

Herrn Prof. Dr. W. Wilke

ergebenst überreicht

vom Verfasser

W. Wilke

München, den 25.9.1941

10070

Institut für chemische Technologie der Technischen Hochschule
München

Versuchslaboratorium für Mineralöle
Vorstand: o.Prof.Dr.Ing.A.W.Schmidt

FORSCHUNGSBERICHTE

der

Fachgliederung Treibstoffe
im Reichsforschungsrat

Band III

Motorischer Teil.

1007:

Probleme der Kraftstoff-
Bewertung

von Prof. A. W. Schmidt.

10972

Inhaltsverzeichnis des III. Bandes.

	Seite
1. Probleme der Kraftstoffbewertung Prof. A.W. Schmidt. . .	1
2. Bewertung von Dieselmotorkraftstoffen Dr.Ing.habil. Kneule. . .	20
3. Forschungsbericht über die Weiterentwicklung des Klopfmessgerätes Dipl.-Ing.Paul Funck. . .	67
4. Versuchsbericht über die Anwendung der elektroakustischen Klopfmeßmethode an Ein- und Mehrzylindermotoren, auf dem Prüfstand und im Fahrbetrieb Dipl.-Ing. Herbert Funck	86

Probleme der Kraftstoffbewertung.

von

Prof. A. W. Schmidt

Die Bewertung der Kraftstoffe gehört mit zu den wichtigsten Aufgaben der wissenschaftlichen Forschung auf dem Gebiet der Kraftstoffchemie. Die Zusammenhänge zu ergründen, die zwischen den gewollten Umsetzungserscheinungen im Motor einerseits und der Herstellung des Kraftstoffes andererseits bestehen, ist kurz gesagt, das Programm dieser Forschungsaufgaben. Die Reaktion im Motor bezeichnen wir als Verbrennung und gliedern sie damit in das grosse Gebiet der Oxydationsreaktionen ein. Diese Reaktion bestimmte und bestimmt die zukünftige Entwicklung der Anwendungsmöglichkeit der Kraftstoffe. Das bedeutet, dass diese Reaktion sowohl die Entwicklung der Motoren, als auch die Entwicklung der Herstellung der Kraftstoffe grundsätzlich beeinflusst.

Die wissenschaftliche Erforschung dieser scheinbar so einfachen Wechselwirkung zwischen Sauerstoff einerseits und Kohlenwasserstoff andererseits stellt uns allerdings heute noch Aufgaben, deren Lösungen nicht so ohne weiteres im Bereich der Möglichkeit liegen, so dass wir uns bei der wissenschaftlichen Bearbeitung dieses Hauptproblems einst-

weilen noch im Rahmen der Grundlagenforschung bewegen müssen. Die außerordentliche Bedeutung, die die Verbrennungskraftmaschine in unserem Wirtschaftsleben aber bereits erlangt hat, bedingt, dass wir neben dieser Grundlagenforschung uns auch noch mit Arbeiten befassen, die mehr auf dem Gebiet der Zweckforschung liegen. Es handelt sich hier vor allen Dingen darum, die Zusammenhänge zu klären, die zwischen Kraftstoff und Motor bestehen. Dabei besteht einerseits die Möglichkeit, dass im Verlauf dieser Forschung sich Probleme ergeben, die in das Gebiet der Grundlagenforschung, d.h. der Reaktionen zwischen Sauerstoff und Kohlenwasserstoffe als solchen gehören, und andererseits werden sich aus der Grundlagenforschung heraus Erkenntnisse ergeben, deren Stichhaltigkeit sich nur im Motor erweisen lässt.

In diesem Zusammenhang ist es ausserordentlich interessant, die Entwicklung der Bewertung der Kraftstoffe in den letzten Jahrzehnten kurz zu streifen. Noch nach dem Weltkriege beschränkte man sich bei der Bewertung der Kraftstoffe auf die Feststellung gewisser physikalischer bzw. physikochemischer Daten. Nach unserer heutigen Erkenntnis können wir diese Bewertungsarten lediglich als Werte ansehen, die eine gewisse Bedeutung für die Erzeugung bzw. für den Verkauf besitzen. In jenen Zeiten war es der Motorenbau, der den Impuls gab, die bestehende Kraftstoffbewertung grundsätzlich zu ändern. Die Entwicklung der Verbrennungskraftmaschine war soweit fortgeschritten, dass dem Chemiker gezeigt werden konnte, dass die vorhandenen Kraftstoffe sich unterschiedlich in den einzelnen Motorentypen verhalten.

Es ist deshalb gar nicht verwunderlich, dass in jenen Zeiten der Motorenbauer dem Chemiker angeben konnte, welche Eigenschaften er von dem Kraftstoff verlangte. Ricardo

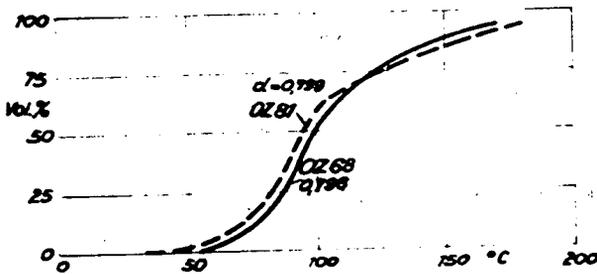
gebührt das Verdienst, weit über die durch sein Arbeitsgebiet gegebenen Grenzen hinaus dem Chemiker nicht nur gezeigt zu haben, dass zwischen den Kraftstoffen bei ihrer Verbrennung im Motor Unterschiede auftreten, sondern dass diese Unterschiede in der verschiedenen chemischen Konstitution der Kohlenwasserstoffgemenge, die wir als Kraftstoffe verwenden, begründet sind.

Diese grundsätzlich neuen Ideen auf dem Gebiet der Kraftstoffbewertung setzten sich erst nach Überwindung grosser Widerstände durch. In den ersten Jahren dieser Meinungsverschiedenheiten versuchte man immer noch die alten labormässigen Methoden gegenüber den neuen revolutionären Gedanken, die in der Forderung nach motorischen Prüfmethoden der Kraftstoffe gipfelten, zu verteidigen. Die hauptsächlichsten Gegengründe, die man gegen die Einführung der motorischen Prüfmethoden einwand, bestanden darin, dass man sich nicht damit einverstanden erklären konnte, anstelle der einfachen und leicht zu handhabenden laboratoriumsmässigen Untersuchungsmethoden die umständlichere und dem Chemiker wensensfremdere motorische Prüfmethode einzuführen.

Aus jenen Zeiten stammen noch Arbeiten von uns, die die aus Laboratoriumstesten gewonnenen Bewertungszahlen den neuen motorischen Versuchsergebnissen gegenüberstellten, und die einwandfrei zeigten, dass die rein laboratoriumsmässige Bewortung zu gründlichen Fehlschlüssen führen konnte. Die beiden folgenden Bilder zeigen die auch heute noch recht aufschlussreichen Ergebnisse jener Forschungen. In Bild 1 ist dargestellt, dass Benzine, die gleiche Siedekurven und gleiches spezifisches Gewicht besitzen, also nach den damaligen Anschauungen sich auch im Motor gleich oder wenigstens ähnlich verhalten müssten, ganz grundsätzlich verschiedene Oktanzahlen, die den Ausdruck der

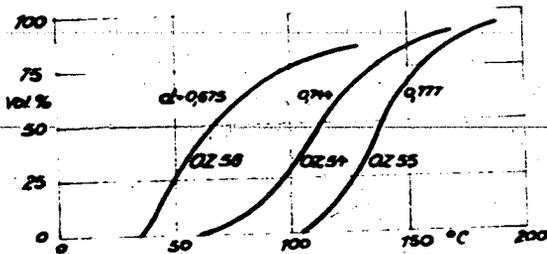
motorischen Bewertung darstellen, aufweisen.

Bild 1



Im Gegensatz dazu ist in Bild 2 dargestellt, dass Kraftstoffe, mit gleicher Oktanzahl, also gleichem motorischen Verhalten, grundsätzlich verschiedenes Siedeverhalten und spezifisches Gewicht besitzen können.

Bild 2



Die schlagende Beweiskraft dieser und ähnlicher Untersuchungen führte letzten Endes zum klaren Endsieg der Anhänger der motorischen Prüfmethode. Diese neue Methode wurde entsprechend ihrer Bedeutung sorgfältig ausgebaut und brachte die Schaffung eigener Prüfmotoren.

In Amerika entstand der CFR-Motor (Comporation of Fuel Research). In der devisenknappen Zeit, als die Beschaffung dieser Motorentype für uns in Deutschland sehr schwierig wurde, ist es das Verdienst der I.G. gewesen, einen eigenen deutschen Prüfmotor (den J.G. Prüfmotor) geschaffen zu haben. Es ist selbstverständlich, dass für die beiden Motoren auch die geeignetsten Untersuchungsmethoden festgelegt wurden.

Es hatte in jener Zeit den Anschein, als ob damit die Kraftstoffprobleme endgültig gelöst bzw. über diese Untersuchungsmethode weg zu lösen seien. Es steht fest, dass die Einführung der motorischen Prüfung, die in der Bewertung der Kraftstoffe nach Oktanzahlen zum Ausdruck kommt, der Kraftstoffchemie einen ausserordentlichen Aufschwung verliehen hat. Der schon von Ricardo erkannte Zusammenhang zwischen chemischer Konstitution und Kraftstoffgüte brachte es mit sich, dass man daran gehen konnte, neue Kraftstofftypen zu schaffen. Das Gebiet der Mischkraftstoffe wurde in jenen Zeiten ausserordentlich erfolgreich entwickelt. Das Bestreben, einfache Destillatkraftstoffe durch Zusätze zu verbessern, führte zu der Entwicklung einer Unmenge von Zusätzen, die als Klopfbremsen-Verwendung finden konnten. Die wichtigsten, wie Benzol und Alkohol, besitzen heute noch eine beherrschende Bedeutung. Besonders aufsehenerregend und wirkungsvoll war die Entdeckung der Tatsache, dass bestimmte metallorganische Verbindungen in weit höherem Masse klopfbremsende Wirkung zeigen als rein organische Verbindungen. Hier ist besonders die Entwicklung der Bleitetraäthylzusätze zu erwähnen.

Es ist interessant, dass man in dieser Entwicklungsperiode selbst von Seiten des Motorenbaues zugeben musste, dass die Erfolge der Kraftstoffchemie für die Entwicklung des

Motorenbaues bedeutungsvoller gewesen sind als rein konstruktive Neuerungen.

Wenn auch die Erfolge der Einführung der motorischen Prüfmethode auf die Entwicklung der Kraftstoffqualitäten von ganz grundsätzlicher Bedeutung gewesen sind, so ergab sich doch bald die Feststellung einer gewissen Unzulänglichkeit der durch die Normung zur Oktanzahlbestimmung erstarrten motorischen Prüfmethode.

Diese Unzulänglichkeit zeigte sich zuerst, als man feststellen musste, dass sich zwischen dem Verhalten der Kraftstoffe im Einzylindermotor auf dem Prüfstand und ihrem Verhalten im Mehrzylindermotor auf der Landstrasse Unterschiede ergeben. Die ursprünglichen Bestrebungen, durch Modifikation der Prüfverfahren diese Diskrepanzen zu beheben, führten zu Versuchsreihen, die in besonders grossem Umfang in Amerika vorgenommen wurden. Diese Strassenklopversuche kosteten Summen und hatten schliesslich doch nur negative Ergebnisse. Beeindruckt durch die früheren Erfolge der Oktanzahlbewertung und bedingt durch die negativen Ergebnisse der Strassenversuche, liess man daher die hier anstehenden Probleme einige Zeit ruhen.

