

Sucht man geschichtlich zu verstehen, warum Carnot mit seinem richtigen Ansatz des „chute du calorique", der den verlangten Entropietransport rechtfertigt, nicht durchgedrungen ist, so zeigt sich das folgende Bild:

Carnot war noch nicht in der Lage, die notwendigen Folgerungen seiner Vorstellung für einen nichtumkehrbaren Prozeß, wie er schon bei einer einfachen kalorimetrischen Messung mit Temperaturgefälle vorliegt, zu ziehen. Er konnte noch nicht erkennen, daß die Wärme im Gegensatz zu anderen Energien ein „quantitätsvariables System" (Brønsted) ist. Erst Clausius fand bei der Durchrechnung des Carnotschen Kreisprozesses, daß keine Übereinstimmung des Carnotschen Wärmestoff-Begriffes mit der Kalorimetrie herrschte. Clausius hätte daraus schließen müssen, daß bei einem nichtumkehrbaren Prozeß im kalten Wärmebehälter mehr Wärme auftritt als bei dem entsprechenden umkehrbaren Vorgang. Dies erschien Clausius offenbar mit dem Stoffbegriff der Wärme unverträglich. Denn wenn auch inzwischen die Wärmestoffvorstellung mehr und mehr aufgegeben wurde, so nahm Clausius doch der Idee nach die Wärmeenergie mit den Eigenschaften der Unzerstörbarkeit an, wie es bei einer Substanz der Fall ist.

Um mit den angedeuteten Begriffsschwierigkeiten fertig zu werden, brauchte Clausius, wie K. Schreber nachweist[10]), 16 Jahre Zeit. Clausius lernte 1834 die grundlegende Arbeit Carnots kennen und hatte sie erst 1850 soweit umgearbeitet, daß sie, nach seiner Ansicht, mit dem Gesetz der Erhaltung der Energie übereinstimmte. Er tat dies, indem er annahm, daß bei einem Arbeit leistenden umkehrbaren Prozeß entsprechend der geleisteten Arbeit weniger Wärme im kalten Wärmebehälter auftritt als bei dem entsprechenden nichtumkehrbaren. Clausius betrachtete also im Gegensatz zu Carnot die Wärmeenergie als thermische Quantität, was den von Brønsted gezeigten Eigenschaften eines energetischen Grundprozesses widerspricht.

Wenn aber Clausius eine Zunahme des „Wärmestoffes" bei nichtumkehrbaren Prozessen zu vermeiden glaubte, so mußte er der Entropie diese Eigenschaft der Zunahme bei nichtumkehrbaren Vorgängen zubilligen. Auf diesem Umwege gelangt man mit jeder Entropiezunahme doch wieder zu einer Wärmeentwicklung oder Wärmeproduktion, wie z. B. bei jedem Reibungsvorgang oder einer Verbrennung ohne weiteres ersichtlich ist.

Das Problem der Wärmezunahme wurde also von Clausius nicht gelöst, sondern nur auf das Gebiet einer Hilfsgröße, der Entropie, verschoben, deren Dimension nicht sofort erkennen läßt, was sie bedeutet. Hätte man die ursprüngliche Carnotsche Auffassung beibehalten und sie nur sinngemäß weiterentwickelt, so hätte das von Jul. Rob. Mayer aufgestellte „Prinzip von der Erhaltung der Kraft" als Prinzip der Erhaltung der thermischen Quantität aufgefaßt werden können. Das letztere ist gleichbedeutend mit der Aussage, daß die Entropie eines geschlossenen Systems niemals abnehmen kann. Wie bekannt, wurde das Prinzip der Erhaltung der Kraft unter dem Einfluß von Helmholtz als Prinzip der Erhaltung der Energie aufgefaßt, und J. R. Mayer hat sich dann selbst zu dieser Auffassung bekannt. Da seit den grundlegenden Entdeckungen J. R. Mayers gerade 100 Jahre vergangen sind, mag es nicht ohne Interesse sein, daß auch die von ihm zuerst ausgesprochene Fassung seines Prinzips, das die Wärme als „Kraft" auffaßt, ebenfalls richtig ist, wenn man seine Ausdrucksweise genau wörtlich nimmt.

Ich hoffe, daß es möglich gewesen ist, aus den wenigen Argumenten, die besprochen werden konnten, zu erkennen, daß es sich bei den Vorschlägen III und IV nicht nur um formal logische Forderungen handelt. Es ist schließlich auch physikalisch etwas anderes, ob sich bei energetischen Vorgängen die Übertragung einer „fix und fertigen" Energie oder nur der Übergang einer energetischen Quantität unter dem Einfluß eines Potentialgefälles vollzieht, das den energetischen Übertragungsvorgang selbst nicht mitmacht, sondern nur der treibende Faktor ist.

Es handelt sich also bei dem besprochenen Thema um die Aufgabe, die richtigen Begriffe zu den Vorgängen zu erhalten, zu denen wir im wesentlichen richtige Gleichungen schon lange besitzen.

Aussprache:

An der Aussprache beteiligten sich die Herren Prof. Dr. Wilke, Regierungsrat Dr. Justi, Dipl.-Ing. Matz und Dr. Patat.

Wilke: Die hier aufgeworfenen Fragen dürften in erster Linie von pädagogischem Interesse sein.

Matz: Es ist unmöglich, aus der Gleichung $dQ = dU + AdL$ den zweiten Hauptsatz herzuleiten. Die Entropie kann jedoch aus dem ersten Hauptsatz hergeleitet werden. Es gibt verschiedene Arbeiten, innere und äußere. Beide müssen miteinander in Einklang gebracht werden und dies geschieht durch den integrierenden Nenner.

Patat: Der Anschauung III kann man zustimmen, denn es ist schließlich nebensächlich, ob man die Arbeitsvorgänge wie Brønsted durch Kompensationen erklärt oder in der üblichen Art durch Äquivalentsetzung von Wärme und Arbeit. Molekularkinetisch gesehen besteht ja zwischen diesen Größen kein Unterschied. Der Anschauung IV kann man aber nicht zustimmen, da sie nicht die Aussagen berücksichtigt, die aus der inneren Energie zu gewinnen sind. Man erklärt sich deshalb die Vorgänge am besten in der bekannten Weise.

Hegelmann: Die innere Energie ist eine Wärmemenge, die sich auf den irreversibel definierten Wärmemengenbegriff stützt. Sie schaltet zwar die Volumenarbeit, aber nicht die thermische Arbeit aus. Auch ein bei konstantem Volumen sich reversibel abkühlender Körper kann infolge des Temperaturgefälles z. B. durch eine ideale Thermosäule noch eine Arbeit AL_u leisten. Man kann die innere Energie U noch analog der Gleichung 2 zerlegen in

$$U = \mathfrak{Q}_u + AL_u$$

Die der inneren Energie entsprechende „reversibel gemessene" Wärmemenge $\mathfrak{Q}_u$ wird dabei im kalten Wärmebehälter erhalten. Spielt sich ein Vorgang (z. B. eine isotherme Expansion) bei konstant gehaltener Vergleichstemperatur ab, so müssen notwendig die Wärmemengen nach der üblichen Auffassung und nach Auffassung IV einander gleich sein; trotzdem sagen beide Auffasungen, wie nachgewiesen wurde, verschiedenes aus. Der Widerspruch kann dann nur in der falschen Deutung der Begriffe in der gegenwärtigen Thermodynamik liegen. Im übrigen müssen auch aus der Anschauung III die gleichen Schlüsse gezogen werden.

Matz: Man sollte unterscheiden, woher die Zunahme der Entropie kommt, von der Wärme oder von der Arbeit. Z. B. ist die Verdampfungswärme über einer Lösung größer als die über einem reinen Lösungsmittel. Dies kommt von der Dampfdruckerniedrigung (Raoult-vant Hoff'sches Gesetz).

Hegelmann: Die von Herrn Matz verlangten Unterscheidungen in der Herkunft der Entropiezunahme bilden einen Ausgangspunkt und wesentlichen Bestandteil der neuen Anschauungen III und IV.

Justi: Der Kernpunkt wurde in der Einleitung genannt. Die Erörterungen über solche Themen sind umso häufiger geworden, je mehr die Thermodynamik Allgemeingut geworden ist. Die Anschauungen an den Technischen Hochschulen sind überdies anders als an den Universitäten. Am wesentlichsten ist, daß die Sätze der Thermodynamik (II. Hauptsatz) als Wahrscheinlichkeitssätze anzusehen sind, wie aus dem folgenden Vortrag hervorgehen dürfte.

Hegelmann: Die neuen Anschauungen sind mit den Wahrscheinlichkeitsgesetzen genau so vereinbar, wie die bisherige Thermodynamik, da sich beide nur durch

fenen Fragen dürften in
Interesse sein.

aus der Gleichung dQ =
ptsatz herzuleiten. Die En-
n jedoch aus dem ersten Hauptsatz hergeleitet
s gibt verschiedene Arbeiten, innere und äußere.
ssen miteinander in Einklang gebracht werden
geschieht durch den integrierenden Nenner.

t: Der Anschauung III kann man zustimmen,
st schließlich nebensächlich, ob man die Arbeits-
wie Brønsted durch Kompensationen erklärt
ler üblichen Art durch Äquivalentsetzung von
nd Arbeit. Molekularkinetisch gesehen besteht ja
diesen Größen kein Unterschied. Der Anschau-
zustimmen, da sie nicht die
us der inneren Energie zu
deshalb die Vorgänge am

Energie ist eine Wärme-
versibel definierten Wärme-
begriff stützt. Sie schaltet zwar die Volumenarbeit,
ht die thermische Arbeit aus. Auch ein bei kon-
Volumen sich reversibel abkühlender Körper
olge des Temperaturgefälles z. B. durch eine ideale
säule noch eine Arbeit AL_u leisten. Man kann die
Energie U noch analog der Gleichung 2 zerlegen in

$$U = Q_u + AL_u$$

inneren Energie entsprechende „reversibel ge-
" Wärmemenge Q_u wird dabei im kalten Wärme-
erhalten. Spielt sich ein Vorgang (z. B. eine iso-
nstant gehaltener Vergleichs-
twendig die Wärmemengen
g und nach Auffasung IV
sagen beide Auffasungen,
schiedenes aus. Der Wider-
r falschen Deutung der Be-
n Thermodynamik liegen. Im
müssen auch aus der Anschauung III die gleichen
se gezogen werden.

atz: Man sollte unterscheiden, woher die Zunahme
ntropie kommt, von der Wärme oder von der Arbeit.
st die Verdampfungswärme über einer Lösung grö-
s die über einem reinen Lösungsmittel. Dies kommt
r Dampfdruckerniedrigung (Raoult-vant Hoff'sches
z).

egelmann: Die von Herrn Matz verlangten Unter-
punkt der Entropiezunahme bilden
wesentlichen Bestandteil der
l IV.

wurde in der Einleitung ge-
r solche Themen sind umso
r die Thermodynamik Allge-
e Anschauungen an den Tech-
en Hochschulen sind überdies anders als an den Uni-
täten. Am wesentlichsten ist, daß die Sätze der Ther-
namik (II. Hauptsatz) als Wahrscheinlichkeitssätze
sehen sind, wie aus dem folgenden Vortrag hervor-
n dürfte.

Hegelmann: Die neuen Anschauungen sind mit
Wahrscheinlichkeitsgesetzen genau so vereinbar, wie
bisherige Thermodynamik, da sich beide nur durch

einen konstanten Faktor (T_0) bei der Entropie unterschieden.

Justi: Auch die traditionelle Anschauung entspricht nicht ganz den statistischen Gesetzen der Thermodynamik, es erscheint also nicht angebracht, die Logik in der Thermodynamik zu überspitzen.

Hegelmann: Auch die statistische Darstellung muß den Anschluß an die gewöhnlichen Begriffe und Meßmethoden der Thermometrie und Kalorimetrie finden. Dies geschieht aber am besten, wenn ihr die allgemeine Thermodynamik als Grundwissenschaft dient, die dadurch unentbehrlich ist.

Schrifttum

1. L. Hausen: „Entropie und Wahrscheinlichkeit." G. H. H.-Berichte. Band II, S. 51 (1932).
2. E. Bodea: „Erweiterung des Giorgi'schen Maßsystems auf die Thermodynamik." C. R. Acad. Sci. Roum 3, Nr. 2 S. 156—162 (1939).
3. H. Hausen: Wie oben, S. 51, Fußnote 1.
4. R. Plank: „Die logarithmische Temperaturskala." Z. Forschung 4, S. 262 (1933).
5. J. N. Bronsted: „Über die Beziehungen zwischen Wärme und Arbeit." Kgl. Dän. Wiss. Ges. Math. Phys. Mitt. XV, 4. (1937). (Dänisch)
   Ferner: „Die Grundlagen und Formulierung der Thermodynam. Hauptsätze." Daselbst, Math. Phys. Mitt. XVI. 10. (1939), (Dän.).
   Ferner: „Über den Begriff der Wärme." Daselbst, Math. Phys. Mitt. XIX 8, (1941), (Englisch).
6. Mac Dougall: Journ. Phys. Chem. 44, 713 (1940).
7. E. Hegelmann: Eine neue thermodynamische Begriffsfassung der Entropie. Ztschr. „Die Wärme", 61. Jahrg., Nr. 32, 33 und 34 (1938).
   Desgl. Erwiderung auf Zuschriften in Z. „Die Wärme", 62. Jahrgang, Nr. 43 (1939).
8. S. Carnot: „Über die bewegende Kraft des Feuers", in Ostwalds Klass. d. exakt. Wissensch., Nr. 37, S. 7 und 8.
9. Max Planck: „Thermodynamik". 5. Aufl., 8. 80 (§ 108).
10. K. Schreber: „Sadi Carnot und Rudolf Clausius" in Sudhoffs Archiv für Geschichte der Medizin und Naturwissenschaften. Bd. 30, Heft 3 (1937).

Statistische Berechnung der kalorischen Daten idealer Gase — Abhängigkeit dieser Daten vom Realzustand der Gase — Thermodynamik von Gasgemischen

Von Dr. phil. habil. E. JUSTI
Professor a. d. Universität Berlin, Reg.-Rat u. Mitglied der PTR.

Inhalt:

In die gewöhnliche „phänomenologische" Thermodynamik gehen die kalorischen Daten (C_v, C_p, S, U, H) der Stoffe als unbekannte Größen ein, die im interessierenden Temperaturbereich gesondert bestimmt werden müssen. Die genaue Messung der kalorischen Daten bereitet besonders bei den Gasen und Dämpfen wegen ihrer geringen Wärmekapazität Schwierigkeiten; indessen kann man aus der „statistischen" Thermodynamik, die die Wärmelehre auf die Mechanik der Moleküle zurückführt, diese kalorischen Daten berechnen, wobei die Molekülkonstanten aus dem Spektrum entnommen werden können. Dieser Berechnungsvorgang wird im 1. Teil elementar erläutert und bis zur Gewinnung von Zahlentafeln durchgeführt, wobei auch die thermische Dissoziation der Gase bei hohen Temperaturen berücksichtigt wird.

Im 2. Teil wird die Druck- und Volumabhängigkeit der kalorischen Daten reiner Gase halbempirisch aus der Zustandsgleichung berechnet; die notwendigen Konstanten werden über das Theorem der übereinstimmenden Zustände auf die kritischen Daten T_K, P_K, V_K zurückgeführt.

Im 3. Teil wird durch Zurückführung des realen Gaszustandes auf die Wechselwirkung der Moleküle gezeigt, warum im allgemeinen bei der Mischung von Gasen Abweichungen von der Additivität der Volumina und Drucke auftreten; sie können halbempirisch dargestellt werden und erweisen sich als von derselben Größenordnung wie die Abweichung zwischen realem und idealem Zustand einer Gase, so daß sie zu unrecht vernachlässigt werden. Die Nichtadditivität der kalorischen Daten und des Joule-Thomson-Effektes werden in Beziehung zu den p-, V-Anomalien gesetzt, und eine Mischungswärme der Gase daraus berechnet und anschaulich gedeutet.

I. Statistische Berechnung der kalorischen Daten idealer Gase.

Die Gesamtheit der drei Hauptsätze der Wärmelehre bezeichnet man als die „phänomenologische" Thermodynamik, weil sie die äußeren Erscheinungen bei beliebigen Energieumsetzungen allgemeingültig beschreibt, ohne irgend welche Voraussetzungen über die Art der teilnehmenden Stoffe oder über die atomistischen Vorgänge bei diesen Erscheinungen zu machen. Gerade diese Allgemeinheit der Hauptsätze beschränkt aber wiederum ihre praktische Anwendbarkeit; um nämlich spezielle Probleme durchrechnen zu können, braucht man die Kenntnis der spezifischen Wärmen der teilnehmenden Stoffe in Abhängigkeit von Temperatur und Druck bzw. vom Volumen, etwa in Form eines Mollier-Diagramms. Die experimentelle Feststellung dieser Daten bereitet nicht nur wegen der großen Anzahl der interessierenden Stoffe Schwierigkeiten; stärkere Hemmnisse liegen vielmehr darin begründet, daß die spezifischen Wärmen gerade der technisch so wichtigen Gase und Dämpfe wegen deren geringer Dichte meist klein sind gegen die Wärmekapazität der Kalorimeter und somit eine genaue Messung vielfach erschweren. So hat eine internationale Organisation seit vielen Jahren größte Mittel und Sorgfalt aufwenden müssen, um die entsprechenden Zahlenwerte allein für Wasserdampf festzustellen, und es schien daher nicht wahrscheinlich, daß man auf diesem Wege in absehbarer Zeit die kalorischen Daten von etwa 40 anderen wichtigen Gasen und Dämpfen kennenlernen würde.

Inzwischen hat sich, von der technischen Wärmelehre zunächst unbeachtet, die statistische Mechanik, gestützt auf die Erfolge der Quantentheorie und der Molekülspektroskopie, so vervollkommnet, daß man heute die kalorischen Daten der meisten praktisch wichtigen Gase in

bhängigkeit von der Temperatur mit einer mehr als ausreichenden Genauigkeit berechnen kann; damit beginnt für die technische Anwendung der drei Hauptsätze eine neue Epoche. Seit mehreren Jahren habe ich mich bemüht, diese Ergebnisse der theoretischen Molekularphysik kritisch zu sammeln, Fehlendes zu ergänzen und durch geeignete Darstellung [1)–6)] diese wichtigen Ergebnisse der reinen Forschung der Praxis zugänglich zu machen; hierbei wurde ich durch den Verein Deutscher Ingenieure, den Deutschen Normenausschuß und andere Organisationen und Unternehmen unterstützt, so daß die deutsche Industrie heute in der Anwendung dieser Forschungsergebnisse als führend angesehen werden kann.

Entgegen der weit verbreiteten Ansicht von der Spezialisierung der Wissenschaften handelt es sich hier umgekehrt um Erfolge der gelungenen Zusammenfassung von so verschiedenen Wissenszweigen wie der Thermodynamik, der Chemie, der Spektroskopie und Atomtheorie, der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Kalorimetrie. Deshalb ist es auch unmöglich, im Rahmen dieser kurzen Darlegungen eine erschöpfende Darstellung dieses Gebietes zu geben. Wer diese Ergebnisse praktisch anwenden will, oder wer Interesse an dieser Leistung des menschlichen Geistes gefunden hat, sei auf die umfassenden Literaturangaben meiner buchmäßigen Darstellung[1)] verwiesen, die außer möglichst einfachen Ableitungen annähernd 200 Zahlentafeln und Kurven bringt.

Die statistische Behandlung der thermodynamischen Fragen, die wir unserem großen Landsmann Boltzmann verdanken, geht von der Vorstellung aus, daß die damals durch die Arbeiten von Julius Mayer, Helmholtz u. a. begründeten beiden Hauptsätze keine exakten Naturgesetze sind, sondern nur Wahrscheinlichkeitssätze, die allerdings mit einer an Gewißheit sehr nahe heranreichenden Wahrscheinlichkeit gelten. Diesen Zusammenhang möchte ich durch ein praktisches Beispiel erläutern: Niemand weiß, wie sein künftiges Leben verlaufen wird, ja selbst die Frage eines kausalen Verlaufes ist umstritten; trotzdem sind die Lebensversicherungsgesellschaften bereit, unser Leben auf Grund einer ganz bestimmten wahrscheinlichen Dauer zu versichern. Da auch die Versicherungsgesellschaft die inneren Zusammenhänge des Schicksals nicht durchschaut, besteht kein logischer Grund, warum diese Schätzung gerade für uns zutreffen sollte; aber die Erfahrung zeigt, daß die zusammengefaßten Prognosen der Versicherungsmathematiker um so eher stimmen, je größer die Anzahl der erfaßten Individuen ist. So behandelte auch Boltzmann das Gas statistisch als eine Vielheit von einzelnen Molekülen, deren individuelles Verhalten wir nicht kennen, da uns ihre Gesetzmäßigkeiten im einzelnen unbekannt sind, über die wir aber als Gesamtheit um so wahrscheinlichere Aussagen machen können, als ihre Anzahl außerordentlich groß ist; enthalten doch nach dem berühmten Satz von Avogadro gleiche Volumina verschiedener Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleichviel Moleküle, und zwar $2{,}69 \cdot 10^{22}$ Stück je Liter bei $p_0 = 1$ atm und $t = 0°$ C.

In einer so großen Anzahl von durcheinander schwirrenden Molekülen befinden sich wahrscheinlich auch solche, die ein vom mittleren Verhalten, wie es die Hauptsätze darstellen, ganz abweichendes Benehmen zeigen; in diesem Zusammenhang verwies Maxwell auf die Bedeutung der überdurchschnittlich schnellen Moleküle, denen man wegen der statistischen Deutung der Gastemperatur als der mittleren kinetischen Energie der Moleküle eine besonders hohe Temperatur zuzuschreiben hat. Gäbe es Dämonen von submikroskopischer Kleinheit, so könnten diese durch Öffnen und Schließen von kleinen Klappen die schnellen von den langsamen Molekülen trennen und so eine Temperaturdifferenz hervorrufen, aus der man Arbeit gewinnen könnte. In dieser Fassung läßt offenbar der zweite Hauptsatz ein Perpetuum mobile zu; neuerdings ist es Lindblad mit den Mitteln der heutigen Experimentiertechnik gelungen, einen solchen Versuch zu realisieren. Er schaltete eine in einem dunklen Kasten (Lichtabschluß!) auf Zimmertemperatur befindliche Sperrschicht-Photozelle in Reihe mit einem hochempfindlichen Galvanometer und beobachtete auch bei wochenlanger Fortsetzung dieses Versuches einen Dauerstrom; dieser Strom entsteht dadurch, daß die Photozelle als Gleichrichter von den in allen Richtungen umherschwirrenden Elektronen der Leitungsdrähte nur diejenigen einer Geschwindigkeitsrichtung hindurchläßt, und unter denen wiederum nur die extrem schnellen, deren kinetische Energie ausreicht, die „Austrittsarbeit" beim Verlassen der betreffenden Elektrode des Gleichrichters aufzubringen. Hier sind also die „Maxwell'schen Dämonen" in den Oberflächenmolekülen der Photozelle verkörpert; dieses Experiment bildet damit eine eindrucksvolle Bestätigung des Wahrscheinlichkeitscharakters der Hauptsätze, ohne allerdings bei der bescheidenen Ausbeute von noch nicht ein millionstel Ampere einen neuen Ansporn für Perpetuum-mobile-Erfinder zu bedeuten.

Vom Standpunkt der Mechanik ist die innere Energie eines Gases offenbar um so größer, je mehr Freiheitsgrade den Molekülen zukommen; drei Freiheitsgrade schreiben wir der rein translatorischen (fortschreitenden) Bewegung der Moleküle in den drei Richtungen des Raumes zu. Ebensoviele Freiheitsgrade kommen im allgemeinen der rotatorischen Energie (dem Drall) der Moleküle zu, da wir nach einem bekannten Satz der Mechanik jede beliebige Drehung des Moleküls in drei Komponenten entsprechend der Drehung um die Hauptträgheitsachsen zerlegen können. Liegen die Atome eines Moleküls auf einer Achse wie bei allen zweiatomigen Molekülen (H_2, N_2, NO usw.) und den vielatomigen „gestreckten" Molekülen (CO_2, C_2H_2 usw.), so wird ein Hauptträgheitsmoment gleich Null, so daß nur zwei rotatorische Freiheitsgrade übrigbleiben. Die rotatorische Energie fällt ganz aus für einatomige Moleküle wie die Egelgase He, Ne, Ar usw., deren Trägheitsmomente wegen des außerordentlich geringen Durchmessers eines Atoms praktisch verschwinden. Als Ergebnis seiner statistischen Rechnung fand Boltzmann, daß die spezifische Wärme C_v eines Gases bei konstantem Volumen $f \cdot R/2$ [kcal/kmol · Grad] betragen sollte; die hierin eingehende Gaskonstante R wurde experimentell zu 1,986 [kcal/kmol · Grad] bestimmt.

Danach sollten alle einatomigen Gase, unabhängig von der Temperatur, wegen $f = 3$, die spezifische Wärme $C_V = 3\,R/2 = 2{,}979$ besitzen, die zweiatomigen und anderen gestreckten Moleküle (CO_2, N_2O, C_2H_2 usw. mit $f = 5$ $C_V = 5\,R/2 = 4{,}964$ aufweisen und alle andern Moleküle mit mindestens drei Atomen wegen $f = 6$ $C_V = 6\,R/2 = 5{,}958$ zeigen. Da nach dem ersten Hauptsatz die spezifische Wärme C_p beim konstanten niedrigen Druck p um R größer ist als C_v, betragen die spezifischen Wärmen Cp in derselben Reihenfolge entsprechend $5\,R/2 = 4{,}964$, bzw. $7\,R/2 = 6{,}951$ bzw. $8\,R/2 = 7{,}944$ [kcal/kmol · Grad].

…chen Energie der Moleküle eine …atur zuzuschreiben hat. Gäbe es …oskopischer Kleinheit, so könnten …l Schließen von kleinen Klappen die …chnellen von den langsamen Molekülen trennen und so …ine Temperaturdifferenz hervorrufen, aus der man Arbeit …gewinnen könnte. In dieser Fassung läßt offenbar der …zweite Hauptsatz ein Perpetuum mobile zu; neuerdings …ist es Lindblad mit den Mitteln der heutigen Experimen…tiertechnik gelungen, einen solchen Versuch zu reali…sieren. Er schaltete eine in einem dunklen Kasten (Licht…abschluß!) auf Zimmertemperatur befindliche Sperrschicht…Photozelle in Reihe mit einem hochempfindlichen Galvano…meter und beobachtete auch bei wochenlanger Fortsetzung …dieses Versuches einen Dauerstrom; dieser Strom ent… Photozelle als Gleichrichter von den …umherschwirrenden Elektronen der …jenigen einer Geschwindigkeits…und unter denen wiederum nur die …n kinetische Energie ausreicht, die … Verlassen der betreffenden Elek…ters aufzubringen. Hier sind also die „Maxwell'schen Dämonen" in den Oberflächenmolekülen der Photozelle verkörpert; dieses Experiment bildet damit eine eindrucksvolle Bestätigung des Wahrscheinlichkeitscharakters der Hauptsätze, ohne allerdings bei der bescheidenen Ausbeute von noch nicht ein millionstel Ampere einen neuen Ansporn für Perpetuum-mobile-Erfinder zu bedeuten.

