Tafel 4 (Seite 20) zeigt die Ergebnisse der Ringsteckprüfung mit den Al Cl_3 behandelten Schmierstoffen. Auch hier tritt wieder die geringe Ringsteckneigung der Mischung SS962/66/70/71 Alp hervor. Die Reihenfolge der Öle bezüglich Laufzeiten ist gegen die der Gruppe 1 etwas verändert, im ganzen zeigt sich bei wenig unterschiedlichen Laufzeiten keine besondere Wirkung der $AlCl_3$-Behandlung.

Bei den in Tafel 4 (Seite 20) angeführten Versuchen mit Schmierstoffen der Gruppe 3 sollte nochmals nachgeprüft werden, inwieweit die natürliche oder künstliche Alterung des Öles SS962/66/70/71p einen Einfluss auf die Laufzeit hat. Die Versuchsergebnisse zeigen die auch schon bei Gruppe 1 beobachtete verbessernde Wirkung einer natürlichen Alterung, die durch die angewandte Art der künstlichen Alterung (48stündiges Erwärmen auf 80°) nicht zu erreichen war. Es trat hier im Gegenteil eine geringe Verschlechterung der Laufzeit ein.

Tafel 4 (Seite 20) zeigt weiter Versuche mit den Schmierstoffen der Gruppe 4 u.zw. mit einem gebrauchten SS962/66/70/71p. Das Öl stammte aus mehreren 100 Stundenläufen im BMW-Motor. Es war mit 5% Bleicherde behandelt worden und dann a) direkt im BMW-Einzylinder geprüft (Vers.19) und b) nocheinmal mit 0,02% p versetzt worden (Vers.20). Beide Versuche zeigen, dass durch diese einfache Raffination noch nicht wieder der Neuzustand des Öles hergestellt werden kann, obgleich die nachstehenden Analysendaten dieses anzudeuten scheinen. Man erkennt daraus wieder die Unvollkommenheit der chemischen Schmierölanalysen.

POOR COPY 5

03321

Tafel 8. Analysendaten der Schmierstoffmischung SS962/66/70/71p

Kennwert		SS962/66/70/71p		
		Frischöl	nach 100 Std.	regeneriert
Wichte	kg/l	0,874	0,883	0,877
Viskosität bei 38°	°E	36,3	43,5	37,4
99°	°E	3,12	3,45	3,14
Viskositäts-Index		105	106	103
Flammpunkt	°C	235	242	237
Stockpunkt	°C	-27	-36	-25
Säurezahl		0,04	0,33	0,05
Verseifungszahl		0,20	1,40	0,08
Verkokungszahl		0,25	1,46	0,33
Asphalt	%	0	0,26	0

Da oft von einem Einfluss der Jahreszeit auf die Schlammbildung bei Prüfstandserprobungen gesprochen wird, sind in der nachstehenden Tafel 9 die Schlammbildungen nach der Jahreszeit, in welcher der Versuch durchgeführt wurde, zusammengestellt.

POOR COPY 5

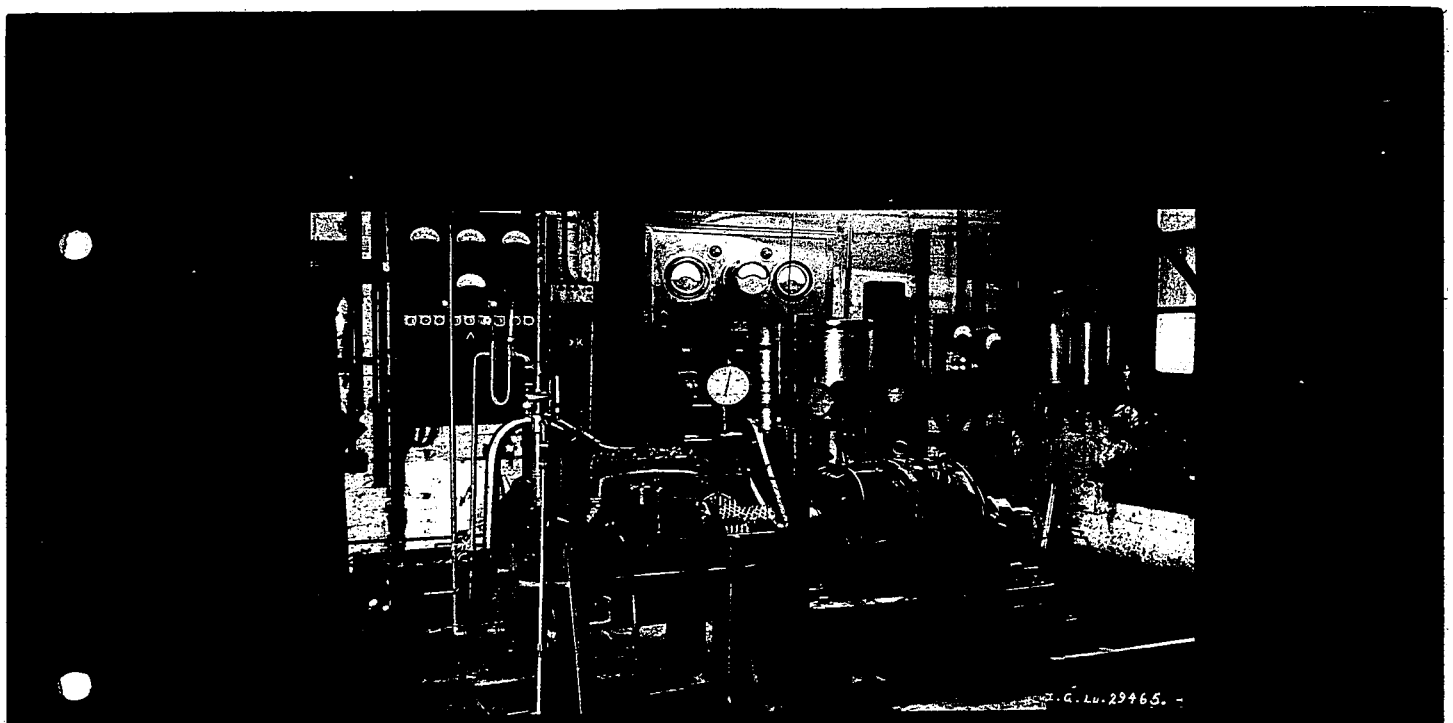
Tafel 9. Schlammbildung bei den Vollmotorläufen.

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Septem-ber	Oktober	Novem-ber	Dezem-ber
Argus							962 gering	966 gering 971 gering	970 gering	962/71 normal		
Bramo	962/71 normal								970 gering			
BMW	962/71 gering							962 normal 966 gering 970 gering	971 normal		962/71 gering	
Daimler-Benz	962/71 sehr gering		970 viel					962 sehr gering		966 sehr gering	970 viel 971 viel	
Hirth								962 sehr gering 970 normal 971 gering	966 gering			
Junkers								962 normal 970 normal 971 normal	966 normal			

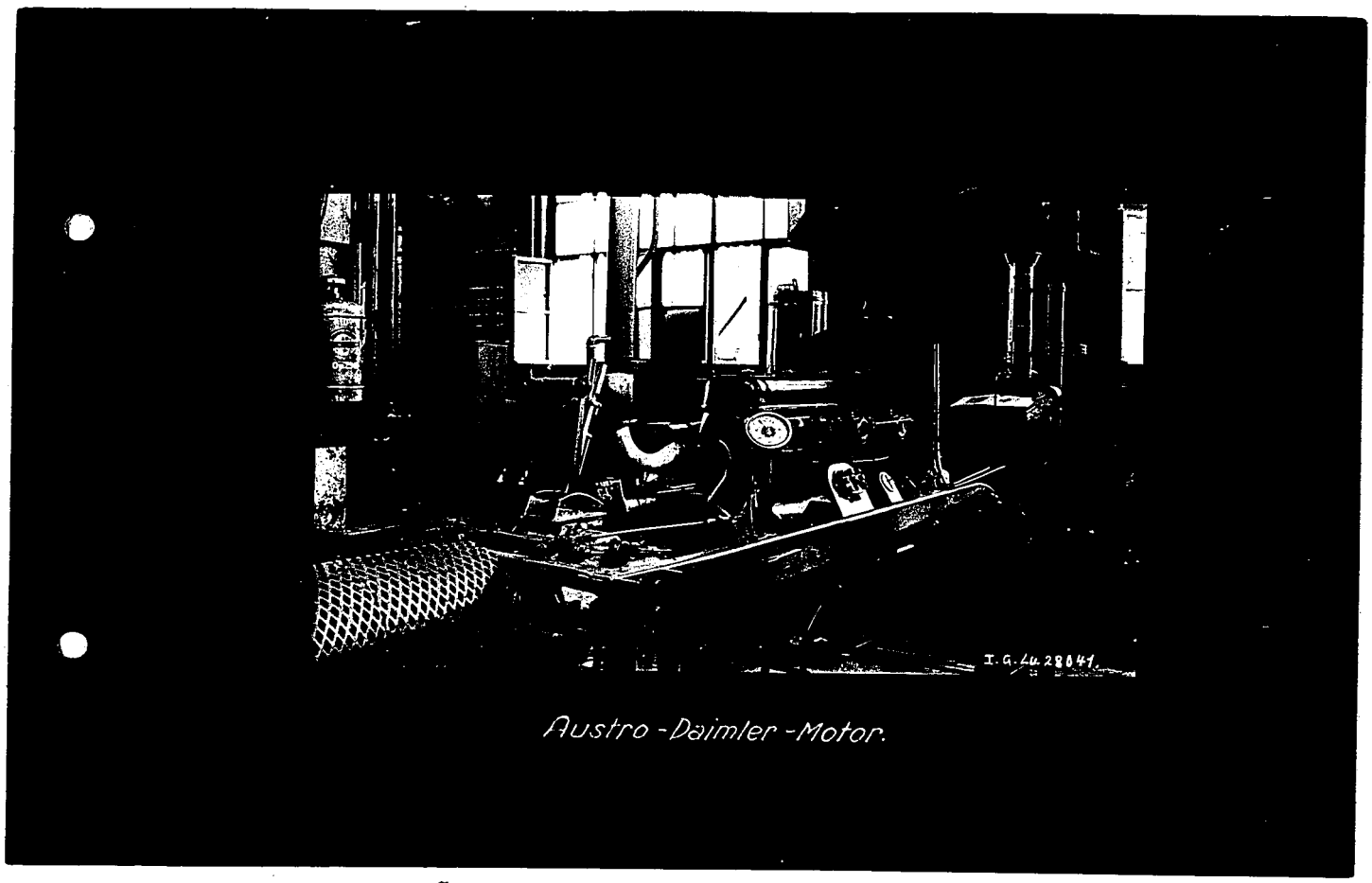
03322

Man erkennt, dass sehr geringe Schlammbildung im gleichen Motor sowohl im Hochsommer als auch im Oktober oder Januar auftreten kann. Sie ist wohl mehr ein Charakteristikum des Öles und zwar bei diesen Mischölen ein Charakteristikum des Mineralölanteiles, denn der Anteil an synthetischem SS906 war bei allen Ölen der gleiche.

POOR COPY



Adler-Motor II mit Pendeldynamo.



Austro-Daimler-Motor.

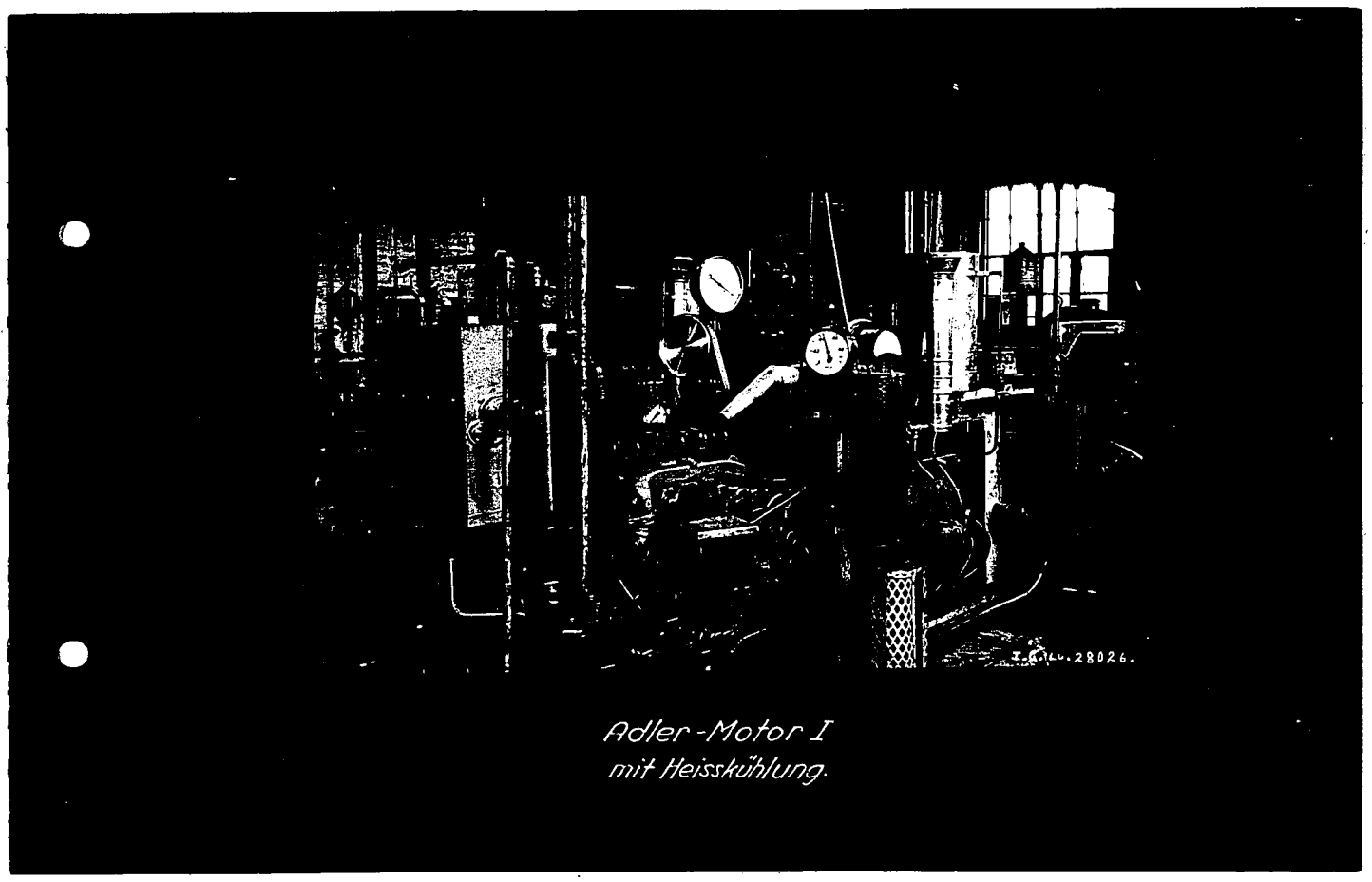


Magirus - Lastwagenmotor
mit Fronde - Wasserbremse.

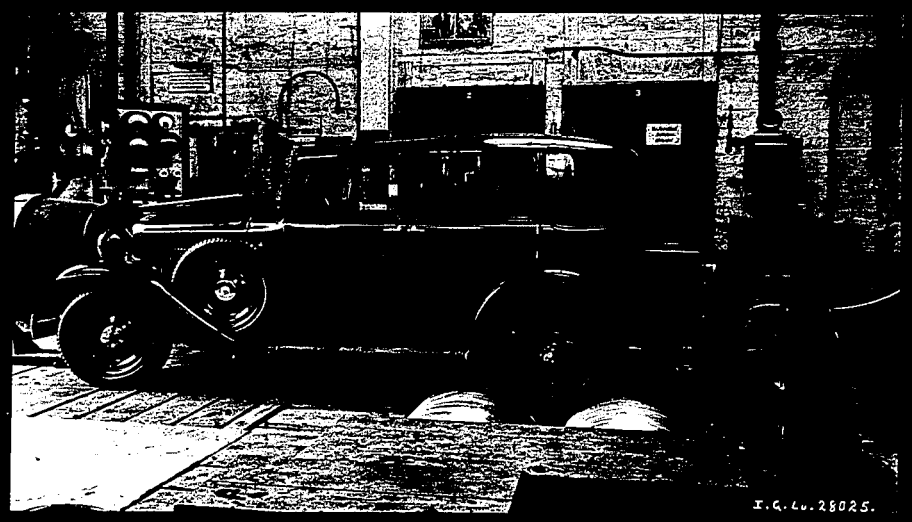


Universalmotor
zur Untersuchung gasförmiger Kraftstoffe.

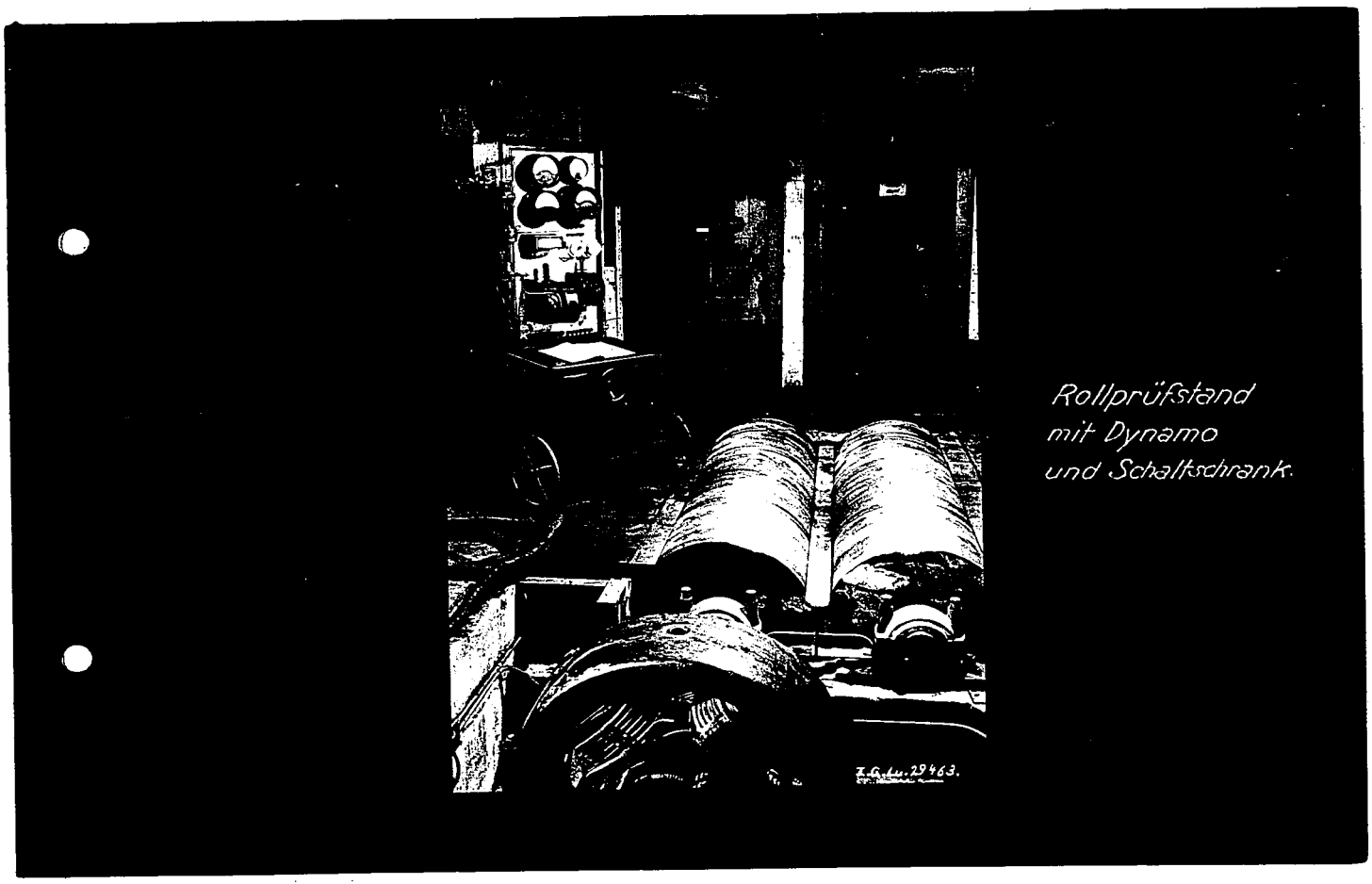
KODAK SAFETY



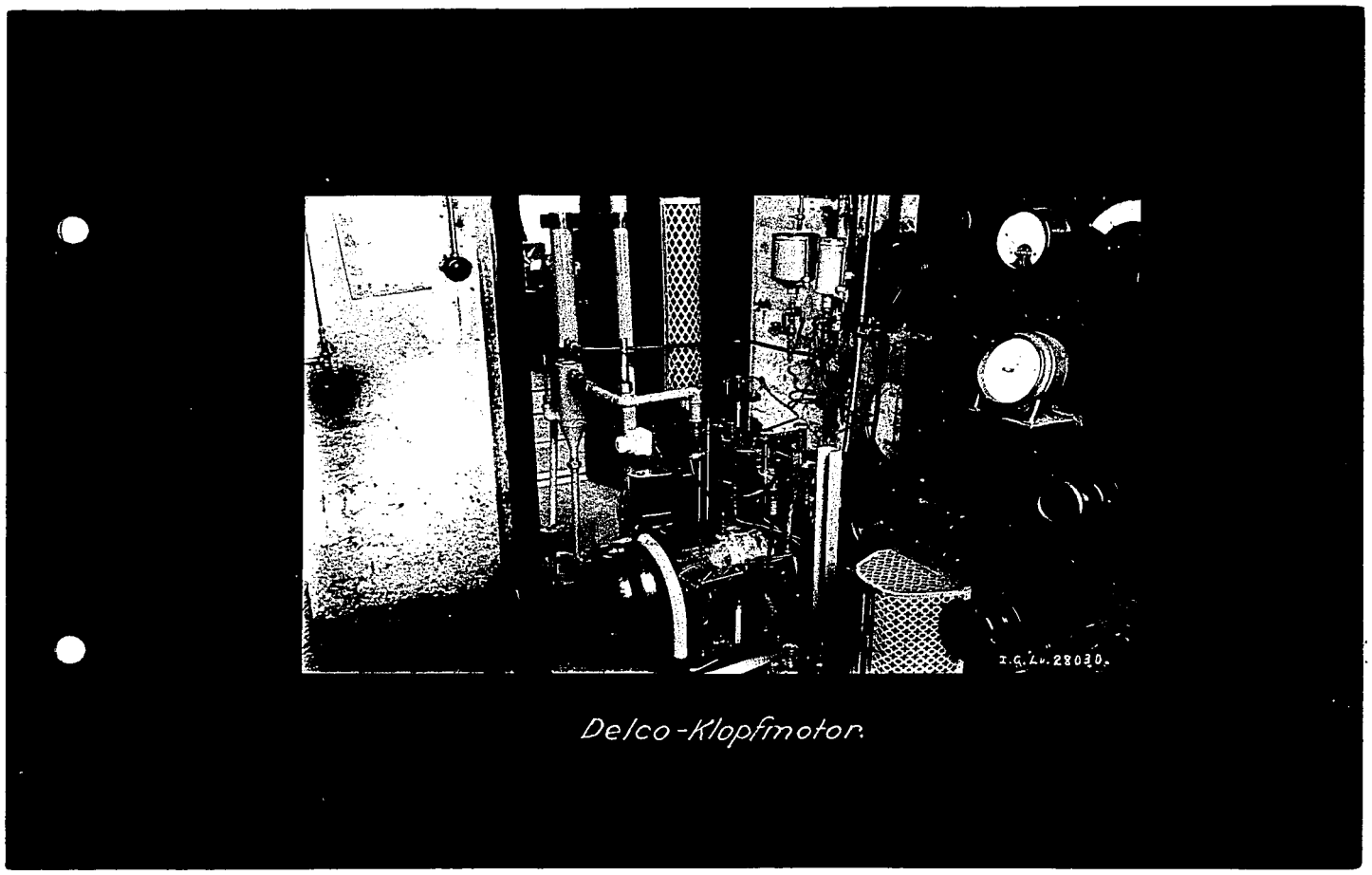
Adler-Motor I
mit Heisskühlung.



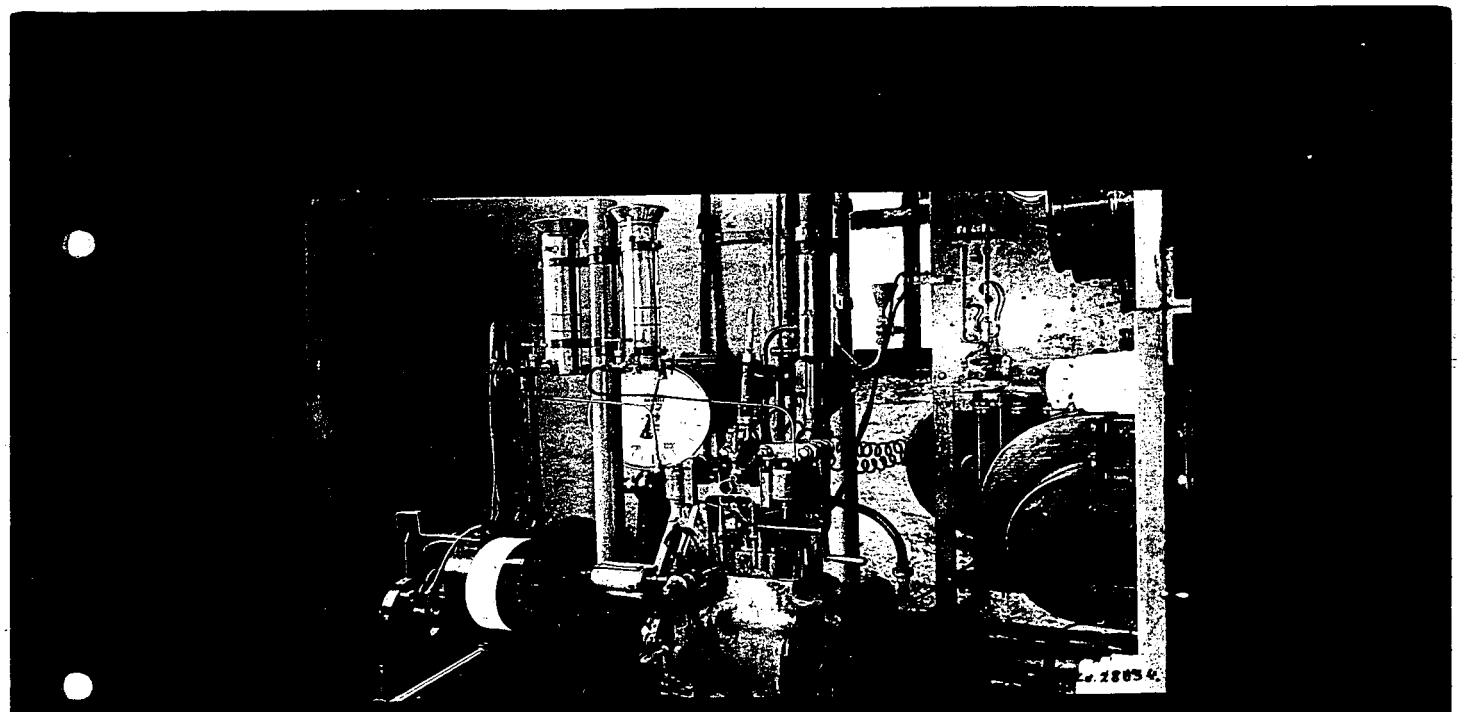
Rollprüfstand.



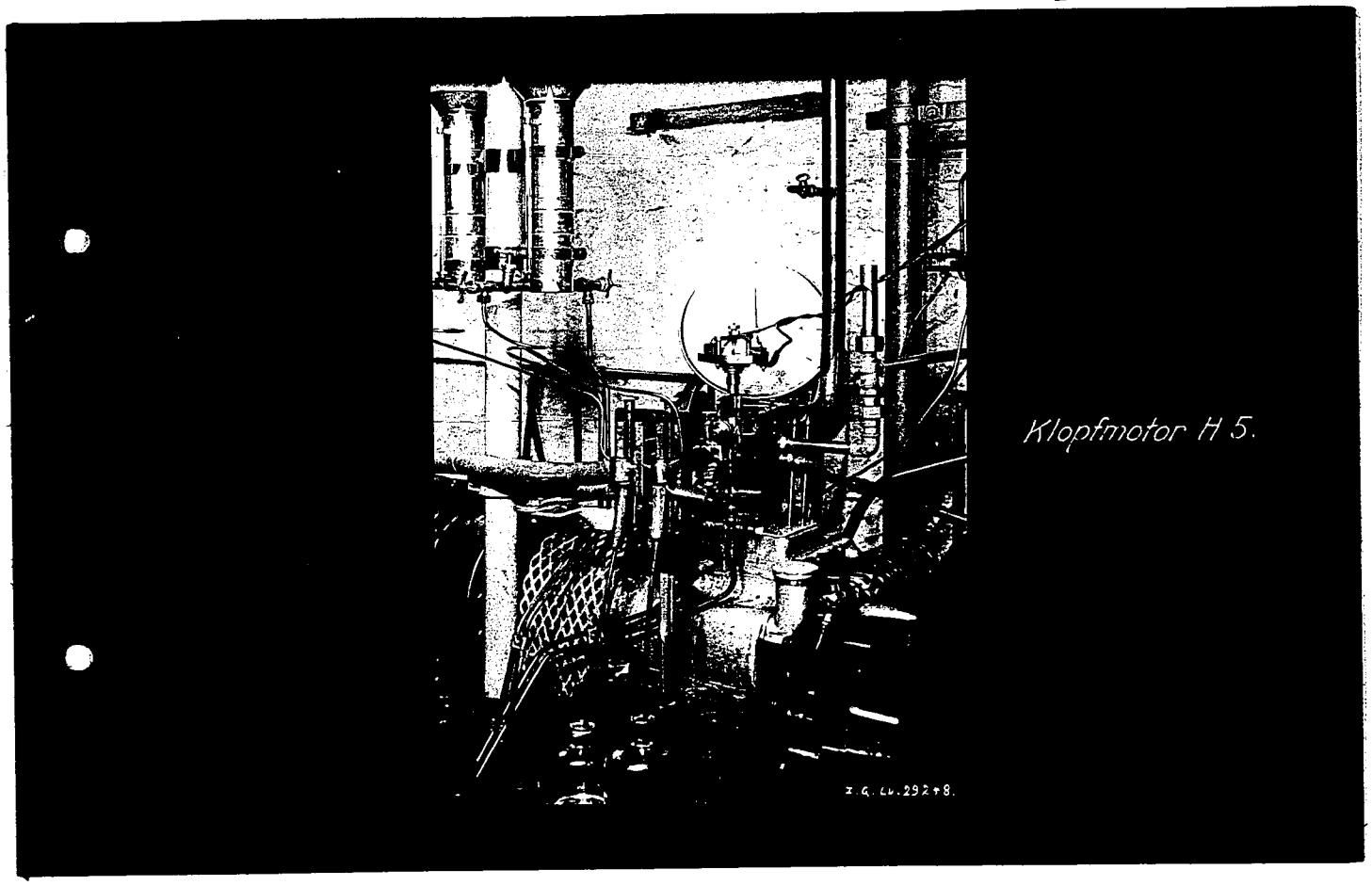
Rollprüfstand
mit Dynamo
und Schaltschrank.



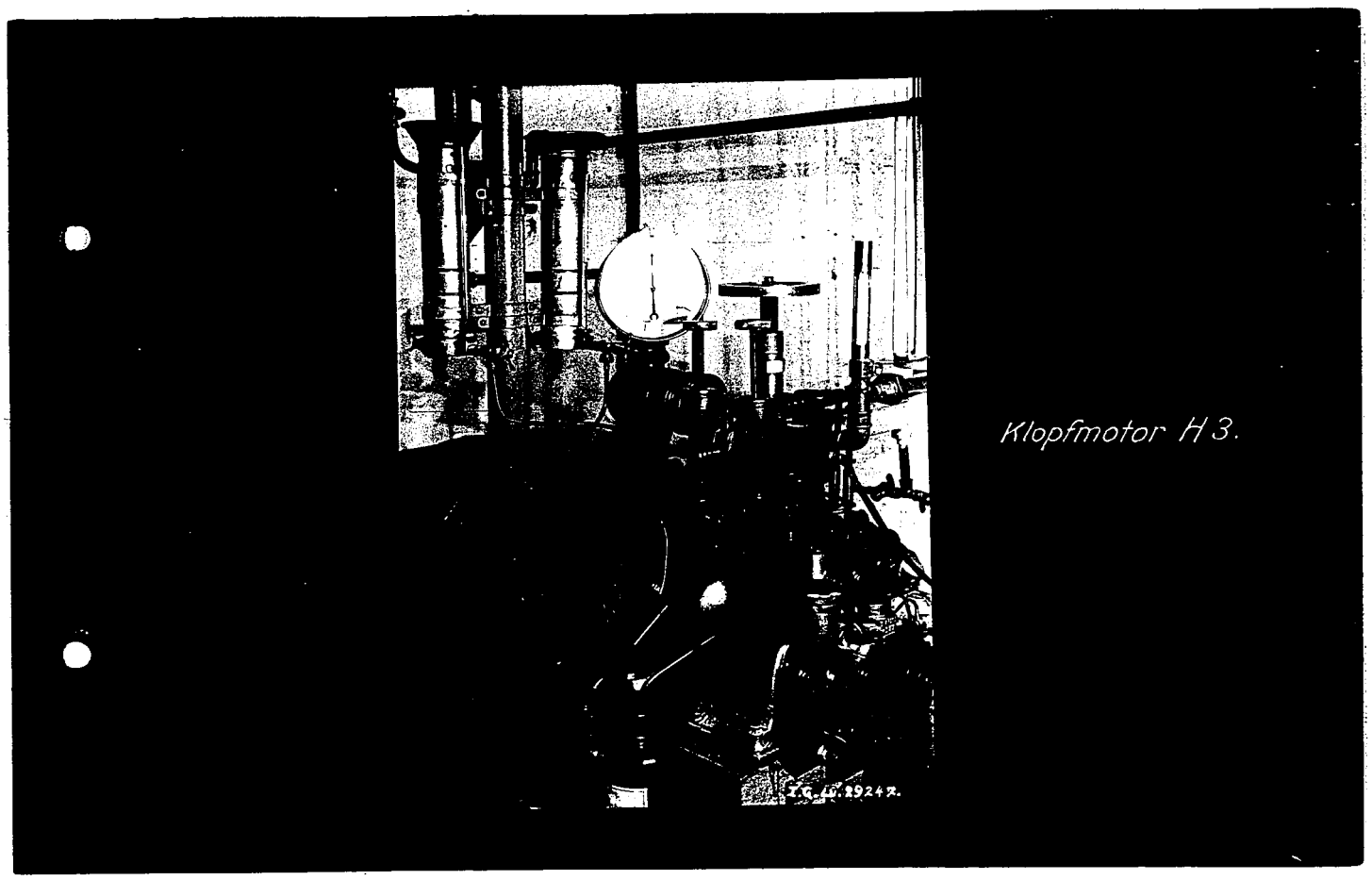
Delco-Klopfmotor.



I.G. Vario-Motor.



Klopfmotor H 5.



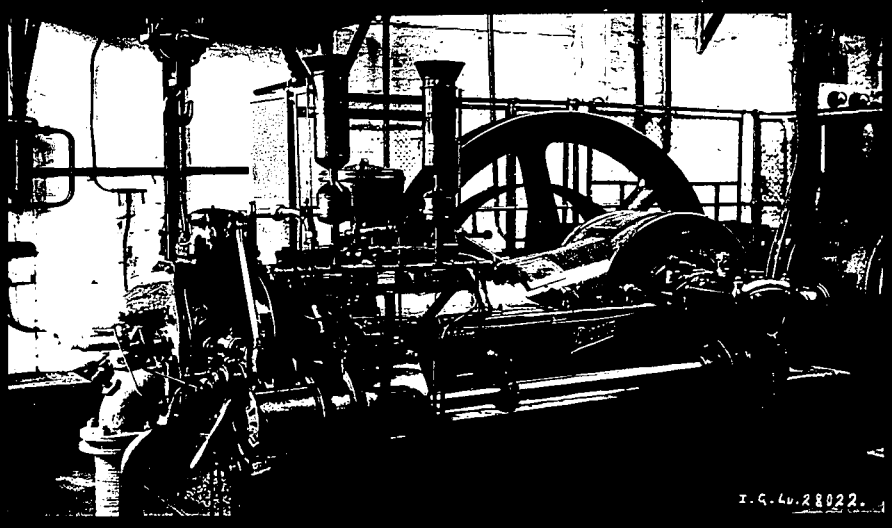
Klopfmotor H 3.



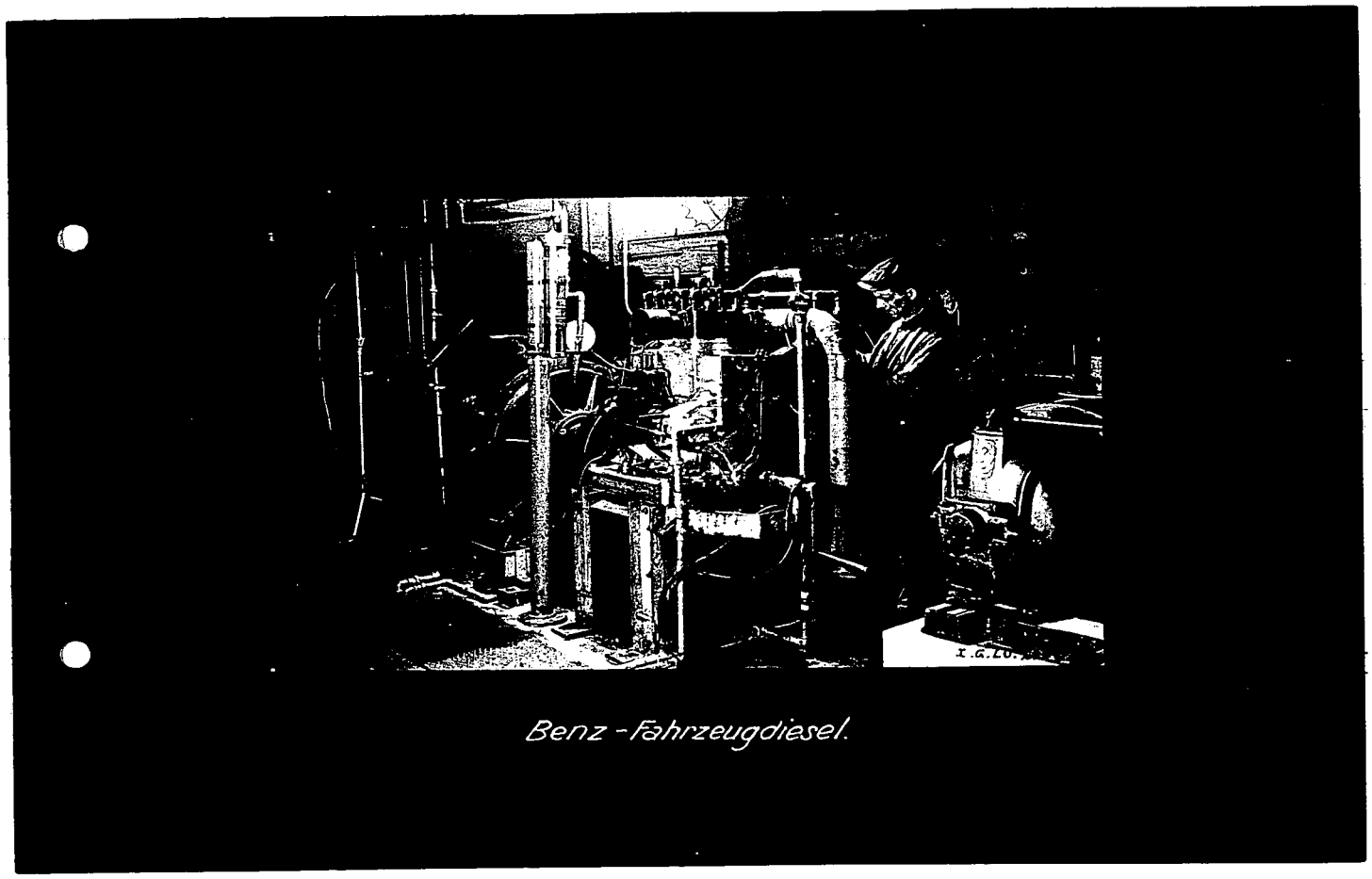
Prüfstand
zur Untersuchung von Kraftstoffen auf Startvermögen.



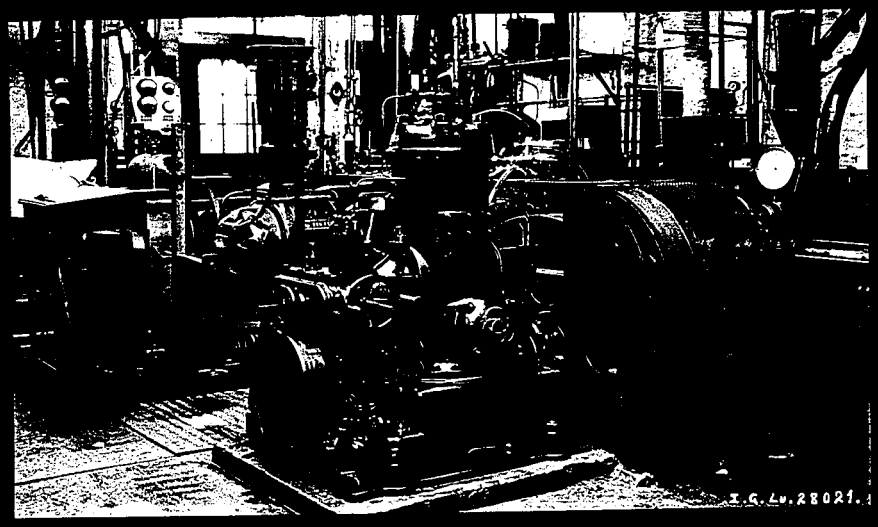
Prüfstand
zur Untersuchung von Kraftstoffen auf Verpichung.



Deutz-Dieselmotor.



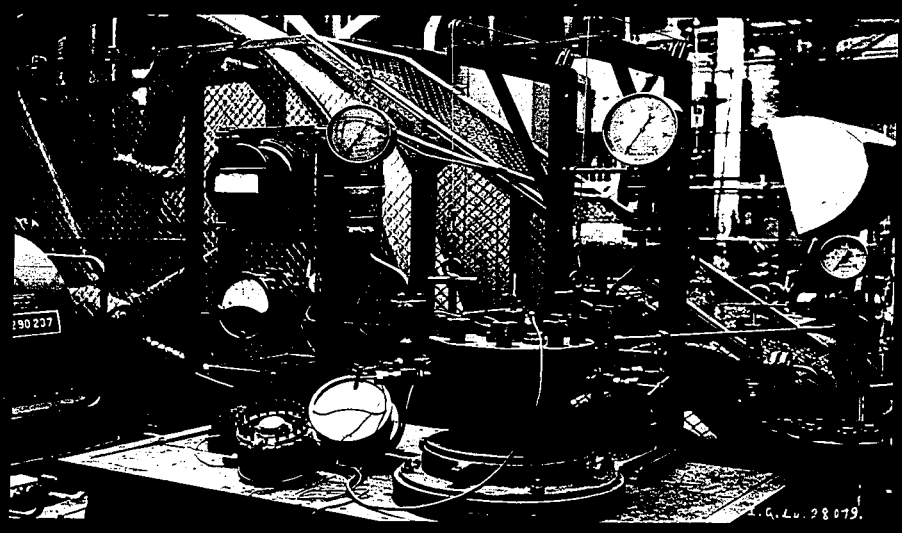
Benz - Fahrzeugdiesel.



Krupp-Dieselmotor.



Apparatur
zur Prüfung von Schmierölen bei Kälte.



Flammpunktbestimmung für Öle unter Druck.

03342

DEUTSCHE AKADEMIE DER LUFTFAHRTFORSCHUNG

03343

Über Aromatenkraftstoffe
von Matthias Pier

Selbstzündung von Brennstoff-Luftgemischen durch adiabatische Verdichtung und ihr Klopfverhalten im Motor
von Wilhelm Jost

Arbeiten des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen an der Technischen Hochschule Graz
von Hans List

Arbeiten aus dem Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig
von Ernst Schmidt

Physikalisch-chemische Probleme bei Verbrennungsvorgängen
von Gerhard Damköhler

VORTRÄGE
gehalten in der Sitzung des Ausschusses
für Verbrennungsfragen am 3. Juli 1940
Sitzungsperiode 1940/41

6

03344

Eröffnung der Sitzung

E. Schmidt: Meine Herren! Ich begrüße Sie im Namen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung und danke Ihnen, daß Sie hierher gekommen sind, um Ihre Mitarbeit im Rahmen des Ausschusses für Verbrennungsfragen zur Verfügung zu stellen. Der Kanzler der Akademie, Herr Ministerialdirigent Baeumker, bedauert, durch eine Dienstreise verhindert zu sein, heute hier zu erscheinen.

In ihren Ausschüssen will die Akademie in kleinerem Rahmen eine Reihe von maßgebenden Persönlichkeiten der Wissenschaft zusammenfassen zum Zwecke der Aussprache, der Beratung und des Gedankenaustausches über wichtige Fragen des Fachgebietes. Insbesondere soll die Aufgabe dieser Ausschüsse auch sein die Organisation der wissenschaftlichen Zusammenarbeit, die Ausarbeitung von Vorschlägen zur Erteilung von Forschungsaufträgen und die Bereitstellung von Mitteln hierfür. Dabei sollen die Arbeiten sich insbesondere mit den Grundlagen und mit den Grenzgebieten befassen, und es soll auch die Möglichkeit gegeben sein, Arbeiten zu fördern, die von der allgemeinen Luftfahrtforschung bisher nicht genügend beachtet worden sind, weil sie vielleicht noch keine unmittelbare Anwendung erkennen lassen.

Auf unserem Fachgebiet der Verbrennung hat die Akademie eine große öffentliche Vortragstagung im Mai 1939 in Berlin veranstaltet, an der Sie teilgenommen haben. In diesem Jahr ist wegen des Krieges und auch aus Gründen der Geheimhaltung eine solche größere Veranstaltung nicht am Platze. Wir haben aber eine Zusammenkunft in kleinem Kreise für zweckmäßig gehalten, um uns wieder einmal über die Fragen unseres Fachgebietes aussprechen zu können. Dabei denke ich mir als Aufgabe dieser Besprechung unseres Ausschusses im wesentlichen die Gewinnung eines Überblickes über die Arbeitsmöglichkeiten der einzelnen Forschungsstellen und die darin laufenden Arbeiten.

6

C3345

Daraus werden sich dann Anregungen ergeben für weitere Aufgaben und vielleicht Vorschläge entwickeln für eine Zusammenarbeit sowie für eine zweckmäßige Arbeitsteilung zwischen den einzelnen Forschungsstätten.

Da die Auswahl der Teilnehmer völlige Gewähr für Geheimhaltung bietet, können in diesem Kreise auch Dinge besprochen werden, die wegen ihrer wehrtechnischen Bedeutung nicht für einen größeren Kreis bestimmt sind. Ich bitte Sie daher, das hier Mitgeteilte als streng vertraulich zu behandeln.

03346

Über Aromatenkraftstoffe

von Matthias Pier

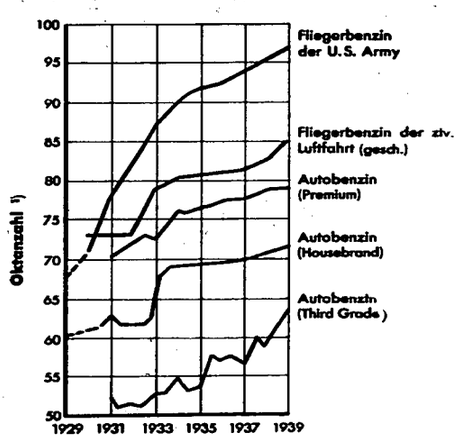
03347

Über Aromatenkraftstoffe

Von Matthias Pier

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Kraftstoffe, insbesondere für die modernen Flugmotoren, dauernd gestiegen. Um die für hohe Fluggeschwindigkeiten erforderlichen Spitzenleistungen im Motor zu erzielen, mußte besonders die Klopffestigkeit der Kraftstoffe gesteigert werden. Zum Beispiel ist in den Vereinigten Staaten in den letzten 10 Jahren die Oktanzahl der Autobenzine um etwa 10 Einheiten erhöht worden (Abbildung 1). Die amerikanische Luftwaffe, die sich noch 1930 mit einer Oktanzahl von etwa 70 (Army-Methode) begnügte, forderte 1939 bereits eine Oktanzahl von etwa 97. Auch bei der Zivilluftfahrt, bei der nur wirtschaftliche Gesichtspunkte maßgebend sind, ist ein starkes Ansteigen der Oktanzahl von 73 (Motormethode) im Jahre 1930, auf 85 im Jahre 1939 festzustellen, wenn auch in geringerem Maße als bei der Luftwaffe.

Abb. 1



Entwicklung der Oktanzahl in den letzten 10 Jahren in U. S. A.
(nach Nat. Petr. News 32 (1940) No. 17, 13)

1) Oktanzahl nach Motor-Methode, nur Fliegerbenzin der U. S.-Army nach U. S. Army-Methode (z. B. OZ. nach Army-Methode 92 = nach Motor-Methode 87)

6

C3348

Die rasche Entwicklung der Flugmotoren und der Kraftstoffe brachte eine Leistungssteigerung von 100 % und darüber, ohne daß die Abmessungen der Flugmotoren nennenswert vergrößert wurden.

Allgemeines über die Klopffestigkeit von Kohlenwasserstoffen

Die in der Praxis verwendeten Kraftstoffe sind Gemische aus Kohlenwasserstoffen verschiedener Molekulargewichte und verschiedener Konstitution. Um hochklopffeste Kraftstoffe zu erhalten, muß nach Möglichkeit jeder einzelne Bestandteil des Kohlenwasserstoffgemisches eine hohe Klopffestigkeit aufweisen.

Abbildung 2 zeigt, wie sich bei den verschiedenen Kohlenwasserstofftypen die Klopffestigkeit (Oktanzahl) in Abhängigkeit vom Siedepunkt, das heißt vom Molekulargewicht, ändert.

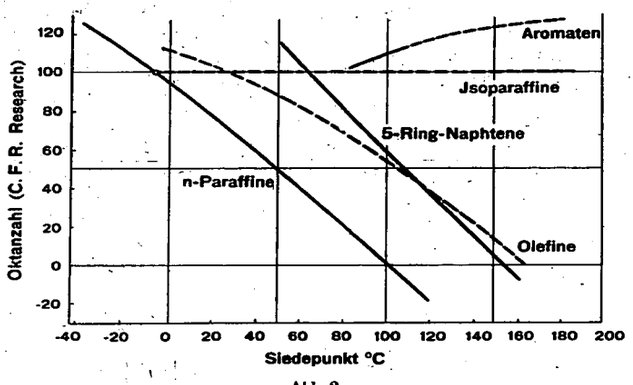


Abb. 2

Oktanzahlen und Siedepunkte von verschiedenen Kohlenwasserstoffen (Schematische Darstellung)

Man sieht aus der schematischen Darstellung, daß die normalen Paraffine mit zunehmendem Siedepunkt, also mit länger werdender gerader Kette, in ihrer Klopffestigkeit rasch abnehmen und bei n-Heptan (Siedepunkt 98° C) bereits die Oktanzahl 0 erreichen. Auch bei den

6

03349

Naphthenen nimmt die Oktanzahl mit steigendem Siedepunkt ab, wie für die Fünfringnaphthene gezeigt ist. Die Sechsringnaphthene haben bei gleichem Verlauf der Abhängigkeit vom Siedepunkt etwas höhere Oktanzahlen. Auch die Ungesättigten verhalten sich ähnlich, wobei noch zu bemerken ist, daß sie klopffester werden, wenn die Doppelbindung nach der Mitte des Moleküls rückt. Wenn auch die Ungesättigten im allgemeinen wegen ihrer Neigung zur Verpichung und ihrer geringen Lagerbeständigkeit als Fliegerbenzine weniger in Betracht kommen, so machen die neuerdings durch katalytisches Kracken hergestellten Olefine, Monoolefine in nicht zu hoher Konzentration, eine Ausnahme. Im Gegensatz zu den geradkettigen Paraffinen zeigen die stark verzweigten Isoparaffine auch bei höheren Siedebereichen eine sehr gute Klopffestigkeit. So hat das Isooktan (2, 2,4-Trimethylpentan) definitionsgemäß eine Oktanzahl von 100, während das n-Oktan nur eine Oktanzahl von — 20 aufweist. Noch höhere Oktanzahlen als Isooktan haben die Aromaten, bei denen mit zunehmendem Siedepunkt die Klopffestigkeit zunächst sogar noch ansteigt.

Die physikalischen Daten einiger technisch wichtiger Isoparaffine sind aus Zahlentafel 1 zu ersehen. Dabei sei bei den Isoparaffinen besonders auf das 2, 2,3-Trimethylbutan hingewiesen, das sogenannte »Triptan«, mit dem nach amerikanischen Berichten eine wesentlich höhere Leistung erzielt werden soll als mit Isooktan. Auch dem »Neohexan«, dem

Zahlentafel 1

	Summen-Formel	Struktur-Formel	Siedepunkt °C	Schmelzpunkt °C	Spez. Gewicht bei 20°C	Mol.-Gewicht	H-Gehalt in Gew.-% des Stoffes	Heizwert H_u WE/kg	Heizwert H_u WE/Ltr.	M.-M.-Mischoktanzahl [1]
Isopentan	C_5H_{12}		28	←24	0,620	72,0	16,6	10650	6600	90 [2]
Neohexan (2,2-Dimethylbutan)	C_6H_{14}		50	—100,1	0,649	86,1	16,3	10600	6900	105
Triptan (2,2,3-Trimethylbutan)	C_7H_{16}		81	—25	0,686	100,1	16,0	10550	7240	125 [3]
Isooktan (2,2,4-Trimethylpentan)	C_8H_{18}		99	—107,4	0,692	114,1	15,8	10500	7260	100
Isododekan	$C_{12}H_{26}$		193		0,737	170,2	15,3	10500	7750	93

Physikalische Daten einiger Isoparaffine

[1] in 50-Vol.%iger Mischung mit Benzin Oktanzahl 42 [2] nach Literaturangaben [3] Egloff, Mechanical Engineering, Juli 1939

6

03350

2,2-Dimethylbutan, schenkt man neuerdings in Amerika größeres Interesse, da es niedriger siedet als Isooktan und eine besonders hohe Bleiempfindlichkeit aufweist. Es kommt daher als Mischbestandteil für Isooktan enthaltende Kraftstoffe der Oktanzahl 100 in Frage. Allgemein gilt für die Isoparaffine, daß ihre Klopffestigkeit um so größer ist, je stärker die Verzweigung und je symmetrischer die Anordnung der Seitenketten ist.

Die Verwendung der Isoparaffine zur Herstellung hochklopffester Fliegerbenzine ist in erdölreichen Ländern naheliegend. Für die Herstellung der Isoparaffine werden ungesättigte Kohlenwasserstoffe benötigt, und es ist daher eine größere Produktion an eine umfangreiche Krackindustrie gebunden. In den Vereinigten Staaten würde ein kleiner Teil der verfügbaren Krackgase genügen, um den ganzen derzeitigen Bedarf an Hochleistungskraftstoffen zu decken. In Deutschland liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Wir besitzen auf der Basis der katalytischen Druckhydrierung und der Kohlenoxyd-Wasserstoff-Synthese eine hochentwickelte Treibstoffindustrie, wobei der erstgenannten für die Beschaffung von Hochleistungskraftstoffen die Hauptbedeutung zukommt. Die dabei anfallenden Gase sind jedoch keine ausreichende Grundlage für die Erzeugung von Hochleistungskraftstoff auf Isoparaffingrundlage. Deshalb wurde auch die Isooktansynthese aus Kohlenoxyd und Wasserstoff über Isobutylöl entwickelt. Vor allem aber lassen sich bei der Druckhydrierung verhältnismäßig einfach aromatische Kohlenwasserstoffe herstellen, so daß wir in Deutschland auf die Verwendung von Aromaten für Hochleistungskraftstoffe hingewiesen wurden.

Eigenschaften der Aromaten, insbesondere ihr Verhalten im Motor

Der Grundtyp der Aromaten ist das Benzol, das nach gründlicher Raffination zusammen mit geringen Mengen Toluol und Xylol in Mischung mit Flugbenzinen als Fliegerbenzol Verwendung findet. In Zahlentafel 2 sind noch eine Reihe anderer technisch wichtiger reiner Aromaten zusammengestellt. Außer der hohen Oktanzahl haben sie gegenüber den Isoparaffinen den Vorteil eines wesentlich höheren Literheizwertes. Dies ist deshalb von Wichtigkeit, weil bei vielen modernen Flugzeugen die Raumfrage für den Kraftstoff wichtiger ist als die Gewichtsfrage. Der vom Benzol her bekannte Nachteil, daß es bei niedrigen Temperaturen fest wird, fällt bei den höheren Aromaten weg, da ihre Schmelzpunkte im allgemeinen weit unter 0° C liegen.

6

Zahlentafel 2

	Summen-Formel	Struktur-Formel	Siedepunkt °C	Schmelzpunkt °C	Spez. Gew. bei 20 °C	Mol.-Gew.	H-Gehalt in Gew.-% des Stoffes	Heizwert H_u WE/kg	Heizwert H_u WE/Ltr.	M.-M.-Mischoktanzahl [1]
Benzol	C_6H_6		80,4	+ 6	0,879	78,05	7,3	9630	8450	98
Toluol	C_7H_8		110,3	−14	0,867	92,06	8,7	9750	8450	99
o-Xylol	C_8H_{10}		144	−27	0,881	106,08	9,5	9825	8650	98
m-Xylol	C_8H_{10}		139	−54	0,864	106,08	9,5	9750	8420	100
p-Xylol	C_8H_{10}		138	+15	0,861	106,08	9,5	9780	8420	101
Äthylbenzol	C_8H_{10}		136	−94	0,867	106,08	9,5	9770	8460	100 [2]
1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	C_9H_{12}		165	−46	0,865	120,1	10,0	9800	8460	109 [2]
1,4-Äthylmethylbenzol	C_9H_{12}		162	<−20	0,862	120,1	10,0			110 [2]
n-Propylbenzol	C_9H_{12}		159	−99,2	0,862	120,1	10,0	9890	8500	101 [2]
n-Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$		183	−81,2	0,861	134,1	10,5			99 [2]
1,4-Diäthylbenzol	$C_{10}H_{14}$		183	−35	0,865	134,1	10,5	9858	8550	116
1,4-Äthylisopropylbenzol	$C_{11}H_{16}$		197	−20	0,858	148,2	10,8	9945	8540	120

Physikalische Daten einiger Aromaten

[1] in 50-Vol.%iger Mischung mit Benzin Oktanzahl 42 [2] nach Literaturangaben

Die in der Zahlentafel angegebenen Oktanzahlen (Motormethode) sind Mischoktanzahlen. Diese werden bestimmt, indem man die zu prüfenden Stoffe mit einem Benzin bekannter Oktanzahl mischt und dann den Klopfwert aus der für die Mischung erhaltenen Oktanzahl nach der Mischungsregel berechnet.

Die Bestimmung der Mischoktanzahl ist einmal deswegen von Bedeutung, weil die Klopffestigkeit von Kohlenwasserstoffen mit sehr hoher Oktanzahl nicht mehr ermittelt werden kann; sie lassen sich in den üblichen Prüfmotoren nicht zum Klopfen bringen. Zum anderen

03352

geben die Mischoktanzahlen ein Bild über das Verhalten der Kohlenwasserstoffe in Mischungen, was insbesondere bei Kohlenwasserstoffen von engem Siedebereich wichtig ist.

Die Höhe der Mischoktanzahl hängt in starkem Maße vom Grundbenzin und von der Konzentration des zu untersuchenden Treibstoffes in der Mischung ab. Je niedriger die Oktanzahl des Grundbenzins ist, desto höher ist im allgemeinen bei allen Kohlenwasserstoffklassen die Mischoktanzahl des zu prüfenden Stoffes. So ergibt sich zum Beispiel für Äthylpropylbenzol in 50 volumprozentiger Mischung mit einem Grundbenzin von Oktanzahl 40 eine Mischoktanzahl von 117, mit einem Grundbenzin von Oktanzahl 72 von etwa 100.