Die fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet des Flugzeugmotorenbaues brachte jedoch die hier vorliegende Problematik erneut ins Rollen. Die Tatsache, dass heute unsere Flugzeuge über Dauergeschwindigkeiten verfügen, die vor kurzer Zeit noch Weltrekorde darstellten, stellte auch an die Kraftstoffbewertung neue und höhere Aufgaben. Bei der Bearbeitung dieser Probleme erwies es sich nun erneut, dass die Bewertung der Kraftstoffe nach der genormten Oktanzahlmethode nicht ausreicht. Im Verein mit den früheren Kritiken, die aus den Ergebnissen der Strassenversuche resultierten, wurde die Meinung, dass die Bewertung der Kraftstoffe nach der Oktanzahl allen Anforde-

rungen genüge, stark erschüttert.

Es war deshalb die Zeit gegeben, nach neuen Methoden zu suchen, die einerseits die Vorzüge der motorischen Kraftstoff-Prüfmethode aufwiesen und andererseits ihre Nachteile vermieden. Schon beim Auftreten der ersten Zweifel an der bedingungslosen Sicherheit der Bewertung der Kraftstoffe durch die Oktanzahl war mir der Gedanke gekommen, dass diese Einpunktmethode durch andere Verfahren ersetzt werden müsste. Es konnte sich nicht darum handeln, die Eigenschaft des Kraftstoffes in einem willkürlich gewählten Bereich zu bestimmen, sondern man musste danach trachten, das gesamte Verhalten des Kraftstoffes in dem kritischen Teil seines Zersetzungsbereiches, den wir Klopfen nennen, zu untersuchen. Dabei musste man sich darüber klar sein, dass das Klopfen nicht eine Erscheinung ist, die plötzlich auftritt und ebenso plötzlich verschwindet, sondern dass das Klopfen ein Vorgang ist, der sich zuerst als leises und nicht allzuhäufig auftretendes Geräusch bemerkbar macht und allmählich häufiger, stärker wird, bis die Schläge sich zuletzt so häufen, dass der gesamte Verbrennungsvorgang sich nur in dieser unerwünschten Weise abzuspielen scheint.

Schon aus dieser Tatsache allein ergibt sich die Unzulänglichkeit der Feststellung der Klopferscheinungen durch das Einpunktverfahren der Oktanzahl. Dies führte zwangsläufig zu dem Gedanken, nach Methoden zu suchen, die es gestatten, das gesamte Klopfverhalten der Kraftstoffe zu ermitteln.

Die von mir entwickelte elektro-akustische Methode, über die bereits verschiedentlich in der Literatur berichtet wurde, schien diese Beobachtungsmöglichkeit in sich zu schliessen. Deshalb werden im Rahmen des Reichsforschungsrates in meinem Institut seit längerer Zeit Arbeiten unter Verwendung dieses Gerätes durchgeführt, die diesen Prob-

lemen nachgehen.

Inzwischen konnten wir zeigen, dass das Gerät die dargelegten Erwartungen voll und ganz erfüllte. Nicht nur im Einzylinderprüfmotor lässt sich das Klopfverhalten des Kraftstoffes einwandfrei ermitteln, sondern darüber hinaus ergibt sich die Möglichkeit, auch an einem Mehrzylindermotor derartige Untersuchungen durchzuführen. Dabei ist besonders wichtig, dass diese Methode beim Mehrzylindermotor nicht nur das Klopfgeräusch des Motors als solchen festhält, sondern dass auf der Oszillographenröhre zugleich der Klopfzustand jedes einzelnen Zylinders sichtbar gemacht wird. Das bedeutet, dass wir durch unsere Methode einen Einblick in die Wechselwirkung zwischen Kraftstoff und Motor erhalten, wie es bisher noch nicht möglich war. Bislang konnte man lediglich feststellen, ob der Motor als solcher klopft oder nicht klopft. Jetzt sind wir in der Lage, festzustellen, ob sämtliche Zylinder an dem Klopfvorgang beteiligt sind oder ob nur einzelne dieses Verhalten zeigen. Unsere Untersuchungen ergaben überraschenderweise, dass nur in den seltensten Fällen sämtliche Zylinder gleichzeitig klopfen. Dieses Ergebnis berechtigte uns zur Annahme, dass für den Klopfvorgang im Mehrzylindermotor nicht ausschließlich der Kraftstoff, sondern auch die Konstruktion des Motors verantwortlich zu machen ist. Damit finden wir gleichzeitig eine Erklärung für die Unmöglichkeit, das Verhalten eines Kraftstoffes, der im Einzylindermotor nach seiner Oktanzahl bewertet ist, in Einklang mit seinem Verhalten zu bringen, sobald er im Mehrzylindermotor Verwendung findet.

Darüber hinaus ergaben unsere Untersuchungen des Klopfverhaltens im Einzylindermotor, dass das mit dem Chronoskop festgestellte Klopfen nicht den gesamten Verlauf des Klopfvorganges darstellt. Zwischen dem einwandfreien Lauf des

Motors und dem mit dem Ohr wahrnehmbaren Klopfen liegt ein Bereich, wo die Klopferscheinungen bereits auftreten, ohne jedoch bisher wahrgenommen werden zu können. Die weiteren Arbeiten zeigten, dass diese Wahrnehmung sowohl für den Einzylinder-, als auch für den Mehrzylindermotor gilt. Die nächsten Bilder stellen diese Tatsache dar.

Im folgenden Bild ist das Verhalten eines Benzins im Einzylindermotor dargestellt.

Bild 3

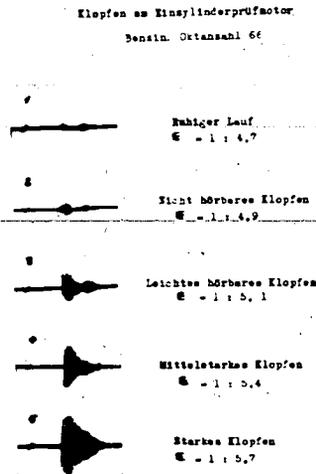


Bild 4 zeigt diesen Vorgang im Vierzylindermotor:

Bild 4

Vorlaufbilder eines Vierzylindermotors

Vorlaufung 0°
runder Lauf



2 4 3 1

Vorlaufung 30°
Zylinder 1, 2, 4 arbeiten
zu kipfen
Zylinder 3 hat
noch zu kipfen



2 4 3 1

Vorlaufung 60°
Kipfer nach kipfen
Kipfer
Zylinder 2 hat laut zu
kipfen
Zylinder 1 hat noch
zu kipfen



3 1 2 4

Vorlaufung 90°
Zylinder 3 hat kipfen
zu stark, Zylinder 2 noch
mäßig
Zylinder 1 beginnt zu
kipfen



2 4 3 1

Vorlaufung 120°
Antitische Zylinder
sind zu kipfen bereit
liegt aber noch jetzt
noch Zylinder 1 in geringe
von Kipfen



1 2 4 3

Es ist ohne weiteres einleuchtend, dass selbst für die Bewertung der wechselseitigen Beziehungen zwischen Kraftstoff und Motor diese bisher nicht zu ermittelnde Spanne des nicht hörbaren Klopfens von grundsätzlicher Bedeutung ist. Sobald die Möglichkeit besteht, wollen wir der Klärung dieser Verhältnisse nachgehen.

Im weiteren Verlauf unserer Arbeiten auf diesem Gebiet finden sich zwei interessante Ergebnisse:

Beim Einzylinderprüfmotor kann man die Klopfausschläge, welche auf der Oszillographenröhre sichtbar gemacht sind, durch Anwendung eines gedämpften elektrischen Zeigergerätes in Millivolt- bzw. Milliampère ablesen. Daraus ergibt sich die Tatsache, dass man das Klopfverhalten des Kraftstoffgemisches graphisch darstellen kann. Man hat somit die Möglichkeit, die auf diesem Wege erhaltenen Klopfkurven aufzuzeichnen und zu vergleichen. In gleicher Weise kann man die Einwirkung von Zusätzen an ein und demselben Kraftstoff untersuchen, wobei besonders betont sein mag, dass hier das Gebiet des nicht hörbaren Klopfens zwangsläufig mit erfasst wird. Die graphische Darstellung derartiger Kraftstoffbewertungen ist in folgender Bild wiedergegeben:

- 72 -

Braunkohlenbenzin (Bokaw)

mit 0,4 0,7 1,0 % Blei

mit 10 20 30 % Benzol

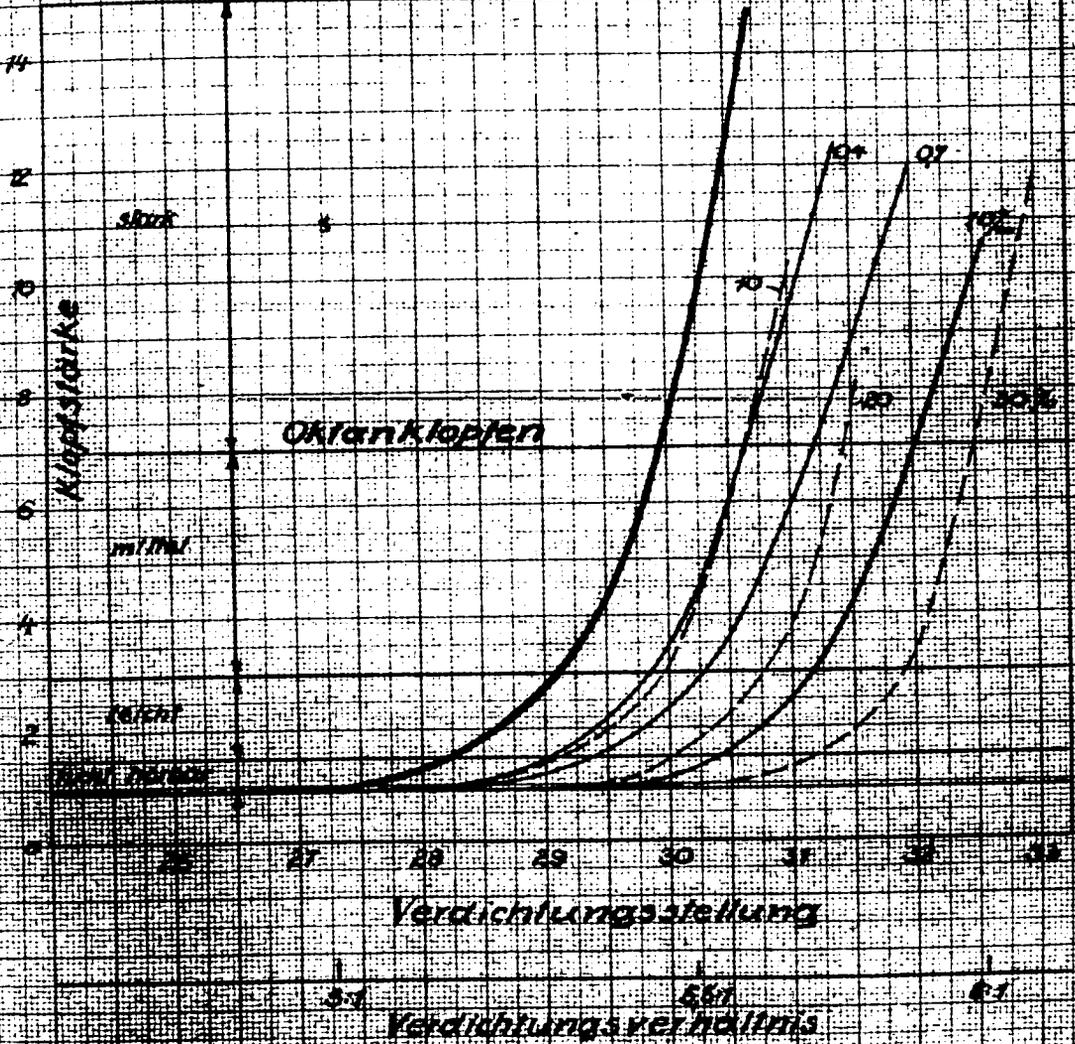


Bild 5 1008

Benennung

Zu Nr.