Vom Standpunkt der Mechanik ist die innere Energie eines Gases offenbar um so größer, je mehr Freiheitsgrade …n Molekülen zukommen; drei Freiheitsgrade schreiben …torischen (fortschreitenden) Bewegung …rei Richtungen des Raumes zu. Eben…kommen im allgemeinen der rota…m Drall) der Moleküle zu, da wir …Satz der Mechanik jede beliebige …s in drei Komponenten entsprechend …e Hauptträgheitsachsen zerlegen kön…nen. Liegen die Atome eines Moleküls auf einer Achse wie bei allen zweiatomigen Molekülen (H_2, N_2, NO usw.) und den vielatomigen „gestreckten" Molekülen (CO_2, C_2H_2 usw.), so wird ein Hauptträgheitsmoment gleich Null, so daß nur zwei rotatorische Freiheitsgrade übrigbleiben. Die rotatorische Energie fällt ganz aus für einatomige Moleküle wie die Egelgase He, Ne, Ar usw., deren Trägheitsmomente wegen des außerordentlich geringen Durchmessers eines Atoms praktisch verschwinden. Als Ergebnis seiner statistischen Rechnung fand Boltzmann, daß die …zifische Wärme C_v eines Gases bei konstantem Vo…mol · Grad] betragen sollte; die hierin …nte R wurde experimentell zu 1,986 …timmt.

…le einatomigen Gase, unabhängig von …gen f = 3, die spezifische Wärme C_v …sitzen, die zweiatomigen und anderen gestreckten Moleküle (CO_2, N_2O, C_2H_2 usw. mit f = 5 $C_v = 5\,R/2 = 4{,}964$ aufweisen und alle andern Moleküle mit mindestens drei Atomen wegen f = 6 $C_v = 6\,R/2 = 5{,}958$ zeigen. Da nach dem ersten Hauptsatz die spezifische Wärme C_p beim konstanten niedrigen Druck p um R größer ist als C_v, betragen die spezifischen Wärmen C_p in derselben Reihenfolge entsprechend $5\,R/2 = 4{,}964$, bzw. $7\,R/2 = 6{,}951$ bzw. $8\,R/2 = 7{,}944$ [kcal/kmol · Grad].

Tatsächlich schien es zunächst, als ob diese Boltzmann'sche Theorie experimentell ausnahmslos bestätigt sei. Nachdem aber vor über 50 Jahren auf Betreiben von Werner von Siemens die Physikalisch-Technische Reichsanstalt mit der Aufgabe der Durchführung von Präzisionsmessungen gegründet war, ergaben sich unverkennbare Abweichungen zwischen Meßergebnis und Berechnung. Einerseits fanden nämlich Holborn, Henning und Austin, denen die Ausdehnung solcher Messungen bis zu sehr hohen Temperaturen gelang, daß die spezifische Wärme von Luft, Stickstoff, Wasserdampf und Kohlensäure mit steigender Temperatur anwächst, andererseits beobachteten Scheel und Heuse einen Abfall der spezifischen Wärme des Wasserstoffs zwischen Zimmertemperatur und der Siedetemperatur der Luft.

Solche auch von anderer Seite bestätigten Beobachtungen ließen bei der inneren Folgerichtigkeit der Boltzmann'schen Theorie vermuten, daß irgendeine fundamentale Annahme unrichtig sein mußte; die richtige Erklärung fand Einstein, indem er auf die Anwendbarkeit der bereits vorliegenden Theorie der Strahlung schwarzer Körper von Planck hinwies. Planck war nämlich durch die mathematische Analyse der Messungen von Lummer und Pringsheim, ebenfalls in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, über die spektrale Intensitätsverteilung der Hohlraumstrahlung zu der, umwälzenden, aber zunächst bezüglich ihrer Tragweite nicht weiter beachteten Folgerung gelangt, daß auch die Energie atomistisch sei, d. h. aus nicht unbegrenzt weiter teilbaren Energie-„Quanten" bestehe, so daß jede Energiemenge ein ganzzahliges Vielfaches des „Wirkungsquantums" $h \cdot \nu$ bildet ($h = 6{,}55 \cdot 10^{27}$ Erg. sec. „Planck'sche Konstante", ν Schwingungsfrequenz). Wendete man die Planck'sche Quantentheorie sinngemäß auf die bisher noch nicht berücksichtigten Freiheitsgrade der Schwingungen der Atome innerhalb eines Moleküls an, so erhielt man einen zusätzlichen Schwingungsanteil der spezifischen Wärme

$$C_{osc} = R \cdot \left(\frac{h\nu}{KT}\right)^2 \cdot e^{\frac{\nu}{KT}} \Big/ \left(e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1\right)^2 .$$

Die Größe $h\nu/k$ hat offenbar die Dimension einer Temperatur und wird demgemäß als „charakteristische Tempera…

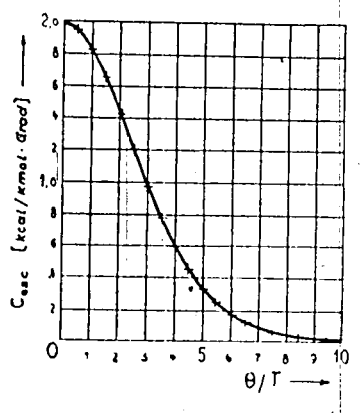


Bild 1. Schwingungsteil der spezifischen Wärme nach der Planckschen Formel $C_{osc} = P(\Theta/T)$ (kcal/kmol Grad) als Funktion von Θ/T

…tur" bezeichnet, da sie die Temperaturabhängigkeit von C bestimmt; sie kann durch spektroskopische Beobachtungen der von den betreffenden Gasen absorbierten oder ausgesandten Lichtfrequenz ν bestimmt werden, so daß in der Formel für C_{osc} keine verfügbaren Größen mehr auftreten.

Bild 1 zeigt ausgerechnet den Verlauf der Schwingungswärme C_{osc} für einen Schwingungsfreiheitsgrad als Funktion von Θ/T. Hiernach steigt C_{osc} vom Wert 0 bei niedrigen Temperaturen zunächst beschleunigt, dann verzögert an, um schließlich bei hohen Temperaturen (kleinem Θ/T) den Grenzwert R [kcal/kmol. Grad] zu erreichen. Es ist also eine unmittelbare Folge der Aufgabe des Boltzmann'schen „Äquipartitionstheorems", d. h. der Annahme von der gleichmäßigen Verteilung der Energie auf alle Freiheitsgrade und der Einführung der Atomistik der Energie, daß die spezifische Wärme nicht temperaturunabhängig ein ganzzahliges Vielfaches von R/2 betragen muß, sondern kontinuierlich von z. B. 7 R/2 auf 8 R/2 übergehen kann, wie es zuerst Austin, Henning und Holborn experimentell beobachtet hatten.

In Bild 2 wird ein Vergleich zwischen den besten kalorimetrischen Meßwerten der spezifischen Wärme C_p und den theoretisch berechneten Kurven gezogen, und

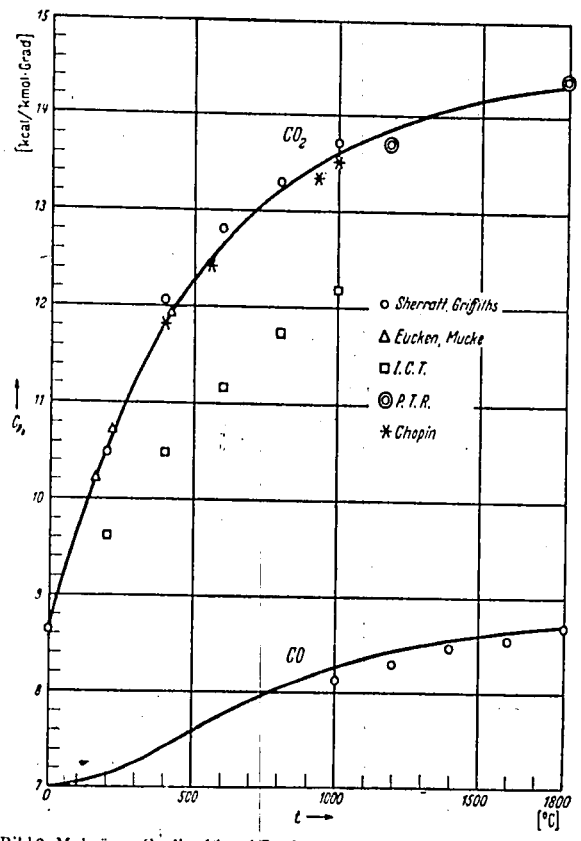


Bild 2. Molwärme C_{po} [kcal/kmol Grad] der Kohlensäure (oberd Kurve) und des Kohlenoxyds (untere Kurve) in Abhängigkeit von der Temperatur t (°C) Eingetragen sind Meßpunkte von Sherrat und Griffiths (o) nach dem Schallgeschwindigkeitsverfahren, von Eucken u. Mücke (△) nach dem Expansionsverfahren, von der P.T.R. (◎) und Chopin (✱) nach dem Störungsverfahren, außerdem Werte für die mittlere Molwärme nach den International Critical Tablqs (□).

zwar für CO (untere Kurve) und CO_2 (obere Kurve); besonders bei der oberen Kurve, für die zahlreiche Meßwerte verschiedener Forscher nach verschiedenen Präzisionsmethoden vorliegen, ist die Übereinstimmung die denkbar beste. Die theoretische Kurve wurde für CO mit der charakteristischen Temperatur $\Theta = 3060°$ abs, entsprechend einem Schwingungsfreiheitsgrad, und für CO_2 mit den Θ-Werten $\Theta_1 = \Theta_2 = 960°$, $\Theta_3 = 1830°$ und $\Theta_4 = 3280°$, entsprechend vier Schwingungsfreiheitsgraden, durchgeführt. Durch besondere Rechentafeln (Tab. 28—30 meines Buches) lassen sich ebenso mittels des Rechenschiebers die mittleren spezifischen Wärmen, Enthalpien,

Entropien und freien Enthalpien in wenigen Minuten ausrechnen. Eine noch schärfere Prüfung kann man mit dem statistisch errechneten Betrag der Entropie etwa für die Normtemperatur T = 298° abs (t = 25° C) und p = 1 atm abs ausführen; man vergleicht ihn nämlich mit demjenigen Entropiewert, den man durch Messung der spezifischen Wärme des kondensierten Gases von tiefsten Temperaturen an (z. B. 10° abs), sowie seiner Schmelz- und Verdampfungswärme nach dem Nernst'schen Wärmesatz erhält. Solche Messungen sind deshalb besonders genau, weil bei tiefen Temperaturen die Molwärme der kondensierten Gase viel größer als die Wärmekapazität der Kalorimeter ist, gerade umgekehrt als bei höheren Temperaturen, und sich deshalb genauestens messen läßt; sehr scharf ist diese Prüfung, weil der Verlauf der spezifischen Wärme über einen Bereich von beinahe 300° richtig berechnet sein muß, nicht nur für eine einzige Temperatur. Wie eine Gegenüberstellung der besten Meßwerte und theoretischen Zahlen für 27 Gase zeigt (Tab. 93 a. a. O.[1]), besteht allgemein eine ausgezeichnete Übereinstimmung; so berechnet man z. B. für CO_2 eine Standardentropie $S_{298^0} = 51{,}09$, die mit dem kalorimetrischen Wert von 51,11 [kcal/kmol · Grad] innerhalb der geringen Fehlergrenzen übereinstimmt. Ebenso sicher ist es, daß die alte Boltzmann'sche Theorie von der Temperaturunabhängigkeit der spezifischen Wärme und Entropie für alle einatomigen Gase (He, Ar, Ne usw.) wegen des Fehlens „innerer" (z. B. rotatorischer oder Schwingungs-Freiheitsgrade) auch quantitativ zutrifft.

Diese „elementare" Theorie der kalorischen Daten der Gase ist wesentlich vervollständigt und verbessert worden durch die Einführung der „Zustandssumme" Z, die uns nicht nur die Berechnung des obenerwähnten Abfalls von C_p des Wasserstoffs bei tiefen Temperaturen nach den Messungen von Scheel und Heuse erklärt, sondern auch praktisch wichtige Verfeinerungen bringt, wie etwa eine Überschreitung des Grenzwertes R der Schwingungswärme C_{osc} des Sauerstoffs bei einigen 1000° C (vgl. Bild 21 und Tab. 98 meines Buches). Planck[7]) hatte diese Funktion, die die Größe und die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Energiestufen enthält, eingeführt, um aus ihr durch einmalige oder zweimalige Differentiation nach T bzw. 1/T die Größen C, S, H usw. zu erhalten. Sie lautet einfach, wenn man mit $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2 \ldots$ die Größe des Energieunterschiedes hν zwischen zwei aufeinanderfolgenden Quantengrößen und unter $g_0, g_1, g_2 \ldots$ usw. die mathematische Wahrscheinlichkeit des betreffenden Energiezustandes versteht:

$$Z = g_0 \cdot e^{-\varepsilon_0/kT} + g_1 \cdot e^{-\varepsilon_1/kT} + g_2 \cdot e^{-\varepsilon_2/kT} + \ldots$$
$$\ldots + g_n \cdot e^{-\varepsilon_n/kT}$$

Unter der Annahme, daß die Rotation, Schwingung oder ähnliche Energieäußerungen der Moleküle voneinander unabhängig sind, kann man diese Zustandssumme Z in Teilsummen der verschiedenen Freiheitsgrade zerlegen, z. B. $Z = Z_{rot} \cdot Z_{osc}$. Nimmt man nun für die Schwingung der Atome innerhalb des Moleküls harmonischen Charakter an, d. h. $\varepsilon_1 = 2 \cdot \varepsilon_0$; $\varepsilon_2 = 3 \cdot \varepsilon_0$; $\varepsilon_3 = 4 \cdot \varepsilon_0$ usw. und setzt, dem Ergebnis spektraler Intensitätsmessung an „Oscillationslinien" entsprechend, alle g = 1, so erhält man die Formel $Z = e^{-\varepsilon_0/kT} + e^{-2\varepsilon_0/kT} + e^{-3\varepsilon_0/kT} + \ldots$, die nach einer bekannten Formel als Summe $1/(e^{-\varepsilon_0/kT} - 1)$ liefert, wonach sich wegen der Beziehung $C_{osc} = -R \cdot d\,[d \ln Z/d(1/T)]/dT$ wiederum mit $\varepsilon_0/k = \Theta$ die obenangeführte Formel für die Schwingungswärme ergibt. Man ersieht also hieraus, daß hier Harmonizität der Schwingungen vorausgesetzt ist, und es gelingt, indem man nach dem Vorschlag von Giauque statt der ganzzahligen Vielfachen der Grundschwingung einfach die spektroskopisch, also empirisch, beobachteten Energieunterschiede einsetzt, auch die Anharmonizität in ihrem Einfluß auf die Schwingungswärme zu fassen, die z. B. beim H_2 die spezifische Wärme bei 1000° abs um nur 0,010, bei 2000° um 0,097, und bei 5000° abs sogar um 0,519 [kcal/kmol · Grad] erhöht. Bei diesem Verfahren der „gliedweisen Summierung" erhält man auch die Wechselwirkungsenergie zwischen Schwingung und Drehung, die man anschaulich als „Streckungseffekt" des kreisenden Moleküls bezeichnet. Er ist beim leichten H_2 mit 0,072 [kcal/kmol · Grad] bei 1000° abs, 0,135 bei 2000° und maximal 0,181 bei 5000° besonders groß. Damit ist die Leistungsfähigkeit der Zustandssummenmethode noch keineswegs erschöpft; sie lehrt uns auch, daß wegen des Übergangs bestimmter Elektronen von einem niedrigeren zu einem höheren Energiezustand bei gewissen Temperaturen steile Buckel der C_p, T-Kurve entstehen, wie man es z. B. für Stickoxyd bei der Siedetemperatur der Luft kalorimetrisch [8]) [9]) nachweisen konnte (vgl. Bild 3), und sie zeigt uns, daß nach Ausweis des Spektrums Wasserstoff zwei verschiedene

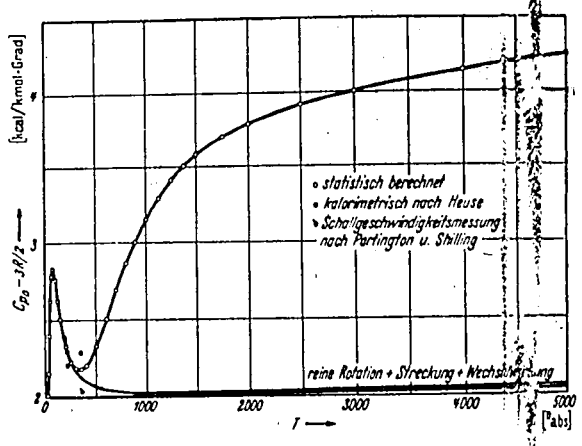


Bild 3. C_{p_0} von NO.

Molekülarten besitzen muß, von denen die eine nur die einfache, dreifache, fünffache Energie des Rotationsquantums, die andere nur den nullfachen, doppelten, vierfachen Betrag aufzunehmen vermag. Der kalorimetrische Nachweis dieser beiden Wasserstoffmodifikationen [10]) verschiedener spezifischer Wärme bildet einen besonderen Triumph der statistischen Thermodynamik.

Die große Genauigkeit der so berechneten kalorischen Daten der Gase geht letztlich darauf zurück, daß sie experimentell auf spektroskopischen Wellenlängenmessungen beruhen, die als (Lichtwellen-) Längenmessungen besonders genau ausführbar sind, und daß sie keine spezielleren Annahmen als die Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes in seiner quantenstatistischen Fassung der Zustandssumme machen. Die Zuverlässigkeit der Berechnung sinkt nur dann, wenn das Spektrum wegen allzu vieler Linien unentwirrbar wird. So besitzt das Benzolmolekül C_6H_6 wegen seiner Molekülzahl (N = 12), 3 N − 6 = 30 Grundschwingungen, die man schwer scheiden kann, von ihrer Wechselwirkung untereinander und mit anderen Freiheits-

[redacted]ich wegen der Beziehung $C_{osc} = [\ldots]/dT$ wiederum mit $\varepsilon_0/k = \Theta$ die [redacted]rmel für die Schwingungswärme ergibt. [redacted]eraus, daß hier Harmonizität der Schwin[redacted]esetzt ist, und es gelingt, indem man nach dem Vorschlag von Giauque statt der ganzzahligen Vielfachen der Grundschwingung einfach die spektroskopisch, also empirisch, beobachteten Energieunterschiede einsetzt, auch die Anharmonizität in ihrem Einfluß auf die Schwingungswärme zu fassen, die z. B. beim H_2 die spezifische Wärme bei 1000° abs um nur 0,010, bei 2000° um 0,097, und bei 5000° abs sogar um 0,519 [kcal/kmol · Grad] erhöht. Bei diesem Verfahren der „gliedweisen Summierung" erhält man auch die Wechselwirkungsenergie zwischen Schwingung und Drehung, die man anschaulich als [redacted]ungseffekt" des kreisenden Moleküls bezeichnet. [redacted]chten H_2 mit 0,072 [kcal/kmol · Grad] bei [redacted] bei 2000° und maximal 0,181 bei 4[redacted]00°. [redacted]Damit ist die Leistungsfähigkeit der Zu[redacted]thode noch keineswegs erschöpft; sie [redacted] daß wegen des Übergangs bestimmter [redacted]einem niedrigeren zu einem höheren Energiezustand bei gewissen Temperaturen steile Buckel in der C_p, T-Kurve entstehen, wie man es z. B. für Stickoxyd bei der Siedetemperatur der Luft kalorimetrisch [8] [9]) nachweisen konnte (vgl. Bild 3), und sie zeigt uns, daß nach Ausweis des Spektrums Wasserstoff zwei verschiedene

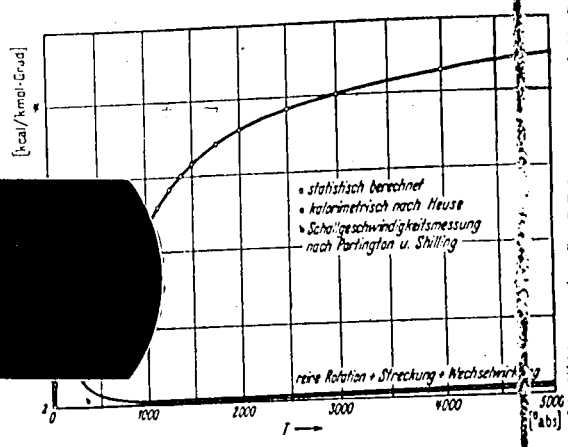


Bild 3. C_{p_0} von NO.

Molekülarten besitzen muß, von denen die eine nur die einfache, dreifache, fünffache Energie des Rotationsquantums, die andere nur den nullfachen, doppelten, vierfachen Betrag aufzunehmen vermag. Der kalorimetrische Nachweis dieser beiden Wasserstoffmodifikationen [10]) verschiedener spezifischer Wärme bildet einen besonderen Triumph der statistischen Thermodynamik.

Die Genauigkeit der so berechneten kalorischen [redacted] geht letztlich darauf zurück, daß sie experimentell spektroskopischen Wellenlängenmessungen, [redacted]als (Lichtwellen-) Längenmessungen besonders [redacted]ausführbar sind, und daß sie keine spezielleren Annahmen als die Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes in seiner quantenstatistischen Fassung der Zustandssumme machen. Die Zuverlässigkeit der Berechnung sinkt nur dann, wenn das Spektrum wegen allzu vieler Linien unentwirrbar wird. So besitzt das Benzolmolekül C_6H_6 wegen seiner Molekülzahl (N = 12), 3 N — 6 = 30 Grundschwingungen, die man schwer scheiden kann, von ihrer Wechselwirkung untereinander und mit anderen Freiheit-

$\ldots + \ldots$

$\varepsilon_0/kT \ldots 1)$

graden ganz zu schweigen. Daher ist es einstweilen zuverlässiger, für vielatomige Moleküle kalorimetrische Werte zu verwenden; doch werden auch hier rasche Fortschritte gemacht, teils, indem man gelernt hat, jedem C- und H-Atom in bestimmten Bindungen eine stets annähernd wiederkehrende Frequenz zuzuschreiben, teils, indem man mechanische Molekülmodelle auf ihre möglichen Schwingungen untersucht hat, wozu man die verschieden schweren Atome durch Holzkugeln entsprechender Massenverhältnisse und die Bindungskräfte durch Spiralfedern abgemessener Kraft nachbildet. (Bild 4.)

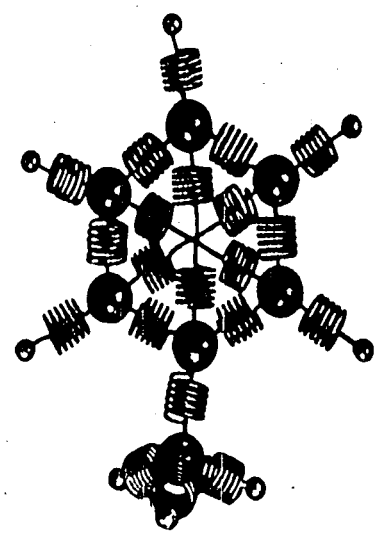


Bild 4. Mechanisches Modell des Toluol-Moleküls

Sehr wertvoll ist die Genauigkeit solcher statistisch ermittelten Zahlen, wenn man die Reaktionsgleichgewichte berechnen muß, die durch die Differenz der freien Enthalpien der teilnehmenden Gase bestimmt werden, also meist kleine Differenzen großer Zahlen sind. Besonders durch den Energiebedarf des thermischen Zerfalls („Dissoziation") der Gase bei höheren Temperaturen entsteht ein beträchtlicher zusätzlicher Energiebedarf, der bisher wegen seiner wenig bekannten Größe z. B. bei der Aufstellung der Energiebilanz von Verbrennungsmotoren nicht berücksichtigt wurde. Bild 5 zeigt für die Beispiele des Wasserstoffs, Stickstoffs, Sauerstoffs und Stickoxyds, daß tatsächlich die „eigentliche" spezifische Wärme, wie sie unter Ausschluß einer chemischen Reaktion gemessen oder berechnet wird, durch den Dissoziationsanteil C_D der spezifischen Wärme beispielsweise um das 50fache übertroffen werden kann, so daß die Technik auf diesen Vorgang ihr Augenmerk richten muß.

Hier liegen noch gerade für die chemische Industrie wichtige Probleme, die von anderen Zweigen der Physik zu lösen sind. Freilich hat man auch in der Technik den praktischen Fortschritt nicht allein von der Zweckforschung zu erwarten; als Boltzmann und Planck die statistischen Methoden der Thermodynamik schufen, hätten sie deren spätere praktische Anwendbarkeit oder gar Wichtigkeit nicht zu behaupten gewagt. An diesem Beispiel sieht man besonders deutlich, daß die von manchen Nützlichkeitsaposteln geforderte Beschränkung auf die Zweckforschung diejenigen Fortschritte der technischen Wärmelehre unterbunden hätte, über die ich hiermit kurz berichten durfte.