Nicht so eindeutig ist die Abhängigkeit der Mischoktanzahl von der Konzentration. Während die Mischoktanzahl der Isoparaffine im großen und ganzen von dieser unabhängig ist, nimmt sie bei den Ungesättigten mit steigender Konzentration stark ab. Beispiele für die umgekehrte Wirkung findet man bei den Aromaten. So zeigt zum Beispiel das Reinbenzol, in Mischung mit paraffinischem Benzin der Oktanzahl 42, mit der Konzentration steigende Mischoktanzahlen von etwa 80 bis 110. Dagegen zeigen andere aromatische Kohlenwasserstoffe, wie zum Beispiel Diäthylbenzol und Äthylpropylbenzol, mit der Konzentration wieder fallende Oktanzahlen. Dabei ist es möglich, daß bei hoher Konzentration der hohe Siedebereich dieser Kohlenwasserstoffe die Gemischbildung im Vergaser stark beeinflußt. Ein genaueres Bild müßte eine Untersuchung im Einspritzmotor ergeben.

Wegen dieser starken Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren sind die Mischoktanzahlen mit Vorsicht zu werten. Sie ermöglichen jedoch bei der Durchführung systematischer Versuchsreihen insbesondere mit den neuen hochklopffesten aromatischen Kohlenwasserstoffen eine für die Entwicklung wertvolle Beurteilung der Klopffestigkeit.

So ergeben sich bei aromatischen Kohlenwasserstoffen Beziehungen zwischen Mischoktanzahl, Konstitution und Siedepunkt, wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind. Die Mischoktanzahlen sind in 50 volumprozentiger Mischung mit einem paraffinischen Benzin von der niederen Oktanzahl 42 bestimmt, das gewählt wurde, um auch bei den Aromaten mit sehr hoher Oktanzahl die Mischoktanzahl noch mit genügender Genauigkeit bestimmen zu können. Man sieht, daß die Klopffestigkeit mit steigendem Siedepunkt bis zur Propylgruppe zunimmt. Methyl- und

6

03353

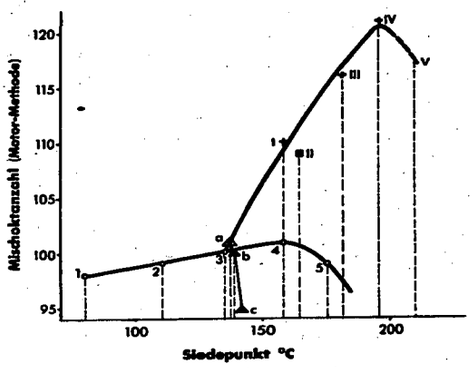


Abb. 3

Mischoktanzahl einiger Aromaten

(bestimmt in Mischung mit 50 Vol. % paraffinischem Benzin OZ. 42)

1) Benzol
2) Toluol
3) Äthyl-Benzol
4) n-Propyl-Benzol
5) n-Butyl-Benzol

a) p-Xylol
b) m-Xylol
c) o-Xylol

I. p-Methyl-Äthyl-Benzol
II. Mesitylen
III. p-Diäthyl-Benzol
IV. p-Äthyl-n-Propyl-Benzol
V. p-Äthyl-n-Butyl-Benzol

Äthylgruppen erhöhen die Klopffestigkeit stark. Weiterhin ergibt sich am Beispiel der Xylole, daß die Parastellung am günstigsten ist. Eine besonders hohe Klopffestigkeit zeigt das p-Äthyl-n-propylbenzol. Auch hier scheint Verzweigung und Symmetrie der Seitenketten die Klopffestigkeit zu erhöhen, während lange gerade Seitenketten wie bei den Paraffinen geringere Klopffestigkeit ergeben.

In Zahlentafel 3 sind für verschiedene Aromaten im Vergleich mit Isooktan die Mischoktanzahlen nach der Motormethode und nach der Researchmethode eingetragen. Die Bewertung der verschiedenen Aromaten ist in der Reihenfolge sowohl nach Motormethode wie nach Researchmethode die gleiche. Während jedoch nach der Motormethode die meisten Aromaten nur ebenso klopffest wie Isooktan erscheinen, sind sie nach der Researchmethode deutlich besser. Dies stimmt auch mit den Ergebnissen in der Praxis überein und zeigt, daß die Aromaten

6

03354

Zahlentafel 3

Kraftstoff	Oktanzahl aus Mischung berechnet	
	Motor-Methode	Research-Methode
Isooktan	100	100
Benzol, rein	98	114
Toluol, rein	99	116
Xylol, rein	101	118
Aromaten –180°C aus Aromatisierung	103	116
„ 150–175°C aus Dehydrierung	104	122
„ 175–200°C aus Dehydrierung	104	122
Diäthylbenzol	116	132
Äthylpropylbenzol	122	134

Mischoktanzahlen verschiedener klopffester Kraftstofftypen in Mischung 1 : 1 mit paraffinischem Benzin der Oktanzahl 42

nach der CFR-Motormethode zu ungünstig beurteilt werden. Der Grund liegt vor allem in dem verschiedenen Verhalten der Kohlenwasserstoffe gegenüber Änderungen der Motortemperatur.

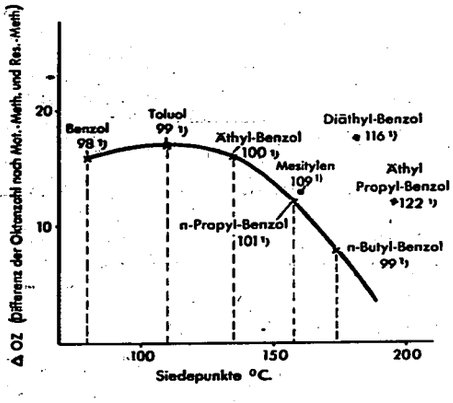
Während die Isoparaffine bei Erhöhung der Temperatur fast keine Änderung der Oktanzahl ergeben, zeigen die Aromaten einen mehr oder weniger starken Oktanzahlabfall. Dabei gilt im allgemeinen, daß dieser mit steigender Temperatur um so größer ist, je höher die Oktanzahl bei der Anfangstemperatur liegt. In Abbildung 4 ist als Maß für die Temperaturempfindlichkeit der Unterschied der Mischoktanzahl nach Research- und Motormethode aufgetragen. Bei den untersuchten aromatischen Kohlenwasserstoffen ergibt sich mit steigendem Siedepunkt eine Abnahme der Temperaturempfindlichkeit. Auch bei den Verbindungen mit Methyl- und Äthylgruppen scheint diese Beziehung zu bestehen. Besonders günstig verhält sich Äthylpropylbenzol, das trotz seiner Mischoktanzahl verhältnismäßig temperaturbeständig ist.

Außer der Temperaturabhängigkeit ist für Fliegerbenzine von Bedeutung, wie sie auf die Zugabe von Bleitetraäthyl ansprechen, das heißt, was für eine Bleiempfindlichkeit sie besitzen. Abbildung 5 zeigt, wie sich bei Untersuchung am CFR-Motor mit einem aromatenhaltigen Treibstoff die Temperaturabhängigkeit und Bleiempfindlichkeit mit steigender

6

03355

Abb. 4



Temperaturempfindlichkeit von Aromaten

¹) Mischoktanzahlen (Mot.-Meth.) mit 50 Vol.% paraffin. Benzin von OZ. 42

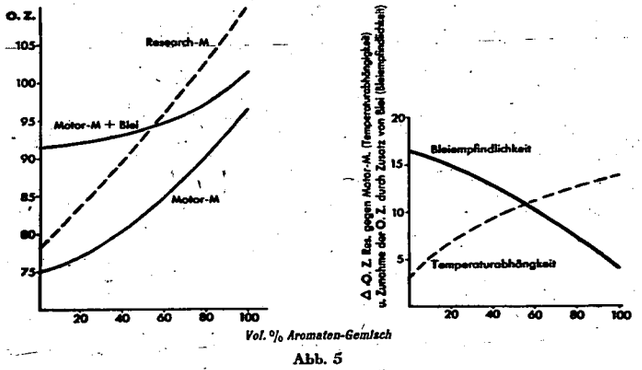


Abb. 5

Bleiempfindlichkeit und Temperaturabhängigkeit bei Zusatz von Aromatengemisch zu Hydrierbenzin aus Steinkohle

6

03356

Aromatenkonzentration ändern. Es ergibt sich, daß mit steigendem Aromatengehalt die Temperaturabhängigkeit etwa linear zu-, die Bleiempfindlichkeit abnimmt. Unter anderen Verhältnissen von Temperatur und Druck kann jedoch die Bleiempfindlichkeit einen anderen Verlauf nehmen. So zeigen bei der Prüfung der Klopffestigkeit nach dem der Praxis mehr angepaßten Überladeverfahren, auf das im folgenden noch näher eingegangen wird, Kraftstoffe mit hohem Aromatengehalt eine gute Bleiempfindlichkeit.

Die Beurteilung der Klopffestigkeit erfolgte lange Zeit ausschließlich auf Grund der Oktanzahlen bzw. Mischoktanzahlen. Die Oktanzahl ist bekanntlich ein Maß dafür, wie weit am Prüfmotor unter genau festgelegten Prüfbedingungen das Verdichtungsverhältnis gesteigert werden kann, ohne daß Klopfen eintritt. Die Oktanzahl ist stark von den Betriebsbedingungen und der Konstruktion des Motors abhängig.

Für die Untersuchung von Fliegerkraftstoffen wird meist die CFR-Motormethode angewandt, die in verschiedenen Ländern hinsichtlich Prüfbedingungen und Motorkonstruktion zur Erzielung einer besseren Übereinstimmung mit der Praxis abgeändert wurde. Diese Methoden erfüllten alle Anforderungen, solange Kraftstoffe mit einer Oktanzahl von etwa 80 für die Motoren ausreichend waren. Mit der Einführung von Überlademotoren, die Hochleistungskraftstoffe von Oktanzahl 87, 100 und mehr erfordern, zeigte sich jedoch, daß die Oktanzahl allein zur Beurteilung von Fliegerkraftstoffen nicht mehr ausreichte. Aus diesem Grunde wurden an verschiedenen Stellen neue Prüfverfahren ausgearbeitet, bei denen die Prüfbedingungen weitgehend den Verhältnissen des modernen Flugmotors angepaßt sind (Überladung mit Gebläse, Einspritzung des Kraftstoffes mit Pumpe), und das Klopfen nicht durch Steigern der Verdichtung, sondern durch Steigern des Ladedruckes eingestellt wird.

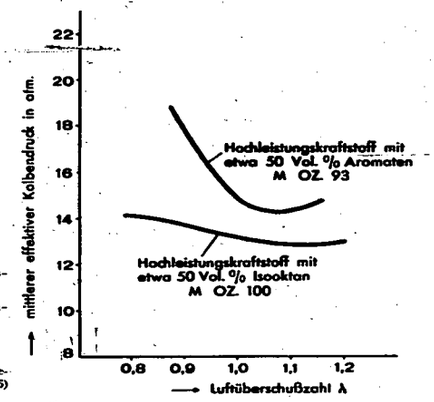
Bei Anwendung dieses neuen Überladeprüfverfahrens zeigte sich nun, daß insbesondere die Aromatenkraftstoffe nach der CFR-Motormethode in ihrer Klopffestigkeit zu schlecht beurteilt werden. Hat man zum Beispiel zwei Benzine gleicher Oktanzahl, von denen das eine hohen Isoparaffingehalt und das andere hohen Aromatengehalt aufweist, so kann das Aromatenbenzin bei der Überladeprüfung weit überlegen sein. Zwei typische Klopfgrenzkurven, die am BMW-132-Einzylindermotor mit einem Aromatisierungsbenzin aus Steinkohle (52 % Aromaten, Oktanzahl 93) und einem Benzin mit 50 Volumprozent Isooktan (Oktan-

6

03357

zahl 100) erhalten wurden, sind in Abbildung 6 dargestellt. Demnach ist das Aromatisierungsbenzin trotz niederer Oktanzahl in der Überladefähigkeit eindeutig überlegen. Die Aromatenbenzine besitzen besonders bei fetten Gemischen (Luftüberschußzahl $\lambda < 1$) nach der Überladeprüfung eine bedeutend höhere Klopffestigkeit als Benzine mit hohem Gehalt an Isoparaffinen. Bei Vermagerung des Gemisches nimmt die Überladefähigkeit von Aromatenkraftstoffen stärker ab, was mit der oben gezeigten Temperaturabhängigkeit parallel geht. Trotzdem besitzen aber die stark aromatenhaltigen Kraftstoffe nach dem Überladeverfahren bei Ladelufttemperaturen von etwa 80° C im allgemeinen auch im mageren Gebiet ($\lambda > 1$) noch eine höhere Klopffestigkeit als solche mit hohem Isoparaffingehalt gleicher oder höherer Oktanzahl.

Abb. 6



Überladekurven von Hochleistungskraftstoffen mit hohem Aromaten- bzw. Isoparaffingehalt (DVL-Überladeverfahren; Ladelufttemperatur: 80° C, $\varepsilon = 6{,}5$)

Einen Überblick über die mit verschiedenen Aromatenkraftstoffen durch Überladung erzielbare Leistung im Vergleich mit bekannten Fliegerkraftstoffen gibt Zahlentafel 4. Dabei ist die mit einem 50volumprozentigen Gemisch von Äthylpropylbenzol und Hydrierbenzin aus Steinkohle mit einem Zusatz von 0,12 % Blei bei $\lambda = 0{,}9$ erzielbare Leistung gleich 100 gesetzt. Die Dehydrieraromaten verhalten sich in der Mischung hinsichtlich der Überladefähigkeit ähnlich wie Flieger-

6

03358

benzol, während ein Gemisch aus 50 Volumprozent Isooktan und 50 Volumprozent Hydrierbenzin aus Steinkohle mit einem Bleigehalt von 0,12 % nur 60 % ($\lambda = 0{,}9$) bzw. 52 % ($\lambda = 1{,}1$) der Leistung des Äthylpropylbenzolgemisches (bei $\lambda = 0{,}9$) erreicht. Zum Vergleich sind auf

Zahlentafel 4

50 Vol.%iges Gemisch von Hydrierbenzin aus Steinkohle O.Z. 73 + 0,12 Vol.% Pb mit:	% Leistung bei Luftüberschußzahl		Oktanzahl	
	$\lambda = 0{,}9$	$\lambda = 1{,}1$	Motor-Methode	Research-Methode
Äthyl-propylbenzol	100	71	99	110
Diäthylbenzol	95	67	97	107
Fliegerbenzol	81	60	94	104
Dehydrier-Aromaten 150–175° C	80	59	93	103
Dehydrier-Aromaten 175–200° C	77	55	92	101
Isooktan	60	52	100	101
Zum Vergleich: bekannte Hochleistungskraftstoffe				
O.Z. 87 Fliegerbenzin aus Steinkohle (0,09 Vol.% Pb)	44	33	88	91
O.Z. 100 Kraftstoff mit ca. 50 Vol.% Isoparaffinen (0,09 Vol.% Pb)	56	49	101	104
Aromatisierungsbenzin aus Steinkohle (300 at) (0,12 Vol.% Pb)	64	50	90	100
Aromatisierungsbenzin aus Pech (700 at) (0,12 Vol.% Pb)	80	59	93	103
Isooktan rein (0,09 Vol.% Pb)	72	67	114	115

Durch Überladung erzielbare Leistung bei Aromaten-Kraftstoffen
Leistung mit Äthyl-propylbenzol bei $\lambda = 0{,}9$ gleich 100 % gesetzt
(Ladeluftemperatur 80 °, $\varepsilon = 6{,}5$)

Zahlentafel 4 die mit anderen zum Teil schon bekannten Hochleistungskraftstoffen erreichbaren Leistungen aufgetragen. Demnach gibt zum Beispiel Aromatisierungsbenzin aus Steinkohle (etwa 50 Volumprozent Aromaten) bei $\lambda = 0{,}9$ eine um etwa 50 % höhere Leistung als Flieger-

6

03359

benzin Oktanzahl 87 und noch eine um mehr als 10 % höhere Leistung als Oktanzahl 100-Kraftstoff mit 50 Volumprozent Isoparaffinen. Bei weiterer Steigerung des Aromatengehaltes durch Dehydrierung des Aromatisierungsbenzins kommt man zu Leistungen, die auch bei $\lambda = 1{,}1$ noch um etwa 50 % höher sind als bei dem Oktanzahl 100-Kraftstoff.

Die aus Zahlentafel 4 ersichtliche stärkere Abhängigkeit der aromatenhaltigen Kraftstoffe von der Luftüberschußzahl λ (großer Unterschied der Leistung bei $\lambda = 0{,}9$ und $\lambda = 1{,}1$) kann durch Abänderung des motorischen Arbeitsverfahrens wesentlich verbessert werden. So hat F. A. F. Schmidt einen Weg gezeigt, wie man durch mehrfaches Einspritzen ein Absinken der Überladefähigkeit im Vermagerungsgebiet vermeiden kann.

Ein weiterer Weg eröffnet sich mit dem »Ringverfahren«, das an unserem Technischen Prüfstand[1]) entstanden und in seinen grundlegenden Eigenschaften untersucht wurde. Bekanntlich wird hierbei nicht mit einer Zündkerze, sondern durch Einspritzen von Stoffen gezündet, die ebenfalls eine besondere Entwicklung unserer Laboratorien darstellen. Es hat sich nun überraschenderweise gezeigt, daß bei diesem Arbeitsverfahren die starke Abhängigkeit der aromatischen Kraftstoffe vom Luftüberschuß gemildert wird, so daß im mageren Gebiet eine bis zu 40 % höhere Überladung angewandt werden kann als bei der bisherigen Kerzenzündung. Die Überladekurve von Aromatenkraftstoffen wird also flacher gestaltet. Um dieses Verfahren ausführen zu können, ist lediglich eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses auf 1 : 8 erforderlich, eine Maßnahme, die in der Praxis teilweise schon durchgeführt wird, um niederen spezifischen Verbrauch zu erreichen.

Im folgenden soll noch kurz auf das Dauerverhalten der Aromaten eingegangen werden. Motorenbenzol wurde schon früher in Mischung mit Benzin als Hochleistungskraftstoff für Flugmotoren verwendet. Mit der zunehmenden Leistung und thermischen Belastung der Flugmotoren traten jedoch Schwierigkeiten bezüglich des Ringsteckens ein. Versuche zeigten, daß der Schwefelgehalt des Benzols für das Ringstecken von Bedeutung ist. Deshalb wird für Fliegerkraftstoffe nur noch das durch besondere Raffination praktisch schwefelfrei gemachte Fliegerbenzol verwendet.

Bei Benzolkraftstoffen liegen außerdem die mittleren Temperaturen im Verbrennungsraum höher als bei Benzinbetrieb. Durch die höheren

[1]) Vortr. Pensig im Reichsluftfahrtministerium am 1. Februar 1940.

6

03360

Temperaturen wird das Festgehen der Kolbenringe begünstigt. In Abbildung 7 ist eine Wärmebilanz für Benzin- und Benzolbetrieb aufgezeichnet, die auf Grund von Temperaturmessungen am Flugmotoren-Einzylinder errechnet wurde.

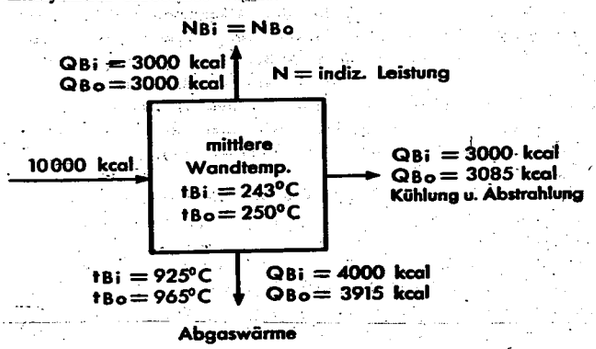


Abb. 7

Wärmebilanz bei Benzin- u. Benzolbetrieb

Daraus ist ersichtlich, daß bei gleicher Energiezufuhr und gleicher Motorleistung die Zylindertemperaturen bei Benzolbetrieb höher liegen als bei Betrieb mit Benzin, eine Erscheinung, die darauf zurückzuführen ist, daß Benzol weniger Luft zur Verbrennung benötigt. Obwohl infolge der höheren Zylindertemperaturen mehr Wärme durch Kühlung und Abstrahlung an die Umgebung verlorengeht, liegen bei Benzolbetrieb auch die Abgastemperaturen höher als bei Verwendung von Benzin. Dies erklärt sich dadurch, daß bei Verbrennung von Benzol die Abgasmenge und damit auch die mit den Abgasen verlorengehende Wärmemenge geringer ist.

Trotz des schlechteren Dauerverhaltens von Benzol ergaben jedoch Motorversuche, daß Kraftstoffe mit hohem Aromatengehalt sich durchaus günstig verhalten können. Insbesondere hat sich gezeigt, daß es höher siedende Aromaten gibt, die weniger zu Ringstecken neigen als Benzol. Die Höherlegung der Siedekurve ist jedoch begrenzt durch die Gefahr der Schmierölverdünnung, die in einigen Motorbauarten unter bestimmten Betriebsbedingungen auftritt, aber durch konstruktive Maßnahmen sicher weitgehend vermieden werden kann. Abbildung 8

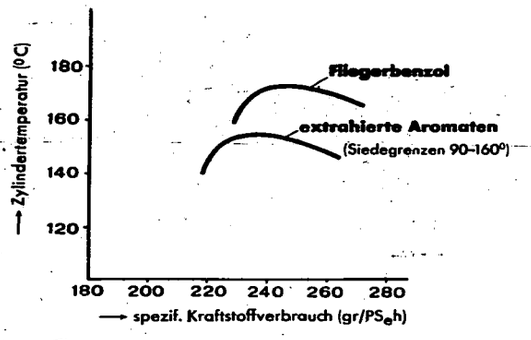
6

03360

03361

zeigt bei BMW-München durchgeführte Versuche, wonach aus Hydrierprodukten durch Extraktion gewonnene Aromaten (Siedegrenzen 90 bis 160° C) niedrigere Temperaturen im Motor ergeben als Fliegerbenzol. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, daß die höher siedenden Aromaten gegenüber Benzol einen höheren Wasserstoffgehalt aufweisen, was sich ohne Zweifel auch günstig auf das Ringstecken auswirkt. Von den Flugmotorenfirmen und dem Technischen Prüfstand der I. G. wurden bereits mehrere Dauerversuche durchgeführt, bei denen sich Gemische mit etwa 50 Volumprozent Aromaten im Ringstecken nicht schlechter verhielten als aromatenfreie Fliegerbenzine. Es liegen sogar Versuche im Einzylindermotor mit einem 25prozentigen Zusatz von Diäthylbenzol vor, die gegenüber normalem Fliegerbenzin mit Oktanzahl 87 eine Verlängerung der Laufzeit ergaben.

Abb. 8



Zylindertemperaturen bei verschiedenen Aromaten (nach Versuchen von BMW-München am BMW 132-Einzylindermotor)

Technische Gewinnung von Hochleistungskraftstoffen, insbesondere aromatischer Natur

Die katalytische Druckhydrierung liefert im normalen Betrieb aus Kohle, Teeren und Ölen gute Autobenzine. Ohne Änderung des Verfahrens läßt sich durch Einstellung eines tieferen Benzinendpunktes im Bedarfsfall Fliegerbenzin erzeugen, das nach Zusatz der üblichen Menge Bleitetraäthyl eine Oktanzahl von etwa 87 hat. Besonders hochwertig

6

03362

ist das Fliegerbenzin aus Steinkohle, doch entsprechen auch Benzine aus Braunkohle und Erdöl allen Anforderungen an Fliegerbenzin vom Typ Oktanzahl 87.

Im Gegensatz zur Ölverarbeitung durch Destillation oder katalytisches Kracken, bei der nur ein Teil des Öles in Fliegerbenzin übergeführt und außer Gas gleichzeitig große Mengen anderer Produkte, zum Beispiel Gasöl, anfallen, wird gewöhnlich bei der katalytischen Druckhydrierung so gearbeitet, daß neben gasförmigen Kohlenwasserstoffen nur Fliegerbenzin erhalten wird. Diese weitgehende Ausnützung des Rohstoffes ist für Deutschland besonders wichtig.

Eine Hydrieranlage, in der Autobenzin und Fliegerbenzin vom Typ Oktanzahl 87 hergestellt werden, läßt sich durch Änderung der Arbeitsbedingungen und des Katalysators mit ganz geringen apparativen Abänderungen auf die Erzeugung aromatischer Hochleistungskraftstoffe durch Aromatisierung umstellen. Außer dieser Aromatisierung liefert die Dehydrierung von Benzin derartige Kraftstoffe. Anlagen zur Dehydrierung von Benzin lassen sich nicht nur an Hydrieranlagen, sondern auch an Destillations- und sonstige Ölverarbeitungsanlagen anschließen.

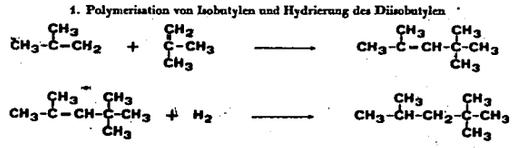
In der Ölindustrie der Vereinigten Staaten wurden jedoch aromatische Flugmotorenkraftstoffe in nennenswertem Umfang bisher nicht hergestellt; vielmehr spielt bei der technischen Herstellung von Hochleistungskraftstoffen in den Erdölländern die Gewinnung von Isooktan und anderen Isoparaffinen, insbesondere durch Polymerisation und Alkylierung, eine hervorragende Rolle. Das erste Verfahren geht von dem bei den Krackprozessen in reichlicher Menge anfallenden Isobutylen aus, das in Gegenwart von Katalysatoren zu Diisobutylen umgesetzt und dann zu Isooktan hydriert wird. Diesem Verfahren ist das neue Verfahren der Alkylierung nahe verwandt, nach dem Butylen mit Isobutan zur Reaktion gebracht wird (Abbildung 9).

In Deutschland, das wegen seiner verhältnismäßig kleinen Erdölvorkommen keine ausgedehnte Krackindustrie hat, muß das für die Isooktanerzeugung nötige Isobutylen erst aus anderen Rohstoffen erzeugt werden. Es ist hier der Isobutylalkohol (synthetisch aus Kohlenoxyd und Wasserstoff gewinnbar) zu nennen, ferner die Abgase der Druckhydrierung und der Benzinsynthese. Während der Isobutylalkohol sich leicht zu Isobutylen dehydratisieren läßt, ist die Umwandlung der C_4-Fraktionen der genannten Abgase zu Isobutylen, sei es durch Dehydrierung, sei es durch Isomerisierung, ein ziemlich kostspieliges Ver-

6

03363

1. Polymerisation von Isobutylen und Hydrierung des Diisobutylen



2. Alkylierung von Isobutan mit n-Butylen

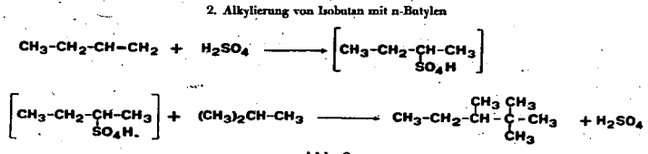


Abb. 9
Isooktanherstellung

fahren. Die bei der Hydrierung anfallenden Gase bestehen im Gegensatz zu den Krackgasen aus gesättigten Kohlenwasserstoffen, die für die Polymerisation vollständig dehydriert werden müssen. Dieser sehr viel Energie erfordernde Prozeß wird etwa zur Hälfte durch Anwendung der Alkylierung umgangen, da hier auf ein Mol Butylen ein Mol (nicht dehydriertes) Isobutan zur Reaktion gelangt.

Bei der Fliegerbenzinherstellung aus Steinkohle lassen sich aus den Hydrierabgasen auf je 100 000 t Benzin vom Typ Oktanzahl 87 folgende Mengen Isooktan erzeugen:

durch Dehydrierung und Polymerisation ..... 10000 t (= 10% des Benzins)
oder durch Dehydrierung und Alkylierung ..... 18000 t (= 18% des Benzins).

Zu der Herstellung von Isooktan nach den oben beschriebenen Verfahren kommt als neuer Weg für die Erzeugung von Hochleistungskraftstoffen die synthetische Herstellung von Diäthylbenzol und Äthylpropylbenzol aus dem durch Dehydrierung hergestellten Äthylen und Propylen. Man lagert diese an Benzol an und kann, wenn die nötigen Benzolmengen zusätzlich zur Verfügung gestellt werden, neben 100 000 t Benzin

31 000 t Diäthylbenzol ..... (= 31% des Benzins) und
22 000 t Äthylpropylbenzol ..... (= 22% des Benzins)

6

erhalten. Bemerkt sei, daß die genannten Mengen für Isooktan und Alkylbenzole sich auf die gleichzeitige Herstellung von Fliegerbenzin vom Typ Oktanzahl 87 beziehen, sich aber bei der Herstellung anderer Benzine ändern.[*3]

Da in Deutschland im Gegensatz zu Ländern mit großer Erdölverarbeitung die Ausgangsstoffe für die Isooktanerzeugung nur in begrenzten Mengen verfügbar sind, hat man außerdem die synthetische Isooktanerzeugung aus Kohlenoxyd und Wasserstoff aufgenommen. Um jedoch sehr große Mengen an Hochleistungskraftstoffen zu gewinnen, kommt in erster Linie die Erzeugung aromatischer Kraftstoffe durch Hochdruckhydrierung in Frage.

Zur Gewinnung von aromatischen Hochleistungskraftstoffen stehen, wie erwähnt, praktisch zwei Verfahren zur Verfügung, und zwar

die Aromatisierung und
die Dehydrierung.

Zum besseren Verständnis der Herstellung von Aromatenkraftstoffen ist in Abbildung 10 die Lage der Gleichgewichte zwischen hydrierten und aromatischen Ringsystemen an zwei Beispielen dargestellt.

Es zeigt sich, daß bei den untersuchten Systemen Cyklohexan-Benzol und Methylcyklohexan-Toluol bei etwa 50 at Druck und in Gegenwart von Katalysatoren, die das Gleichgewicht einstellen, im Temperaturbereich von 400 bis 450° C die Hydrierung vorherrscht, während bei höheren Temperaturen (460 bis 560° C) das Gleichgewicht auf der Seite der aromatischen Produkte liegt. Man hat es also durch Regulierung der Temperatur in der Hand, mehr oder weniger hydrierte Produkte zu erhalten. Außerdem ergibt sich aus der Lage der Kurven zueinander, daß mit zunehmendem Molekulargewicht die Dehydrierung leichter stattfindet.

Wie aus Abbildung 11 hervorgeht, verschiebt eine geringe Erhöhung des Wasserstoffdruckes das Gleichgewicht stark nach der Seite der hydrierten Produkte, das heißt, daß bei den normalen Bedingungen der katalytischen Druckhydrierung und Einstellung des Gleichgewichtes bei 200 at oder mehr Aromaten nur in geringer Konzentration erhalten werden können. Das gilt auch dann, wenn der Grundcharakter des Ausgangsproduktes aromatisch ist.

Nun ist aber durch die Aromatisierung auch bei 200 bis 700 at Wasserstoffdruck die Bildung aromatischer Benzine aus wasserstoff-

6

03365

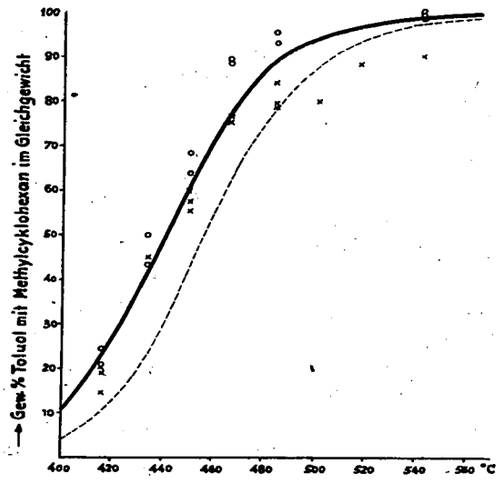


Abb. 10

Toluol-Methylcyklohexan-Gleichgewicht
50 at Gesamtdruck
5,5 at Produktpartialdruck

Theoretisches Gleichgewicht:
——— Toluol-Methylcyklohexan
------- Benzol-Cyklohexan

Experimentelle Werte:
× × × nach Anilinpunkt
o o o nach Brechungs-Index

armem Mittelöl möglich. Hierzu müssen Temperaturen von 500° und darüber und geeignete Katalysatoren, die das Mittelöl unter möglichst geringer Gasbildung aufspalten, angewandt werden. Zweckmäßig wählt man den Öldampfpartialdruck höher als bei der Benzinierung. In Übereinstimmung mit obigen Gleichgewichtsbetrachtungen ist das Mittelöl aromatischer als das Benzin. Wichtig ist es, die Reaktion so zu leiten, daß keine ungesättigten Verbindungen entstehen, die zu störenden

6

03366

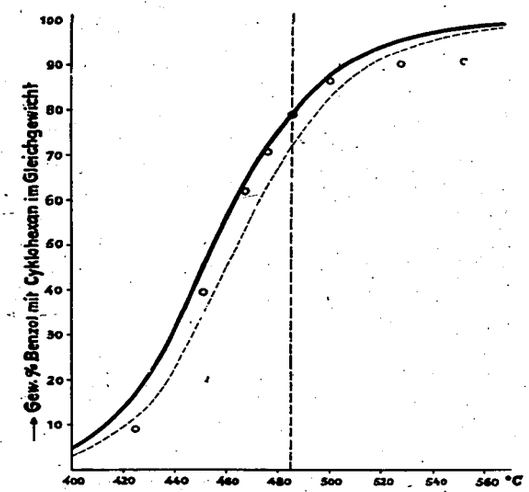


Abb. 11

Benzol-Cyklohexan-Gleichgewicht

Theoretisches Gleichgewicht:
——— für 43,5 at H_2-Partialdruck
– – – – – für 50,0 at H_2-Partialdruck
o o Experimentelle Werte bei 43,5 at H_2-Partialdruck

Kondensationen auf dem Katalysator führen; denn der Katalysator bei der Aromatisierung muß wie derjenige bei der Benzinierung eine Lebensdauer von etwa 1 Jahr haben.

Durch Aromatisierung lassen sich Mittelöle aus Steinkohle wie auch aus Braunkohle, ferner wasserstoffarme asphaltbasische oder gekrackte Erdölmittelöle verarbeiten; dagegen ist sie weniger geeignet für die Verarbeitung wasserstoffreicher Öle. Die Aromatenkonzentration hängt vom Ausgangsstoff ab, zum Beispiel gibt Steinkohle bei 300 bis 600 at bei etwas über 500° C ein Benzin mit 50% Aromaten. Es ist somit möglich, durch die Wahl geeigneter Katalysatoren in einem Gebiet, in dem

6

03367

das Gleichgewicht weit auf der Seite der Hydrierungsprodukte liegen würde, aromatenreiches Benzin herzustellen. Hierauf beruht zum Beispiel auch die Benzolraffination, die bei 40 at und 350° C vorgenommen wird.

Durch Aromatisierung erhält man aus geeigneten Mittelölen Hochleistungskraftstoff in einer Apparatur, die von der üblicherweise bei der Benzinierung angewendeten fast nicht abweicht. Im Gegensatz hierzu führt man, wie erwähnt, die Dehydrierung von Benzinen in einer zusätzlichen, verhältnismäßig einfachen Apparatur durch, die an die Hydrierung bzw. jede andere Benzingewinnung angeschlossen werden kann. Durch Dehydrierung lassen sich Benzine jeder Herkunft in aromatenreiche Kraftstoffe überführen.

Man arbeitet bei Temperaturen von etwa 500° C, bei niedrigeren Drucken, zum Beispiel von 50 at und weniger, in Gegenwart geeigneter Katalysatoren. Während der Katalysator bei der Aromatisierung eine lange Lebensdauer hat, wird bei der Dehydrierung meist mit kurzen Betriebsperioden, etwa 1 Tag und mehr, und anschließender Regeneration gearbeitet. Die Anlage befindet sich während drei Viertel der Zeit in Betrieb und während einem Viertel in Regeneration.

Die Dehydrierung erfolgt um so leichter, das heißt die Verluste sind kleiner und der Aromatengehalt des Dehydrierungsproduktes ist größer, je wasserstoffärmer das verarbeitete Benzin ist. Es ist möglich, durch die Dehydrierung selbst das rein paraffinische Benzin der Fischersynthese in ein aromatenreiches Benzin überzuführen, nur müssen dabei höhere Temperaturen angewandt und größere Verluste durch Vergasung in Kauf genommen werden. Die Verluste an Gas betragen größenordnungsmäßig bei Benzin aus Steinkohle etwa 15%, bei Benzin aus Braunkohle etwa 20%, wenn es sich darum handelt, eine Aromatenkonzentration von rund 50 bis 60% zu erhalten. Dabei sind stets die Aromaten in den höheren Fraktionen stark angereichert. Die höchste Aromatenkonzentration (90% und mehr) läßt sich durch Dehydrierung von Aromatisierungsbenzinen erreichen.

Beispiele für verschiedene aus Steinkohle erhaltene Fliegerbenzine bzw. Hochleistungskraftstoffe enthält die Zahlentafel 5. Die erste Spalte gibt die Daten für ein Produkt, das durch Benzinieren von Steinkohlemittelöl erhalten wurde. Das Mittelöl wurde durch Vorbehandeln mit einem stark hydrierenden Katalysator von Stickstoff- und Schwefelverunreinigungen befreit und dann mit einem stark spaltenden Katalysator

6

03368

verarbeitet, wobei nur 7% Aromaten erhalten wurden. Auf diese Weise wird das handelsübliche Fliegerbenzin mit Oktanzahl 87 bei etwa 150° C Endpunkt hergestellt. Arbeitet man mit den gleichen Katalysatoren auf ein Benzin etwa vom Endpunkt 180° C und dehydriert dann die Fraktion 90 bis 180° C, so erhält man nach Zumischung der bis 90° C siedenden Anteile das in der zweiten Spalte der Zahlentafel 5 aufgeführte Produkt.

Zahlentafel 5

	Benzinierung [1]		Aromatisierung [2]	
	—	Fraktion 90–180 °C dehydriert	—	Fraktion 120–190 °C dehydriert
Spezifisches Gewicht	0,730	0,794	0,803	0,830
% –100°C	57	42	32	20
Endpunkt °C	153	182	167	186
Aromatengehalt %	7	60	52	68
Oktanzahl Research-Methode	75	96	89	99
Motor-Methode	73	83	78	86
Mot.-Meth. + 0,12% Pb.	91	94	91	94

Einige Fliegerbenzine aus Steinkohlenmittelöl
Verschiedene Herstellungsweisen

[1]) mit stark spaltendem und stark hydrierendem Katalysator
[2]) mit stark spaltendem und schwach hydrierendem Katalysator

Es hat 60% Aromaten und ist ein ausgesprochener Hochleistungskraftstoff, der im Überlademotor bei den derzeitig vorherrschenden Motorenbedingungen eine höhere Leistung ergibt als ein handelsüblicher Isooktantreibstoff der Oktanzahl 100. In die dritte Spalte ist ein Produkt eingetragen, das durch Aromatisierung mit einem stark spaltenden, schwach hydrierenden Katalysator hergestellt wurde. Die Konzentration an Aromaten betrug dann 52%. In der letzten Spalte ist das Produkt verzeichnet, das durch Dehydrierung der Fraktion 120 bis 190° C des Aromatisierungsproduktes auf etwa 85% Aromaten und anschließende Mischung mit den vorher abgetrennten leichten Anteilen hergestellt wurde. Der Aromatengehalt des Gesamtproduktes steigt bis auf 68%.

Vom motorischen Verhalten des Benzols her ist es bekannt, daß bei den aromatischen Treibstoffen wie bei allen Fliegerbenzinen besonderer Wert auf höchsten Reinheitsgrad gelegt werden muß. Großversuche mit

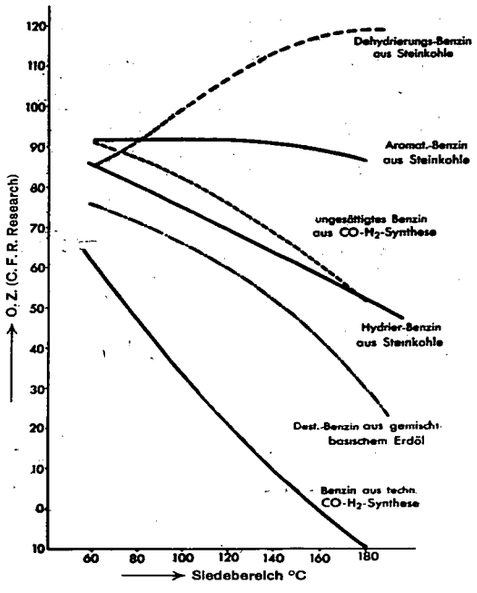
6

03369

Roh- und Schwerbenzol zeigten, daß durch katalytische Behandlung mit Wasserstoff unter Druck eine ausgezeichnete, mit geringen Substanzverlusten verbundene Benzolraffination zu erzielen ist. Als ausreichend raffiniert erwiesen sich, wie erwähnt, auch die durch Kondensation mit Aluminiumchlorid gewonnenen höheren Aromaten Diäthyl- und Äthylpropylbenzol. Man hat also in der Behandlung mit Katalysatoren die Möglichkeit, aromatische Hochleistungskraftstoffe nachzuraffinieren, falls es sich gelegentlich als zweckmäßig erweisen sollte.

Die Bedeutung, die der Herstellung aromatenreicher Kraftstoffe zukommt, zeigt ein Vergleich der Oktanzahlen ihrer einzelnen Fraktionen mit denjenigen anderer technisch hergestellter Treibstoffe. Hierfür gibt Abbildung 12 einige Anhaltspunkte.

Abb. 12



Oktanzahl und Siedeverhalten von Benzinen verschiedener Herkunft

6

03370

Die Oktanzahlen sind für das paraffinische Benzin aus der technischen Kohlenoxyd-Wasserstoff-Synthese am niedrigsten und sinken mit steigendem Siedepunkt ab. Durch nachträgliche Spaltung und Erhöhung der Konzentration an ungesättigten Verbindungen läßt sich die Oktanzahl wesentlich verbessern, die Abnahme der Werte mit steigendem Siedepunkt geht aber auch dann noch parallel mit dem ursprünglichen Synthesebenzin. Neuerdings eröffnet sich die Möglichkeit, unmittelbar ohne nachträgliche Spaltung ein Synthesebenzin mit hoher Konzentration an Ungesättigten zu erhalten. Bemerkt sei, daß bei diesem die Doppelbindung im allgemeinen endständig ist, und daß das Benzin trotz seines hohen Gehaltes an ungesättigten Verbindungen eine gute Lagerfähigkeit aufweist und kein Ringstecken verursacht. Besser als beim paraffinischen Benzin ist das Klopfverhalten, wenn man zu Destillationsbenzinen aus gemischtbasischem oder gar aus asphaltbasischem Erdöl übergeht. Weiter verbesserte Resultate gibt das Hydrierbenzin und das Aromatisierungsbenzin aus Steinkohle. Letztgenanntes hat, im Gegensatz zu den übrigen Benzinen, auch bei steigendem Siedepunkt eine verhältnismäßig konstante Oktanzahl. Die höchsten Werte liefert jedoch das Dehydrierungsbenzin aus Steinkohle, bei dem die Oktanzahl nicht nur im niedrigen Siedebereich schon sehr hoch liegt, sondern mit steigendem Siedepunkt noch stark zunimmt.

Die besonderen Eigenschaften der aromatenhaltigen Kraftstoffe, ihr hoher Klopfwert, ihr gutes Verhalten im Überlademotor, ihr hoher Literheizwert rechtfertigen es, mit allen Mitteln ihre Einführung als Hochleistungskraftstoff zu fördern, zumal die Technik so weit ist, sie in großer Menge aus deutschen Rohstoffen herstellen zu können.

6

03371

Aussprache

E. Schmidt: Ich danke Herrn Pier für seinen Beitrag, der uns neue Ausblicke in die Zukunft unserer Benzinversorgung ermöglichte. Es ist gerade für den Motorenbauer besonders wichtig, den neuesten Stand der Hydriertechnik zu kennen, da er seine Konstruktionen einrichten muß für die Betriebsstoffe, die in der nächsten Zeit zur Verfügung stehen.

Ich möchte auf einen Nebenvorteil der aromatischen Kraftstoffe hinweisen, der sich jetzt im Kriege bei den Flügen in größeren Höhen herausgestellt hat. Durch den Wasserdampfgehalt der Abgase tritt bekanntlich von einer gewissen Höhe an eine Eiswolkenbildung in Gestalt eines langen Schweifes hinter dem Flugzeug auf, der dieses auf weite Entfernung verrät und der daher für den Luftkampf von außerordentlicher Bedeutung ist. Luftkämpfe zwischen Jägern spielen sich häufig so ab, daß Freund und Feind bis an die Grenze der beginnenden Eiswolkenbildung — die sogenannte »Kondensschicht« in der Sprache der Flieger — aufsteigen und dann sicher sind, keinen unerkannten Gegner über sich zu haben, da die Eisnebelfahne jedes Flugzeug weithin sichtbar macht. Nun hängt die Eiswolkenbildung wesentlich von dem Wasserstoffgehalt des Brennstoffes ab. Wenn wir also zu den an Wasserstoff ärmeren aromatischen Brennstoffen übergehen, so gelingt es, den Beginn der Eisnebelbildung weiter hinaufzurücken. Von mir angestellte Rechnungen[1]) ergeben, daß man durch Übergang von dem üblichen Benzin zum reinen Benzol diese Grenze, die natürlich im Winter und Sommer in verschiedener absoluter Höhe liegt, um etwa 1 km hinaufrücken kann. Zwar hat reines Benzol, insbesondere wegen des hohen Erstarrungspunktes, Nachteile, aber mit anderen Aromaten von der von Herrn Pier beschriebenen Art mit niedrigerem Erstarrungspunkt und hohen Oktanzahlen von 100 und mehr gelingt es, die Nebelgrenze um 300 bis 400 m hinaufzurücken. Auch das ist nach Angabe unserer Jagdflieger für den Luftkampf schon ein ganz wesentlicher Vorteil. Diese angenehme Eigenschaft der Aromaten fällt uns also nebenbei zu.

v. Philippovich: Ich möchte nur noch etwas hervorheben, worauf auch Herr Pier schon hingewiesen hat, daß nämlich die Möglichkeit der Höherlegung der Siedekurve wegen der damit verbundenen Gefahr der Schmierölverdünnung weitgehend von der Bauart des Motors abhängt. Versuche, die in letzter Zeit gemacht worden sind, sollten zeigen, was die Ursache dieser sehr starken Schmierölverdünnung bei DB 601-Motoren ist, die Sperre fliegen und in kurzer Zeit 20% Schmierölverdünnung mit einem Benzin haben, das den RLM-Anforderungen entspricht. Es sind jetzt in Rechlin Standversuche gemacht worden mit einem BMW 132- und einem DB 601-Motor. Wie mir mitgeteilt wurde, ist dabei im BMW 132 keine nennenswerte Schmierölverdünnung eingetreten, im DB 601 dagegen ungefähr wiederum 20%, wenn er einige Zeit mit etwa 50° C Schmieröltemperatur betrieben wurde.

[1]) E. Schmidt: Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg. Vortr. auf d. Wissenschaftssitzg. am 15. 3. 1940.

6

03372

E. Schmidt: Zur Erläuterung für die mit den Nummernbezeichnungen der Motoren nicht so vertrauten Herren sei erwähnt, daß der BMW 132 ein luftgekühlter Motor, der DB 601 dagegen ein wassergekühlter Motor ist. Der BMW 132 hat also erheblich höhere Zylinderwandtemperaturen.

v. Philippovich: Es ergibt sich aus dem Ganzen meiner Ansicht nach die dringliche Forderung, im Betrieb eine Kühlerautomatik vorzusehen und dafür zu sorgen, daß nicht der Pilot mit irgendwelchen Mitteln immer wieder dafür sorgen muß, daß der verdünnte Kraftstoff aus dem Öl herausgeht, also z. B. kurzzeitig Vollgasflug einlegt usw. Ich halte diese Automatik für sehr wesentlich, denn es ist schon eine ganze Reihe von Störungen eingetreten, und eine Nichtbeachtung dieses Punktes würde die Verwendung von Kraftstoffen mit höherer Siedekurve meiner Ansicht nach unmöglich machen.

Pier: Grundsätzlich kann man natürlich bei den aromatenhaltigen Kraftstoffen die höher siedenden Anteile genau so abschneiden wie beim normalen Fliegerbenzin, nur wertet man dann die Aromaten nicht voll aus, da auch die höher siedenden Aromaten sehr klopffest sind. Der Siedepunkt des Diäthyl- und des Äthylpropylbenzols liegt z. B. über der heute üblichen Siedegrenze der Fliegerbenzine von 145 bis 160° C.

Triebnigg: Darf ich fragen, wie das Kälteverhalten dieser Aromaten ist, wo ihr Stockpunkt liegt usw.?

Pier: Das Kälteverhalten ist sehr gut. Die Schmelzpunkte liegen im Unterschied zu Reinbenzol sehr tief.

Damköhler: Kann man sich schon eine Vorstellung machen, woran es liegt, daß die Propyl-, Methyl-Benzole usw. höhere Oktanzahlen als das reine Benzol besitzen? Kann das an dem höheren Siedepunkt liegen?

Pier: Das wissen wir noch nicht genau.

Damköhler: Denn die Verdampfungswärme liegt doch dann auch höher.

Pier: Darin dürfte die Ursache nicht allein zu suchen sein. Wir haben die Bestimmungen bei verschiedenen Konzentrationen gemacht und dabei gesehen, daß die Kurve der Mischoktanzahlen mit steigender Konzentration etwa linear abfällt. Die Versuche müßten natürlich mit dem Einspritzmotor wiederholt werden. Sie wurden bisher nur an normalen Vergasermotoren durchgeführt.

v. Philippovich: Wir haben die Versuche ja mit Einspritzmotoren gemacht.

Pier: Auch in der Abhängigkeit von der Konzentration?

v. Philippovich: Auch solche Versuche haben wir zum Teil gemacht. Bei Mischungen von Benzin mit Benzol, Toluol, Äthylbenzol usw. nimmt bei gleichem

6

03373

Zusatz die Überladbarkeit stetig zu mit zunehmendem Siedepunkt der Aromaten. Es scheint so zu sein, als ob das klopfauslösende Moment im Benzin eben in den höheren Fraktionen vorhanden ist. Dies spricht mehr für die Tröpfchentheorie.

Pier: Bemerkenswert ist, was ich nicht erwähnte, daß z. B. durch einen Zusatz von Diäthylbenzol und Äthylpropylbenzol die Laufzeiten bis zum Ringstecken im Flugmotor bei normalem Leuna-Fliegerbenzin von O. Z. 87 verlängert wurden.

Jost: Zur Frage des Einflusses der Verdampfungswärme möchte ich sagen: Wenn man die Versuche über Zündung bei adiabatischer Verdichtung auswertet, erkennt man, daß verhältnismäßig kleine Temperaturerniedrigungen schon einen großen Einfluß auf das Klopfen ausüben müssen. Wenn man für die Aromaten und paraffinischen Benzine Unterschiede in der Temperatur in der Größenordnung von etwa 5° annimmt, die durch die Verdampfungswärme hereinkommen, wobei man die weitere Verdichtung durch die fortschreitende Flamme noch mit berücksichtigen muß, dann kommt man am Ende vielleicht auf das 2- bis 2½fache der Temperaturunterschiede vor Kompressionsbeginn, das sind dann etwa 10 bis 15°. Nach unseren Versuchen über die Selbstzündung entsprechen in dem Gebiet höherer Oktanzahlen etwa 1 bis 2° Temperaturunterschied bereits einer Oktanzahl; eine verhältnismäßig geringe Verschiedenheit der Verdampfungswärme kann sich also schon sehr stark bemerkbar machen. Nur glaube ich nicht, daß gerade bei den höheren Aromaten die Verdampfungswärme das Wesentliche ist. Diese würde sich wohl beim Benzol am stärksten auswirken, während bei den höheren Aromaten noch ein anderer Einfluß eine Rolle spielen müßte. Man hat etwas den Eindruck, als ob die längeren Ketten, vor allem die Seitenketten bei den Aromaten sich so ähnlich benehmen wie Seitenketten in Paraffinen. Selbst die durch Butyl substituierten Aromaten verhalten sich eigentlich ganz günstig, obwohl diese langen Ketten bei den Paraffinen nicht günstig sind; noch auffälliger finde ich dasselbe bei den Äthern. Aus den Angaben von Egloff [1]) ergeben sich noch beim Butyl-tert. Butyläther und beim n-Amyl-tert. Butyläther recht hohe Oktanzahlen, während der Diäthyläther eine ganz schlechte Oktanzahl hat. Bei den Äthern ist das noch schwerer verständlich. Bei den Aromaten verdient vielleicht erwähnt zu werden, daß nach der Doppelbindungsregel und ebenso nach direkten Versuchen die Seitenkette sowohl bei der Oxydation wie bei anderen Reaktionen in der α-Stellung angegriffen wird, also an dem Kohlenstoffatom, das dem Benzolring zunächst liegt. Das deutet darauf hin, daß die lange Kette nicht vom Ende her abgebaut wird, sondern von der Wurzel her, daß daher eine Ähnlichkeit in der Kinetik der Oxydation mit den verzweigten Paraffinen bestehen könnte; im einzelnen ist das natürlich noch unklar.

Pier: Zu dieser Vorstellung neigen wir auch.

Lorenz: In letzter Zeit sind aus den Vereinigten Staaten Mitteilungen über beträchtliche Leistungssteigerungen bei Verwendung von Triptan bekannt geworden. Herr Pier hat denselben Stoff in seiner Aufstellung erwähnt. Es sollen in USA. bereits eingehendere Motorversuche hiermit vorgenommen worden sein. Ist über diese Versuche etwas Genaueres zu erfahren?

[1]) G. Egloff, J. Inst. Petroleum Technologists 23 (1937) 645.

6

Pier: Nein. Wir sind dabei, auch mit diesem Stoff Versuche zu machen, wie ich bereits angedeutet habe. Man wird offensichtlich noch mehr derartige Kohlenwasserstoffe finden und besonders in Amerika aus Krackgasen noch neue Stoffe herstellen.

v. Philippovich: In den Tabellen, die von den Amerikanern über die höchste zulässige Verdichtung herausgegeben worden sind, war als Grenzwert für Isooktan ein Verdichtungsverhältnis von 7,2 angegeben, für das unverbleite Triptan von 11; für das Isooktan war für 1 ccm Bleizusatz je Gallone eine Steigerung des Verdichtungsverhältnisses um 2,1 angegeben; für das Triptan mit Bleizusatz war nichts angegeben. Demnach wären tatsächlich die genannten Leistungssteigerungen durchaus möglich. Ich weiß nur nicht, welche Motoren solche Kraftstoffe ausnützen sollen, denn die vorhandenen können schon mit dem Kraftstoff von der O. Z. 100 nicht mehr weiter hochgetrieben werden.

Pier: Wenn man einen Hochleistungskraftstoff von einer bestimmten Qualität herstellen will, ist natürlich zu prüfen, ob es zweckmäßig ist, das gesamte Ausgangsprodukt unmittelbar auf eine bestimmte Qualität zu verarbeiten oder ob man besser eine kleinere Menge Kraftstoff von höherer Qualität erzeugt und die gewünschte Oktanzahl durch Mischen einstellt. Einige Aromaten erhöhen gerade in geringer Konzentration die Klopffestigkeit des Kraftstoffgemisches besonders stark.

6

SAFETY FILM

03375

Selbstzündung von Brennstoff-Luftgemischen durch adiabatische Verdichtung und Klopfverhalten im Motor

von Wilhelm Jost

03376

Selbstzündung von Brennstoff-Luftgemischen durch adiabatische Verdichtung und Klopfverhalten im Motor

Von Wilhelm Jost

Seit das letzte Mal über unsere Untersuchungen berichtet worden ist, war es hauptsächlich unser Ziel gewesen, diese im Hinblick auf unmittelbare Vergleichsmöglichkeit mit dem Motor auszubauen. Infolge Mitarbeitermangel und Lieferschwierigkeiten konnten diese Versuche bisher nicht in Angriff genommen werden. Jedoch gelang es, die bisherige Apparatur so zu verbessern, daß damit Messungen über die Wirksamkeit von Zusätzen ausgeführt werden konnten, über die ich heute berichten will. Ferner soll über einige Betrachtungen berichtet werden, die über den Zusammenhang zwischen Selbstzündungsverhalten bei adiabatischer Verdichtung und Klopfverhalten im Motor angestellt worden sind.

1. Versuche mit Zusätzen

Die Versuche wurden mit der früher beschriebenen Apparatur von Herrn Rögener ausgeführt, wobei lediglich eine Reihe von Verbesserungen im einzelnen angebracht waren, die die Reproduzierbarkeit der Messungen wesentlich erhöhten. Als Bezugsstoff diente bisher ausschließlich n-Heptan, als Zusätze wurden $Pb(Aeth)_4$, $Fe(CO)_5$, Anilin, Amylnitrit, Aethylnitrat, Acetonperoxyd verwandt. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

An den Versuchen ist folgendes hervorzuheben:

Die Zusätze wirken im allgemeinen wie erwartet, jedoch hat Bleitetraäthyl nur einen sehr geringen, in höherer Konzentration sogar nicht feststellbaren Einfluß; dabei sind die Zusätze von $Fe(CO)_5$ und $Pb(Aeth)_4$ höher als sie in der Praxis in Frage kommen.

Daß n-Heptan nur eine sehr geringe Bleiempfindlichkeit hat, ist vom Motor her bekannt; es ist aber sehr auffallend, daß der Einfluß wesentlich geringer ist als der von Anilin (bei Durchschnittsbenzinen wirkt Blei

6

03377

etwa 100 mal, Eisen 50 mal stärker als Anilin). Sofern nicht das Pb aus unserem Gemisch von dem Schmiermittel heraus absorbiert war, was noch besonders kontrolliert werden wird, obwohl es sehr unwahrscheinlich ist, so dürfte folgende Deutung vorzuschlagen sein:

Einfluß von Zusätzen auf die Induktionszeit bei der Selbstzündung von Brennstoff-Luft-Gemischen

Brennstoff	Zusatz	Temperatur*) $\sim^{\circ}$ abs.	Induktionszeit*) 10^{-3} sec.
n-Heptan	—	675,3	5,8
n-Heptan	5 Volumenprozent Amylnitrit	674,0	2,8
n-Heptan	—	674,0	3,9
n-Heptan	4 Volumenprozent Aethylnitrat	673,3	0,59
n-Heptan	—	672,8	5,2
n-Heptan	Acetonperoxyd	674,0	1,05
n-Heptan	—	695,8	2,7
n-Heptan	4 Volumenprozent Anilin	695,0	4,8
n-Heptan	—	696,4	3,0
n-Heptan	4,3 Volumenprozent Anilin	697,2	7,6
n-Heptan	—	710,6	2,8
n-Heptan	3 Volumenprozent Eisenkarbonyl	709,5	4,6
n-Heptan	—	716,5	1,15
n-Heptan	1 Volumenprozent Bleitetraäthyl	712,7	1,6
n-Heptan	—	694,0	2,6
n-Heptan	3 Volumenprozent Bleitetraäthyl	694,6	2,5

*) Jeweils Mittelwerte aus mehreren Einzelversuchen

Es ist bekannt, daß $Pb(Aeth)_4$ nur wirkt, wenn es in Gegenwart von Luftsauerstoff zerfallen ist. Bei den Versuchen mit Heptan sind die Versuchsbedingungen sehr milde, so daß diese notwendige Vorreaktion vielleicht noch nicht stattgefunden hatte. Sonst wäre noch in Betracht zu ziehen, daß Bleitetraäthyl, wie an sich bekannt, unter Bildung freier Radikale zerfällt und daß es Bedingungen geben könnte, wo diese freien Radikale das Klopfen induzieren. Auffallend ist weiter, daß Anilin etwa ebenso stark wirkt wie Eisenkarbonyl.

6

03378

Die Proklopfmittel wirken etwa ebenso stark klopffördernd, wie die Antiklopfmittel klopfenunterdrückend. Bemerkenswert ist die gute Wirkung von Acetonperoxyd und die starke Wirkung von Äthylnitrat. Acetonperoxyd ist nicht der Typ von Peroxyd mit einfacher O_2-Brücke, wie es normalerweise als wirksam gilt.

Diese Versuche werden fortgesetzt werden, und zwar sollen einerseits eine größere Zahl typischer reiner Stoffe, anderseits eine Zahl von Zusätzen unter variierten Bedingungen untersucht werden, wobei Anfangstemperatur, Druck und Verdichtungsverhältnis geändert werden sollen.