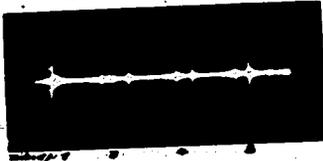
29.11.40

Datum

Das andere Ergebnis bestand darin, dass wir feststellten, dass die Klopfuntersuchungen an Mehrzylindermotoren auch im fahrenden Wagen durchgeführt werden können. Die nächsten Bilder zeigen die Gegenüberstellung derartiger Untersuchungen im Fahrzeug und auf dem Prüfstand. Es handelt sich hier um einen Vierzylindermotor, der mit dem gleichen Kraftstoff einmal auf dem Prüfstand und das andere Mal auf der Landstrasse untersucht wurde. In dem einen Bild sehen wir den einwandfreien Lauf des Motors dar, in dem andern ist das leichte, nicht hörbare Klappen und im dritten Bild deutlich wahrnehmbares Klappen ersichtlich.

Bild 6 - 8

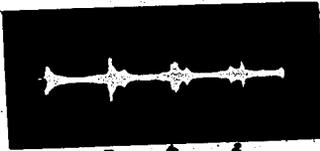
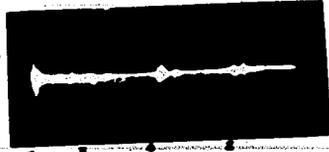
Peugeot 2,1 L.
Auf dem Prüfstand :



ruhiger Lauf

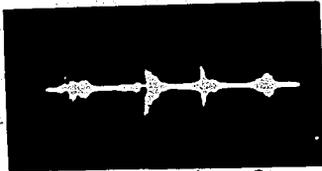
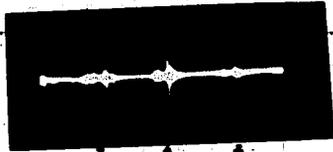
Bild 6

In Fahrweg :



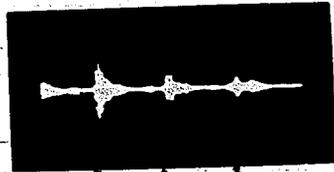
leichtes Klopfen

Bild 7



starkes Klopfen

Bild 8



Die Entwicklungsmöglichkeiten in der Fortsetzung der Erkenntnisse, die wir im Binzylindermotor gewonnen, liegen darin, dass hier die Aussicht besteht, zu einer neuen prüfstandsmässigen Bewertung der Kraftstoffe zu kommen, die den wirklichen Verhältnissen mehr Rechnung trägt als die Festlegung der Oktanzahl. Die Tatsache, dass wir weiterhin jetzt in der Lage sind, das Klopfverhalten eines Kraftstoffes im Fahrbetrieb zu untersuchen, wird sich für die künftige Entwicklung in mehrfacher Richtung auswirken. Es besteht damit die Möglichkeit, den Kraftstoff unter solchen Umständen zu untersuchen, wie sie seiner tatsächlichen Verwertung entsprechen. Dabei bin ich der Überzeugung, dass die Einwirkung auf das Klopfverhalten des Kraftstoffes nicht allein durch seinen chemischen Aufbau bedingt ist, sondern dass auch die Fahrweise, der motorische Zustand und die motorische Konstruktion ebenso einflussreich sind. Damit fällt die bisherige Ansicht, dass das Klopfverhalten lediglich als eine Eigenschaft des Kraftstoffes anzusprechen ist. Wie weit sich diese neue Erkenntnis auf die Gestaltung des Kraftstoffes und des Motors auswirken wird, lässt sich im Augenblick noch nicht überschauen. Es sind hierzu noch eine Reihe von Versuchsarbeiten notwendig, die bereits zusammen mit der Industrie und der Wehrmacht in Anlaufen sind.

Wenn bisher ausschliesslich von Ottokraftstoffen die Rede war, so ist das darin begründet, dass die Entwicklung der motorischen Kraftstoffprüfung vorwiegend diesen Treibstoff vorbehalten war. Auf dem Gebiet der Dieselmotoren hat man mit weit günstigeren Verhältnissen zu rechnen, insofern, als der Dieselmotor gegenüber dem Ottomotor wesentlich anspruchloser ist. Trotzdem hat die Einführung motorischer Prüfungen in Form der Oktanzahlbestimmung auch hier ausserordentlich viele Fortschritte mit sich gebracht. Anstelle von Oktanzahl 60, die früher für den Betrieb des

Dieselmotors für tätig erachtet wird. Inwiefern wir heute mit Cetanzahlen von 35 bis 40 ausstatten unsere deutschen Dieselmotoren betreffen. Allerdings war von vorher ein bei der Bewertung der Dieselmotorkraftstoffe durch die Cetanzahl, die die Ermittlung des Zündverzögerungs darstellt, klar, dass damit noch nicht alle Eigenschaften, die ein Dieselmotorkraftstoff haben muss, restlos erfasst werden. Neben dem Kälteverhalten und der Neigung zu Rückstandsbildung war vor allen Dingen bei den einzelnen Dieselmotorkraftstoffen festzustellen, dass der Gang der Motoren je nach Wahl des Kraftstoffes unterschiedlich sein konnte.

Man machte in dieser Richtung Unterschiede und sprach von weichen bzw. weichen oder harten Gang des Dieselmotors. Diese rein empirische Feststellung wirkt sich so aus, dass der Korantrieb diesen Uebelstand dadurch abzuheben suchte, dass er vor dem Anlauf der durch dieses Verhalten belasteten Motorsteile unverändertlich robust fertigte. Damit wird zwar Abhilfe für das Uebel der Dieselmotoren, verglichen mit den der Vergasermotoren, bühler liegen.

Die guten Erfolge, die die elektrische optische Messmethode bei der Erklärung der Klopfvorgänge an Motorsmotoren zeitigte, veranlassen mich, dieselbe Untersuchung auch auf dem Gebiet der Dieselmotorkraftstoffe durchzuführen zu lassen. Hier ergibt sich die erwartete Tatsache, dass die Anwendungsgleichheit unserer Methode ebenfalls gegeben ist. Die bisherigen Forschungsergebnisse lassen eindeutig den Zusammenhang zwischen der Gangart und der angewendeten Kraftstoffqualität erkennen. Wir konnten bisher feststellen, dass die Verminderung des Zündverzögerungs gleichzeitig auch einen weichen Gang mit sich bringt. Damit eröffnet sich die Notwendigkeit, die Dieselmotorkraftstoffe auch in dieser Richtung zu untersuchen. Vor allen Dingen deshalb weil es sich bereits ergeben hat, dass Dieselmotorkraftstoffe mit

gleichen Zündverzügen unterschiedliche Gangweise besitzen können. Hier besteht zweifelsohne wiederum ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Konstitution und motorischen Verhalten. Damit ist aber auch ein Hinweis gegeben, Untersuchungen darüber anzustellen, inwieweit durch Zusätze die Brauchbarkeit der Dieselmotoren beeinflusst werden kann. Diesem letzteren Gebiet, das gerade für uns in Deutschland von grundsätzlicher Bedeutung ist, ist leider noch sehr wenig Beachtung geschenkt worden. Diese Tatsache ist vielleicht darauf zurückzuführen, dass bisher die Beobachtungsmöglichkeit, inwieweit sich diese Zusätze günstig oder ungünstig auswirken, fehlte.

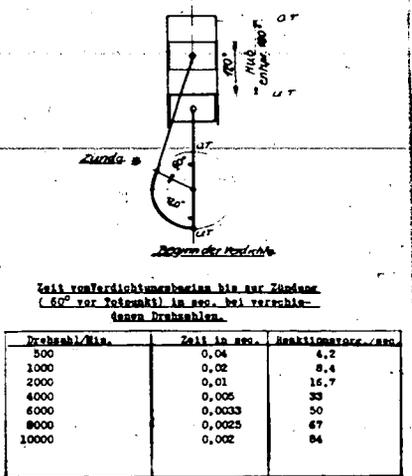
Die Notwendigkeit, durch exakte Bewertungsmethoden das Verhalten der Kraftstoffe eingehend kennen zu lernen, und damit der eingangs erwähnten Grundlagenforschung richtiggestellte Probleme zuzuführen, ist für die Weiterentwicklung der Kraftstoffchemie von grundsätzlicher Bedeutung. Soweit man eine derartige Entwicklung heute übersehen kann, scheint sich als besonderes Charakteristikum bei dem Motorenbau das Bestreben durchzusetzen, die Tourenzahl der einzelnen Motoren zu erhöhen und damit höhere Literleistungen und kleineres Leistungsgewicht zu erzielen. Diese beiden Forderungen, die für den Fahrzeug-, wie für den Flugmotor wichtig sind, scheinen augenblicklich die Entwicklungsrichtung im Motorenbau zu beherrschen. Betrachtet man diese Probleme von der Kraftstofftechnischen Seite, so wird man zu der Überzeugung kommen, dass die Kraftstoffe in ihrer augenblicklichen Qualität die in diesen Problemen enthaltenen Anforderungen nicht erfüllen können.

Gegenüber den heutigen Bestrebungen, die Kraftstoffe möglichst zerfallfest zu machen, liegt in den Planungen, die Tourenzahl der Motore zu erhöhen, das Problem begründet,

die Reaktionswilligkeit der Kraftstoffe zu steigern, da die für die Abwicklung der gesamten Reaktion zur Verfügung stehende Zeitspanne mit Steigerung der Tourenzahl ausserordentlich schrumpft.

Während wir bei einem Motor der entsprechend unserer heutigen Entwicklung mit einer Tourenzahl von 3 - 4000 ausgestattet ist, für den Ablauf der Reaktion im Zylinderkopf eine Zeitspanne von rund 5/1000 Sekunden zur Verfügung haben, würde die Zeit, in der die Reaktion sich abspielen muss, bei einem Motor, der 10.000 Touren dreht, rund 2/1000 Sekunden betragen müssen. Dabei ist nicht zu vergessen, dass derartige Motoren in unseren Rennwagen bereits Verwendung finden und dass damit die hier angeschnittene Problematik auf dem Gebiet der Kraftstoffe tatsächlich vor der Tür steht.

Bild 9.



Die Verminderung der Reaktionszeit von 5/1000 auf 2/1000 Sekunden bedeutet eine Verkürzung von mehr als der Hälfte der bisher zur Verfügung stehenden Zeit. Die Eigenschaften der hierzu benötigten Kraftstoffe empirisch zu entwickeln, würde vermutlich ausserordentlich viel Zeit und Geld kosten. Durch die von uns geschaffenen Bewertungsverfahren ergaben sich bisher schon soviel neue Einblicke in die Wechselwirkung zwischen Kraftstoff und Motor, dass die berechtigte Hoffnung besteht, auch diesen neuen Kraftstoffproblemen gerecht zu werden.

Bewertung von Dieselkraftstoffen.

von Dr.Ing.habil.F.Kneule.

Inhaltsverzeichnis.

I.	Bewertung im Einzylindermotor.	S. 22
1.	Zündverzug und Cetanzahl.	S. 22
2.	Der Klopfvorgang des Dieselmotors.	S. 33
3.	Anwendungsbeispiele der Klopfmessmethode im Dieselmotor	S. 44
II.	Bewertung im Mehrzylindermotor.	S. 53

Bewertung von Dieselkraftstoffen

I. Bewertung im Einzylindermotor.

1. Zündverzug und Cetanzahl.

Viele Jahre hindurch betrachtete man den Zündverzug hauptsächlich vom physikalischen Standpunkt aus, indem man die Zeit berechnete, die bei einem bestimmten Temperaturgefälle zwischen Luft und Brennstoff nötig wäre, um den Brennstofftropfen aufzuheizen und zu verdampfen. Rechnerische und experimentelle Untersuchungen ergaben jedoch, dass diese rein thermischen Vorgänge nicht die alleinigen Ursachen für den Zündverzug sein können.