II. Abhängigkeit der kalorischen Eigenschaften der Gase vom realen Gaszustand (pV ≠ RT).

Bei der soeben erläuterten Berechnungsmethode wurde stillschweigend angenommen, daß die kalorischen Daten eines Moles das $N_L$fache eines einzelnen Moleküls (im Mittel) betragen, daß sich also die molare Energie aus den Energien der einzelnen Atome additiv zusammensetzt. Diese Annahme wird zutreffen, wenn die Zustände der einzelnen Moleküle voneinander unabhängige Ereignisse im Sinne der Wahrscheinlichkeitslehre sind, und eine gegenseitige Beeinflussung der Moleküle wird dann ausgeschlossen sein, falls sie genügend weit voneinander entfernt sind, wie es bei hinreichend großem spezifischem Volumen der Fall ist. In diesem Falle ergibt die kinetische Gastheorie nach Boltzmann das ideale Gasgesetz pV=RT; wir wenden uns also nunmehr der Frage zu, wie sich die kalorischen Daten der Gase ändern, wenn deren Dichte soweit zunimmt, daß die einzelnen Moleküle infolge größerer Annäherung aufeinander merkliche Kräfte ausüben,

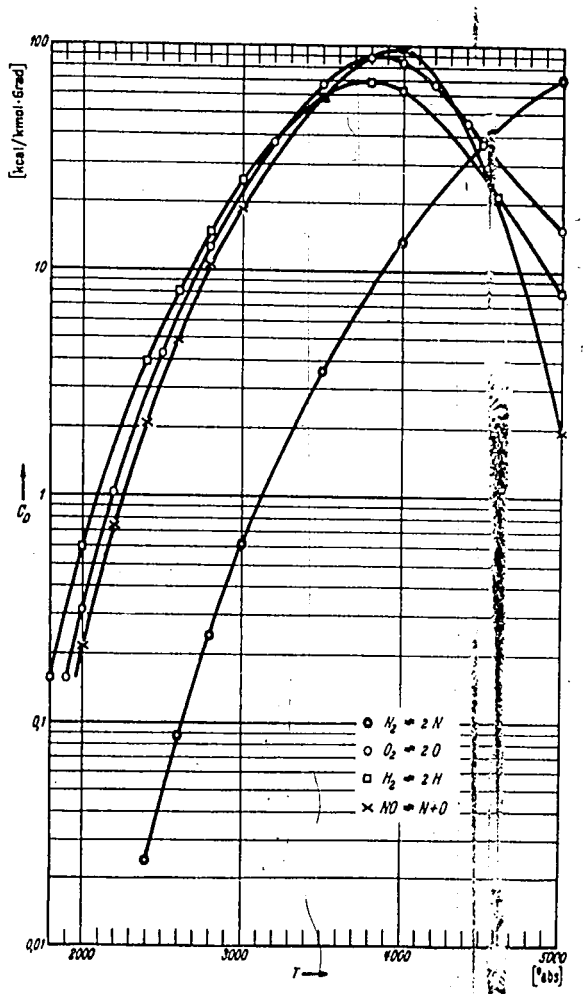


Bild 5. Dissoziationszuwachs C_D der Molwärmen von N_2, O_2, H_2 und NO bei 1 Atm.

so daß sie allmählich vom idealen (pV=RT) Gaszustand in den realen (pV ≠ RT) und insbesondere in den dampfförmigen Zustand (pV<RT) übergehen.

Im Falle der spezifischen Wärmen läßt sich diese Frage z. B. so präzisieren, wie groß ihre Änderung beim

isothermen Übergang von p = 0 auf p = 1 Atm ist, und wir werden diesen oft auftretenden Betrag $\int_0^1 (\partial C_p/\partial p)dp$ abkürzend mit δC_p bezeichnen. Hier benutzt man bekanntlich die Clausius'sche Differentialgleichung $(\partial C_p/\partial p)_T = -T(\partial^2 V/\partial T^2)_p$, die diese Druckabhängigkeit auf die Krümmung der V, T-Kurve zurückführt und damit eine Verbindung zwischen der kalorischen und der thermischen Zustandsgleichung feststellt. Bei einer so bemerkenswerten Leistung erscheint es sehr bedauerlich, daß die Gleichung meist durch einen speziellen Kreisprozeß in wenig durchsichtiger Weise abgeleitet wird und als ein deus ex machina erscheint. Es sei daher kurz darauf hingewiesen, wie der tiefere Sinn dieser Formel klar wird, wenn man von dem allgemeinen Ausdruck des thermodynamischen Potentials, der nach dem großen Thermodynamiker Gibbs mit G = U + pV — TS bezeichneten „freien Enthalpie" ausgeht. (U = Energieinhalt, S = Entropie).*) Bekanntlich ergibt die erste Ableitung von G nach dem Druck das Volumen: $\partial G/\partial p = V$ und diejenige nach der Temperatur die Entropie: $\partial G/\partial T = -S$. Differenzieren wir nun weiter die erste Gleichung nach T und die zweite nach p, so erhalten wir $\partial^2 G/\partial p \partial T = \partial V/\partial T$ und $\partial^2 G/\partial T \partial p = -\partial S/\partial p$. Beachten wir nun, daß wegen der Vertauschbarkeit der Reihenfolge der Differentiationen $\partial^2 G/\partial p \partial T = \partial^2 G/\partial T \partial p$ ist, so ergibt sich der zur Konstruktion von Mollier-Diagrammen wichtige Satz $\partial V/\partial T = -\partial S/\partial p$, wonach der Druckkoeffizient der Entropie entgegengesetzt gleich dem Ausdehnungskoeffizienten ist. Berücksichtigen wir ferner, daß $\partial^2 G/\partial T^2 = -C_p/T$ ist, so stellt sich die oben angeführte Clausius'sche Differentialgleichung $(\partial C_p/\partial p)_T = -T(\partial^2 V/\partial T^2)_p$ einfach als die mathematische Identität $\partial^3 G/\partial T^2 \partial p = \partial^3 G/\partial p \partial T^2$ dar und enthüllt sich somit als Folge der Existenz eines thermodynamischen Potentials, das die nach experimentellen Methoden herkömmliche Unterscheidung der Zustandsgrößen in thermische (T, V, p) und kalorische (C, S, H, U) als theoretisch nicht begründet erkennen läßt. Dieses thermodynamische Potential existiert deshalb, weil nach dem zweiten Hauptsatz die Größe dQ/T ein vollständiges Differential ist, der Wert von $\int_a^b (dQ/T)dT$ im Gegensatz zur Energie $\int_a^b dQ$ (nach dem ersten Hauptsatz) nicht vom Integrationsweg zwischen a und b abhängt. So haben sich uns die Beziehungen zwischen den thermischen und kalorischen Daten der Stoffe als allgemeingültige unmittelbare Folgerungen des zweiten Hauptsatzes erwiesen.

Wollen wir nun diese Relationen für die Druck- und Volumenabhängigkeit benutzen, um die statistisch berechneten kalorischen Daten vom idealen auf den realen Gaszustand umzurechnen, so bemerken wir sofort eine grundsätzliche Schwierigkeit: in diesen Gleichungen tritt nicht das Volumen selber, sondern seine erste oder zweite Ableitung nach T auf, und daher muß die thermische Zustandsgleichung (f(p, V, T) = 0 äußerst genau bekannt sein, wenn nur mäßig genaue Zahlenwerte für die Realkorrekturen der kalorischen Daten benötigt werden. Trotzdem gelingt die Lösung dieser Aufgabe aus zweierlei Gründen. Einerseits sind nämlich diese Realkorrekturen der Gase bei nicht zu hohen Drucken und genügend hoch über der Siedetemperatur so gering — bei trockener Luft von 0° C wächst z. B. C_{p_0} = 6,945 beim Übergang von 0 auf 1 Atm nur um $\delta C_p = 0{,}015_5$ kcal/kmol · Grad entsprechend 0,2 % — daß selbst eine Unsicherheit von 50 % für die Realkorrektur meist unerheblich ist. Andererseits stehen uns in den Messungen des Joule-Thomson-Effektes $(\partial T/\partial p)_H$ oder besser noch des isothermen Drosseleffektes $(\partial H/\partial p)_T$ Zahlen zur Verfügung, die für ideale Gase gleich null sind, also im Gegensatz zum Realvolumen — der Realteil des Volumens beträgt z. B. bei trockener Luft von 0° C und 1 Atm nur 0,01 auf 22,40 Nm³/kmol, also nur 0,5%—100%ig den Realzustand verkörpern und dadurch dazu empfindlich auf den Unterschied zwischen V und $T(\partial V/\partial T)_p$ ansprechen.

Um solche Präzisionsmeßergebnisse in einer analytischen und daher differenzierbaren Form darstellen zu können, entwickelt man das Produkt pV nach Potenzen von p, V oder d = 1/V und schreibt dementsprechend

$$pV = RT + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \ldots\ldots,$$

wobei die B, C, D ... als „Virialkoeffizienten" bezeichnet werden, entsprechend ihrer Deutung in der kinetischen Gastheorie. Bei hinreichend niedrigen Drucken wird, falls nicht $B \ll C \ll D \ll E \ldots$ gilt, aus rein mathematischen Gründen $Bp \gg Cp^2 \gg Dp^3 \ldots$ sein, und daher dürfen wir ohne besondere physikalische Begründung unter den oben angegebenen Bedingungen die thermische Zustandsgleichung allgemein gültig mit pV = RT + Bp festlegen, wobei B = f(T) eine von p, V, d unabhängige Temperaturfunktion darstellt. Dieser Koeffizient B bestimmt nun bei gegebenem Druck die Realkorrekturen vollständig, weil das Idealvolumen wegen $(\partial V/\partial T)_p = R/p = V/T$ und $(\partial^2 V/\partial T^2)_p = 0$ keinen Beitrag liefert:

$$(\partial H/\partial p)_T = B - T(\partial B/\partial T)_p$$
$$(\partial C_p/\partial p)_T = -T(\partial^2 B/\partial T^2)_p$$
$$(\partial C_v/\partial p)_T = -[2(\partial B/\partial T)_p + T(\partial^2 B/\partial T^2)_p].$$

Diese grundsätzliche Lösung der Aufgabe, die Realkorrekturen zu berechnen, genügt praktisch insofern nicht, als nur für die wenigsten Gase hinreichend ausführliche und genaue Meßreihen vorliegen, die eine brauchbare analytische Darstellung von B(T) erlauben. Es erscheint vielmehr technisch wünschenswert, allgemein gültige Formeln für B(T) zu erhalten, in denen die individuellen Unterschiede der Gase auf leicht feststellbare Charakteristika wie z. B. ihre Siedetemperaturen oder kritischen Drucke zurückgeführt werden. Damit werden wir auf die Nutzbarmachung des Theorems der übereinstimmenden Zustände geführt, das bekanntlich besagt, daß die thermische Zustandsgleichung aller Gase übereinstimmt, wenn man beim Vergleich statt der Variablen T, V, p die „reduzierten" Koordinaten $\mathfrak{T} = T/T_k$, $\mathfrak{p} = p/p_k$, $\mathfrak{V} = V/V_k$, $\mathfrak{d} = d/d_k$ einführt, die Zustandsgrößen also in Bruchteilen der kritischen Daten ausdrückt. Wir wissen heute, daß dieses seinerzeit heuristisch aufgestellte Theorem ein quantentheoretisch fundiertes Naturgesetz ist; auch daß dieser Satz für He, H_2 und Ne weniger genau gilt, ist insofern sinnvoll begründet, als bei diesen schwerst kondensierbaren Gasen die Nullpunktsenergie (U bei 0° abs) gegenüber dem temperaturabhängigen Energieinhalt nicht vernachlässigbar klein ist.

Das Theorem der korrespondierenden Zustände hat spezielle Formulierungen in verschiedenen einfachen Zustandsgleichungen gefunden, von denen die bekannteste und historisch verdienstvollste diejenige von J. D. van der Waals ist. Entwickelt man diese halbempirische Gleichung in eine Potenzreihe nach p, so erhält man durch Gleichsetzung der Koeffizienten von p $B = b - \frac{a}{RT}$;

*) Die Vereinfachung thermodynamischer Berechnungen durch Einführung von G behandeln Justi u. v. Laue (11).

um $\delta C_p = 0{,}015_5$ kcal/kmol · Grad entspre
daß selbst eine Unsicherheit von 50 % fü
r meist unerheblich ist. Andererseits ste
Messungen des Joule-Thomson-Effekte
besser noch des isothermen Drosse
$p)_T$ Zahlen zur Verfügung, die für ideal
Gase gleich Null sind, also im Gegensatz zum Realvolume
der Realteil des Volumens beträgt z. B. bei trockene
Luft von 0° C und 1 Atm nur 0,01 auf 22,40 Nm³/kmol, als
nur 0,5%—100%ig den Realzustand verkörpern und nor
dazu empfindlich auf den Unterschied zwischen V un
$T(\partial V/\partial T)_p$ ansprechen.

Um solche Präzisionsmeßergebnisse in einer analyt
schen und daher differenzierbaren Form darstellen zu
können, entwickelt man das Produkt pV nach Potenzen
von p, V oder d = 1/V und schreibt dementsprechend

$$pV = RT + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \ldots\ldots,$$

C, D... als „Virialkoeffizienten" bezeichn
rechend ihrer Deutung in der kinetisch
hinreichend niedrigen Drucken wird, fal
E... gilt, aus rein mathematischen Grü
Dp^3... sein, und daher dürfen wir oh
ysikalische Begründung unter den oben a
Bedingungen die thermische Zustandsgleichu
allgemein gültig mit $pV = RT + Bp$ festlegen, wobei B
f(T) eine von p, V, d unabhängige Temperaturfunkti
darstellt. Dieser Koeffizient B bestimmt nun bei gegeb
nem Druck die Realkorrekturen vollständig, w
das Idealvolumen wegen $(\partial V/\partial T)_p = R/p = V/T$ u
$(\partial^2 V/\partial T^2)_p = 0$ keinen Beitrag liefert:

$$(\partial H/\partial p)_T = B - T(\partial B/\partial T)_p$$
$$(\partial C_p/\partial p)_T = -T(\partial^2 B/\partial T^2)_p$$
$$(\partial C_v/\partial p)_T = -[2(\partial B/\partial T)_p + T(\partial^2 B/\partial T^2)\ p].$$

Diese grundsätzliche Lösung der Aufgabe, die Re
zu berechnen, genügt praktisch insofern nic
die wenigsten Gase hinreichend ausführlic
ßreihen vorliegen, die eine brauchbare a
llung von B(T) erlauben. Es erscheint vi
h wünschenswert, allgemein gültige Form
erhalten, in denen die individuellen Unt
Gase auf leicht feststellbare Charakteris
wie z. B. ihre Siedetemperaturen oder kritischen Druc
zurückgeführt werden. Damit werden wir auf die Nutzb
machung des Theorems der übereinstimmenden Zustä
geführt, das bekanntlich besagt, daß die thermische
standsgleichung aller Gase übereinstimmt, wenn man b
Vergleich statt der Variablen T, V, p die „reduzier
Koordinaten $\mathfrak{T} = T/T_k$, $\mathfrak{p} = p/p_k$, $\mathfrak{V} = V/V_k$, $\mathfrak{d} = d$
einführt, die Zustandsgrößen also in Bruchteilen der kri
tischen Daten ausdrückt. Wir wissen heute, daß die
seinerzeit heuristisch aufgestellte Theorem ein quant
h fundiertes Naturgesetz ist; auch daß die
, H_2 und Ne weniger genau gilt, ist insof
ründet, als bei diesen schwerst kondens
die Nullpunktsenergie (U bei 0° abs) ge
mperaturabhängigen Energieinhalt nicht
r klein ist.

heorem der korrespondierenden Zustände
spezielle Formulierungen in verschiedenen einfachen
standsgleichungen gefunden, von denen die bekannt
und historisch verdienstvollste diejenige von J. D. van
Waals ist. Entwickelt man diese halbempirische Gleich
in eine Potenzreihe nach p, so erhält man, d
Gleichsetzung der Koeffizienten von p $B = b - a/RT$

durch Differentiation ergibt sich dann $2(\partial B/\partial T)_p = -T(\partial^2 B/\partial T^2)_p$, und somit würde nach der oben angeschriebenen Formel für $(\partial C_v/\partial p)_T$ die spezifische Wärme C_v druckunabhängig werden, was in offenbarem Widerspruch zur Erfahrung steht. Aus diesem Grunde ist die van der Waals'sche Zustandsgleichung für technische Zwecke nicht brauchbar.

Nachdem schon Clausius bemerkt hatte, daß man eine bessere Wiedergabe der p, V, T-Meßwerte erzielt, wenn man in der van der Waals'schen Gleichung $(p + a/V^2)(V - b) = RT$ die Konstante a durch eine Temperaturfunktion der Form $a = a'/T$ ersetzt, stellte Daniel Berthelot 1903 seine Zustandsgleichung

$$(p + a'/TV^2)(V - b) = RT$$

auf, die nicht nur diesen vorteilhafteren Ansatz $B = b - a'/RT^2$ enthält, sondern in der auch zwecks günstigerer Anpassung an die Experimente der kritische Koeffizient („reduzierte Gaskonstante") $s = RT_k/p_k V_k = 32/9 = 3{,}555$ statt wie bisher 3,375 gesetzt wird, in der das Kovolumen b nicht mit $V_k/3$, sondern $V_k/4$ angenommen wird, und in der entsprechend dem Fortschritt der Kompressibilitätsmessungen der Zahlenfaktor des Kohäsionsdruckes mit 16/3 statt wie bisher 3 eingeführt wird. Demgemäß lautet die Berthelot'sche Zustandsgleichung in reduzierter Form

$$\left(\mathfrak{p} + \frac{16}{3}\frac{1}{\mathfrak{T}\mathfrak{V}^2}\right)\left(\mathfrak{V} - \frac{1}{4}\right) = \frac{32}{9}\mathfrak{T}.$$

Diese Gleichung gilt ausdrücklich nur für mäßige Drucke; denn am kritischen Punkt würde die linke Seite wegen $\mathfrak{p} = \mathfrak{V} = \mathfrak{T} = 1$ 4,747, die rechte hingegen 3,555 betragen. Unter weiterer Vernachlässigung höherer Glieder wird (vgl. (1) S. 14 ff.) die praktische Form

$$pV = RT\left(1 + \frac{\mathfrak{p}}{\mathfrak{T}}\frac{9}{128}\left(1 - 6/\mathfrak{T}^2\right)\right)$$

erhalten, in der nur die auf den Realzustand korrigierenden Glieder in Bruchteilen der kritischen Daten angegeben sind.

Man ersieht durch Vergleichung dieser Formel mit dem allgemeinen Ausdruck $pV = RT + Bp$, daß die Berthelot-Gleichung

$$B = \frac{9}{128}\frac{R\,T_k}{p_k} - \frac{54}{128}\frac{R\,T_k^3}{p_k\,T^2}$$

ergibt, woraus wiederum für die Ableitungen $\partial B/\partial T = 2{\cdot}54\,RT_k^3/128\,p_k T^3$ und $\partial^2 B/\partial T^2 = 2{\cdot}3{\cdot}54\,RT_k^3/128\,p_k T^4$ folgt.

Mithin ergeben sich aus dem Theorem der übereinstimmenden Zustände unter spezieller Zugrundelegung der Berthelot'schen Zustandsgleichung folgende Zahlenformeln für die Korrekturen δ, die beim Übergang vom idealen auf den realen Gaszustand oder bei Drucksteigerung um je 1 Atm im Realzustand zu den statistisch berechneten kalorischen Daten zu addieren sind:

$$\delta C_v = 1{,}6759 \cdot T_k^3/p_k \cdot T^3 = \delta C_p/3$$
$$\delta C_p = 5{,}0277 \cdot T_k^3/p_k \cdot T^3 = 3\,\delta C_v$$
$$\delta H = 0{,}000\,036\,885 \cdot T_k^3/p_k = 2{,}5135 \cdot T_k^3/p_k \cdot T^2$$
$$= 0{,}000\,036\,885 \cdot T_k/p_k - 0{,}5 \cdot T \cdot \delta C_p$$

Die zuletzt angeführte Korrektur δH bezieht sich ebenso wie die technisch weniger bedeutungsvolle Größe $(\partial U/\partial p)_T = -T(\partial B/\partial T)_p = -1{,}676 \cdot T^3 k/p_k \cdot T^2$ auf die absolute Enthalpie $H_\infty = \int_0^T C_{p_\infty} dT$ bzw. die absolute innere Energie $U_\infty = \int_0^T C_{v\infty}\,dT$; rechnet man, wie praktisch üblich, mit der Enthalpiedifferenz zwischen z. B. der Eispunktstemperatur 0° C = 273° abs und der Versuchstemperatur t° C = (t+273)° abs, und geht man von der absoluten zur gesetzlichen Skala (t° C) über, so hat man als Realkorrektur dieser Enthalpiedifferenz offenbar

$$\delta\Delta H = -2{,}5135 \cdot T_k^3 \left(\frac{1}{(t+273)^2} - \frac{1}{273^2}\right)/p_k =$$
$$-0{,}5\left((t+273)\delta C_{p,\,(t+273)} - 273 \cdot \delta C_{p,\,273^\circ}\right)$$

anzusetzen, also eine positive Größe zu ΔH_0 zu addieren.

Diesen Größen C_v, C_p, U und H ist gemeinsam, daß sie im idealen Gaszustand nicht von Druck und Volumen des Gases abhängen; hingegen ist die Entropie nicht voll durch $\int_0^T (C/T)dT$ definiert, sondern zu diesem im (C/T), T-Diagramm als Fläche planimetrisch ermittelten Betrag tritt noch ein Glied $R \cdot \ln V$ hinzu, so daß die Entropie eines unendlich verdünnten und daher idealen Gases wegen $\ln 0 = -\infty$ unendlich groß wird. Es ist daher zweckmäßig, die Entropie auf den (extrapolierten) idealen Gaszustand bei dem speziellen Druck p = 1 Atm und V_M = 22,414 Nm³/kmol bei 0° C zu beziehen und daher die isobare Entropie mit $S^{id}_{p=1}$, die isochore Entropie mit $S^{id}_{V=22}$ zu bezeichnen und dementsprechend die von 0° C an gemessenen Beträge der isochoren bzw. isobaren Entropie mit $\Delta S^{id}_{V=22}$ bzw. $\Delta S^{id}_{p=1}$ deutlich zu kennzeichnen.

Bei der Umrechnung der statistisch ermittelten isobaren Entropie vom idealen Gaszustand bei 1 Atm auf den Realzustand bei p Atm sind also zwei verschiedene Schritte wohl zu unterscheiden. Einerseits müssen wir durch Addition von $R \cdot \ln p = 4{,}573 \cdot \log_{10} p$ einer für p>1 positiven Größe, der „Kompressionsentropie", der Druckabhängigkeit im Idealzustand Rechnung tragen, und andererseits müssen wir den Übergang vom Ideal- zum Realzustand bei unveränderlichem Druck p (Atm) durch Addition der negativen Größe $(\partial S/\partial p)_T = -(\partial B/\partial T)_p = -2{,}54 \cdot R \cdot T_k^3/128 \cdot p_k \cdot T^3 = 1{,}676 \cdot T_k^3/p_k \cdot T^3 = -\delta C_p/3$ $-\delta C_v = \delta U/T$ berücksichtigen. Ganz analog wird die Änderung der isochoren Entropie $S^{id}_{v=22}$ beim Übergang von V_N = 22,414 Nm³/kmol im Idealzustand auf das Realvolumen V berechnet, indem zunächst wieder die Kompressionsentropie im Idealzustand durch Addition der für $V < V_N$ positiven Größe

$$R \cdot \ln (V/V_N) = 4{,}573 \cdot \log_{10} (V/V_N)$$

hinzugefügt wird, und dann die Wirkung der van der Waals'schen zwischenmolekularen Kräfte durch Addition der negativen Größe

$$\delta S_v = -\delta Cp/9 = +\delta S_p/3 = -0{,}5586 \cdot T_k^3/p_k T^3$$

in Rechnung gesetzt.

Damit ist die Aufgabe, sämtliche kalorischen Realkorrekturen für nicht allzu hohe Drucke aus leicht beobachtbaren Zahlenwerten wie den kritischen Daten unter Zugrundelegung des Theorems der korrespondierenden Zustände allgemein zu berechnen, vollständig und einfach unter spezieller Annahme der Berthelot'schen Zustandsgleichung gelöst. In die experimentelle Diskussion der Zahlenergebnisse soll aber nicht eingetreten werden, ohne vorher vom theoretischen Standpunkt zwei wegen ihrer Allgemeinheit wichtige Einschränkungen hervorgehoben zu haben.

Das erste Bedenken ist historisch bedingt: alle wichtigen Zustandsgleichungen sind nämlich vor der Auf-

stellung des Nernst'schen Wärmesatzes formuliert worden, dessen Leistung bekanntlich darin besteht, die bis dahin unbestimmte Integrationskonstante in der Entropiegleichung festgelegt zu haben. Man darf daher nicht darauf vertrauen, daß der Absolutbetrag z. B. von δS_v bei der Standardtemperatur (273° oder 298° abs) durch Differentiation einer solchen thermischen Zustandsgleichung richtig wiedergegeben wird. Hierauf dürften gewisse Diskrepanzen bei der Berechnung der δS_v-Werte beruhen, die vielleicht auch andere Autoren z. B. bei der Berechnung von Mollier-Diagrammen bemerkt haben, ohne eine allgemeinere tiefe Ursache zu vermuten. Praktisch sind solche Unbestimmtheiten glücklicherweise unerheblich, weil der Absolutwert von δS_v und δS_p gering ist und man ihn daher für eine bestimmte Temperatur wie z. B. die Standardtemperatur durch Addition einer passenden Konstante einfach auf 0 normieren kann, wenn man ohnehin mit ΔS statt S rechnet. Physikalisch sinnvoller ist es freilich, die Konstante so zu wählen, daß $\delta S_v = \delta S_p$ für genügend hohe reduzierte Temperaturen = 0 werden.

Ist so das Fundament der Zustandsgleichungen im Gebiet der tiefen Temperaturen nicht ganz sicher, so trifft dies nach den neuesten Experimentaluntersuchungen wie z. B. von Benedict (13) auch für den Bereich hoher Drucke zu. Die van der Waals'sche Konstante b soll bekanntlich das 4fache Kovolumen darstellen, also dasjenige Volumen der nicht punktförmigen Moleküle, auf das sich der Raumin halt eines Gases durch beliebig hohe Druck allenfalls verringern läßt, wenn die Zwischenräume zwischen den Molekülen völlig verschwunden sind. Tatsächlich ist es Benedict durch Anwendung bisher bei Gasen noch nicht erreichter Drucke (über 15 000 Atm) gelungen, das Volumen von Stickstoff derartig zu verringern, daß das von niedrigen Drucken her extrapolatorisch ermittelte Kovolumen beträchtlich unterschritten wird; durch seine Experimente hat er nachgewiesen, daß sich die Moleküle „überlappen" können, ein Tatbestand, der aus spektroskopischen und Atomzertrümmerungsversuchen schon lange bekannt ist und nun auch thermodynamisch verifiziert, daß der von den Elektronenbahnen begrenzte Atomraum infolge des relativ verschwindend geringen Atomkern-Volumens fast leer ist. Praktisch folgt aus diesen Messungen nicht nur, daß die Extrapolation auf ein Kovolumen unzutreffend ist, sondern auch, daß selbst weit oberhalb der kritischen Temperatur, also der Grenze des flüssigen Zustandes, die Substanz im festen (kristallinen) Zustand existieren kann; so wird sich z. B. N_2 bei 0° C unter einem äußeren Druck von etwa 20 000 Atm verfestigen. Diese auf den ersten Blick absurd erscheinende Tatsache enthüllt sich im Zusammenhang mit unserer obigen Berechnung von δS als sehr sinnvoll, ja notwendig. Bei genügenden Drucken wächst nämlich der Absolutbetrag der positiven Kompressionsentropie wegen seiner logarithmischen Form langsamer an als der (negativen) δS-Werte, so daß die Summe dieser beiden Glieder immer stärker negativ wird, und es sich vorhersehen läßt, wann die gesamte Entropie $S_p^{id} + \delta S_p + R \cdot \ln p$ zunächst 0 wird, um dann negative Werte anzunehmen. Ein Auftreten negativer Entropien würde aber die Konstruktion eines Perpetuum mobile zweiter Art zulassen, und die Natur rettet den zweiten und dritten Hauptsatz dadurch, daß sie das genügend verdichtete Gas auskristallisieren läßt, womit gemäß der Clausius-Clapeyron'schen Gleichung die beträchtliche unstetige Entropievermehrung Q/T (Q = Schmelzwärme) verbunden ist.