2. Beziehungen zum Klopfen im Motor

Daß sich aus dem Selbstzündungsverhalten das Klopfverhalten ableiten läßt, ist bereits früher gezeigt worden. Von theoretischem Interesse und von praktischer Wichtigkeit ist es, darüber hinaus zu verstehen, wie sich das Klopfen bei Variation der Motorbedingungen ändern muß (Überladung, Temperaturänderung, Gemischänderung usw.).

Qualitativ folgt aus einer Reihe von Beobachtungen (z. B. der Möglichkeit der Leistungssteigerung bei Ersetzen eines Gußeisenzylinderkopfes durch Alpax u. a.), daß die Temperaturerhöhung bei Überladung die wesentlichste Ursache des Klopfens ist. Für einen quantitativen Anschluß der Selbstzündungsmessungen an das Verhalten im Motor wäre genaue Kenntnis der Temperaturen im Unverbrannten im Motor erforderlich, von der wir heute noch weit entfernt sind. Ohne die Mitarbeit des Motorfachmanns sind hier auch nicht genügend genaue Angaben zu erwarten. Wenn wir hier einige Überlegungen mitteilen, die unter Verwertung bekannt gewordener Messungen am Motor angestellt worden sind, so geschieht das:

1. um zu zeigen, daß die Ergebnisse wenigstens größenordnungsmäßig mit den Erwartungen übereinstimmen;
2. um die Anregung zu weiteren Messungen am Motor zu geben, die für das Verständnis des Klopfverhaltens von größter Wichtigkeit sind.

Einen ersten Versuch in dieser Richtung stellen die folgenden Überlegungen meines Assistenten Rögener dar.

6

03379

Der Einfluß des Wärmeüberganges auf den Verbrennungsablauf im Motor

Problem: Überladung und Klopfneigung

Es ist eine bekannte Erfahrung aus dem praktischen Motorbetrieb, daß die Klopfneigung mit der Überladung sehr stark zunimmt. Diese Abhängigkeit der Selbstzündung vom Anfangsdruck ist bedeutend stärker als die übliche Druckabhängigkeit einer chemischen Gasreaktion. Es liegt daher die Annahme nahe, daß die durch Überladung hervorgerufene Erhöhung der Klopfneigung auf eine Temperaturerhöhung im unverbrannten Restgemisch zurückzuführen ist. Diese Temperaturerhöhung kann herrühren von einer vermehrten Wärmeübertragung von den Zylinder- und Kolbenwänden auf das Frischgas. Die Wärmeübertragung ihrerseits ist abhängig von den Zylinderwandtemperaturen, und diese müssen naturgemäß mit steigender Überladung anwachsen.

Lösungsversuch:

I. Erhöhung der Zylinderwandtemperatur bei Erhöhung der Belastung eines Motors.

Aus einer experimentellen Arbeit[1]) entnehmen wir, daß die Temperatur des Zylinderkopfes etwa um 17% ansteigt bei Erhöhung der Belastung auf das Doppelte $\left(\frac{\Delta L}{L} = 1\right)$.

II. Wärmeübertragung

Aus derselben Arbeit ergibt sich eine Wärmeübertragungszahl $\alpha = 5 \cdot 10^2 W_t \frac{\text{cal}}{°\text{C} \cdot \text{min}}$; dabei ist W_t die pro min. durch den Motor strömende Frischgasmenge.

Damit errechnet sich eine Temperaturerhöhung des Frischgases durch Wärmezuleitung von:

$$\Delta T_f = 0{,}2 \cdot (T_W - T_f)$$

T_f = Frischgastemperatur
T_W = Wandtemperatur.

Bei Belastungsverdoppelung steigt die Wandtemperatur um 17%; damit die Frischgastemperatur um:

$$\delta(\Delta T_f) = 0{,}2 \cdot \delta(T_W) = 0{,}2 \cdot 0{,}17 \cdot 422° = 14{,}3°$$

$\overline{T}_W = 422°$ abs. gesetzt.

[1]) B. Pinkel: Heat transfer process in air-cooled engine cylinders. NACA Report Nr. 12.

6

03380

Diese Temperaturerhöhung von $\delta(\Delta T_f) = 14{,}3°$ infolge Überladung um den Faktor 2 gilt für das Frischgas vor Kompression; am Ende der Kompression durch Kolben und verbrannten Gemischanteil ergibt sich ungefähr der dreifache Wert, also rund 43°.

III. Eine Reihe von Arbeiten beschäftigen sich mit dem Zusammenhang zwischen Ansaugdichte und Ansaugtemperatur an der Klopfgrenze. Die in der Ansaugleitung gemessene Temperatur stimmt sicher nicht mit der Temperatur des Frischgases im Zylinder bei Kompressionsbeginn überein infolge der Wärmeübergänge.

Angenommen, die Frischgastemperatur T_1 sei um ΔT_1 erhöht, dann muß die mittlere Verbrennungsraumtemperatur mindestens um denselben absoluten Betrag erhöht sein, wie eine Abschätzung im einzelnen zeigt. Tatsächlich beobachtet man eine Erhöhung der Mitteltemperatur[1]) $\Delta \overline{T}$ um nur ∞ $^1/_4 \Delta T_1$.

Es ist naheliegend, anzunehmen, daß die tatsächlichen Unterschiede in der Ansaugtemperatur nur etwa $^1/_4$ der gemessenen Temperaturunterschiede betragen. Zum Beispiel wird bei Rothrock und Biermann eine Druckverdoppelung durch eine Erniedrigung der Ansaugtemperatur um nominell etwa 100° C kompensiert, tatsächlich also durch eine Erniedrigung um 25 °. Unsere obige Wärmeübergangsrechnung lieferte eine zu kompensierende Erwärmung um 14,3°. Beide Werte liegen also durchaus in derselben Größenordnung.

Die im vorangehenden besprochenen sind nicht alle Effekte, die sich auf die Temperatur auswirken (es kommen u. a. hinzu: Wirkung wechselnder Abgasverdünnung, Änderung der Dissoziation mit dem Druck usw.). Da an eine hinreichend genaue rechnerische Erfassung aller Einflüsse nicht zu denken ist, so müssen unmittelbare Messungen am Motor ergänzend hinzukommen; ohne die Mitarbeit des Motorfachmannes ist dabei nicht weiterzukommen. Man könnte nun hiergegen einwenden: Die exakte Erfassung der Temperaturen in einem Motor in Abhängigkeit von Überladung, Gemischvorwärmung und Zusammensetzung usw. stellt eine solche Riesenarbeit dar, daß es sinnlos ist, sie

[1]) Vgl. v. Philippovich, Zs. Elektrochem. 42 (1936).

6

03381

auszuführen; es ist dann einfacher, das Klopfverhalten selbst eines jeden Kraftstoffes in dem Motor unter vielfach variierten Bedingungen zu untersuchen... Demgegenüber ist zu sagen: Unser Ziel ist nur, daß an einem oder wenigen Motoren einmal diese Wärmefragen völlig geklärt werden, damit man ein eindeutiges Bild von dem Klopfvorgang erhält. Das weitere Ziel für eine praktische Anwendung muß es dann sein, einen beliebigen Motor mit einem oder mehreren Standardkraftstoffen zu »eichen« und daraus rückwärts auf die Temperaturverhältnisse des Motors zu schließen, wie es z. B. von v. Philippovich vorgeschlagen worden ist.

6

03382

Aussprache

v. Philippovich: Zur Frage der Wirkung des Bleies auf die Überladbarkeit von Kraftstoffen möchte ich darauf hinweisen, daß die Konzentration dabei eine ziemlich erhebliche Rolle spielt. Bei Fischer[1]) gemachte Versuche über die Selbstzündung von Dieselkraftstoff zeigten, daß Eisenkarbonyl und meiner Erinnerung nach auch Bleitetraäthyl in hoher Konzentration das Selbstzündungsverhalten in dem Sinne beeinflussen, daß die Zündung bei niedrigeren Temperaturen eintritt. Die Konzentration spielt also sicher eine erhebliche Rolle. Eisenkarbonyl ist ja pyrophor und fängt in Luft von selbst an zu brennen. Zum Einfluß der Verdampfungswärme auf die berechnete Kurve der Überladbarkeit möchte ich fragen, wieso dieser bei verzweigten Kohlenwasserstoffen so gering ist.

Jost: Dazu ist zu sagen: Man bekommt, wenn man nur diese einfachen physikalischen Faktoren berücksichtigt, die sich auf die Temperatur auswirken, schon eine Kurve, die der beobachteten Grenzkurve für Überladung in Abhängigkeit vom Luftüberschuß ähnlich ist; aber es müssen noch weitere spezifische Einflüsse vorhanden sein. Ob das nun reaktionskinetische oder irgendwelche indirekten Einflüsse sind, die mit dem Wärmeübergang zusammenhängen, kann man nicht sagen. Ich bestreite nicht, daß noch weitere Einflüsse bestehen, die die Feinheiten erklären, aber die Auswirkungen der Temperatur darf man keineswegs außer acht lassen.

F. A. F. Schmidt: In der DVL wurden auch vergleichende Untersuchungen der Vorgänge bei der Zündung in der Bombe, der Zündung adiabatisch komprimierter Gemische und der Zündung beim Klopfvorgang durchgeführt. Die motorischen Untersuchungen erstreckten sich speziell auf diejenigen Fragen, die Herr Jost besonders erwähnt hat, insbesondere wurde auf eine möglichst genaue Untersuchung der Wärmeübergangsverhältnisse und der Verbrennungsvorgänge im Motor großer Wert gelegt. Voraussetzung für die Auswertung der Motorversuche war eine möglichst große Genauigkeit der Druckmessung im Motorzylinder. Um die Richtigkeit der Indikatordiagramme zu prüfen, wurden zahlreiche Kontrollen durchgeführt, insbesondere Untersuchungen, die sich auf die Wärmebilanz des Auslaßvorganges beziehen. Im Rahmen dieser Untersuchung muß die Abgaswärme, die während des Auslaßvorganges geleistete Arbeit sowie der Zustand der Gase im Zylinder am Ende der Dehnung genau bestimmt werden. Diese Bilanzen sind sehr empfindlich gegen kleine Fehler im Indikatordiagramm, so daß sie eine wertvolle Kontrolle für die Richtigkeit der Druckmessungen bilden. An Hand der Diagramme wurden vor allem die Druck- und Temperaturänderungen im Zylinder bei Motorbetrieb ohne Zündung und annähernd für den unverbrannten Teil des Gemisches bei Betrieb mit Zündung untersucht. Eine wichtige Teiluntersuchung war die Bestimmung der Temperatur des unverbrannten Gemischteiles in Abhängigkeit von der Anfangstemperatur vor der Verdichtung. Obwohl die Bestimmung von Absolutwerten verhältnismäßig schwierig ist, ergibt sich ein guter Überblick über die Änderung der Zustandsgrößen bei Änderung der Be-

[1]) Hartner-Seberich u. Horn, Brennstoffchemie Bd 14 (1933) S. 141.

6

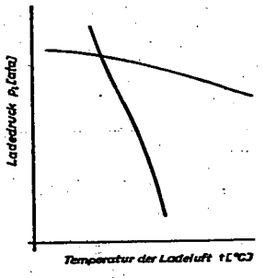
03383

triebsbedingungen des Motors. Aus den Untersuchungen konnte man z. B. schließen, daß die Endtemperatur des unverbrannten Gemisches durchaus nicht der Temperatur entspricht, die bei adiabatischer Verdichtung zu erwarten wäre. Die Endtemperatur wird mit zunehmender Temperatur bei Beginn der Verdichtung kleiner, als man auf Grund adiabatischer oder polytropischer Verdichtung mit konstanten Exponenten erwarten würde, und zwar wegen des höheren Wärmeüberganges.

Man kommt zu dem Ergebnis, daß durch die Veränderung der Wärmeübergangsverhältnisse mit dem Druck allein die Druckabhängigkeit der Klopfgrenzen nicht annähernd erklärt werden kann, daß also die Temperatur auch in erster Annäherung nicht allein bestimmend für die Vorgänge beim Klopfen sein kann. Es ist vielmehr auch die Druckabhängigkeit der Reaktionsvorgänge, die zwar zahlenmäßig viel geringer in Erscheinung tritt als die Temperaturabhängigkeit, von entscheidender Bedeutung.

Zur Erläuterung darf ich einige Kurven zeigen: Die Abszisse bedeutet die Temperatur der angesaugten Luft, die Ordinate den Druck der angesaugten Luft beim Motorbetrieb an der Klopfgrenze. Die beiden Kurven beziehen sich auf zwei verschiedene Kraftstoffe. Wäre der Druckeinfluß auf die Reaktion zu vernachlässigen,

Abb. 1



Klopfgrenzen zweier verschiedener Kraftstoffe

dann müßte die in diesen Kurven dargestellte Druckabhängigkeit der Klopfgrenzen im wesentlichen nur auf die Wärmeübergangsverhältnisse zurückzuführen sein. Diese Erklärung ist jedoch mit den obengenannten Versuchen über den Einfluß des Wärmeüberganges auf die Temperatur des unverbrannnten Gemischteiles nicht in Einklang zu bringen, da — wie schon erwähnt — die Einzeluntersuchungen der Wärmeübergangsverhältnisse zeigen, daß die dadurch bedingte Änderung des thermischen Zustandes des Motors und die damit zusammenhängende Änderung der Endtemperatur des unverbrannten Gemisches allein auch in erster Annäherung eine Überschneidung der Klopfgrenzen in der Form, wie sie hier dargestellt ist, nicht zur Folge haben kann. Es kommt dabei nicht nur auf den Absolutwert der mehr oder weniger starken Temperaturabhängigkeit der Reaktion an, sondern auch auf das Verhältnis des Faktors der Temperaturabhängigkeit zu dem Faktor der Druckabhängigkeit. Es scheint möglich, daß der Druckeinfluß auf die chemische Reaktion im höheren Temperaturbereich

6

03384

größer ist als bei geringeren Temperaturen. Möglicherweise kann also ein Teil der Unklarheiten dadurch bedingt sein, daß die für die motorischen Vorgänge maßgebenden Temperaturen des unverbrannten Gemischteiles im Durchschnitt höher liegen als die Temperaturen, die bisher den physikalischen Untersuchungen zugrunde gelegt wurden. Aus den motorischen Untersuchungen ergibt sich, daß eine Vernachlässigung der Druckabhängigkeit der chemischen Vorgänge auch in grober Annäherung nicht zulässig erscheint.

E. Schmidt: Wurden die Versuche mit Einspritzmotoren oder mit Vergasermotoren ausgeführt?

F. A. F. Schmidt: Die Versuche wurden mit Einspritzung durchgeführt, es wurde jedoch untersucht, wie sich das Klopfverhalten an demselben Motor ändert, wenn man anstatt mit Einspritzung mit Vergaser arbeitet. Es hat sich herausgestellt, daß kein grundsätzlicher Unterschied im Klopfverhalten auftritt. Die Veränderung der Klopfgrenzen bleibt in allen ihren wesentlichen Abhängigkeiten dieselbe. Es ergibt sich lediglich eine Verschiebung der Klopfgrenzen, die hauptsächlich durch den Einfluß der Verdampfungswärme erklärt werden kann. In dem einen Fall erfolgt die Verdampfung im Vergaser, in dem anderen Fall erst nach der Einspritzung im Zylinder, so daß bei Einspritzung die Temperatur des Gemisches im Zylinder geringer wird, wenn man die gleiche Temperatur vor dem Einlaßventil zugrunde legt.

Das Klopfverhalten läßt sich jedoch sehr stark verändern, wenn man die Klopfreaktion im Zylinder selbst durch den Verdampfungsvorgang beeinflußt. Besonders wirkungsvoll ist eine Gemischschichtung, die zu einer starken Brennstoffanreicherung in dem Bereich des Zylinders führt, in dem das Gemisch zum Klopfen neigt, weil dadurch die Temperatur in diesem Gebiete gesenkt wird. Zu diesem Zweck wurde eine zeitliche Aufteilung der Einspritzung in zwei Teile durchgeführt, so daß im ersten Teil der Einspritzung mageres Gemisch und im zweiten Teil der Einspritzung örtlich reiches Gemisch hergestellt wurde. Der erste Teil des Gemisches neigt deshalb nicht zum Klopfen, weil der durchschnittliche Luftüberschuß zu hoch ist; für den zweiten Teil des Gemisches ist die Klopfneigung gering, weil die Zeit für die Gemischbildung sehr kurz ist. Mit dieser Methode konnten die Klopfgrenzen eines untersuchten Motors so verändert werden, daß die Dauerleistung dieses Motors um 25 v. H. erhöht werden konnte.

Es sei noch hinzugefügt, daß im Motor und in der Bombe Untersuchungen mit demselben Kraftstoff mit und ohne Bleitetraäthyl durchgeführt wurden, die gezeigt haben, daß sich der Zusatz von Bleitetraäthyl in beiden Fällen in gleicher Richtung und Größenordnung ausgewirkt hat.

Damköhler: Die Induktionszeiten, die Sie bei Ihrer adiabatischen Verdichtung hatten, waren von der Größenordnung $^1/_{100}$ sec, im Motor liegen sie bei $^1/_{1000}$ sec. Wie das Bleitetraäthyl wirkt, wissen wir heute noch nicht. Man kann aber einmal überschlagen, was geschieht, wenn das Gas $^1/_{1000}$ sec lang auf 400 oder 500° gehalten wird, wie es kurz vor dem Klopfstoß der Fall ist. In dieser Zeit nehmen bestimmt irgendwelche aktiven Teilchen, die den Verbrennungsmechanismus beeinflussen, an Zahl zu. Das ist ja der Sinn einer jeden Induktionsperiode. Aber was geschieht im einzelnen? Man könnte denken, eine C-C-Bindung wird gespalten; dazu brauchte man je Bindungsäquivalent ungefähr 75 kcal, und man kann für diese monomolekulare Startreaktion

6

03385

ausrechnen, wieviel an Radikalen in $^1/_{100}$ sec gebildet wird. Man kann ferner diesem Brennstoff Bleitetraäthyl zusetzen und weiß auch, wieviel davon in $^1/_{1000}$ sec in Blei und CH_3-Radikale zerfällt. Aus diesen bekannten Dingen ergibt sich die interessante Feststellung, daß die Zahl der aus dem Bleitetraäthyl in $^1/_{1000}$ sec gebildeten Radikale um einige Zehnerpotenzen größer ist als die Zahl der Radikale, die durch Spaltung des Kohlenwasserstoffes selbst entstehen. Man fragt sich also: Warum wirkt das Bleitetraäthyl als Antiklopfmittel, wenn es wesentlich mehr Radikale liefert, als schon ohnehin da sind. Da ist also noch vieles nicht recht verständlich. Man kann natürlich sagen, es entsteht gleichzeitig ein Bleinebel, und dieser wirkt katalytisch, und vielleicht ist das auch der Grund, daß die Bleiatome und alle metallorganischen Antiklopfmittel um 1 bis 2 Zehnerpotenzen wirksamer sind als die organischen, wie Anilin usw. Jedenfalls ist mir bisher kein anderes organisches Antiklopfmittel bekannt, dessen Wirkung von derselben Größenordnung ist, wie die von metallorganischen Antiklopfmitteln. Trotzdem ist es merkwürdig, daß die Zahl der aus dem Bleitetraäthyl entstehenden Radikale größer ist als die Zahl der in derselben Zeit aus dem Kohlenwasserstoff gebildeten. Man fragt sich dann: Ist es nicht für die Induktionsperiode entscheidend, daß in dieser Zeit der Sauerstoff schon direkt am Kohlenwasserstoffmolekül irgendwie angreift und dabei meinetwegen über Hydroperoxyde usw. Stoffe entstehen, die in Radikale übergehen. Dieser Gedanke auf eine einfache bimolekulare Reaktion übertragen — z. B. Kohlenwasserstoff + Sauerstoff → Alkylhydroperoxyd mit der nicht unwahrscheinlichen Aktivierungswärme von 40 bis 50 kcal — ergibt, daß die Zahl der gebildeten Hydroperoxyde größer ist als die Zahl der Radikale, die in der Induktionsperiode aus dem Kohlenwasserstoff primär durch Zerreißen einer C-C-Bindung entstehen. Deshalb glaube ich, daß der Einfluß der unmittelbaren Reaktion zwischen Sauerstoff und Kohlenwasserstoff in der Induktionsperiode nicht zu vernachlässigen ist und daß zu untersuchen ist, wo das Bleitetraäthyl angreift. Fängt es Radikale weg oder greift es Hydroperoxyde an, aus denen erst nachher Radikale entstehen würden? Dies ist heute noch völlig ungeklärt. Deshalb haben wir, wie ich in meinem Vortrag ausführen werde, eine Apparatur entwickelt, mit der man systematisch schnell verlaufende homogene Gasreaktionen untersuchen kann.

Jost: Mit dem, was Herr Damköhler gesagt hat, bin ich ganz einverstanden; den Primärprozeß bei der Oxydation kennt man noch nicht; der Sauerstoff muß dabei aber eine entscheidende Rolle spielen. Hinsichtlich der Bleiwirkung möchte ich ohne eigene Stellungnahme darauf hinweisen, daß nach Egerton Blei nur wirksam ist, wenn Sauerstoff dabei ist. Also es könnte der entscheidende Einfluß des Sauerstoffs auch bei dem Blei liegen und nicht bei dem Kohlenwasserstoff. Ich möchte nicht sagen, daß es so sein muß, aber man muß das bedenken.

Dann zu unseren Messungen und zu dem, was Herr F. A. F. Schmidt über die Bleiwirkung sagte. Diese Bleiwirkung im verkehrten Sinne erwarten wir ja nur unter Bedingungen, wie sie beim Heptan vorliegen, d. h. bei niederen Oktanzahlen und vielleicht nur bei verhältnismäßig langen Induktionszeiten. Wenn wir an Isooktan messen würden (was tatsächlich früher schon geschehen ist) oder einem anderen Kohlenwasserstoff mit höherer Oktanzahl, dann würden wir zumindestens qualitativ dieselbe Erhöhung des kritischen Kompressionsverhältnisses durch Blei finden wie im Motor. Bei Isooktan haben wir das schon gesehen, und es besteht kaum ein Zweifel, daß es

6

03386

bei anderen Stoffen nicht anders ist. Das hängt beim Heptan bestimmt mit den milden Versuchsbedingungen zusammen, bei denen es untersucht worden ist, es könnte auch wieder mit den Einflüssen zusammenhängen, auf die Herr Damköhler hingewiesen hat. Wegen des Einflusses der Temperatur auf die Klopfreaktion und der Möglichkeit der Deutung, die von Herrn F. A. F. Schmidt anders aufgefaßt wird, möchte ich auf folgendes hinweisen: Daß die Neigung seiner beiden Kurven für zwei Stoffe sehr verschieden stark herauskommt, scheint nicht so verwunderlich, denn die Aktivierungswärme der verschiedenen Stoffe ist ja sehr verschieden, bei Benzol und Aromaten in der Größenordnung bis etwa 60 kcal und bei Paraffinen in der Gegend von 40 kcal und darunter; das gibt eine sehr verschieden starke Neigung. Die Schwierigkeit, die Temperaturen im Motor zu erfassen, besteht, wenigstens soweit wir die veröffentlichten Versuche von Herrn F. A. F. Schmidt beurteilen können, darin, daß man erstens die Temperatur aus indiziertem Druck und der Gemischansaugtemperatur nicht berechnen kann, solange man nicht den Wärmeübergang während der Ansaugperiode mit erfaßt. Dabei kann man aus den indizierten Drucken allein nicht genau übersehen, wie sich die Temperatur ändert; das ist die eine Schwierigkeit. Wir haben unter etwas anderen Voraussetzungen die vor einem Jahr veröffentlichten Werte von Herrn Schmidt ausgewertet, und wir bekommen damit etwa das Gegenteil von dem heraus, was er angibt. Eine einwandfreie Auswertung ist nicht einfach, es liegen noch zu wenig absolute Messungen vor, als daß man daraus eine Endtemperatur mit Sicherheit ausrechnen könnte. Das zweite ist, und darin liegt der Hauptteil der Schwierigkeiten: Es kommt ja gar nicht auf die Endtemperatur des gesamten Gemisches an, sondern auf die Endtemperatur des klopfenden Gemischanteiles, und dieser liegt wahrscheinlich in Wandnähe. Es wirken sich auf ihn die Wärmeübergänge stärker aus als auf das Ganze. Wir haben mit Herrn von Philippovich Versuche besprochen, die ebenfalls aus den indizierten Drucken unter variierten Bedingungen die Temperaturen ergeben sollen. Dabei zeigt sich, daß man ungeheuer hohe Anforderungen an die Genauigkeit des Druckindizierens stellen muß. Denn wenn in dem klopfenden Anteil 5 % des Wärmeinhaltes abgeleitet werden, und es klopfen im ganzen nur 10 % des Gemisches, dann sind nur 0,5 % des Wärmeinhaltes dem Gesamtgemisch entzogen, was sich nur sehr schwach auf den indizierten Druck auswirkt. Es ist natürlich nicht zu bezweifeln, daß auch die chemische Reaktion vom Druck abhängig ist und von der Gemischzusammensetzung. Es sprechen nur alle Versuche und gerade die Versuche der Motorenbauer dafür, daß der Einfluß der Temperatur meist überwiegt. Wenn man durch Ersetzen eines Zylinderkopfes aus Gußeisen durch einen aus Alpax die Leistung um 20 bis 50 % steigern kann, dann ist damit bestimmt kein direkter Einfluß auf die chemische Reaktion ausgeübt worden (was innen im Motor vorgeht, ist unabhängig von der Wand; Überzüge von Kupfer, Aluminium u. a. waren ohne Wirkung), sondern es ist ausschließlich die Wärmeabfuhr verbessert worden. Wenn es überhaupt gelungen ist, in der letzten Zeit durch konstruktive Maßnahmen beim gleichen Treibstoff das erreichbare Kompressionsverhältnis oder die Überladung zu steigern, dann wurde nicht die Reaktion geändert, sondern es muß nur dem Motorenbauer gelungen sein, die Temperaturen an den entscheidenden Stellen zu senken. Wenn man die motorischen Erfahrungen durchsieht, dann gibt es eine ungeheure Menge von qualitativem Beweismaterial, das auf den weitaus überwiegenden Einfluß der Temperatur hindeutet. Wenn man die

6

03387

chemische Reaktion erfassen will, muß man alle anderen Einflüsse mit Sicherheit ausschalten. Aber, wie gesagt, beim Motor selbst ist das alles ohne Mitwirkung des Motorenbauers, der die Temperatur in dem letzten unverbrannten Teil des Gemisches direkt oder indirekt ermitteln müßte, nicht zu erzielen.

Lindner: Wenn man die Zündverzugsmessungen als maßgebende Grundlage für die Beurteilung des Klopfvorganges im Motor anerkennt, so bleibt nach meiner Ansicht nur noch die starke Druckabhängigkeit des Zündverzuges bei Bombenversuchen nicht ausreichend geklärt. Selbst an einem Einspritzmotor durchgeführte Versuche, bei denen der Motor immer stärker gekühlt wurde, haben gezeigt, daß der Zündverzug trotz der stärkeren Kühlung abnahm. Hieraus mußte geschlossen werden, daß lediglich die Erhöhung der Dichte und damit die Erhöhung des Druckes für die Abnahme des Zündverzuges maßgebend war, denn bei besserer Kühlung wird der Liefergrad des Motors, d. h. das Luftgewicht während der Verdichtung erhöht. Ebenso konnte bei zahlreichen Bombenversuchen eine eindeutige Abhängigkeit des Zündverzuges vom Druck erhalten werden, wenn die Anfangsbedingungen hinsichtlich Druck und Temperatur einwandfrei eingestellt wurden. Die Versuche mit Dieselkraftstoffen zeigen eine recht beträchtliche Abhängigkeit vom Druck, und der Dieselmotorenbauer ist gewohnt, den Einfluß der Dichte zu berücksichtigen.

Versuche, die in der gleichen Versuchsbombe mit Leichtkraftstoffen vorgenommen wurden, ergaben im Bereiche höherer Temperaturen eine etwas geringere Druckabhängigkeit. Dabei zeigte es sich, daß die Zündverzugstemperatur-Kurven in diesem Gebiete höherer Temperaturen recht erheblich von dem gewohnten logarithmischen Verlauf abweichen. Die Ursache dieser Abweichungen ist zunächst nicht geklärt. Sie im Verdampfungsvorgang zu suchen, erscheint gerade bei den leichtsiedenden Kraftstoffen kaum berechtigt. Es bleibt dann nur die Erklärung übrig, daß sich im Gebiete höherer Temperaturen der Reaktionsverlauf ändert, womit vielleicht eine geringere Druckabhängigkeit zusammenhängen kann.

Die Festlegung der Temperaturverhältnisse eines gegebenen Motors während der Kompression, die für den Klopfvorgang maßgebend ist, erscheint mir sehr schwierig, wenn eine befriedigende zahlenmäßige Bewertung gefunden werden soll. Bei dem von Herrn F. A. F. Schmidt eingeschlagenen Weg, der von der Abgaswärme ausgeht, sehe ich insofern Nachteile, als zwischen den hier zu beurteilenden Zuständen während der Verdichtung und dem Endszustand im Auspuff die große Verbrennungswärme frei wird, die es sehr erschweren wird, beim Rückwärtsverfolgen der einzelnen Vorgänge die bei der Kompression maßgebenden Temperatureinflüsse einwandfrei zu erfassen. Ich glaube, daß hier der bereits von Herrn Jost vorgeschlagene Weg besser zum Ziele führen wird, der von den Einflüssen, die den Temperaturzustand während der Verdichtung bestimmen, ausgeht. Leider sind hier unsere Kenntnisse, vor allem soweit sie die Wärmeübergangsverhältnisse im Zylinder betreffen, heute noch sehr lückenhaft.

Den am nächsten liegenden Weg sehe ich daher z. Zt. in Vergleichsversuchen an verschiedenartigen Motoren und auch an Zündversuchsapparaturen mit den gleichen Kraftstoffproben, wobei man die einzelnen für den Temperaturzustand maßgebenden Einflüsse herauszuschälen versucht, um daraus Unterlagen für die Wärmeübergangsverhältnisse der Motoren zu erhalten.

6

TABLES 03388

F. A. F. Schmidt: Ich bin insofern falsch verstanden worden, als meine Angaben über die Untersuchung des Auslaßvorganges in direkten Zusammenhang mit den Untersuchungen des Klopfvorganges gebracht wurden. Der Auslaßvorgang hat natürlich mit dem Klopfvorgang unmittelbar nichts zu tun. Meine Bemerkungen sollten nur zeigen, daß die Untersuchung des Auslaßvorganges eine gute Kontrolle dafür liefert, ob es gelingt, die Druckänderung beim motorischen Vorgang durch Indizieren genau zu erfassen. Es ist natürlich nicht möglich, den Temperaturzustand des unverbrannten Gemisches mit voller Genauigkeit zu erfassen. Man kann jedoch unter Berücksichtigung von Meßwerten über den Einfluß des Wärmeüberganges die Temperatur des Unverbrannten annähernd bestimmen und auch die Grenzen der Bereiche, in denen die Temperaturen liegen können, abschätzen. Da die Fehler bei verschiedenen Betriebszuständen ähnlich sind, ergeben sich gute relative Vergleichsmöglichkeiten. Wenn auch die Absolutwerte der mittleren Temperatur nicht genau stimmen, ergeben sich dennoch aus den Auswertungen der Motorenversuche bei verschiedenen Klopfgrenzen und verschiedenen Kraftstoffen Vergleiche mit den aus Bombenversuchen gewonnenen Kennzahlen für die Temperatur- und Druckabhängigkeit.

Ich möchte nochmals auf den Schnittpunkt der beiden gezeigten Kurven hinweisen. Betrachtet man eine bestimmte Anfangstemperatur des Gemisches vor dem Motor, dann kann man die Endtemperatur der Verdichtung und auch die Temperatur des Unverbrannten während des Fortschreitens der Flammenfront in erster Annäherung unter Berücksichtigung der Verdampfungswärmen und der Wärmeübergangsverhältnisse im Motor bestimmen. Auch durch den Verbrennungsvorgang wird natürlich wegen der Strahlung die Temperatur des Unverbrannten beeinflußt. Man ist damit durchaus in der Lage, die thermischen Einflüsse so weit abzuschätzen und einzugrenzen, um festzustellen, daß der Verlauf der gemessenen Kurven nicht zu erklären ist, wenn man als Annäherung die Druckabhängigkeit der Reaktionsvorgänge nicht in die Betrachtung einbezieht.

Jost: Ich glaube, das ist zu verwickelt, als daß man das hier alles diskutieren sollte. Aber wenn Herr F. A. F. Schmidt selbst sagt, daß so komplexe Einflüsse maßgebend sind, sehe ich nicht ein, warum z. B. die beiden Kurven sich nicht auch schneiden sollten. Insbesondere die Verbrennungswärme ist ein Einfluß, den man auf keinen Fall vernachlässigen kann; für das Klopfen ist ja entscheidend gerade die Kompression durch die fortschreitende Flamme vom Beginn der Zündung bis zu dem Zeitpunkt des Klopfens. Denn ich möchte immer wieder betonen, eine Oktanzahl entspricht ungefähr 1 bis 2° Temperaturunterschied. Man braucht, um irgendeine Überschneidung zu bekommen, nicht Temperatureffekte von 50 oder 100°, sondern vielleicht nur von 5 bis 10°. Das kann man aus dem Indikatordiagramm niemals sicher erkennen; insbesondere wenn es sich nicht um 5 oder 10° Temperaturänderung des gesamten Unverbrannten handelt, sondern nur des Teiles von 10 oder 20 %, der klopft. Das ist nur ein kleiner Bruchteil. Dann möchte ich noch einmal die rein qualitativen Schlüsse hervorheben: Wenn es möglich ist durch Übergang von Gußeisen zu einem gut wärmeleitenden Material den mittleren nutzbaren Druck im Motor zu erhöhen, dann halte ich das für einen völlig schlüssigen Beweis dafür, daß etwas anderes als der

6

03389

Druck der maßgebende Faktor ist. Daraus muß man zwingend schließen, daß die chemische Reaktion viel schwächer druckabhängig ist, als man aus den Unterlagen der Versuche von F. A. F. Schmidt entnimmt.

Zu der Bemerkung von Herrn Lindner: Man muß natürlich bei allen Einspritzversuchen beim Dieselmotor immer berücksichtigen, daß es zündet in der Umgebung der Tröpfchen, die mindestens partiell verdampft sein müssen und daß die Verdampfungswärme das umgebende Gas abkühlt. Diese Abkühlung hängt ab von der Wärmekapazität der Raumeinheit des Gases. Je höher sein Druck, desto geringer wird also die Abkühlung in der Umgebung der Tröpfchen. Es sind Temperatureinfluß und Druckeinfluß schwer zu trennen. Daß auch eine chemische Reaktion irgendwo mitspielt, ist natürlich selbstverständlich. Aber der starke Druckeinfluß ist außerordentlich schwierig damit allein zu verstehen und besonders schwer unter den komplexen Beobachtungen am Motor selbst oder auch bei der Dieselzündung. Ich möchte nicht annehmen, daß bei unseren Messungen, wo wir wirklich sauber die chemischen Reaktionen messen, ein störender Einfluß vorliegt, während der ganz unübersehbare Motor ein gutes Mittel sein soll, um auf die chemische Reaktion zu schließen.

6

03390

Arbeiten des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen an der Technischen Hochschule Graz

von Hans List

03391

Arbeiten des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen an der Technischen Hochschule Graz

Von Hans List

Wir beschäftigen uns in Graz mit der Erforschung von Grundlagen für den Zweitaktmotor mit Benzineinspritzung.

Die Verhältnisse der Gemischbildung liegen hier wesentlich schwieriger wie beim Viertakteinspritzmotor, denn für die Gemischbildung steht nur kurze Zeit zur Verfügung. Sie darf erst nach Abschluß der Auslaßschlitze beginnen und sollte zu Beginn der Verbrennung beendet sein. Das gibt eine von der Schlitzhöhe abhängige Zeitspanne, die ungefähr 100 bis 120° Kurbelwinkel betragen kann.

Um die Zusammenhänge zwischen Einspritzung, Verdampfung und Verbrennung zunächst einmal losgelöst vom Motor zu untersuchen, wurde eine Bombenapparatur gebaut, die vorerst mit unveränderlichem Volumen des Misch- und Brennraumes arbeitet.

Es ist anzunehmen, daß die Mischung und Verdampfung außer vom Brennstoff von folgenden Bedingungen abhängt:

1. von den Einspritzverhältnissen, räumliche Verteilung des Brennstoffes (Düsenform, Lage der Düse, Einspritzgesetz),
2. von der Wirbelung der Verbrennungsluft,
3. von den Wandtemperaturen,
4. von der Zeitspanne zwischen Einspritzung und Zündung.

Es wurden daher an der Anlage alle diese Größen veränderbar gemacht, um ihren Einfluß untersuchen zu können.

Die Einspritzeinrichtung besteht aus einer Brennstoffpumpe, die durch eine vorgespannte Feder betätigt wird, aus Brennstoffleitung und der geschlossenen kühl- und heizbaren Brennstoffdüse. Die eingespritzte Brennstoffmenge kann durch ein Meßgefäß auf der Saugseite bestimmt werden.

Die Luftwirbelung wird dadurch erzeugt, daß die Verbrennungsluft mit erheblichem Überdruck durch Öffnungen in die zuerst evakuierte Bombe eintritt. Die Luft kann vorgeheizt, Beginn und Ende der Einströmung kann verändert werden.

6

03392

Wir haben die Versuche damit begonnen, daß wir die summarische Auswirkung des Mischungs- und Verdampfungsvorganges auf die Endprodukte der Verbrennung bei verschiedenen Verhältnissen untersuchten. Dazu wird das Gemisch nach der Einspritzung gezündet. Die Verbrennungsprodukte werden der Menge und der Art nach durch Gasanalysen und Volumbestimmung bei gemessenen Zustandsgrößen ermittelt. Das Volumen wird in einer Bürette bestimmt.

Die Versuche haben erst begonnen. Ich will hier nur auf das Wesentlichste der bisherigen Ergebnisse eingehen, aus denen sich einige Folgerungen ziehen lassen.

Aus der Kohlenstoff- und aus der Sauerstoffbilanz der Abgasanalyse läßt sich bestimmen:

1. der vollkommen verbrannte Brennstoff,
2. der nicht verbrannte Brennstoff,
3. die Produkte der unvollkommenen Verbrennung: CO, CH_4, H_2 und der als annähernd reiner Kohlenstöff angenommene Ruß.

Verändert man die Luftdichte und die Brennstoffmenge so, daß die Luftüberschußzahl $\lambda = 1$ bleibt, so ergibt z. B. Abbildung 1 für eine der untersuchten Düsen den Zusammenhang zwischen Luftdichte und den 3 Anteilen, ausgedrückt in Bruchteilen des Kohlenstoffes in ihnen.

Bei kleinen Luftdichten schlagen sich erhebliche Brennstoffmengen an der Wand nieder und werden der Verbrennung entzogen. Trotzdem sich die Verhältnisse durch Wahl geeigneter Düsen wahrscheinlich verbessern lassen, so kann doch gefolgert werden, daß beim Einspritzen in nicht verdichtete Luft Brennstoffverluste durch Niederschlag an der Wand im Motor schwer zu vermeiden sein werden. Daher kann man fragen, ob man nicht zweckmäßiger später und dann in stärker verdichtete Luft einspritzt. Dadurch werden die Wandverluste herabgesetzt, aber es wird infolge der Kürze der Zeit vor der Verbrennung wahrscheinlich keine vollkommene Mischung erreicht, so daß die Verbrennung ähnlich wie im Dieselmotor verläuft.

Betrachtet man die Zusammensetzung der Verbrennungsendprodukte für eine gleichbleibende größere Luftdichte von 6,5 kg/m³ bei Zündung nach Einspritzung, so erhält man z. B. für die gleiche Düse wie früher die Kohlenstoffbilanz nach Abbildung 2. Sie entspricht einer Verbrennung, die in ihrem Ablauf zwischen der Verbrennung im Dieselmotor und der Verbrennung im Ottomotor liegt.

6

03393

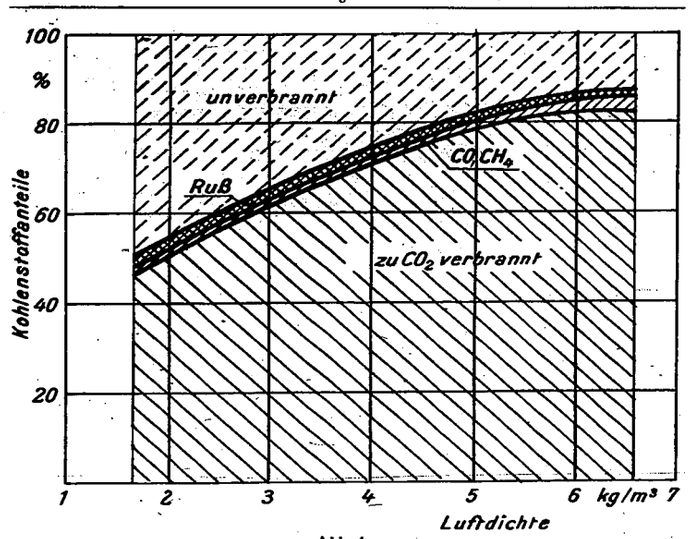


Abb. 1
Verteilung des Kohlenstoffes im Abgas bei verschiedener Luftdichte und theoretischer Luftmenge (Luftüberschußzahl 1). Viellochdüse mit 40 Bohrungen zu 0,2 mm ϕ

Bei der Verbrennung im Dieselmotor sind die Produkte der unvollständigen Verbrennung Ruß und nur ganz geringe Mengen CO. Bei der Verbrennung im Ottomotor treten im wesentlichen nur gasförmige Zwischenstufen der Verbrennung auf, wie CO, CH_4 und H_2.

Im Motor ist die Verbrennung mit Rußbildung aus betrieblichen Gründen unerwünscht, die Ausnützung des Sauerstoffes zur Wärmeerzeugung dabei jedoch besser als bei dem normalen Verbrennungsablauf im Ottomotor, denn es gibt 1 Nm^3 Luft mit H_2 verbrannt 1080 kcal, mit C zu CO_2 verbrannt 910 kcal, hingegen mit C zu CO verbrannt nur 556 kcal.

In bezug auf die Gemischbildung im Zweitaktottomotor mit Einspritzung ergeben sich aus diesen Zusammenhängen die folgenden Möglichkeiten:

6

03394

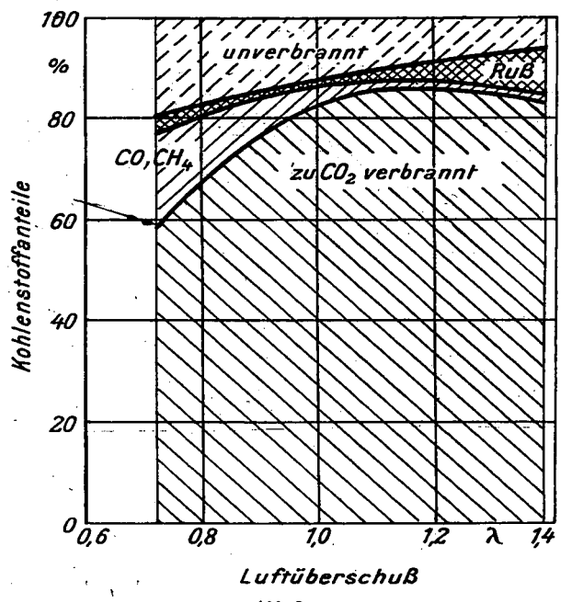


Abb. 2

Verteilung des Kohlenstoffes im Abgas in Abhängigkeit vom Luftüberschuß bei einer Luftdichte von 6,5 kg/m³. Viellochdüse mit 40 Bohrungen zu 0,2 mm ⌀

1. Wenn man vollkommene Mischung vor der Verbrennung, also reines Ottoverfahren anstrebt, so muß man zu Beginn der Verdichtung einspritzen, um genügend Zeit zur Gemischbildung zu haben. Die Luftdichte zur Zeit der Einspritzung ist dann gering, und es ist vor allem darauf zu achten, Einspritzverhältnisse herzustellen, bei denen das Durchschlagen des Brennstoffes an die Wand vermieden wird. Die dabei zu überwindenden Schwierigkeiten sind erheblich.

6

03395

Eine weitere Schwierigkeit liegt infolge der engen Zündgrenzen des Ottomotors in der Regelung. Drosselregelung ist schwer durchführbar, befriedigende Verhältnisse werden sich bei Teillasten, voraussichtlich nur durch Schichtung der Ladung schaffen lassen.

2. Bei einem zwischen dem Otto- und Dieselverfahren liegenden Ablauf von Mischung und Verbrennung kann später, also in bereits verdichtete Luft eingespritzt werden. Dadurch ist es leichter, das Durchschlagen des Brennstoffes an die Wand zu verhindern. Auch die Regelungsverhältnisse werden hier günstiger liegen, da eine Schichtung mit genügender Brennstoffkonzentration an der Zündkerze unmittelbar nach der Einspritzung leichter zu erreichen ist. Hier liegen die Schwierigkeiten in der Erzielung rußfreier Verbrennung bei geringen Luftüberschüssen, also hohen Mitteldrücken, im Motor. Zur Herbeiführung in dieser Beziehung befriedigender Verhältnisse ist es notwendig, zu untersuchen, wann bei der unvollkommenen Verbrennung gasförmige Produkte und wann Ruß auftritt. Es ist beabsichtigt, bei den Bombenversuchen auch diese Frage zu bearbeiten.

6

C3336

Aussprache

Lindner: Die Frage, unter welchen Bedingungen bei einem Verbrennungsvorgang Rußbildung auftritt, scheint im wesentlichen nur durch die Gemischzusammensetzung und damit durch die Gemischverteilung bestimmt zu sein. Bei sehr starkem Luftmangel ist stets mit Rußbildung zu rechnen. Wir haben Verbrennungsversuche in Bomben mit gasförmigen bzw. völlig verdampften Kohlenwasserstoffen und Luft durchgeführt und erhielten bei einer Luftunterschußzahl von 0,6 und darunter stets Ruß. Die gleiche Erscheinung tritt auch im Vergasermotor auf, nur arbeitet man hier im praktischen Betrieb nicht mit so großem Luftmangel. Im Bereiche kleinen Luftmangels tritt CO- und H_2-Bildung, in kleinen Mengen auch CH_4 in den Abgasen auf. Sobald Rußausfall erfolgt, nehmen die Gehalte an diesen Produkten der unvollkommenen Verbrennung rasch ab.

Der Dieselmotor wird praktisch stets im Luftüberschußgebiet betrieben. Nähert man sich bei hohen Belastungen der Luftüberschußzahl 1, so tritt um so leichter Rußausfall auf, je schlechter die Gemischverteilung ist, weil dann stets im Verbrennungsraum Zonen vorhanden sind, in denen erheblicher Luftmangel herrscht. Wahrscheinlich spielen hier auch Spaltvorgänge an unverdampften Tröpfchen eine wesentliche Rolle. Die CO-Bildung tritt damit beim Dieselmotor stark zurück, und die bisher gemessenen Werte liegen fast stets in der Größenordnung von Zehntel Prozenten. Dieser Vorteil des Dieselmotors, gesundheitsschädliche Abgase in nennenswerter Menge nicht zu liefern, wird besonders für Diesellokomotiven in Grubenbetrieben geschätzt. Gelingt es, bei sehr guter Zerstäubung gleichzeitig eine gleichmäßige Gemischverteilung zu verwirklichen, wie das bei einigen neueren raschlaufenden Fahrzeugdieselmotoren in letzter Zeit der Fall ist, dann nähert sich der Verbrennungsablauf immer mehr dem des Vergasermotors, und man erhält bei kleinen Luftüberschußzahlen, mit denen der Motor in diesem Falle noch betrieben werden kann, verhältnismäßig große Anteile an CO in den Abgasen.

Pier: Aber man beobachtet doch auch Rußbildung bei Luftüberschuß während des Klopfvorganges im Ottomotor.

Lindner: Rußbildung tritt auch auf, wenn die Kohlenwasserstofflamme mit kalten Wandungen in Berührung kommt.

E. Schmidt: Ich glaube, daß wir noch immer zu sehr die Vorstellung haben, daß die Verhältnisse im Zylinder selbst wirklich einheitlich sind. Beim Klopfvorgang müssen wir, um ihn überhaupt zu verstehen, genau unterscheiden zwischen den in gewöhnlicher Weise verbrannten Teilen des Gemisches und dem klopfend verbrennenden Gemischrest. Ich glaube aber, daß auch bei der nichtklopfenden Verbrennung im Motor infolge ungenügender Durchmischung Gasballen recht verschiedener Zustände nebeneinander vorhanden sind und abbrennen, so daß die einfache Betrachtung des durchschnittlichen Mittels nicht alle Erscheinungen erklären kann.

6

03397

List: Es ist doch merkwürdig, daß im Dieselmotor, in dem das Gemisch inhomogen ist, bei kleinem Luftüberschuß nur sehr kleine Mengen von CO von der Größenordnung einiger Zehntel Prozent auftreten. Man kann diesen Anteil weiter herabsetzen, wenn man den Druck (Verdichtung) steigert. Es ist ja bekannt, daß man bei Grubenlokomotiven, wo CO nicht in merklicher Menge auftreten darf, einfach durch erhöhte Verdichtung unter den in Gruben noch zulässigen Gehalt herunterkommt.

E. Schmidt: Kann vielleicht die höhere Verdichtung durch die Zufälligkeiten der Konstruktion eine bessere Verteilung der Tröpfchen auf den Raum zur Folge haben?

List: Es wäre unwahrscheinlich, daß das dann bei allen Maschinen auftritt trotz durchaus verschiedener Verfahren der Gemischbildung.

6

03398

Arbeiten aus dem Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig

von Ernst Schmidt

6

03399

Arbeiten aus dem Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig

Von Ernst Schmidt

Ich möchte hier einen kurzen Bericht über einige im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring auf dem Gebiet der Verbrennung in Angriff genommene Arbeiten geben. Dabei bitte ich zu berücksichtigen, daß wir als junges Institut uns für unsere Aufgaben erst das Handwerkszeug und die Versuchseinrichtungen schaffen mußten. Ich gehe zunächst auf Arbeiten zur Verbesserung der piezoelektrischen Druckmesser und der zugehörigen Verstärker und Anzeigegeräte ein, behandele dann Versuche über den Einfluß der Turbulenz auf die Verbrennungsgeschwindigkeit und zeige schließlich von uns entwickelte Meßeinrichtungen zur Aufnahme von Verbrennungserscheinungen in Fensterbomben im eigenen Licht und mit Hilfe von Schlierenaufnahmen.

1. Piezoelektrische Indikatoren hoher Eigenfrequenz

Das wichtigste Hilfsmittel zur Untersuchung des Verbrennungsvorganges in Motoren ist die Druckmessung. Wenn man dabei den Verlauf des Verbrennungsvorganges studieren will, muß die Druckmessung trägheitslos erfolgen, was am besten mit Piezoquarzen geschieht.

Untersuchungen an den zunächst beschafften handelsüblichen Geräten von Loewe, Zeiß und Nier zeigten aber, daß diese Geräte erhebliche Mängel aufweisen und nicht halten, was man von ihnen erwartet. Beide Geräte besitzen bereits bei Frequenzen von der Größenordnung 6000 Hz starke Resonanzgebiete, die keine formgerechte Aufnahme von Druckverläufen erlauben, die sich in kürzeren Zeiten abspielen. Nehmen wir, um runde Zahlen zu erhalten, in den heißen Gasen im Motorzylinder eine Schallgeschwindigkeit von 600 m/sec an, so entspricht die Frequenz 6000 Hz einer Wellenlänge von 10 cm, also gerade von der Größenordnung der Abmessungen des Verbrennungsraumes eines Zylinders. Wir

6

03400

können daher nicht erwarten, daß ein solches Meßgerät Vorgänge wie das Hinundherlaufen von Stoßwellen oder gar die steile Stoßwellenfront selbst auch nur einigermaßen formgerecht wiedergibt. Dazu bezieht sich die Eigenfrequenz von 6000 Hz nur auf das Meßgerät allein. Die handelsüblichen Formen brauchen aber noch einen Verbindungskanal, durch den die Verbrennungsgase auf das eigentliche Druckmeßgerät wirken. Für den Gasinhalt dieser Verbrennungsräume findet man Eigenschwingungen von der Größenordnung 3000 Hz, das bedeutet eine weitere Störungsquelle von noch niedrigerer Frequenz. Man hat versucht, diese Gaskanäle durch metallene Stempel zu ersetzen, aber dadurch werden die Quarze des Druckgebers mit einer Masse belastet, die die Eigenfrequenz dieses Systems erheblich erniedrigt.

Unser Ziel war es daher, einen Quarzdruckgeber zu entwickeln, dessen Eigenfrequenz wesentlich höher liegt, als es bisher erreicht wurde und dessen druckaufnehmende Fläche unmittelbar mit der Innenwand des Verbrennungsraumes abschneidet. Zu diesem Zwecke haben wir das Gerät so weit verkleinert, daß die Quarze innerhalb des normalen Zündkerzengewindes von 14 mm Durchmesser Platz finden, wobei innerhalb dieses Raumes auch noch die bei Motorversuchen unentbehrliche Wasserkühlung untergebracht ist. Bei dieser Bauweise bildet die druckaufnehmende Fläche unmittelbar einen Teil der inneren Oberfläche des Verbrennungsraumes, und es entfallen alle Schwierigkeiten durch den Verbindungskanal oder Druckstempel.

Den Querschnitt durch das Meßgerät, das mein Mitarbeiter W. Gohlke entwickelt hat, zeigt Abbildung 1. Die beiden Quarze *a* in Gestalt niedriger Zylinder, von denen der obere durchbohrt ist, liegen innerhalb eines Stutzens mit Zündkerzengewinde. Zur Vorspannung der Quarze dient eine Rohrfeder *b*, die außen von Wasser *c* gekühlt wird, wobei eine weiche Membran das Wasser gegen den Verbrennungsraum abdichtet.

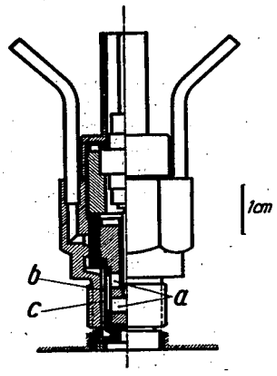
Die äußere Ansicht zeigt Abbildung 2 neben anderen handelsüblichen Bauformen und neben einer Zündkerze. Man erkennt, daß die neue Bauart auch in den äußeren Abmessungen wesentlich verkleinert ist und die Größe einer Zündkerze nur wenig überschreitet.

Um die Resonanzkurven des Gerätes zu ermitteln, wurden die Quarze durch den umgekehrten piezoelektrischen Effekt zu elastischen Schwingungen angeregt, indem ihnen durch einen Röhrensummer Wechselspannung beliebiger Frequenz zwischen 2000 und 100 000 Hz zugeführt wurde. An den stärksten Resonanzstellen war die auf diese Weise an-

6

03401

Abb. 1



Quarzdruckgeber hoher Eigenfrequenz
a) Quarze
b) Rohrleder
c) Wasserkühlung

geregte Schwingung schwach hörbar. Außerhalb der Resonanzstellen war mit dem Ohr nichts wahrzunehmen. Um die Größe der Schwingungsamplitude bei verschiedenen Frequenzen und besonders die Lage der Eigenfrequenzen zu ermitteln, lag es nahe, die elektrische Energieaufnahme zu messen, die der mechanischen Amplitude entsprechen und an

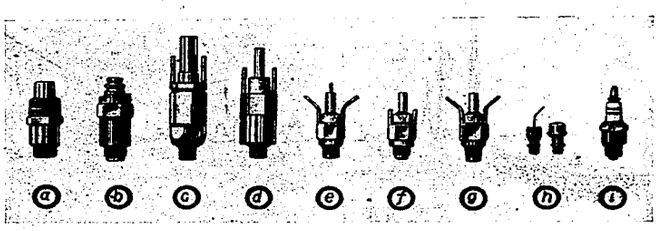


Abb. 2
Quarzdruckgeber verschiedener Bauart

a) Druckgeber nach Loewe
b) Druckgeber nach Zeiß
c) Druckgeber nach Meurer
d) Druckgeber mit Membranvorspannung
e), f), g) Druckgeber eigener Entwicklung
h) geschweißte und verschraubte Federhülse für Druckgeber nach g)
i) Zündkerze 14 × 1,25 m

6

03402

den Resonanzstellen Maxima erreichen muß. Es stellte sich aber heraus, daß diese Energie, abgesehen von den Hauptresonanzstellen, so klein ist, daß sie sich nicht genau genug messen läßt, um eine einwandfreie Resonanzkurve über den ganzen Frequenzbereich des Röhrensummers aufzunehmen.

Es wurde daher das folgende Verfahren entwickelt. Der Stirnfläche des Druckelementes wurde die Endfläche eines isolierten metallischen Stempels in einem Abstand von nur wenigen hundertstel Millimeter gegenübergestellt, so daß die einander zugekehrten Flächen die Elektroden eines Kondensatormikrofons bildeten. Die Schwingungen des Druckelementes rufen dann Kapazitätsänderungen hervor, die mit Hilfe einer geeigneten Verstärkeranordnung angezeigt werden konnten. Auf diese Weise war es möglich, Schwingungsamplituden bis herab zu 10^{-6} mm, das sind nur 10 Angströmeinheiten, zu messen, und es konnte die Resonanzkurve auch außerhalb der Resonanzstellen einwandfrei aufgenommen werden. Abbildung 3 zeigt solche Resonanzkurven im Frequenz-

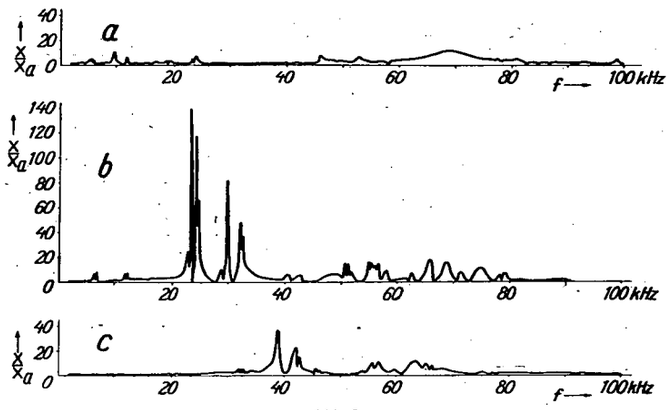


Abb. 3

Resonanzkurven von Quarzdruckgebern
a) und b) bisherige Bauarten
c) neue Bauart

6

03403

bereich von 2000 bis 100 000 Hz für zwei handelsübliche Bauarten und für das neue Gerät, darin ist der sogenannte Überhöhungsfaktor x/x_a angegeben, das ist eine Zahl, welche das Verhältnis des Ausschlages x bei periodischen Drücken höherer Frequenz zu dem Ausschlag x_a bei statischem Druck bzw. bei niederer Frequenz gleicher Amplitude angibt. Formgerecht gemessen wird nur bei Frequenzen, bei denen der Überhöhungsfaktor den Wert 1 hat. Mit Rücksicht auf die sehr großen Überhöhungsfaktoren an den Resonanzstellen mußte der Maßstab sehr klein gewählt werden, so daß der Überhöhungsfaktor 1 schon nahe bei der Abszissenachse liegt. In Wirklichkeit ist aber die Genauigkeit der Kurven auch an diesen Stellen viel größer, als sie in den dargestellten Kurven erscheint.

Die Kurven von Abbildung 3 zeigen, daß bei den bisherigen Bauarten bereits in der Gegend von 6000 Hz Resonanzstellen mit Überhöhungsfaktoren von 5 bis 10 beginnen. Bis zur Frequenz 20 000 treten noch mehrere Resonanzstellen auf, und die Resonanzkurve weicht erheblich von dem Anfangswert 1 ab. Bei der neuen Bauart bleibt dagegen der Anfangsausschlag bis 20 000 Hz erhalten, und hier macht sich eine erste schwache Überhöhung bemerkbar, die dann wieder zurückgeht. Erst bei etwa 26 000 Hz treten größere Erhöhungen auf, so daß man bis zu diesen Frequenzen noch praktisch verzerrungsfrei messen kann.