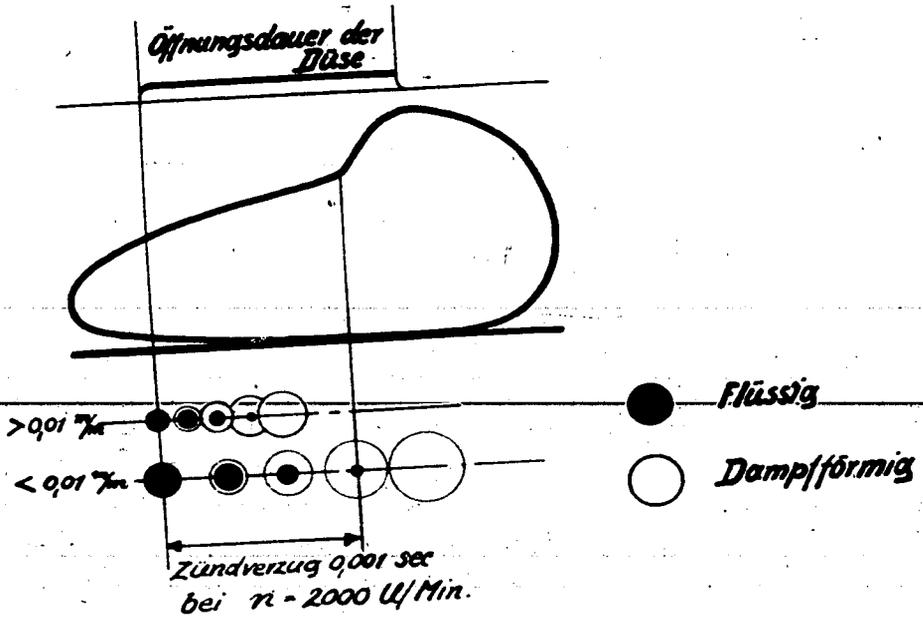
Für normale Verhältnisse schwankt der Tropfendurchmesser des Brennstoffstrahles zwischen 0.004 und 0.5 mm. Die Verdampfungszeit eines mittleren Tropfens errechnet sich nach *W e n t z e l* (1)¹⁾ bei einer Temperatur von 550°C (es entspricht dies einem Verdichtungsverhältnis von ca. 16 : 1) zu 0.0006 sec. Dies bedeutet, dass bei einem Zündverzug von 0.001 sec., wie er in schnelllaufenden Motoren bei Verwendung eines normalen Gasöles üblich ist, alle Tropfen der genannten Grösse und darunter vollständig verdampft wären, während die nicht so häufig auftretenden grösseren Tropfen wenigstens zum Teil in Dampfform übergegangen sind. s. Abb. 1.

Die Verdampfung beginnt nach derartigen Berechnungen bereits 0.000 00 2 sec. nach der Einspritzung, d.h. praktisch beim Einspritzbeginn.

1) Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf das Schrifttum am Schlusse der Arbeit.

Abb.1

Verdampfung der Kraftstofftropfen.



Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Zündverzögerung fast nur durch den " Zerfall der Moleküle " d.h. durch den Verlauf der chemischen Reaktion bedingt ist. Diese Auffassung wird bestätigt:

- durch Zündverzögerungsmessungen mit Kraftstoffen unterschiedlicher Molekülstruktur (z.B. paraffinisch, aromatisch usw.) bei gleichen Betriebszuständen,

- b) durch die Form der über der Temperatur aufgetragenen Zündverzugskurven, die den später besprochenen Charakter einer e-Funktion aufweisen, eines kennzeichnenden Merkmals oxydativer Reaktionen,
- c) durch die neueren Anschauungen über den Reaktionsmechanismus, insbesondere die Erkenntnisse über Kettenreaktionen, die von der gastheoretisch begründeten Voraussetzung ausgehen, dass ein chemischer Umsatz nur stattfinden kann, wenn ein Zusammenstoß eines Brennstoff - und Sauerstoffmoleküls stattfindet und wenn die betreffenden Moleküle genügend hohe Energie haben.

Auf Grund dieser Vorstellungen wird der Zündverzug heute ~~allgemein in einen physikalischen (endothermen) Teil und in einen chemischen (exothermen) Teil unterteilt~~, die sich jedoch infolge der Wechselwirkung der Vorgänge überschneiden können.

Der physikalische Teil besteht im Wesentlichen in der Zerstäubung des Kraftstoffes, in der Erhitzung der zerstäubten Teilchen, einer teilweisen Verdampfung derselben und schnell nachfolgender Erhitzung durch Wärmeübertragung von Seiten der verdichteten Luft. Während die für die Zerstäubung erforderliche Zeitdauer im Wesentlichen von der Viskosität des Kraftstoffes und den äusseren Bedingungen der Einspritzvorrichtung abhängt, wird die Erhitzungszeit der zerstäubten Brennstoffteilchen und -dämpfe in der Hauptsache durch die Temperatur der verdichteten Luft sowie durch die für die Wärmeübertragung massgebenden Strömungsverhältnisse bestimmt.

Der chemische Teil wird bestimmt durch die Art der zur Einleitung der Zündung erforderlichen Umwandlungsvorgänge, wobei wir nach einem Vorschlag von A.W. Schmidt

(2) die chemische Beschaffenheit des Brennstoffes als "Zündwilligkeit" bezeichnen wollen. Die Zündung wird stets dort auftreten, wo die Verdampfung und die Aufspaltung des Brennstoffes am weitesten fortgeschritten sind. Nachdem dies am Strahlrand durch das Verdampfen einerseits, die bessere Zerstäubung andererseits zu erwarten ist, kann die Entflammung in diesen Zonen angenommen werden. Diese Annahme wurde auch tatsächlich bestätigt sowohl durch unmittelbare Flammenphotographie, als auch durch Abtasten des Brennstoffstrahles mittels mehrerer Ionisationsstrecken. (3).

Diese Tatsache lässt sich gleichzeitig mit der Auffassung vereinbaren, dass man nach A.W. Schmidt die Reaktion unter dem Gesichtswinkel eines Grenzflächenvorganges betrachtet. Mit zunehmender Feinheit der Tröpfchen vergrößert sich die Oberfläche, die von denjenigen Atomen gebildet wird, die Kräfte nach aussen hin zu betätigen vermögen. Je grösser die je Raumeinheit vorhandene Zahl von Oberflächenatomen ist, die dem Reaktionspartner zugänglich sind, desto rascher wird der Stoff eine gewünschte chemische Verbindung eingehen können.

Wie schon erwähnt, kommt der chemische Charakter des Zündverzuges augenscheinlich in der starken Temperaturabhängigkeit zum Ausdruck, die innerhalb eines bestimmten Bereiches durch die für chemische Reaktionsvorgänge geltende Gleichung

$$z = C \cdot e^{\frac{E}{RT}} \quad 1)$$

gegeben ist.

Ohne die grundsätzliche Gültigkeit dieses Gesetzes auch für den Zündvorgang im Motor zu berühren, muss man hier noch weitere Einflussgrössen (z. B. den Verdichtungsdruck)

1) Hierin bedeuten: z = Reaktionszeit, E = Aktivierungsenergie, R = Gaskonstante, T = abs. Temperatur, C = Konstante.

und Konstanten in die Gleichung einführen, die dem verwickelten Wechselspiel von Strahleinspritzen und Zerstäuben, Aufheizen und Verdampfen einerseits und von chemischen Reaktionen andererseits Rechnung tragen.

Eine experimentelle Erfassung dieses Gesetzes kann am ehesten durch Versuche in Bomben angestrebt werden, weil hier Druck und Temperatur eindeutig festgelegt sind und die Messungen auch bis in Gebiete sehr niedriger Temperaturen (bis etwa 350°C herunter) ausgedehnt werden können, deren Anwendung sich in einem Motor verbieten würde. Abb. 2 enthält derartige Versuchsergebnisse. Der überragende Einfluss, den die Temperatur auf den Zündverzug ausübt und der sich aus der starken Abhängigkeit der chemischen Reaktionsgeschwindigkeiten von der Temperatur erklärt, kommt hier deutlich zum Ausdruck.

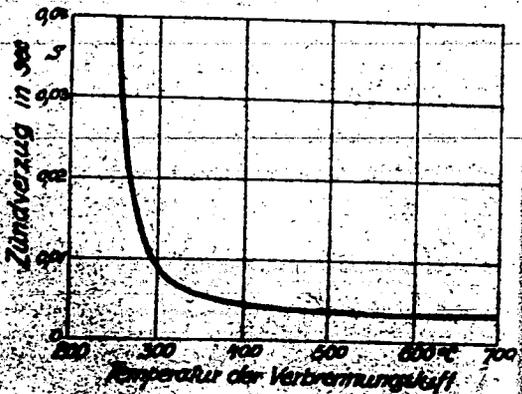


Abb. 2
Zündverzug von Gasöl in Abhängigkeit von der Verbrennungslufttemperatur nach Bombenversuchen von R. Müller. (5)

Von verschiedener Seite wurde schon versucht, die Temperaturabhängigkeit der Zündverzögerung und zwar sowohl von Gasen als auch von flüssigen Kraftstoffen durch eine Formel, entsprechend der empirisch gefundenen e-Funktionen wiederzugeben. Die Übereinstimmung derartiger Formeln mit den Zündverzögerungsmessungen ist für Gase besser als für flüssige Kraftstoffe, weil der thermische Anteil des Zündverzögerung bei Gasen weniger oder gar nicht in Erscheinung tritt, s. F.A.F. Schmidt.(4)

Im Bereiche der höheren Temperaturen, wie sie auch im laufenden Motor auftreten, biegen die Zündverzögerungskurven bei flüssigen Kraftstoffen, s. Abb. 2, stärker ab, als nach dem Verlauf der e-Funktion anzunehmen wäre. Diese Abweichung kann vielleicht damit begründet werden, dass hier infolge der sehr hohen Reaktionsgeschwindigkeiten der Einfluss der chemischen Vorgänge gegenüber dem thermischen Teil, also dem zur Zündaufbereitung des Gemisches erforderlichen Verdampfungsvorgang, etwas zurücktritt.

Auf Grund der motorischen Versuche, die in den letzten Jahren durchgeführt wurden, wird allgemein das Zündverhalten als wichtigstes Kennzeichen für die Beurteilung eines Dieselmotorkraftstoffes angegeben. Ähnlich wie bei vielen Laboratoriumstesten gibt es aber auch auf dem Gebiet der motorischen Prüfung noch kein Verfahren, das in Fachkreisen allgemeine Anerkennung und Anwendung gefunden hätte. Die Schwierigkeiten bestehen darin, dass man auch an diese motorischen Methoden die Anforderungen hoher Genauigkeit, Wiederholbarkeit, Einfachheit und rascher Durchführbarkeit stellt, deren gemeinsame Erfüllung nur schwer erreichbar ist.

Von allen bisher geübten motorischen Prüfmethode für die

Ermittlung des Zündverhaltens von Dieselmotoren¹⁾ haben sich am besten die Zündverzugsverfahren durchsetzen können, die aus dem Grunde unweigerlich den Vorzug verdienen, weil sie den tatsächlichen Betriebsbedingungen am nächsten kommen.

Die heute gebräuchlichen Verfahren der Zündverzugsmessung unterscheiden sich mehr oder weniger nur noch in der Art der Gebereinrichtung für die Anzeige des Einspritzbeginnes und des Verbrennungsanfanges.