Im Bereiche der technisch verbreiteten nur mäßig hohen Drucke spielen aber solche Komplikationen glücklicherweise keine Rolle, und die in meinem Buch durchgeführten Vergleichungen zwischen den Realkorrekturen nach Berthelot einerseits und nach Rechenergebnissen auf Grund von Präzisionsmessungen der Zustandsgleichung und Drosseleffekte andererseits haben gezeigt, daß im allgemeinen die Genauigkeit der Berthelot-Gleichung mindestens praktisch ausreicht. Als Beispiel betrachte man das Bild 6, in der die von Deming und Shupe (14) aus den pV-Messungen von Bartlett und Mitarbeitern (15) abge-

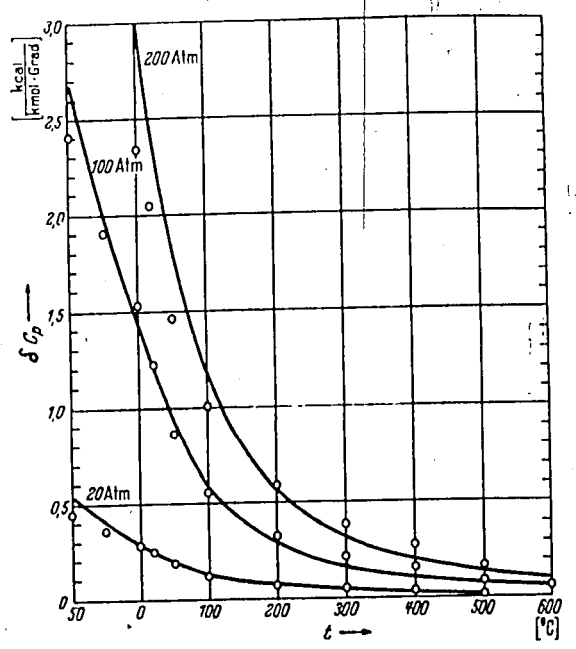


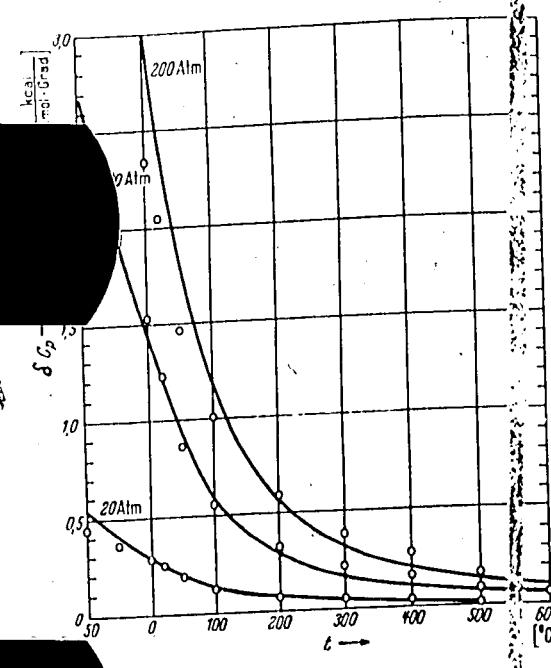
Bild 6. Isobaren der Druckabhängigkeit δC_p der Molwärme C_p des N_2 in Abhängigkeit von der Temperatur

leiteten δC_p-Werte im Temperaturbereich von —50° bis 600° C und Druckbereich bis zu 200 Atm mit den Zahlenwerten nach der einfachen Berthelotgleichung verglichen sind — wohlgemerkt ohne angepaßte Konstanten. Selbst bei diesen hohen Drucken zeigen sich noch keine Abweichungen, die sicher als systematisch angesehen werden müssen. Typisch in dieser Hinsicht ist auch der Befund, daß die aus der Berthelotgleichung berechneten Joule-Thomson-Koeffizienten ungefähr in der Mitte zwischen den bekannten Präzisionsmeßreihen von Hausen (16) einerseits und Roebuck (17) andererseits liegen. Wenn trotzdem einzelne Autoren speziell für ein einziges Gas aufgestellten vielgliedrigen Zustandsgleichungen den Vorzug geben möchten, so sei hier darauf hingewiesen, daß u. a. die Giauque'sche Schule ihre rühmlichst bekannten Ermittlungen der Standardentropien der Gase aus kalorimetrischen Präzisionsmessungen mit Hilfe der Berthelotschen δS_p-Werte auf den idealen Gaszustand reduziert.

Treffen in Einzelfällen die Aussagen der Berthelot-Gleichung weniger genau zu, so liegt dies weniger an dieser Gleichung, als daß ihr Benutzer sie in einem ihren Voraussetzungen nicht entsprechenden Fall benutzt hat. So habe ich in meinem Buch (1) darauf hingewiesen, daß man für die von Wohl sogenannten Normalstoffe, die durch einen kritischen Koeffizienten von $3{,}5 \leqq s \leqq 3{,}95$ gekenn-

unstetige Entropievermehrung Q/T (
me) verbunden ist.

iche der technisch verbreiteten nur
e spielen aber solche Komplikationen
keine Rolle, und die in meinem Buch
Vergleichungen zwischen den Realkorrek
nelot einerseits und nach Rechenergebnissen
Grund von Präzisionsmessungen der Zustandsgleichung
und Drosseleffekte andererseits haben gezeigt, da
allgemeinen die Genauigkeit der Berthelot-Gleichung
destens praktisch ausreicht. Als Beispiel betrachte
das Bild 6, in der die von Deming und Shupe (14)
pV-Messungen von Bartlett und Mitarbeitern (15)



sobaren der Druckabhängigkeit δC_p der Molwär
des N_2 in Abhängigkeit von der Temperatur

C_p-Werte im Temperaturbereich von
nd Druckbereich bis zu 200 Atm mit den
werten nach der einfachen Berthelotgleichung
sind — wohlgemerkt ohne angepaßte Konstanten
bei diesen hohen Drucken zeigen sich noch keine
chungen, die sicher als systematisch angesehen
müssen. Typisch in dieser Hinsicht ist auch der
daß die aus der Berthelotgleichung berechneten
Thomson-Koeffizienten ungefähr in der Mitte
den bekannten Präzisionsmeßreihen von Hausen
seits und Roebuck (17) andererseits liegen. Wen
dem einzelne Autoren speziell für ein einziges
stellten vielgliedrigen Zustandsgleichungen
möchten, so sei hier darauf hingewiesen,
que'sche Schule ihre rühmlichst bekannten
n der Standardentropien der Gase aus
Präzisionsmessungen mit Hilfe der
p-Werte auf den idealen Gaszustand
effen in Einzelfällen die Aussagen der
Gleichung weniger genau zu, so liegt dies weniger
ser Gleichung, als daß ihr Benutzer sie in einem
aussetzungen nicht entsprechenden Fall benutzt
habe ich in meinem Buch (1) darauf hingewiesen,
für die von Wohl sogenannten Normalstoffe,
einen kritischen Koeffizienten von $3,5 \leq s \leq 3,95$

zeichnet sind, besser diese Wohl'sche Zustandsgleichung benutzt, da die Berthelotgleichung ausdrücklich s = 32/9 = 3,555 voraussetzt. Auch auf Grund der Wohl'schen Zustandsgleichung erhält man einfache Ausdrücke für die δ-Werte, die ich berechnet und dargestellt habe (1, § 19).

Aber selbst wenn die Voraussetzungen der Berthelot-Gleichung noch weitgehender verletzt werden, etwa dadurch, daß eine an sehr hohen s-Werten erkennbare Assoziation einsetzt, wie sie bekanntlich der Wasserdampf durch Bildung von H_4O_2-Molekülen zeigt, bleibt diese Zustandsgleichung zumindest angenähert richtig. Zu diesem Resultat gelangten neulich W. Fritz und Berthold Koch (18), als sie ohne Bindung an bestimmte physikalische Voraussetzungen lediglich eine die Messungen der thermischen und kalorischen Daten des H_2O-Dampfes bei niedrigen Drucken möglichst gut interpolierende Zustandsgleichung anpaßten. Die Autoren gelangten hierbei nicht nur wieder empirisch zu einem T^{-3}-Gesetz für die δC_p, sondern erhielten auch Koeffizienten, die nahe mit den Berthelot'schen Werten übereinstimmen.

Es darf daher abschließend festgestellt werden, daß auch die Umrechnung der kalorischen Daten auf den Realzustand (19) als praktisch gelungen anzusehen ist.

III. Thermodynamik realer Gasgemische.

Die Thermodynamik von Gasgemischen bietet keine Schwierigkeiten, solange es sich um ideale Gase handelt; dagegen war die Behandlung der Gesetzmäßigkeiten der technisch wichtigen Mischungen realer Gase nicht geglückt. Eine neuere Zusammenstellung [1 § 21] der einschlägigen Arbeiten zeigt, daß die Volumina und Drucke realer Gase im allgemeinen keineswegs additiv sind; die mannigfachen Versuche, die Konstanten der Zustandsgleichungen von Gasgemischen aus denjenigen der reinen Gase zu mitteln, müssen versagen, wenn die Volumina der Gemische nach Ausweis der Erfahrung nicht zwischen den Werten für die einzelnen Gase liegen. Diese Schwierigkeiten hängen natürlich aufs engste damit zusammen, daß man selbst für einheitliche Gase noch keine Zustandsgleichung kennt, die die Abweichungen vom idealen Gaszustand in weiteren Temperatur- und Druckbereichen mit genügender Genauigkeit darzustellen vermag; praktisch ist eine hohe Genauigkeit erforderlich, um die höheren Ableitungen, z. B. des Volumens und Druckes nach der Temperatur zu erhalten, die für die Druckabhängigkeit der kalorischen Daten maßgebend sind. Es soll daher nicht die Aufgabe dieser Arbeit sein, zu den zahlreichen vorhandenen Zustandsgleichungen eine weitere hinzuzufügen; vielmehr beschränken wir uns hier auf einen solchen p, V, T-Bereich, in dem unsere Schlüsse von der Unsicherheit über die Form der allgemeinen Zustandsgleichung unabhängig bleiben.

Dieser Fall ist offenbar im Gebiet nicht allzu niedriger reduzierter Temperatur und nicht zu hoher reduzierter Drucke gegeben, wo sowohl die van der Waals'sche [1 § 6], wie die Berthelot'sche [1 § 7], die Wohl'sche [1 § 19], die Onnes'sche und die Beattie-Bridgeman'sche Zustandsgleichung in die einfache Virialform

$$p \cdot V = R \cdot T + p \cdot B \qquad 1)$$

übergehen (B = „zweiter Virialkoeffizient"). Diese Gleichung hat sich sowohl für reine Gase wie für Mischungen im Bereich mäßiger Drucke, insbesondere beim Normdruck von 1 Atm. = 760 Torr experimentell gut bewährt; ihre Anwendung erscheint für unseren Zweck auch deshalb vorteilhaft, weil sie sowohl für die Einzelgase wie für die Mischungen dieselbe Form besitzt, und weil B zwar eine (teilweise verwickelte) Funktion der Temperatur ist, vom Druck aber nicht abhängt.

Nach der kinetischen Gastheorie hängt der zweite Virialkoeffizient B aufs engste mit den Wechselwirkungskräften zusammen, die die Moleküle im nichtidealen Gas aufeinander ausüben, und zwar gilt nach Lennard-Jones und Cook [20] die Beziehung

$$B = 2\pi N_L \int_0^\infty \left(1 - e^{-W_{11}/kT}\right) r^2 dr, \qquad (2)$$

worin N_L die Loschmidt'sche Zahl ($N_L = 6{,}02_8 \cdot 10^{23}$ Moleküle je Mol) und $W_{11}(r)$ die potentielle Energie zweier Moleküle des Gases 1 in Abhängigkeit von deren Abstand r bedeutet, und k die Boltzmann'sche Konstante ($k = R/N = 1{,}372 \cdot 10^{-16}$ erg/Grad) ist. Mit dieser Formel hat man schon vielfach erfolgreich aus einer angenommenen Form $W_{11}(r)$ — Lennard-Jones z. B. setzt $(r) = a \cdot r^{-6} - b \cdot r^{-8}$ — die Temperaturabhängigkeit von B berechnen können. Für eine Gasmischung, bestehend aus c_1 Molbruchteilen des Gases 1, c_2 Molbruchteilen des Gases 2 usw. macht nun die kinetische Gastheorie die Aussage, daß der zweite Virialkoeffizient B der Mischung

$$B_M = \sum_{m,n} B_{mn} \cdot c_m \cdot c_n \qquad (3)$$

ist, wo über alle Komponenten der Mischungen zu summieren ist und worin $B_{mn} = 2\pi N_L \int_0^\infty (1 - e^{-W_{mn}/kT}) r^2\, dr$ ist, analog dem Ausdruck (2) für das reale Gas. In dieser Formel (3) bedeutet $W_{mn}(r)$ die Wechselwirkungsenergie eines Moleküls des i-ten Gases und eines des k-ten Gases als Funktion von deren gegenseitigem Abstand r. Speziell gilt also für eine binäre Mischung, wenn man die Molkonzentration des ersten Gases mit c und demnach die des zweiten Gases mit (1 — c) bezeichnet:

$$B = B_{11} \cdot c^2 + 2B_{12} \cdot c\,(1-c) + B_{22}\,(1-c)^2 = B_{11}\,c + \beta\,c\,(1-c) + B_{22}\,(1-c)^2 \qquad (3a)$$

Zahlentafel 1

Gemisch	t°C	$10^3 \cdot \beta$	$10^3 \cdot B_{11}$	$10^3 \cdot B_{22}$	$2 \cdot 10^3 \cdot B_{12}$	Autoren
H_2—N_2	0	0,985	0,6224	—0,4903	1,1171	Verschoyle [21]
	20	0,849	0,6461	—0,2755	1,2194	
H_2—He	25	0,232	0,656	0,510	1,398	Gibby, Tanner, Masson [22]
H_2—CO	25	0,87	0,6511	—0,4393	1,09	Scott [22]
O_2—C_2H_4	25	4,0	—0,72	—6,4	—3,12	Masson, Dolley [24]
Ar—C_2H_4	25	3,9	—0,70	—6,4	—3,2	
	25	1,856	0,515	—0,730	1,641	
	50	1,681	0,508	—0,513	1,676	
	75	1,554	0,501	—0,334	1,721	
He—Ar	100	1,442	0,498	—0,183	1,757	
	125	1,348	0,489	—0,032	1,805	
	150	1,257	0,485	0,097	1,839	
	174	1,208	0,487	0,166	1,861	Tanner, Masson [25]
	25	0,782	0,656	—0,730	0,708	
	50	0,663	0,680	—0,513	0,830	
	75	0,625	0,689	—0,334	0,980	
H_2—Ar	100	0,604	0,697	—0,183	1,118	
	125	0,557	0,705	—0,032	1,230	
	150	0,520	0,711	0,097	1,328	Nach Masson und Dolley [22] [24] Kuenen, Verschoyle, u. van Urk [23], Amagat [23] u. Holborn u. Otto [24] berechnet von den Verff.
	174	0,536	0,710	0,166	1,412	
N_2—O_2	20	—0,00	—0,35	—0,71	—0,53	

Also ist im allgemeinen nach der kinetischen Gastheorie der zweite Virialkoeffizient B_M der Mischung eine quadratische Funktion (Bild 7) der Konzentration c und (1 — c) und nur dann in eine (in der Technik vielfach still-

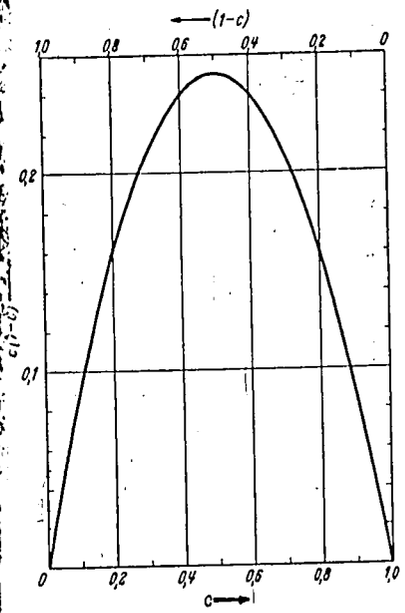


Bild 7. Die Funktion c (1—c) als Funktion der Konzentration c

schweigend angenommene) lineare Abhängigkeit ausartet, wenn die Kenngröße $\beta = 2B_{12} - B_{11} - B_{22} = 0$ ist, d. h. wenn der zweite Virialkoeffizient B_{12}, hervorgerufen durch die Wechselwirkung der ungleichartigen Moleküle, gleich dem arithmetischen Mittel aus den beiden zweiten Virialkoeffizienten der beiden reinen Gase ist. Das ist näherungsweise dann der Fall und anschaulich verständlich, wenn sich die beiden Molekülsorten sehr ähnlich sind, wie z. B. N_2 und O_2 in dem Gemisch Luft (Bild 8).

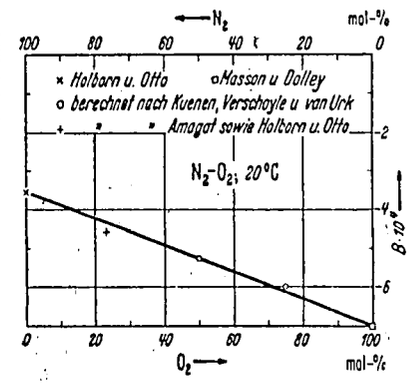


Bild 8. Der zweite Virialkoeffizient 10^4B des Systems O_2—N_2 als Funktion der Konzentration

Die theoretisch geforderte Beziehung (3a) ist schon in vielen Fällen mit ausreichender Genauigkeit experimentell bestätigt worden, wie eine Durchsicht des Schrifttums leicht zeigt. In Zahlentafel 1 sind für die Gemische H_2—J_2[21], H_2—He[22], H_2—Co[23], O_2—C_2H_4[24], Ar—C_2H_4[9], He—Ar[9] und H_2—Ar[9] sowohl die Größen B_{11}, B_{12} und B_{22}, wie die Kenngröße β eingetragen, die offenbar ein Maß für die Abweichung vom Amagat'schen Gesetz der additiven Volumina ist; weniger verwendbare Messungen liegen für N_2—CH_4[26], CO_2—CH_3Cl[27], CO_2—H_2[28], C_2H_6—HCl[29] und CO_2—N_2[30] vor; die B_M- und β-Werte sind in Amagat-Einheiten aufgetragen, d. h. sie beziehen sich auf das Volumen 1 bei t = 0° C und p = 760 Torr, geben also mit 100 multipliziert die prozentische Abweichung des Realvolumens vom Idealvolumen 1 bei 0° C an. Multipliziert man diese Größen mit 22,414, so sind die 10^3B die Abweichung des Realvolumens in $Nm^3/kmol$ vom Idealvolumen 22,414 $Nm^3/kmol$.

Dieser Sachverhalt wird durch Bild 9—11 veranschaulicht, in denen die Volumina der in der Zahlentafel 1 behandelten binären Gasgemische für beliebige Molkonzentrationen c bzw. (1 — c) graphisch dargestellt sind. So stellt Bild 9 das System H_2—CO dar; für 100% CO ist hiernach das reale Molvolumen um $100 \cdot 4{,}4 \cdot 10^{-4}$% geringer als das mit B = 0 eingezeichnete Idealvolumen (wird B = 0, so geht $pV = RT + Bp$ in die ideale Gasgleichung $pV = RT$ über). Das Molvolumen von 100proz. H_2 ist um $100 \cdot 6{,}51 \cdot 10^{-4}$% größer als das Idealvolumen, weshalb man vom „überidealen" Gaszustand ($V > V_{id}$) spricht. Die punktierte Gerade würde das Volumen für beliebige, auf der Abszisse aufgetragene c-Werte darstellen, wenn β = 0 wäre; über dieser Geraden ist nach Gl. (3a) bzw. Bild 7 die Größe $\beta c \cdot (1 - c)$ aufgetragen, die für ein 1:1-Gemisch wegen $c = (1 - c) = 1/2$ den Maximalwert β/4 erreicht. Anschaulich läßt sich also β als der vierfache Betrag der Abweichung des Volumens einer realen äquimolaren Gasmischung vom linear gemittelten Volumen darstellen. Der Wert der Formel (3a) für binäre Gasgemische beruht offenbar darauf, daß man das Realvolumen nicht für beliebige c-Werte durchzumessen braucht, sondern daß die Volummessung an den beiden reinen Gasen und einem einzigen Gemisch, zweckmäßig dem am meisten abweichenden 1:1-Gemisch, zur Berechnung der ganzen Kurve ausreicht. Die Betrachtung von Bild 9—11 lehrt, daß das Volumen der Mischung nie kleiner ist, als es sich aus der linearen Mischungsformel ergeben würde; die Frage, ob es Gesetz oder Zufall ist, daß $\beta > 0$, nie $\beta < 0$ ist, wird unten erörtert werden.

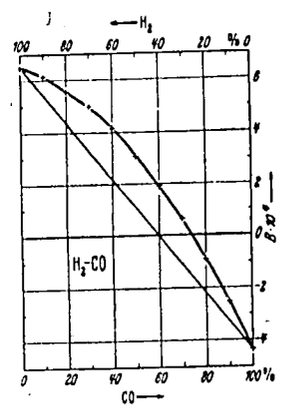


Bild 9. Der zweite Virialkoeffizient 10^4B des Systems H_2—CO als Funktion der Konzentration. + Meßpunkte; Gerade = Additivitätsgesetz

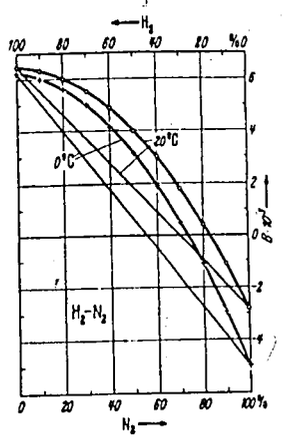


Bild 10. Der zweite Virialkoeffizient 10^4B des Systems H_2—N_2 als Funktion der Konzentration + und ○ Meßpunkte; Gerade = Additivitätsgesetz

Die Bilder 9—11 zeigen ferner, daß die Abweichung des Volumens der äquimolaren Mischung vom linearen Mittelwert der Einzelvolumina durchaus ähnliche Beträge erreichen kann wie die Abweichung der Realvolumina einheitlicher Gase vom Idealvolumen; solange nicht für

H_2[28]), C_2H_6—HCl[29]) und CO_2—N_2[30]) vor; die B_M- und
magat-Einheiten aufgetragen, d. h. sie
s Volumen 1 bei t = 0° C und p =
mit 100 multipliziert die prozentische
lvolumens vom Idealvolumen 1 bei
man diese Größen mit 22,414, so sind
lung des Realvolumens in Nm^3/kmol
22,414 Nm^3/kmol.

Dieser Sachverhalt wird durch Bild 9—11 ver-
anschaulicht, in denen die Volumina der in der Zahlen-
tafel 1 behandelten binären Gasgemische für beliebige
Molkonzentrationen c bzw. (1—c) graphisch dargestellt
sind. So stellt Bild 9 das System H_2—CO dar; für 100% CO ist hiernach das reale Molvolumen um $100 \cdot 4{,}4 \cdot 10^{-4}$% kleiner als das mit B = 0 eingezeichnete Idealvolumen

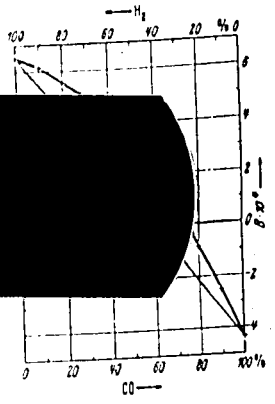


Bild 9. Der zweite Virialkoeffizient 10^4B des Systems H_2—CO als Funktion der Konzentration. + Meßpunkte; Gerade = Additivitätsgesetz

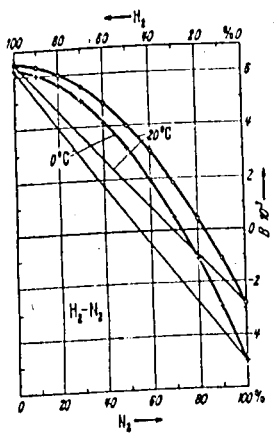


Bild 10. Der zweite Virialkoeffizient 10^4B des Systems H_2—N_2 als Funktion der Konzentration + und ○ Meßpunkte; Gerade = Additivitätsgesetz

geht pV = RT+Bp in die ideale Gas-
T über). Das Molvolumen von 100proz.
$\cdot 10^{-4}$% größer als das Idealvolumen,
„überidealen" Gaszustand (V>Vid)
ktierte Gerade würde das Volumen
uf der Abszisse aufgetragene c-Werte
darstellen, wenn β = 0 wäre; über dieser Geraden ist
nach Gl. (3a) bzw. Bild 7 die Größe β c · (1 — c) aufgetra-
gen, die für ein 1:1-Gemisch wegen c = (1 — c) = ½ den
Maximalwert β/4 erreicht. Anschaulich läßt sich also β als
der vierfache Betrag der Abweichung des Volumens einer
realen äquimolaren Gasmischung vom linear gemittelten
Volumen darstellen. Der Wert der Formel (3a) für binäre
Gasgemische beruht offenbar darauf, daß man das Real-
volumen nicht für beliebige c-Werte durchzumessen
braucht, sondern daß die Volummessung an den beiden
reinen Gasen und einem einzigen Gemisch, zweckmäßig
n abweichenden 1:1-Gemisch, zur Berech
Kurve ausreicht. Die Betrachtung vo
daß das Volumen der Mischung ni
sich aus der linearen Mischungsform
die Frage, ob es Gesetz oder Zufall is
< 0 ist, wird unten erörtert werden.

Die Bilder 9—11 zeigen ferner, daß die Abweichur
des Volumens der äquimolaren Mischung vom linear
Mittelwert der Einzelvolumina durchaus ähnliche Beträ
erreichen kann wie die Abweichung der Realvolumi
einheitlicher Gase vom Idealvolumen; solange nicht

alle technisch wichtigen binären Gasgemische β-Messungen vorliegen, erscheint es daher zulässig, für Gasgemische das Idealvolumen anzusetzen. Es steht zu erwarten, daß bald solche Messungen ausgeführt werden, die nunmehr als eine unerläßliche Ergänzung für das Normblatt 1871 erscheinen. Daß die hier dargestellten Schrifttumswerte sich häufig auf die technisch unwichtigeren Edelgase beziehen, erklärt sich daraus, daß diese für die Theorie als einatomige Gase einen besonders einfachen und daher interessanten Sonderfall bilden.