Wenn man auf die Wasserkühlung verzichtet, was bei einmaligen Vorgängen, z. B. bei Bombenversuchen, durchaus möglich ist, kann man aber noch wesentlich weiter kommen. In Abbildung 4 sehen Sie zwei Resonanzkurven unseres Gerätes ohne Wasserkühlung. Bei Kurve *a* sind das obere Stück der Federhülse und der als Widerlager der Quarze dienende Stempel miteinander verschweißt, bei Kurve *b* durch Verschraubung verbunden. Bei der geschweißten Ausführung tritt eine erste schwache Resonanzstelle bei 35 000 Hz auf, dann wird die Kurve wieder glatt, und erst bei etwa 60 000 Hz beginnt sie merklich anzusteigen, bis bei 70 000 die Hauptresonanzstelle auftritt. Mit dieser Hülse kann man also noch bis zu etwa 60 000 Hz einwandfrei messen. Bei der Kurve der verschraubten Hülse treten die ersten schwachen Erhebungen bei 23 000 und 30 000 Hz auf, denen bei 45 000 Hz eine stärkere Resonanzstelle folgt, so daß man praktisch verzerrungsfrei nur bis etwa 45 000 Hz messen kann. Die Ursache des ungünstigeren Verhaltens der verschraubten Ausführung ist in der Federung zu suchen, die durch nicht vollständiges Anliegen der Gewindegänge hervorgerufen wird. Die ge-

6

03404

schweißte Ausführung ist also wesentlich besser und erlaubt schon jetzt, bis zu 60 000 Hz formgetreu zu messen. Nimmt man mit diesem Gerät einen plötzlichen Druckanstieg auf, in dem auf Grund der Zerlegung mit Hilfe des Fourierschen Integrals alle Frequenzen nach einem stetigen Verteilungsgesetz enthalten sind, so wird der Bereich bis etwa 60 000 Hz

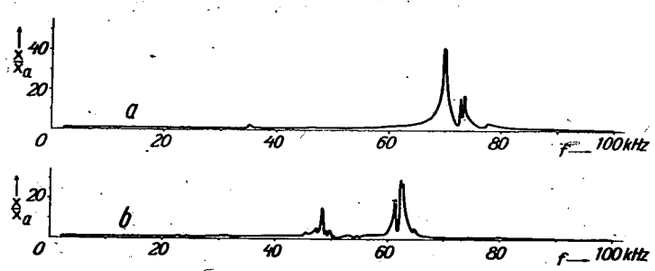


Abb. 4

Resonanzkurven von Quarzdruckgebern eigener Bauart
a) mit geschweißter Federhülse
b) mit verschraubter Federhülse

richtig wiedergegeben, aber die der Eigenfrequenz von 70 000 Hz nahekommenden Teilschwingungen werden stark vergrößert wiedergegeben, so daß sich an den Drucksprung im Bilde noch ein gedämpfter Wellenzug anschließt, der in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Diesen Fehler kann man vermeiden, indem man vor das Braunsche Rohr noch eine elektrische Siebkette schaltet, die keine Frequenzen oberhalb 60 000 Hz durchläßt. Theoretisch sollte es sogar möglich sein, durch solche Siebketten die Überhöhungen der mechanischen Resonanzkurve auf elektrischem Wege wenigstens für einzelne Resonanzstellen wieder rückgängig zu machen. Die praktische Ausführung dieses Gedankens erfordert aber erheblichen versuchstechnischen Aufwand.

Baut man das Quarzdruckgerät ohne Rücksicht auf die Möglichkeit der Wasserkühlung, so kann man die vor den Quarzen liegende Masse noch etwas verkleinern und so die Eigenfrequenzen wahrscheinlich bis auf 100 000 Hz hinaufrücken.

Nun erhebt sich die Frage, ob es Zweck hat, mit der Eigenfrequenz des Meßgerätes noch weiter hinaufzugehen. Wir sahen, daß bei 6000 Hz

6

03405

die Wellenlänge der Gasschwingungen im Verbrennungsraum mit 10 cm etwa dem Zylinderdurchmesser gleichkam. Einer Frequenz von 60 000 Hz entspricht eine Wellenlänge von etwa 1 cm. Trifft nun eine Stoßwelle mit unstetig steiler Wellenfront senkrecht auf die Druckfläche eines Piezoquarzgerätes von 60 000 Hz Eigenfrequenz, so wird dieses statt der senkrechten Wellenfront eine Kurve zeigen, die in einer der Laufzeit einer halben Wellenlänge entsprechenden Zeit, also während eines Wellenweges von etwa 0,5 cm, den Enddruck der Stoßwelle erreicht. In dem Verbrennungsraum eines Motors wird die Stoßwelle aber kaum jemals senkrecht auf das Meßgerät treffen, sondern mehr oder weniger parallel zur Druckfläche laufen, so daß deren Belastung auch bei unendlich steiler Wellenfront stetig von Null bis zum Endwert ansteigt in einer Zeit, die der Laufdauer des Stoßes über die Druckfläche hin entspricht. Da deren Durchmesser von etwa 0,5 cm wieder einer halben Wellenlänge bei 60 000 Hz gleichkommt, sieht man, daß es nicht viel Zweck hat, die Eigenfrequenzen von Quarzdruckgeräten für motorische Zwecke wesentlich über 60 000 Hz zu steigern, wenn man nicht zugleich die Quarze noch weiter verkleinert. Aber mit Geräten dieser Eigenfrequenz wird man schon einen wesentlich genaueren Einblick in den Verlauf der Druckwellen bei der klopfenden Verbrennung erhalten als bisher.

Zu den neuen Druckgebern werden auch die entsprechenden Verstärkungseinrichtungen entwickelt, denn die Nachprüfung der üblichen Verstärker ergab, daß sie jenseits des hörbaren Bereiches, also von etwa 15 000 Hz an, sehr erhebliche Änderungen des Verstärkungsgrades aufweisen. Die neuen von uns gebauten Verstärker liefern bis zu 90 000 Hz eine gleichförmige Verstärkung mit einer Abweichung von nur wenigen Prozent an der oberen Grenze.

Für das Aufzeichnen der Schwingungen reicht der Schleifenoszillograph nicht aus, da er bald oberhalb 6000 Hz nicht mehr nachkommt. Aber auch das übliche Braunsche Rohr, bei dem der Brennfleck auf der fluoreszierenden Innenfläche des Glaskolbens eine Lichtkurve schreibt, die dann mit einer Fotokamera aufgenommen wird, besitzt keine ausreichende Schreibgeschwindigkeit mehr, um so schnelle Vorgänge wiederzugeben, wie sie der Quarz aufnehmen kann. Es erwies sich daher als notwendig, ein Gerät zu verwenden, bei dem der Brennfleck des Elektronenstrahles unmittelbar auf einer ins Vakuum eingeschleusten Platte

6

03406

schreibt. Es war also noch eine Reihe von Entwicklungsarbeiten an Hilfsgeräten nötig, um die von dem neuen Quarzdruckgerät gebotenen Möglichkeiten wirklich ausnutzen zu können.

2. Verbrennungsgeschwindigkeit und Turbulenz

Da die Verbrennungsgeschwindigkeit in Motoren, verglichen mit Versuchen an ruhenden Gemischen in Bomben, durch turbulente Bewegungen stark erhöht wird, haben wir zunächst nach der Bunsenbrennermethode Messungen der Verbrennungsgeschwindigkeit vorgenommen. Die Versuche wurden von meinem Mitarbeiter G. Damköhler ausgeführt und sind im Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrtforschung[1]) veröffentlicht. Dieses Verfahren wurde gewählt, weil in einem genügend langen geraden Rohr der Turbulenzzustand der Strömung aus hydrodynamischen Untersuchungen recht genau bekannt ist. Die Versuche zeigen, daß die turbulent brennende Flamme eine verwaschene Brennzone besitzt von erheblich größerer Dicke als bei dem uns vertrauten Brennkegel der laminar brennenden Bunsenflamme. Dabei muß man unterscheiden zwischen der feinballigen Turbulenz, bei der die Durchmesser der Turbulenzballen von der Größenordnung der Dicke einer laminaren Brennfläche sind und der grobballigen Turbulenz, bei der die Turbulenzballen so groß sind, daß sie makroskopisch sichtbare Ausbeulungen der Brennfläche verursachen. Beide Arten von Turbulenz erhöhen die Brenngeschwindigkeit. Den Einfluß der grobballigen Turbulenz wollen wir in weiten Rohren studieren, wobei das Gemisch durch einen Propeller in einem geschlossenen Rohrsystem in Umlauf gesetzt und dann gezündet werden kann. Durch eingesetzte Siebe oder andere Hindernisse können Intensität und Struktur der Turbulenz geändert werden.

Zu diesen Formen der Turbulenz bei stationären Flammen kommt bei der nichtstationären Fortpflanzung der Verbrennung in Rohren noch die anlaufende Turbulenz, hervorgerufen durch die vor der Flamme herlaufende Gasbewegung. Diese durch die Ausdehnung der schon verbrannten Gase verursachte Strömung hat, wie man mit Hilfe der in Frage kommenden Reynoldsschen Zahlen leicht ausrechnen kann, in nicht zu engen Rohren die Bildung von turbulenten Grenzschichten zur Folge. Diese Verwirbelung des unverbrannten Gases erhöht die Flammengeschwindigkeit, wenn die Brennzone dieses Gebiet erreicht. Mit dem

[1]) Jb. d. dt. Luftfahrtforschg (1939) Bd Triebwerk S. 3.

6

03407

erhöhten Umsatz steigt wieder die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Turbulenz, wodurch wieder die Flammengeschwindigkeit wächst usw. bis, wenigstens bei manchen Gemischen, die Verbrennung in die Detonation übergeht. Im Motor wird bei den üblichen Brennstoffen die Detonation nicht erreicht, sondern wir haben es noch mit dem Anlaufvorgang zu tun. In dieser Übergangszone spielen sich die Beschleunigung der Verbrennung, das Entstehen der Stoßwelle und das Klopfen ab.

3. Verbrennungsversuche an Bomben mit Beobachtungsfenstern

Um einen tieferen Einblick in diese verwickelten Vorgänge zu erhalten, muß man Verbrennungsversuche in Bomben und geraden Rohrstrecken ausführen, in denen sich die Vorgänge auch bis zur Detonation verfolgen lassen. Dabei genügt es nicht, nur die Flammenfront selbst etwa durch ihr Eigenlicht aufzunehmen, sondern man muß auch versuchen, etwas über die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse der vor der Flammen-

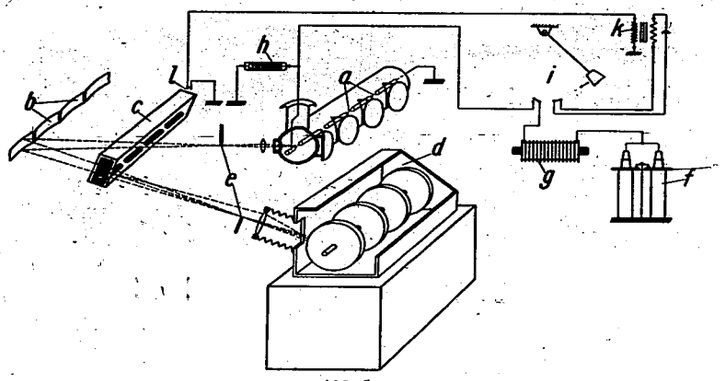


Abb. 5

Schema der Versuchseinrichtung für Schlierenaufnahmen mit Funkenbeleuchtung an Verbrennungsbomben

a) Funkenstrecke
b) Hohlspiegel
c) Verbrennungsbombe
d) Aufnahmegerät
e) Schlierenblenden
f) Speicherkondensator
g) Drosselspule
h) Funkenkondensator
i) Pendelschaltung
k) Zündspule
l) Zündung

6

03408

front herlaufenden Stoßwelle zu erfahren. Das ist nur durch Schlierenaufnahmen möglich. Zu diesem Zwecke haben wir die folgende in Abbildung 5 schematisch und in Abbildung 6 in der Ansicht dargestellte Meßeinrichtung entwickelt: Aus einer unter Druck brennenden vierfachen Funkenstrecke *a* fällt das Licht über 4 Hohlspiegel *b* durch die 4 Fenster der Verbrennungsbombe *c* auf die umlaufenden Filme des Aufnahmegerätes *d*. In den Strahlengang können bei *e* die beiden Teile einer Schlierenblende eingeschaltet werden, so daß sowohl gewöhnliche wie

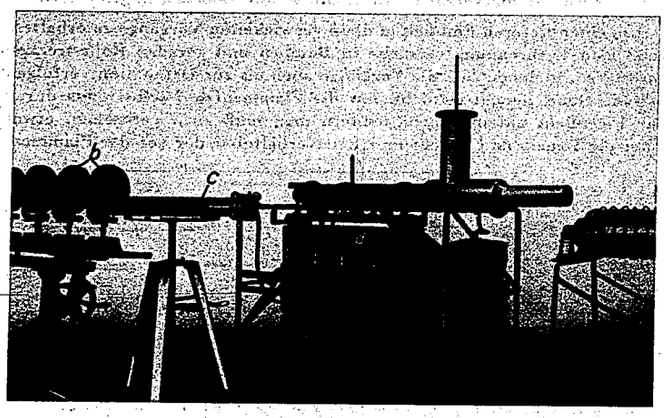


Abb. 6
Ansicht des Aufbaues der Versuchseinrichtung für Schlierenaufnahmen nach Abbildung 5
a) Funkenstrecke
b) Hohlspiegel
c) Verbrennungsbombe
d) Aufnahmegerät

Schlierenaufnahmen möglich sind. Die elektrische Einrichtung, auf die ich hier nicht eingehen will, erlaubt mit Hilfe von Kondensatoren und Drosselspulen nacheinander 20 bis 50 Funken in Abständen von $^1/_{500}$ bis $^1/_{8000}$ Sekunde zu erzeugen, so daß ebenso viele Momentbilder auf den Filmen entstehen.

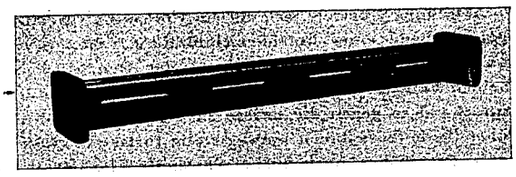
Die Fensterbombe selbst zeigt Abbildung 7. Eine Bombe gleicher Art mit Fenstern auf einer Seite ist für Flammenaufnahmen im Eigenlicht

6

SUPEO

03409

Abb. 7

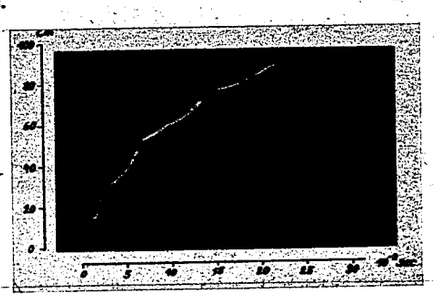


Fensterbombe für Verbrennungsversuche

bestimmt. Auf einem laufenden Film erhält man dann die bekannten Bilder, bei denen die Flamme eine schräg über das Bildfeld laufende Spur zeichnet, deren Neigung als Maß der Flammengeschwindigkeit dient. Die Bilder 8 bis 10 geben Beispiele solcher Aufnahmen im Eigenlicht der Flamme an der geschlossenen Bombe bei einem Anfangsdruck des Gemisches von 1 at.

Abbildung 8 zeigt das Abbrennen eines stöchiometrischen Propan-Luft-Gemisches. Die Flamme läuft von unten nach oben. Die Zeit zählt dem angeschriebenen Maßstab entsprechend von links nach rechts. Aus dem Bilde herausgeschnittene senkrechte Streifen entsprechen demnach Augenblicksbildern der Bombenfenster. Die Unterbrechungen des Lichtbandes sind die Spuren der Stege zwischen den 4 Fenstern der Bombe. Die Neigung des Lichtbandes gegen die Zeitachse ist ein Maß der Geschwindigkeit der Flamme gegen die ruhende Bombe. Diese Geschwindigkeit ist wegen der durch die Expansion des verbrannten und der Kompression des frischen Gemisches hervorgerufenen Gasbewegung natürlich nicht gleich der Geschwindigkeit der Brennfläche gegen das ruhende Gas.

Abb. 8



Abbrennen eines stöchiometrischen Propan-Luft-Gemisches in der Fensterbombe

6

03410

Abbildung 9 bezieht sich auf ein Propan-Luft-Gemisch bei Luftmangel, entsprechend einer Luftüberschußzahl $\lambda = 0{,}6$, wobei die untere Aufnahme die ersten beiden Fenster der Bombe, die obere die letzten beiden Fenster umfaßt. Die obere Aufnahme ist also dem Zeitmaß entsprechend so gegen die untere zu verschieben, daß das Lichtband sich über beide Aufnahmen hinweg stetig fortsetzt. Dieses Bild zeigt besonders gut bisher noch nicht einwandfrei geklärte Schwingungen der Flammenfront anscheinend von derselben Art, wie sie Lewis und von

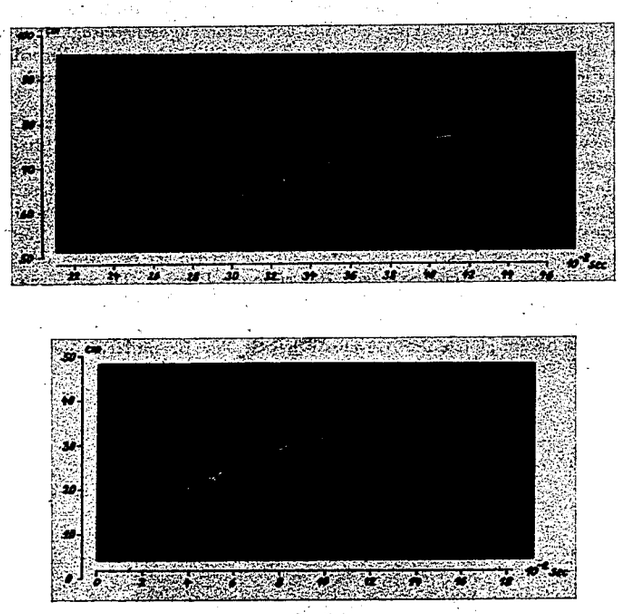


Abb. 9

Abbrennen eines Propan-Luftgemisches mit $\lambda = 0{,}6$ in der Fensterbombe

6

Elbe[1]) am Druckverlauf von langsam brennenden Gemischen beobachtet haben. Diese Schwingungen haben sicher nichts zu tun mit der Eigenschwingung der Bombe, da deren Frequenz etwa 10mal größer ist.

Abbildung 10 wurde gewonnen an einem Propan-Luft-Gemisch bei geringem Luftmangel ($\lambda = 0{,}8$) in der Nähe der höchsten Brenngeschwindigkeit und zeigt nur das 3. und 4. Fenster der Bombe. Hierbei ist bereits die Eigenschwingung der Gassäule in der Bombe durch die Verbrennung angeregt.

Neben diesen Versuchen an Bomben ist auch ein Zylinderkopf mit Sichtfenster in Vorbereitung, bei dem ähnlich wie bei den Arbeiten von Raßweiler und Withrow[2]) der Verbrennungsraum eines Zylinders voll überblickt werden kann.



Abb. 10
Abbrennen eines Propan-Luft-Gemisches mit $\lambda = 0{,}8$ entsprechend der Zusammensetzung höchster Flammengeschwindigkeit in der zweiten Hälfte der Fensterbombe

Ferner beabsichtigen wir, die schönen Messungen von Weinhardt, München, zu wiederholen, bei denen der Verlauf des Anstiegs des Ionisierungsstromes einer Zündstrecke beim Vorbeilaufen der Flamme gemessen werden kann. Weinhardt fand bekanntlich bei Detonationen einen plötzlich unstetigen Anstieg des Ionisierungsstromes, während beim klopfenden Motor der Anstieg von endlicher Steilheit war, und schloß

[1]) B. Lewis u. G. von Elbe, J. chem. Phys. Bd 3 (1935) S. 63.
[2]) G. M. Raßweiler u. L. C. Withrow, Indust. Engng. Chem. Bd 28 (1936) S. 672.

6

03412

daraus, daß im klopfenden Motor die Verbrennung keine wirkliche Detonation ist. Mit Hilfe eines Kathodenstrahloszillographen hoher Schreibgeschwindigkeit hoffen wir noch weitere Einzelheiten im Verlauf des Ionisierungsstromes erkennen zu können.

Meine Ausführungen sollten einen kurzen Überblick über die Aufgaben auf dem Gebiete der Verbrennung geben, die wir in Braunschweig bearbeiten, zum Teil sind sie in der Kriegszeit zurückgestellt worden, aber können hoffentlich bald wieder in vollem Umfange aufgenommen werden. Gerade das Gebiet der Verbrennung erfordert in besonderem Maße die Zusammenarbeit des Ingenieurs mit dem physikalischen Chemiker und dem Physiker, wenn die zahlreichen noch ungelösten Probleme nicht nur in einseitiger Weise behandelt werden sollen. Mein Mitarbeiter Damköhler wird in seinem Vortrag meine Ausführungen nach der physikalisch-chemischen Seite hin ergänzen.

6

03413

Aussprache

Eucken: Wir haben uns auch schon Druckindikatoren gebaut, aber nicht aus Quarz, sondern nach dem Prinzip des veränderlichen Kondensators. Allerdings verfolgten wir einen anderen Zweck; wir wollten möglichst genau die Drucke registrieren, und dann sind die Quarzindikatoren nicht ausreichend; jedenfalls haben wir gefunden, daß die Angaben nur auf 1 bis 2% genau und auch nicht ganz reproduzierbar sind. Nun handelt es sich bei Ihnen darum, den Druck**verlauf** festzustellen, und da wird es auf den absoluten Druck nicht so genau ankommen. Bei den Versuchen von Herrn Jost lagen die Verhältnisse dagegen ähnlich wie bei uns. Daher hat er, soweit ich mich erinnere, gleichfalls nicht mit einem Quarzindikator gearbeitet. Man kann jedenfalls mit unserem Kondensatormanometer ausgezeichnet arbeiten; die Ergebnisse sind sehr gut reproduzierbar, erheblich genauer als auf 1%.

E. Schmidt: Und welche Eigenschwingungen wurden damit erreicht?

Eucken: Diese haben wir wohl nicht genau festgestellt. Die Membran ist ziemlich dick. Man hat eigentlich gar keine Membran. An ihrer Stelle wurde der Boden des Zylinders bis auf einige Millimeter abgedreht. Eine ausführliche Beschreibung unserer Anordnung wird später veröffentlicht werden, sobald die fragliche Untersuchung zu Ende geführt ist.

E. Schmidt: Dieses Kondensatorverfahren haben wir, wie ich erwähnte, zur Messung der Amplitude unseres elektrisch angeregten Quarzdruckgerätes verwandt. Wenn man es aber als Indikator benutzt in Verbindung mit einer Membran, so erreicht man mit dieser keine so hohen Eigenfrequenzen wie mit dem Quarz.

Eucken: Ja, wir verfolgen in der Tat ein anderes Ziel. Ihr Indikator hat den Vorteil einer geringeren Trägheit. Das läßt sich ja auch leicht erklären bei diesen ganz kleinen Dimenstonen. Und uns kam es auf möglichst gute, reproduzierbare Absolutwerte an. Wir mußten auf unter 1% herunter. Wir haben auch tatsächlich eine Genauigkeit von 1 bis 2‰ erreicht. Ich wollte nur erwähnen, daß, wenn es auf die Absolutdrucke ankommt, ich diesem Gerät den Vorrang geben würde. Im Rahmen unseres ganzen Arbeitsprogramms kommen solche Aufgabenstellungen ja auch sonst vor, und für solche Genauigkeit reicht der Quarzindikator nicht aus.

Triebnigg: Darf ich dazu bemerken: Die Entwicklung dieser Druckmeßgeräte ging seinerzeit aus von der Kondensatormethode. Die ersten elektrischen Druckmeßgeräte waren auf dem Kondensatorprinzip aufgebaut. (Es folgen einige Angaben über die geschichtliche Entwicklung, beginnend mit Schnauffer; Herr List macht auf Fieber, Wien aufmerksam.) Das Kondensatorprinzip hat sich jedoch für die motorische Verbrennung nicht recht geeignet, so daß man notgedrungen nach anderen Möglichkeiten suchte und schließlich zur Quarzmethode überging, die heute eigentlich die einzige Methode darstellt, von der wir glauben, daß sie bei der Untersuchung von Druckvorgängen an schnellaufenden Motoren einigermaßen reproduzierbare Ergebnisse erzielt.

Eucken: Wir haben, wie erwähnt, einen Kunstgriff angewendet, indem wir direkt den Boden ausgedreht haben, so daß nur eine Wand, von einigen Millimetern Stärke stehenblieb, die sich dann nur um einige Hundertstel Millimeter durchbiegt. Ich weiß nicht,

6

03414

ob die früheren Konstruktionen so beschaffen waren. Der Vorteil unserer Bauart beruht darauf, daß das sonst meist unentbehrliche, aber die Genauigkeit des Indikators stark beeinträchtigende Verbindungsrohr fortfällt; dagegen wird es wohl oft als Nachteil empfunden werden, daß das Manometer nicht ohne weiteres an einen fertigen Motor angebracht werden kann.

Triebnigg: Wenn ich mich recht erinnere, waren wohl seinerzeit die Umstände mit von Einfluß, daß die verhältnismäßig großen Membranen durch die wechselnden Verbrennungsdrücke und nicht beherrschbaren Höchstdrücke oft rissen.

Zinner: Die Konstruktion, die Herr Eucken erwähnt hat, wird sich besonders zur Aufnahme eines einmaligen Vorganges eignen, bei dem die Membran nicht erwärmt wird, bevor der eigentliche Meßvorgang beginnt. Der Motorenbauer stellt aber gewöhnlich andere Anforderungen. Im Motor muß das Meßgerät auch während eines veränderlichen Betriebszustandes richtig anzeigen, d. h. die Eichkurve muß temperaturunabhängig sein. Im Motor würde eine Konstruktion, bei der ein Teil der Zylinderwand unmittelbar als Kondensatorplatte ausgebildet wird, wahrscheinlich Schwierigkeiten bereiten durch Verziehen der Membran infolge von Temperatureinflüssen u. ä. Deswegen ist man bei der Kondensatormeßdose für Untersuchungen im Motor dazu übergegangen, die Meßmembran vom Verbrennungsraum wegzulegen und die Gasdrücke zunächst auf eine Abdichtungsmembran wirken zu lassen, die durch einen Stempel mit der Meßmembran verbunden ist. Mit solchen Geräten lassen sich allerdings bei weitem nicht so hohe Eigenschwingungszahlen erreichen wie mit Quarzkammern.

Zu den Ausführungen von Herrn Schmidt wollte ich noch sagen: Die Eigenfrequenz der Quarzkammer hängt von der Masse und von der Federung der meistens aus mehreren Quarzscheiben und Zwischenelektroden bestehenden Säule ab. Herr Schmidt hat gezeigt, wie man durch Verkleinerung der Quarze zu sehr hohen Eigenschwingungszahlen kommen kann. Versuche im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden haben ergeben, daß die Steifigkeit der Säule nicht nur durch die Elastizitätskonstanten des Materials und durch die Abmessungen der Säule bedingt ist, sondern auch durch ihre Unterteilung. Wenn zur Erhöhung der Empfindlichkeit mehrere Quarze übereinandergeschichtet werden, dann nimmt die Steifigkeit der Säule um so mehr ab, je mehr Flächen aufeinanderliegen. Wenn die Flächen auch geschliffen sind, ist die Berührung doch nicht so vollkommen, daß dadurch nicht eine starke Beeinflussung der Steifigkeit eintreten würde. Bei der normalen Quarzkammerkonstruktion sind die Quarze so ausgespalten, daß die Druckrichtung mit der elektrischen Achse zusammenfällt, d. h. die Ladungsabnahme erfolgt an Flächen parallel zu den Auflageflächen. Eine solche Ausspaltung der Quarze ist an und für sich nicht notwendig. Wenn man die Druckrichtung senkrecht zu der elektrischen Achse legt und die Ladung an Flächen senkrecht zu den Auflageflächen abnimmt, kann man mit einem einzigen Quarz auskommen statt mit einer Quarzsäule. Man erspart sich Zwischenelektroden und Unterteilung der Säule, womit die Steifigkeit und damit die Eigenfrequenz bei gleicher Empfindlichkeit wächst. Die Entwicklung in Dresden ist allerdings nicht so sehr in Richtung einer Quarzkammer sehr hoher Eigenfrequenz gegangen, wie sie Herr Schmidt gezeigt hat, sondern in Richtung einer Kammer sehr hoher Empfindlichkeit mit geradliniger Charakteristik und für übliche Zwecke genügender Eigenfrequenz.

6

ATD

03415

Lindner: Die Frage, ob man einem Quarzindikator oder einem Kondensatorindikator den Vorzug geben soll, wird auch durch rein praktische Gesichtspunkte beeinflußt. So sind die elektrischen Schaltungen für die Aufzeichnung der Kapazitätsänderungen wesentlich unbequemer als die Gleichstromverstärker für die Quarzmeßschaltungen. Bei den Kondensatorschaltungen benutzt man meist Resonanzvorgänge, und es ist schwierig, dabei eine genau gradlinige Eichkurve zu erhalten. Auch sind diese Schaltungen verhältnismäßig empfindlich gegen äußere Störungen. Das ist belanglos, wenn nur gelegentlich Messungen vorgenommen werden. Wenn aber, wie es bei motorischen Untersuchungen der Fall ist, sehr oft indiziert werden muß, dann legt man Wert auf eine jederzeit gut reproduzierbare geradlinige Eichkurve, wie sie eben heute mit dem Quarzindikator leicht zu erreichen ist.

Ich möchte noch fragen, ob es bei dem Erreichen so hoher Eigenfrequenzen möglich gewesen ist, mit der Gleichstromverstärkung auszukommen, oder ob zur Wechselstromverstärkung übergegangen werden mußte. Es würde das vor allem für die Eichung eine wesentliche Erschwerung bedeuten, die dann nicht mehr statisch, d. h. bei ruhenden Drucken vorgenommen werden kann.

E. Schmidt: Es wurde mit Gleichstromverstärkung gearbeitet, aber die Schaltungen und Geräte mußten besonders entwickelt werden, da die üblichen Verstärker nicht genügend frequenzunabhängig waren.

Lindner: Die Hochohmwiderstände der Gleichstromschaltung erschweren naturgemäß das Erreichen einer befriedigenden Frequenzunabhängigkeit in einem so hohen Frequenzbereich.

Der Quarzindikator hat allerdings einen Nachteil, der darin besteht, daß eine unmittelbare Zuordnung zwischen der vom Quarz erzeugten Spannung und dem zu messenden Druck nicht möglich ist, wenn nicht im aufgezeichneten Druckverlauf ein Bezugspunkt vorhanden ist, für den der absolute Druckwert bekannt ist. Die vom Quarz erzeugte Elektrizitätsmenge und damit auch die aufgezeichnete Spannung ist proportional der Druckänderung, und es fehlt sozusagen die Integrationskonstante. Man ist dann gezwungen, einen Bezugsdruck mit aufzuzeichnen, wie das z. B. durch die Aufnahme der Atmosphärenlinie geschehen könnte. Die hierzu erforderlichen Einrichtungen sind bei einem wegen der Eigenschwingungszahlen so klein auszuführenden und unmittelbar an den Brennraum anzubauenden Indikator sehr schwierig auszubilden. Bei den Aufzeichnungen der hohen Zünddrücke in einem Motor ist diese Frage insofern bedeutungslos, als man hier mit ausreichender Genauigkeit dem niedrigsten im Zylinderdruckdiagramm erhaltenen Druck stets den Atmosphärendruck zuordnen kann.

E. Schmidt: Die Membran ist sicher für viele Zwecke ein geeignetes Druckmeßgerät, aber für den Motor kommt sie kaum in Frage, wenn man die Forderung stellt, das Gerät in der Zündkerzenbohrung unterzubringen. Man müßte schon eine sehr kleine Membran nehmen, wenn sie auf der Stirnfläche einer solchen Bohrung Platz haben soll, und dann ist ihre Kühlung schwierig. Ohne Wasserkühlung geht es nicht, sonst verspannt sich die Membran, weil in ihr thermische Änderungen bei der hohen Temperatur auftreten. Bei Wasserkühlung treten andere Schwierigkeiten auf:

6

03416

Die Membran wird dadurch mit der Masse der Flüssigkeit belastet, was ihre Eigenfrequenz herabsetzt. Außerdem tritt wahrscheinlich bei den schnellen Schwingungen Kavitation auf, da das Wasser den Bewegungen nicht rasch genug zu folgen vermag und zu Schaum geschlagen wird. Wie wir bei anderen Versuchen feststellten, kann man nämlich mit Membranen hoher Eigenfrequenz, ähnlich wie mit Quarzsendern, Emulsionen herstellen.

Pier: Man könnte die Temperaturkurve der Membran für sich aufnehmen und dann die entsprechende Korrektur anbringen.

Triebnigg: Das ist natürlich sehr schwer.

Eucken: Ich will zugeben, daß das Kondensatormanometer für fertige Motoren nicht sonderlich geeignet ist; aber hier sind wir doch dabei, Apparate zu besprechen, die in erster Linie für spezielle Forschungszwecke bestimmt sind. Ich weise nur auf die Versuche von Herrn F. A. F. Schmidt hin, bei denen es auf besonders genaue Druckmessungen ankam. Es war daher mein Wunsch, auf dieses Instrument wegen seiner großen Genauigkeit noch einmal aufmerksam zu machen. Im Notfall muß man eventuell einen besonderen Motor so konstruieren, daß in ihm die Vorrichtung ohne weiteres angebracht werden kann. Ich glaube auch, daß sich die durch die veränderliche Temperatur des ganzen Zylinders bedingten Schwierigkeiten werden überwinden lassen, wenn man sich nach einem geeigneten Material umsieht und bei der ganzen Konstruktion des Kondensators von vornherein auf das Auftreten von Temperaturänderungen Rücksicht nimmt.

Pier: Vielleicht käme zur Messung von angenäherten Maximaldrucken auch das Kruppsche Meßei in Frage. Dabei wird der Explosionsdruck durch einen Stempel übertragen, der einen kleinen Kupfer- oder Bleizylinder staucht. So wurden vor vielen Jahren von mir bei Versuchen mit Wasserstoff-Sauerstoff und Azetylen-Sauerstoff in Stahlrohren von 1 bis 6 m Länge und etwa 20 cm l. W. bei verschiedenen Anfangsdrucken Druckunterschiede gemessen und bis zum Bersten der Rohre durchgeführt. Es waren dabei mindestens 3 Meßeier in der Achse des Rohres angeordnet. An dem der Zündung entgegengesetzten Ende betrug der Druck entsprechend der zerstörenden Wirkung auf die Rohrwandung das Mehrfache desjenigen am Zündanfang.

F. A. F. Schmidt: Zur Messung des Höchstdruckes steht ein durchaus betriebssicheres und vielfach benutztes Gerät, der DVL-Höchstdruckmesser, zur Verfügung. Im Höchstdruckmesser ist eine dünne Membran oder ein Ventil angebracht, deren eine Seite durch den Druck der Gase im Zylinder und deren andere Seite durch einen einstellbaren Gegendruck (z. B. aus einer Druckluftflasche) belastet wird. Wird der Druck im Zylinder größer als der Gegendruck, so biegt sich die Membran durch und schließt einen Stromkreis. Die Kontaktgebung kann durch eine in den Stromkreis geschaltete Glimmlampe sichtbar gemacht werden. Bei der Messung des Höchstdruckes wird der Gegendruck so lange gesteigert, bis er gleich dem Höchstdruck im Zylinder ist. Bei Druckgleichheit ist die Durchbiegung der Membran aufgehoben und der Stromkreis der Glimmlampe unterbochen. Der Höchstdruck im Zylinder ist also dann gleich dem eingestellten Gegendruck, wenn die Glimmlampe gerade zum Erlöschen kommt.

6

03417

Physikalisch-chemische Probleme bei Verbrennungsvorgängen

von Gerhard Damköhler

03418

Physikalisch-chemische Probleme bei Verbrennungsvorgängen

Von Gerhard Damköhler

I. Chemisch-Reaktionskinetische Probleme

Der Aufklärung des chemischen Mechanismus sehr schnell verlaufender homogener Gasreaktionen, wie sie z. B. kurz vor dem Einsetzen des Klopfens im Motor ablaufen, stehen zwei grundsätzliche Schwierigkeiten entgegen. Einerseits sind die Zeiten, die beim Versuch zum Einleiten oder Anhalten der Reaktion benötigt werden (Aufheiz-, Vermischungs- und Abkühlzeiten), von derselben Größenordnung wie die eigentliche chemische Reaktionszeit selbst (10^{-1} bis 10^{-3} s), so daß die letztgenannte sich nicht mehr genau definieren läßt. Anderseits verlaufen diese Reaktionen über Ketten, d. h. unter Bildung hoch aktiver Zwischenprodukte, die sich nur sehr schwer isolieren lassen, meistens sogar nur als halbwegs stabilisierte Produkte, wie Hydroperoxyde, Aldehyde, Persäuren usw.

Zur Überwindung der ersten Schwierigkeit wurde im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring eine nach dem Prinzip der Diffusionsflamme arbeitende Untersuchungsapparatur entwickelt[1]), die folgende Forderungen erfüllt:

1. Anreicherungs- und Abfangmöglichkeit für die Reaktionsprodukte und aktiven Zwischenprodukte,
2. Ausschluß der Wandreaktion,
3. Einfache und definierte Einstellung der Reaktionszeiten von 10^{-1} bis 10^{-3} s,
4. Schaffung definierter Konzentrations- und Temperaturverhältnisse in der Reaktionszone, die bei verschiedenen Reaktionszeiten miteinander vergleichbar sind.

Die Ausgangsgase werden getrennt erwärmt, gelangen in der Reaktionszone zur Vermischung und werden dann schnell abgekühlt. Die bei der Apparatur zu beachtende Arbeitsweise ergab sich zwanglos aus

[1]) Vgl. die demnächst erscheinende Arbeit von G. Damköhler u. A. Sander im Jb. d. dt. Luftfahrtforschg (1940).

6

03419

einigen Ähnlichkeitsbetrachtungen der Strömungs- und Wärmeübergangslehre. Die Apparatur ist zunächst für die Untersuchung thermisch stabiler Ausgangskomponenten gedacht (z. B. Kohlenwasserstoffe, Kohlenwasserstoffe + Anilin einerseits, Sauerstoff bzw. Luft anderseits), wird sich aber wahrscheinlich auch für die Untersuchung des Einflusses thermisch labiler Komponenten (Bleitetraäthyl, Peroxyde) verallgemeinern lassen. –

Die zweite Aufgabe wird nun sein, aus den faßbaren Zwischenprodukten auf den chemischen Mechanismus solcher Oxydationsvorgänge zu schließen, d. h. insbesondere die maßgeblichen Start-, Verzweigungs- und Abbruchsreaktionen aufzuklären. Denn erst sie können die Wirkungsweise gewisser chemischer Zusätze, wie z. B. der Antiklopfmittel, verständlich machen. Diese zweite Aufgabe setzt allerdings eine saubere qualitative und quantitative chemische Analyse der faßbaren Zwischenprodukte voraus, ein Problem, das bisher noch nicht systematisch bearbeitet wurde. Die wirkliche Schwierigkeit liegt dabei darin, daß nebeneinander Stoffe bestimmt werden müssen, von welchen der eine den Nachweis des anderen stört. So kann man z. B. sehr gut Aldehyde für sich bestimmen, man kann auch, allerdings etwas schlechter, Peroxyde für sich bestimmen. Es ist aber sehr schwer, in einem Gemisch von Aldehyden und Peroxyden diese beiden Stoffe einzeln herauszuanalysieren. Noch schwieriger ist es, einwandfrei die einzelnen Peroxydarten voneinander zu unterscheiden: Wasserstoffperoxyd, Alkylhydroperoxyde, die aus diesen mit Aldehyden entstehenden Oxydialkylperoxyde, Persäuren usw. Und trotzdem wird die Unterscheidung dieser Stoffe notwendig sein; denn nur aus der Änderung ihres relativen Vorkommens bei veränderten Reaktionsbedingungen kann auf die Reihenfolge ihres Entstehens im Reaktionsmechanismus geschlossen werden.

II. Rückstoßmessungen am einseitig geschlossenen Rohr bei detonativer Verbrennung[1])

Bringt man im einseitig offenen Reaktionsgefäß ein brennbares Gemisch so schnell zum Abbrand, daß alles Gas umgesetzt ist, bevor noch die ersten Teile wegen der auftretenden Druckerhöhung unverbrannt entweichen, so ist ein beträchtlicher Schub zu erwarten. Die schnellste uns bekannte Verbrennungsform ist die detonative, und deshalb wurden

[1]) G. Damköhler, Zentrale f. wiss. Berichtswes. F. B. 1196 Berlin 1939.

6

03420

die bei ihr auftretenden Rückstöße in einem pendelnd aufgehängten, einseitig geschlossenen Rohr näher verfolgt. Es wurde bei Propan-Sauerstoff-Gemischen der Einfluß der Konzentration, der Zündstellenanordnung, der Rohrlänge und der Luftvorlagerung untersucht. Die Rückstöße je Ladungseinheit sind bei der detonativen Verbrennung von derselben Größenordnung wie die beim Paul Schmidtschen Strahlrohrantrieb im Einzelschuß gefundenen, wo jedoch offenbar nur mit einer durch die Turbulenz des Mediums sehr schnellen Flammenverbrennung gearbeitet wird. Welche von diesen beiden Verbrennungsformen beim Strahlrohrantrieb die vorteilhaftere ist, kann heute noch nicht entschieden werden, zumal sich das Abbrennen und Auspuffen bisher noch nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit und Übersichtlichkeit gasdynamisch verfolgen ließ. So ist doch z. B. noch ungeklärt, warum Paul Schmidt beim Einzelschuß je Ladungseinheit einen etwa doppelt so großen Rückstoß findet wie beim Dauerbetrieb mit etwa 50 Zündungen in der Sekunde.

In Brennstoff-Luft-Gemischen ließ sich die Detonation bisher nur durch Sauerstoffzusatz erzwingen. Dabei detonierten die Gemische mit Äther, die im Motor sehr stark zum Klopfen neigen, keineswegs leichter als die entsprechenden sehr klopffesten Gemische mit Propan. Typische Proklopfmittel, wie Ozon und Äthylnitrit, begünstigten den Detonationseinsatz nur sehr wenig, so daß auch von dieser Seite her das Klopfen im Motor und das Detonieren als zwei grundsätzlich verschiedene Vorgänge angesehen werden müssen. Am leichtesten detonieren nach unseren Erfahrungen noch Acetylen-Luft-Gemische[1]).

Einen bedeutenden Einfluß auf das Einsetzen der Detonation hat offenbar die Höhe der der gewöhnlichen Flamme vorweglaufenden Stoßwelle: So konnten die Flammengeschwindigkeiten von Propan-Sauerstoff-Gemischen nach der Bunsenbrennermethode, wo sich offenbar keine genügend hohe Stoßwelle ausbildet, bestimmt werden. Dieselben Gemische aber ergaben im einseitig geschlossenen Rohr Detonationen, und zwar war der Rückstoß und damit wohl auch der detonativ abbrennende Gasteil bei Zündung am geschlossenen Ende größer als bei Zündung am offenen Ende, offenbar deshalb, weil sich im ersten Falle eine höhere Stoßwelle ausbildet als im letztgenannten.

Zündet man den Rohrinhalt aus einer kleinen Vorkammer heraus[2]), so kann man bei geeigneter Abmessung der Verbindungsöffnung den Einsatz

[1]) Noch nicht abgeschlossene Untersuchungen von G. Damköhler u. R. Edse.
[2]) H. Havemann, Diplomarbeit, Braunschweig 1940.

6

03421

der Detonation begünstigen: Offenbar wird durch Turbulenzerzeugung eine größere Geschwindigkeit der Primärflamme und damit eine höhere Stoßwelle erzwungen. Allerdings muß die durch eine solche Vorkammer erzeugte Turbulenz sehr genau auf die Stärke der sich entwickelnden Flamme abgestimmt sein, denn man kann eine Flamme nicht nur anblasen, sondern auch ausblasen.

III. Flammen- und Schlierenaufnahmen im Rohr

Im Hinblick auf die unter II angeführten Problemstellungen wird man auch weiterhin Verbrennungen im einfachen Rohr ausführen müssen und das Fortschreiten der Flamme durch Aufnahmen teils im Eigenlicht, teils durch Fremdlicht nach der Schlierenmethode evtl. funkenkinematographisch verfolgen. Dabei ist es aber unbedingt erforderlich, nicht nur schöne Bilder aufzunehmen, sondern sie auch quantitativ auszuwerten. Es genügt nicht, nur aus der Neigung des Flammenverlaufes auf dem Film die Flammengeschwindigkeit relativ zum Rohr anzugeben; denn diese Flamme könnte ja in ein ruhendes oder ein bewegtes Gas hineingelaufen sein, und was wirklich interessiert, ist die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Flamme in das noch Unverbrannte massenmäßig hineinfrißt. Aber man muß noch mehr wissen, wenn man z. B. den plötzlichen Umschlag der langsamen Flammenverbrennung in die detonative verstehen will. Für diesen sind nämlich zum mindesten die Zustandsgrößen Druck, Dichte und Temperatur unmittelbar vor der ursprünglichen Flammenfront maßgebend, evtl. auch die Dauer dieses Zustandes, während welcher sich das Gemisch auf den Umschlag vorbereiten konnte. Man kann diese Zustandsgrößen zusammen mit der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar aus den Flammen- bzw. Schlierenaufnahmen errechnen, wenn man beachtet, daß zu jeder beobachtbaren Stoßwellengeschwindigkeit eine ganz bestimmte Änderung der Strömungsgeschwindigkeit, des Druckes, der Dichte und damit der Temperatur gehören. Die hierzu notwendigen Formeln und Diagramme werden augenblicklich von uns zusammengestellt[1]). Erst wenn man in dieser Weise Flammenaufnahmen auswertet (die Versuchsanordnung muß man eben so wählen, daß diese Auswertung nicht zu kompliziert wird!), wird man langsam verstehen lernen, warum sich z. B. in einem bestimmten Augenblick

[1]) G. Damköhler u. A. Schmidt.

6

03422

plötzlich die Flammengeschwindigkeit ändert, und man wird auch die näheren reaktionskinetischen Bedingungen finden, unter welchen eine gewöhnliche Flammenverbrennung in die detonative umschlägt.

Zwei Möglichkeiten erscheinen mir hier besonders beachtenswert, weil sie sich vermutlich hinsichtlich der Beeinflussung durch chemische Zusätze grundsätzlich unterscheiden werden: Einerseits der Umschlag vor der ursprünglichen Flammenfront (Fall 1), bei dem das Gasgemisch durch die vorweglaufende evtl. reflektierte Stoßwelle auf die Temperatur der Selbstzündung gebracht wird und diese mehrere Zentimeter vor der Flammenfront einsetzen kann. Anderseits der Umschlag in der Flammenfront (Fall 2), der überall dort erfolgen muß, wo sich eine Detonation aus einer noch relativ langsam laufenden Flamme heraus entwickelt; denn zündet man am geschlossenen Rohrende, so würde bei einer Flammengeschwindigkeit von 200 m/s relativ zum Rohr die Temperaturerhöhung in der primären vorweglaufenden Stoßwelle nur etwa 80° betragen, und diese würde nur dann für einen Detonationseinsatz ausreichen, wenn schon genügend viele Radikale und aktive Zwischenprodukte von irgendeiner besonderen Quelle her geliefert sind, die aber im wesentlichen nur in der ursprünglichen Flammenfront oder in Zusätzen selbst sitzen kann. Den Umschlag vor der Flammenfront (Fall 1) wird man vermutlich durch solche Zusätze beeinflussen können, die auch das Klopfen begünstigen oder unterdrücken, denn bei ihm handelt es sich ja ebenfalls um eine Selbstzündung des noch nicht Verbrannten. Beim Umschlag in der Flammenfront (Fall 2) hingegen werden wahrscheinlich in erster Linie solche Stoffe wirksam sein, die auch eine schon ausgebildete Flamme mit ihrem beträchtlichen Radikalvorrat in der Brennfläche beschleunigen oder verzögern oder unterdrücken können; das aber sind wohl Zusatzstoffe, die auch die Konzentrationsgrenzen des Zündbereiches merklich erweitern oder einengen.

Zündet man ein Gemisch in einem Rohr am geschlossenen Ende, so beschleunigt sich im allgemeinen die fortschreitende Flamme von selbst. Es ist jedoch z. Zt. noch ungeklärt, ob hierfür lediglich die anlaufende Turbulenz vor der ursprünglichen Flammenfront verantwortlich ist, oder ob nicht in gewissen Fällen die Flamme vielleicht auch rein chemisch beschleunigt wird dadurch, daß die für die Flammengeschwindigkeit maßgebliche chemische Reaktionsgeschwindigkeit mit der Zeit zunimmt. Dieser Fall würde eintreten, wenn in der Brennzone instationäre Ketten abliefen, bei welchen je Zeiteinheit mehr aktive Zwischenprodukte ge-

6

C3423

bildet (durch Start- oder Verzweigungsreaktionen) als vernichtet werden. Solche instationären Ketten sind ganz allgemein für die bei Oxydationsvorgängen so häufig beobachteten Induktionsperioden verantwortlich. Warum sollen sie also nicht auch einmal in einer Brennzone auftreten können, insbesondere in dem obigen Fall 2, wo der Umschlag der gewöhnlichen Flammenverbrennung in die detonative in der Flammenfront selbst stattfinden sollte? Durch systematische vergleichende Messungen der Flammengeschwindigkeitsentwicklung in Rohren bei verschiedenen Gemischen wird man entscheiden können, ob neben der hydrodynamischen Beschleunigung auch noch eine chemische möglich ist oder nicht.

6

03424

Aussprache

Eucken: Ich stimme mit Herrn Damköhler darin überein, daß es für uns jetzt eins der wichtigsten Probleme ist, schnellverlaufende Reaktionen zu messen und dabei möglichst in das Grenzgebiet der langsamen Explosionen zu kommen. Die Arbeit von Herrn Jost zielt ja schon darauf hin, die Anlaufzone und die Zündverzüge bei Entflammungen zu messen.

Vielleicht darf ich noch einige allgemeinere Gesichtspunkte, die für die Lösung dieser Aufgabe in Frage kommen, kurz erläutern. Eine Möglichkeit, rasche Reaktionen zu verfolgen, besteht darin, daß man die bereits fertig gemischte reagierende Gasmischung strömen läßt, wobei man die Strömungsgeschwindigkeit so einreguliert, daß sich ein stationärer Zustand einstellt, der durch die Ausbildung einer feststehenden Reaktionszone gekennzeichnet ist. Die Geschwindigkeit des Bruttoumsatzes ergibt sich aus der Breite der Reaktionszone. In dieser Weise vollzieht sich bekanntlich die Reaktion in gewöhnlichen Flammen (Innenkegel des Bunsenbrenners), doch ist hier die Reaktionszone so schmal, daß sie nicht unmittelbar ausgemessen werden kann. Man kann aber die Reaktionsgeschwindigkeit dadurch verlangsamen und die Breite der Reaktionszone erhöhen, indem man bei kleinen Drucken arbeitet, wie dies z. B. Wolfarth getan hat. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, daß man die zunächst getrennten Reaktionspartner rasch (bei kleinen Drucken) gegeneinander diffundieren läßt; dann läßt sich prinzipiell aus der Breite der Diffusionszone, in der sich die Reaktion abspielt, die Reaktionsgeschwindigkeit berechnen. In einem Falle wird die Reaktionsgeschwindigkeit gewissermaßen durch ihre Rivalität mit einer Strömungsgeschwindigkeit, im anderen Falle durch eine solche mit einer Diffusionsgeschwindigkeit gemessen. Die Verfahren sind selbstverständlich nicht neu; ich erinnere nur an die kalten Flammen von Polanyi und Mitarbeitern[1]), die Herrn Damköhler natürlich auch bekannt sind, ferner an die theoretische Arbeit von Förster und Geib[2]) sowie die Arbeit von Geib und Harteck[3]) im Bodenstein-Festband.

Ich glaube, man sollte jetzt doch noch einmal etwas eingehender prüfen, ob sich diese Verfahren nicht auch zur Untersuchung der Vorgänge, die sich bei normalen Verbrennungen abspielen, verwenden lassen, was, soweit mir bekannt ist, bisher noch nicht geschehen ist. Ich glaube, daß hier noch einiges zu machen sein wird. Dabei möchte ich glauben, daß die Methode der Diffusionsgeschwindigkeit etwas aussichtsvoller ist als die der Strömungsgeschwindigkeit. Man muß dann natürlich eine enge Düse nehmen und aus dieser den einen Reaktionspartner in den in einem weiten Rohr langsam strömenden anderen Reaktionspartner hinein diffundieren lassen. Auf diese Weise lassen sich störende Wandeinflüsse weitgehend ausschalten.

[1]) Vgl. mehrere Arbeiten von Polanyi und Mitarbeitern, Zs. f. phys. Chemie B Bd 1 (1928) S. 1, 30, 62, 68 usw.

[2]) Th. Förster u. K. H. Geib, Ann. Phys. Bd 20 (1934) S. 250.

[3]) Vgl. auch K. H. Geib u. P. Harteck, Ber. d. Dt. chem. Ges. Bd 66 (1933) S. 1815 sowie K. H. Geib, Atomreaktion Erg. d. exakt. Naturw. Bd 15 (1936) S. 44.

6

03425

Ich darf vielleicht noch kurz eine sehr schöne Methode erwähnen, durch die man extrem hohe Reaktionsgeschwindigkeiten ermitteln kann und die auf einer Messung der Schalldispersion beruht. Die Idee ging seinerzeit von Nernst aus; die strenge Theorie wurde von Einstein entwickelt (Berliner Akademieberichte 1920). Der Grundgedanke ist sehr einfach: Die Mischung befindet sich im thermischen Gleichgewicht. Durch die Schallwellen werden nun in dem Gase rasch wechselnde adiabatische Kompressionen und Dilationen erzeugt. Jetzt sind zwei Grenzfälle denkbar: 1. die Reaktionsgeschwindigkeit ist so groß, daß die Gleichgewichtseinstellung dauernd den Schallschwingungen zu folgen vermag; 2. die Reaktionsgeschwindigkeit ist sehr klein; dann verhält sich das Gas wie eine normale indifferente Gasmischung (wie Luft u. dgl.).

Für beide Grenzfälle erhält man bestimmte Grenzwerte der Schallgeschwindigkeit. In der Mitte liegt natürlich der Fall einer endlichen Reaktionsgeschwindigkeit. Es ist daher einleuchtend, daß man aus der (leicht zu messenden) Schallgeschwindigkeit, die hier ein Gebiet der Dispersion durchläuft, die Reaktionsgeschwindigkeit berechnen kann. Die zur Auswertung erforderlichen Formeln sind allerdings ziemlich kompliziert. Bei Verbrennungen käme die Methode selbstverständlich auch nur für das Gebiet sehr hoher Temperaturen in Frage, bei denen sich ein Gleichgewicht einstellt. Dadurch wird ihre Anwendbarkeit für die uns interessierenden Fragen zwar stark beeinträchtigt; trotzdem sollte man sie wohl doch im Auge behalten, da eine Kenntnis der Reaktionsgeschwindigkeiten in diesem Gebiet von erheblichem Interesse wäre (z. B. für die Frage der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Entflammungen).

Damköhler: Die wirkliche Schwierigkeit bei der Aufklärung von Verbrennungsvorgängen liegt ja darin, daß man Produkte abfangen will und sie dann erst qualitativ und dann quantitativ analysieren muß. Und dabei ist gerade die Methode der Schalldispersion, die auch nur bei ganz einfachem System angewandt und rechnerisch verfolgt werden kann, nicht brauchbar. Nun die andere Sache mit der Diffusion: Wenn man weiß, daß die Reaktionsgeschwindigkeit doch von der Dichte abhängt, dann möchte man eigentlich bei noch höheren Drucken untersuchen, also nicht nur bei Atmosphärendruck, sondern möglichst auch bei einem Druck von 10 at, wie er im Motor vorliegt. Dann wird man aber zwangsläufig auf die angegebene Apparatur geführt.

Eucken: Soweit ich es zu übersehen vermag, steht doch wohl immer noch ganz im Vordergrund das Klopfproblem, das wir, wenn wir ehrlich sein wollen, noch nicht als endgültig gelöst betrachten können; wenn auch durch die Erkenntnis, daß es sich beim Klopfen um das Einsetzen einer Wärmeexplosion an verschiedenen Stellen des Raumes handelt, bereits eine wichtige Grundlage gewonnen ist. Sollte man nicht einmal versuchen, darauf einen größeren strategisch angelegten Generalangriff anzusetzen, obgleich dies sicher nicht ganz einfach sein wird? Der Angriff müßte von zwei Seiten aus erfolgen, von der motorischen und der physikalisch-chemischen Seite. In der Mitte müßte man sich dann irgendwo begegnen, wahrscheinlich eben bei der Raumexplosion. Einen in praktischer Hinsicht wichtigen Richtpunkt sollten hierbei irgendwelche Kennzahlen bilden. Die jetzige Oktanzahl genügt meines Erachtens nicht; den Eindruck mußte man ja heute wieder aufs neue gewinnen. Wir müssen daher noch andere Kennzahlen hinzunehmen. Es bestünde also die Aufgabe, zu diesen Kennzahlen erstens einmal von der rein substantiellen, also der atomphysikalischen

6

03426

Seite her zu gelangen, und zweitens muß man feststellen, wie reagiert auf diese »theoretischen Kennzahlen« der Motor? Man könnte umgekehrt auch auf rein praktischem Wege zu empirischen Kennzahlen kommen durch eine Art Großzahlforschung, also von der motorischen Seite her. Und dann könnte man sich in der Mitte auf irgendwelche Kennzahlen einigen. Wahrscheinlich wird man dabei zu einer komplizierten Formel kommen, durch die die verschiedenen Kennzahlen mit den für den einzelnen Motor charakteristischen Größen verknüpft sind. Jedenfalls würde ich mir in dieser Weise ein allgemeines Programm vorstellen, das aber natürlich noch viel genauer durchdacht werden muß. Vorläufig fehlt es wohl noch hauptsächlich an den atomphysikalischen (bzw. reaktionskinetischen) Unterlagen; aber auch von der motorischen Seite her wird noch allerhand zu tun sein, da das sich von hier aus darbietende Bild noch keineswegs als klar zu bezeichnen ist. Als Beispiel erwähne ich nur die Unterschiede der Ergebnisse für die Oktanzahl, die man mit der Motor- und der Researchmethode erhält. Da ist doch offenbar noch mindestens eine Variable wirksam, die noch nicht richtig erfaßt ist.

Pier: Die O. Z.-Unterschiede bei der Bestimmung nach der Motor- und Researchmethode beruhen in erster Linie auf dem Einfluß der Temperatur. Während bei der Researchmethode das Brennstoff-Luft-Gemisch Raumtemperatur hat, wird es bei der Motormethode auf 150° vorgewärmt. Die Unterschiede der nach den beiden Methoden bestimmten O. Z. sind geradezu ein Maß für die Temperaturempfindlichkeit der verschiedenen Brennstoffe. Bestimmt man die Leistungskurven bei verschiedenen Kraftstoffluftverhältnissen und vergleicht die Werte bei einer Luftüberschußzahl von $\lambda = 0{,}9$ und $\lambda = 1{,}1$, so ist der Unterschied bei Kraftstoffen, wie Isooktan, nur gering, bei anderen, z. B. den Aromaten, verhältnismäßig groß. Trägt man die Empfindlichkeit des Kraftstoffes gegenüber dem Brennstoffluftverhältnis, die durch die Differenz der Leistung bei $\lambda = 0{,}9$ und bei $\lambda = 1{,}1$ ausgedrückt sein möge, und die Differenz der O. Z. zwischen Motor- und Researchmethode auf, so ergibt sich eine lineare Beziehung. Es zeigt sich also in beiden Gruppen der Temperatureinfluß; die Aromaten sind temperaturempfindlicher als die Paraffine. Vielleicht ist die primäre Wasserstoffsuperoxydbildung auf den Eintritt des Klopfens von Einfluß.