Die verwendeten Prüfmotoren sind fast durchwegs mit unmittelbarer Strahleinspritzung ausgerüstet und ermöglichen die Einstellung von hohen und auch sehr niedrigen Verdichtungsverhältnissen, weil die Prüfbedingungen bewusst scharf ausgewählt sein sollen. Es ist dann die Gewähr gegeben, daß ein so geprüfter Kraftstoff auch in anderen Motoren mit Vorkammer, Luftspeicher oder Wirbelkammer, die gegenüber den Zündigenschaften der Kraftstoffe unempfindlicher sind, keine Schwierigkeiten machen wird.

a) Das Verfahren mit veränderlicher Verdichtung bei gleichbleibendem Zündverzug wird in Amerika von Schweitzer und Hetzel angewandt. In Deutschland entwickelte auf der gleichen Grundlage die I.G. Farbenindustrie das sog. I.G.-Verfahren, bei welchem als Versuchsmotor der von Wilke und Köhler entwickelte I.G.-Prüfmotor und als Anzeigegerät ein piezoelektrischer Indikator in Verbindung mit einem Wasser-ringübertrager benutzt wird.(7)

Durch Vergleich mit Cetan, nördlings Cetan, als zündwilligen und α - Methylnaphthalin als zündträgen Bezugskraftstoff lässt sich die Cetan- bzw. Cetanzahl des untersuchten Kraftstoffes bestimmen.

1) Eine Zusammenstellung und Beurteilung der bisher angewendeten motorischen Verfahren für die Feststellung des Zündverhaltens befindet sich in "Öl und Kohle" 1938 S.1034 A.W.Schmidt und F. Kneule, Beitrag zur motorischen Bewertung von Dieselmotoren.(6)

Abb. 3, 4 und 5 zeigen die Ergebnisse einer Eichung am I.G.-Prüfdieselmotor. Da Einspritzbeginn auf 20° KW vor oberem Totpunkt und Zündverzug mit 18° KW eingestellt wird, setzt der Druckanstieg 2° vor o.T. ein, wodurch sich die für die Diagrammgestaltung günstigsten Verhältnisse ergeben. Die Prüfdrehzahl beträgt 1000 U/Min.

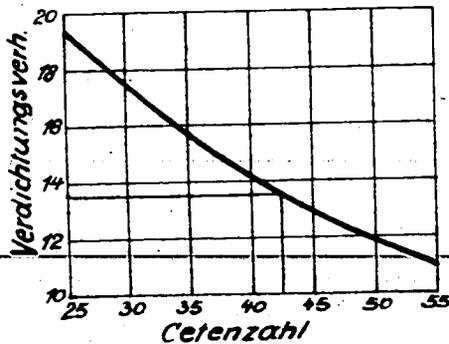


Abb. 3
Cetanzahl in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis bei gleichbleibendem Zündverzug, im I.G.-Motor gemessen.

Da die Verschiebung des Zylinders ebenso wie die Cetanzahl etwa hyperbolische Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis zeigt, ist die Skaleneinstellung am Schneckenrad für die Verdichtungsänderung praktisch linear abhängig von der Cetanzahl. Die täglichen Eichkurven verschieben sich damit höchstens parallel, Abb. 5.

Die Methode des gleichbleibenden Zündverzuges bei veränderlicher Verdichtung bietet den Vorteil, einen grossen Messbereich bei annähernd gleicher Messemphindlichkeit zu erhalten.

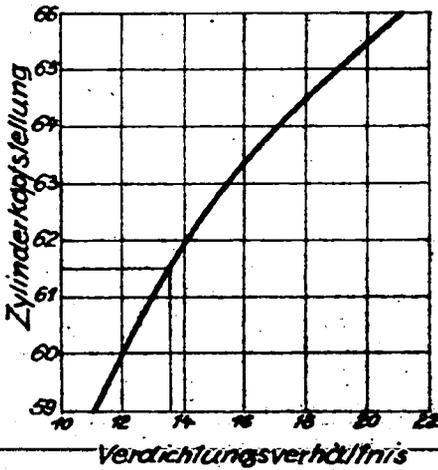


Abb. 4

Eichkurve für Zylinderkopfstellung und Verdichtungsverhältnis beim I.G.-Motor.

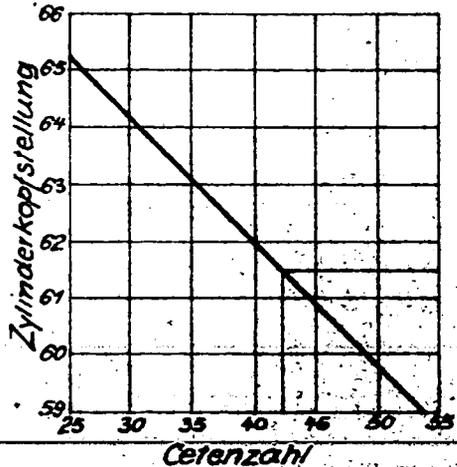


Abb. 5

Drehzahl in Abhängigkeit von der Zylinderkopfstellung beim I.G.-Motor "Eichlinie".

b) Das zweite Prüfverfahren lässt das Verdichtungsverhältnis ungeändert und bewertet den Kraftstoff nach der Länge seines Zündverzuges.

Die Entwicklung dieser Methode reicht bis in den Beginn der 30-iger Jahre zurück und wurde wohl zuerst von Boerlage und Broeze, in Deutschland von A.W.Schmidt und Slowak begonnen.

Abb. 6 zeigt Druckverlaufslinien, die der Verfasser an einem mit unmittelbarer Strahleinspritzung ausgerüsteten Einzylindermotor, Bauart Kamm, bei $n = 1500$ U/min. mit verschiedenen Kraftstoffen aufgenommen hatte.

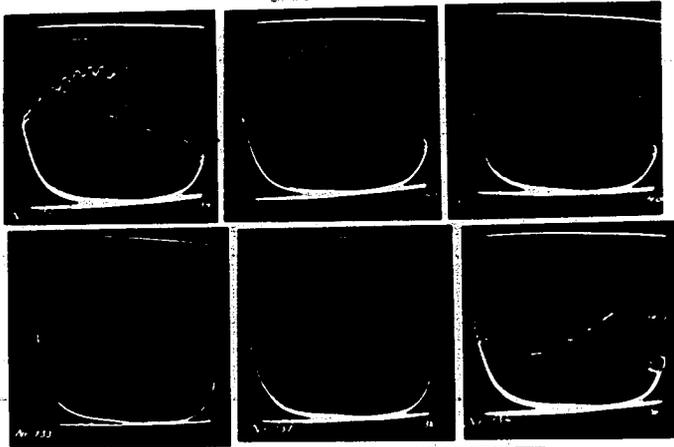


Abb. 6

Druckverlaufslinien von Dieselkraftstoffen bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen
101, 118, 128, und 133 Braunkohlenderivate.
131 Gemischdieselkraftstoff
134 Erdölderivat.

Es wurden hier vier Braunkohlendieselkraftstoffe untersucht, die aus verschiedenen Herstellungsverfahren stammten, ferner ein Gemischdieselkraftstoff aus Steinkohlenteeröl und Fischer-Tropsch-Kraftstoff sowie ein Erdölderivat.

Am besten kommt die Beeinflussung des Zündverzuges durch die Qualität der Kraftstoffe zum Ausdruck, wenn die gemessenen Zündverzüge in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis aufgetragen werden, Abb.7.

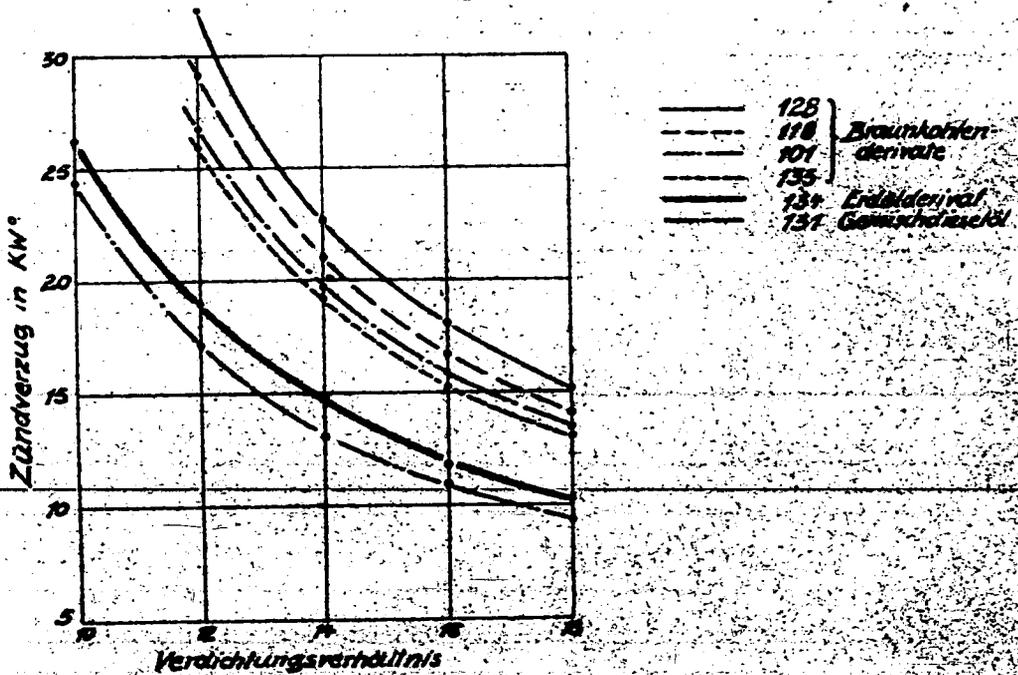


Abb. 7

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sämtliche untersuchten Braunkohlenderivate nur bis zu einem Verdichtungsverhältnis von 12 : 1 herunter einen störungsfreien Betrieb ohne Aussetzer ermöglichten, während das Erdöl-derivat und der Gemischdieselkraftstoff auch bei 10 : 1 noch zündfähig blieben.

Rein messtechnisch ist dieses Verfahren schwieriger zu beherrschen als das erstgenannte I.G.-Verfahren; denn einerseits kann das Ende des Zündverzuges bei konstantem Einspritzbeginn je nach der Güte des Kraftstoffes vor oder nach dem oberen Totpunkt liegen, womit diese Stelle in einem Druckdiagramm nicht immer mit ausreichender Genauigkeit feststellbar ist. Andererseits nimmt der Zündverzug mit höherer Cetenzahl verhältnismässig immer weniger ab, so dass besonders bei hohen Cetenzahlen eine sehr grosse Messgenauigkeit bei der Zündverzugsbestimmung erforderlich ist.

Als grundsätzlicher Vorteil ist jedoch der Umstand zu werten, dass die Methode den praktischen Motorbedingungen am besten entspricht, da die Messung bei den in den üblichen Gebrauchsmotoren herrschenden Verdichtungsverhältnissen erfolgt.

Durch die Kurvenmethode wird ausserdem noch dem Verlangen Rechnung getragen, in analoger Weise wie bei den Leichtkraftstoffen auch bei der Prüfung der Dieselmotoren vom "Einpunktverfahren" abzugehen und die Untersuchung unter Änderung der Betriebsbedingungen, insbesondere des Temperaturzustandes im Motor vorzunehmen.

2. Der Klopfvorgang des Dieselmotors.

Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Prüfung des Zündverhaltens nicht in allen Fällen eine ausreichende Bewertungsgrundlage darstellt, sondern dass in besonderen Fällen der Kraftstoff auch noch durch den auf die Zündung folgenden Verbrennungsablauf charakterisiert wird. Der nach der Zündung einsetzende Verbrennungsvorgang ist von grundsätzlicher Bedeutung; denn von ihm hängt der Druckverlauf, die Grösse der Diagrammfläche und damit die Arbeitsleistung

der Maschine ab.