Die allgemeine Formel zeigt auch den Weg zur Berechnung der Volumina von ternären Gasgemischen; in diesem Falle lautet sie:

$$B_M = B_{11} \cdot c_1^2 + B_{22} \cdot c_2^2 + B_{33} \cdot c_3^2 + 2\,B_{12} \cdot c_1 \cdot c_2 + 2\,B_{23} \cdot c_2 \cdot c_3 + 2\,B_{13} \cdot c_1 \cdot c_3.$$

Diese Formel sagt aus, daß das Volumen eines ternären Gases aus den Virialkoeffizienten der drei Komponenten und den drei Virialkoeffizienten der drei möglichen binären Gemische berechnet werden kann; das Problem der ternären (und der höheren) Gemische wird also auf das viel einfachere der Zweistoffsysteme zurückgeführt Bild 11). Es sind also außer den — meist schon bekannten — B-Werten der reinen Gase nur noch die drei B_M-Werte z. B. der äquimolaren Mischungen zu messen, um die Volumina für beliebige Konzentrationen errechnen zu können.

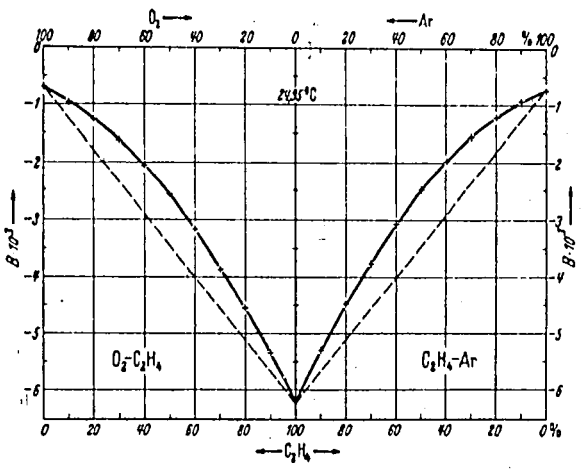


Bild 11. Zweite Virialkoeffizienten 10^3B der beiden Systeme O_2—C_2H_4 und C_2H_4—Ar als Funktion der Konzentrationen + Meßpunkte; Geraden = Additivitätsgesetz

Als Beispiel für die praktische Bedeutung dieser Berechnungsmöglichkeit sei auf das Problem hingewiesen, die in Stahlflaschen unter hohem Druck enthaltene Menge Stadtgas zu ermitteln, wie sie seit einiger Zeit zum Betrieb von Kraftwagen verkauft wird. Bisher wurde der Druck der Gasmenge in der Stahlflasche bekannten Inhaltes gemessen und daraus nach einem Mischungsgesetz für die Drucke der Einzelgase die Menge des Stadtgases errechnet; inzwischen haben Messungen von J. Otto[31]) gezeigt, daß in den Flaschen über 10% weniger Gas enthalten sein kann, als es sich nach dieser Mischungsregel ergab.

Nachdem es so gelungen ist, Volumen und Druck von Gemischen mit beliebig vielen Komponenten und beliebigen Mischungsverhältnissen durch einfache halbempirische Formeln auf binäre Gemische mit nur einer einzigen zu messenden Kenngröße (β) zurückzuführen, liegt nunmehr die Aufgabe vor, eine entsprechende Berechnung auch für die spezifische Wärme von Gasgemischen durchzuführen. Die Druckabhängigkeit der spezifischen Wärme reiner Gase, die auf dem Unterschied zwischen idealem (pV = RT) und realem (pV ≠ RT) Verhalten beruht, habe ich für alle interessierenden Gase berechnet und tabelliert. Damit erhebt sich folgende Frage: Inwieweit erhält man richtig die Druckabhängigkeit der spezifischen Wärme eines Gasgemisches, wenn man die bekannten Druckabhängigkeiten der einzelnen Komponenten bei den zugehörigen Teildrucken addiert?

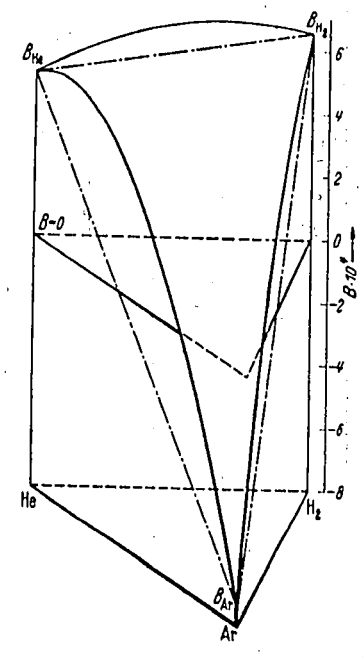


Bild 12. Zweite Virialkoeffizienten 10^4B des ternären Systems He—H_2—Ar als Funktion der Konzentrationen gemäß Bild 13 und 14. Strichpunktierte Geraden = Additivitätsgesetz

Diese Frage ist von Bedeutung für nahezu alle technischen Aufgaben, z. B. für die genauere Aufstellung von i, x-Diagrammen feuchter Luft, die bisher stillschweigend additiv aus den entsprechenden Werten für O_2-, N_2- und H_2O-Dampf zusammengesetzt wurden, oder z. B. für die Synthesegase wie N_2—H_2—NH_3, von deren spezifischer Wärme die Ausbeute empfindlich abhängt. Gerade für diese technisch wichtigen Fälle fehlen zur Zeit noch die experimentellen Unterlagen (p-V-T-Messungen). Die nachstehenden Berechnungen wurden daher für die allein ausreichend durchgemessenen binären Systeme He—Ar, H_2—Ar, He—N_2 und CH_4—C_2H_6 durchgeführt. Die technische Bedeutung dieser Rechnungen dürfte durch die geringere Wichtigkeit der speziellen Beispiele nicht gemindert werden.

Für Gasgemische gilt ebenso wie für reine Gase die Clausius'sche Gleichung

$$(\partial C_p/\partial p)_T = -T\,(\partial^2 V/\partial T^2)_p,$$

d. h. die Druckabhängigkeit der spezifischen Wärme δC_p ist entgegengesetzt gleich der Krümmung der Volumkurve als Funktion der Temperatur, multipliziert mit der absoluten Temperatur. Für das Molvolumen von binären Mischungen $V_M = V_{id} + B_M$ mit der Molkonzentration c der ersten und (1 — c) der zweiten Komponente gilt, wenn man die Zustandsgleichung pV = RT + Bp allgemein ein-

führte[3], in Übereinstimmung von Messungen und Theorie gefunden worden:

$$B_M = c^2 B_{11} + (1-c)^2 B_{22} + 2c(1-c) B_{12}$$
$$= c B_{11} + (1-c) B_{22} + c(1-c)\beta.$$

Dabei bedeutet B_{11} die Abweichung vom idealen Molvolumen V_{id}, die durch die Wechselwirkung zwischen den Molekülen der ersten Komponente hervorgerufen wird, B_{22} die durch die gegenseitige Beeinflussung der Moleküle der zweiten Komponente bewirkte Volumänderung und B_{12} diejenige, die durch Wechselwirkung zwischen ungleichartigen Molekülen, also zwischen 1 und 2 entsteht. β ist eine Abkürzung für die Kenngröße $2B_{12} - B_{11} - B_{22}$. Somit ist die Druckabhängigkeit der spezifischen Wärme des Gasgemisches

$$(\partial C_p/\partial p)_{T,M} = -T(\partial^2 V_M/\partial T^2)_p = -T(\partial^2 V_{id}/\partial T^2 + \partial^2 B_M/\partial T^2)_p = -T(\partial^2 B_M/\partial T^2)_p,$$

da $(\partial^2 V_{id}/\partial T^2)_p$ wegen $V_{id} = RT/p$ verschwindet. So ergibt sich

$$(\partial C_p/\partial p)_T = -T(\partial^2 B_M/\partial T^2)_p = -T(\partial^2 B_{11}/\partial T^2) + (1-c)(\partial^2 B_{22}/\partial T^2 + c(1-c)(\partial^2\beta/\partial T^2)_p,$$

falls man (2) in (3) einsetzt.

Diese Gleichung läßt sich leicht anschaulich deuten, wenn man die B, T-Kurven*) des Gemisches betrachtet, wie sie z. B. im Bild 13 für das He-Ar-Gemisch[25]) nach Zahlentafel 1 aufgetragen sind. Die Krümmung der B_{11}- und B_{22}-Kurven gegen die Abszisse ist negativ, die spezifische Wärme von He und Ar wächst also nach Gl. (1) mit steigendem Druck; die Krümmung der B_{22}-Kurve ist größer als die der B_{11}-Kurve, entsprechend der größeren Druckabhängigkeit der C_p von Ar. Für ein reales He-Ar-Gemisch ist nun nach Gl. (4) noch die Krümmung der β, T-Kurve mit dem Koeffizienten $c(1-c)$ zu addieren; ihre Krümmung ist positiv, ihr Beitrag zu δC_p daher negativ, mit anderen Worten: die spezifische Wärme des Gasgemisches ist kleiner als die Summe der spezifischen Wärmen der Komponenten (Bild 14, Tab. 2). Die Abweichung von der Mischungsregel erreicht ihren Höchstbetrag für das äquimolare (1:1)-Gemisch, weil dann $c(1-c)$ mit 0,25 seinen Höchstwert erreicht (Bild 7).

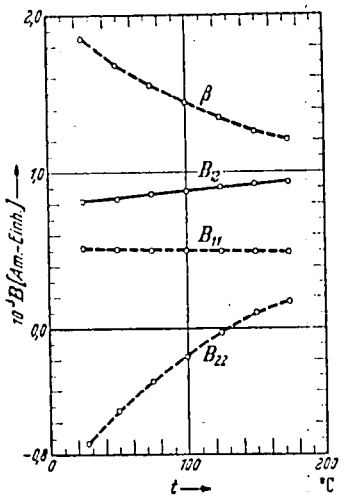


Bild 13. Zweite Virialkoeffizienten von Helium (B_{11}), Argon (B_{22}), vom Gemisch He–Ar (B_{12}) und $\beta = 2B_{12} - B_{11} - B_{22}$ als Funktion der Temperatur, nach Messungen von Tanner und Masson (vgl. Zahlentafel 1)

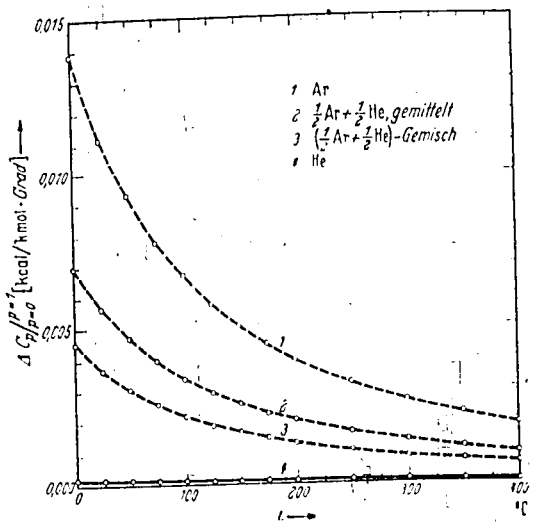


Bild 14. Druckabhängigkeit $\Delta C_p|_{p=0}^{1}$ [kcal/kmol·Grad] je Atm. der spezifischen Wärme von Ar (Kurve 1), He (Kurve 4), dem äquimolaren (1:1)-Gemisch (Ar+He)/2 (Kurve 3) und dem arithmetischen Mittelwert der He- und Ar-Kurve (Kurve 2), sämtliche als Funktion der Temperatur, nach Zahlentafel 2

Dieser Satz gilt nicht nur im Sonderfall des He-Ar-Gemisches, sondern stets (vgl. Bild 15, 16 u. 17), wenn $\beta > 0$ ist und sich asymptotisch dem Wert 0, entsprechend dem idealen Gaszustand bei höheren Temperaturen nähert.

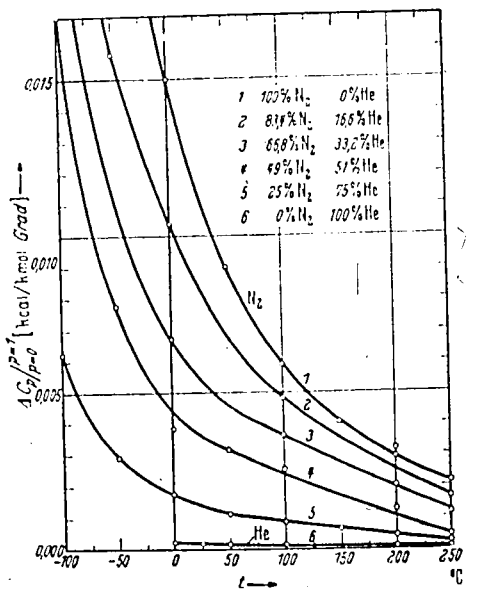
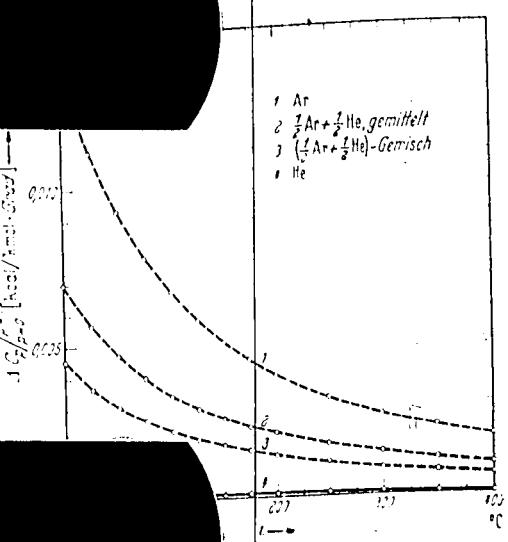


Bild 15. Druckabhängigkeit $\Delta C_p|_{p=0}^{1}$ [kcal/kmol·Grad] je Atm. von He, N_2 und verschiedenen He–N_2-Gemischen als Funktion der Temperatur, durch graphische Differentiation abgeleitet.
Von oben nach unten:
Kurve 1: 100% N_2, 0% He; Kurve 4: 49% N_2, 51% He;
Kurve 2: 83,4% N_2, 16,6% He; Kurve 5: 25% N_2, 75% He;
Kurve 3: 66,8% N_2, 33,2% He; Kurve 6: 0% N_2, 100% He.

Ist $\beta = 0$, wie im System $N_2 - O_2$ (trockene Luft), so ist auch $(\partial^2\beta/\partial T^2)_p = 0$ und die spezifische Wärme der Mischung ist genau gleich der Summe der C_p der Kompo-

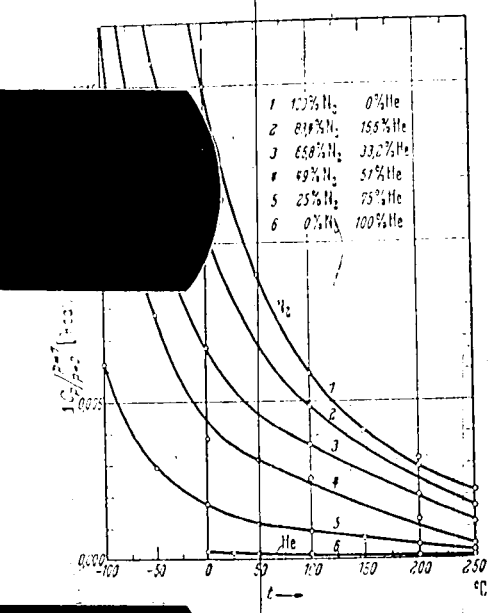
*) Die geringe Krümmung der B_{11}-Kurve kann nur aus den nicht eingezeichneten Meßwerten von Holborn und Otto [24]) sicher abgeleitet werden.

nponenten (Bild 14, Tab. 2). Die Abweichung von
Mi[illegible] erreicht ihren Höchstbetrag für das
[illegible]ch, weil dann c (1 — c) mit 0,25
[illegible]ht (Bild 7).



$\Delta C_p|_{p=0}^{1}$ [kcal/kmol·Grad] je Atm. der
Kurve 1), He (Kurve 4), dem äquimolaren
Kurve 3) und dem arithmetischen Mittelwert
der He- und Ar-Kurve (Kurve 2), sämtliche als Funktion der Temperatur,
nach Zahlentafel 2

Dieser Satz gilt nicht nur im Sonderfall des He-Ar-
emisches, sondern stets (vgl. Bild 15, 16 u. 17), wenn
>0 ist und sich asymptotisch dem Wert 0, entsprechend
m idealen Gaszustand bei höheren Temperaturen nähert.



$\Delta C_p|_{p=0}^{1}$ [kcal/kmol·Grad] je Atm. von
He—N_2-Gemischen als Funktion der Tem-
[illegible]hische Differentiation abgeleitet.
[illegible]oben nach unten:
[illegible]% He; Kurve 4: 49% N_2, 51% He;
[illegible]% He; Kurve 5: 25% N_2, 75% He;
[illegible]2% He; Kurve 6: 0% N_2, 100% He.

Ist $\beta = 0$, wie im System $N_2 - O_2$ (trockene Luft), so ist
auch $(\partial^2\beta/\partial T^2)_p = 0$ und die spezifische Wärme der Mi-
schung ist genau gleich der Summe der C_p der Kompo-

nenten bei ihren jeweiligen Teildrucken. Daß $\beta<0$ und dementsprechend $(\partial^2\beta/\partial T^2)_p^r<0$ wäre, ist bisher noch nie beobachtet worden und kann gesetzmäßig begründet sein.*)

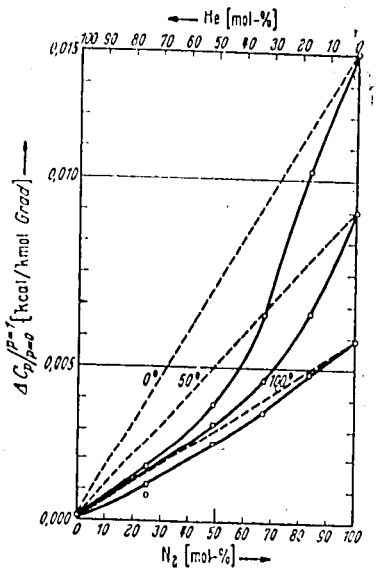


Bild 16. Druckabhängigkeit $\Delta C_p|_{p=0}^{1}$ [kcal/kmol·Grad] je Atm. von He—N_2-Gemischen als Funktion des Mischungsverhältnisses und konstanter Temperatur: 0° C (oben), 50° C (Mitte), 100° C (unten),

Tab. 2

Druckabhängigkeit der spezifischen Wärme

$\Delta C_p|_{p=0}^{1}$ von He, Ar, ½ (He + Ar) gemittelt, [½ (He + Ar) (1:1)-Gemisch] nach Justi und Kohler[3])

	I	II	(I+II)/2	$\frac{k_1}{4}$ (I−II)	(I+II)$\frac{k_1}{8}$(−II)
t°C	$\Delta C_p\|_{p=0}^{1}$ von He	$\Delta C_p\|_{p=0}^{1}$ von Ar	$\Delta C_p\|_{p=0}^{1}$ von ½(He+Ar)	$\frac{k_1}{4}[\Delta C_p\|_{p=0,He}^{1} - \Delta C_p\|_{p=0,Ar}^{1}]$	$\Delta C_p\|_{p=0}^{1}$ des (1:1)-Gemisches
0	0,00020$_7$	0,0138	0,0070$_0$	0,0024$_7$	0,0045$_3$
25	,00017$_4$	,0112	,0056$_7$	,0020$_0$	,0036$_7$
50	,00014$_8$	,0092	,0046$_9$	,0016$_5$	,0030$_4$
75	,00012$_8$	,0078	,0039$_5$	,0013$_9$	,0025$_6$
100	,00011$_1$	,0066	,0033$_7$	,0011$_9$	,0021$_8$
125	,00009$_8$	,0057	,0029$_1$	,0010$_3$	,0018$_8$
150	,00008$_7$	,0050	,0025$_4$	,0008$_9$	,0016$_5$
174	,00007$_7$	,0044	,0022$_5$	,0007$_9$	,0014$_6$
200	,00006$_9$	,0039	,0020$_0$	,0007$_0$	,0013$_0$
250	,00005$_6$	,0031$_5$	,0016$_0$	,0005$_6$	,0010$_4$
300	,00004$_7$	,0026	,0013$_2$	,0004$_6$	,0008$_6$
350	,00004$_0$	,0022	,0011$_1$	,0003$_9$	,0007$_2$
400	,00003$_4$	,0018$_5$	,0009$_4$	,0003$_3$	,0006$_1$

Infolge der gebotenen Kürze soll auf weitere quantitativ durchgearbeitete Systeme hier nicht eingegangen, sondern auf meine entsprechende Abhandlung[4]) verwiesen werden. Dort findet man auch δC_p-Kurven für das Gemisch

*) Z. B. dadurch, daß der nicht additive Anteil von $(\partial C_p/\partial p)_T$, also $-T(\partial^2\beta/\partial T^2)_p$, gleich dem Temperaturkoeffizienten der Mischungswärme bei konst. Druck $\partial[\beta - T(\partial\beta/\partial T)_p]/\partial T$ ist (Kirchhoffscher Satz); soll also die Mischungswärme bei steigender Temperatur entsprechend der Annäherung an den idealen Gaszustand asymptotisch verschwinden, so ist hierfür $(\partial^2\beta/\partial T^2)_p \geq 0$ die notwendige Bedingung.

He-N_2, die nicht aus der beim System He-Ar benutzten Formel ausgehen, sondern unmittelbar aus Messungen des Joule-Thomson-Koeffizienten bei verschiedenen Kon-

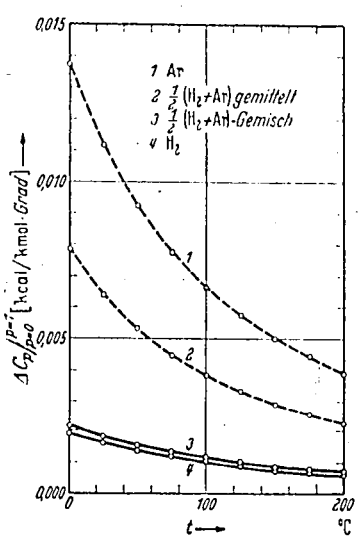


Bild 17. Druckabhängigkeit $\Delta C_p|_{p=0}^{1}$ [kcal/kmol·Grad] je Atm. der spezifischen Wärme von Ar (Kurve *1*), H_2 (Kurve *4*), vom äquimolaren Gemisch (Ar + H_2)/2 (Kurve *3*) und dem arithmetischen Mittelwert der Ar- und H_2-Kurve (Kurve *2*).

zentrationen abgeleitet sind (Bild 18). Hierbei ergibt sich vollständige Übereinstimmung (Bild 16) mit dem Ergebnis meiner zuerst wiedergegebenen Gleichungen; diese Bestätigung ist insofern von Wert, als der Joule-Thomson-Effekt für ideale Gase verschwindet, also 100%ig den Realzustand widerspiegelt, während Messungen des Gesamtvolumens z. B. der Luft bei gewöhnlichen Bedingungen zu 99,9% das Idealvolumen enthalten und deshalb auf etwa $^1/_{1000}$% genau sein müssen, wenn man nicht nur β, sondern $\partial\beta/\partial T$ und gar $\partial^2\beta/\partial T^2$ mit einiger Sicherheit abgeben will. Insofern verdienen Joule-Thomson-Effekt-Messungen besondere Aufmerksamkeit, und nach den obigen Ausführungen (s. nebenst. Fußn.) ist es verständlich, daß die Abkühlung bei der Drosselung eines Gasgemisches

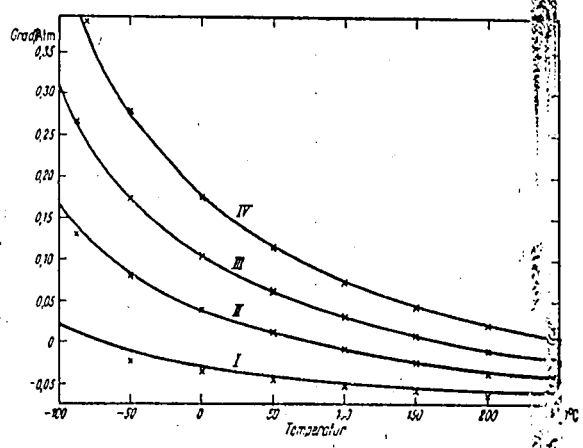


Bild 18. Joule-Thomson-Koeffizient μ [Grad/Atm] verschiedener He—N_2-Gemische als Funktion der Temperatur, nach Messungen von Roebuck gezeichnet von Hirschfelder und Roseveare[5]), von unten nach oben: Kurve *I*: 75,5% He; Kurve *II*: 51% He; Kurve *III*: 33,2% He; Kurve *IV*: 16,6% He.

geringer ist, als man sie additiv aus den Gaskomponenten berechnet; qualitativ betrachtet bedeutet Abkühlung Zunahme der Ordnung, Mischung von Gasen dagegen vermehrte Unordnung.

Man mag einwenden, daß diese Nichtadditivitäten so gering sind, daß sie hinsichtlich Volumen und Druck vernachlässigt werden können; die Tab. 1 läßt aber erkennen, daß die β und B_{12} von derselben Größenordnung sind wie die B_{11} und B_{22}, daß es also sinnlos ist, den realen Gaszustand berücksichtigen zu wollen, solange man die Mischungseffekte vernachlässigt. In dieser Hinsicht müßte das Normblatt DIN 1871 erweitert bzw. neu bearbeitet werden.

In einem industriell besonders wichtigen Falle sind aber die Mischungseffekte nicht nur Korrekturen des Idealzustandes, sondern sie beeinflussen die physikalisch-chemischen Vorgänge entscheidend; hierbei denke ich an die Wirkungen der aus meinen Formeln ableitbaren Mischungswärmen, die mit $\Delta U = -T\frac{\partial \beta}{\partial T} c\,(1-c)\,p$ bei konstantem Volumen und $\Delta H = \left[\beta - T\frac{\partial \beta}{\partial T}\right] c\,(1-c)\,p$ [kcal/kmol] an sich nur geringe Temperaturänderungen bewirken. Nun sind aber die Logarithmen der Reaktionsgleichgewichts-Konstanten bekanntlich kleine Differenzen großer Zahlen (der freien Enthalpien usw.), und dies ist der Grund, warum eine an sich geringe Wärmetönung wie diese Mischungswärme das Gleichgewicht entscheidend beeinflussen kann. Die entsprechenden Gleichungen sollen hier nicht wiedergegeben werden, zumal da sie inzwischen auch in der amerikanischen Literatur in Übereinstimmung mit meinen Ableitungen veröffentlicht worden sind. Es sei lediglich auf das Zahlenbeispiel auf S. 138 meines Buches hingewiesen, wonach Larson und Dodge[35] bei der Ammoniaksynthese die NH_3-Ausbeute von 2,04% auf 69,4% bei 450° C steigern konnten, als sie den Druck von 10 auf 1000 Atm erhöhten. Gerade in diesem Kreise möchte ich auf die großen Möglichkeiten hinweisen, die hier die Theorie der Praxis zeigt.