Eucken: Das sind zweifellos sehr wertvolle Hinweise; das Ziel wäre aber doch, das Quantitative zu erfassen. Durch Verwendung von Kennzahlen wurden ja in den letzten Jahren bereits auf anderen Gebieten der technischen Forschung hervorragende Erfolge erzielt. Der dort eingeschlagene Weg war aber meistens der, daß man die in Frage kommenden Kennzahlen zunächst von der Theorie her festlegte, nicht wie bei der Oktanzahl von der Praxis her. Deshalb sollte man, wie ich glaube, zunächst einmal ganz von vorne anfangen und dabei keine allzu große Rücksicht auf das nehmen, was bereits eingebürgert ist, wie z. B. die Oktanzahl. So erfreulich sich die Arbeit zwischen den Motorenbauern und Physikochemikern im Laufe der vergangenen Jahre gestaltet hat, das letzte fehlt vorläufig noch. Es liegt aber in der Natur der Sache, daß das nicht aus dem Ärmel geschüttelt werden kann. Vielleicht machen die übrigen Herren Gegenvorschläge?

v. Philippovich: Ich möchte darauf hinweisen, daß im allgemeinen bei technischen Problemen die Frage immer wieder auftaucht, wie man Vorgänge komplexer Natur sauber

6

03427

erfassen kann. Einerseits wünscht man sehr genaue Einzelkenntnisse, um einen komplexen Vorgang beherrschen zu können, das setzt aber anderseits voraus, daß der technische Vorgang in seinen Bedingungen auch so eindeutig erfaßbar ist, daß man die sauberen Einzelerkenntnisse auf ihn übertragen kann. Beim Schmierungsproblem ist es genau dasselbe, es sind da unheimlich viel Einzelfaktoren, die in Frage kommen, z. B. Absorptionseffekt, Wärmeeffekt usw. Man kann alle diese einzelnen Faktoren sehr sauber untersuchen, und es ist jetzt die Frage, ob diese verschiedenen, sauber gemessenen physikalischen Einzeleigenschaften so kombiniert werden können, daß man dann einen komplexen Vorgang, den man nicht sauber messen kann, überhaupt in seiner Gesamtheit voraussagen kann. Es ist meiner Ansicht nach natürlich notwendig, daß man versucht, eine saubere Erkenntnis zu bekommen, gleichzeitig aber, daß man sich bewußt ist, daß da vieles vielleicht überhaupt niemals zu erreichen ist. Das, was an Einzelbedingungen interessiert, werden wir im technischen Vorgang wohl niemals restlos erfassen können.

Eucken: Ich gebe zu und habe dies auch durch meine Ausführungen bereits deutlich zum Ausdruck gebracht, daß es sich um eine ungewöhnlich schwierige Aufgabe handelt; man sollte sich aber nicht hierdurch entmutigen lassen. Selbst wenn man das angestrebte Ziel nicht 100prozentig erreicht, würde sich die Arbeit doch wahrscheinlich lohnen.

Nusselt: Vom rein wissenschaftlichen Standpunkt aus gesehen halte ich von der Oktanzahl nicht viel, ist sie doch unter anderem nach den Versuchen von Ricardo stark von der Zylindergröße abhängig. Die Oktanzahl ist aus den Bedürfnissen der Praxis entstanden und hat sich zur Beurteilung des Brennstoffes da sehr gut bewährt. Sie ist sicher für praktische Zwecke sehr brauchbar, aber ich glaube, daß man bei physikalisch-chemischen Betrachtungen nicht viel mit ihr anfangen kann. Bis vor kurzem lag die Schwierigkeit beim Klopfproblem darin, daß man nicht wußte, ob die Ursache des Klopfens das Auftreten der Explosionswelle im Zylinder ist oder ob sie in der Selbstzündung des Gasrestes liegt. Nachdem nun wohl als feststehend zu gelten hat, daß die Selbstzündung des Gasrestes und die dadurch bedingte plötzliche Verbrennung desselben zum Klopfen des Motors führt, so ist man dadurch ein großes Stück vorwärts gekommen. Meines Erachtens hängt das Eintreten des Klopfens von 3 Größen ab. Eine dieser Bestimmungsgrößen ist der Wärmeaustausch zwischen Gas und Zylinderwand. Wir haben ja vorher gehört, wie wichtig die dadurch beeinflußte Temperatur des Gasrestes ist. Sie hängt außer vom Wärmeübergang als 2. Größe noch von der Zündgeschwindigkeit im Motor ab. Die 3. Einflußgröße ist der Zündverzug, der bei der Selbstzündung des Gasrestes auftritt. Wenn man demnach die 3 Größen: Wärmeübergang, Zündgeschwindigkeit und Zündverzug in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung kennt, dann kann man das ganze Problem des Klopfens rechnerisch lösen. Mit der Untersuchung jener drei Aufgaben bin ich in meinem Laboratorium in der Technischen Hochschule in München beschäftigt.

E. Schmidt: Ich glaube, daß man die Sache von verschiedenen Richtungen her angreifen muß. Die eine Richtung ist die der reaktionskinetischen Forschung, wobei man sich weder auf die Brennstoffe noch auf die Betriebsbedingungen des Motors beschränken kann, sondern weiter ausholen muß, wie das von Herrn Eucken und Herrn Damköhler schon geschieht. Dies ist der Weg, auf dem der physikalische

6

03428

Chemiker an das Problem herangeht. Außerdem wird man Bombenversuche machen, um idealisierte Verbrennungskurven zu gewinnnen unter Bedingungen, die denen im Motor schon näher kommen. Schließlich wird man am Motor selbst Versuche anstellen, wobei es aber noch einer erheblichen Verfeinerung der Meßtechnik bedarf. Eine vorbereitende Arbeit in dieser Richtung waren unsere Versuche zur Entwicklung eines genaueren piezoelektrischen Druckmeßgerätes, über die ich berichtet habe. Vielleicht kann man auch dadurch, daß man den Motor unter extremen Bedingungen fährt, z. B. mit sehr kaltem oder sehr warmem Kühlmittel usw., zu wichtigen Erkenntnissen kommen. Aber auch die gewöhnlichen Bedingungen, unter denen ein Motor betriebsmäßig läuft, müssen viel genauer erfaßt werden, damit wir z. B. dem physikalischen Chemiker (Herr Jost hat hier besondere Wünsche zum Ausdruck gebracht) wirklich sagen können, wie der Zustand des Gemisches im Zylinder in einem gegebenen Zeitpunkt ist, z. B. mit welcher Temperatur des Gemisches die Verdichtung beginnt. In dieser Weise muß man von drei verschiedenen Seiten gleichsam einen konzentrischen Angriff auf das Klopfproblem machen.

Bezüglich der Großzahlforschung an Motoren bin ich allerdings skeptisch. Denn die Anzahl der Veränderlichen ist bei einem so komplizierten Gebilde wie dem Motor ungeheuer groß und jede einzelne ist nur ungenau bekannt. Außerdem ist bei sehr großer Anzahl der Versuche kaum mehr festzustellen, in welchen Punkten die Versuchsbedingungen übereinstimmen und worin sie voneinander abweichen.

Eucken: Man kannn sich ja auf 4 bis 5 der hauptsächlichsten im Gebrauch befindlichen Motoren beschränken und für diese die Großzahluntersuchungen durchführen, um sagen zu können, ein bestimmter Brennstoff würde sich in einem bestimmten Motor so und so verhalten. (Bisher kann man das wohl noch nicht.) Um dieses Ziel zu erreichen, wäre es freilich wünschenswert, wahrscheinlich sogar notwendig, auch die Vorgänge bei der Verbrennung im Motor noch besser theoretisch (in bezug auf Strömungsvorgänge, Wärmeübergang usw.) zu erfassen, als es bisher möglich war.

v. Philippovich: In der Richtung laufen bei uns Versuche mit Einzylindermotoren. Es werden verschiedene Brennstoffe durchgemessen; wir versuchen, eine solche Charakteristik zu bekommen, und hoffen, sie auf diese Weise zu erreichen.

Eucken: Da werden Sie freilich nicht nur mit der Oktanzahl auskommen.

E. Schmidt: Da das Wort nicht mehr gewünscht wird, darf ich zum Schluß allen Vortragenden und Diskussionsrednern für ihre Anregungen im Namen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung herzlich danken. Ich möchte anregen, den hier begonnenen Meinungsaustausch auch schriftlich fortzusetzen, bis wir wieder einmal zu einer Aussprache zusammenkommen. Sollten von Ihrer Seite Vorschläge oder Wünsche zur Durchführung eigener Versuche vorliegen, für die Ihnen Mittel oder sonstige Hilfe erwünscht sind, so bitte ich, sich dabei an die Akademie zu wenden. Wir sind gern bereit, Ihnen im Rahmen unseres Aufgabenbereiches durch Mittel und Ratschläge zu helfen. Damit schließe ich die heutige Sitzung und danke Ihnen nochmals für Ihr Erscheinen.

6

03429

Vortragende und Ausspracheredner

* Mitglieder der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung

Damköhler, Gerhard, Dr. habil., Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig, Postfach 390.

Eucken, Arnold, Professor Dr., Direktor des Instituts für Physikalische Chemie der Universität Göttingen, Göttingen, Bürgerstr. 50.

Jost, Wilhelm, Professor Dr. sc. nat., Vorstand der Abteilung für angewandte Physikalische Chemie des Physikalisch-Chemischen Instituts der Universität Leipzig, Leipzig, Linnéstr. 2.

Lindner, Werner, Professor Dr.-Ing., Technische Hochschule Breslau, Breslau, Borsigstr. 21.

List, Hans, Professor Dr.-Ing., Technische Hochschule Graz, Graz, Heinrichstr. 126.

* Lorenz, Hermann, Flieger-Oberstabsingenieur, Dr.-Ing., Reichsluftfahrtministerium, Berlin SW 68, Jerusalemer Str. 65/66.

Nusselt, Wilhelm, Professor Dr.-Ing. E. h., Vorstand des Laboratoriums für Wärmekraftmaschinen, Technische Hochschule München.

* v. Philippovich, Alexander, Dr. phil., Institutsleiter in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V., Berlin-Adlershof, Rudower Chaussee.

Pier, Matthias, Dr., Dr.-Ing. E. h., Direktor der I. G. Farbenindustrie A. G., Ludwigshafen (Rhein).

* Schmidt, Ernst, Professor Dr.-Ing., Leiter des Instituts für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig, Postfach 390.

Schmidt, Fritz A. F., Dr.-Ing. habil., Institutsleiter in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V., Berlin-Adlershof, Rudower Chaussee.

* Triebnigg, Heinrich, Professor Dr.-Ing., Leiter der Fachrichtung Luftfahrt in der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Hochschule Berlin, Berlin-Charlottenburg, Berliner Str. 170/172.

Zinner, Karl, Dr.-Ing., Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg, Augsburg.

6

03430

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Eröffnung der Sitzung	3
Über Aromatenkraftstoffe Von Matthias Pier	7
Aussprache zum Vortrag von Herrn M. Pier	31
Selbstzündung von Brennstoff-Luftgemischen durch adiabatische Verdichtung und ihr Klopfverhalten im Motor Von Wilhelm Jost	37
Aussprache zum Vortrag von Herrn W. Jost	43
Arbeiten des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen an der Technischen Hochschule Graz Von Hans List	53
Aussprache zum Vortrag von Herrn H. List	58
Arbeiten aus dem Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig Von Ernst Schmidt	63
Aussprache zum Vortrag von Herrn E. Schmidt	77
Physikalisch-chemische Probleme bei Verbrennungsvorgängen Von Gerhard Damköhler	83
Aussprache zum Vortrag von Herrn G. Damköhler	89

Reichsdruckerei
7790 40 2 B°

6

03431

Klopfuntersuchungen an einem Einzylindermotor unter besonderer Berücksichtigung des Klopfverzugs

Dipl.-Ing. A. Süss

03432

Inhaltsangabe

Seite

Einleitung..... 51

Versucheinrichtung:

1.Versuchsmotor..... 53

2.Messung der Klopfstärke und des Klopfverzuges..... 54

Versuchsdurchführung..... 57

Versuchsergebnisse:

1.Bedeutung des Klopfverzugs..... 65

2.Reproduzierbarkeit..... 68

3.Unregelmäßigkeiten im Klopfen bei aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen bei Vergaserbetrieb..... 69

4.Versuche mit drei Benzinen gleicher Oktanzahl..... 78

5.Beziehung zum praktischen Fahrbetrieb..... 84

6.Versuche mit Benzineinspritzung..... 85

7.Ermittlung des Klopfbeginns..... 89

Zusammenfassung..... 91

03433

Einleitung

Die Entwicklung der Verbrennungsmotoren nach hoher Literleistung und dem damit für die Praxis so wichtigen geringen Leistungsgewicht wurde durch die Neigung der Kraftstoffe zum Klopfen gehemmt. Es mußten Kraftstoffe und Motoren geschaffen werden, die in bezug auf das Klopfverhalten bestmögliche Eigenschaften aufwiesen. Die zahlenmäßige Bewertung dieser Eigenschaften stellte daher eine Forderung dar, die für die Weiterentwicklung der Kraftstoffe und Motoren von größter Bedeutung wurde. Ricardo hat erstmals eine Kraftstoffbewertung unmittelbar im Motor selbst vorgenommen. Er führte den Begriff des höchsten nutzbaren Verdichtungsverhältnisses ein, um das Verhalten der verschiedenen Kraftstoffe zahlenmäßig zu kennzeichnen. Um einen Maßstab der Klopffestigkeit zu bekommen, der soweit als möglich von der einzelnen Prüfmaschine unabhängig ist, wurden von Graham Edgar Isooktan und Heptan als Bezugskraftstoffe vorgeschlagen, durch deren Vermischung die verschiedenen Klopffestigkeiten erreicht werden konnten. Entsprechend dem Prozentgehalt an Isooktan erhielt Isooktan die Oktanzahl 100, Heptan die Oktanzahl 0. Aus Gründen der einfachen Herstellung wurden von der I.G. andere Bezugskraftstoffe hergestellt.(Eichstoff Z und Eichbenzin) Mit diesen Testgemischen werden die zu prüfenden Kraftstoffe in besonderen Prüfmotoren bei festgelegten Betriebsbedingungen miteinander verglichen.

Unterzieht man die heutige Kraftstoffbewertung einer Kritik, so ist festzustellen:

Die OZ-Bestimmung ergibt nicht immer einen eindeutigen Zusammenhang mit dem Verhalten im praktischen Betrieb. Bei dieser Prüfmethode wird ausschließlich mit starkem Klopfen gearbeitet. Für die Beurteilung des Kraftstoffes sind aber auch das schwache Klopfen und der Klopfbeginn wichtig, da auch bereits leichtes Klopfen zu Motorschäden führen kann, wenn es im Dauerbetrieb auftritt.

03434

Kraftstoffe gleicher OZ können sich in Mehrzylindermotoren verschieden verhalten. Es treten Unterschiede auf, je nachdem es sich um ein verbleites Benzin oder um ein Benzol-oder Alkoholgemisch handelt. Außerdem kann auch das jeweilige Grundbenzin eine Rolle spielen. Je nach dem Herstellungsverfahren - ob aus Erdöl oder Braunkohle oder durch Kohle-Teer-oder CO-Hydrierung gewonnen - ergeben sich etwas andere Zusammenhänge.

Es sollten deshalb einmal grundlegende motorische Untersuchungen durchgeführt werden, die außer der Stärke des Klopfens auch den vor dem eigentlichen Klopfen stattfindenden Reaktionsablauf berücksichtigen. Ein kennzeichnendes Merkmal dieses Reaktionsablaufes scheint die Zeitspanne zwischen Zündung und Klopfeinsatz zu sein, die im folgenden in Anlehnung an den Begriff des Zündverzuges als "Klopfverzug" bezeichnet wird.

03435

Versuchseinrichtung

1. Versuchsmotor

Die Versuche wurden an einem dem CFR-Motor nachgebildeten Einzylindermotor durchgeführt, dessen Verdichtung durch Verstellen des Zylinderkopfes von 4:1 bis 13:1 geändert werden kann. Seine Daten sind:

Hubvolumen	:	496 cm^3
Hub	:	104 mm
Bohrung	:	78 mm

Am Motor sind Einrichtungen angebracht, die es gestatten, das Mischungsverhältnis, den Zündzeitpunkt, die Kühlwassertemperatur und die Ansaugluftemperatur beliebig zu verändern. Zur Regelung der Drehzahl und zur Leistungsmessung wurde ein Gleichstrompendeldynamo verwendet, der durch Widerstände belastet werden kann. Als Vergaser diente ein Zweischwimmervergaser, der in einfacher Weise durch Heben und Senken des Schwimmerstandes, also ohne Düsenwechsel, gestattet, das Mischungsverhältnis zu verändern. Unter den normalen Betriebsbedingungen, die später zum Vergleich herangezogen werden, seien folgende Verhältnisse verstanden:

Drehzahl	:	900 U/Min
Zündung	:	26°KW vor OT
Vergasereinstellung:		30
Kühlwassertemperatur:		75 - 80°
Ansaugluftemperatur:		15°C

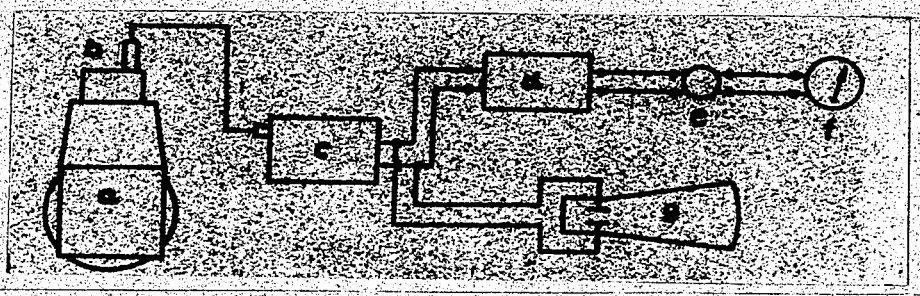
Außerdem wurde die Anlage mit einem Wasserringübertrager, Bauart Dr.Nier-Dresden, ausgerüstet.

03436

2.Messung der Klopfstärke und des Klopfverzugs

Die Messungen wurden mit der von A.W.Schmidt entwickelten elektroakustischen Klopfuntersuchungsmethode durchgeführt.(5) Dieses Verfahren weist den grundlegenden Vorteil auf, daß die Meßeinrichtung nicht in unmittelbare Verbindung mit dem Verbrennungsraum gebracht werden muß, also der Motor nicht anzubohren ist, wie das beim Springstiftindikator, der Quarzkammer usw. der Fall ist. Es war lediglich die Anbringung einer Lasche an eine der Zylinderkopfschrauben zur Übertragung des Körperschalls erforderlich.

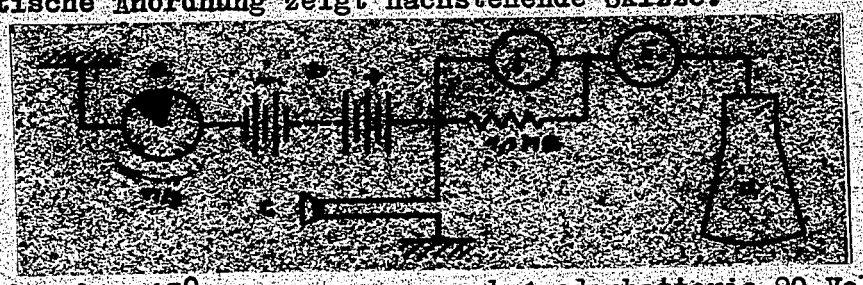
Als Maß für die Klopfstärke dient die Amplitudenhöhe des auf dem Schirm der Braun'schen Röhre sichtbaren Geräusches. Durch Ausmessung der photographisch aufgenommenen Amplitudenhöhen mehrerer Klopfschläge und arithmetische Mittelung konnte ein Maßstab für die Klopfneigung des Kraftstoffes gewonnen werden. Um in ähnlicher Weise wie beim Springstiftindikator eine bequeme Messung zu ermöglichen, wurde in der Folgezeit eine weitere Einrichtung geschaffen, welche auf einem Zeigerinstrument einen der jeweiligen mittleren Klopfstärke entsprechenden Wert abzulesen gestattet.(3) Die Anordnung der Meßgeräte ist aus nachstehender schematischer Darstellung zu ersehen.



a Motor b Geber c Siebverstärker
d Leistungsverstärker e Thermoumformer
f Klopfstromanzeigegerät g Elektronenstrahlosz.

+ Die Zahlen in runden Klammern beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis am Ende der Arbeit.

Da nun in vorliegender Arbeit neben der Geräuschintensität auch der Klopfverzug, d.h. die zwischen Zündpunkt und Geräuscheinsatz verstreichende Zeitspanne interessiert, wurde die Anlage, wie oben erwähnt, mit einem Wasserringübertrager ausgerüstet, der ein stehendes Bild auf dem Oszillographenschirm ermöglicht. In meßtechnischer Hinsicht stellen sich wegen der durch das Prinzip des Wasserringübertragers bedingten Rückläufe des Oszillographenstrahles Schwierigkeiten ein. Durch eine besondere Schaltanordnung(6) konnte dieser Nachteil beseitigt werden. Zu diesem Zweck wurde ein Erhebungsnocken auf der Nockenwelle angebracht, der die einer Anodenbatterie entnommene Spannung von 90 Volt während des nicht interessierenden Zeitabschnittes (bei 90° Auseinanderziehung 630°KW) erdet und somit den Elektronenstrahl ablenkt. Da der Unterbrecher auf der Nockenwelle sitzt, die mit der halben Drehzahl läuft, darf die Erhebung, die die Erdverbindung unterbricht, nur 45° betragen.Die schematische Anordnung zeigt nachstehende Skizze.



a Unterbrecher 45°
b Anodenbatterie 90 Volt
c Mikrophon
d Elektronenstrahloszillograph
I und II Verstärkerstufen

03438

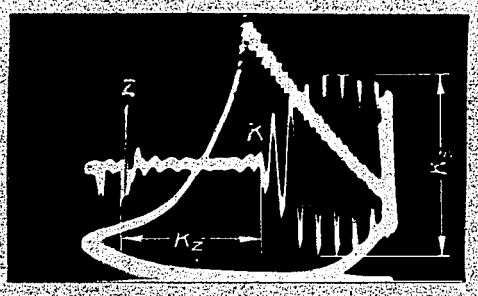


Bild 1

Z = Zündzeitpunkt
K_z = Klopfverzug

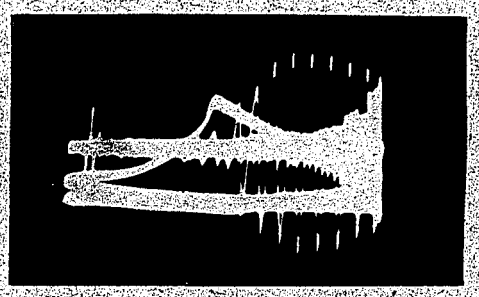


Bild 2

K = Klopfeinsatz
K_s = Klopfstärke

Bild 1 zeigt eine Aufnahme, diemittels der oben beschriebenen Messeinrichtung erhalten wurde.

Bild 2 gibt die durch den Rücklauf des Strahles hervorgerufene Störung wieder.

Versuchsdurchführung

Untersuchungen, die den Klopfeinsatzpunkt gegenüber dem Zündzeitpunkt betreffen, wurden bereits früher von K.Generlich durchgeführt.(5) Wenn auch gewisse Zusammenhänge zwischen Klopfwert und Klopfverzug erkannt werden konnten, wiesen doch die einzelnen Versuchspunkte sehr große Streuungen auf, so daß ein einwandfreier Vergleich unter den verschiedenen Betriebsbedingungen unmöglich war. Der Grund hierfür lag einerseits in dem damals noch mit Luftschall arbeitenden elektroakustischen Klopfmeßverfahren, bei dem die Klopfgeräusche sich nicht prägnant genug aus dem Gesamtgeräusch des Motors hervorhoben; andererseits fehlte eine hierfür geeignete Aufnahmeeinrichtung. Da die Vorgänge auf einem laufenden Film aufgenommen wurden, ergaben sich gewisse Ungenauigkeiten dadurch, daß die Filmgeschwindigkeit nicht genau konstant gehalten werden konnte. Infolgedessen mußte bei der Umrechnung eines Arbeitsspieles in Grad Kurbelwinkel immer das Mittel des zu dem betreffenden Klopfschlag gehörigen Arbeitsspieles und des vorhergehenden eingesetzt werden. Bei Übertragung der Geräusche durch Luftschall bestand ein weiterer Nachteil darin, daß der auf diese Weise ermittelte Winkelweg nicht den Kurbelwinkelgraden entsprach, die von der Zündung bis zum Klopfeinsatz verstrichen. Da das Mikrophon in einer gewissen Entfernung vom Motor stand, mußten die Winkelgrade in Abzug gebracht werden, welche die Kurbel in der Zeit zurücklegt, in der die Schallwellen das Mikrophon erreichen. Bei der geringen Luftschallgeschwindigkeit von 333 m/sec. beträgt diese Beeinflussung bei 800 U/min. und einer Mikrophonentfernung von 95 cm immerhin 14° Kurbelwinkel. Bei der in der Zwischenzeit am gleichen Institut entwickelten elektroakustischen Klopfmeßmethode mit Körperschallübertragung (ungefähr 5000 m/sec.) kann diese Verzögerung des Klopfeinsatzes vernachlässigt werden, da sie außerhalb der Meßgenauigkeit liegt. Die Entfernung des Mikrophons vom klopfenden Gemischrest beträgt ungefähr 10 cm. Bei einer Körperschallgeschwindigkeit von 5000 m/sec.

ist dazu eine Zeit von

1 / 50000 sec. nötig.

Bei 900 U/min. entspricht diese Zeit einem Kurbelwinkelweg von

$$\frac{900 \cdot 360}{60 \cdot 50000} = 1/10^{o} \text{ Kurbelwinkel}$$

Ein weiterer Vorteil bei Verwendung des Körperschalls besteht darin, daß durch diese Geräuschübertragung Fremdgeräusche besser zurückgehalten werden können.

Weitere Untersuchungen über den Klopfverzug wurden von H.Funck+) vorgenommen. Bild 3 zeigt eine Klopfverzugsaufnahme der damligen Versuche. Der Klopfvorgang wurde hier bereits als stehendes Bild aufgenommen. Die zeitliche Länge des Klopfverzugs wurde aus einem gleichzeitig aufgenommenen Zeitmarkenbild (unterer Strahl des Oszillographen) ermittelt. Bei diesen Versuchen handelte es sich zunächst um Vorversuche, welche die grundsätzliche Meßmöglichkeit zeigen sollten. Auf die Beeinflussung des Klopfverzugs durch die Betriebsbedingungen oder durch die chemische Konstitution wurde noch nicht eingegangen.

+)H.Funck,Bestimmung des Einsatzpunktes des Klopfschlages Versuchsbericht d.deutschen Forschungsgemeinschaft Mai 1942

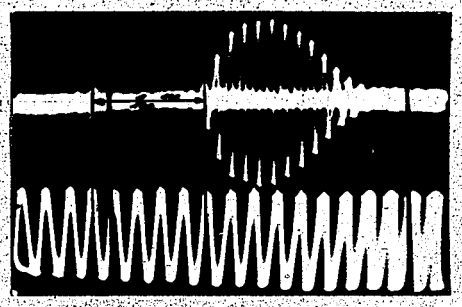


Bild 3

Im vorliegenden Fall war die Aufgabe gestellt, Zusammenhänge zwischen Klopfstärke und Klopfverzug einerseits und den motorischen Betriebsbedingungen und Kraftstoffeigenschaften andererseits in größerem Rahmen festzustellen. Zu diesem Zweck kamen nur Meßverfahren in Frage, bei denen mit einem Minimum an Zeitaufwand die hinsichtlich der Genauigkeit gestellten Ansprüche erfüllt werden können. Auf Grund der Tatsache, daß der Klopfvorgang sich während der aufeinanderfolgenden Arbeitsspiele nicht in stets gleichbleibender Weise abspielt, sondern Schwankungen unterworfen ist, mußte außerdem eine Mittelwertbildung möglich sein. Das Problem, eine mittlere Klopfstärke zu erhalten, war durch die vorher wiedergegebene Schaltanordnung bereits dadurch gelöst, daß dieser Wert auf einem Zeigerinstrument abgelesen werden konnte Für die Messung des mittleren Klopfverzugs gab es zwei Möglichkeiten:

1. visuelle Auswertung der auf dem Leuchtschirm erscheinenden Oszillogramme
2. photographische Registrierung

KODAK SAFE

03442

Zu 1: zu diesem Zweck wurden am Oszillographen vor dem Leuchtschirm zwei verschiebbare Marken angebracht. Die erste wird auf den Zündfunken eingestellt und braucht während des ganzen Versuches nicht mehr verschoben werden. (Wenn auch kleine Zündschwankungen bei den einzelnen Arbeitsspielen auftreten, so zündet doch der Motor im Mittel immer an der gleichen Stelle.) Um keine allzu störende Beeinflussung der Oszillogramme durch den Zündfunken zu bekommen, wurden ähnliche Vorkehrungen getroffen wie sie auch bei Flugmotoren verwendet werden.(teilweise Abschirmung der Zündanlage, ein-oder mehrmaliges Vorbeiführen des Mikrophonkabels am Zündkabel). Die zweite Marke wird auf den mittleren Klopfbeginn eingestellt. Der Abstand zwischen den beiden Marken stellt den Klopfverzug dar. Es erschien wünschenswert, den Abstand sofort in Grad Kurbelwinkel auf der Röhre ablesen zu können. Mit Hilfe einer auf durchsichtiges Papier gezeichneten Skala, die eine der Länge des Oszillographenbildes entsprechende Kurbelwinkelgradeinteilung aufwies, war dies ohne weiteres möglich. Der zweite Oszillographenstrahl konnte zur Indizierung verwendet werden.

Zu 2: wenn sich auch die vorhergehende Methode sehr gut bewährte, so wies die doch den Nachteil auf, daß die Meßergebnisse später nicht mehr kontrolliert werden konnten. Außerdem hatte sie noch den Nachteil, daß keine Zusammenhänge zwischen Klopfwert und Klopfverzug der unmittelbar aufeinander folgenden Arbeitsspiele aufgestellt werden konnten, daß also Klopfwert und Klopfverzug nur mittelwertmäßig erfaßt werden konnten. Der Gedanke an eine filmische Auswertung bei stillstehendem Elektronenstrahl, wobei die Auseinanderziehung durch die Filmgeschwindigkeit zustande kommt, kann jedoch keine befriedigende Lösung darstellen; denn die Filmgeschwindigkeit müßte, um die nötige Genauigkeit zu erreichen, mindestens 2 bis 3 m/sec. betragen, abgesehen davon,

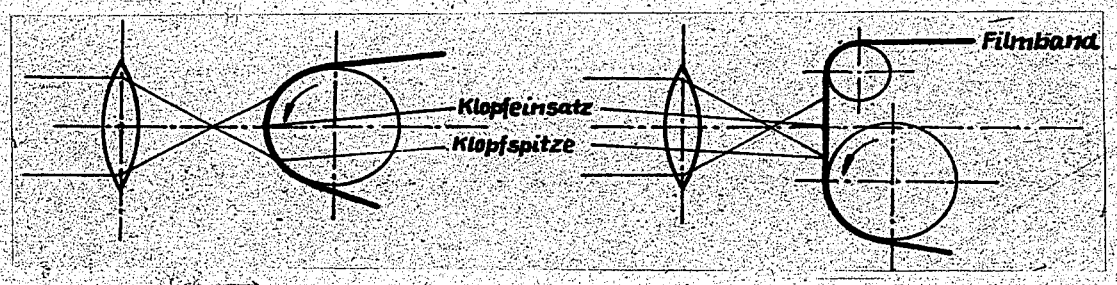
dass diese Methode höchst unwirtschaftlich wäre. (für 5o Arbeitsspiele ungefähr lo m Filmband) Ein Versuch, das durch den Wasserringübertrager auseinandergezogene laufende Oszillographenbild filmisch auszuwerten, führte zu vollem Erfolg. Bei Anwendung sehr kleiner Filmgeschwindigkeiten kann der interessierende Teil der einzelnen Arbeitsspiele unmittelbar hintereinander aufgenommen werden, so dass beispielsweise für die Auswertung von 5o Arbeitsspielen ungefähr 1 m Filmband benötigt wird. Bei der Wahl der richtigen Filmgeschwindigkeit ist die Grösse des Klopfausschlages massgebend. So kann bei ruhigen Lauf oder bei Klopfbeginn die Filmgeschwindigkeit sehr klein sein. Mit zunehmendem Klopfen ist auch die Filmgeschwindigkeit zu vergrössern, so dass die einzelnen Klopfausschläge nicht in einander übergehen. Wie Abb. 5 und 6 zeigen, kann durch diese Aufnahmemethode für jeden einzelnen Arbeitstakt die Grösse des Klopfausschlages und der Klopfeinsatzpunkt kontrolliert werden.

Bevor die Versuche durchgeführt werden konnten, musst e bei der verwendeten Registrierkamera eine kleine Änderung vorgenommen werden. Da das Filmband hinter dem Objektiv über eine Rolle lief, konnte der Klopfeinsatzpunkt und die maximale Klopfamplitude nicht in der Brennschärfe des Objektivs liegen. Ausserdem werden die Klopfausschläge mehr oder weniger verzerrt, wie aus der schematischen Darstellung zu ersehen ist. Nach Versetzen des Objektivs und nach Einbau einer Rolle derart, dass sich das Filmband senkrecht zur Projektionsrichtung bewegt , arbeitete die Kamera zufriedenstellend. Durch diese einfache Aufnahmemethode ist es also möglich, neben den Klopfausschlägen die Klopfverzüge, die massgebenden Einfluss auf die Verdichtungsmöglichkeit eines Kraftstoffes haben, für verschiedene Benzine bei verschiedenen Verhältnissen unmittelbar nebeneinander aufzunehmen. Weiterhin ist es infolge der raschen Versuchsdurchführung möglich, selbst bei grösseren Versuchsreihen, die sich normalerweise immer über eine längere Zeit erstrecken,

den unerwünschten Einfluss der Zeit auf den Beharrungszustand des Motors weitgehendst zurückzudrängen. (z.B. Lufttemperatur im Sommer mittags und morgens)

Führung des Filmbandes

vor der Änderung nach der Änderung



Versuchsergebnisse

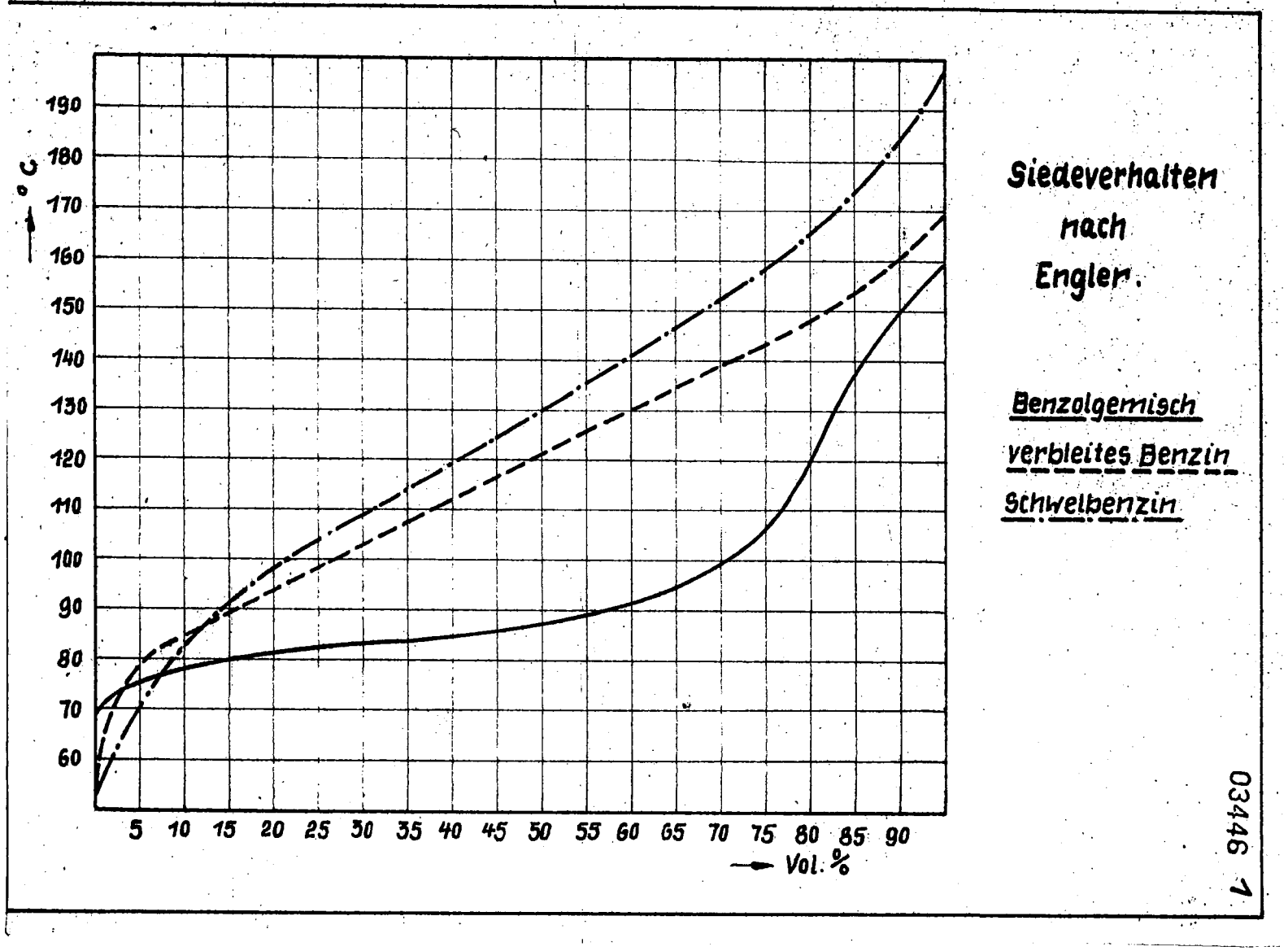
Im folgenden sind die Ergebnisse einer Versuchsreihe zusammengestellt, die für drei verschiedenartige Kraftstoffe (Abb.1) der gleichen Oktanzahl(MOZ 71) - um den Einfluß der Verdichtung auf die Größe des Klopfverzugs auszuschalten - den Einfluß der verschiedenen Betriebsbedingungen auf die Klopfstärke und den Klopfverzug wiedergeben.

Daten der verwendeten Kraftstoffe

	Benzolgemisch	Bleibenzin	Schwelbenzin
d_{20}	0,800	0,747	0,779
n_{20}^{D}	1,4565	1,4290	1,449
Aromat.u.unges.KW	41Vol%	20,5Vol%	82Vol%
Naphtene u.Paraffine	59Vol%	79,5Vol%	18Vol%
theor.Luftbedarf	14,0 kg	14,6 kg	14,1 kg

Geändert wurden:

Kühlwassertemperatur
Ansaugluftemperatur
Drehzahl
Mischungsverhältnis
Belastung



Siedeverhalten nach Engler.

Benzolgemisch

verbleites Benzin

Schwelbenzin

03446 1

Dabei wurden die einzelnen Ergebnisse immer den Normalverhältnissen, die weiter vorn angegeben wurden, gegenübergestellt.

Zunächst wurden für die drei Kraftstoffe Leistungs-und Verbrauchskurven, die in Abb.2 u.3 zusammengestellt sind, gefahren. Danach hat das Benzolgemisch die schlechteste und das Schwelbenzin die beste Leistung. Da die Verbräuche auch in derselben Richtung liegen, kann das Schwelbenzin als der beste Kraftstoff angesehen werden. Im Normalfall wurden die Kraftstoffe ungefähr beim Leistungsmaximum gefahren, bei der Vergaserseinstellung 30, wie aus den Leistungskurven hervorgeht.

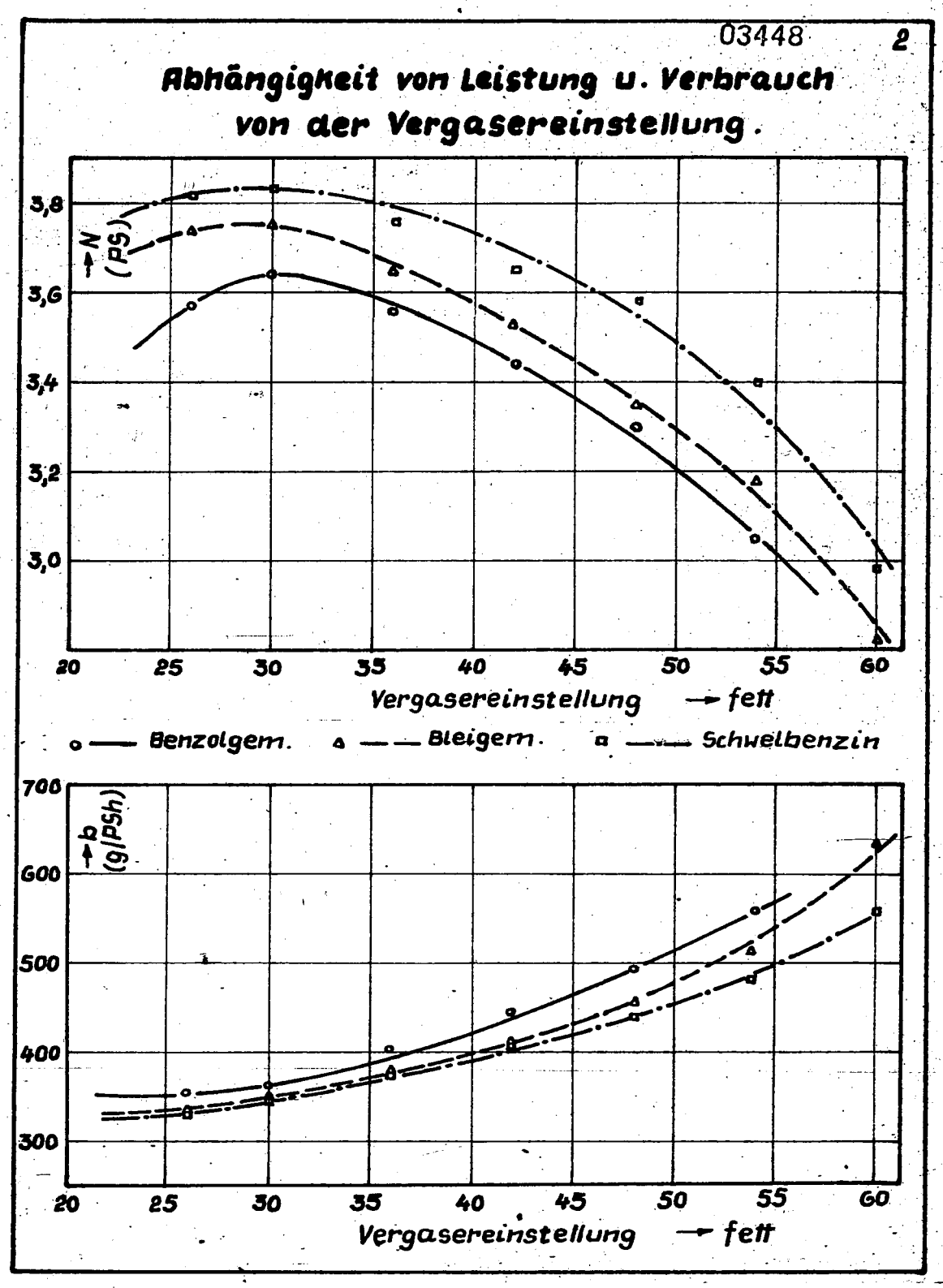
Zusammenhang zwischen Vergasereinstellung und Mischungsverhältnis bei den normalen Verhältnissen:

Vergasereinstellung	Mischungsverhältnis		
	Benzolgem.	Bleigem.	Schwelbenzin
26	1,015	0,975	0,995
30	0,974	0,935	0,945
34	0,928	0,892	0,908
38	0,888	0,855	0,870
42	0,852	0,820	0,834
46	0,818	0,790	0,805
50	0,792	0,766	0,778
54	0,760	0,735	0,750
58	0,735	0,710	0,725

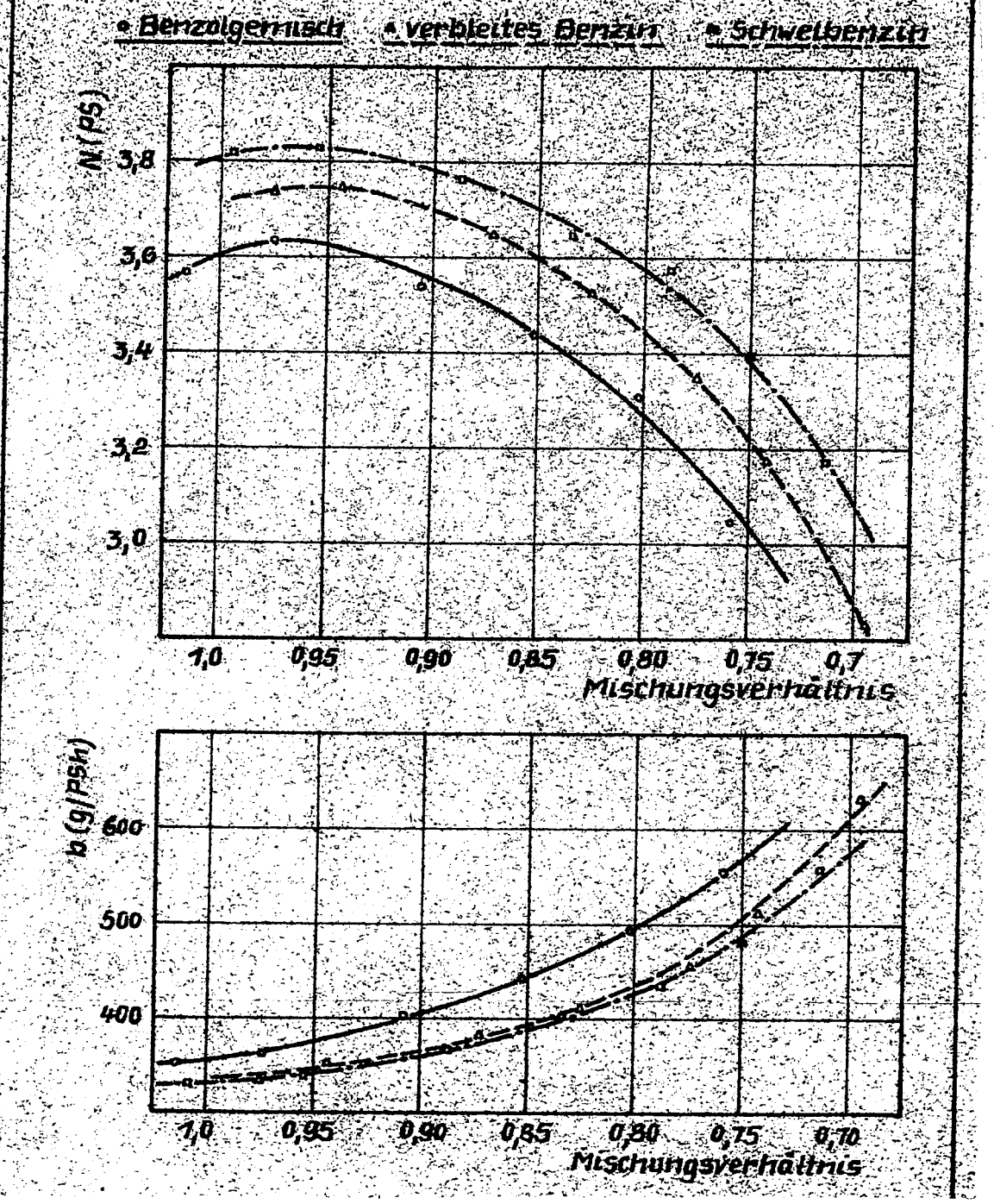
Bei der Auswertung der Filme wurde bei den Klopfausschlägen 4 mm als Grundgeräusch abgezogen, so daß die kleinen Schwankungen in der Breite des Geräuschbandes (1 bis 1½ mm) bei den verschiedenen Betriebsverhältnissen dadurch ausgeglichen wurden.

03448 2

Abhängigkeit von Leistung u. Verbrauch von der Vergasereinstellung.



Abhängigkeit von Leistung und Verbrauch vom Mischungsverhältnis.



1.Bedeutung des Klopfverzugs

Für die Größe des Klopfverzugs sind zwei Faktoren maßgebend:

a) Größe der Verbrennungsgeschwindigkeit
b) Höhe der Selbstentzündungstemperatur.

Beide hängen in erster Linie von der chemischen Zusammensetzung des Kraftstoffes ab. Je größer die Verbrennungsgeschwindigkeit und je tiefer die Selbstentzündungstemperatur des Gemisches ist, desto früher wird das Klopfen nach dem Zündzeitpunkt einsetzen, desto kleiner wird also auch der Klopfverzug sein. Verschiedene Kraftstoffe können trotz gleicher Verbrennungsgeschwindigkeit durch die Unterschiede in der Selbstentzündungstemperatur verschiedene Klopfverzüge bei gleichen Klopfzuständen aufweisen. Bei ein und demselben Kraftstoff kann die durch die Betriebsbedingungen hervorgerufene Änderung des Klopfverzugs als ein der Verbrennungsgeschwindigkeit proportionales Maß angesehen werden.

Es ist bekannt, daß bei Erhöhung der Verdichtung durch die höheren Kompressionstemperaturen die Verbrennungsgeschwindigkeit zunimmt. Die klopfende Verbrennung wird ausgelöst, wenn eine bestimmte Temperaturgrenze überschritten wird. Wie Zeitlupenaufnahmen an Motoren gezeigt haben, breitet sich die Flammenfront bei normalem Betrieb zwar beschleunigt, aber doch kontinuierlich aus. Bei klopfender Verbrennung erfolgt die Umsetzung des Gemischrestes fast gleichzeitig. Dadurch tritt eine plötzliche Druckerhöhung ein, die die gesamte Gasladung in Schwingungen versetzt. Durch Aufschlagen dieser Druckschwingungen auf die Verbrennungswände werden dieselben ebenfalls in Schwingungen versetzt, deren Frequenz von der Masse des Motors abhängt, und die sich in dem bekannten Motorgeräusch äußern. Diese Geräusche kön-

03451

Druck- und Geräuschoszillogramme
bei Aenderung der Verdichtung.

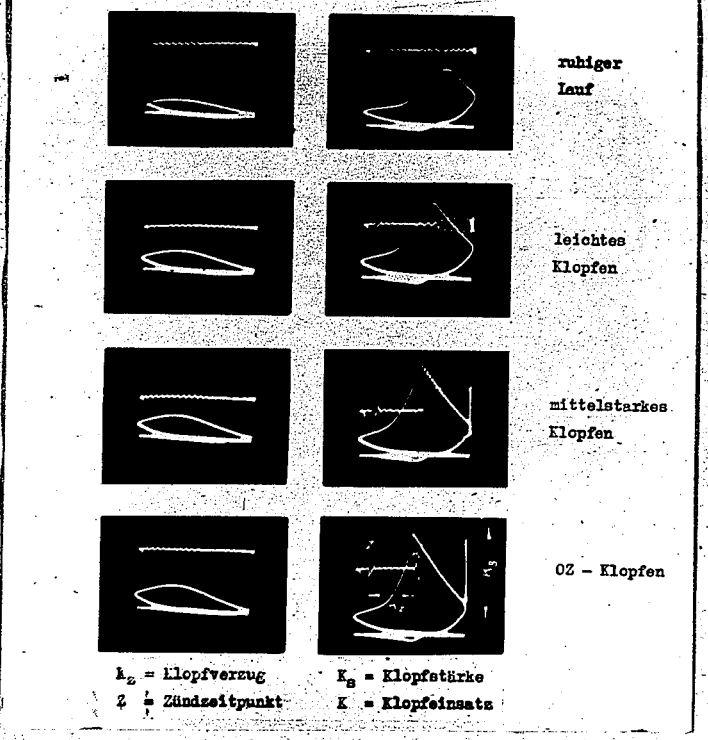
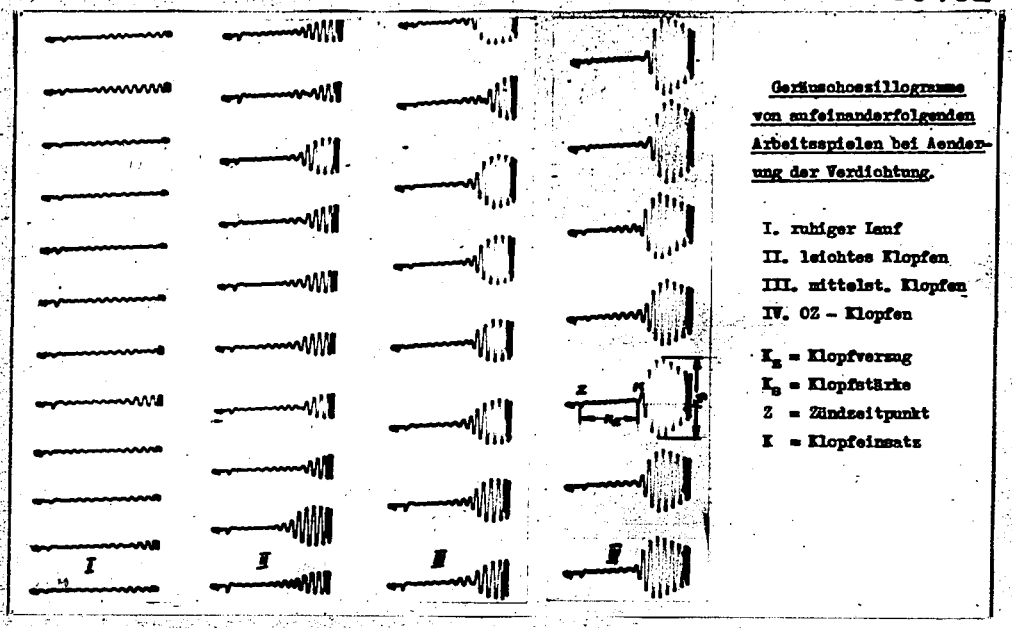


Abb. 4

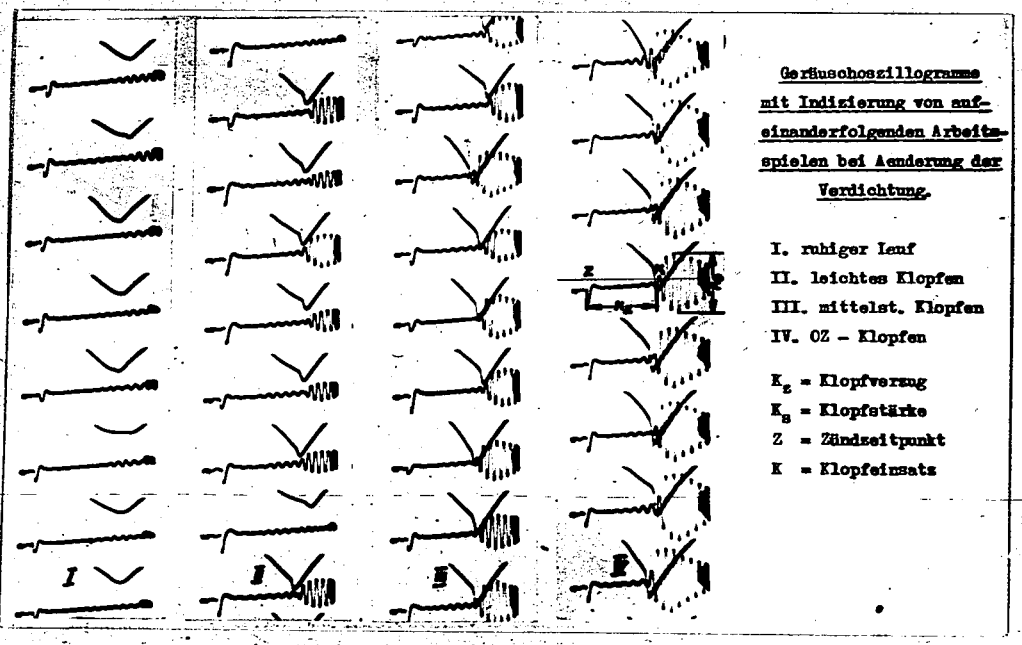


Geräuschoszillogramme von aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen bei Aenderung der Verdichtung.

I. ruhiger Lauf
II. leichtes Klopfen
III. mittelst. Klopfen
IV. OZ - Klopfen

K_z = Klopfverzug
K_s = Klopfstärke
Z = Zündzeitpunkt
K = Klopfeinsatz

Abb. 5



Geräuschoszillogramme mit Indizierung von aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen bei Aenderung der Verdichtung.

I. ruhiger Lauf
II. leichtes Klopfen
III. mittelst. Klopfen
IV. OZ - Klopfen

K_z = Klopfverzug
K_s = Klopfstärke
Z = Zündzeitpunkt
K = Klopfeinsatz

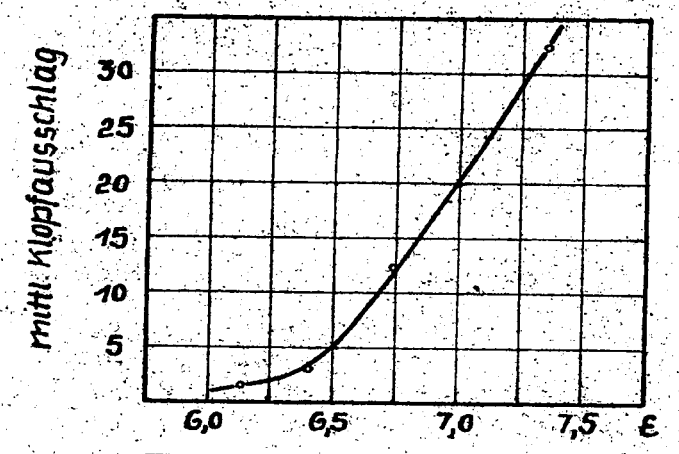
Abb. 6

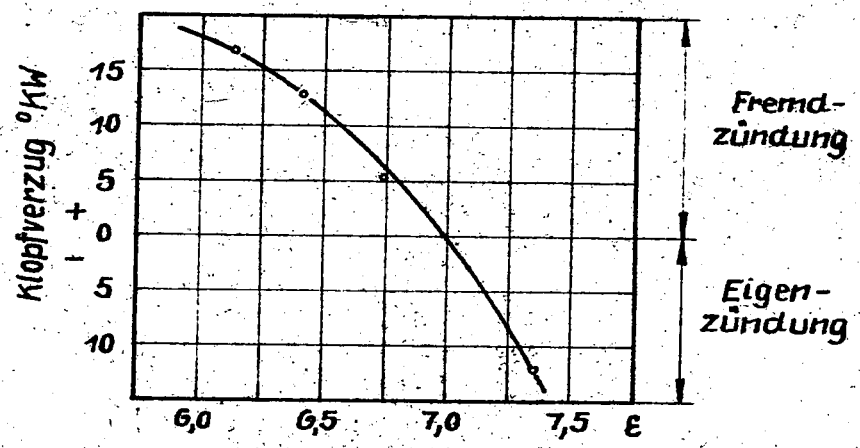
nen elektroakustisch nach dem Verfahren von A.W.Schmidt, das sich für Klopfmessungen gut bewährte, aufgenommen werden. Wie oben schon beschrieben wurde, eignet sich diese Methode auch zur Messung des Klopfverzuges sehr gut, dessen Größe ein Maß für die Reaktionswilligkeit eines Kraftstoffes ist. Daß der größere Klopfverzug bei gleichem Zündzeitpunkt klopfhindernd wirkt, ist folgendermaßen zu erklären: bei normaler Zündeinstellung wird der Klopfeinsatz immer nach dem oberen Totpunkt erfolgen. Je größer also der Klopfverzug ist, desto mehr wirkt die Expansion durch die Abwärtsbewegung des Kolbens der Verdichtung des Gemischrestes durch das Fortschreiten der Flammenfront entgegen, desto länger verläuft die Verbrennung normal. Beim kurzen Klopfverzug ist jedoch nur bei einem geringen Teil des Gemischrestes eine ruhige Verbrennung vorhanden. Je nach der Größe des klopfenden Gemischrestes wird die Verbrennung härter oder weicher ausfallen. Danach hat also der Klopfverzug bei der Untersuchung eines Kraftstoffes sowohl bei den verschiedenen Betriebsbedingungen als auch beim Vergleich mit anderen Kraftstoffen maßgebenden Einfluß auf das Klopfverhalten.

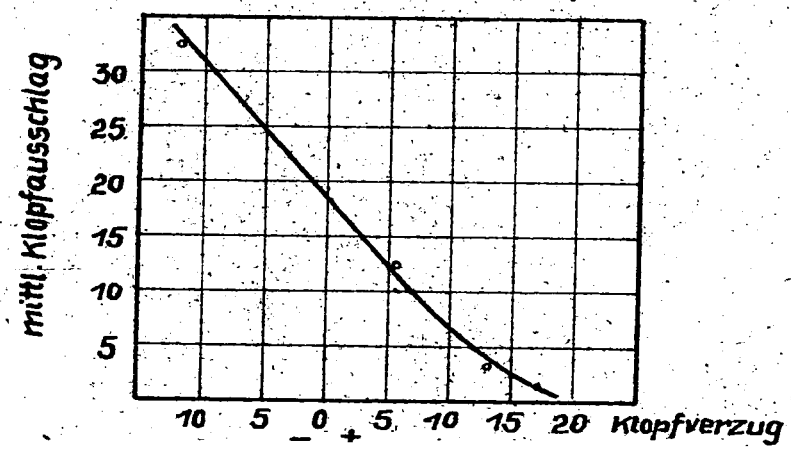
Abb.4 zeigt Geräusch-und Druckoszillogramme bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen. Daraus ist deutlich die Abnahme des Klopfverzugs mit der größeren Klopfamplitude zu erkennen. Man beachte ferner im Indikatordiagramm den mehr oder weniger großen Drucksprung, durch den das Klopfen angeregt wird. In Abb.5 u.6 sind Geräusch-und Druckoszillogramme von unmittelbar aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen bei verschiedenen Klopfstärken aufgenommen. Auch ist daraus zu entnehmen, daß der Klopfverzug mit steigender mittlerer Klopfintensität abnimmt, daß aber beim gleichen Klopfzustand die einzelnen Arbeitsspiele keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Klopfausschlag und Klopfverzug aufweisen. Auf die Unregelmäßigkeiten des Klopfens und die hierfür maßgebenden Ursachen wird später noch eingegangen werden.