Die Brenngeschwindigkeit ist gewöhnlich kurz nach der Zündung am grössten und strebt nach Durchlaufen des Höchstwertes mit bis auf Null abklingender Geschwindigkeit ihrem Ende zu. Je frühzeitiger im Arbeitshub des Kolbens dieser Höchstwert erreicht wird, um so besser wird die durch die Verbrennung ausgelöste Wärme im Arbeitsprozess ausgenützt und mit einem um so höheren Wirkungsgrad ist der Energieumsatz in der Maschine verknüpft.

Die Forderungen gehen dahin, dass die Brenngeschwindigkeiten im Zylinder nicht zu gering sein dürfen, um zu langes Nachbrennen zu vermeiden; sie dürfen aber auch nicht so hohe Werte annehmen, dass zu plötzliche Drucksteigerungen und damit unzulässig hohe Zünddrücke und harter Gang auftreten.

~~Die Umsetzungsgeschwindigkeiten werden beim Dieselmotor so wohl durch die chemische Reaktionsfähigkeit des Kraftstoffes als auch durch die äusseren Bedingungen der Gemischaufbereitung (konstruktive Gestaltung des Brennraumes, Einspritzverfahren, Betriebsbedingungen) bestimmt. Hält man die äusseren Bedingungen konstant, so kann man aus der Umsetzungsgeschwindigkeit Rückschlüsse auf die chemischen Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe ziehen.~~

Die erste Phase der Umsetzung wird durch die Geschwindigkeit der Drucksteigerung nach der ersten Zündung, d. i. durch die Steilheit der Zünddrucklinie im Indikatordiagramm bestimmt. Die mit dem Zündvorgang verbundene chemische Umsetzung beginnt unter der Einwirkung der hohen Temperaturen im Verbrennungsraum wahrscheinlich mit der Aotrennung atomaren Wasserstoffes (8), weshalb die erste Verbrennung durch hohe Umsetzungsgeschwindigkeit ausgezeichnet ist. Hinzu kommt, dass die ersten Teilchen des eingespritzten Brennstoffstrahles in eine sauerstoffreiche

Atmosphäre gelangen und dabei leicht den notwendigen Sauerstoff aufnehmen können, den sie zur vollkommenen Verbrennung benötigen. Die erste Stufe der Verbrennung geht deshalb rasch vor sich.

Da der primär abgespaltene Wasserstoff unmittelbar verbrennt, verarmt der Brennstoff dauernd an Wasserstoff und der Verbrennungsvorgang gewinnt immer mehr den Charakter der Kohlenstoffverbrennung. Da diese langsamer verläuft, neigt das System mit fortschreitender Verarmung an Wasserstoff zu unvollkommener Verbrennung, wenn nicht in allen Teilen des Verbrennungsraumes für Sauerstoffüberschuss gesorgt wird.

Die Drucksteigerungsgeschwindigkeit und das damit verbundene Klopfgeräusch der Maschine wird mit steigendem Zündverzug stärker. Eine Erklärung hierfür ist darin zu suchen, dass die Geschwindigkeit der Verbrennung um so höher wird, je vollständiger die Durchmischung von Brennstoff und Luft im Zeitpunkt der Entzündung ist.

Bei steigendem Zündverzug nimmt die für die Durchmischung verfügbare Zeit und somit die Vollständigkeit dieser Durchmischung zu, ein Umstand, der auf die Entzündungsgeschwindigkeit fördernd wirkt. Hinzu kommt, dass bei grösseren Zündverzügen der Brennstoff länger erwärmt wird, weshalb die Mitteltemperatur der zu Beginn der Entzündung im Zylinder befindlichen Brennstoffmenge bei den grösseren Zündverzügen höher wird. Durch die längere Erwärmungszeit wird nach Wentzel (1) die Bildung eines Kraftstoffdampf-Luftgemisches ermöglicht, das infolge seiner besseren Homogenität eine grössere Brenngeschwindigkeit zulässt als ein Tröpfchengemisch. Letzteres entwickelt eine trägere Umsetzungsgeschwindigkeit als ein reines Dampf-Luftgemisch, in dem der Dampf mit der Luft diffundieren kann. Die Verbrennung findet nicht mehr in einem Tröpfchen-Luftgemisch statt,

sondern beginnt in einer explosiven Gasmischung und pflanzt sich infolgedessen in einer weit grösseren Masse fort. Eine übermässige Drucksteigerung ist die Folge, welche das wohlbekannte "Klopfen" verursacht.

Die Stärke des Klopfens ist von der Kraftstoffmenge abhängig, die bis zum Augenblick der Zündung in den Zylinder eingebracht worden ist. Ein kleiner Betrag kann eine geringe oder auch keine Klopfwirkung haben. Wenn es sich aber um eine beträchtliche Menge handelt, ist Klopfen unvermeidlich.

Bezüglich des Klopfens stellen demnach Vergasermotoren und Dieselmotoren entgegengesetzte Anforderungen an den Kraftstoff. Bei Vergasermotoren verbrennt das Gemisch um so heftiger, neigt also um so mehr zum Klopfen, je reaktionswilliger der Brennstoff ist. Bei Dieselmotoren dagegen bewirkt ein reaktionswilliger Brennstoff einen kleinen Zündverzug und verhindert das Entstehen grösserer Gemischmengen von Brennstoffdampf und Luft, die stossartig verbrennen.

Aus obigen Überlegungen geht hervor, dass sowohl der Zündverzug, als auch das Dampfbildungsvermögen m.a.W. die Flüchtigkeit ¹⁾ in einem ursächlichen Zusammenhang mit dem Klopfen stehen müssen.

Was den Zündverzug betrifft, könnte man nun annehmen, dass die ideale Bedingung darin zu sehen sei, den Zündverzug soweit als nur irgend möglich herabzudrücken, vielleicht sogar vollständig zu vermeiden. Die ersten Kraftstofftröpfchen würden demzufolge zünden, sobald sie die Düsenmündung verlassen haben. Durch entsprechende Regelung des Einspritzvorganges könnte dann das Mass des Druckanstieges leicht in den gewünschten Grenzen gehalten werden.

Praktische Messungen haben gezeigt, dass mit sehr zündefreudigen Kraftstoffen, z. B. Kogasin II, wohl ein guter weicher Lauf der Maschine erreicht wird, der erzielbare mitt-

¹⁾ Hierauf hat insbesondere Dicksee (9) hingewiesen.

lere Druck darunter einen geringeren Teil zuzuführen, als bei Betrieb mit normalen Kraftstoffen. Dann würden diese Kraftstoffe hätten, der überhaupt keinen Zündvorzug aufwies und nicht gedessen sich sofort nach Verlassen der Düse entzünden würde, so würde sich nach Ricardo die ganze Verbrennungsenergie hauptsächlich in der Nähe der Düsenladung abspielen, der Brennstoffstrahl aber ohne keine Gelegenheit gegeben, sich in der gesamten Verbrennungsraum auszubreiten und mit Sauerstoff zu versorgen, bevor die Verbrennung beginnt. Ein beträchtlicher Teil der verflüchtigen Brennstoffe würde zur Verbrennung nicht herangezogen werden. Es ist also ein Zündvorzug wirklich notwendig, um dem Kraftstoff die Möglichkeit der Vermischung mit der Verbrennungsluft zu geben.

Für jeden gegebenen Motor gibt es eine optimale Zündverzögerungszeit, welche zur Durchmischung gerade ausreicht, um eine genügend kurze Durchlaufzeit bei gleichzeitig guter Verbrennungsausnutzung zu erzielen.

Diese optimale Zündverzögerungszeit ist naturgemäß von der Drehzahl abhängig und muss, in absteigender Linie (sec.) gehalten, mit steigender Drehzahl kleiner und kleiner werden, von der rein molekularen Seite her (Temperatur, Dichte und Mischung der Verbrennungsluft sowie Mischung heißer Endgastteile) kann auf Grund der heute vorliegenden Forschungsresultate der Zündvorzug für unsere handelsüblichen Kraftstoffe wohl nicht mehr wesentlich verkleinert werden. Da jedoch der Zündvorzug auch als chemisches Problem anzusehen ist, kann erwartet werden, dass aus die chemische Forschung Mittel an die Hand gibt, um die heute noch bestehenden Zündverzögerungsgrenzen des Dieselmotors überschreiten zu können. Von diesem Gesichtspunkt aus können wir nach A. V. Schmidt den Dieselmotor-Dieseldieselkraftstoff als einen Kraftstoff der Zukunft bezeichnen,

1) siehe A. V. Schmidt, Probleme der Kraftstoffwirtschaft, Brennstoff- und Wärmewirtschaft, Jahrb. 26 (1929) S. 21.

der sich erst in solchen Motoren voll und ganz auswirken kann, die im Drehzahlgebiet von 5000 U/Min. und darüber arbeiten.¹⁾

Auf Grund der Annahme, dass hohe Drucksteigerungsgeschwindigkeit und das damit verbundene Klopfen des Dieselmotors mit dem Entstehen grösserer Gemischmengen aus Brennstoffdampf und Luft zusammenhängen, muss man auch der Siedekurve eines Kraftstoffes eine entsprechende Bedeutung zumessen. Ein Kraftstoff mit niedrigem Siedeverlauf wird während gleicher Zeitdauer (Zündverzug) in grösserem Ausmass verdampfen und infolgedessen stossartiger verbrennen als ein Kraftstoff, dessen Siedekurve höherliegt.

Von verschiedenen Seiten (11 u.12) wurde bereits darauf hingewiesen, dass zwischen Zündverzug und Druckanstieg nicht immer ein eindeutiger Zusammenhang besteht, sondern dass es Fälle gibt, bei denen verschiedene Kraftstoffe trotz gleichen Zündverzuges etwas verschiedenartigen Druckanstieg und damit unterschiedliches Klopfen aufweisen können.

Zur Ermittlung dieser Zusammenhänge wurden im hiesigen Versuchslaboratorium für Mineralöle Arbeiten begonnen, über deren methodische Durchführung und Zielsetzung im folgenden kurz berichtet werden soll.

Zunächst wurden vom Verfasser aus den für die Zündverzugs-messung dienenden Druckverlaufslinien der Abb. 6 die Druckanstiegswinkel entnommen und über dem jeweiligen Zündverzug aufgetragen, wodurch die Kurven schar der Abb.9 erhalten wurde.

In Abb. 8 ist an dem Beispiel des Gemischdieselmotors 133 gezeigt, wie die Ermittlung dieser Druckanstiegswinkel erfolgte.

¹⁾ siehe A.F. Schmidt, Probleme um Dieselmotoren, Brennstoff- und Wärmewirtschaft, Jahrg. 20 (1938) S. 24.

die dünn ausgezogenen Linien verbunden, wodurch sich eine Parameter-Kurvenschar für das Verdichtungsverhältnis ergibt.

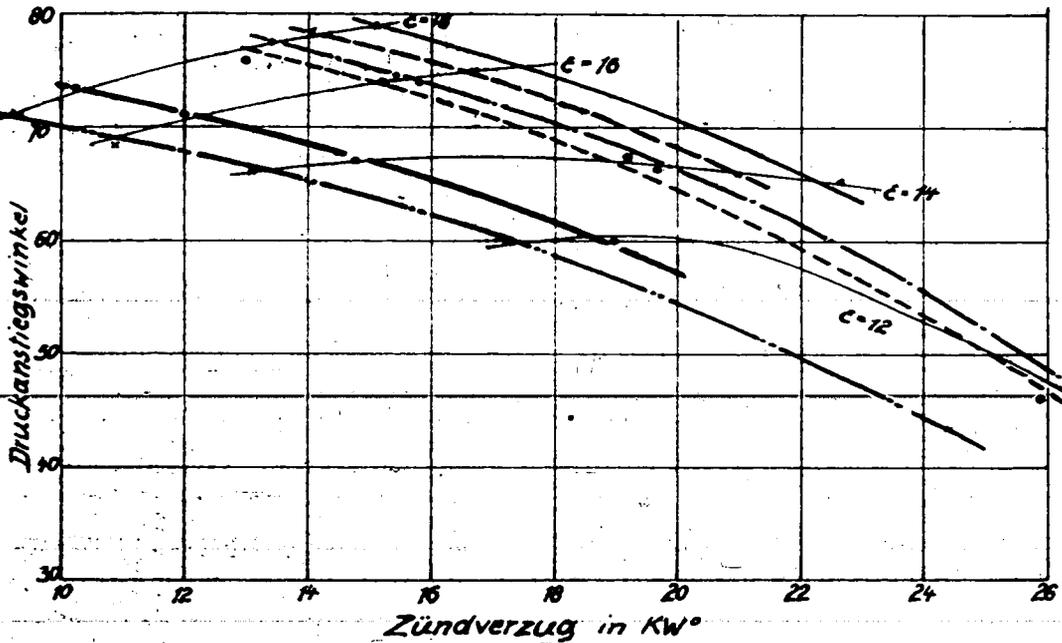


Abb.9 Druckanstiegswinkel in Abhängigkeit vom Zündverzug, entnommen aus den Druckverlaufslinien der Abb. 6.