Auch die Frage nach der atomistischen Deutung dieser Mischungseffekte läßt sich anschaulich beantworten. Betrachten wir beispielsweise wieder das He-Ar-Gemisch, von dem uns die Tab. 1 entsprechend dem Vorzeichen der B-Werte aussagt, daß sich die Ar-Atome untereinander anziehen, die He-Atome untereinander abstoßen, und daß die He- und Ar-Teilchen sich gegenseitig besonders stark abstoßen (große positive B_{12}-Werte). Es wird sich daher im Gasgemisch eine solche räumliche Verteilung ausbilden, daß möglichst viele Ar-Atome einander benachbart sind, und daß die He- und Ar-Atome sich gegenseitig weitgehend meiden. Es tritt also ein halbkristalliner Ordnungszustand ein, der bei steigender Temperatur durch die zunehmende Wärmebewegung der Atome verwischt wird. Bei sinkender Temperatur nimmt umgekehrt der Ordnungszustand solange zu, bis das Ar fest wird und schneeförmig ausflockt. Diese zusätzlichen Ordnungs-Unordnungs-Übergänge entsprechen zusätzlichen Entropie-Änderungen, wie sie ähnlich Hildebrand[36] in der Theorie der Elektrolyte berechnet hat. Die Metallkundler unter ihnen werden die Parallele zu geordneten und ungeordneten Metallegierungen bemerken, und wir werden daher die besprochenen Mischungs- und Entmischungseffekte schlagwortartig dadurch charakterisieren können, daß wir statt von Gemischen von Gaslegierungen sprechen.

Aussprache:

Lüder legt folgendes dar. Herr Dr. Justi trägt in fleißiger Arbeit wertvolles physikalisches Material in einer für technische Anwendung verwertbaren Form herbei, seine Zahlenwerte gelten mit großer Genauigkeit. Es war daher sehr geschickt, ihn zu einem Vortrag in Oppau zu gewinnen, einem Werke der chemischen Großgasreaktionen, wo mit großer Präzision gearbeitet wird und man gezwungen ist, mit großer Genauigkeit auf die physikalischen Werte einzugehen. Ist es um die Physik der kleinen Moleküle verhältnismäßig gut bestellt, so steht es um die der großen schwieriger (z. B. die Freone, Toluole u. a.). Wir haben ein großes Interesse, alle die großen Moleküle, die streng gesetzmäßig aufgebaut sind, vorzugsweise die Polymeren, z. B. Styrol, die Äthylengruppe oder Stoffe wie Phenylchlorid, kennen zu lernen. Gewiß ist solch ein Molekül — man stelle es sich im Modell vor — ein kompliziertes Gebilde mit einer ganzen Reihe von Eigenschwingungen, dessen Teilstücke beispielsweise durch Polymerisation zusammengebracht werden; aber man sollte meinen, daß da doch bestimmte Wege seien, um hier weiterzukommen.

Justi: Dieser Wunsch kann vielleicht erfüllt werden. Es sind schon verschiedene Schwingungstypen festgelegt, und man kann die physikalischen Daten schon auf 10% genau schätzen. Dr. Lüder sei selbst an der Ausrechnung der Wasserdampftafeln beteiligt gewesen und kenne daher Aufgabe und Arbeitsweise.

Eine Frage um die Kenntnis der Paraffinkohlenwasserstoffe beantwortet Dr. Justi dahin, daß hierüber der Abschnitt 29 seines Buches Aufschluß gebe.

In der Aussprache wird auf die vom Vortragenden angeführte Selenzelle zurückgegriffen. Diese läßt den durch Belichtungsänderungen entstehenden schwachen Strom nur in einer Richtung fließen, und es ist nicht möglich, durch Stromumkehr Lichtstärkeänderungen zu erzielen. Insofern sei die Selenzelle ein Beweis gegen die strenge Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes und ein Argument dafür, daß die Sätze der Thermodynamik Wahrscheinlichkeitssätze sind.

Matz fragt, ob die kinetische Gastheorie nur über umkehrbare Vorgänge Aussagen mache.

Justi erwidert, daß das diesbezügliche Wissen über Vorgänge wie die elektrische Leitung und die Wärmeleitung gering sei.

Wilke führt aus, daß der Vortrag schön und eindrucksvoll gewesen sei und in seiner vollendeten Form ein geeigneter Beitrag, um das schwierige Gebiet näher zu bringen, bei dessen eingehenderem Studium das Justi'sche Buch weiterhelfe. Man würde zunächst glauben, daß hier in der I. G. nur zweckgebundene Forschung getrieben werde, doch wird hier auch die reine Forschung in erheblichem Maße gepflegt. Die Tabellen von Dr. Justi seien auch als Grundlagen für die Stoffwertesammlung benutzt. Dabei sei das eigentliche Arbeitsgebiet von Dr. Justi ein anderes, und sollte es wohl auch sonstwo möglich sein, einen ähnlichen Privatfleiß zu entwickeln. Wilke fragt, wie groß wohl die Abweichungen der Diagramme von Pflaum seien.

Justi erklärt, daß die Abweichungen nicht so groß seien, Pflaum habe gewissermaßen mit ihm in Verbindung gestanden. Umgekehrt möchte er nicht durch Anfertigung von Diagrammen ähnlich den Pflaum'schen oder Neubearbeitung diesem vorgreifen.

Aussprache:

Lüder legt folgendes dar. Herr Dr. Justi trägt in fleißiger Arbeit wertvolles physikalisches Material in einer [redacted] Anwendung verwertbaren Form herbei, [redacted] te gelten mit großer Genauigkeit. Es war [redacted] ickt, ihn zu einem Vortrag in Oppau zu [redacted] Werke der chemischen Großgasreaktio- [redacted] r Präzision gearbeitet wird und man ge- [redacted] großer Genauigkeit auf die physikalischen [redacted] en. Ist es um die Physik der kleinen Mole- küle verhältnismäßig gut bestellt, so steht es um die der großen schwieriger (z. B. die Freone, Toluole u. a.). Wir haben ein großes Interesse, alle die großen Moleküle, die streng gesetzmäßig aufgebaut sind, vorzugsweise die Polymeren, z. B. Styrol, die Äthylengruppe oder Stoffe wie Phenylchlorid, kennen zu lernen. Gewiß ist solch ein Molekül — man stelle es sich im Modell vor — ein komplizierter Gebilde mit einer ganzen Reihe von Eigenschwingungen, dessen Teilstücke beispielsweise durch Polymerisation zusammengebracht werden; aber man sollte meinen, daß da doch bestimmte Wege seien, um hier weiterzu- [redacted]

[redacted] er Wunsch kann vielleicht erfüllt werden. [redacted] rschiedene Schwingungstypen festgelegt, [redacted] ie physikalischen Daten schon auf 10% [redacted] Dr. Lüder sei selbst an der Ausrechnung [redacted] pitafeln beteiligt gewesen und kenne da- [redacted] Aufgabe und Arbeitsweise.

Eine Frage um die Kenntnis der Paraffinkohlenwasserstoffe beantwortet Dr. Justi dahin, daß hierüber der Abschnitt 29 seines Buches Aufschluß gebe.

In der Aussprache wird auf die vom Vortragenden angeführte Selenzelle zurückgegriffen. Diese läßt den durch Belichtungsänderungen entstehenden schwachen Strom nur in einer Richtung fließen, und es ist nicht möglich, durch Stromumkehr Lichtstärkeänderungen zu erzielen. Insofern sei die Selenzelle ein Beweis gegen die strenge Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes und ein Argu- [redacted] daß die Sätze der Thermodynamik Wahr- [redacted] ätze sind.

[redacted] ob die kinetische Gastheorie nur über- [redacted] gänge Aussagen mache.

[redacted] ert, daß das diesbezügliche Wissen um [redacted] die elektrische Leitung und die Wärme- [redacted] sei.

Wilke führt aus, daß der Vortrag schön und eindrucksvoll gewesen sei und in seiner vollendeten Form ein geeigneter Beitrag, um das schwierige Gebiet näher zu bringen, bei dessen eingehenderem Studium das Justi'sche Buch weiterhelfe. Man würde zunächst glauben, daß hier in der I.G. nur zweckgebundene Forschung getrieben werde, doch wird hier auch die reine Forschung in erheblichem Maße gepflegt. Die Tabellen von Dr. Justi seien auch als Grundlagen für die Stoffwertesammlung benutzt. Dabei sei das eigentliche Arbeitsgebiet von Dr. Justi ein- [redacted] sollte es wohl auch sonstwo möglich sein [redacted] Privatfleiß zu entwickeln. Wilke fragt, wi- [redacted] bweichungen der Diagramme von Pflaum [redacted]

[redacted] rt, daß die Abweichungen nicht so gro- [redacted] abe gewissermaßen mit ihm in Verbindung [redacted] gekehrt möchte er nicht durch Anfertigung von Diagrammen ähnlich den Pflaum'schen oder Neubearbeitung diesem vorgreifen.

Sachsse fragt nach der Ursache der Mischungswärme. Obwohl die Mischungswärmen oft gering sind, so ist ihre Kenntnis doch wichtig zur Bestimmung der Reaktionsgleichgewichte. In der Ammoniaksynthese z. B. ist man von 10 auf 750 at hinaufgegangen und hat dabei die Ausbeute von 3 auf 40% erhöht.

Matz erwähnt beiläufig, daß zwischen Äthyl- und Methylalkohol keine Mischungswärme auftritt.

Patat bemerkt, daß Einzelangaben oder Gleichungen über Mischungswärmen erwünscht seien.

Schrifttum

1) E. Justi, Spez. Wärme, Enthalpie, Entropie und Dissoziation technischer Gase. Berlin 1938, Verlag J. Springer; hierzu folgende Nachträge. Vgl. auch E. Justi u. H. Lüder, Forsch. a. d. Ing. Wes. **6** (1935), S. 209.
2) E. Justi, Feuerungstechnik **26**, (1938), S. 313 u. 385. Hier Berichtigungen zu 1) und Realzustand.
3) E. Justi u. M. Kohler, Feuerungstechnik **27**, (1939), S. 5 (Thermische Zustandsgleichung der Gasgemische).
4) E. Justi, Feuerungstechnik **27**, (1939), S. 297 (Kalorische Zustandsgleichung der Gasgemische).
5) E. Justi u. F. Langer, Ztschr. f. techn. Physik **21**, (1940), S. 189 (CH_2Cl_2 u. CF_2Cl_2).
6) E. Justi u. F. Langer, Ztschr. f. techn. Physik **22**, (1941) S. 121 ($CFCl_3$ u. CF_3Cl).
7) M. Planck, Wärmestrahlung S. 126. Leipzig 1921, Verlag S. Hirzel.
8) W. Heuse, Ann. d. Phys. **59**, (1919). S. 86.
9) A. Eucken u. L. d'Or, Göttinger Nachr. 1932, S. 107.
10) K. F. Bonhoeffer u. P. Harteck, Ztschr. f. phys. Chem. (B) **4**, (1929) S. 113.
11) E. Justi u. M. v. Laue, Ztschr. f. techn. Phys. **15**, (1934), S. 521. Sitz. Ber. Berliner Akad. (1934) S. 237. E. Justi u. M. v. Laue.
12) D. Berthelot, Sur les Thermomètres à Gaz, Paris 1903, Verlag Gauthier-Villars. 1903.
13) M. Benedict, J. Amer. Chem. Soc. **59**, (1937), S. 2224 u. 2233.
14) W. E. Deming u. L. E. Shupe, Physic. Rev. **37**, (1931), S. 638.
15) E. P. Bartlett, H. L. Cupples, T. H. Tremearne u. H. C. Hetherington J. Amer. Chem. Soc. **50**, (1928), S. 1275; **52**, (1930) S. 1363 u. 1374.
16) H. Hausen, Forsch. a. d. Geb. d. Ing. Wes. Nr. 274, 1926.
17) J. R. Roebuck, Proc. Amer. Acad. Sci. **60**, (1925) S. 537; **64**, (1930) S. 287.
18) W. Fritz u. Berthold Koch, Wärme- und Kältetechnik **24**, (1940), S. 65.
19) E. Justi in Landolt-Börnstein, 7. Aufl., Bd. 3 (im Druck).
20) J. E. Lennard-Jones u. W. R. Cook, Proc. Roy. Soc. London (A) **115**, (1927) S. 334.
21) T. T. H. Verschoyle, Proc. Roy. London (A) **111**, (1926), S. 552.
22) C. W. Gibby, C. C. Tanner u. J. Masson, London Proc. Soc. Roy. (A) **122** (1929) S. 283.
23) G. A. Scott, Proc. Roy. Soc. London (A) **125**, (1929), S. 330.
24) J. Masson u. L. G. F. Dolley, Proc. Roy. Soc. London (A) **103**, (1923), S. 524.
25) C. C. Tanner u. J. Masson, Proc. Roy. Soc. London (A) 126, (1930), S. 268.
26) F. G. Keyes u. H. G. Burks, J. Amer. Chem. Soc. **49**, (1927), S. 1403; **50** (1928) S. 1100.
27) J. P. Kuenen, Habilitationsschrift Leiden 1892.
28) J. J. Verschaeffelt, Ztschr. f. phys. Chem. **31**, (1899), S. 97.
29) A. Quint, Dissertation, Amsterdam 1900.
30) Th. Andrews. Phil. Trans. London (A) **178**, (1887), S. 45.
31) J. Otto, Phys. Ztschr. **39**, (1938), S. 137.
32) J. P. Kuenen, T. T. H. Verschoyle u. A. Th. van Urk, Comm. Leiden Nr. 161, (1923).
33) E. H. Amagat, Ann. chim. phys. (6) **29**, (1893), S. 68.
34) W. Holborn u. J. Otto, Ztschr. f. Phys. **33**, (1925), S. 1.
35) A. T. Larson u. R. L. Dodge J. Amer. Chem. Soc. **45**, (1923), S. 2918; **46**, (1924), S. 367.
36) J. H. Hildebrand, Solubility of Non-electrolytes, New York 1936, Reinhold Publishing Corporation.

Versuche zur Bestimmung der Zähigkeit des Wasserdampfes

Von Dr.-Ing. HELMUTH SPEYERER

Inhalt:

Die bisher vorliegenden Forschungsarbeiten zur Ermittlung der Zähigkeit des Wasserdampfes werden kritisch besprochen und die Meßverfahren der einzelnen Experimentatoren kurz angegeben. Ausführlich wird auf neue, aus dem Jahr 1940 stammende amerikanische Versuche eingegangen, bei denen die Zähigkeit bis 105 at und 540° C bestimmt wurde. Obwohl sie noch nicht alle Erwartungen, die man bezüglich der Genauigkeit stellen möchte, erfüllen, zeigen sie, daß eine ausgeprägte Steigerung der Wasserdampfzähigkeit mit dem Druck vorliegt, während die Temperaturabhängigkeit bei 1 at abs durch die Versuche von Speyerer richtig wiedergegeben wird. Infolge der großen Schwierigkeiten, die der exakten Bestimmung der Zähigkeit entgegenstehen, können erst neue Versuche zu einer befriedigenden und dann hoffentlich endgültigen Klärung führen.

Ich möchte Ihnen heute über die neuesten Versuche zur Bestimmung der Viskosität des Wasserdampfes berichten und dabei gleichzeitig einen kurzen Überblick über den Gesamtstand unserer Kenntnisse dieser physikalischen Größe geben.

Nachdem die neueren Versuche der Amerikaner Hawkins, Solberg und Potter, Trans. Amer. Soc. mech. Engrs. Bd. 62 (1940) S. 677, veröffentlicht worden sind, liegen nunmehr sechs Arbeiten vor, die sich mit dem Einfluß von Druck und Temperatur auf die Zähigkeit des Wasserdampfes beschäftigen. (Zahlentafel 1.)

Arbeiten von	Jahr	Verfahren	Druckbereich at	Temperaturbereich
Speyerer	1925	Kapillare	1 — 10	100 — 350
Schiller	1934	Düse	5 — 30	150 — 300
Schugajew	1934	Rankine	1 — 93	100 — 400
Hawkins I	1935	Lawaczek	1 — 245	150 — 540
Sigwart	1936	Kapillare	25 — 250	275 — 380
Hawkins II	1940	Kapillare	7 — 105	200 — 540

Zahlentafel 1. Verfahren und Umfang der Zähigkeitsbestimmung von Wasserdampf verschiedener Forscher

Die von mir bei 1 at abs gefundenen Werte werden durch die späteren Arbeiten durchweg gut bestätigt (Bild 1). Dagegen bestehen bezüglich der ermittelten Druckabhängigkeit beträchtliche Unterschiede. Während Speyerer, Schiller sowie Hawkins und seine Mitarbeiter (Zahlentafel 2) eine ausgeprägte Steigerung mit dem Druck feststellen, überschreitet diese bei Schugajew und Sigwart kaum die Genauigkeitsgrenze der Versuche. Dabei ist besonders beachtenswert, daß die Meßverfahren bei Schiller, Schugajew und den älteren Versuchen von Hawkins aus dem Jahre 1935 untereinander und von dem meinigen, demjenigen Sigwarts und Hawkins bei seinen Versuchen aus dem Jahre 1940 verschieden sind. Auch die Überein-

...nmung in dem von den drei letzterwähnten Autoren ...utzten Durchflußverfahren ist nur eine äußerliche, da ...wart die den Druckabfall vergrößernden Druckver-

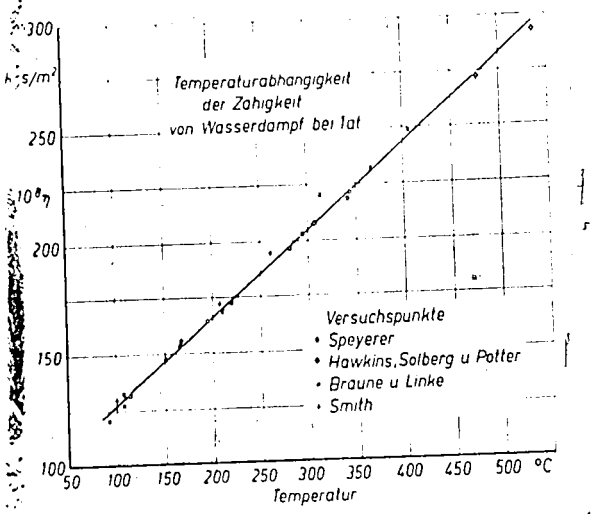


Abb. 1. Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit von Wasserdampf bei 1 at

...aste im Ein- und Auslauf mitgemessen und durch eine ...Korrektur berichtigt hat, während Hawkins die Meß-...kapillare so lang wählte, daß die zusätzlichen Druck-...verluste im Ein- und Auslauf gegenüber dem Gesamt-...druckabfall vernachlässigt werden konnten. Bei meiner

Nach	200° C	300° C	350° C	400° C	500° C	Druck
Speyerer	12,7	9,5	8,3			
Schiller	31,0	16,3	—			1 auf
Hawkins I	21,0	14,4	12,9			10 at
Sigwart	—	0,5	0,4			
Hawkins II	16,8	9,2	7,5			
Schiller		48,0		—	—	
Hawkins I		46,1		40,9	36,5	1 auf
Sigwart		1,5		1,2	—	30 at
Hawkins II		22,4		14,7	9,5	
Hawkins I				108,0	99,0	
Sigwart				3,8	—	1 auf
Hawkins II				41,1	28,7	100 at

Zahlentafel 2. Zunahme der Zähigkeit des Wasserdampfes in % bei Steigerung des Druckes nach verschiedenen Forschern

...Versuchsanordnung aber lagen die Druckmeßstellen ge...nügend weit vom Ein- und Auslauf des Rohres entfernt.

Zu den einzelnen Bestimmungsverfahren ist folgendes zu sagen:

Über das Durchflußverfahren mit Kapillaren werde ich mich im Laufe meiner Ausführungen noch besonders äußern.

Schiller hat bei seiner Arbeit ein bisher nicht benutztes, neuartiges, mittelbares Verfahren gewählt. Beim Strömen von Gasen und Dämpfen durch Düsen steigt die Durchflußzahl α in einem bestimmten Bereich der Reynoldsschen Zahl um 5 bis 10% an, während sie davor und dahinter nahezu konstant ist. Lage und Verlauf dieses Anstieges sind nach den bisherigen Versuchen praktisch unabhängig vom Stoff entsprechend dem Ähnlichkeitsgesetz. Wenn also ein α-Wert auf dem ansteigenden Teil der α-Kurve zusammen mit dem dazugehörenden Wert der Reynoldsschen Zahl mit Wasser bestimmt ist, dann kann die Dampfströmung für denselben α-Wert eingestellt und die Zähigkeit aus der Reynoldsschen Zahl ermittelt werden.

Der Zähigkeitsbestimmung von Schugajew liegt das Rankinesche Verfahren zu Grunde. Es besteht darin, daß ein Quecksilbertropfen, der eine Kapillare absperrt, in dieser herabgleitet und dabei die darin befindliche Gas- oder Dampfmenge vor sich herschiebt. Aus der Fallzeit des Quecksilbers zwischen zwei Marken lassen sich angenähert Verhältniswerte für die Zähigkeit ermitteln. Schugajew hat im Bereich zwischen 100 und 400° C und bei Drücken zwischen 1 und 93 at gemessen. Jedoch wurden die Drücke nur mittelbar aus der Menge des in die Kapillare eingeschlossenen Wasservolumens errechnet. Da der Dampf das Glas stark auslaugte, konnte der Beharrungszustand nicht abgewartet werden, sondern es wurde bei steigender und fallender Temperatur beobachtet. Die Genauigkeit der Zähigkeitsbestimmungen soll ±6% betragen.

Gegen die Schillersche Arbeit läßt sich einwenden, daß das Durchflußmeßverfahren doch recht mittelbar ist. Außerdem ist aus seinen Angaben nicht zu ersehen, ob die Ähnlichkeit an der Düse auch bezüglich des die Strömung charakterisierenden Druckverhältnisses p_2/p_1 gewahrt worden ist bzw., wenn dies nicht der Fall war, ob diese mangelnde Ähnlichkeit ohne Einfluß auf den α-Wert bleibt.

Größere Bedenken ergeben sich bei der Arbeit von Schugajew infolge des Angriffes des Wasserdampfes auf das Glas und der fraglichen Temperaturmessung im nicht stationären Zustand.

Das von Hawkins und seinen Mitarbeitern angewandte Lawaczeksche Viskosimeter besteht in seiner ursprünglichen Form aus einem genau kalibrierten senkrechten Glasrohr, in dem ein zylindrischer Metallkörper, der durch kleine Stifte reibungslos gleichachsig zum Rohr geführt wird, herabgleitet. Der Durchmesser des Metallkörpers ist um wenige Zehntelmillimeter kleiner als der Glasrohrdurchmesser. Zum Messen der Viskosität füllt man das Glasrohr mit der zu untersuchenden Flüssigkeit bzw. Dampf, stellt es senkrecht und läßt dann den Metallkörper durch die Flüssigkeit durchfallen. Die Strömung in dem ringförmigen Zwischenraum zwischen dem Metallkörper und dem Glasrohr muß natürlich laminar bleiben. Durch Vergleich der Fallzeit des Zylinders, beispielsweise in Wasser und in einem zu untersuchenden Medium, kann dessen Zähigkeit ermittelt werden, da die Fallzeit der Zähigkeit proportional ist. Hawkins hat die Apparatur insofern modifiziert, als er anstelle des Glasrohres ein nicht rostendes Stahlrohr verwandte, indem er Druck und Temperatur innerhalb seines Versuchsbereiches einstellen und messen konnte. Im wesentlichen waren für eine Zähigkeitsbestimmung die Dichte des Wasserdampfes, Dichte und Zähigkeit der Eichflüssigkeit und die Fallzeiten zu ermitteln. Die Fallzeit wurde elektrisch mit einem registrierenden Milliamperemeter gemessen.

Bei der Entwicklung der Theorie des Lawaczek-Viskosimeters hatte man nicht damit gerechnet, daß unmittelbar hinter dem Fallkörper Strömungsstörungen auftreten könnten. Unsere modernen Anschauungen und

unabhängig vom Stoff entsprechend dem Ähnlichkeitsgesetz. Wenn also ein α-Wert auf dem ansteigenden [illegible] der α-Kurve zusammen mit dem dazugehörenden [illegible] der Reynoldsschen Zahl mit Wasser bestimmt ist, kann die Dampfströmung für denselben α-Wert eingestellt [illegible] Zähigkeit aus der Reynoldsschen Zahl ermittelt [illegible]

[illegible]higkeitsbestimmung von Schugajew liegt [illegible] Verfahren zu Grunde. Es besteht darin, [illegible] Quecksilbertropfen, der eine Kapillare absperrt, [illegible] begleitet und dabei die darin befindliche [illegible] Dampfmenge vor sich herschiebt. Aus der Fallzeit des Quecksilbers zwischen zwei Marken lassen sich [illegible] näherte Verhältniswerte für die Zähigkeit ermitteln. Schugajew hat im Bereich zwischen 100 und 400° C und [illegible] Drücken zwischen 1 und 93 at gemessen. Jedoch wurde die Drücke nur mittelbar aus der Menge des in die Kapillare eingeschlossenen Wasservolumens errechnet, [illegible] der Dampf das Glas stark auslaugte, konnte der Beharrungszustand nicht abgewartet werden, sondern es wurde bei steigender und fallender Temperatur beobachtet. Die Genauigkeit der Zähigkeitsbestimmungen soll ± 6% betragen.

[illegible] die Schillersche Arbeit läßt sich einwenden, [illegible] Durchflußmeßverfahren doch recht mittelbar ist. [illegible] ist aus seinen Angaben nicht zu ersehen, ob [illegible] an der Düse auch bezüglich des die Strömung [illegible] sierenden Druckverhältnisses p_2/p_1 gewahrt [illegible] ist bzw., wenn dies nicht der Fall war, ob die [illegible] mangelnde Ähnlichkeit ohne Einfluß auf den α-Wert bleibt.

Größere Bedenken ergeben sich bei der Arbeit von Schugajew infolge des Angriffes des Wasserdampfes auf das Glas und der fraglichen Temperaturmessung im nicht stationären Zustand.

Das von Hawkins und seinen Mitarbeitern [illegible]wandte Lawaczeksche Viskosimeter besteht in seiner ursprünglichen Form aus einem genau kalibrierten [illegible] rechten Glasrohr, in dem ein zylindrischer Metallkörper, [illegible] durch kleine Stifte reibungslos gleichachsig zum [illegible] wird, herabgleitet. Der Durchmesser des Metallkörpers ist um wenige Zehntelmillimeter kleiner als der Durchmesser. Zum Messen der Viskosität füllt man das Glasrohr mit der zu untersuchenden Flüssigkeit [illegible] pft, stellt es senkrecht und läßt dann den Metallkörper durch die Flüssigkeit durchfallen. Die Strömung in dem ringförmigen Zwischenraum zwischen dem Metallkörper und dem Glasrohr muß natürlich laminar bleiben. Durch Vergleich der Fallzeit des Zylinders, beispielsweise in Wasser und in einem zu untersuchenden Medium, kann dessen Zähigkeit ermittelt werden, da die Fallzeit der Zähigkeit proportional ist. Hawkins hat die Apparatur insofern modifiziert, als er anstelle des Glasrohres ein nicht rostendes Stahlrohr verwandte, indem er Druck und Temperatur innerhalb seines Versuchsbereiches einstellen und messen konnte. Im wesentlichen waren für eine Zähigkeitsbestimmung die Dichte des Wasserdampfes, [illegible] higkeit der Eichflüssigkeit und die Fallzeit des [illegible]. Die Fallzeit wurde elektrisch mit einem [illegible]n Milliamperemeter gemessen.