Zusammenhänge zwischen mittlerem Klopfausschlag, Klopfverzug und Verdichtungsverhältnis. 03454

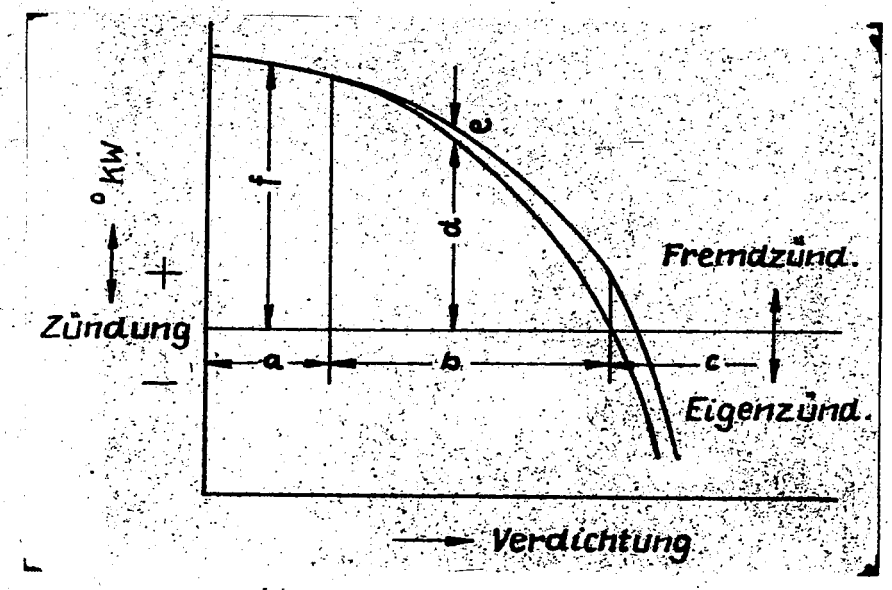
Kraftstoff: Normalheptan Zündung: 15° nach O.T.





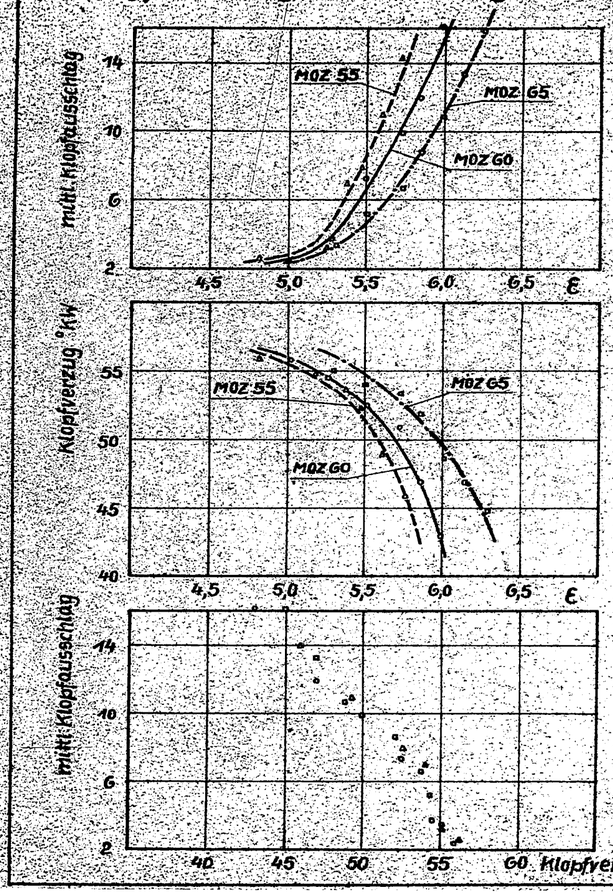


Wie aus den später besprochenen Versuchsergebnissen zu entnehmen ist, nimmt mit steigender Verdichtung der Klopfverzug ziemlich rasch ab und dürfte sich verhältnismäßig schnell dem Wert Null nähern. Es war daher von Interesse, den weiteren Verlauf des Klopfverzugs zu untersuchen, wenn möglich auch im negativen Gebiet, d.h.also bei Selbstentzündung des gesamten Kraftstoffluftgemisches vor der eigentlichen Zündung. Hierzu wurde ein besonders reaktionsfreudiger Kraftstoff, nämlich Normalheptan, verwendet. Außerdem mußte noch die Zündung auf Spätzündung gestellt werden. Abb.7 zeigt die Ergebnisse.Danach dürften sich ungefähr folgende Zusammenhänge zwischen Verbrennungszeit (normaler und klopfender) und Verdichtung ergeben, die in nachstehender schematischer Skizze dargestellt sind.



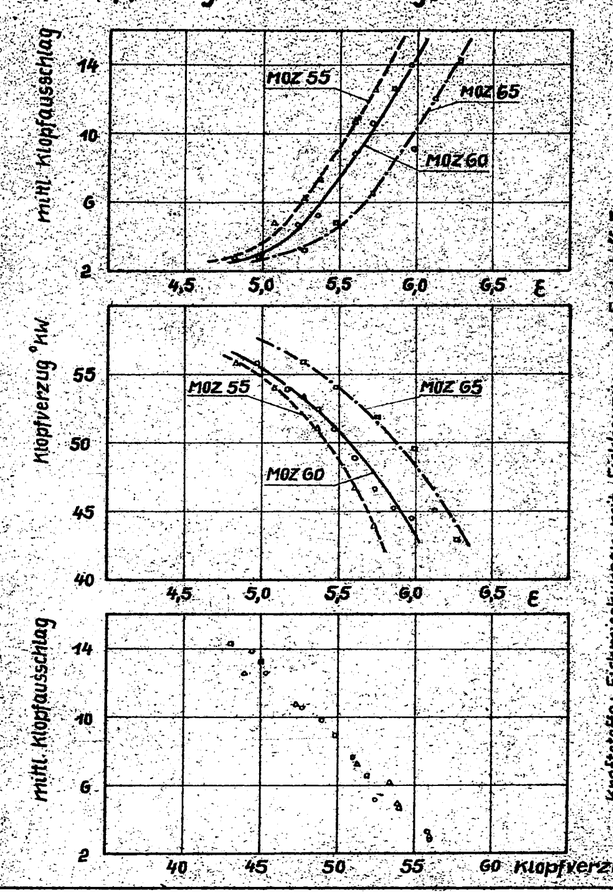
KODAK SAFETY

Abhängigkeit zwischen mittlerem Klopfausschlag, Klopfverzug und Verdichtungsverhältnis. I



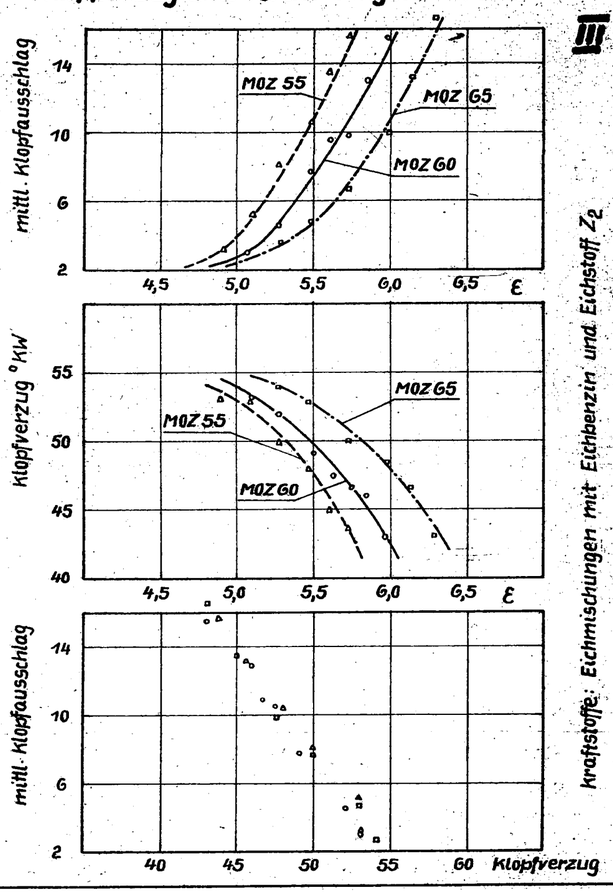
Kraftstoffe: Eichmischungen mit Eichbenzin und Eichstoff Z_2

Abhängigkeit zwischen mittlerem Klopfausschlag, Klopfverzug und Verdichtungsverhältnis. II



Kraftstoffe: Eichmischungen mit Eichbenzin und Eichstoff Z_2

Abhängigkeit zwischen mittlerem Klopfausschlag, Klopfverzug und Verdichtungsverhältnis. III



Kraftstoffe: Eichmischungen mit Eichbenzin und Eichstoff Z_2

Darin bedeuten:

a = Verdichtung für normale Verbrennung
b = Verdichtung für klopfende Verbrennung
c = Verdichtung, bei der sich das gesamte Gemisch vor der eigentlichen Zündung selbst-entzündet
d = Klopfverzug
e = klopfende Verbrennungszeit
f = d + e = gesamte Verbrennungszeit

Im Verdichtungsbereich a dürfte die Verbrennungszeit f infolge der mit zunehmender Verdichtung verbundenen höheren Kompressionstemperaturen etwas abnehmen. Im Verdichtungsbereich b spaltet sich die Verbrennungszeit f, die nicht in linearem Zusammenhang mit der Verdichtung stehen dürfte, in zwei Verbrennungszeiten, in die Zeit für normale Verbrennung und in die Zeit für klopfende Verbrennung e. Vom Verdichtungsbereich c an, in dem sich das gesamte Gemisch vor der Fremdzündung selbstentzündet, also der Motor als Diesel läuft, dürfte die klopfende Verbrennungszeit e durch die höheren Temperaturen mit steigender Verdichtung wieder etwas abnehmen.

2. Reproduzierbarkeit

Um zunächst die Reproduzierbarkeit des Verfahrens nachzuweisen, wurden drei Kraftstoffe der Oktanzahl 55, 60 und 65 an drei verschiedenen Tagen untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb.8 zusammengestellt. Wie daraus zu ersehen ist, sind die Verdichtungsmöglichkeiten und die Klopfverzüge ungefähr die gleichen. Die kleinen Abweichungen dürften durch die Unterschiede des Luftdruckes, der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit bedingt sein. Grundsätzlich ist aber festzustellen, daß sowohl hinsichtlich der Form der Kurven als auch hinsichtlich ihrer gegenseitigen Lage keine wesentlichen Unterschiede vorhanden sind, womit den an die Reproduzierbarkeit zu stellenden Anforderungen für den vorliegenden Zweck Genüge geleistet ist.

3. Unregelmäßigkeiten im Klopfen bei aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen

Jedem Motorfachmann werden beim Flugmotor oder auch bei einem anderen mit Einspritzbetrieb arbeitenden Motor schon die scharfen einzelnen Klopfschläge aufgefallen sein. Bei Vergasermotoren sind derartige Unterschiede im Klopfzustand aufeinanderfolgender Arbeitsspiele meist nicht in diesem Maße zu beobachten. Es schien daher wichtig, diesen Verhältnissen besonderes Augenmerk zuzuwenden. Im folgenden werden daher Versuchsergebnisse mitgeteilt, welche unter Anwendung des EAK-Verfahrens eine Erklärung in dieser Richtung bringen sollten.

Aus den Abb.9, 10 u.11 sind verhältnismäßig starke Änderungen in der Klopflautstärke festzustellen, obwohl gehörmäßig kaum Unterschiede wahrgenommen werden konnten. Ähnliche Schwankungen weisen auch die Verbrennungshöchstdrücke auf. Sie sind jedoch nicht phasengleich mit den Klopfintensitätsschwankungen; im Gegenteil, der größere Klopfschlag weist häufig einen kleineren Höchstdruck auf und umgekehrt. Es können also beim gleichen Klopfzustand Zylinderhöchstdruck und Klopfintensität nicht in Beziehung gebracht werden.

Zur Erklärung dieser Verhältnisse können die folgenden fünf Punkte herangezogen werden:

a) Druckschwankungen in der Ansaugleitung
b) Druckschwankungen in der Auspuffleitung
c) kleine Zündschwankungen
d) kleine Unterschiede in der Verwirbelung des Gemisches
e) unterschiedliches Mischungsverhältnis bei den einzelnen Arbeitsspielen

a) Druckschwankungen in der Ansaugleitung:

Zur Untersuchung der Ansaugverhältnisse wurde die Höhe der Kompressionsenddrücke benützt, die bei gleichen Drehzahlen ein Maß für die angesaugte Luftmenge darstellen. Zu diesem Zweck wurde

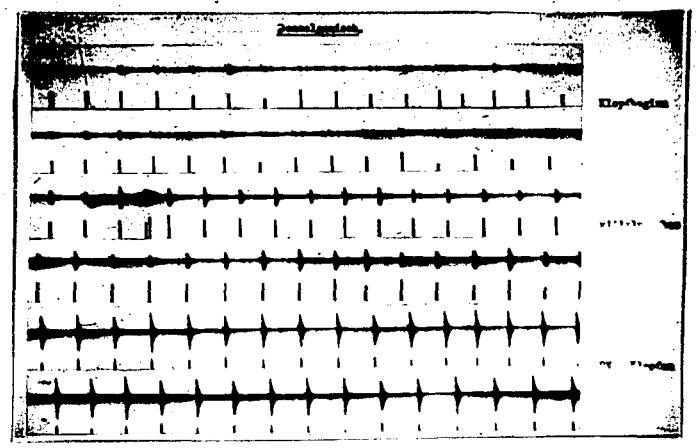


Abb. 9

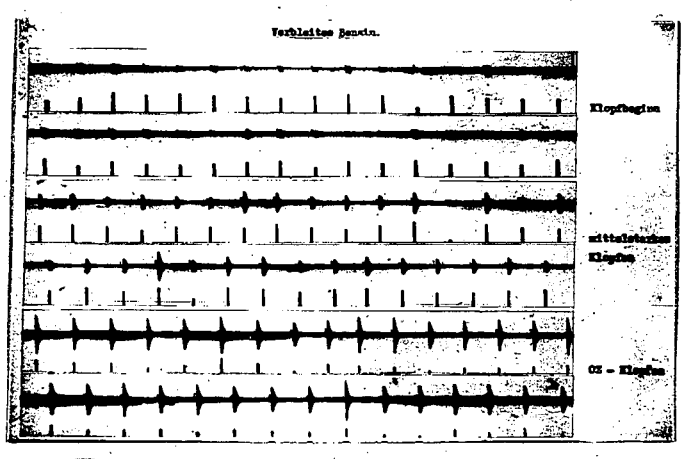


Abb. 10

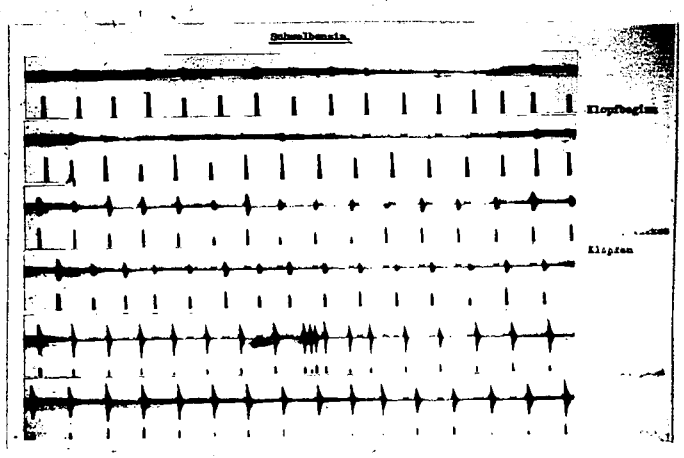


Abb. 11

in eine der beiden Zündkerzenöffnungen eine Quarzkammer eingesetzt und der Motor fremd angetrieben. Durch das periodische Öffnen und Schließen des Einlaßventils kommt die Luftmenge in der Ansaugleitung in Schwingungen. Die Frequenz hängt im wesentlichen von der Drehzahl ab. Durch diese Schwingungen treten am Einlaßventil Druckschwankungen auf, die das Bestreben haben, den Zylinder bei gewissen Drehzahlen zu überladen, bei anderen zu drosseln. Im Fall der Resonanz der Ventilöffnungsfolge mit der Frequenz der Gemischsäule würden Druckschwankungen von beträchtlicher Stärke auftreten. Da jedoch diese Verhältnisse in Wirklichkeit kaum vorkommen, oder wenn, dann leicht vermieden werden können, so werden sich die Druckschwankungen in den anderen Fällen dadurch, daß sich die Druckwellen gegenseitig beeinflussen, nicht sehr stark bemerkbar machen.(12) Abb.12 zeigt die Schwankungen der angesaugten Luftmenge bei verschieden langen Ansaugleitungen. Da der Fall der Resonanz nur durch Zufall hätte erreicht werden können, so waren praktisch keine Unterschiede bei den verschiedenen Ansaugleitungen festzustellen. Danach ist also zu schließen, daß sich die Druckschwankungen auf die Kompressionstemperatur und damit auf das Klopfverhalten in nur geringem Maße auswirken.

b)Druckschwankungen in der Auspuffleitung

Ähnliche Schwingungen wie in der Ansaugleitung werden auch in der Auspuffleitung durch das Öffnen und Schließen des Auslaßventils angeregt. Die Druckschwankungen werden ungefähr in der gleichen Größenordnung liegen wie in der Ansaugleitung. Auch hier wird sich der Fall der Resonanz am ungünstigsten auswirken, da in diesem Fall durch die Druckschwankungen in der Auspuffleitung beträchtliche Unterschiede der noch im Zylinder verbleibenden Restgasmenge auftreten. Da die Verdünnung des Brennstoff-Luftgemische

KODAK SAFETY FILM

03461

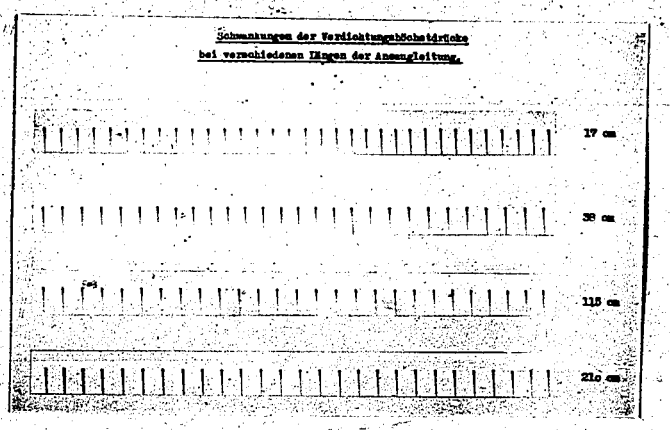


Abb. 12

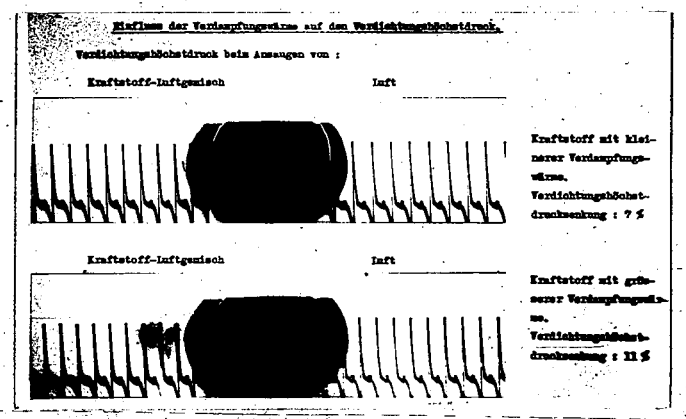


Abb. 13

POOR COPY

durch die Restgasmenge auf die Verbrennung einen verzögernden Einfluß hat, würden mehr oder weniger große Anteile die Verbrennung hemmen oder fördern. Diese Druckschwankungen dürften sich außer im Resonanzfall in der Größe von 0,1 bis 0,2 at. bewegen und somit die Restgasanteile nur kleine Unterschiede aufweisen, darum dürfte der Einfluß auf die Verbrennung auch nur klein sein. Starken Einfluß jedoch dürften die Restgasanteile bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen, bei denen der die Restgase enthaltene Kompressionsraum verändert wird, auf die Verbrennungseigenschaften haben. Nach D.R.Pye (10) hat die Verringerung des die Frischladung verdünnenden Abgasrestanteils auf das Steigen der Verbrennungsgeschwindigkeit bei größeren Verdichtungsverhältnissen einen größeren Einfluß als die Druck-und Temperaturerhöhung. Nachstehende Zahlentafel veranschaulicht den Einfluß des Abgasrestes auf die Verdichtungstemperaturen bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen.

Verdichtungsverhältnis	Volumen des Abgasrestes bei 850°C	höchste Verdichtungstemp.
4	0,33	376
5	0,25	399
6	0,20	419
7	0,166	437

c)Kleine Zündschwankungen

Mehr oder weniger große Zurückverlegung der Zündung bedingt eine mehr oder weniger große Verdichtungsmöglichkeit. Die Ursache für die Erhöhung der Klopfneigung bei früherer Zündung ist darin zu suchen, daß die Druck-und Temperatursteigerung in der Nähe des oberen Totpunktes wegen des früheren Eintreffens der Flammenfront rascher vor sich geht. Die auftretenden Zündunterschiede durch die Erschütterungen der Nockenwelle und durch Spannungsunterschiede dürften sich ungefähr in der Größenordnung von 1 bis 2° Kurbelwinkel bewegen, so daß sie auf das Klopfverhalten nur einen unbedeutenden Einfluß ausüben.

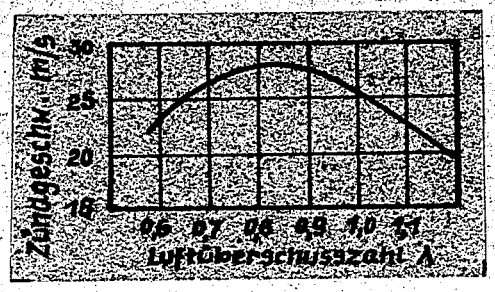
d)Kleine Unterschiede in der Verwirbelung des Gemisches

Wie groß der Einfluß der Verwirbelung des Gemisches auf die Verbrennungsgeschwindigkeit ist, haben Versuche in Rohren gezeigt. Danach ist für entsprechende Verbrennungsgeschwindigkeiten die Wirbelbewegung unbedingt erforderlich. Wäre das Gemisch im Augenblick der Zündung vollständig in Ruhe, so würde sich die Flammenfront nur sehr langsam ausbreiten, so daß während der kurzen im Motor zur Verfügung stehenden Zeit nur ein Teil der Ladung verbrannt wäre. Der Aufrechterhaltung des turbulenten Zustandes in der Ladung bis zum Einsetzen der Zündung kommt also sehr große Bedeutung zu. Den stärksten Einfluß auf die Verwirbelung hat die Drehzahl. Mit zunehmender Drehzahl wird die Verbrennungsgeschwindigkeit größer. Da jedoch bei den Versuchen die Drehzahl konstant gehalten wurde, so dürften auch nur sehr kleine Änderungen in der Verwirbelung auftreten.

e)Unterschiedliches Mischungsverhältnis bei den einzelnen Arbeitsspielen

Wie aus Vorhergehendem zu entnehmen, ist der Einfluß der Druckschwankungen in der Ansaug-und Auspuffleitung, der Zündschwankungen und der Unterschiede in der Verwirbelung des Gemisches auf das unregelmäßige Klopfverhalten eines Kraftstoffes bei gleichen Klopfzuständen zwar vorhanden, jedoch nicht so groß, daß er derartige Unterschiede in der Klopfintensität verursachen könnte. Als einzige veränderliche Größe bleibt beim Einzylindermotor noch das Mischungsverhältnis übrig. Wie leicht an zwei Verbrennungsdruckdiagrammen festgestellt werden kann, ändert sich mit dem Mischungsverhältnis die Verbrennungsgeschwindigkeit sehr stark.(13) Bei größerem Luftüberschuß und der damit verbundenen geringeren Verbrennungsgeschwindigkeit wird der Verbrennungshöchstdruck etwas später auftreten. Bei noch ärmerer Einstellung wird die Verbrennungsgeschwindigkeit immer kleiner, bis schließlich das bekannte Vergaserknallen (Rückschlag der Flamme in die Auspuffleitung) auftritt, das so zu erklären ist, daß sich bei der kleinen Verbrennungsgeschwindigkeit die Verbrennung über den ganzen Auspuffhub hinzieht und infolgedessen die Frischladung beim Ein-

tritt in den Zylinder entzündet. Die gleiche Erscheinung der Verminderung der Verbrennungsgeschwindigkeit kann auch bei großem Brennstoffüberschuß gezeigt werden. Die Erklärung dieser Verhältnisse interessiert im Rahmen dieser Arbeit nicht. Wesentlich ist nur die Tatsache, daß das Mischungsverhältnis die Verbrennungsgeschwindigkeit sehr stark beeinflußt. Nachstehende schematische Darstellung zeigt nach F.A.F.Schmidt (9) den Zusammenhang zwischen Luftüberschußzahl und Verbrennungsgeschwindigkeit für ein Benzol-Luftgemisch.



n = 1900 U/min.

Die Verdampfungswärme, die Verdampfbarkeit und der Endpunkt der Verdampfung eines Kraftstoffes spielt bei der Gemischbildung eine wichtige Rolle. Soll ein Kraftstoff in Luft verdampfen, so muß sein Dampfdruck (Sättigungsdruck) größer sein als sein Partialdruck. Bei einem Kraftstoff mit kleinem Dampfdruck besteht deshalb die Gefahr, daß er nicht vollkommen verdampft, daß sich die Kraftstofftröpfchen an den Wänden der Ansaugleitung und an den Zylinderwandungen niederschlagen. Dadurch wird das im Zylinder tatsächlich vorhandene Kraftstoff-Luftgemisch im Vergleich zum gemessenen Mischungsverhältnis etwas ärmer ausfallen. Die für die Verdampfung notwendige Wärmemenge müßte bei der vollkommenen Verdampfung im Vergaser der Ansaugluft entnommen werden. Um diesen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen,

müssen die Kraftstoffe bei den heutigen hochtourigen Maschinen und der damit für die Verdampfung sehr kurzen zur Verfügung stehenden Zeit eine entsprechende Verdampfungsgeschwindigkeit haben, d.h. Siedetemperatur und Verdampfungswärme müssen entsprechende Werte aufweisen. Während Kraftstoffe mit hoher Verdampfungswärme sich dadurch etwas klopffester erweisen, daß ein verhältnismäßig größerer Anteil statt im Vergaser und in der Ansaugleitung im Zylinder verdampft und dadurch die Kompressionsenddrücke und Kompressionsendtemperaturen etwas herabsetzt, muß ein Kraftstoff mit kleiner Verdampfungswärme in bezug auf das Klopfen etwas schlechter bewertet werden.(s.Abb.13) Da durch die Verdampfungsverhältnisse außer dem Klopfverhalten auch der volumetrische Wirkungsgrad und somit die Leistung beeinflußt werden, so muß zwischen Zerstäubung und Verdampfung im Vergaser und Ansaugstutzen ein möglichst günstiger Ausgleich gefunden werden. Von Einfluß auf die Gemischbildung ist auch der Endpunkt der Verdampfung. Er soll stets so tief wie möglich sein, weil sich sonst die bei höheren Temperaturen verdampfenden Brennstoffbestandteile außer an den Wänden der Ansaugleitung auch an den Zylinderwandungen niederschlagen, so daß dadurch auch das Mischungsverhältnis verändert wird. Weiterhin besteht dabei die Gefahr, daß das Benzin in das Kurbelgehäuse abfließt und das Öl verdünnt. Solange der Endpunkt der Verdampfung jedoch unter 200°C liegt, ist diese Befürchtung ziemlich belanglos.

Nach Zerstäubungsuntersuchungen von Sauter (11) wird der Brennstoff durch den Vergaser in mehr oder weniger kleine Tröpfchen zerrissen und dadurch seine Gesamtoberfläche in starkem Maße vergrößert. Dieser Unterschied in der Tröpfchengröße wirkt sich auf die Gemischbildung und Gemischverteilung sehr nachteilig aus. Während das verdampfte Gemisch und die kleinen Brennstofftröpfchen beim Öffnen des Einlaßventils unmittelbar in den Zylinder gelangen, werden die größeren Brennstofftröpfchen etwas zurückbleiben

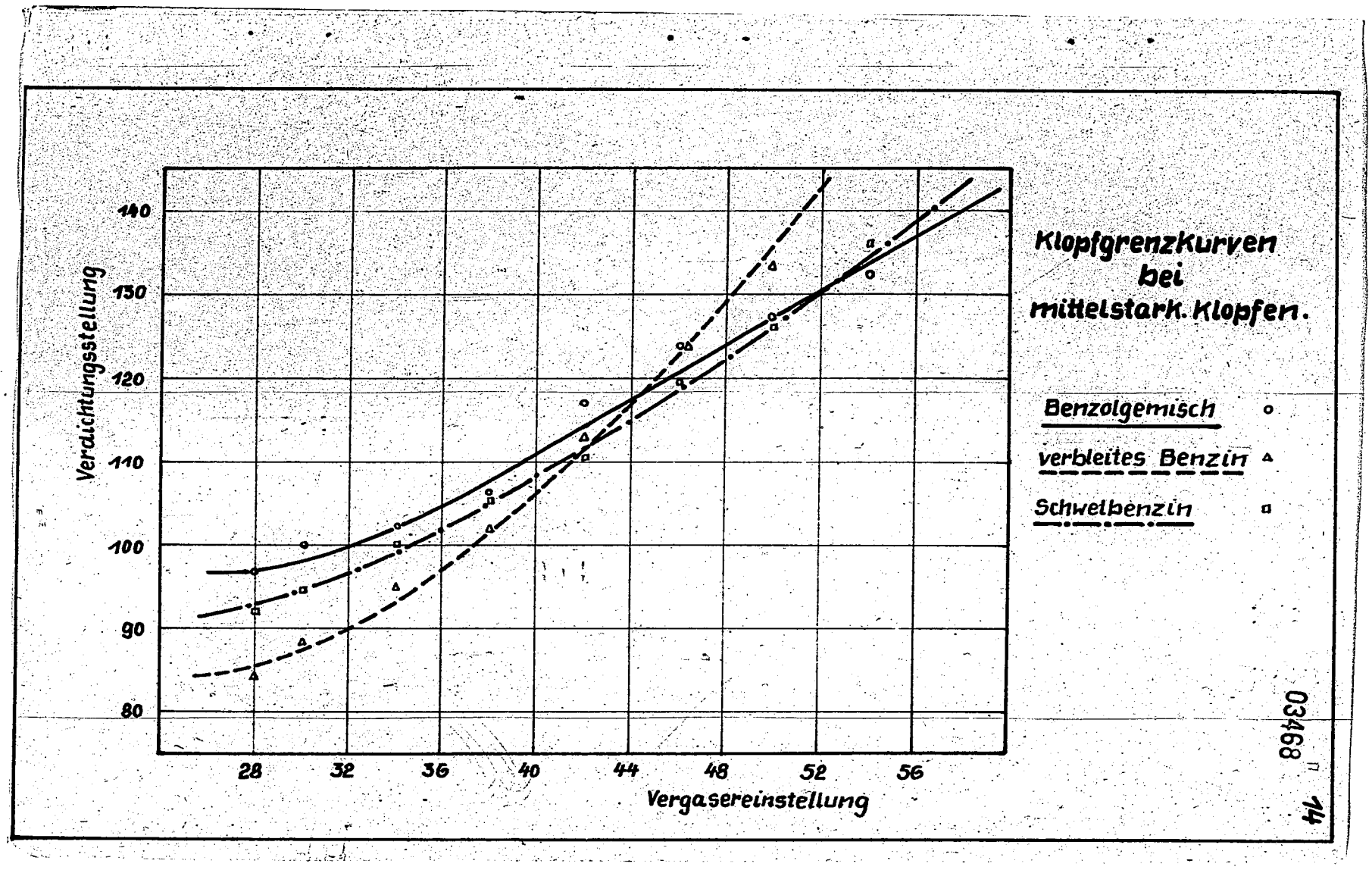
und vielleicht erst beim nächsten Arbeitstakt in den Zylinder kommen oder sich auch inzwischen an den kalten Wandungen der Ansaugleitung niederschlagen. Durch die Schwingungen der Gemischsäule in der Ansaugleitung werden sich die Brennstofftröpfchen gegenseitig beeinflussen, ihre kinetische Energie vergrößern oder aufheben. Im letzten Fall werden die großen Brennstofftröpfchen ausfallen und an den Wänden der Ansaugleitung sich zu großen Tropfen zusammenschließen. Gelangen sie in den Zylinderraum, so werden sie bei den hohen Temperaturen zu überreicher Gemischbildung führen, die wahrscheinlich außerhalb der Zündgrenzen liegt oder nur zu einem größeren oder kleineren Teil für die Verbrennung geeignet ist. Die Folge dieser Verhältnisse ist eine beträchtliche Änderung des tatsächlichen Mischungsverhältnisses unmittelbar vor der Verbrennung. Diese Unterschiede treten also auch schon unter der Voraussetzung auf, daß die Düse während der einzelnen Arbeitsspiele vollkommen gleiche Kraftstoffmengen zerstäubt. In Wirklichkeit werden jedoch auch die von der Düse gelieferten zerstäubten Kraftstoffmengen Unregelmäßigkeiten aufweisen. Sie sind so zu erklären, daß durch die Druckschwankungen in der Ansaugleitung auch die Luftgeschwindigkeit an der Düse und somit der Unterdruck beeinflußt wird. Dadurch gerät der Brennstoffspiegel ins Schwanken, so daß abhängig von der Höhe desselben mehr oder weniger große Brennstoffmengen von der Luft mitgerissen werden. Da sich mit dem Mischungsverhältnis die Verbrennungsgeschwindigkeiten stark ändern, die mit dem Klopfen eng verknüpft sind, so dürften dadurch Schwankungen in der Klopfintensität zum großen Teil verursacht werden. Daß bei verschiedenen Kraftstoffen diese Unregelmäßigkeiten mehr oder weniger auftreten, dürfte mit der durch die chemische Zusammensetzung des Kraftstoffes bedingten Änderung der Verbrennungsgeschwindigkeit mit dem Mischungsverhältnis zusammenhängen. Je größere Unterschiede sich bei den einzelnen Mischungsverhältnissen in der Verbrennungsgeschwindigkeit ergeben, desto größer werden die Schwankungen in der Klopfintensität sein. Ungefähren Einblick in das Auftreten dieser Unregelmäßgkeiten bei verschiedenen Vergasereinstellungen

03467

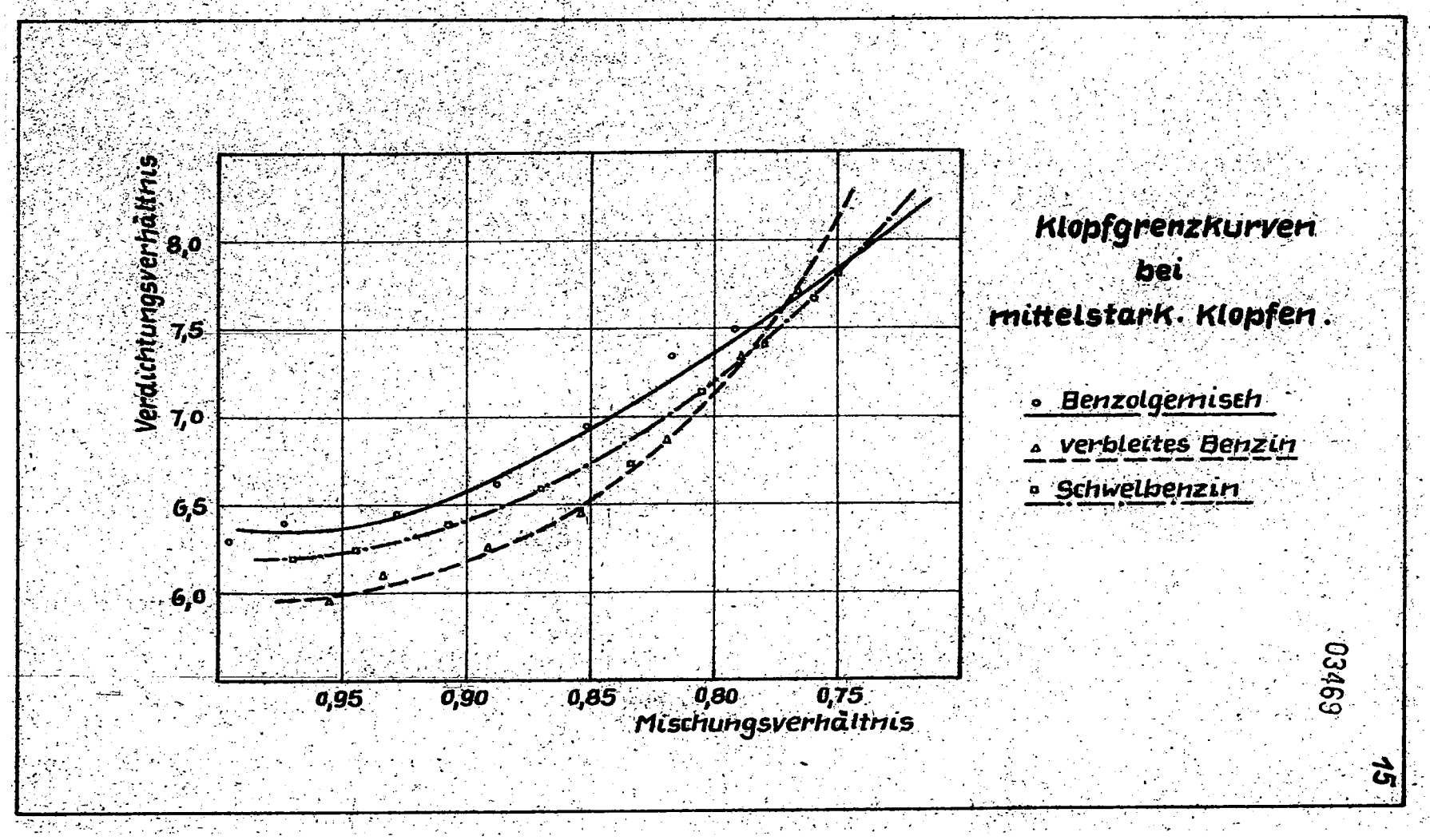
gibt die Klopfgrenzkurve in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis. Aus der grösseren oder kleineren Steilheit des Kurvenzuges können Rückschlüsse auf die Klopfintensitätsschwankungen gezogen werden. Verläuft die Kurve steiler, so entspricht einer kleinen Änderung des Mischungsverhältnis eine grössere Änderung des Klopfwertes. Betrachtet man die Klopfgrenzkurve in Abb. 15, so ist deutlich die grössere Steilheit für das verbleite Benzin zu erkennen. Entsprechend diesem Verhalten weisen a uch die Klopfaufnahmen in Abb. 9, lo und 11 grössere Unterschiede auf, als bei den beiden anderen Benzinen. Auch das unregelmässige Verhalten bei der fetteren Einstellung (s. Abb. 16) kann durch die grössere Steilheit der Klopfgrenzkurven (s. Abb. 14 u. 15) bei dieser Einstellung geklärt werden.

Aus den Klopfverzugsaufnahmen in Abb. 5 u. 6, sowie aus Abb. 16, in der Zusammenhänge zwischen Klopfintensität und Klopfverzug für zwei Vergasereinstellungen wiedergegeben sind, geht eindeutig hervor, dass der grosse Klopfschlag nicht immer den kleinen Klopfverzug haben muss. Wenn auch das jeweilige im Zylinder vorhandene Mischungsverhältnis zum grossen Teil für das unterschiedliche Klopfverhalten beim gleichen Klopfzustand verantwortlich ist, so ist doch der Einfluss der Druckschwankungen in der Ansaug- und Auspuffleitung und kleine Unterschiede im Zündzeitpunkt nicht ganz zu vernachlässigen. Auch werden sich beim Fortschreiten der Flammenfront, die sich immer mehr beschleunigt, kleine Unterschiede in der Durchwirbelung des Gemischrestes ergeben. Durch diese sich mit dem Mischungsverhältnis überlagernden Einflüsse ist es möglich, dass gleiche Klopfausschläge verschiedene Klopfverzüge aufweisen. Es sind also auch bei der klopfenden Verbrennung Unterschiede in der Verbrennungsgeschwindigkeit vorhanden, die sich entsprechend dem härteren Schlag, in der Steilheit des Schwingungsanstieges äussern. (s. Abb. 5 u. 6) Danach hat von zwei gleich grossen Klopf

POOR COPY

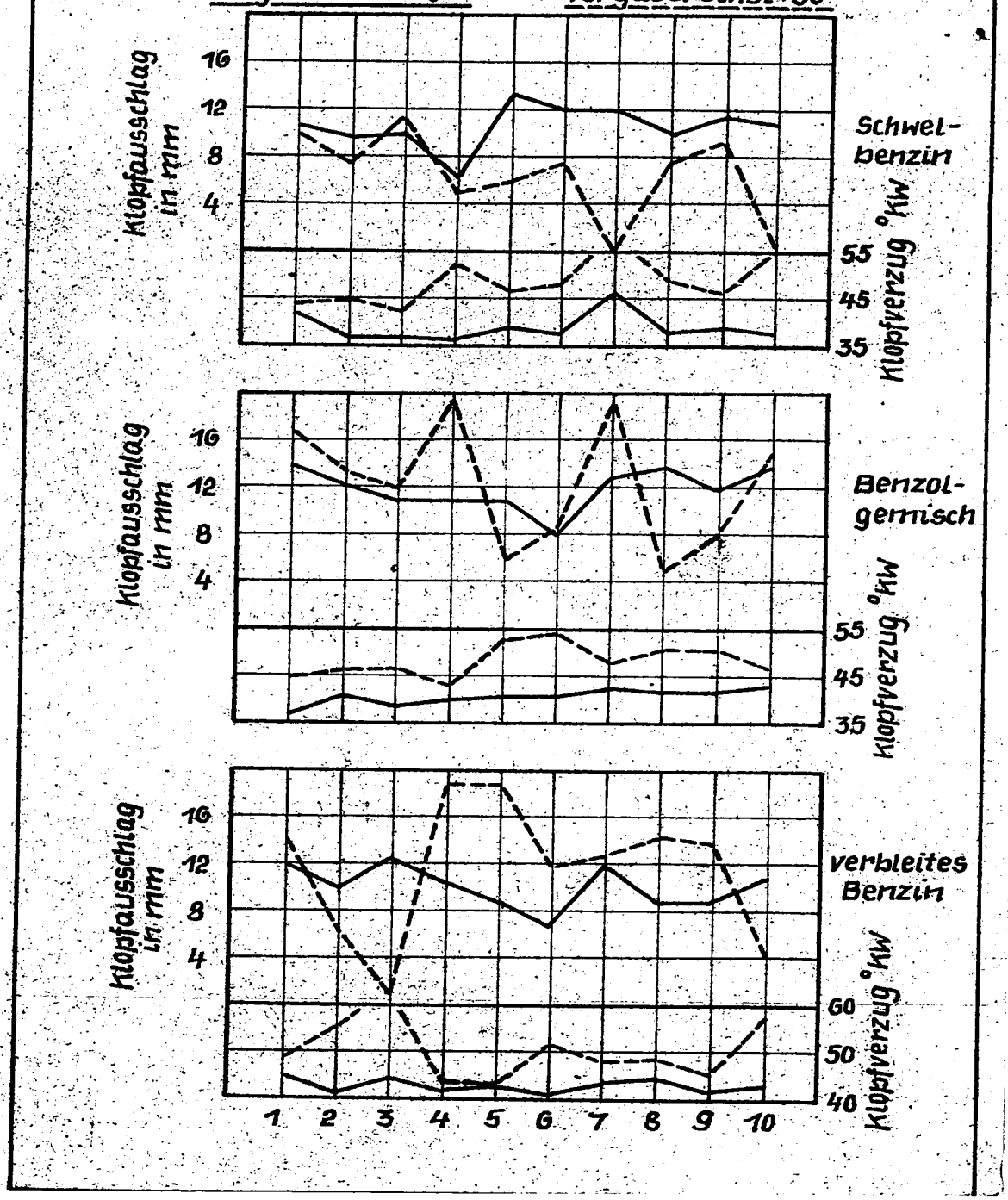

Klopfgrenzkurven
bei
mittelstark. Klopfen.
Benzolgemisch
verbleites Benzin
Schwelbenzin
Verdichtungsstellung
140
130
120
110
100
90
80
28
32
36
40
44
48
52
56
Vergasereinstellung
03468
74

POOR
COPY


Verdichtungsverhältnis
8,0
7,5
7,0
6,5
6,0
0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
Mischungsverhältnis
Klopfgrenzkurven
bei
mittelstark. Klopfen.
Benzolgemisch
verbleites Benzin
Schwelbenzin
03469
15

POOR
COPY

Zusammenhänge zwischen Klopfstärke- und Klopfverzugsschwankungen für 10 aufeinanderfolgende Arbeitsspiele bei mittelstarkem Klopfen.



ausschlägen der mit dem großen Klopfverzug den steileren Schwingungsanstieg, also die größere Klopfverbrennungsgeschwindigkeit. Da für die mechanische Beanspruchung die Geschwindigkeit des Druckanstiegs maßgebend ist, dürfte die klopfende Verbrennung mit dem steileren Druckanstieg für den Motor schädlicher sein. Daß sich jedoch diese Zusammenhänge bei anderen Kraftstoffen durch die chemische Zusammensetzung umkehren können, zeigen die Bilder 4 u.5. Hier hat die Aufnahme mit dem langen Klopfverzug einen flacheren Anstieg. Es weist in diesem Fall auch die Klopfverbrennung entsprechend der normalen Verbrennungsgeschwindigkeit höhere Werte auf. Da im Gegenteil beim kurzen Klopfverzug die Durchwirbelung nicht so gut ist wie beim langen, so dürfte für diese Unterschiede im Schwingungsanstieg und damit der Härte des Klopfens die chemische Zusammensetzung verantwortlich sein.



Bild 4

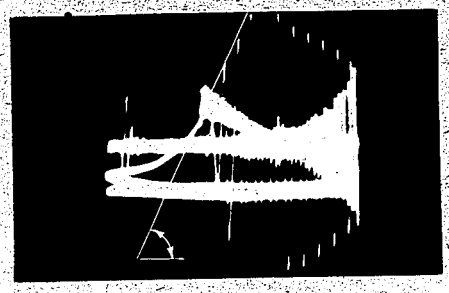


Bild 5

POOR
COPY 7

4. Versuche mit drei Benzinen gleicher Oktanzahl

Nachdem die Bedeutung des Klopfverzugs (Verbrennungsgeschwindigkeit) erkannt war und auch eine geeignete Messmethode zur Verfügung stand, sollten grundlegende motorische Untersuchungen durchgeführt werden, um den Zusammenhang zwischen Klopfstärke und Klopfverzug einerseits und motorischen Betriebsbedingungen und Kraftstoffeigenschaften andererseits festzustellen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen Abb. 17 bis 21. Die einzelnen Messpunkte wurden durch Bildung des arithmetischen Mittels aus mindestens 10 unmittelbar hintereinanderfolgenden Arbeitsspielen erhalten. Da die Periodendauer der Unregelmässigkeit des Klopfens sich kaum über 10 Arbeitsspiele erstreckt, genügt in den meisten Fällen ein Mittel daraus (bei Vergaserbetrieb). Oben sind immer die Zusammenhänge zwischen Klopfwert, Klopfverzug und Verdichtungsverhältnis für die normalen Verhältnisse, unten die entsprechenden Zusammenhänge bei Änderung von je einer Betriebsbedingung aufgetragen. Während bei der Prüfung im IG-Motordie Kraftstoffe die gleiche Bewertung aufwiesen, ist dies im Versuchsmotor unter den normalen Verhältnissen nicht mehr der Fall. Alle Kraftstoffe wurden, wie aus Abb. 15 hervorgeht, bei dem Mischungsverhältnis untersucht, welche die grösste Klopfstärke aufweist. Die sich im Versuchsmotor einstellenden Abweichungen können daher nicht durch Unterschiede im Mischungsverhältnis, sondern nur durch Unterschiede in den übrigen Betriebsbedingungen, wie Kühlwasser-und Lufttemperatur, geklärt werden. Es sei in diesem Zusammenhang auch auf die unterschiedliche Oktanzahlbewertung na ch der Motormethode und nach der Researchmethode hingewiesen. Unter Umständen können auch die zu prüfenden Kraftstoffe je nach ihrer Empfindlichkeit bei den verschiedenen Prüfmethoden Bewertungsverschiebungen zu den Eichkraftstoffen selbst aufweisen.

a) Einfluss der Kühlwassertemperatur

Betrachtet man das untere Diagramm links, das bei der sehr niedrigen Kühlwassertemperatur von 25°C erhalten wurde, so stellt man im Klopfverhalten der drei untersuchten Benzine nur geringe Unterschiede fest, die fast noch im Bereich der Messgenauigkeit

POOR COPY 7

03473

liegen. Auf eine Erhöhung der Kühlwassertemperatur bis auf den im Fahrzeugmotor üblichen Wert von 80° sprechen die drei Benzine verschieden an. Bei allen drei Benzinen zeigt sich zwar eine geringe Verdichtungsmöglichkeit, jedoch in mehr oder weniger starkem Ausmaß. Am günstigsten verhält sich das Benzolgemisch, am ungünstigsten das verbleite Benzin. Die geringe Verdichtungsmöglichkeit dürfte in der Hauptsache mit der höhen- Verdichtungstemperatur zusammenhängen, welche infolge der höheren Kühlwassertemperatur entsteht. Eine Erklärung für das unterschiedliche Verhalten der genannten Benzine kann wohl auf folgende Weise gefunden werden:

Bei der hohen Kühlwassertemperatur von 80° hat die Zylinderwand ziemlich hohe Temperaturen, so daß Kraftstoffkondensation nicht zu befürchten ist. Es nehmen infolgedessen sämtliche Fraktionen des in den Zylinder gelangenden Kraftstoffes an der Verbrennung teil und bestimmen somit auch das Klopfverhalten. Bei der niedrigen Kühlwassertemperatur von 25° muß man zweifellos mit mehr oder weniger starker Wand-Kondensation rechnen. Da das Benzolgemisch im Durchschnitt eine tiefere Siedelage aufweist als das verbleite Benzin, wird beim letzteren ein großer Prozentsatz an der Wand kondensieren und demzufolge hinsichtlich der Gestaltung des Verbrennungsvorganges ausscheiden. Nehmen wir z.B. an, daß sämtliche Fraktionen über 140° kondensieren, so scheiden, wie aus Bild 1 zu entnehmen ist, beim Benzolgemisch nur 9%, beim verbleiten Benzin dagegen 24%, beim Schwelbenzin soger 35% infolge Wand-Kondensation aus. Beim verbleiten Benzin sind es gerade die Fraktionen, welche infolge ihrer molekularen Struktur - es handelt sich ja vorwiegend um Paraffine - klopfmäßig sehr ungünstig sind. Infolgedessen ist es leicht erklärlich, daß durch die Erniedrigung der Kühlwassertemperatur eine Änderung der Klopfeigenschaften des verbleiten Benzins in der Richtung stattfindet, daß eine Angleichung an das Benzolgemisch erfolgt. Durch den Wegfall der schweren Frak-

POOR COPY 7

tionen findet also eine Erniedrigung der Reaktionsgeschwindigkeit statt, die im unteren Bild, mittleres Diagramm, in einer nachfälligen Erhöhung des Klopfverzuges zum Ausdruck kommt.

Beim Schwelbenzin ist zwar der Prozentsatz der zur Kondensation neigenden Anteile noch größer als beim verbleiten Benzin. Er wirkt sich aber trotzdem nicht so stark auf das Klopfverhalten aus wie beim verbleiten Benzin, weil es sich beim Schwelbenzin um eine gänzlich anders geartete Molekularstruktur handelt, nämlich um eine aromatische Form.

Aus vorstehenden Untersuchungsergebnissen geht also hervor, daß die Kühlwassertemperatur auf das Klopfverhalten eine nicht zu unterschätzende Wirkung ausübt. In der Hauptsache ist diese Wirkung bedingt durch die Wand-Kondensation, die letzten Endes das für die Verbrennung maßgebende Mischungsverhältnis bestimmt.

b)Einfluß des Ansaugtemperatur

Betrachten wir den Einfluß der Ansaugtemperatur, so finden wir insofern den umgekehrten Fall, als sich die Klopfkurven bei Erhöhung der Temperatur zusammendrängen. Das Benzolgemisch wird durch die Veränderung der Ansaug-Lufttemperatur nicht beeinflußt; denn seine Klopfkurve zeigt in beiden Fällen praktisch den gleichen Verlauf. Bei den beiden anderen Mischungen wirkt sich dagegen die höhere Lufttemperatur in einer Verbesserung der Klopfeigenschaften aus. Während diese Benzine bei der niedrigen Lufttemperatur von 15° geringere Verdichtungsmöglichkeiten hatten als das Benzol, liegen sie bei Erhöhung der Temperatur auf der anderen Seite der Benzolkurve, was einer höheren Verdichtungsmöglichkeit und damit einer Verbesserung des Klopfverhaltens gleichkommt. Für die Begründung dieses Verhaltens kann zweifellos wieder der Gemischbildungsvorgang herangezogen werden. Infolge seiner niederen Siedelage wird das Benzolgemisch bereits bei der niedrigen Ansaugtemperatur von 15° gut verdampfen, so daß auch bei der hohen Temperatur in dieser Beziehung keine wesentliche Verbesserung zustande kommt. An sich wäre aber wegen der

hohen Verdichtungstemperatur eine Verringerung der Verdichtungsmöglichkeit zu erwarten. Wahrscheinlich findet aber dadurch ein Ausgleich statt, daß infolge der geringeren Ansaugluftmenge - bedingt durch die höhere Temperatur - eine Änderung des Mischungsverhältnisses hervorgerufen wird, die im Sinne einer Herabsetzung der Klopfstärke wirkt. Bei den anderen Benzinmischungen kann die Steigerung der Klopffestigkeit infolge der höheren Lufttemperatur zunächst durch eine Änderung im Mischungsverhältnis erklärt werden, die sich zwangsläufig aus der geringeren Luftladung ergibt. Die Betriebspunkte der Klopfkurven wurden infolgedessen nicht immer bei dem der größten Klopfstärke entsprechenden Mischungsverhältnis aufgenommen, sondern bei einer fetteren Einstellung. Als zweiter Faktor kann aber noch die molekulare Widerstandskraft in betracht gezogen werden. Es ist bekannt, daß die sogenannte "Empfindlichkeit", ausgedrückt durch den Unterschied zwischen der Research- und der Motor-Oktanzahl, bei Benzolmischungen größer ist als bei verbleiten Benzinen. Es bedeutet dies, daß die Benzolmoleküle gegenüber Temperaturbeanspruchungen sich weniger widerstandsfähig erweisen. Aus diesem Grunde kommen heute Benzolgemische für Flugmotoren kaum mehr in Frage. Diese Feststellung wird auch durch die vorliegenden Versuche bestätigt. Im Fall der Abb. 18 kann das Benzolgemisch offenbar über ein bestimmtes Maß der Verdichtungsmöglichkeit nicht hinausgebracht werden, weil die Zerfallsneigung der Moleküle hier ein stärkeres Gegengewicht darstellt als bei den anderen zum Vergleich herangezogenen Benzinmischungen.

c)Einfluß des Mischungsverhältnisses

Abb.19 zeigt die Zusammenhänge, die sich durch Veränderung des Mischungsverhältnisses ergaben. Wie zu erwarten, wirkt sich die fettere Vergasereinstellung (entsprechend 50) bei sämtlichen drei Benzinmischungen in einer Steigerung der Verdichtungsmöglichkeit aus. Dies ist aber bei allen Benzinen nicht in gleichem Maße der Fall. Das Benzolgemisch spricht auf diese Veränderung am wenigsten an, das verbleite Benzin dagegen am stärksten, so daß sich die Reihenfolge der Klopfkurven demgemäß umkehrt. Die Änderung der Klopfverzüge in Richtung einer Vergrößerung derselben deutet daraufhin, daß die Verbrennunggeschwindigkeiten infolge der fetteren Gemischeinstellung verringert werden, was einerseits auf

die niedrigeren Temperaturen und andererseits auf die geringere Sauerstoffkonzentration zurückzuführen ist.

d)Einfluß der Belastung

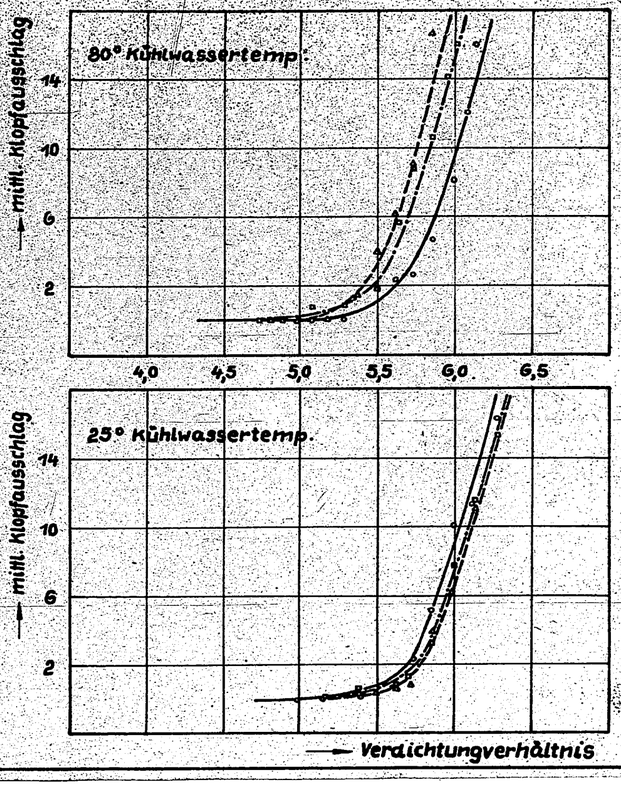
Aus Abb.20 ist die Beeinflussung durch die Belastung zu ersehen. Während bei Vollast die Bewertung der einzelnen Kraftstoffe verschieden ist, verhalten sie sich bei Halblast praktisch gleich. Ähnlich verhalten sich auch die Klopfverzüge. Außerdem nimmt bei Halblast die Klopffestigkeit infolge der kleineren Füllung und des zunehmenden Restgasgehaltes beträchtlich zu. Es ergibt sich dadurch eine Verringerung der Kompressionsendtemperaturen und damit eine Verkleinerung der Verbrennungsgeschwindigkeit, die sich in einem späteren Klopfeinsatz äußert. Dadurch nimmt die Klopfstärke ab und ermöglicht eine Erhöhung der Verdichtung.

e)Einfluß der Drehzahl

Schließlich zeigt Blatt 21 noch die Zusammenhänge für zwei verschiedene Drehzahlen. Da der Motor bei Vollast durch die Belastung nicht auf 700 U/min. gedrosselt werden konnte, wurden diese Verhältnisse bei Halblast untersucht. Während die Klopfkurven bei 900 U/min. nur ganz kleine Unterschiede aufweisen, fällt bei 700 U/min. das verbleite Benzin vollkommen aus der Reihe. Die Klopffestigkeit nimmt stark ab. Wie aus diesem Verhalten zu erwarten war, fällt auch der Klopfverzug völlig aus der Reihe. Da es sich hier um eine Drehzahländerung handelt, können nicht, wie bisher, die Klopfverzüge im Kurbelwinkelmaß miteinander verglichen, sondern sie müssen auf ein absolutes Zeitmaß in Sekunden umgerechnet werden. Ein auf dieser Basis geführter Vergleich zeigt, daß bei sämtlichen Benzinen die Klopfverzüge erheblich steigen, was einer Verlangsamung der Verbrennungsgeschwindigkeit gleichkommt. Diese Verlangsamung der Verbrennungsgeschwindigkeit ist bekanntlich auf die geringere Wirbelung im Zylinder zurückzuführen. Lediglich beim verbleiten Benzin ist diese Steigerung des Klopfverzuges

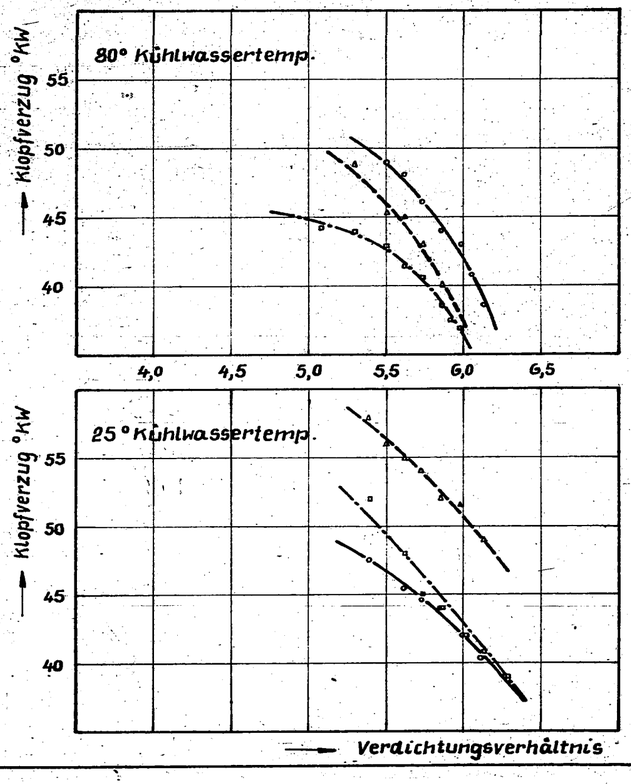
Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und mittlerem Klopfausschlag.