Der Verlauf der Hauptkurvenschar bestätigt die an sich bekannte Tatsache, dass bei konstantem Einspritzbeginn der Druckanstieg mit abnehmendem Zündverzug einen steileren Verlauf annimmt, weil bei frühem Einsetzen der Zündung der Druckanstieg nicht allein von der durch die Verbrennung

freigewordenen Wärmeenergie, sondern auch noch von der Volumenverminderung des Brennraumes beeinflusst wird, die infolge der Kolbenbewegung entsteht. Für die verschiedenen untersuchten Kraftstoffe ergibt sich lediglich eine graduelle Verschiebung der Werte, während die Tendenz der Kurven gleichbleibt.

Von besonderem Interesse ist weiterhin der Verlauf der Kurven gleichen Verdichtungsverhältnisses (dünn ausgezogen). Während im Bereich der hohen Verdichtungsverhältnisse 18 : 1 und 16 : 1 der Druckanstieg in Richtung des zündträgeren Kraftstoffes steiler wird, bewegt er sich im Bereich kleinerer Verdichtungsverhältnisse (12 : 1) im umgekehrten Sinn. Bei 14 : 1 weisen sämtliche untersuchten Kraftstoffe ungefähr einen konstanten Wert des Druckanstieges auf. Diese Zusammenhänge sind ohne weiteres zu erklären, wenn man bedenkt, dass sich hier die chemisch-physikalischen Kraftstoffeigenschaften den durch die Kolbenbewegung verursachten motorischen Einflüssen überlagern. Erfolgt die Zündung vor dem oberen Totpunkt, so wird die durch die Verbrennungsenergie bewirkte Drucksteigerung infolge der Verkleinerung des Brennraumes noch weiter verstärkt. Bei einer nach dem oberen Totpunkt einsetzenden Zündung bewirkt die durch den abwärtsgehenden Kolben verursachte Vergrößerung des Brennraumes eine Verlangsamung des Druckanstieges.

Um die durch die Kolbenbewegung verursachten motorischen Einflüsse soweit als möglich auszuschalten, wurde daher vom Verfasser eine zweite Versuchsreihe gefahren, bei welcher der Einspritzpunkt jeweils 1. verän- dert wurde, dass die Zündung stets im O.T. oder in unmittelbarer Nähe desselben erfolgte, siehe Zahlentafel 1.

Zahlentafel 1

Versuch Nr.	Kraftstoff	Zünd-	Druck-	Höchst-	Klopf- ampli- tude
		verzög	anstieg	druck	
		^o KW	^o	atü	mm
1	-	Motor fremd angetrieben		32	4
2	80% Kog. + 20% M.	3,1	62	39	19
3	60% " + 40% "	5,4	74	39,5	28
4	50% " + 50% "	8,0	79	45,5	34
5	131% "			38,5	23
6	40% " + 60% "	9,7	80	47	36
7	41% " + 5% AN	unregelmässige Zündungen			
8	41% " + 12% "	9,3	75	44,5	20
9	41% " + 8% "	12	78,5	-	25
10	41% " + 30% Kog.	14	83	51	37
11	41% " + 40% "	10,4	81	47,5	34

Nach einem Vorschlag von Prof. A.W.Schmidt wurde gleichzeitig auch das Klopfgeräusch als "stehendes Bild" mit aufgenommen, was sich durch Verwendung des Nier'schen Doppelstrahloszillographen mittels einer besonderen Schaltung ermöglichen liess. Es erforderte dies allerdings, dass der Einspritzzeitpunkt nun nicht mehr auf dem zweiten Strahl, sondern auf der Druckverlaufslinie selbst markiert wurde, siehe Abb. 10.

In Abb. 10 sind einige kennzeichnende Diagramme der Versuchsreihe von Zahlentafel 1 wiedergegeben. Um eine "Bezugskurve" zu erhalten, wurden Mischungen aus Kogasin II und α - Methyl-naphthalin verwendet. Ferner wurde ein sehr

Abb. 10 Druckverlaufslinien und Klopfgeräusche, aufgenommen am Prüfdiesel Bauart A.W.Schmidt-Slowak, bei einer Drehzahl von 750 U/min u. einem Verdichtungsverhältnis von 14:1.

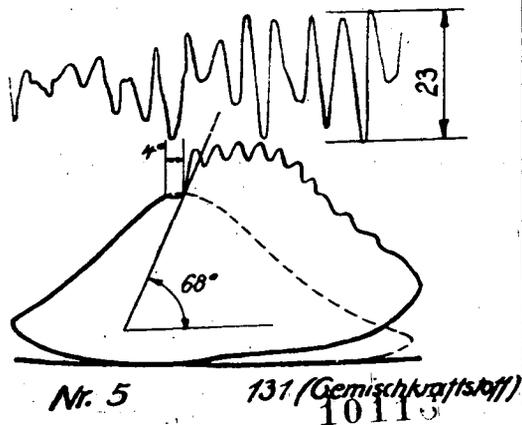
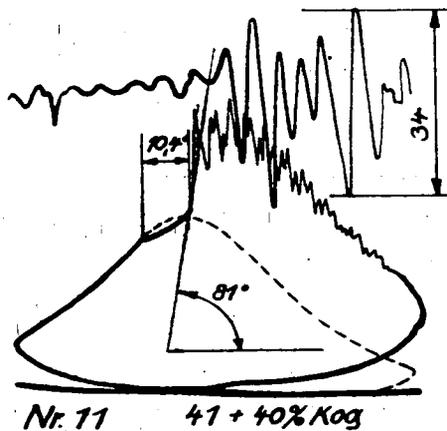
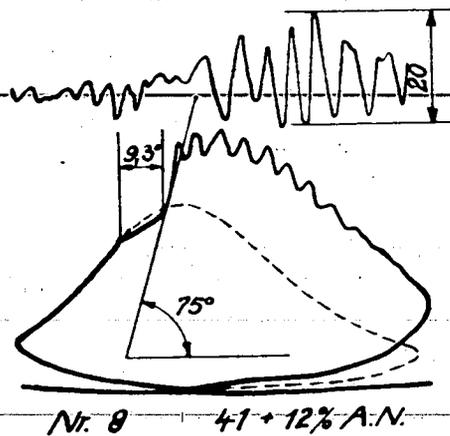
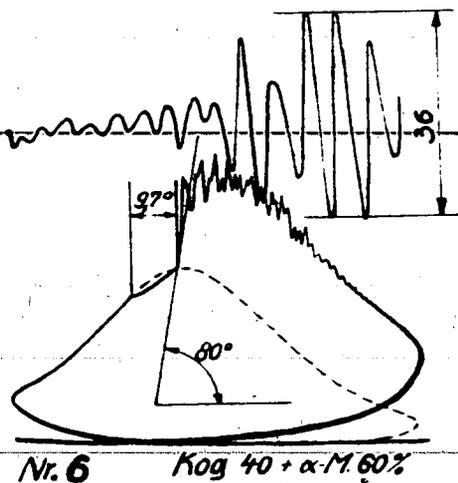
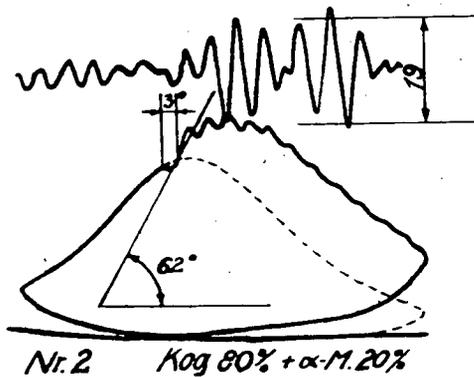
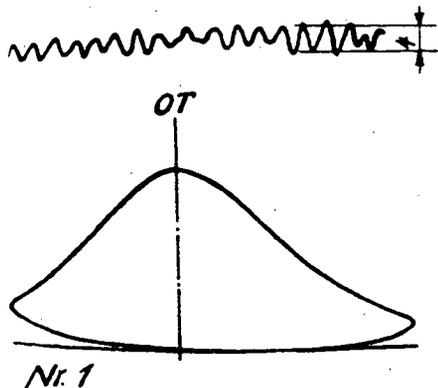
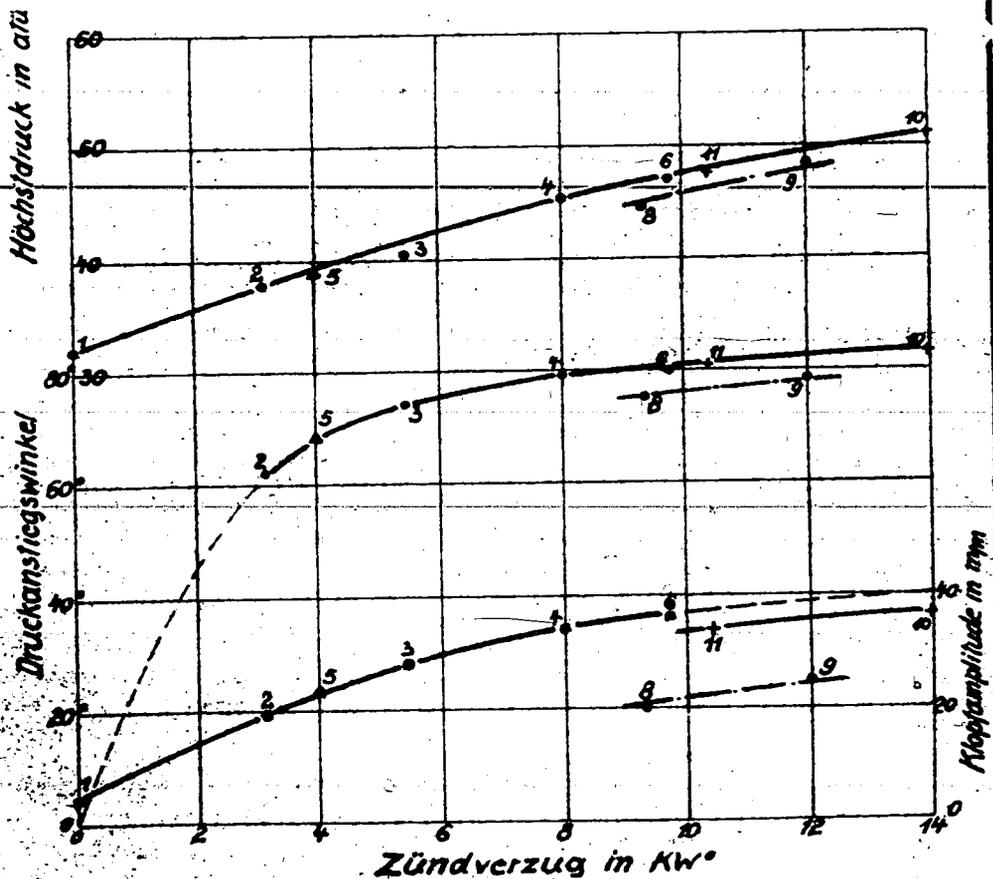


Abb. 11. Höchstdruck, Druckanstieg und Klopfamplitude in Abhängigkeit vom Zündverzug, entnommen aus Zahlentafel 1.