[illegible]der Entwicklung der Theorie des Lawaczekschen Viskosimeters hatte man nicht damit gerechnet, daß [illegible] hinter dem Fallkörper Strömungsstörungen auftreten könnten. Unsere modernen Anschauungen sind

Kenntnisse auf dem Gebiet der Hydrodynamik lassen aber derartige Störungen als durchaus möglich erscheinen. Die Unterschiede zwischen der Druckabhängigkeit, wie sie Hawkins bei seinen älteren Versuchen und Sigwart für die Wasserdampfzähigkeit gefunden hatten, ließen die Amerikaner an der Richtigkeit ihrer eigenen Messungen zweifeln. Hawkins berichtet in seiner Arbeit, man habe große Mühe auf eine theoretische Ermittlung der Größe dieser Endstörungen verwandt, sei aber bis jetzt zu keinem befriedigenden Ergebnis gelangt.

Die beträchtlichen Unterschiede in der von den einzelnen Autoren gemessenen Druckabhängigkeit, wie sie nach Abschluß der amerikanischen Versuche von 1935 und nach Veröffentlichung der Sigwartschen Versuche 1936 vorlagen, veranlaßten also Hawkins und seine Mitarbeiter, mittels einer anderen als der Lawaczekschen Methode eine erneute Bestimmung der Dampfzähigkeit vorzunehmen. Sie entschlossen sich für die Kapillarmethode und stellten an ihre neue Versuchseinrichtung folgende Anforderungen:

1. Das Versuchsrohr sollte derartige Abmessungen erhalten, daß der Druckabfall eine genau meßbare Größe erhielt.
2. Die Länge des Rohres sollte so groß gewählt werden, daß eine Berichtigung des gemessenen Druckabfalles infolge des Energieverbrauches beim Eintritt des Mediums in das Rohr bis zur Ausbildung des stationären hydrodynamischen Zustandes und infolge der Bewegungsenergie des ausströmenden Mediums am Ende des Rohres unnötig wurde.
3. Das Versuchsrohr sollte aus korrosionsfestem Material und mit solcher Wandstärke hergestellt sein, daß auch bei den höchsten zur Anwendung gelangenden Drücken und Temperaturen eine Deformation im Sinne einer Verzerrung vermieden wurde.
4. Die Temperatur sollte längs des Versuchsrohres möglichst geringe Unterschiede aufweisen.
5. Das Differentialmanometer sollte mit dem Versuchsrohr derartig verbunden werden, daß eine Trennung zwischen Flüssigkeits- und Dampfphase in einer durch das Versuchsrohr gelegten horizontalen Ebene stattfinden mußte.
6. Ablesungen der Druckdifferenz sollten erst nach vollkommenem Eintritt des Beharrungszustandes vorgenommen und die Konstanz der Druckdifferenz sollte mindestens eine Stunde lang aufrecht erhalten werden.
7. Die theoretische Konstante des Rohres sollte während der Versuche in gleichmäßigen Zeitabständen und nach deren Beendigung unter Verwendung geeigneter Medien von bekannter Zähigkeit nachgeprüft werden.

Zum Verständnis dieser Forderungen, die aus dem Studium der älteren Arbeiten gewonnen wurden, sind noch einige Ausführungen und Erklärungen notwendig:

Zu Punkt 1. Dr. Sigwart hatte die Druckdifferenz bei seinen Versuchen mittels einer von Prof. Schmidt in der Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 1936 beschriebenen Ringwaage zur Messung kleiner Druckunterschiede bei hohen absoluten Drücken gemessen. Die in dem Protokoll eines Versuches angegebene höchste und geringste Druckdifferenz betrug 6,27 bzw. 4,67 mm Quecksilber gegen Wasser. Hawkins und seine Mitarbeiter wollten also mit derartigen geringen Druckdifferenzen nicht arbeiten. Die von ihnen gemessenen Druckdifferenzen bewegen sich zwischen 19 und 222 mm Quecksilber gegen Wasser.

Zu Punkt 2. Ich habe schon zu Anfang meiner Ausführungen darauf hingewiesen, daß Sigwart an dem gemessenen Druckabfall Berichtigungen anbrachte, während ich dem eigentlichen Versuchsrohr Beruhigungsstrecken vor- und nachgeschaltet hatte. Hawkins wollte bei seinen Versuchen einen anderen Weg beschreiten und das Versuchsrohr so lang bzw. die Druckdifferenz so groß machen, daß die erwähnten Berichtigungen unterhalb der Grenze der Versuchsgenauigkeit blieben und Beruhigungsstrecken überflüssig wurden.

Zu Punkt 3. Bei meinen Messungen benützte ich ein Messingrohr von beinahe 2 mm Durchmesser. Sigwart dagegen verwendete eine Quarzkapillare von 0,375 mm Durchmesser und eine Platinkapillare von 0,547 mm Durchmesser.

Während der Durchführung meiner Versuche wurden von mir bei 6 at. abs, nachdem das Rohr mehrere Male auf 350° C geheizt worden war, Zähigkeitswerte bestimmt, die um rund 4% kleiner waren, als erwartet werden mußte. Als Ursache dieser Erscheinung mußte angenommen werden, daß infolge des oft wiederholten Anheizens ein Fließen des Messings eingetreten war, wofür auch in der Literatur ein Hinweis gefunden wurde, und daß sich infolgedessen der Durchmesser des Rohres vergrößert hatte. Nach Beendigung der Versuche wurden aus dem Versuchsrohr zwei Rohrstücke herausgeschnitten und durch Füllung mit Quecksilber kalibriert. Dabei ergab es sich, daß der Rohrdurchmesser tatsächlich gegenüber den vor Beginn der Versuche vorgenommenen Kalibrierungen um 8,1 v. T. größer geworden war, was infolge der Abhängigkeit der Viskosität von der vierten Potenz des Durchmessers für diese einen Unterschied von 3,2% ausmachte. Diese Zahl stimmte auch befriedigend mit den mit Luft vor und nach dem Fließen des Rohres vorgenommenen Eichversuchen überein.

Ich vermute, daß Hawkins infolge dieser Erfahrungen einerseits ein Messingrohr für ungeeignet hielt, worin ich ihm nur beipflichten kann, daß er aber auch Quarz- oder Platinkapillaren nicht verwenden wollte und sich deshalb für ein Versuchsrohr aus Nickel entschied.

Zu Punkt 6. Hiermit lehnte Hawkins ein von Sigwart angewandtes geistreiches, aber experimentell anzweifelbares Verfahren ab, das ich wie folgt kennzeichnen möchte: Sigwart bestimmte die Dampfzähigkeit bei seinen Versuchen vor Eintritt des Beharrungszustandes. Nach Öffnen des Dampfventiles am Ende der Kapillare stellte sich beispielsweise eine noch unstationäre Strömung mit langsam anwachsender Durchflußgeschwindigkeit ein. Dabei mußte dann zwangsläufig Dampf am Anfang der Kapillare aus dieser in die Verbindungsleitungen zum Differentialmanometer übertreten und entsprechend am Ende der Kapillare Wasser vom Differentialmanometer her in das Versuchsrohr einströmen. Auf Grund gewisser Annahmen leitete Sigwart eine Gleichung für die Zeit ab, die verstreicht zwischen dem Öffnen des Dampfventiles und dem Zeitpunkt, in dem die gerade gemessene Druckdifferenz diejenige nach Erreichen der Beharrung zu mindestens 99% erreicht hat. Aus den beiden Manometerablesungen zu Beginn und am Ende dieses Zeitraumes konnte die Zähigkeit ermittelt werden. Hawkins weist darauf hin, daß die erwähnte Gleichung den

veränderlichen physikalischen Zustand des Mediums in den Verbindungsleitungen und die Größe des Röhrenvolumens, welches von dem Medium in verschiedenen Aggregatzuständen eingenommen wird, nicht enthalte. Dr. Sigwart dagegen teilte mir in einer privaten Zuschrift mit, daß von ihm auch Messungen durchgeführt worden seien, bei denen sich die Durchflußmenge während des Versuches nicht änderte, und daß dabei keine anderen Zähigkeitswerte gefunden worden seien. Meine persönliche Einstellung liegt auf Seiten der Hawkinsschen Auffassung, eine derartige Methode zu vermeiden, da während der instationären Strömung Einflüsse auftreten können, die man theoretisch nicht vorher bestimmen und vorher bewerten kann und die doch auf das Ergebnis einwirken können.

Zu Punkt 7: Es ist aus der Originalarbeit nicht ersichtlich, ob dieser Forderung tatsächlich entsprochen wurde.

Zu den Punkten 4 und 5 werde ich mich nachher noch äußern.

In Übereinstimmung mit den obigen Forderungen wurde ein nahtloses Nickelrohr von 2,33 mm Durchmesser bei 2 mm Wandstärke gewählt. Die angelieferten Rohre wurden durch genau passende Nickelmuffen verbunden und verschweißt. In der Muffe lagen sich die Rohrenden genau und ohne Abstand gegenüber. Jede derartige Verbindung wurde nach Fertigstellung durch eine Röntgenaufnahme geprüft. So entstand ein Versuchsrohr von 31,5 m Länge. Es wurde zu kreisrunden Schleifen von 61 cm Durchmesser, welche durch gerade Rohrstücke von etwa 3,60 m Länge verbunden waren, und später zu einer Spule von denselben Durchmesser, jedoch ohne gerade Rohrstücke, gewunden. Im folgenden bezeichnen wir die erstere Rohranordnung als Kapillare I, die letztere als Kapillare II (Bild 2). Das Differentialmanometer bestand

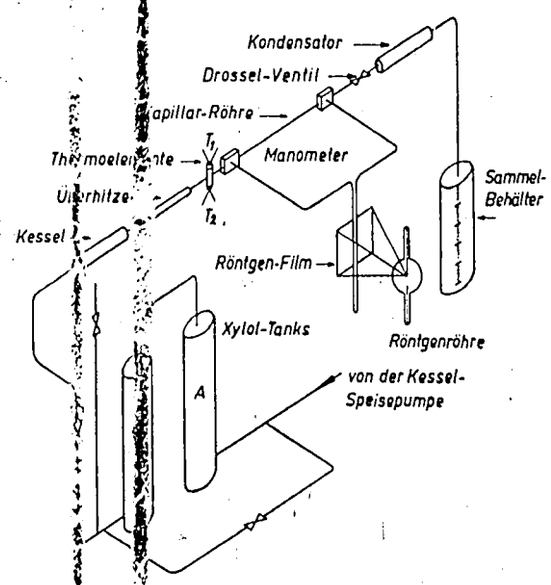


Bild 2. Versuchsanordnung

aus zwei senkrechten, unten miteinander verbundenen Schenkeln aus nahtlosem Hochdruckrohr von 6,35 mm Durchmesser. Die Verbindungsleitungen zum Versuchsrohr lagen mit diesem in einer horizontalen Ebene. Damit war Punkt 5 der obigen Forderungen erfüllt, da es jetzt gleichgültig war, an welcher Stelle der Verbindungsleitung zwischen Versuchsrohr und Differentialmanometer der Dampf gerade kondensierte und damit die Trennung von Dampf und Wasser eintrat. Auf die Anzeige des Manometers konnte es keinen Einfluß haben. Das Manometer war zur Hälfte mit Quecksilber und darüber mit Wasser gefüllt, für dessen gute Entlüftung natürlich gesorgt wurde. Der Quecksilberstand sowohl im Nullpunkt als während des Versuches wurde dadurch bestimmt, daß man die Hochdruckrohre der Manometerschenkel mit einer Röntgenröhre durchleuchtete und photographierte.

Der Kessel, der aus einem gegen die Horizontale etwas geneigten Hochdruckstahlrohr von 50 mm Durchmesser bestand, wurde mit CO_2-freiem destilliertem Wasser durch zwei Behälter A und B gespeist, welche zwischen der Speisepumpe und dem Kessel angeordnet waren. Von diesen beiden an ihrem oberen Ende miteinander verbundenen Behältern war der Behälter A mit Xylol, der Behälter B mit destilliertem Wasser gefüllt. Xylol vermischt sich bei niedrigen Temperaturen in keiner Weise mit Wasser. Während des Versuches wurde der Druck der Kesselspeisepumpe durch das Xylol im Behälter A auf das destillierte Wasser im Behälter B übertragen und strömte so bei Öffnung des Drosselventiles dem Kessel, Überhitzer und Versuchsrohr zu. Bei einigen Versuchen wurden die Behälter A und B ausgeschaltet und der Kessel unmittelbar durch die Pumpe gespeist. Die Ergebnisse wurden durch diesen Wechsel in der Wasserzuführung nicht beeinflußt. Es ist deshalb meines Erachtens nicht ganz verständlich, warum überhaupt diese Behälter und die Verwendung von Xylol nötig gewesen sein sollen. Der Kessel wurde durch eine Batterie von Bunsenbrennern beheizt. Überhitzt wurde der Dampf durch eine elektrische Heizung, die automatisch auf konstante Temperatur geregelt wurde. Durch zwei geeichte, in einem Block einander gegenüber angeordnete Thermoelemente T_1 und T_2 wurde die Dampftemperatur unmittelbar vor Eintritt in das Versuchsrohr gemessen. 20 Thermoelemente waren für die Beobachtung der Temperatur längs des Versuchsrohres vorgesehen, dessen elektrische Heizung so eingestellt wurde, daß sie entsprechend der obigen Forderung 4 von Anfang bis Ende eine einheitliche Temperatur aufrecht erhielt. Der das Rohr verlassende Dampf wurde in dem Drosselventil entspannt, in einer Kupferspirale kondensiert und gewogen.

Das Poiseuillesche Gesetz für die Strömung in einer langen geraden Kapillare, in der Berichtigungen für den Ein- und Auslauf nicht angebracht werden müssen, lautet:

$$\eta = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p}{128 \cdot l \cdot V} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p \cdot \gamma_D}{128 \cdot l \cdot G} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta h (\gamma_{Hg} - \gamma_{H_2O})}{128 \cdot l \cdot G} \quad (1)$$

für ein gegebenes Rohr also

$$\eta = C \cdot \frac{\Delta h \cdot \gamma_D}{G} \quad (2)$$

Für eine gekrümmte Kapillare findet man in der Literatur, daß bei Reynoldsschen Zahlen über 200 der Einfluß der Krümmung den Strömungswiderstand vergrößert und die Kapillarkonstante C eine Funktion der Reynoldsschen Zahl und des Verhältnisses des Kapillardurchmessers zum Durchmesser der Kapillarenkrümmung wird. Die obige Gleichung (2) lautet dann unter Einführung eines Faktors φ zur Berücksichtigung des Krümmungswiderstandes

$$\eta = C \cdot \varphi \cdot \frac{\Delta h \cdot \gamma_D}{G} \quad (3)$$

mpf gerade kondensierte und damit die Trennung von
mpf und Wasser eintrat. Auf die Anzeige des Mano-
ers konnte es keinen Einfluß haben. Das Manometer
zur Hälfte mit Quecksilber und darüber mit Wasser
üllt, für dessen gute Entlüftung natürlich gesorgt
rde. Der Quecksilberstand sowohl im Nullpunkt als
während des Versuches wurde dadurch bestimmt, daß
hre der Manometerschenkel mit
hleuchtete und photographierte.

einem gegen die Horizontale
ckstahlrohr von 50 mm Durch-
mit CO_2-freiem destilliertem
hälter A und B gespeist, welche
ischen der Speisepumpe und dem Kessel angeordnet
ren. Von diesen beiden an ihrem oberen Ende miteinander verbundenen Behältern war der Behälter A mit
lol, der Behälter B mit destilliertem Wasser gefüllt.
lol vermischt sich bei niedrigen Temperaturen in keiner
eise mit Wasser. Während des Versuches wurde der
uck der Kesselspeisepumpe durch das Xylol im Behälter A auf das destillierte Wasser im Behälter B übergen und strömte so bei Öffnung des Drosselventiles
m Kessel, Überhitzer und Versuchsrohr zu. Bei einigen
wurden die Behälter A und B ausgeschaltet und
durch die Pumpe gespeist. Die Erdiesen Wechsel in der Wasserißt. Es ist deshalb meines Erändlich, warum überhaupt diese
ndung von Xylol nötig gewesen
wurde durch eine Batterie von
izt. Überhitzt wurde der Dampf
rch eine elektrische Heizung, die automatisch auf konante Temperatur geregelt wurde. Durch zwei geeichte,
einem Block einander gegenüber angeordnete Thermoemente T_1 und T_2 wurde die Dampftemperatur unmittelar vor Eintritt in das Versuchsrohr gemessen. 20 Thermomente waren für die Beobachtung der Temperatur
ngs des Versuchsrohres vorgesehen, dessen elektrische
eizung so eingestellt wurde, daß sie entsprechend der
bigen Forderung 4 von Anfang bis Ende eine einheitche Temperatur aufrecht erhielt. Der das Rohr ver-
le in dem Drosselventil entspannt, in
densiert und gewogen.

Gesetz für die Strömung in einer
e, in der Berichtigungen für den
ngebracht werden müssen, lautet:

$$\eta = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p \cdot \gamma_D}{128 \cdot l \cdot V} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta h(\gamma_{Hg} - \gamma_{H_2O})}{128 \cdot l \cdot G} \quad (1)$$

für ein gegebenes Rohr also

$$\eta = C \cdot \frac{\Delta h \cdot \gamma_D}{G} \quad (2)$$

Für eine gekrümmte Kapillare findet man in der Literatur, daß bei Reynoldsschen Zahlen über 200 der Einfluß der Krümmung den Strömungswiderstand vergrößert und die Kapillarkonstante C eine Funktion der Reynoldsschen Zahl und des Verhältnisses des Kapillardurchmessers zum Durchmesser der Kapillarenkrümmung wird. (2) lautet dann unter Einführung Berücksichtigung des Krümmungs-

$$\cdot \varphi \cdot \frac{\Delta h \cdot \gamma_D}{G} \quad (3)$$

Da bei der genauen Messung des lichten Durchmessers des Versuchsrohres Schwierigkeiten auftraten, wurde die Konstante C durch Eichversuche nachgeprüft. Mittels Chlorkalzium getrockneter Stickstoff und Wasser wurden als Eichflüssigkeiten verwendet. Die Ergebnisse sind aus der folgenden Abbildung (Bild 3) zu

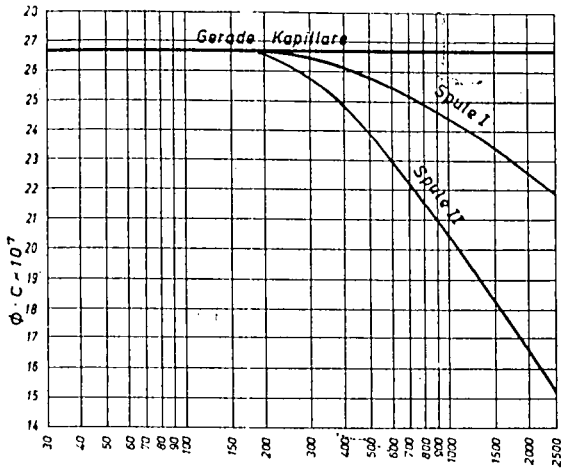


Bild 3. Eichkurven der Versuchsrohre

ersehen. Bis zu einer Reynoldsschen Zahl von 180 ist die Konstante von dieser unabhängig und hat nach den 13 Eichversuchen mit Wasser einen Wert von $26{,}69 \cdot 10^{-7}$ mit einer größten Abweichung einer Einzelbestimmung von 8,7% gegenüber dem obigen Mittelwert. In Anbetracht des großen apparativen Aufwandes enttäuscht dieses Streuen der Eichversuche. Dagegen stimmt der Mittelwert mit der rechnerisch aus der Durchmesserbestimmung ermittelten Zahl für $C = 26{,}73 \cdot 10^{-7}$ mit einem Unterschied von weniger als 2 v. T. ganz ausgezeichnet überein. Für Reynoldssche Zahlen über 180 bis zu deren kritischem Wert von 2300 muß der Zahlenwert von $C \cdot \varphi$ als Funktion von R aus der Kurve entnommen werden.

Hawkins hat das Ergebnis seiner Eichversuche auch noch in dimensionsloser Form abgebildet. Das Poiseuillesche Gesetz nimmt bekanntlich für die Strömung im geraden Rohr unter Hinzuziehung des dimensionslosen Rohrreibungsbeiwertes λ in der Gleichung

$$\frac{dp}{dl} = \lambda \cdot \frac{\gamma \cdot w^2}{2g\,d}$$

die einfache Form

$$\lambda \cdot R = 64$$

an. Für ein gekrümmtes Rohr ist λ bei einer gegebenen Reynoldsschen Zahl höher als der entsprechende Wert für ein gerades Rohr. Bild 4 zeigt diese Auftragung für ein gerades Rohr und für Spule II.

Hawkins und seine Mitarbeiter haben mit der besprochenen Apparatur die Zähigkeit von überhitztem Wasserdampf bei Drücken von 7 bis 105 at und bei Temperaturen zwischen 180 und 537° C bestimmt.

Die Versuchsdauer für einen Zähigkeitswert betrug eine Stunde. Vor dem Beginn eines Versuches wurde eine Röntgenaufnahme des Differentialmanometers gemacht, um dessen Nullpunkt zu prüfen. Während der Versuche wurden in Abständen von 10 Minuten, das heißt also 7mal pro Versuch, Röntgendurchleuchtungen vorgenommen,

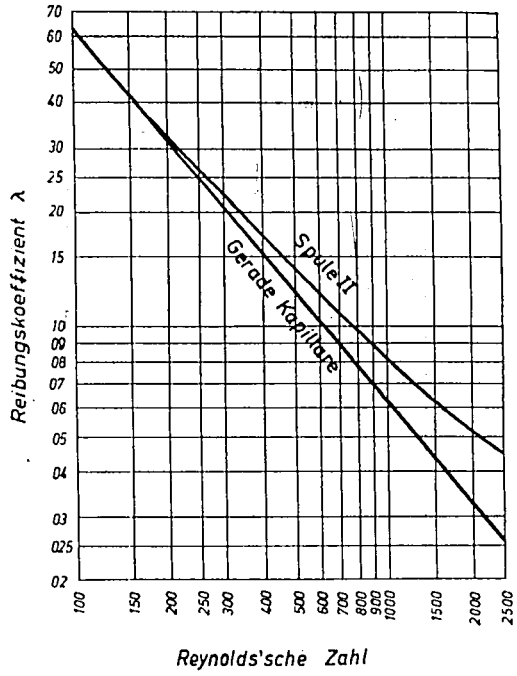


Bild 4. Unterschied im Reibungskoeffizienten für gerade und gekrümmte Rohre

von denen jede eine Belichtungszeit von 20 bis 30 Sekunden erforderte. Wenn sich während der Versuchsdauer irgendwelche Änderungen in der Strömung einstellten, welche sich durch trüben Meniskus auf der Röntgenplatte anzeigten, oder wenn sich Veränderungen sonstiger Ablesungen einstellten, wurde der Versuch verworfen. Die Ergebnisse wurden anscheinend graphisch ausgewertet. Eine Abbildung kleinen Maßstabes in der Originalarbeit zeigt die Isobaren im η, t-Diagramm und eine Tabelle die entsprechenden Werte der Dampfzähigkeit. Leider sind die Drücke in Pfund/Quadratzoll und die Temperaturen in °F angegeben.

Unter Benutzung der allgemeinen thermodynamischen Zustandsgleichung

$$P = \frac{R \cdot T}{v}\left(1 + a_1 \frac{b}{v} + a_2 \frac{b}{v^2} + \cdots\right)$$

und der hieraus von Plank durch Ähnlichkeitsbetrachtungen abgeleiteten Gleichung

$$\eta = \eta_0\left(1 + A_1 \frac{b}{v} + A_2 \frac{b}{v^2} + \cdots\right) \quad (4)$$

haben Hawkins und seine Mitarbeiter die Konstanten für die obige Gleichung aus ihren Versuchen ermittelt. Da jedoch die Abweichungen von den ausgeglichenen Versuchswerten bis zu 6,5% bei 7 at abs und bis zu 3% bei den höheren Drücken betragen und die Anwendung der Gleichung infolge der Abhängigkeit vom spezifischen Volumen recht umständlich ist, wird ihr eine besondere Bedeutung nicht zuzusprechen sein.

Die Verfasser betonen zum Schluß ihrer Arbeit, daß ihre neuen Zähigkeitswerte mit wachsendem Druck beträchtlich niedriger liegen als ihre 1935 nach der Lawaczeck-Methode bestimmten η-Werte. Sie führen dies auf die oben schon besprochenen bisher noch nicht beobachteten Strömungsstörungen hinter dem Fallkörper im Lawaczeck-Viskosimeter zurück.

Aus den oben angegebenen Gründen habe ich darauf verzichtet, die amerikanischen Zähigkeitswerte nach der Gleichung (4) zu berechnen und abhängig von dem Druck in at und der Temperatur in °C anzugeben. Ich habe vielmehr die in der Arbeit für englische Druck- und Temperatur-Maße angegebenen und von Hawkins ausgeglichenen Werte in einem η, t-Diagramm aufgetragen und daraus η, t- und η, p-Diagramme für das metrische System entwickelt (Bild 5).

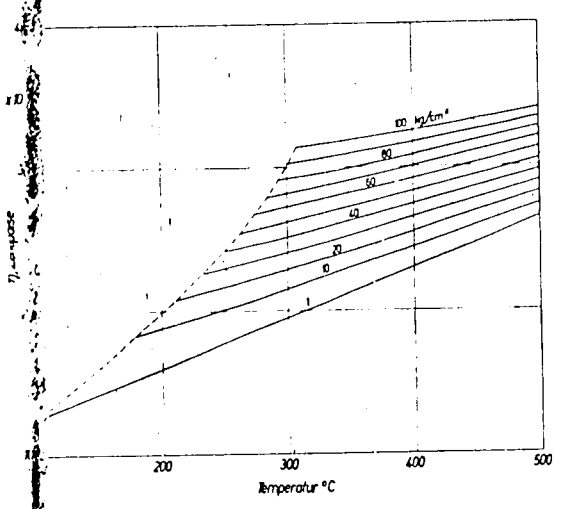


Bild 5. Isobaren im η—t—Diagramm

Für die Zähigkeit bei 1 at abs habe ich die von mir 1928 angegebene Gleichung zu Grunde gelegt, die, wie ich schon anfangs zeigte, durch spätere Messungen auch über den eigentlichen Temperaturbereich hinaus sehr gut bestätigt worden ist, habe die Gerade aber etwas weniger gewählt, um einen zwangloseren Anschluß an die ausgeglichenen Werte von Hawkins zu erhalten, wodurch die Zähigkeit bei 500° C um 2,9% kleiner wird als nach meiner Gleichung. Da in Sättigungsnähe keine Messungen vorlagen, konnte der Verlauf dort nur durch sinngemäße Verringerung der Kurven und nachfolgenden Ausgleich im η, t- und η, p-Diagramm ermittelt werden. Die Abweichungen von den Originalwerten sind nur gering.