° Benzolgemisch ▵ verbleites Benzin ▫ Schwelbenzin



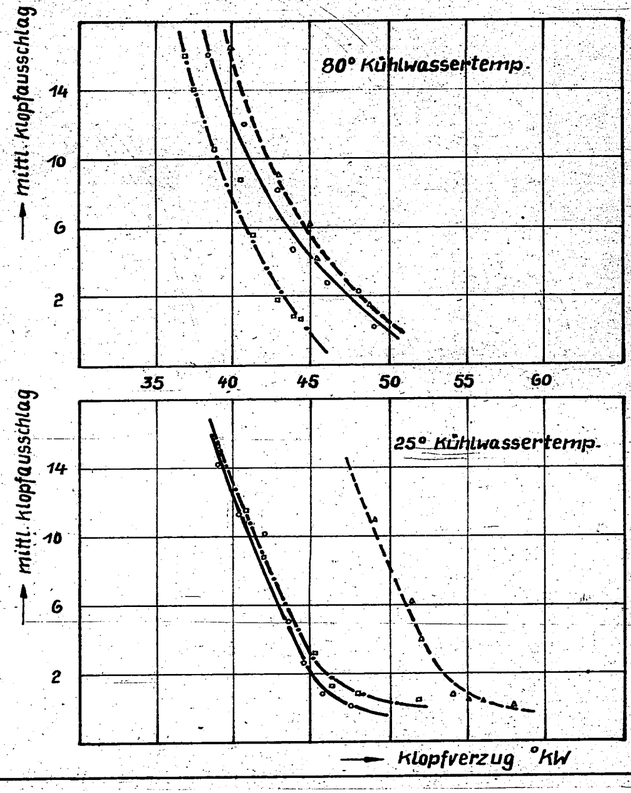
Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und Klopfverzug.

° Benzolgemisch ▵ verbleites Benzin ▫ Schwelbenzin



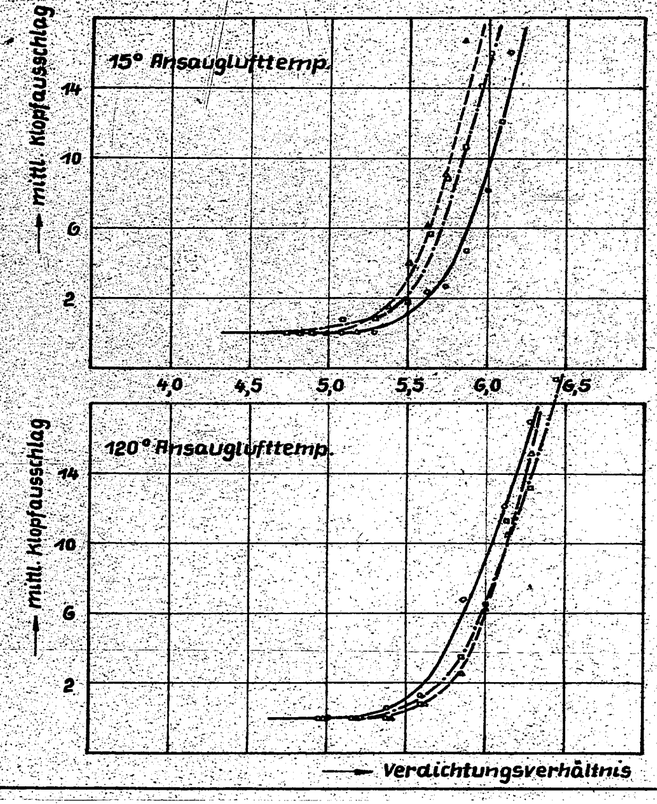
Abhängigkeit zwischen mittleren Klopfausschlag und Klopfverzug.

° Benzolgemisch ▵ verbleites Benzin ▫ Schwelbenzin



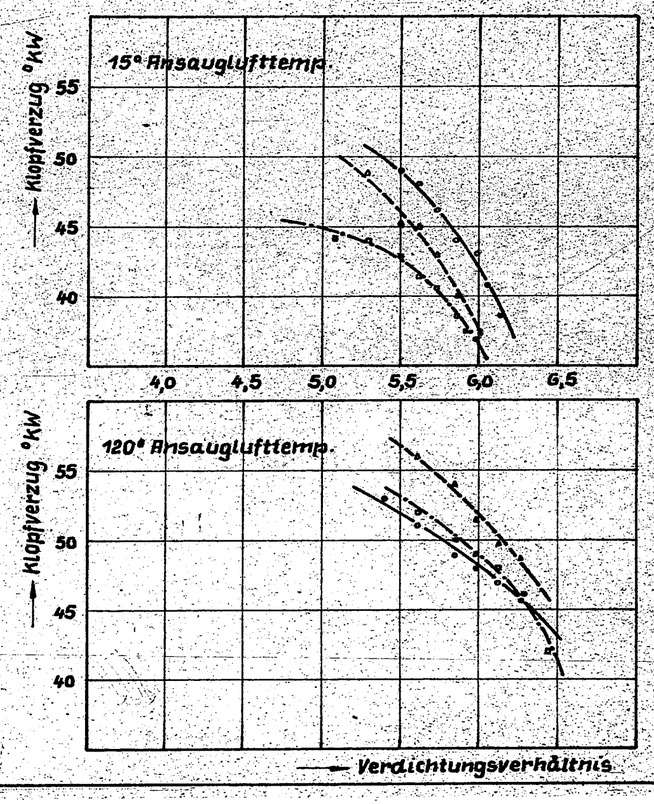
Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und mittlerem Klopfausschlag.

○ Benzolgemisch △ verbleites Benzin □ Schwelbenzin



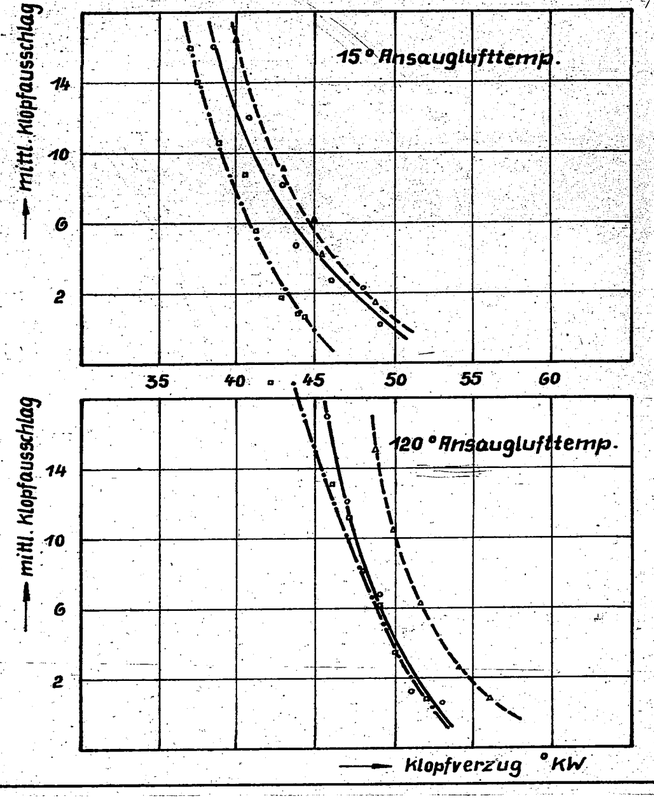
Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und Klopfverzug.

○ Benzolgemisch △ verbleites Benzin □ Schwelbenzin

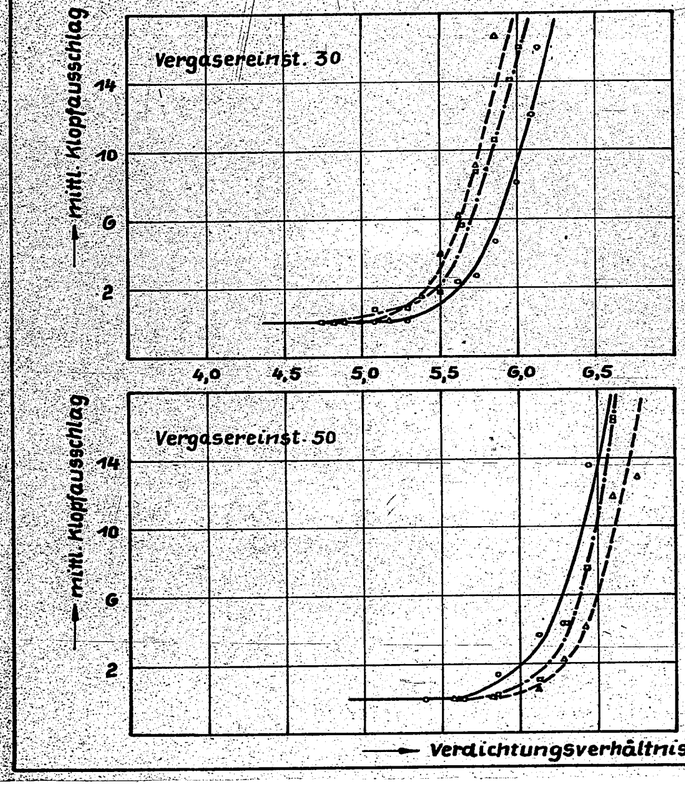


Abhängigkeit zwischen mittlerem Klopfausschlag und Klopfverzug.

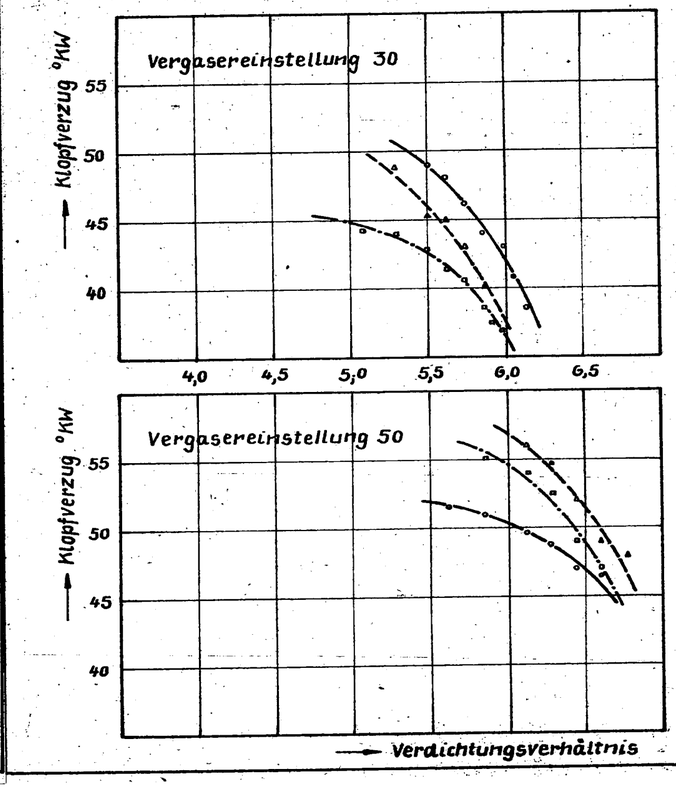
○ Benzolgemisch △ verbleites Benzin □ Schwelbenzin



Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und mittl. Klopfausschlag.

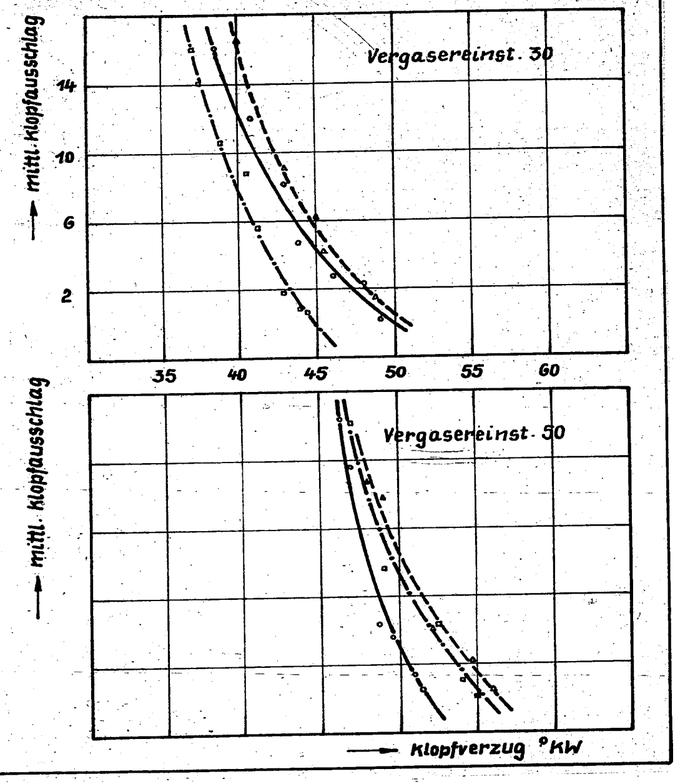


Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und Klopfverzug.

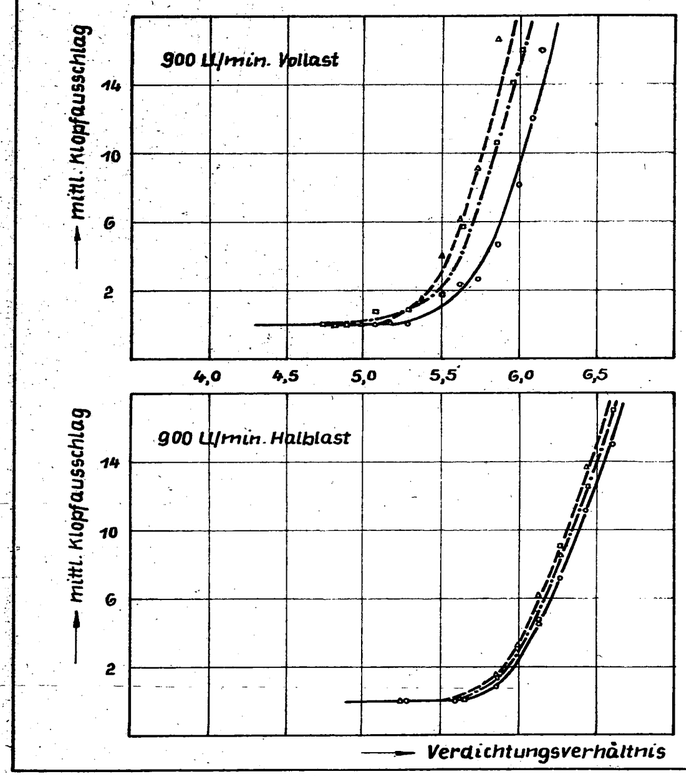


03479

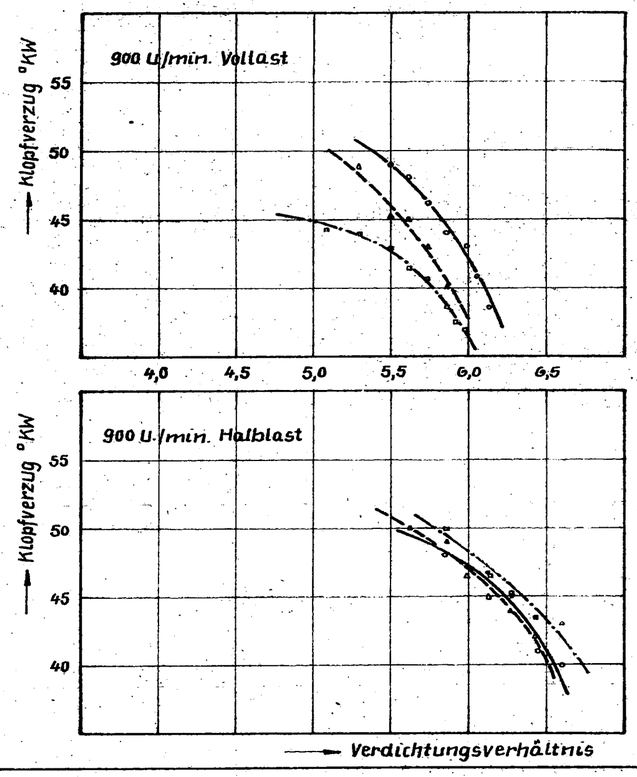
Abhängigkeit zwischen mittleren Klopfausschlag und Klopfverzug.



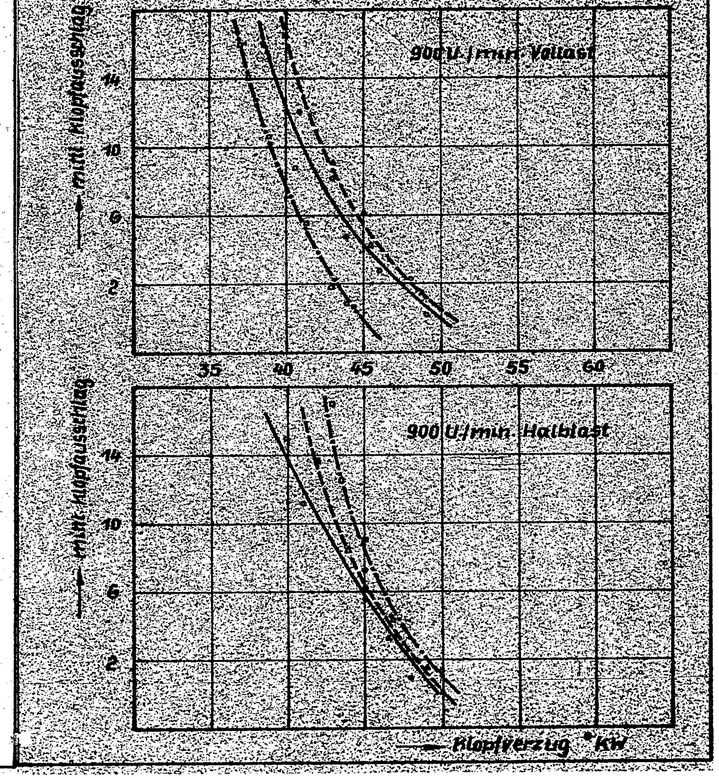
Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und mittlerem Klopfausschlag.



Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und Klopfverzug.

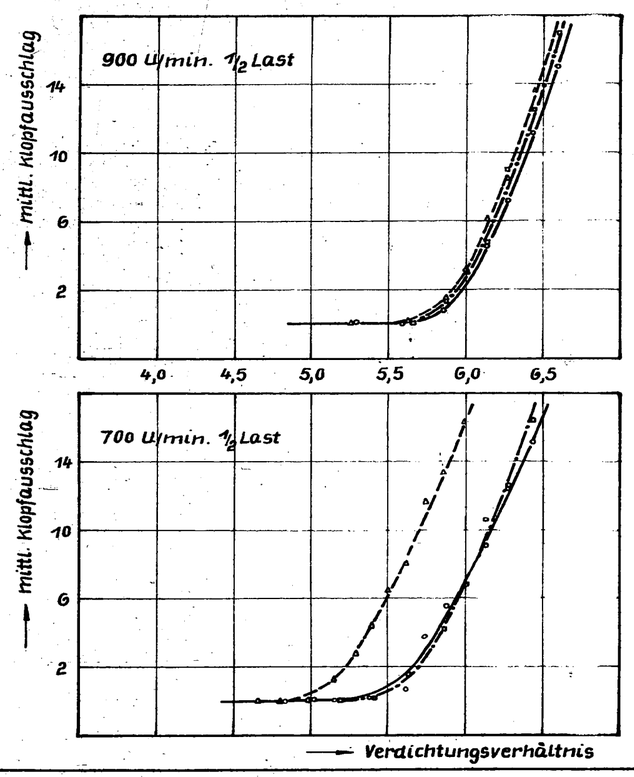


Abhängigkeit zwischen mittlerem Klopfausschlag und Klopfverzug.



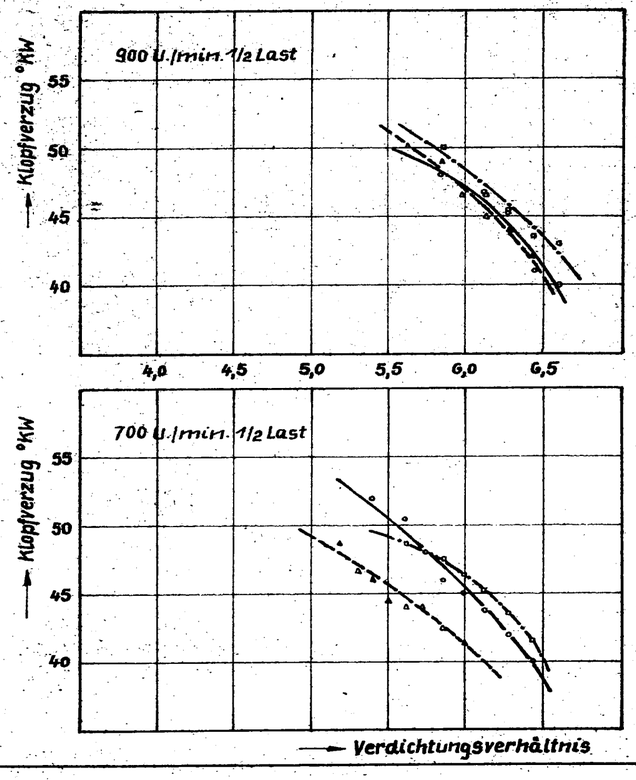
Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und mittlerem Klopfausschlag.

○ Benzolgemisch △ verbleites Benzin □ Schwelbenzin



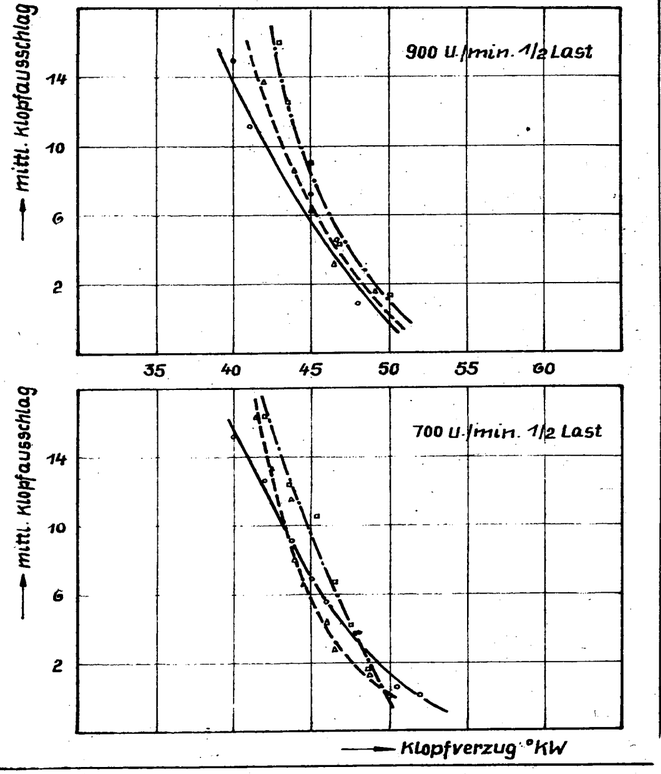
Abhängigkeit zwischen Verdichtungsverhältnis und Klopfverzug.

○ Benzolgemisch △ verbleites Benzin □ Schwelbenzin



Abhängigkeit zwischen mittleren Klopfausschlag und Klopfverzug.

○ Benzolgemisch △ verbleites Benzin □ Schwelbenzin



nicht so weitgehend wie bei den anderen zum Vergleich herangezogenen Benzinmischungen. Es ist anzunehmen, daß dies auf den paraffinischen Charakter des verwendeten Bleibenzins zurückzuführen ist. Es ergibt sich daraus für das verbleite Benzin eine stärkere Drehzahlempfindlichkeit.

Wie durch die Ergebnisse gezeigt wurde, können die Bewertungsverschiebungen bei den einzelnen Betriebsbedingungen zum großen Teil auf Änderungen des Klopfverzuges und damit auf die Verbrennungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Während das Benzolgemisch die geringste Beeinflussung aufweist, ist beim verbleiten Benzin die größte Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Betriebsbedingungen festzustellen. Ein Vergleich dieser beiden Kraftstoffe macht den verschiedenen Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Gegenklopfwirkung besonders deutlich. Ändert man z.B. die Kühlwassertemperatur, so ist, wie aus Blatt 17 ersichtlich, eine beträchtliche Verschiebung der relativen Gegenklopfwirkung des durch Bleitetraäthylzusatz verbesserten Benzins gegenüber dem mit Benzol verbesserten festzustellen. Ähnliche Bewertungsverschiebungen treten auf, wenn man an Stelle der Kühlwassertemperatur das Mischungsverhältnis, die Ansaugluftttemperatur, die Belastung oder die Drehzahl setzt.

In diesem Zusammenhang sei auf die Untersuchungen hingewiesen, die im SAE-Journal unter "Wirkung der Prüfbedingungen auf die Treibstoffbewertung" von A.E.Becker veröffentlicht sind.(14) Die Ausführungen, die sich allerdings auf Drehzahl, Gemischtemperatur und Vorzündung beschränken, zeigen ebenfalls deutlich den Einfluß dieser drei Variablen auf die Bewertung eines Kraftstoffes. Aus den Untersuchungen mit mehr oder weniger reaktionsfreudigen Kraftstoffen ist die unterschiedliche Beeinflussung durch die Betriebsbedingungen zu ersehen. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß nach den genannten Ausführungen mit zunehmender Drehzahl die Klopffestigkeit abnimmt, während bei den in vorliegender Arbeit untersuchten Kraftstoffen die Klopffestigkeit mit

der Drehzahl durchwegs zunimmt. Die Drehzahlabhängigkeit scheint offenbar mit der Eigenart der jeweiligen Kraftstoffe, sowie mit der Motorbauart zusammenzuhängen. Im allgemeinen dürfte jedoch die niedrige Drehzahl deshalb klopffördernd wirken, weil sich der Kolben noch verhältnismäßig nahe dem oberen Totpunkt befindet, wenn die Verbrennung einsetzt; während bei hoher Drehzahl der Kolben sich im gleichen Zeitraum weiter vom oberen Totpunkt entfernt hat und einen größeren Verbrennungsraum freigibt.

5.Beziehungen zum praktischen Fahrbetrieb

Sowohl in Deutschland als auch in Amerika wurden umfangreiche Fahrversuche durchgeführt, um einen Zusammenhang zwischen der im Einzylindermotor ermittelten Oktanzahl und der praktischen Oktanzahl im Gebrauchsmotor zu finden. Dabei kam man übereinstimmend zu dem Ergebnis, daß die Oktanzahlen, die im Einzylinderprüfmotor bei genormten Prüfbedingungen erhalten wurden, nur mit Vorsicht auf den Gebrauchsmotor übertragen werden, und daß unter Umständen recht beträchtliche Unterschiede auftreten können. Wenn auch die Prüfbedingungen im Einzylindermotor so gewählt werden, daß sie den im praktischen Fahrbetrieb herrschenden so nahe wie möglich kommen, so sind doch mit einer einzigen Bewertung, der Oktanzahl, niemals alle Möglichkeiten des praktischen Betriebes zu erfassen. Man neigt deshalb allgemein dazu, das heutige Einpunktverfahren durch ein Mehrpunktverfahren, bzw. durch eine kurvenmäßige Bewertung des Kraftstoffes, zu ersetzen. So wie im Einzylinderprüfmotor bei Änderung der Kühlwassertemperatur, der Ansauglufttemperatur, des Mischungsverhältnisses, der Drehzahl und der Belastung die Klopffestigkeit erhöht oder erniedrigt wird, so werden sich auch im praktischen Fahrbetrieb am Gebrauchsmotor positive oder negative Bewertungsverschiebungen ergeben. Es können also aus dem Klopfverhalten eines Kraftstoffes bei Änderung der Betriebsbedingungen am Einzylindermotor wertvolle Rückschlüsse auf den Gebrauchsmotor gezogen werden.

6.Versuche mit Benzineinspritzung

Die Untersuchungen mit Einspritzbetrieb (7,8) und Überladung wurden am gleichen Versuchsmotor durchgeführt. Der Antrieb der Einspritzpumpe erfolgt von der Nockenwelle aus. Zur Verstellung und zur Kontrolle des Einspritzpunktes trägt die Einspritzpumpe eine mit Gradeinteilung versehene Scheibe. Der Düsenhalter wurde in eine der beiden Zündkerzenbohrungen eingebaut, die 45° zur Zylinderachse geneigt sind. Als Drucklufterzeuger wurde ein Roots-Gebläse verwendet, das von einem durch Widerstände regulierbaren Elektromotor angetrieben wurde. Für eine möglichst genaue Druckeinstellung wurde zwischen Luftuhr und Kompressor eine Drossel vorgesehen (Abb.22). Damit die Ablesegeauigkeit des Druckes durch die stoßweise Luftentnahme bei laufendem Motor nicht beeinträchtigt wird, mußte die Anlage mit einem verhältnismäßig großen Windkessel ausgerüstet werden.(Abb.23)

Zunächst wurden Leistungs-und Verbrauchsmessungen mit den vorhandenen Düsen durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, daß die Zapfendüsen mit einem Strahlwinkel von 12° und einem Zapfendurchmesser von 1 mm, die sich bei früheren Versuchen als die günstigsten erwiesen, noch verhältnismäßig schlechte Verbrauchswerte hatten. Vor allem bei Überladung erreichte der Verbrauch ganz enorm hohe Werte.(s.Abb.24) Wesentlich günstigere Verbrauchswerte konnten mit einer Lochdüse (4) mit 80° Strahlwinkel erzielt werden, die daher auch für die weiteren Versuche verwendet wurde.(s.Abb.25 u.26). Auch konnte dabei der Regelbereich der Einspritzpumpe um die Hälfte vergrößert werden. Diese Feststellung kann durch nachfolgende Überlegung geklärt werden: Bei dem kleinen Strahlwinkel von 12° ist die Gemischbildung sehr ungleichmäßig. Außerhalb des Brennstoffstrahles bildet sich ein armes Gemisch, während sich an der Aufschlagstelle des Strahles der Kraftstoff anreichert, so daß er dort kondensiert und für die unmittelbare Verbrennung ausfällt. Dieser Umstand wird noch durch die verhältnismäßig kleinen Zylinderabmessungen begünstigt, da die Zerstäubung nicht unmittelbar nach Austritt aus der Düse erfolgt. Wesentlich besser sind die Gemischverteilung und damit die Verbrennungseigenschaften bei der Lochdüse mit 80° Strahlwinkel. Noch etwas bessere Werte dürfte

Kompressoranlage. M. 1:10

1 = Gasuhr 2 = Windkessel 3 = Elektromotor 4 = Kompressor 5 = Drossel

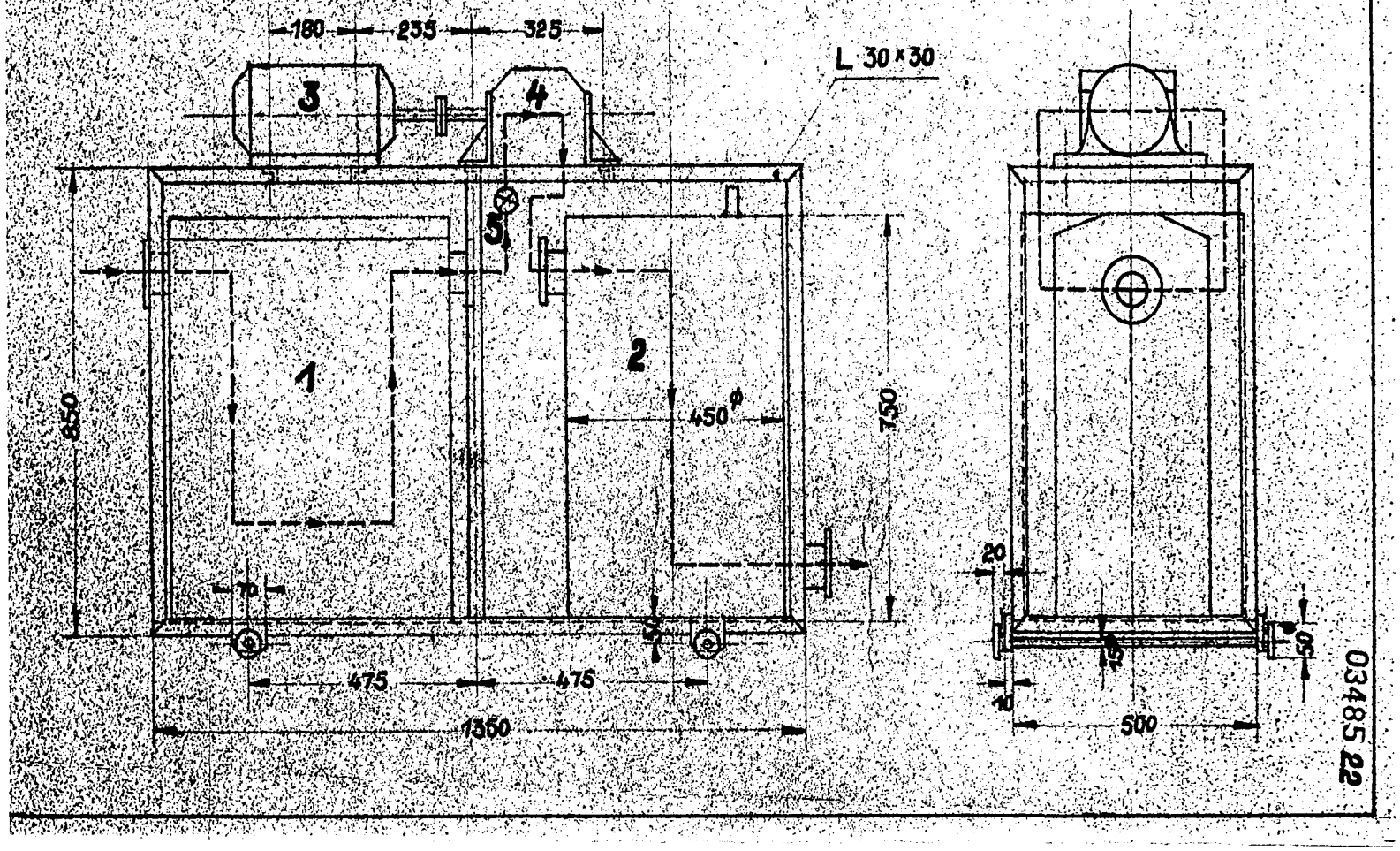
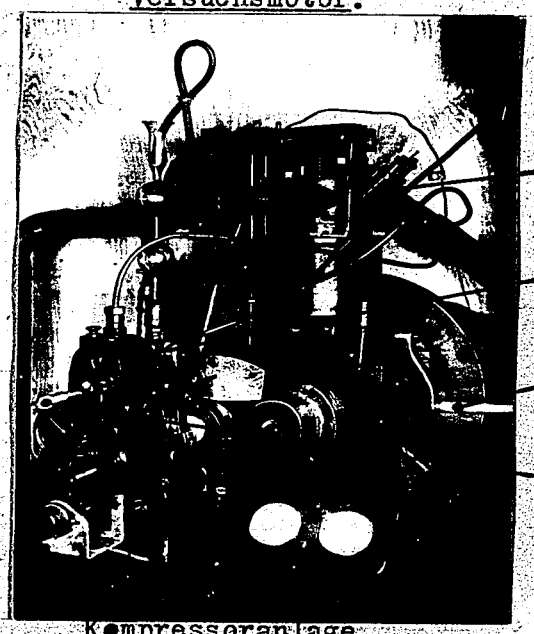


Abb. 23

Versuchsmotor.



Düsenhalter mit Düse

Einspritzpumpe

Verdichtungsänderung

Mikrometerschraube zur Verstellung der Einspritzmenge

Kompressoranlage.



Quecksilbermanometer

Kompressor

Federmanometer

Windkessel

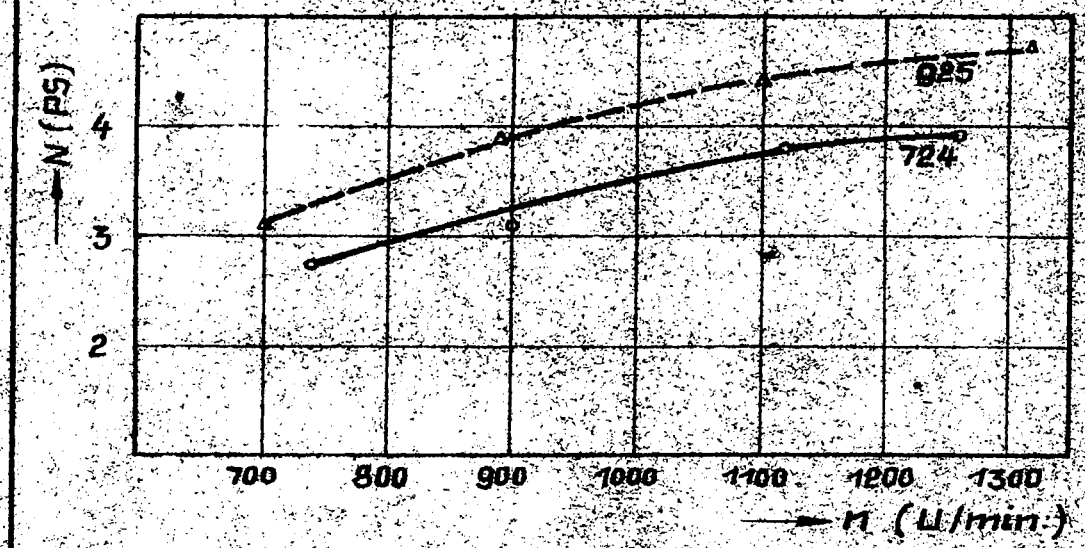
Luftuhr

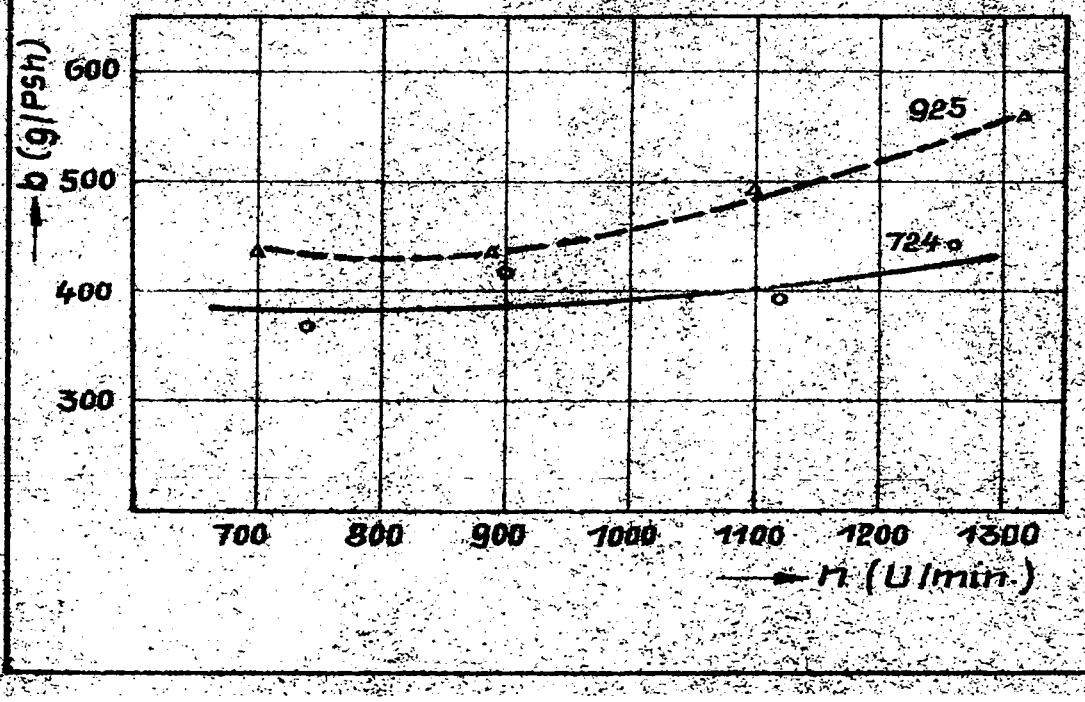
03187

Abhängigkeit von Leistung und Verbrauch von der Drehzahl.

Kraftstoff: Eraölbenzin OZ 42

Düse: Zapfendüse 12°



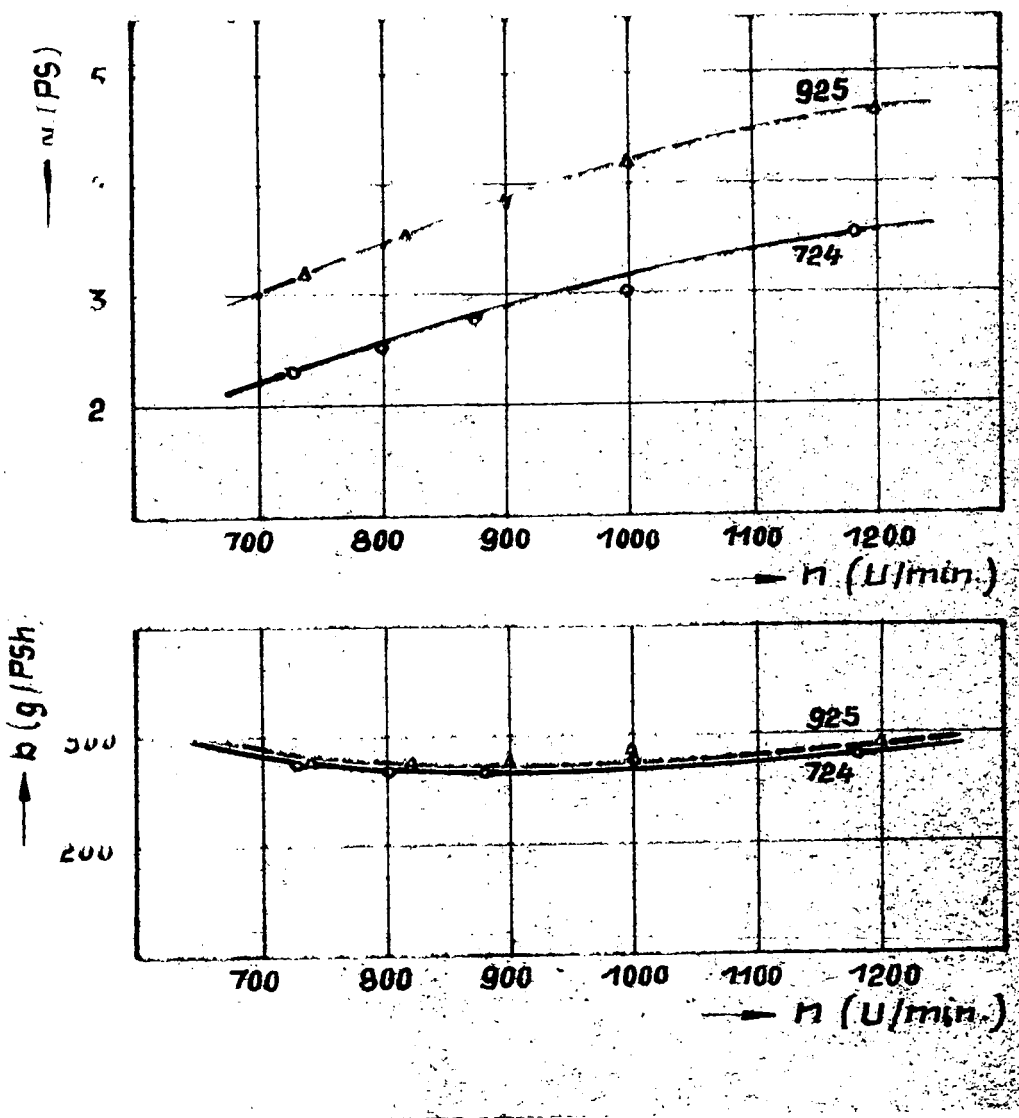


25

03488

Abhängkeit von Leistung und Verbrauch von der Drehzahl

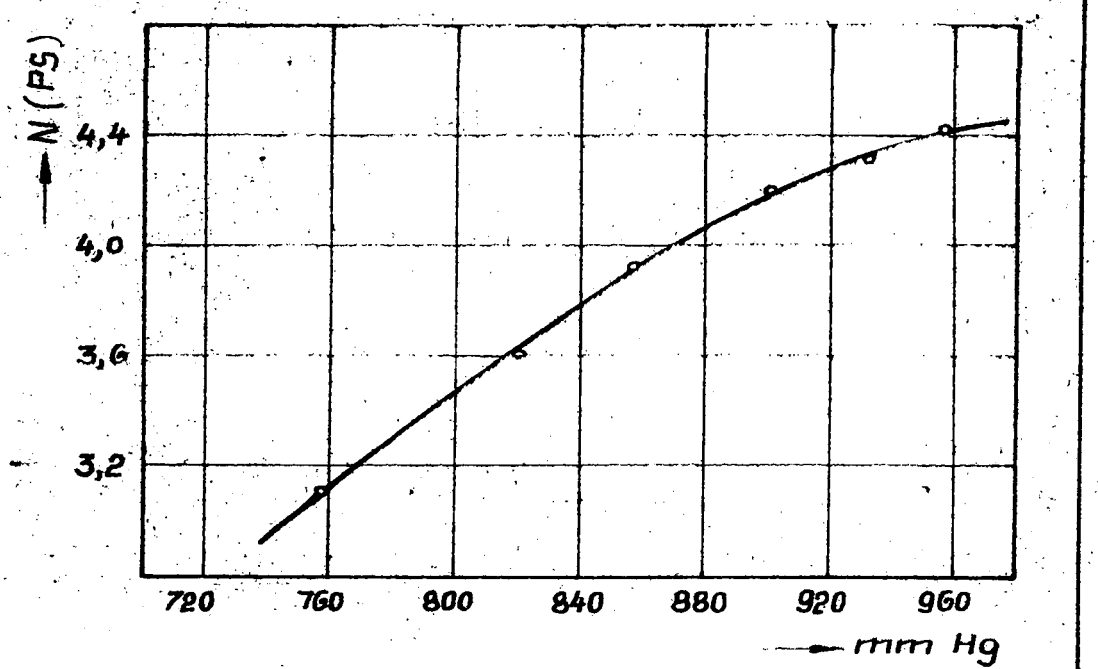
Kraftstoff: Erdölbenzin [illegible]

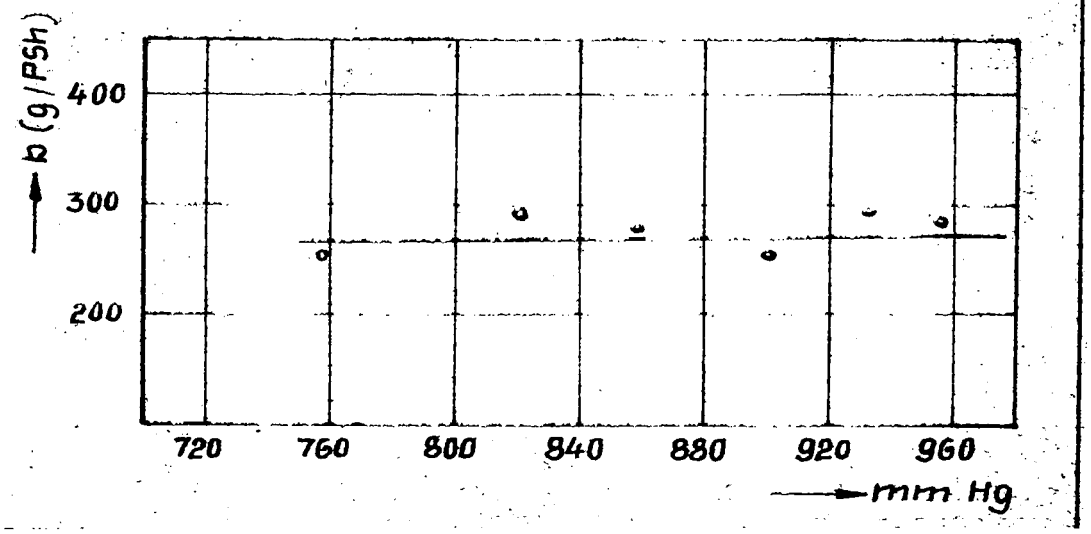


26
03489

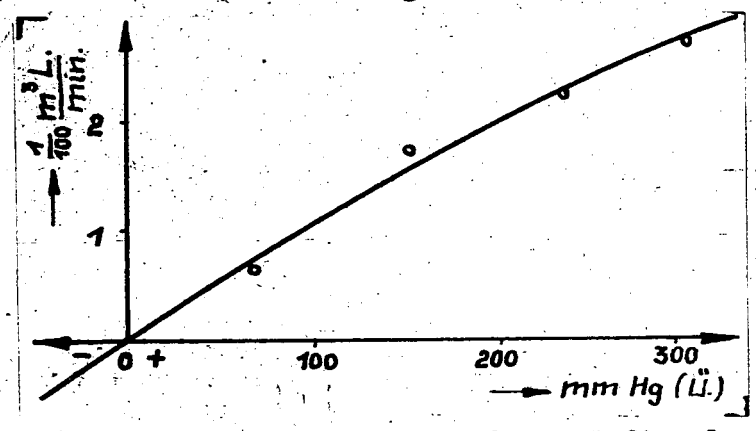
Abhängkeit von Leistung und Verbrauch vom Ladedruck.

Kraftstoff: Eraölbenzin OZ 42
Düse: Lochdüse (4) 80°





eine Zapfendüse mit dem gleichen Strahlwinkel ergeben. Leider konnte eine derartige Düse von Bosch nicht geliefert werden. Für die Untersuchungen war dies jedoch nicht von Bedeutung. Ein noch größerer Strahlwinkel wirtk sich wegen der größeren Flächenberührung mit den Zylinderwandungen und der damit verbundenen Kondensation wieder nachteilig auf die Verbrennung aus. Beim Einbau der Lochdüse war zu beachten, daß ein Strahl nicht direkt auf die Zündkerze spritzt, da sonst wegen des örtlich überfetten Gemisches keine Entzündung erfolgt. Mit den besten Werten lief der Motor, wenn die Düse so eingesetzt wurde, daß die Zündkerze von zwei Strahlen eingeschlossen ist. Ehe die Versuche mit Überladung durchgeführt werden konnten, mußten die Undichtigkeitsverluste der Anlage auf ein Minimum herabgedrückt werden. Für die noch verbleibenden unvermeidlichen Luftverluste bei höheren Ladedrücken sind Kompressor und Ventilführung verantwortlich.(s.Verlustkurve!)



Verlustkurve

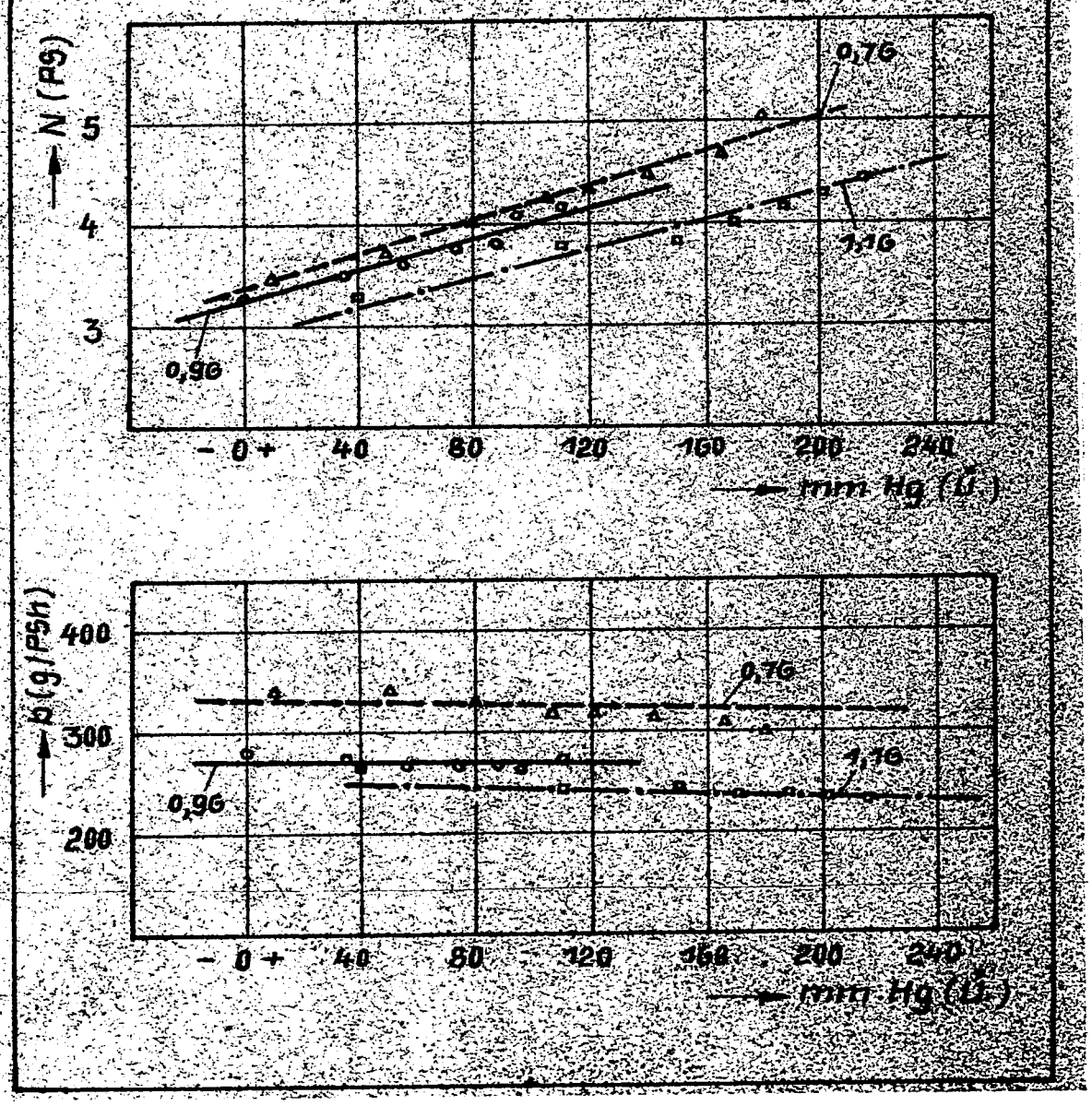
Bei den ersten Versuchen mit größeren Luftverlusten am Kompressor (ein Kompressorwellenende war nicht abgedichtet) konnte mit steigender Überladung keine Steigerung der Klopfintensität erreicht werden, da man bei Aufladung infolge der Luftverluste immer fetter fuhr als gemessen wurde. Es hoben sich also Überladung und Gemischzusammensetzung in ihrer Wirkung bezüglich des Klopfens ungefähr auf, so daß die Klopfintensität annähernd die gleiche blieb.