Anschließend an die Originalarbeit von Hawkins und seinen Mitarbeitern sind Zuschriften zu diesen Zähigkeitsbestimmungen veröffentlicht, auf die ich noch kurz eingehen möchte, soweit sie für das Wesentliche unseres Themas von Bedeutung sind.

Herr Leib von der Gesellschaft für Feuerungstechnik in New York weist darauf hin, daß die von Plank empfohlene Gleichung (4), für die Hawkins aus seinen neuesten Versuchen die Konstanten errechnet hat, für die Zähigkeit bei großen Dichten abgeleitet sei, wo der von den Molekülen eingenommene Raum dieselbe Größenordnung habe wie das Gasvolumen und wo das Übertragungsmoment sowohl bei als auch zwischen den Molekülzusammenstößen auftrete. In dem von Hawkins untersuchten Versuchsbereich habe der Dampf nur eine mäßige Dichte, bei der das Molekülvolumen von geringem Einfluß sei und das Anwachsen der Zähigkeit mit dem Druck hauptsächlich der Anziehungskraft zwischen den Molekülen zuzuschreiben sei.

Leib leitet dann die folgende Gleichung für die Zähigkeit bei mäßigen Dichten abhängig von der Temperatur T, dem spezifischen Volumen v und dem Kovolumen b ab:

$$\eta = \eta_0 \frac{\frac{v}{4b}\left(1-\frac{b}{v}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{v}{4b}+\frac{3}{4}\right)^2+\frac{\Theta}{T}}-\sqrt{1+\frac{\Theta}{T}}}$$

Aus den amerikanischen Versuchswerten ermittelte Leib die Konstante zu

$$\Theta = 19{,}000\,\mathrm{F}.$$

Mit diesem Wert stelle die obige Gleichung die Versuchsergebnisse mit einer Abweichung von nur wenigen Prozenten dar. Infolge der Ableitung auf der Basis zutreffender kinetischer Annahmen erwartet Leib, daß seine Gleichung die Wasserdampfzähigkeit weit über den vorliegenden Versuchsbereich darzustellen geeignet sei.

Herr van Hengel von der Detroit Edison Company beschäftigt sich in seiner Zuschrift zunächst mit dem Einfluß der geometrischen Beschaffenheit des Versuchsrohres auf die Ergebnisse. Das Problem der Krümmung und Windung des Versuchsrohres zu Spulen sei zwar in der Literatur untersucht, aber keiner der früheren Experimentatoren hätte Kapillaren von solcher Länge und solch großer Wandstärke gehabt. Van Hengel hält es für möglich, daß der ursprünglich kreisrunde Querschnitt durch das Verbiegen des Rohres oval werde, wodurch die Ergebnisse beeinflußt werden könnten. Infolge des hohen Innendruckes des Rohres kann diese Verformung noch vergrößert werden.

Die Ausführungen sind wegen der zahlreichen Literaturzitate, die mir nicht zugänglich waren, zum Teil unverständlich.

Des weiteren weist van Hengel auf die Schwierigkeit der Durchmesserbestimmung hin und erwähnt auch das starke Streuen der Eichversuche mit Abweichungen bis zu 5% in den λ-Werten.

Sehr wesentlich erscheint mir sein Einwand, daß Hawkins den Einfluß der Temperatur auf die Ausdehnung des Versuchsrohres nicht berücksichtigt hat.

In einer anderen von van Hengel zitierten Arbeit ist die Feststellung enthalten, daß kleine Niveaudifferenzen in einer geraden Kapillare großen Einfluß auf das Meßergebnis haben können. Darnach bleibe die Frage offen, ob man überhaupt mit Spulen zu richtigen Ergebnissen gelange.

Weiterhin sind auch thermodynamische Gesichtspunkte bei Kapillarmessungen zu beachten. Ist die Strömung zum Beispiel nicht genau isotherm, so können schon sehr kleine Wärmezu- oder -abfuhren die parabolische Geschwindigkeitsverteilung im Rohr und damit die richtige Zähigkeitsbestimmung stören.

Mit dürren Worten stellt schließlich van Hengel fest, daß diese Fehlermöglichkeiten, die das Resultat wesentlich beeinflussen könnten, sowohl für die Eichversuche als auch für die Hauptversuche vor dem Abschluß der Arbeit hätten geprüft werden müssen.

Herr Keyes vom Forschungs-Laboratorium für Physikalische Chemie in Cambridge (Massachusetts) weist ebenfalls auf eine in der Literatur angegebene und auf molekularkinetischen Erwägungen aufgebaute Gleichung hin, in der die Zähigkeit abhängig vom spezifischen Volumen, vom Kovolumen und von der Temperatur dargestellt ist. Wegen der Schwierigkeit ihrer praktischen An-

zifischen Volumen v und dem Kovolumen b ab:

$$= \eta_0 \frac{\frac{v}{4b}\left(1 - \frac{b}{v}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{v}{\quad} + \frac{3}{\quad}\right)^2 + \frac{\Theta}{T}} - \sqrt{1 + \frac{\Theta}{T}}}$$

Versuchswerten ermittelte

00 F.

obige Gleichung die Ver-
weichung von nur wenigen
n dar. Infolge der Ableitung auf der Basis zu-
er kinetischer Annahmen erwartet Leib, daß seine
ng die Wasserdampfzähigkeit weit über den vor-
n Versuchsbereich darzustellen geeignet sei.

r van Hengel von der Detroit Edison Company be-
t sich in seiner Zuschrift zunächst mit dem Einfluß
metrischen Beschaffenheit des Versuchsrohres auf
ebnisse. Das Problem der Krümmung und Win-
s Versuchsrohres zu Spulen sei zwar in der Lite-
ntersucht, aber keiner der früheren Experimen-
hätte Kapillaren von solcher Länge und solch gro-
Hengel hält es für möglich,
de Querschnitt durch das
e, wodurch die Ergebnisse
folge des hohen Innen-
e Verformung noch ver-

Ausführungen sind wegen der zahlreichen Litera-
, die mir nicht zugänglich waren, zum Teil unver-
h.

weiteren weist van Hengel auf die Schwierigkeit
chmisserbestimmung hin und erwähnt auch das
Streuen der Eichversuche mit Abweichungen bis
in den λ-Werten.

r weiterhin erscheint mir sein Einwand, daß Haw-
n Einfluß der Temperatur auf die Ausdehnung des
srohres nicht berücksichtigt hat.

n Hengel zitierten Arbeit ist
kleine Niveaudifferenzen in
n Einfluß auf das Meß-
h bleibe die Frage offen,
zu richtigen Ergebnissen

ermodynamische Gesichts-
bei Kapillarmessungen zu beachten. Ist die Strö-
um Beispiel nicht genau isotherm, so können schon
eine Wärmezu- oder -abfuhren die parabolische
indigkeitsverteilung im Rohr und damit die rich-
higkeitsbestimmung stören.

dürren Worten stellt schließlich van Hengel fest,
se Fehlermöglichkeiten, die das Resultat wesent-
influssen könnten, sowohl für die Eichversuche als
r die Hauptversuche vor dem Abschluß der Arbeit
geprüft werden müssen.

ungs-Laboratorium für Phy-
lge (Massachusetts) weist
atur angegebene und auf
gen aufgebaute Gleichung
gig vom spezifischen Vo-
on der Temperatur darge-
rigkeit ihrer praktischen An-

wendung wendet er sich jedoch einer anderen Gleichungsform zu, in der als unabhängige Veränderliche Temperatur und Druck erscheinen:

$$\eta = \eta_0 \left(1 + 0{,}0146 + 5{,}54 \cdot 10^{-5} p\right) \cdot p \cdot 10^{-4} \text{ Poise, p in at abs,}$$

$$\text{wo } \eta_0 = 8{,}77 \cdot 10^{-5} \frac{1 + \frac{C}{273}}{\frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}} \text{ und } C = 680{,}1$$

Dabei ist η_0 die Zähigkeit bei geringem Druck. Die Konstanten der Gleichung wurden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus den bislang vorliegenden Messungen ermittelt. Unter Benutzung dieses Wertes von η_0 gibt die Gleichung für η die Zähigkeitswerte Hawkins mit mäßigen Abweichungen wieder. Gemäß ihrem Aufbau sind bei dieser Gleichung die Isobaren im η-t-Diagramm äquidistant. Dies widerspricht allerdings deren wahrscheinlichem Verlauf, da zu erwarten ist, daß sie sich mit wachsender Temperatur einander nähern werden.

Soviel über die Zuschriften zur Originalarbeit.

Zur Kritik an dem Text der Veröffentlichung, und zwar sowohl dem von den Autoren verfaßten als auch dem der Zuschriften, möchte ich bemerken, daß ihm an verschiedenen Stellen die Durcharbeitung und die wissenschaftliche Klarheit mangelt. Prof. Knoblauch, ehemals Leiter des Laboratoriums für technische Physik an der Technischen Hochschule München, hat sich einmal in einer Veröffentlichung darüber geäußert, wie unmißverständlich, klar und durchdacht wissenschaftliche Veröffentlichungen abzufassen wären. Nach ihm ist es schon ein Fehler, wenn man einen Satz zweimal lesen muß, um ihn textlich richtig zu verstehen. Der geniale Feldherr Moltke meinte sogar, man müsse an einer Seite Prosa arbeiten wie ein Bildhauer an einer Statue. Wenn wir auch an die amerikanische Veröffentlichung derartige Maßstäbe nicht anlegen wollen, so glauben wir doch von unserem deutschen Standpunkt aus sagen zu dürfen, daß eine größere Mühe um einen klaren, unmißverständlichen Ausdruck der niederzulegenden Gedanken der Arbeit selbst und der Wissenschaft nur hätte von Nutzen sein können.

Bei einer abschließenden Stellungnahme muß man zunächst anerkennen, daß die Versuche Hawkins, Solbergs und Potters in kluger Weise auf den Erfahrungen früherer Versuche aufgebaut sind und mit viel Sachkenntnis, großer Sorgfalt und beträchtlichem apparativem Aufwand durchgeführt wurden. Obwohl der Text stellenweise sehr ausführlich gehalten ist, vermißt man anderwärts nähere Angaben über die Art, wie die Eichungen, die Versuche und wie bestimmte Ermittlungen vorgenommen wurden. Es enttäuscht zweifellos, daß bei den Eichungen der Kapillare II mit Wasser bei Temperaturen zwischen 20 und 30° C, das heißt also praktisch bei Umgebungstemperatur und ohne nennenswerte Aufheizung des Versuchsrohres, unter 13 Einzelversuchen Abweichungen bis 8,7% gegen den Mittelwert auftraten. Beim Vergleich der gemessenen Dampfzähigkeitswerte mit den von Hawkins ausgeglichenen Werten ergaben sich Streuungen einiger Versuchspunkte von über 10%. Wenn bei diesen Versuchen einwandfrei unter gleichbleibenden Bedingungen gemessen wurde, so überraschen derartige Abweichungen, und zwar umsomehr, als die Experimentatoren durch die Art der Anlage ihrer Versuchseinrichtung dafür gesorgt hatten, relativ große Meßeffekte zu erzielen, die wiederum nur relativ kleine Fehler hätten verursachen dürfen. Gerade in diesem Zusammenhang ist der nochmalige Hinweis auf die Äußerungen van Hengels über die der Durchflußmethode anhaftenden Schwierigkeiten wesentlich, wie genaue Erfassung des Einflusses der Windung des Rohres zur Spule, einer möglichen Deformation des ursprünglich kreisförmigen Rohrquerschnittes, einer kleinen Verbiegung des Rohres gegenüber einer stetig verlaufend gedachten Achslinie sowie der Abweichung von der isothermen Strömung. Nicht verständlich ist es mir, warum Hawkins den Einfluß der Temperatur auf die thermische Ausdehnung des Versuchsrohres nicht berücksichtigt hat. Seine Zähigkeitswerte sind dadurch bei 300° C um ungefähr 1,3%, bei 500° C um ungefähr 2,3% zu niedrig angegeben.

Wenn man die Fehlermöglichkeiten zur Beurteilung der Versuchsgenauigkeit abwägt, kommt man zu dem Ergebnis, daß die Genauigkeit der amerikanischen Zähigkeitswerte auf ungefähr ± 5% geschätzt werden kann (Bild 3). Mit den neuen Messungen hat sich die Entscheidung über die tatsächliche Größe der Druckabhängigkeit wieder nach deren mittleren Werten hin verschoben. Sowohl die großen Steigerungen der Zähigkeitswerte mit dem Druck, wie sie Schiller und Hawkins bei ihren ersten Versuchen gemessen hatten, als auch die kleinen Zunahmen, wie sie von Sigwart und Schugajew beobachtet worden waren, werden damit unwahrscheinlich. Es muß jedoch ganz klar ausgesprochen werden, daß auch diese neuesten Messungen das Bedürfnis der Technik nach ausreichend genauen Werten noch nicht befriedigen können. Trotz der in 15 Jahren und in 6 verschiedenen Versuchsarbeiten aufgewandten Mühe und Kosten und trotzdem die folgenden Experimentatoren die Erfahrungen der vorangegangenen ausnutzen konnten, ist das erstrebte Ziel noch nicht ganz erreicht. Die physikalisch-technische Reichsanstalt arbeitet seit 1929 an der Bestimmung der Wasserdampfzähigkeit. Für 1930 waren schon Ergebnisse angekündigt und für 1931 bestimmt zugesagt. Trotzdem konnte die Anstalt, die entsprechend ihrer Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit natürlich nur mit unanfechtbaren Ergebnissen an die Öffentlichkeit treten will, bis heute noch keine Werte herausgeben.

Aus all dem ersieht man immer wieder die großen Schwierigkeiten, die der exakten Bestimmung dieser physikalischen Konstanten entgegenstehen. Vergleichbar sind sie wohl am treffendsten mit den Schwierigkeiten in der Bestimmung der spezifischen Wärme des überhitzten Wasserdampfes, die einen Zeitraum von 25 Jahren erforderte.

Hoffen wir, daß neue Versuche zur Ermittlung der Wasserdampfzähigkeit bald zu einer endgültigen befriedigenden Klärung führen.

Schlußwort

Zum Abschluß der Wärmetagung fand am Nachmittag des zweiten Tages eine Besichtigung des Neubaues des Technischen Prüfstandes statt. Sie vermittelte einen Überblick über die ausgedehnten Arbeiten des Prüfstandes auf den Gebieten der Kraft- und Schmierstoffe, der Motor- und der Wärmetechnik. Sie bestätigte beiläufig die eingangs von Prof. Wilke gemachte Bemerkung, daß die Arbeiten am Wärmeatlas nur einen Teil im Arbeitsprogramm des Prüfstandes bilden.

Hochdruckversuche
(Geschichtliches über Oppau)

18. Juli 1942 Heft 1

998

Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet des Technischen Prüfstandes Oppau

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.

12. G 13.

18. Juli 1942 999 Heft 1

37

Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet des Technischen Prüfstandes Oppau

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.

1000

Zum Geleit!

Bei den Arbeiten, die sich zum Ziel setzten, Deutschland mit flüssigen Kraftstoffen aus heimischen Kohlevorkommen zu versorgen, fiel dem Technischen Prüfstand Oppau zunächst die Aufgabe zu, die bei der Entwicklung der katalytischen Hochdruckhydrierung anfallenden Kraftstoffe zu prüfen und zu bewerten. Dieses Arbeitsgebiet hat dann eine wesentliche Erweiterung dadurch erfahren, daß nicht nur Benzin, sondern auch Dieselkraftstoffe, ferner andere Betriebsstoffe für den Kraftverkehr in den Laboratorien des Technischen Prüfstandes untersucht wurden. Der äußere Umfang der Entwicklung wird am besten dadurch veranschaulicht, daß der Technische Prüfstand seinerzeit seine Versuche mit einem einzigen Automobilmotor begonnen hat, während heute ein stattliches Gebäude mit zahlreichen Versuchseinrichtungen hierfür zur Verfügung steht. In diesem Gebäude werden auch Forschungsarbeiten in wärmetechnischer Richtung fortgeführt, die seinerzeit das erste Arbeitsgebiet des Technischen Prüfstandes überhaupt waren. Die Mittel für diese Entwicklung wurden in großzügiger Weise von der Werksleitung zur Verfügung gestellt.

Die geistige Führung des Technischen Prüfstandes liegt seit 1921 bei Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Wilke. Das Institut nimmt mit seinen Mitarbeitern an allen Aufgaben der deutschen Kraftstoffforschung teil, und seine Arbeiten dienen der gesamten deutschen Kraftstoffwissenschaft.

Aus der Zusammenarbeit mit gleichgerichteten Forschungsstätten der Hochschulen, der Industrie und der Behörden hat sich im Laufe der Jahre ein reger Erfahrungsaustausch entwickelt, der von allen Beteiligten geschätzt wird. Aus diesem Erfahrungsaustausch heraus hat sich die Notwendigkeit ergeben, einen Teil der Arbeiten des Technischen Prüfstandes einem größeren Kreis zugänglich zu machen und damit Anregungen zu weiteren Entwicklungen zu bieten. Diese Absicht soll durch eine Schriftenreihe verwirklicht werden, deren erstes Heft hier vorliegt und die dazu bestimmt ist, die Zusammenarbeit mit befreundeten Stellen innerhalb und außerhalb des Werkes zu fördern.

DER TECHNISCHE PRÜFSTAND OPPAU

nicht gestattet.

Das erste Heft der Schriftenreihe „Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet des Technischen Prüfstandes Oppau" wurde anläßlich des 60. Geburtstages von Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Wilke fertiggestellt. Seine Mitarbeiter haben ihm an diesem Tage das erste Exemplar mit den besten Wünschen für seine weitere Zukunft überreicht.

lungen aus dem Arbeitsgebiet des Tech-
s 60. Geburtstages von Herrn Prof. Dr.-
er haben ihm an diesem Tage das erste
weitere Zukunft überreicht.

Inhaltsverzeichnis

	Blatt
Zum Geleit	3
Die Entwicklung des Technischen Prüfstandes Oppau von Ing. Franz Jantsch	7– 9
Arbeiten der wärmetechnischen Abteilung im Technischen Prüfstand von Dr.-Ing. Georg Kling	10–15
Über die Beschaffenheit und Verwendung der Flugasche von Ing. Walter Schenker	16–19
Die Entwicklung der Klopfwertbestimmung von Leichtkraftstoffen von Ing. Eugen Singer	19–22
Prüfung von Dieselkraftstoffen von Dipl.-Ing. Ludwig Köhler	23–24
Anlaßhilfsmittel bei Kälte von Dipl.-Ing. Heinz Leib	25–27
Der Hesselman-Motor und seine Kraftstoffe von Dipl.-Ing. Walter Witschakowski	27–30
Versuche mit Fahrzeuggeneratoren von Dipl.-Ing. Ludwig Köhler	30–32
Motorische Schmierölprüfung von Dipl.-Ing. Walter Lauer	32–34
Reibung und Verschleiß bei Schmierung von Dipl.-Ing. Rudolf Halder	35–37
I. G.-Versuchsmotor von Obering. Fritz Penzig	37–41
Überladeversuche und die dazugehörigen Prüfstandseinrichtungen von Dipl.-Ing. W. Witschakowski	41–44
Über elektrische Messungen am Technischen Prüfstand Oppau von Dr. Erich Schuch	45–48
Der optische Brechungsindex und die Dispersion als analytisches Hilfsmittel bei der Untersuchung von Benzinen und Dieselölen von Dr. Rudolf Roth	49–52
Auswertung der Verbrennungsgleichung von Obering. Fritz Penzig	52–55
Veröffentlichungen	56

Die Entwicklung des Technischen Prüfstandes Oppau

Von Ing. F. JANTSCH

Der Technische Prüfstand wurde im Jahre 1918 im Werk Oppau der damaligen Badischen Anilin- & Soda-Fabrik eingerichtet. Seine Entstehung hängt mit der Inbetriebnahme der Stickstoffwerke Oppau und Leuna zusammen. Mit dieser ergab sich in erhöhtem Maße die Notwendigkeit, besondere technische Fragen, die aus der Art dieser Betriebe entstanden, wissenschaftlich zu behandeln. Wurden doch in diesen Werken erstmalig in großtechnischem Maßstabe Reaktionen unter dem außerordentlich hohen Druck von 200 Atmosphären und bei hoher Temperatur durchgeführt, die der Technik gänzlich ungewohnte Aufgaben stellten. Es war Dir. Dr. e. h. Lappe, der erste Ingenieur dieser neuen katalytischen Hochdrucksynthesen, der aus diesen Notwendigkeiten heraus Anfang 1918 die Einrichtung des Technischen Prüfstandes veranlaßte.

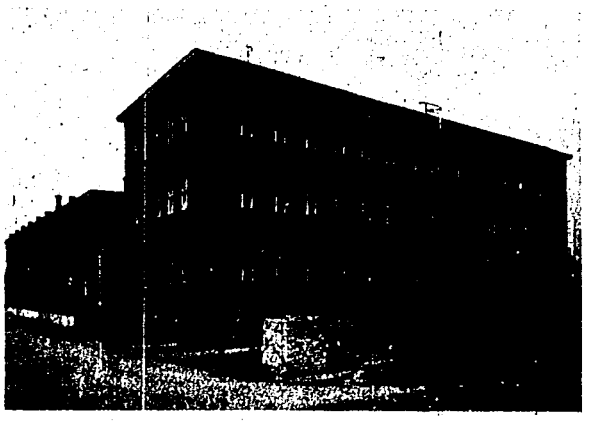
Das Hauptarbeitsgebiet dieser Abteilung bildeten Forschungen und Untersuchungen über die mannigfachen neuartigen Betriebsvorgänge; daneben waren schwierige Berechnungen für den Betrieb und die Konstruktionsabteilungen durchzuführen, Arbeiten, die außerhalb der Tätigkeit der eigentlichen Betriebs- und Konstruktionsingenieure lagen. Später schlossen sich daran die Überwachung und Indizierung von Maschinen, Abnahme- und Leistungsversuche, Betriebsuntersuchungen und ähnliches.

Zugleich war vorgesehen, bei diesen Untersuchungen die neu eintretenden Jungingenieure zu beschäftigen, um sie mit den Arbeiten der Werke vertraut zu machen, ehe sie ihre Tätigkeit als Betriebsingenieure aufnahmen, eine Einrichtung, wie sie sich für die Chemiker und Physiker des Werkes seit je bewährt hatte.

Leiter dieser Abteilung, die zunächst die Bezeichnung „Technisches Laboratorium" führte, war zum Zeitpunkt der Einrichtung Prof. Dr.-Ing. W. Nusselt, der jedoch im Jahre 1920 einer Berufung an die Technische Hochschule Karlsruhe folgte. Sein Nachfolger, Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Wilke, von der Universität Leipzig kommend, wo er eine a. o. Professur für technische Physik innehatte, übernahm im Mai 1921 die Leitung des Technischen Laboratoriums und führte seine Entwicklung in ununterbrochener Arbeit zu dem Stande, der sich heute mit dem Begriff „Technischer Prüfstand Oppau" verbindet.

Zunächst waren es vorwiegend wärmetechnische und wärmewirtschaftliche Fragen des Betriebes, mit denen sich die Abteilung befaßte. So wurden grundlegende Arbeiten über Berieselungskühler und über Wascher ausgeführt. Ferner wurden Untersuchungen und Berechnungen über Wärmeschutz angestellt und insbesondere Isolierungen für die Hochdrucköfen und -apparate der Ammoniaksynthese und der Hydrierung geschaffen. Aus diesem Gebiete liegen etwa 250 Berichte vor. Umfangreiche Studien halfen bei der Klärung der Bewertung des Dampfverbrauches der Eindampfereien und der Teilung der Dampfkosten zwischen Kraft- und Wärmebetrieben. Praktische Versuche wurden auch mit der Wärmepumpe angestellt. Für einzelne Betriebe wurden Wärmebilanzen aufgestellt, so z. B. gerade für die Systeme der Hochdrucköfen der Ammoniaksynthese und der Hydrierung. Hier wurde u. a. durch rein rechnerische Anwendung der Gesetze des Wärmeüberganges eine wesentliche Verbesserung erzielt, indem von den beiden Hochdruckregeneratoren jedes Ammoniakofens einer in Wegfall gebracht wurde, ein Fortschritt, der, wenn auch in schwächerem Maße, auch in der Hydrierung und anderen Betrieben zur Geltung gebracht wurde. Auch versuchstechnische Arbeiten an Wärmeaustauschern der verschiedensten Art wurden vielfach ausgeführt.

In diesem Rahmen lagen die Arbeiten des Technischen Laboratoriums, als im Jahre 1923 Dr. Krauch und Dr. Pier die Methanolsynthese großtechnisch eröffneten. Im Methanol und in dem etwa zur selben Zeit untersuchten Eisenkarbonyl traten zwei Stoffe auf, die auf das Gebiet der Kraftstoffe führten. Es wurde dem Technischen Laboratorium die Aufgabe gestellt, die motorische Eignung und insbesondere die klopfhindernden Eigenschaften dieser und ähnlicher Stoffe zu studieren und zu erproben. Noch wichtiger und umfangreicher wurde das Gebiet dieser kraftstofftechnischen Arbeiten mit der Entwicklung und großtechnischen Einführung der Hydrierung von Ölen, Teeren und Kohlen zu Benzin, Dieselöl usw., und es entwickelte sich auf dem Gebiet in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Stellen eine intensive und weitreichende Tätigkeit. Dabei galt es, nicht nur die eigentlichen Kraftstofffragen zu behandeln, sondern ganz allgemein alle diejenigen Gebiete, auf denen die Arbeiten der I. G. mit der Kraftfahrt und der Luftfahrt zusammenhängen. So wurde z. B. auch die Untersuchung der Schmierstoffe entwickelt, ferner die der Kühlstoffe und der Heizöle. Zu Beginn der Buna-Erzeugung wurden Prüfungen an Autoreifen vorgenommen. Umfangreiche Untersuchungen wurden über die Zusammensetzung und über toxikologische Wirkungen der Auspuffgase durchgeführt u. a. m. Diese eigentlichen kraftstofftechnischen Arbeiten entwickelten sich mehr und mehr zum weitaus umfangreichsten Arbeitsgebiet des Technischen Prüfstandes, gegenüber dem die sich zwar auch vergrößernden wärmetechnischen Arbeiten entsprechend zurücktraten.



Hauptgebäude des Technischen Prüfstandes