Für die Untersuchungen wurde ein amerikanisches Flugbenzin (unverbleit MOZ 70) zur Verfügung gestellt. In Abb.27 sind dafür die Leistungs-und Verbrauchswerte bei drei verschiedenen Gemischzusammensetzungen (0,76; 0,96 u.1,16) in Abhängigkeit vom Überladedruck aufgetragen. Leistungs-und verbrauchsmäßig gesehen,erweist sich demnach eine Gemischzusammensetzung von 0,96 am günstigsten. Aus den Klopfkurven in Abb. 28 u.29 ist ersichtlich, daß einer Ladedruckerhöhung von 200 mm Hg eine Verdichtungserhöhung von 5,8 und 6,8 entspricht. In Abb.30 sind die Abhängigkeiten von Klopfwert, Klopfvertug und Verdichtungsverhältnis für die drei Mischungsverhältnisse zusammengestellt. Die durch Mittelung erhaltenen Kurven zeigen ungefähr die gleiche Tendenz wie bei Vergaserbetrieb. Betrachtet man jedoch die einzelnen Arbeitsspiele, so zeigt der mit Einspritzbetrieb laufende Motor ein ganz anderes Klopfverhalten. Während bei Vergaserbetrieb von leichtem bis zu starkem Klopfen Schwankungen der Klopfamplituden nur bis zu einem gewissen Grad auftraten(s.Abb.9,10 u.11), lief bei Einspritzbetrieb der Motor auch bei stärkerem Klopfen mitunter vollkommen klopffrei(s.Abb.31 u.32). Da die Druckschwankungen in der Ansaug- und Auspuffleitung, die kleinen Zündunterschiede und die Wirbelungsverhältnisse hier genau so wie bei Vergaserbetrieb auftreten, so ist damit der Beweis erbracht, daß für die Unregelmäßigkeiten in der Klopfintensität in erster Linie die Gemischbildung und die Gemischzusammensetzung verantwortlich sind. Bei der Bewegung des Pumpenkolbens wird in der Einspritzleitung keine gleichmäßige Drucksteigerung bis zur Erreichung des Einspritzdruckes an der Düse erreicht. Die in der Nähe der Einspritzpumpe befindlichen Leitungsteile werden infolge der Trägheit des Kraftstoffes einen größeren Druckanstieg aufweisen als die weiter davon entfernten. Dadurch entsteht eine Druckwelle, die die Kraftstoffleitung durchläuft und an der Düse die Einspritzung auslöst. Beim Schließen der Düse wird die Druckwelle reflektiert, die sich dann bei den folgenden Förderhüben positiv oder negativ mit der ankommenden Druckwelle überlagert. Diese Schwingungen verursachen Unregelmäßigkeiten in der Einspritzmenge und diese beeinflussen wieder die

27
03432

Abhängigkeit von Leistung und Verbrauch von der Übersetzung

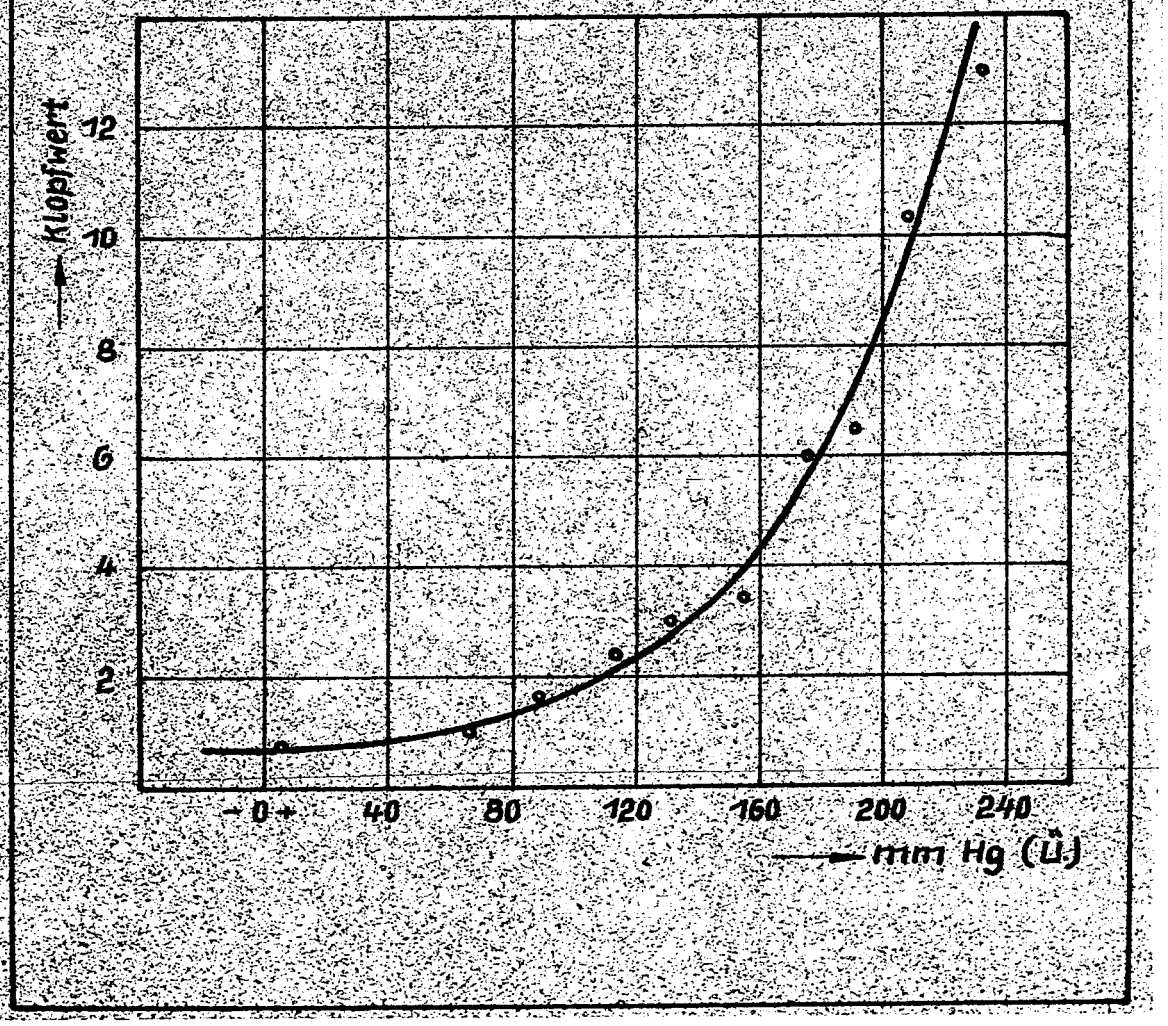
Kraftstoff; amerik. Flugbenzin 134
MOZ – 70



03493

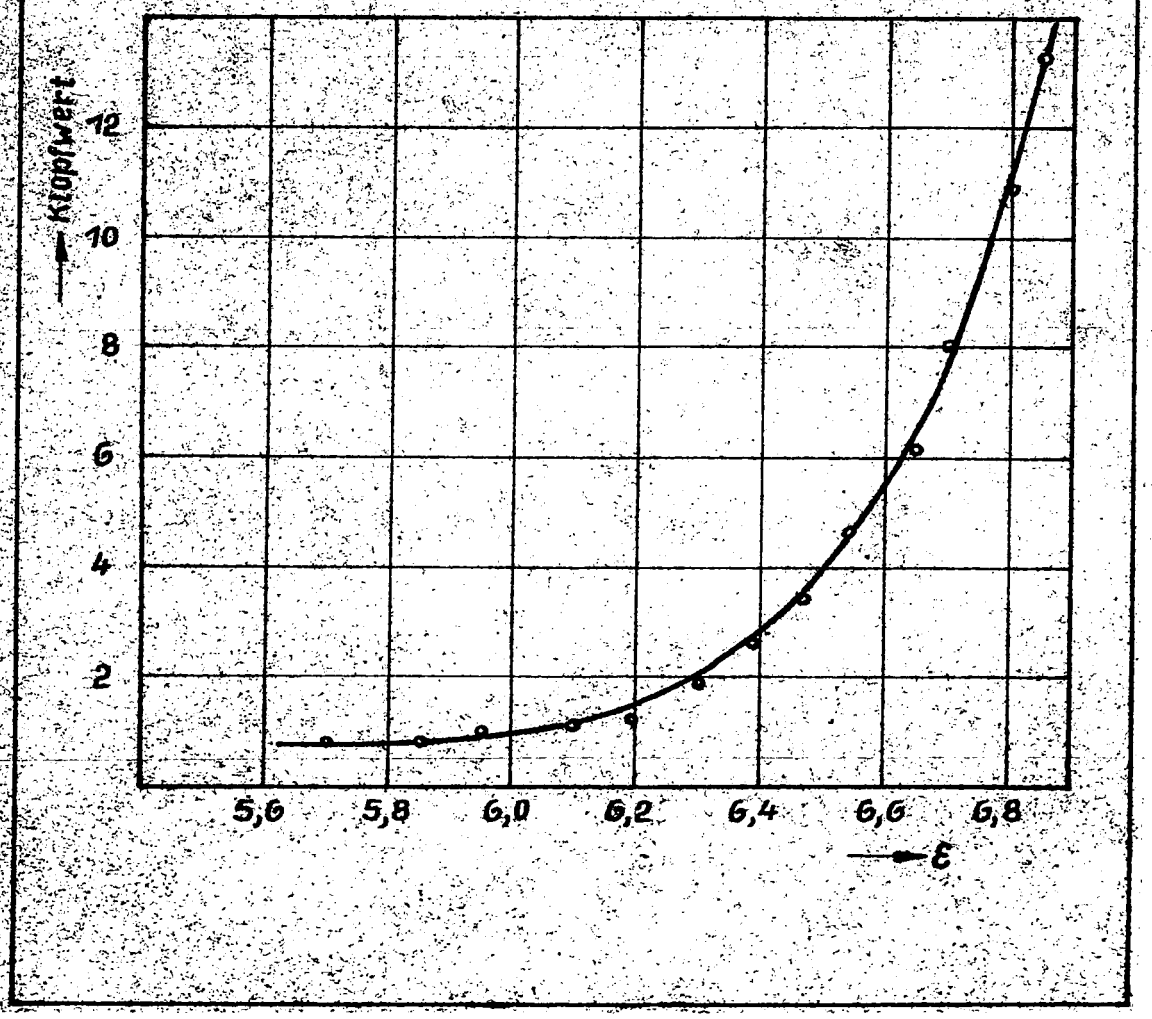
Abhängigkeit des Klopfwertes von der Überladung.

Kraftstoff: amerik. Flugbenzin 134
MOZ = 70
$\lambda \sim 0{,}9 \sim$ Konstant



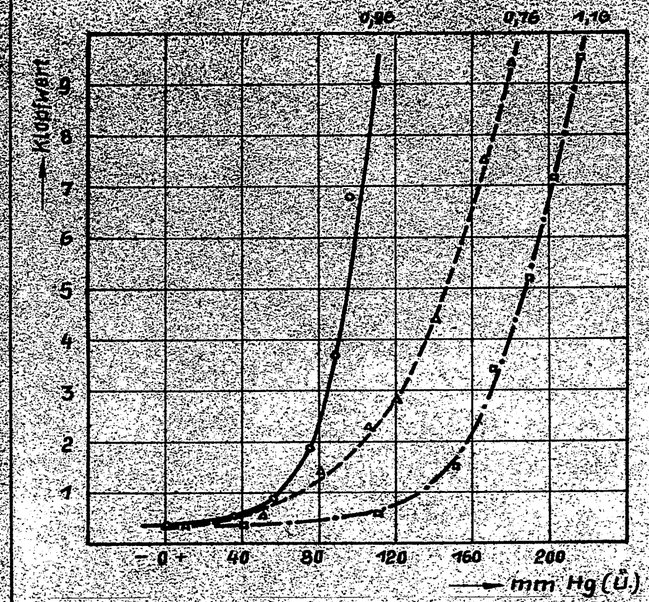
Abhängigkeit des Klopfwertes von der der Überladung entsprechenden Verdichtung.

Kraftstoff: amerik. Flugbenzin 134
MOZ = 70
λ ~ 0,9 ~ konstant



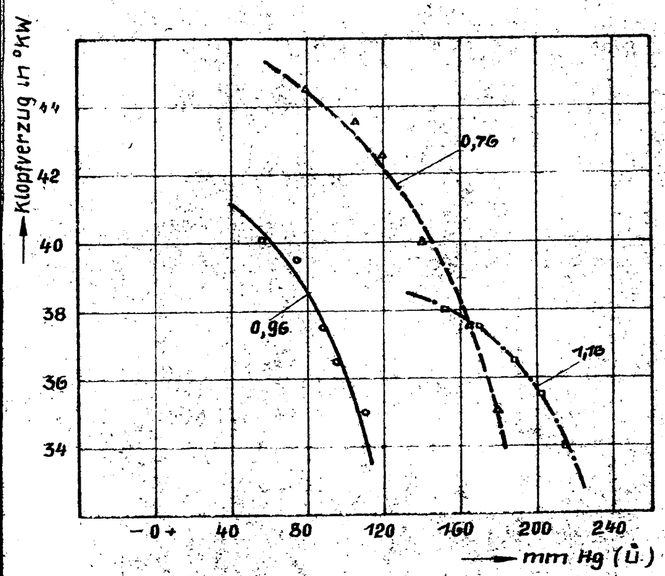
Abhängigkeit des Klopfwertes von der Überladung.

Kraftstoff: amerik. Flugbenzin 134
MOZ = 70



Abhängigkeit des Klopfverzugs von der Überladung.

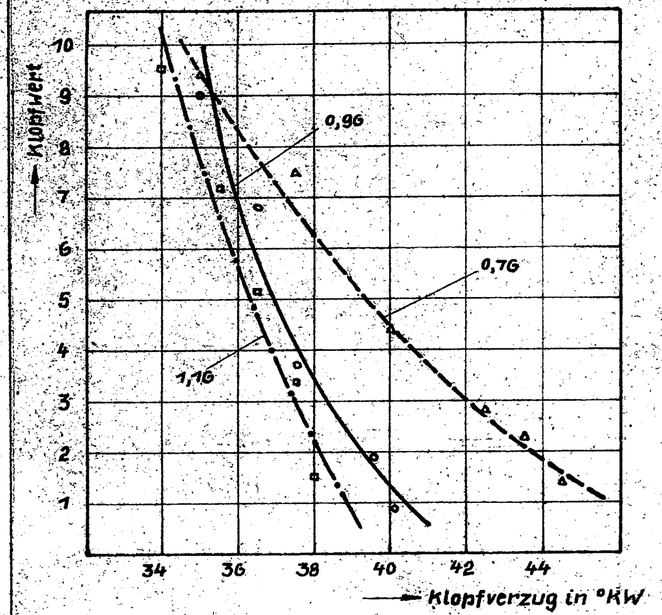
Kraftstoff: amerik. Flugbenzin 134
MOZ = 70



03495

Abhängigkeit des Klopfverzugs vom Klopfwert.

Kraftstoff: amerik. Flugbenzin 134
MOZ = 70



03496

Geräuschoszillogramme von aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen bei Einspritzbetrieb.
Man beachte bei klopfendem Betrieb die vollkommen klopffreien Arbeitsspiele.

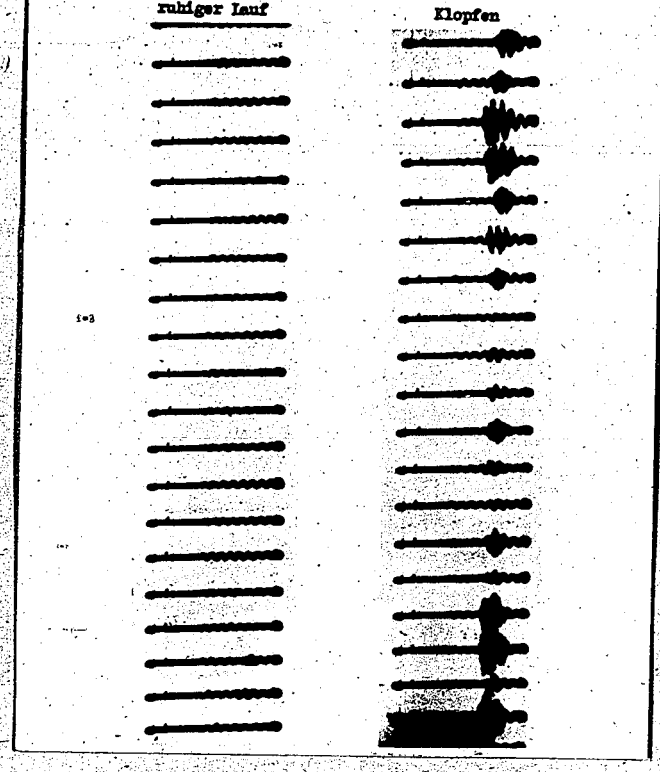


Abb. 31

Klopfaufnahmen bei Einspritzbetrieb.

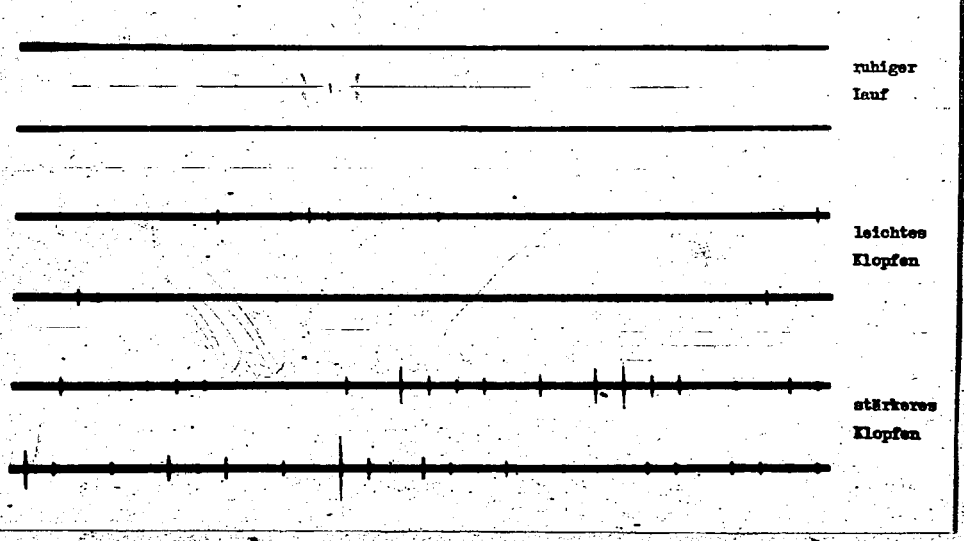


Abb. 32

Strahlbildung und die Verdampfung. Je größer die Strahlkegeloberfläche, desto besser die Verbrennung; denn die Verdampfung setzt zuerst bei den kleinen Kraftstofftröpfchen am Strahlrand ein, während in der Strahlmitte wegen der Kraftstoffanhäufung die Verdampfung unvollkommen ist. Am stärksten werden diese Unregelmäßigkeiten durch die Länge der Einspritzleitung beeinflußt. So werden also bis zum Einsetzen der Zündung mehr oder weniger große Kraftstoffmengen aufbereitet, die, da die Luftzufuhr ungefähr die gleiche bleibt, das Mischungsverhältnis verändern und somit durch Änderung der Verbrennungsgeschwindigkeit das Klopfen beeinflussen.

Eine grobe Beurteilung der Klopfintensitätsschwankungen läßt die Klopfgrenzkurve in Abb.33 zu. Danach dürften sich die Schwankungen im fetten Gebiet stärker auswirken als im mageren, da dort die Klopfgrenzkurve steiler verläuft, so daß einer Änderung des Mischungsverhältnisses eine verhältnnis größere Änderung des Ladedrucks entspricht. Abb.34 zeigt den Zusammenhang zwischen Klopfwert und Mischungsverhältnis für zwei verschiedene Überladungen(8 und 215 mm Hg). Wie daraus zu ersehen ist, verschiebt sich mit der Überladung das Klopfmaximum und zwar in das magere Gebiet. Dabei wurde, dem Klopfwert entsprechend, bei der Überladung die Verdichtung herabgesetzt. Diese Verschiebung dürfte darauf zurückzuführen sein, daß bei der Überladung die durch Überdruck in den Zylinder gepresste Luft durch die scharfen Ventilkanten besser verwirbelt wird, so daß die Vermischung von Luft und Brennstoff vollkommener wird. Der ohne Überladung kondensierte oder aus einem anderen Grunde nicht zur Verbrennung herangezogene Kraftstoff bedingt daher bei Überladung eine Verringerung der Einspritzmenge. Es erweist sich somit die Beurteilung eines mit Überladung gefahrenen Kraftstoffes auf Grund einer Klopfgrenzkurve als nicht ausreichend. Bei Einzeichnung mehrerer Klopfkurven für verschiedene Überladungen in diese Darstellung(s.Abb.34)ergibt sich jedoch ein wenig anschauliches

Bild. Abb.33 zeigt eine Klopfgrenzkurve für Klopfbeginn in Abhängigkeit von der Überladung und vom Mischungsverhältnis. Vervollkommnet man nun diese Darstellung dadurch, daß man Klopfgrenzkurven für verschiedene Klopfstärken einzeichnet(Klopfbeginn bis OZ-Klopfen), so ergibt sich ein sogenanntes "Klopfgebirge". Leider konnten aus Benzinmangel diese Versuchspunkte mit diesem Kraftstoff nicht mehr gefahren werden. Daher wurde diese Versuchsreihe mit einem anderen Kraftstoff durchgeführt(Erdölbenzin OZ 42). Die Zusammenhänge zwischen Überladung, Mischungsverhältnis, Klopfstärke und Klopfmaximum sind aus Abb.35 zu ersehen. Diese Darstellung gibt ein ziemlich umfassendes räumliches Gebilde, aus dem alle für einen Flugmotorenkraftstoff interessierenden Abhängigkeiten zu entnehmen sein dürften.

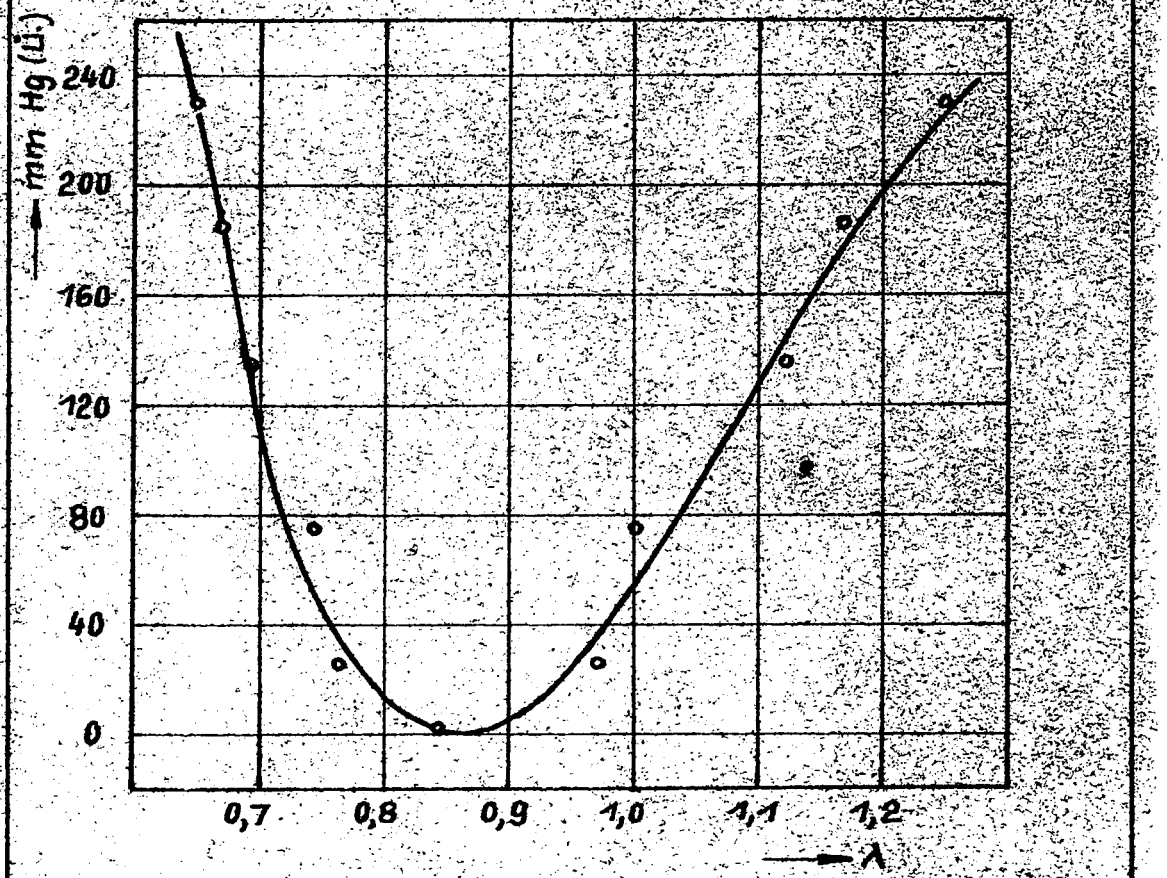
7.Ermittlung des Klopfbeginns

Während die OZ-Bestimmung bei einer verhältnismäßig hohen Klopfstärke vorgenommen wird, wird für die bei Flugkraftstoffen zusätzlich vorgenommene Überladeprüfung der sogenannte Klopfbeginn zugrunde gelegt. Eine genaue Festlegung des Klopfbeginns bereitet jedoch weit größere Schwierigkeiten als die Einhaltung einer größeren Klopfstärke. Man hat sich bisher so geholfen, daß man beim Einzylinderprüfmotor eine Klopfschlagzahl von 6-10/Min. als Klopfbeginn definierte, und zwar handelt es sich hierbei um die gehörmäßig deutlich wahrnehmbaren Klopfschläge. Um sich von der Subjektivität der gehörmäßigen Mittlung des Klopfbeginns freizumachen, hat es nicht an Versuchen gefehlt. Insbesondere bei der DVL wurde von Seeber und Lichtenberger ein neues Verfahren ausgearbeitet, welches auf dem Wege über die Druckindizierung nach dem Prinzip der zweiten Ableitung eine Verbesserung der Meßgenauigkeit ermöglichen sollte. Bei diesem sogenannten DVL-Verfahren wird die Klopfstärke über dem Ladedruck aufgetragen, wobei sich ein Kurvenzug ergibt, der an der Stelle des Klopfbeginns einen deutlich wahr-

33
03.99

Klopfgrenzkurve

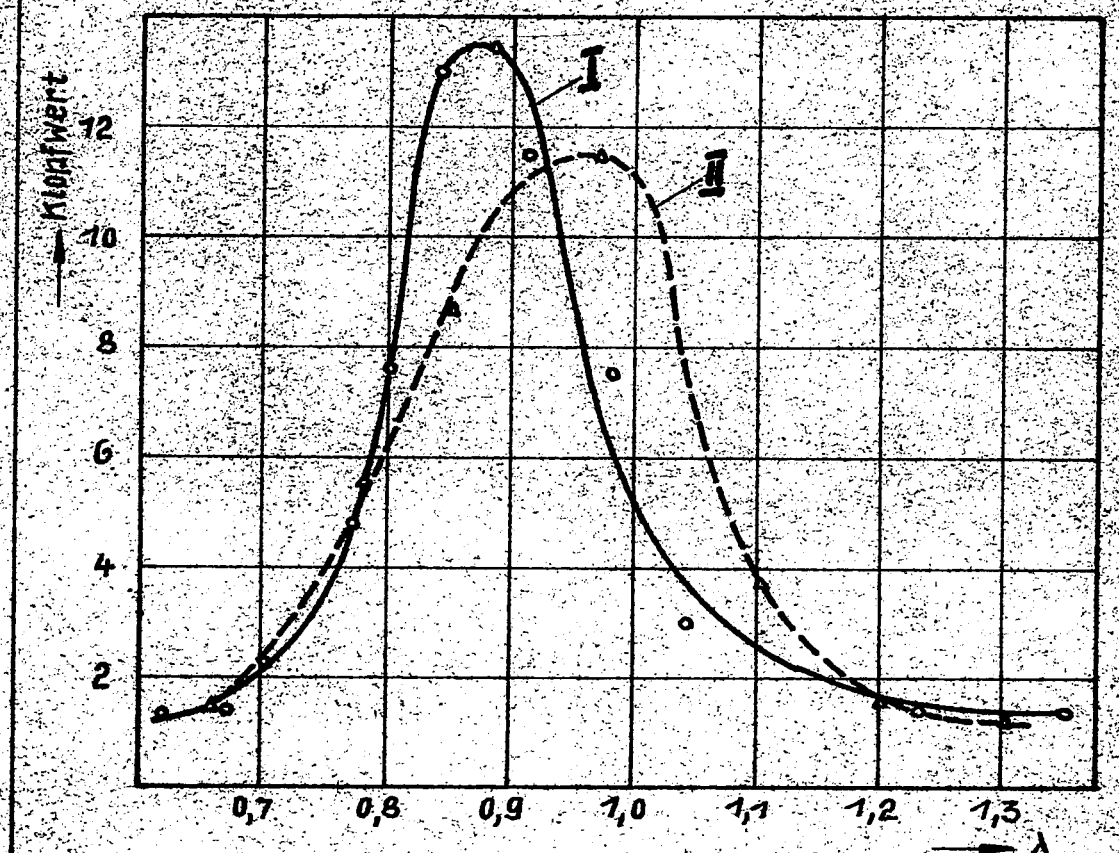
Kraftstoff: amerik. Flugbenzin 134
MOZ - 70



03500

Abhängigkeit des Klopfwertes vom Mischungsverhältnis.

Kraftstoff: amerik. Flugbenzin 134
MOZ = 70



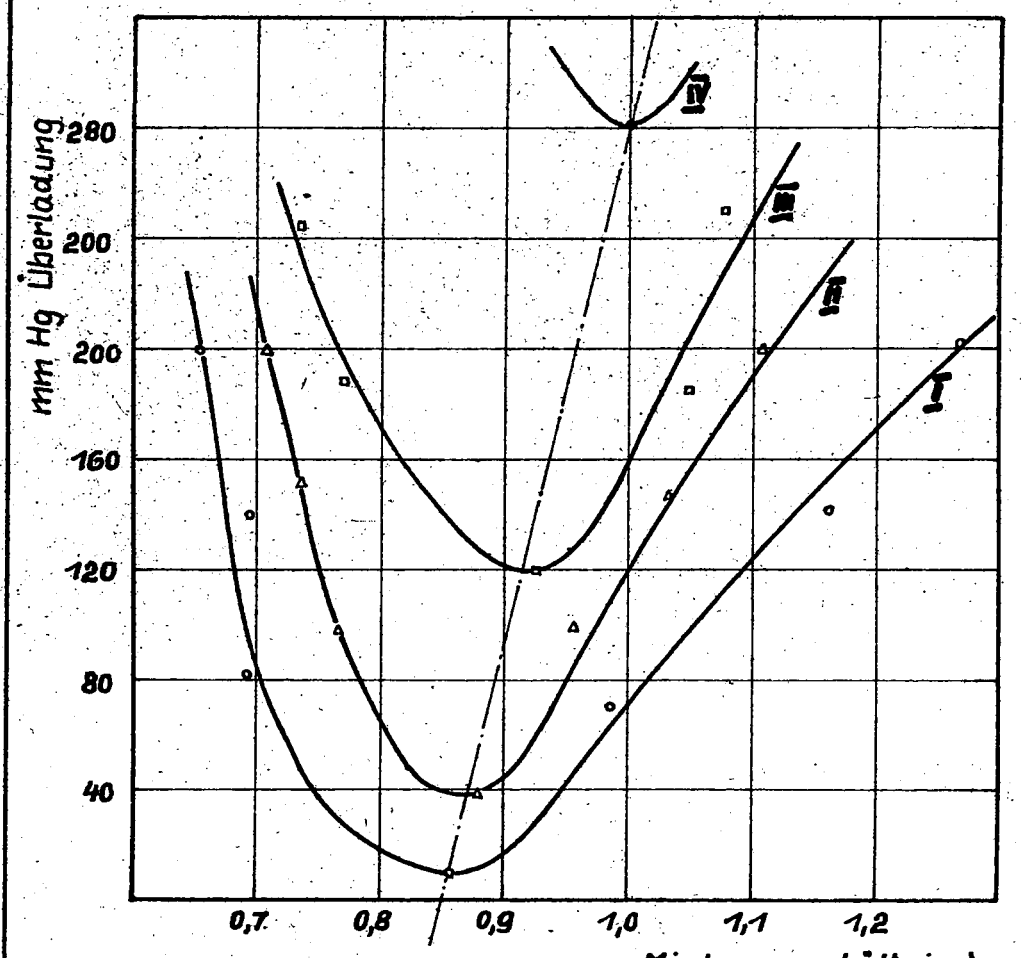
I 8 mm Hg (Ü-)
II 215 mm Hg (Ü-)

35

03501

Klopfgebirge.

Kraftstoff: Erdölbenzin OZ 42



I Klopfbeginn o
II mittl. Klopfen Δ
III OZ-Klopfen □
IV sehr starkes Klopfen •

nehmbaren Knick aufweist und somit eine objektive Feststellung des Klopfbeginns gewährleisten soll.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen erschien es angebracht, dieser Frage besonderes Augenmerk zuzuwenden und zu prüfen, ob auch bei Anwendung des EAK-Verfahrens eine derartige Unstetigkeit in der Geräuschstärke beim Übergang vom ruhigen Motorlauf zum klopfenden Betrieb festzustellen ist.

In Bild 36 sind die nach dem EAK-Verfahren erhaltenen Klopfwerte über dem Verdichtungsverhältnis aufgetragen. Im Fall I wurden die Klopfwerte an einem Zeigerinstrument abgelesen, dessen Ausschlag der jeweiligen mittleren Klopfstärke entspricht. Im Fall II wurden die auf der Braunschen Röhre sichtbaren Geräuschbilder photographisch auf einem fortlaufenden Film festgehalten und durch arithmetische Mittlung ausgewertet. Beide Kurven zeigen die gleiche Tendenz, nämlich einen zügigen Übergang vom ruhigen Lauf zum klopfenden Betrieb. Bei dieser Auswertung wurden alle Klopfausschläge, also auch die kleinen Amplituden, die mit dem Gehör nicht immer wahrgenommen werden können, mit berücksichtigt.

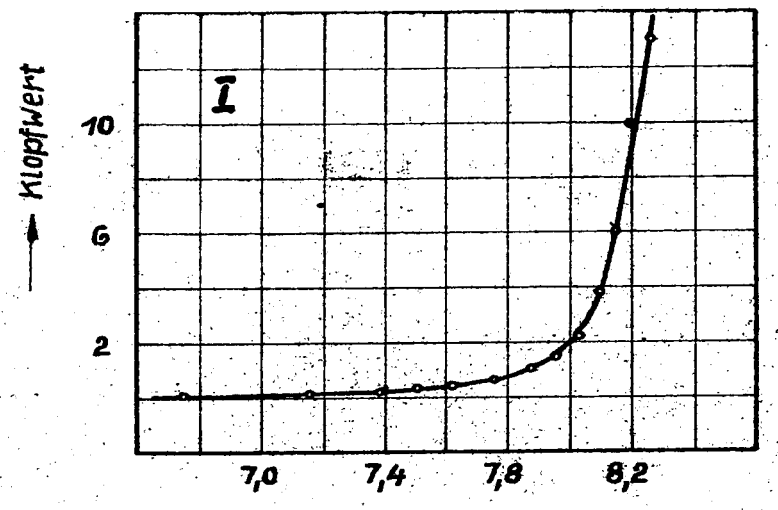
Läßt man nun die kleinen Klopfamplituden außer Betracht und berücksichtigt nur diejenigen, welche über ein bestimmtes Maß hinausgehen, so kann man den oben genannten Knick im Kurvenverlauf feststellen. Abb.37 läßt diese Unstetigkeit erkennen, die mit einer Stärke in Erscheinung tritt, bei der die kleinen Klopfausschläge vernachlässigt werden. Damit ist der Beweis erbracht, daß die beim DVL-Verfahren vorhandene Unstetigkeit nur dadurch erreicht wird, daß nicht alle Klopfschläge, sondern nur diejenigen erfaßt werden, welche über ein bestimmtes Maß hinausgehen. Rein physikalisch gesehen ist zwischen ruhigem Lauf und klopfendem Betrieb keine Unstetigkeit anzunehmen. Letztere kommt, wie besprochen, nur dadurch zustande, daß man vereinbarungsgemäß nur diejenigen Klopfschläge berücksichtigt, die einen bestimmten Schwellwert übersteigen. Die Festlegung des tatsächlichen "Klopfbeginns" ist dadurch aber nicht sichergestellt.

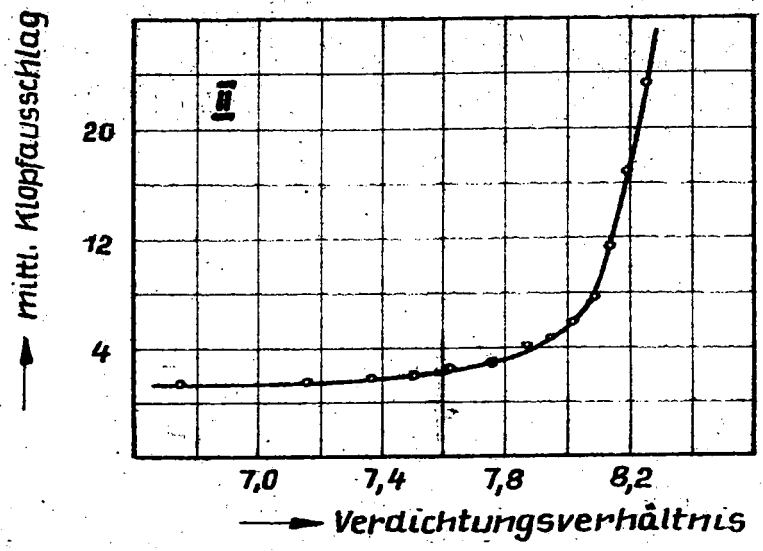
Es ist beabsichtigt, diese Untersuchungen zu erweitern und zwar an Einzylinderprüfmotoren für Flugkraftstoffe.

Klopfkurven.

I erhalten durch Mittelwertinstrument

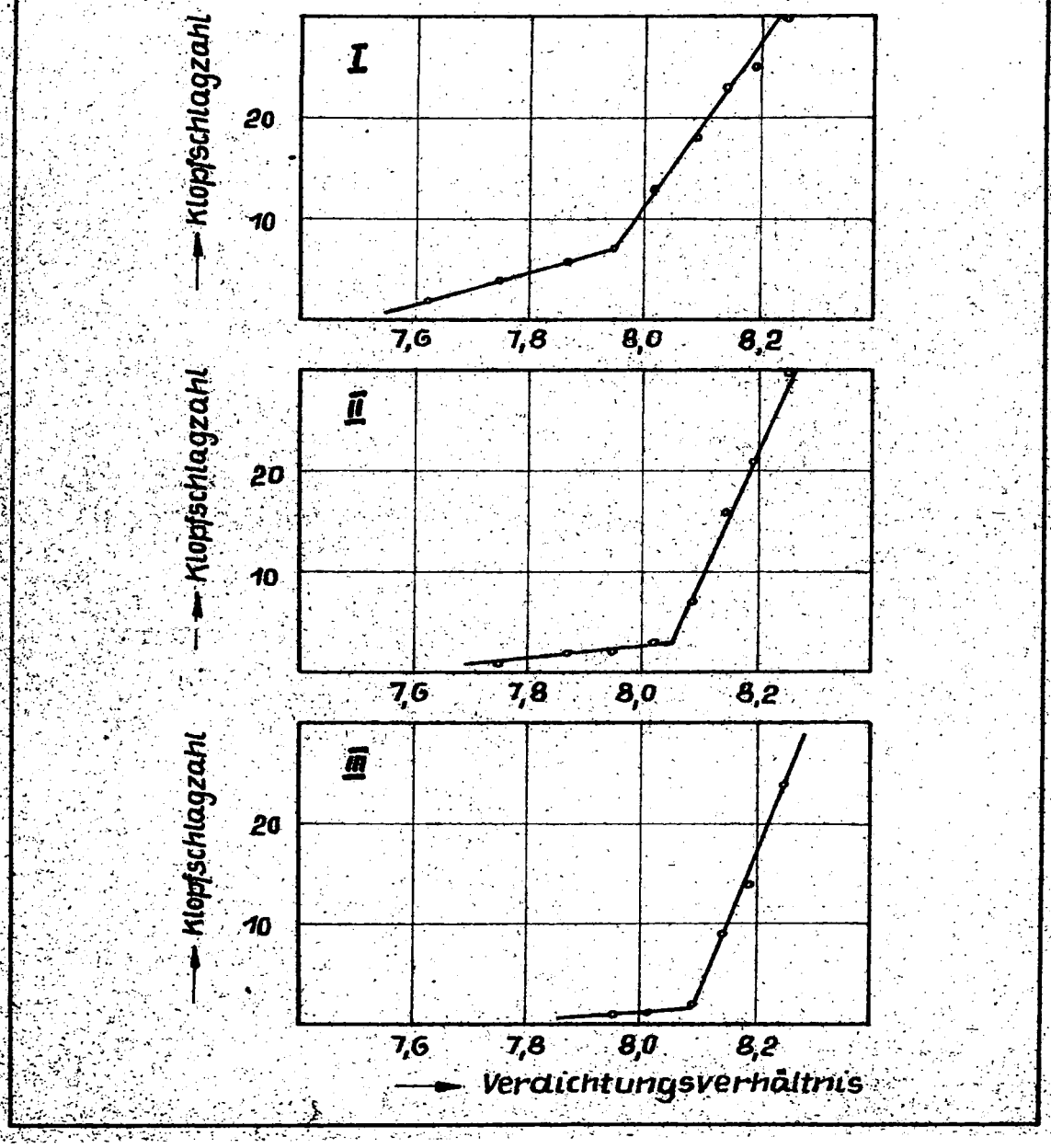
II erhalten durch Filmauswertung





Abhängigkeit der Klopfschlagzahl vom Verdichtungsverhältnis.

I Auswertung aller Klopfausschläge über 6 mm
II " " " " 10 "
III " " " " 15 "



Zusammenfassung

Durch die Untersuchungen in vorliegender Arbeit konnte gezeigt werden, daß der Klopfverzug maßgebenden Einfluß auf die Verdichtungsmöglichkeit und somit auf das Klopfverhalten hat, und daß das unterschiedliche Klopfverhalten für Kraftstoffe gleicher Oktanzahl bei Änderung der verschiedenen Betriebsbedingungen weitgehendst durch die Größe des Klopfverzuges geklärt werden kann. In anbetracht einer oft ungenügenden Übereinstimmung zwischen der Oktanzahl und dem Kraftstoffverhalten im praktischen Fahrbetrieb ist es notwendig, auch im Einzylindermotor Kraftstoffprüfungen unter weitgehender Veränderung der Betriebsbedingungen durchzuführen. Durch die hierbei gewonnenen Erkenntnisse können dann manche Unterschiede geklärt werden, so daß eine wirkliche einwandfreie Bewertung der Kraftstoffe in allen Fällen zustande kommen kann.

Klopfmessungen, welche über mehrere aufeinander folgende Arbeitsspiele durchgeführt wurden, zeigten, daß oft beträchtliche Schwankungen in der Klopfintensität vorhanden waren, wofür eine ausreichende Begründung gefunden werden konnte.

Weiterhin wurde der Ermittlung des Klopfbeginns besonderes Augenmerk zugewendet, der für die Bewertung von Flugkraftstoffen bedeutungsvoll ist. Es konnte gezeigt werden, daß die bisher verwendete Methode den wirklichen Verhältnissen nicht genau genug entspricht, da hierbei nur die starken, mit dem Ohr wahrnehmbaren Klopfschläge erfaßt wurden. Mit Hilfe des EAK-Verfahrens wurden außer diesen starken Klopfschlägen auch noch diejenigen mit erfaßt, welche gehörmäßig nicht immer wahrgenommen werden können, wodurch man dem im Motor sich tatsächlich abspielenden Klopfvorgang eher gerecht wird.

Schrifttum

1. A.W.Schmidt,Bewertung von Kraftstoffen. Braunkohle 1936 Heft 30,Seite 535

2. A.W.Schmidt u.F.Kneule,Entwicklung neuer Prüfmethoden für Leichtkraftstoffe.Versuchsbericht d.Deutschen Forschungsgemeinschaft,März 1940

3. F.Kneule, Klopfmessungen an Mehrzylindermotoren. MTZ,Mai 1942 Seite 187

4. P.Funck, Elektroakustische Bestimmung des Klopfverhaltens. ATZ 1942, Heft 2

5. K.Generlich,Untersuchungen über das Klopfverhalten von Vergasermotoren u.Leichtkraftstoffen auf elektroakustischem Wege. Diss.T.H. München 1936

6. A.W.Schmidt u.A.Schmid,Die motorische Bewertung von Dieselkraftstoffen. MTZ

7. H.Nather,Beiträge zur Lösung des Problems der Einspritzung von Leichtkraftstoffen. Diss.T.H.München

8. K.Vogel,Neue Wege bei der Einspritzung von Leichtkraftstoffen. Diss.T.H.München 1940

9. F.A.Schmidt,Verbrennungsmotoren(Thermodynamische u.versuchsmäßige Grundlagen unter besonderer Berücksichtigung der Flugmotoren)

10.D.R.Pye,Die Brennkraftmaschinen

11.J.Sauter,Untersuchung der von Spritzvergasern gelieferten Zerstäubung.DVI Heft 312(Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens)

12.H.List,Die Strömung in Saugrohren von Verbrennungskraftmaschinen. Z.VDI 1941 Band 85 Seite 301

13.K.Schnauffer,Verbrennungsgeschwindigkeiten von Benzin-Benzol-Luftgemischen in raschlaufendenZündermotoren. Diss.T.H.Berlin 1941

14.A.E.Becker,Effect of Test Conditions on Fuel Rating. S.A.E.-Journal 1938 Seite 63

PART 13

03507-04060

03507

(1) "The shape of contact chambers in catalytic Exothermic and endothermic reactions" By Dr. Wirth. April, 1942. Leuna (14 pages).

A report on the most efficient design of catalytic chambers (Fischer-Tropsch Synthesis) from the view point of heat transfer.

(2) "The calculation and evaluation of chambers for catalytic exothermic and endothermic reactions which occur within a narrow temperature range" By Dr. Wirth July 4, 1942. Leuna (20 pages) (2 copies).

The report concerns an evaluation of different methods of heat transfer arrangements. Besides a mathematical discussion, photographs of the different arrangements are included.

(3) Investigation:- "The stability of various working material against carbon-monoxide corrosion" - Wyszomirski and van Rossum - July 30, 1943 Ammoniakwerk, Merseburg (8 pages).

A report on investigation of substitutes for manganese-copper alloy used in methanol synthesis equipment. Tables and graphs illustrate corrosion effect. The materials tested are listed only by Code number.

(4) "Report concerning the session of the work society for Knock measurement," Technical testing place at Oppau, No. 161, July 15, 1941, deals chiefly with octane measurement and knock measurements thirty-nine pages with charts.

INDEX 1

03508

(5) "Experiments on the preparation of triptane and several other isoparaffins." Bueren, high pressure test 558, 30 Oct. 1940 - nine pages with reactions.

(6) "Comparison investigations on I.G. test diesels", Köhler, technical testing place Op200, report no. 381, May 15, 1939, tests on I.G. test diesels and other motors, ten pages with charts.

(7) "Overload capability of isooctane and aromatics", Pier, high pressure investigation Lu 558, Nov. 15, 1941. The difference in motor behavior between paraffin and aromatic high test fuel, eight pages with charts.

(8) "Fuel Injection," German automotive Research, technical research reports, performance of different compressions of fuels, 1938-1944.

(9) "Investigations of knocking Combustion." Heinz Rögener, Investigations of spontaneous combustion in the gas phase, thirty-three pages with charts.

(10) "Fuel-test of the over-load process in BMW one cylinder motor", H. Schökel, INTAVA work society of Hamburg, Sept. 13, 1941, report no. K.199, testing of aircraft fuel WL814 in BMW over-load motor, three pages with charts.

INDEX 2

(11) Brochure giving history and development of the Leuna Werke in non technical language. Mostly descriptive in nature. 18 pages.

(12) Preliminary cost report for Schwarzmeide for May, 1944. dated 10 July, 1944. Gives production figures for Gasolines, oils, etc. - Dr. Kollmar. 5 pages.

(13) Preliminary cost report for Schwarzmeide for April, 1944. Give production figures for Gasolines, oils, etc. Dr. Kollmar. 8 pages, 1 graph.

(14) Prelimary cost report for Schwarzmeide for December 1943, Gives production figure for Gasolines, oils, etc. Dr. Kollmar. 6 pages, 1 graph.

(15) Report on production of Böhlen Magdeburg, Zeitz, Schwarzheide, Werke, from Jan - March 1943. 26 June, 1943.
Production of gasolines, gases and oils, with master cost data.

(16) Production reports on Schwarzheide, Böhlen, Magdeburg, Zeitz, from Oct. - Dec. 1943, and Jan - Dec. 1943.
Production of gasoline, gases, and oils, etc. with master cost and data.

INDEX 3

(17) Production report on Schwarzherde Böhlen, Magdeburg Zeitz. July - September, 1943.

Production and cost data on Gasoline Gases, and Oils, etc.

(18) Construction and yield of Böhlen Werk gives cost, figures and production of gasolines, oils, etc. 28 June, 1941. 25 pages, including tables and graphs. Dr. Kollmar.

INDEX 4

Dr. Wenzel

I

Beitrag zur Frage der zweckmäßigsten Gestaltung des Kontaktraumes bei katalytischen exothermen und endothermen Reaktionen, bei denen nur geringe Temperaturunterschiede in der Kontaktschicht zulässig sind.

Inhaltsverzeichnis.

		Seite
A	Zusammenfassung	1
B	Einleitung	2
C	Theoretische Unterlagen	3
	I. Plattenofen und Röhrenofen mit Kontakt in den Rohren	3
	a.) Plattenofen	3
	b.) Röhrenofen mit Kontakt in den Rohren (Innenkontaktröhrenofen)	3
	II. Ofen mit Kontakt um die von Flüssigkeit durchflossenen Rohre (Außenkontaktröhrenofen)	4
D	Diskussion	7
	I. Vergleich der verschiedenen Reaktionsräume	7
	a.) Gleichwertige Kontaktraumquerschnitte	7
	b.) Kühlflächenvergleich	8
	II. Vergleich verschiedener Ofentypen	9
	a.) Rohrabstand des Ofens mit Außenkontakt	9
	b.) Kühlflächenvergleich der verschiedenen Öfen	10
	c.) Die Kühlfläche je m³ Kontaktraum für die verschiedenen Öfen	11
	d.) Die Raumausnutzung bei den verschiedenen Ofensystemen	12
E	Theoretische Überlegung für den Innenkontaktröhrenofen mit kreisringförmiger Kontaktanordnung.	13

03512

A <u>Zusammenfassung.</u>

Die bis jetzt gebauten Öfen für die Synthese von Kohlenwasserstoffen aus CO und H_2, bei denen der Kontakt in Rohren und zwischen Platten angeordnet ist, haben den Nachteil, daß der Kontakt sehr schwer entleert werden kann. Es wurde deshalb vorgeschlagen einen Ofen zu entwerfen, mit dem Kontakt um die von der Kühlflüssigkeit durchströmten Rohre

für drei Ofenbauarten und zwar:

a.) Anordnung des Kontaktes in Rohren, die von außen gekühlt sind (Innenkontaktröhrenofen)

b.) Anordnung des Kontaktes zwischen ebenen Kühlflächen

c.) Anordnung des Kontaktes um Kühlrohre (Außenkontaktröhrenofen)

wurden Unterlagen für die wärmetechnische Berechnung abgeleitet.

An Hand der gewonnenen Formeln wurden die drei Ofentypen miteinander verglichen und folgendes festgestellt.

1.) Der Innenkontaktröhrenofen benötigt am meisten Kühlfläche und weist, bezogen auf den m³ umbauten Raum, das geringste Kontaktvolumen auf. Er hat jedoch Vorteile, wenn die Forderung nach sehr hohen Kontaktschichten erfüllt werden muß und die anderen Ofenbauarten für diesen Fall ungeeignet sind.

2.) Der Außenkontaktröhrenofen benötigt um so weniger Kühlfläche und gestattet um so bessere Raumausnutzung je kleinere Kühlrohre man ausführen kann. Er ist dem Röhrenofen mit Innenkontakt eindeutig überlegen. Wegen der schwierigen konstruktiven Probleme hat er bisher nicht die Anwendung gefunden, die er verdient.

3.) Der Plattenofen ist dem Innenkontaktröhrenofen eindeutig überlegen, dem Außenkontaktofen in Bezug auf Raumausnutzung jedoch nicht, wenn man letzteren Ofen mit kleinen Kühlrohren ausrüstet. Das gleiche gilt auch für den Kühlflächenbedarf, doch muß man dabei bedenken, daß der Plattenofen von Pischer beide Seiten der Platte zur Wärmeabfuhr benutzt und deshalb der Materialaufwand des Fischerofens von keiner der anderen Konstruktionen übertroffen werden kann. Je höher die Wärmeleistung pro m³ Kontaktraum und je temperaturempfindlicher die Reaktion ist, um so höher wird jedoch beim Fischerofen der Temperaturabfall in der Kühlrippe und um so weniger gelten dann die unter vereinfachten Annahmen gefundenen Ergebnisse für diesen Ofentyp.

B **Einleitung**

In dem Bericht über die Kohlenwasserstoffsyntheseversuche in Leuna vom Februar 1939 war die Berechnung des Kontaktquerschnittes bei exothermen oder endothermen Reaktionen mit Wärmeabfuhr an eine Kühlwand unter Voraussetzung eines zulässigen Temperaturabfalles in der Kontaktzone gezeigt worden. Die Berechnung wurde seinerseit durchgeführt für kreisförmigen Kontaktquerschnitt d.h. für Anordnung des Kontaktes in einem Rohr mit Außenkühlung und für rechteckigen Kontaktquerschnitt, also für Unterbringung des Kontaktes zwischen ebenen Kühlwänden.

Die für diese beiden Fälle abgeleiteten Formeln, die gleichzeitig auch gestatten den Temperaturverlauf in der Kontaktschicht zu ermitteln, haben sich in der Zwischenzeit zur Berechnung und Beurteilung von Synthesedfen gut bewährt.

Infolge des geringen zugelassenen Temperaturgefälles in der Kontaktschicht weisen die nach diesen Formeln für die Synthese von Kohlenwasserstoffen aus CO und H_2 konstruierten Öfen sehr geringe Rohrdurchmesser bezw. bei Plattenöfen kleine Kühlwandabstände auf. Die Forderung nach einer befriedigenden Wärmeabfuhr hat wegen der engen, gegeneinander abgeschlossenen Räume zu einer sehr schwierigen Entleerbarkeit des Kontaktes aus den Öfen geführt.

Um diesen Mangel, der so ziemlich allen für diese Synthese bisher gebauten Öfen anhaftet, zu beseitigen, hat der Betrieb vorgeschlagen, einen Apparat zu entwerfen, bei dem der Kontakt um die von Kühlflüssigkeit durchströmten Rohre angeordnet wird. In einem derartigen Ofen bietet sich dem Kontakt infolge der größeren zusammenhängenden Räume weit weniger die Möglichkeit zum Brücken und das Füllen und Entleeren ist, wie Versuche an einem kleinen Modell gezeigt haben, wesentlich leichter durchzuführen.

Die Ausführung eines Ofens dieser Bauart mit senkrecht angeordneten Kühlrohren war schon in einem Bericht der Kellog vom 8.Sept.1938 vorgeschlagen worden. Da die Konstruktion aber keineswegs befriedigte und auch bei anderen Ausführungen dieser Art große bauliche Schwierigkeiten zu erwarten waren, wurde der Gedanke eines Ofens mit Kontaktanordnung um die Kühlrohre seinerzeit nicht weiter verfolgt, umsomehr als die Plattenöfen und die Röhrenöfen mit dem Kontakt in den Rohren in wärmetechnischer Hinsicht befriedigten und das Problem des Entleerens noch nicht so in den Vordergrund des Interesses gerückt war.

Da das Entleeren des Ofens z.Zt. eine der wichtigsten noch zu lösenden Aufgaben darstellt, soll die wärmetechnische Eignung eines Apparates mit um die Kühlrohre angeordnetem Kontakt im folgenden untersucht und mit den bisher üblichen Ausführungsformen verglichen werden. Dabei soll nocheinmal kurz auf die früher abgeleiteten Berechnungsunterlagen eingegangen werden.

C Theoretische Unterlagen

I. Plattenofen und Röhrenofen mit Kontakt in den Rohren

a.) Plattenofen

Mit den im Bericht vom Februar 1939 gewählten Bezeichnungen

$2 s_o$ = Kühlflächenabstand in m

ϑ = Temperatur in °C

λ = Wärmeleitzahl in kcal/m h °C (Mittlere Wärmeleitzahl von Gas und Kontakt)

q = Bei der Reaktion erzeugte Wärme in kcal/m³ Kontaktraum und h

Δt = Zulässige Temperaturdifferenz in °C zwischen Mitte Kontaktschicht und Kühlwand

war der halbe Plattenabstand s_o gefunden worden zu

$$s_o = 1{,}414 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{q} \cdot \Delta t} \qquad (1$$

oder die auftretende Temperaturdifferenz in d. Kontaktschicht

$$\Delta t = \frac{s_o^2}{2} \cdot \frac{q}{\lambda} \qquad (2$$

b.) Röhrenofen mit Kontakt in den Rohren, Kühlflüssigkeit um die Rohre (Innenkontaktröhrenofen)

Bezeichnet man mit

r_o den lichten Radius des Rohres in m, so erhält man mit den oben angegebenen Bezeichnungen

$$r_o = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{q} \cdot \Delta t} \qquad (3$$

oder die zwischen Rohrmitte und Rohrwand auftretende Temperaturdifferenz

$$\Delta t = \frac{r_o^2}{4} \cdot \frac{q}{\lambda} \qquad (4$$

II. Ofen mit Kontakt um die von Kühlflüssigkeit durchflossenen Rohre (Außenkontaktröhrenofen)

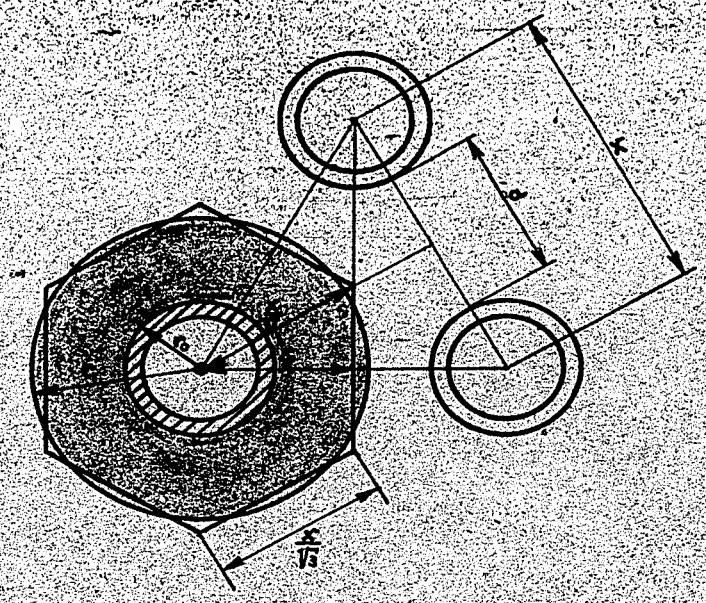


Abb. 1 Röhrenofen mit dem Kontakt um die von der Kühlflüssigkeit durchströmten Rohre

Ordnet man die Rohre in der allgemein üblichen Teilung an, wie auf Abb. 1 gezeigt ist, so strömt die Wärme dem Kühlrohr aus einem Kontaktquerschnitt zu, der ein reguläres Sechseck mit einem kreisförmigen Ausschnitt bildet. Die Seitenlänge des Sechsecks beträgt $\frac{x}{\sqrt{3}}$ wenn die Rohrteilung mit x bezeichnet wird.

Um das Problem der Rechnung zugänglich zu machen ersetzt man das Sechseck näherungsweise durch einen Kreis, dessen Radius r_1 man zu

$$r_1 = \frac{\frac{x}{2} + \frac{x}{\sqrt{3}}}{2} = 0{,}5386 \cdot x \text{ annimmt.}$$

Der Kontaktraum je Rohr erhält damit kreisringförmigen Querschnitt und für diesen vereinfachten Fall gilt die nachfolgende Rechnung.

Außer den bereits oben angegebenen Bezeichnungen sollen bedeuten

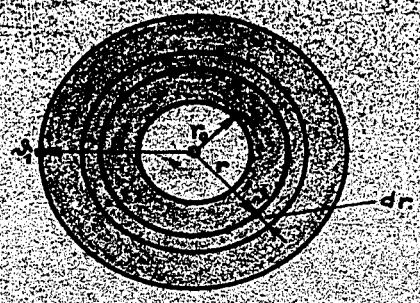


Abb. 2 Kühlrohr mit kreisringförmiger Kontaktschicht.

r_0 = dem äußeren Radius des Kühlrohres in m

r_1 = dem äußeren Radius der Kontaktschicht

$\Delta t = \vartheta_1 - \vartheta_0$ Temperaturdifferenz in der Kontaktschicht

Es wird ferner angenommen, daß die Oberflächentemperatur des Kühlrohres konstant ist.

Die in einen Volumenelement erzeugte Wärme ist dann

$$d\,Q = 2\,r\,\pi \cdot dr \cdot q \qquad (5$$

Die Wärme, die aus der Kontaktschicht dem Volumenelement zugeführt wird, ist

$$d\,Q' = -\lambda \cdot 2\,r\,\pi \cdot \frac{d\,\vartheta}{dr} \qquad (6$$

und die Wärme, die aus dem Volumenelement abströmt

$$d\,Q'' = -\lambda \cdot 2\,r\,\pi \cdot \frac{d\,\vartheta}{dr} - \lambda \cdot 2\,\pi \cdot \frac{d\left\{r \cdot \frac{d\,\vartheta}{dr}\right\}}{dr} \cdot dr \qquad (7$$

die in Volumenelement erzeugte Wärme ist

$$d\,Q = d\,Q'' - d\,Q' \qquad (8$$

$$= -\lambda \cdot 2\,\pi \cdot \frac{d\left\{r \cdot \frac{d\,\vartheta}{dr}\right\}}{dr} \cdot dr \qquad (9$$

oder in Gleichung 5 eingesetzt

$$2\,r\,\pi \cdot dr \cdot q = -\lambda \cdot 2\,\pi \cdot \frac{d\left\{r \cdot \frac{d\,\vartheta}{dr}\right\}}{dr} \cdot dr \qquad (10$$

$$\int q \cdot r \cdot dr = -\int \lambda \cdot d\left(r \cdot \frac{d\vartheta}{dr}\right) \cdot dr \qquad (11$$

$$q \cdot \frac{r^2}{2} = -\lambda \cdot r \frac{d\vartheta}{dr} + C_1 \qquad (12$$

für $r = r_1$ wird $\frac{d\vartheta}{dr} = 0$

damit ergibt sich die Integrationskonstante C_1 zu

$$C_1 = q \cdot \frac{r_1^2}{2} \qquad (13$$

In Gleichung 12 eingesetzt erhält man

$$q \cdot \frac{r^2}{2} = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} + q \cdot \frac{r_1^2}{2} \qquad (14$$

$$\lambda \cdot r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} = \frac{q}{2} \cdot \left\{ r_1^2 - r^2 \right\} \qquad (15$$

$$\lambda \int d\vartheta = \frac{q}{2} \cdot \left\{ \frac{r_1^2}{r} - r \right\} \cdot dr \qquad (16$$

$$\lambda \cdot \vartheta = \frac{q}{2} \cdot \left\{ r_1^2 \cdot \ln r - \frac{r^2}{2} \right\} + C_2 \qquad (17$$

Als Grenzbedingung ergibt sich für $r = r_o$ $\vartheta = \vartheta_o$

$$\lambda \cdot \vartheta_o = \frac{q}{2} \cdot \left\{ r_1^2 \cdot \ln r_o - \frac{r_o^2}{2} \right\} + C_2 \qquad (18$$

oder die Integrationskonstante C_2 ist.

$$C_2 = \lambda \cdot \vartheta_o - \frac{q}{2} \cdot \left(r_1^2 \ln r_o - \frac{r_o^2}{2} \right) \qquad (19$$

in Gleichung 17 eingesetzt erhält man

$$\lambda \cdot (\vartheta - \vartheta_o) = \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{r_o^2}{2} - \frac{r^2}{2} + r_1^2 \cdot \ln \frac{r}{r_o} \right) \qquad (20$$

für $\vartheta = \vartheta_1$ wird $r = r_1$ (21

03518

Abb. 3 Gleichwertige Kontaktraumquerschnitte bei Kontaktanordnung im Rohr, zwischen ebenen Wänden und in einem Kreisringraum um das Kühlrohr.