Zündung im O.T.



zündträges Steinkohlenteeröl Nr. 41 mit verschiedenen zündungsfördernden Zusatzmitteln gefahren. und zwar einmal mit Amylnitrit (in Zahlentafel 2 mit AN bezeichnet), das anderemal mit Kogasin II. Nr. 131 stellt den schon früher erwähnten handelsüblichen Mischkraftstoff aus Steinkohlenteeröl und Kogasin dar. Versuch Nr. 1 zeigt den Druckverlauf und das Maschinengeräusch bei fremd angetriebener Maschine, also ohne Zündung.

In Abb. 11 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe von Zahlentafel 1 kurvenmässig aufgetragen. Die mit den Mischungen aus Kogasin und α - Methylnaphthalin erhaltene Kurve zeigt einen im Bereich niedriger Zündverzüge steil ansteigenden Verlauf, der allmählich verflacht und schliesslich asymptotisch einem Grenzwert zustrebt, der im vorliegenden Fall bei ca. 85° liegen dürfte. Die Grösse dieses Grenzwertes hängt naturgemäss von der gewählten Drehzahl ab und würde nur bei sehr niedrigen Drehzahlen den theoretischen Wert von 90° erreichen können, der einer plötzlichen Verbrennung bei konstantem Volumen entspräche.

Die Kurven für den Höchstdruck und die Klopfamplitude haben einen gleichmässiger ansteigenden Verlauf. Mit Ausnahme der Versuchspunkte 8 und 9 fügen sich sämtliche Versuchswerte in den Kurvenverlauf gut ein.

Von besonderem Interesse ist nun die Feststellung, dass sich der Zusatz von Amylnitrit zu Kraftstoff Nr. 41 auf etwas andere Art auszuwirken scheint, als der Zusatz von Kogasin; denn trotz gleichen Zündverhaltens ergibt der Zusatz von Amylnitrit einen langsameren Druckanstieg, der sich auch durch ein bedeutend schwächeres Klopfgeräusch bemerkbar macht. Eine Heransichung der Siedeeigenschaften vermag in diesem Falle keine ausreichende Erklärung zu geben, da die Siedekennziffern der betreffenden Stoffe (Kraftstoffnummer 41 : 247° und Kogasin II : 256° Siedekennziffer)

sich zu wenig voneinander unterscheiden. Eine Begründung für dieses abweichende Verhalten glaubt der Verfasser darin sehen zu können, dass bei Zusatz des wasserstoffreichen Kogasins der primär abgespaltene Wasserstoff schlagartig verbrennt. Zusatz von Amylnitrit dagegen erleichtert wohl infolge Peroxydbildung an der Oberfläche der Moleküle die Entzündung, die dadurch ausgelöste Wärmeenergie erreicht aber nicht das Mass der durch die Wasserstoffverbrennung beim Kogasinzusatz freigewordenen Wärmemenge. Die Art des Druckanstieges wird vielmehr bestimmt durch die schwerere Aufspaltung der im Steinkohlenteeröl enthaltenen ringförmigen Körper, wodurch sich ein langsamerer Druckanstieg und weicherer Motorlauf ergibt.

3. Anwendungsbeispiele der Klopfmessmethode im Prüfdieselmotor.

Der in der letzten Zeit stärker fühlbar werdende Mangel an Dieselmotorkraftstoffen legt den Gedanken nahe, nach weiteren Erzeugungsmöglichkeiten zu suchen und hierzu auch die Steinkohlenteerderivate stärker heranzuziehen, als es bisher der Fall war. Da die letzteren für die unmittelbare Verwendung in den schnellaufenden Fahrzeugdieselmotoren nicht geeignet sind, ergibt sich die Aufgabe, eine Verbesserung ihrer Zünd- und Verbrennungseigenschaften durch Vermischung mit zündungsfördernden Beimengungen herbeizuführen, wofür besonders der Fischer - Kraftstoff Kogasin II brauchbar erscheint. Im folgenden seien nun Versuchsreihen besprochen, mit denen geprüft wurde, in welcher Höhe die genannten Beimengungen vorgenommen werden müssten, um einen einwandfreien Motorlauf zu gewährleisten.

Im vorliegenden Fall handelte es sich um ein nach dem Verfahren der Innenabsaugung gewonnenen Steinkohlenteeröl, das mit R.V.-Grundkraftstoff bezeichnet sei.

Zunächst haben wir die Cetanzahlen dieses R.V.-Grundkraftstoffes sowie Mischungen desselben mit verschiedenen Zusätzen von Kogasin ermittelt. Die Abb. 12¹⁾ zeigt die Eichkurve, die wir mit verschiedenen Eichmischungen aus Cetan und α -Methylnaphthalin erhalten haben. Durch Eintragung der für die geprüften Kraftstoffe gefundenen Werte lassen sich an Hand dieser Eichkurve sofort die Cetanzahlen ablesen, die in nachstehender Zahlentafel 2 zusammengestellt sind:

Zahlentafel 2

Kraftstoff	Cetanzahl
R.V.-Kraftstoff	29
" " + 10 % Kogasin	34
" " + 20 % "	39
" " + 30 % "	45
" " + 40 % "	50

Die Werte lassen ersehen, dass der reine R.V. Kraftstoff im Gegensatz zu sonstigen Steinkohlenteerderivaten eine verhältnismässig hoch liegende Cetanzahl, nämlich 29, aufweist.

1) Sämtliche folgende Abbildungen 12 - 19 sind in der Anlage am Schluss des Berichtes enthalten.

Bei einer Beurteilung der mit den Kogasinzusätzen erhaltenen Cetanzahlen ist die Tatsache zu berücksichtigen, dass die an Dieselkraftstoffe gestellten Anforderungen im Laufe der letzten Jahre gesunken sind, weil man erkannt hat, dass unsere heutigen Fahrzeugdieselmotoren fast durchweg mit weniger zündwilligen Kraftstoffen noch anstandslos betrieben werden können, als es vor etwa 10 Jahren der Fall war. Während man früher Cetanzahlen von ca. 55 bis 60 forderte, wie man sie von den Erdölderivaten her gewohnt war, kommt man heute im Fahrzeugbetrieb mit 35 bis 40 Cetanzahl aus, was sich auf die Erzeugungsmöglichkeiten ausserordentlich fördernd ausgewirkt hat.

Von diesem Gesichtspunkt aus betrachtet, kann ein Zusatz von 20 - 30 % Kogasin zu dem R.V.-Grundkraftstoff als ausreichend angesehen werden.

In Abb. 13 sind Druckverlaufslinien wiedergegeben, die wir nach dem Verfahren von A.W. Schmidt für den R.V.-Kraftstoff und verschiedene Mischungen desselben mit Kogasin photographisch aufgenommen haben. Am besten kommt die Beeinflussung des Zündverzuges durch die Qualität der Kraftstoffe zum Ausdruck, wenn die gemessenen Zündverzögerungen in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis aufgetragen werden, siehe Abb. 14.

Bemerkenswert ist hier zunächst die Tatsache, dass der reine R.V. Kraftstoff bei einem Verdichtungsverhältnis von 12 : 1 nicht mehr zum Zünden gebracht wurde und einen aussetzerfreien Betrieb nur noch bis zu 14 : 1 herunter ermöglichte. Die Auswirkung der Kogasinzusätze kommt augenfällig dadurch zum Ausdruck, dass die Kraftstoffmischungen nunmehr auch bis 12 : 1 herunter einen einwandfreien motorischen Betrieb erlaubten.

Trägt man die Zündverzögerungen in Abhängigkeit vom Prozentsatz der Beimischung auf, so ist zu ersehen, dass die Verbesserung derselben nicht im gleichen Verhältnis mit der zugemischten Menge

Kogasin wächst, sondern dass die Zündverzögerungswerte bei erhöhtem Zusatz asymptotisch einem Grenzwert zustreben, der je nachdem eingestellten Verdichtungsverhältnis verschiedene Grösse aufweist.

Vergleichsweise wurde auch ein handelsüblicher Gemischkraftstoff sowie ein persisches Gasöl (Abadan) untersucht, deren Messwerte ebenfalls in Abb. 13/14 eingetragen sind. Während der R.V.-Kraftstoff mit einem Zusatz von 40% Kogasin dem handelsüblichen Gemischkraftstoff praktisch gleichkommt, könnten die ausserordentlich günstigen Zündeigenschaften des persischen Öles erst dann erreicht werden, wenn ca. 70 - 80% Kogasin zugemischt wird.

Prüfung auf Motorklopfen.

Abb. 15 a / b zeigt verschiedene Druckverlaufsdiagramme, die wir sowohl mit dem reinen R.V.-Kraftstoff, als auch mit Kogasinmischungen aufgenommen haben. Mit Rücksicht auf eine gute Anschaulichkeit der Klopfausschläge wurde hier der Zeitmaßstab etwas anders gewählt, als es bei den früheren Untersuchungen der Abb. 10 der Fall war. Der Einspritzpunkt wurde jeweils so eingestellt, dass die Zündung stets im oberen Totpunkt erfolgte. Diese Massnahme war wie schon erwähnt, notwendig, um die durch die Kolbenbewegung verursachten motorischen Einflüsse soweit als möglich auszuschalten.

In der Zahlentafel 3 sind die erhaltenen Ergebnisse zahlenmässig zusammengestellt, in Abb. 16 graphisch aufgetragen. Da wir jeden Versuch aus Gründen der Messgenauigkeit doppelt durchgeführt haben, beschränkten wir uns darauf, die Messungen nur bei zwei Verdichtungsverhältnissen, nämlich 14 : 1 und 18 : 1 vorzunehmen.

Zahlentafel 3

Kraftstoff Verdichtungsverh.	Klopfausschlag mm		Leistung PS	
	14 : 1	18 : 1	14 : 1	18 : 1
R.V.-Kraftstoff	73	51	4,9	3,65
" " +10% Kog.	64	39,5	4,6	3,6
" " +20% "	52	30	4,05	3,5
" " +30% "	48,5	27	3,8	3,4
" " +40% "	39,5	24	3,55	3,3
pers. Gasöl	24	18	3,5	3,25
handelsübl. Gemisch- kraftstoff	25	21	3,3	3,1

Aus der graphischen Darstellung der Abb. 16 ist zu entnehmen, dass sich der Kogaszusatz nicht nur in einer Verbesserung des Zündverhaltens, sondern auch in einer starken Verminderung des Klopfens, und zwar bei beiden Verdichtungsverhältnissen, auswirkt. Es bestätigt sich damit wieder die bereits bekannte Tatsache, dass mit kleineren Zündverzügen im allgemeinen auch ein weicherer Motorlauf verbunden ist. Für jede Mischung ist das Klopfgeräusch bei dem hohen Verdichtungsverhältnis von 18 : 1 geringer als bei dem niedrigen von 14 : 1. Man darf jedoch daraus nicht den Schluss ziehen, dass es nun in jedem Falle günstiger wäre, ein möglichst hohes Verdichtungsverhältnis anzuwenden. Vergleicht man nämlich die bei beiden Verdichtungsverhältnissen erhaltenen Leistungswerte, so muss man feststellen, dass hohes Verdichtungsverhältnis gegenüber dem niedrigen einen Leistungsabfall bedeutet, der besonders deutlich, bei den schlechteren Kraftstoffen in Erscheinung tritt. Die Ursache hierfür ist in dem schlechteren mechani-

schen Wirkungsgrad zu suchen, der mit den hohen Verdichtungsdrücken verknüpft ist.

Um eine Vergleichsbasis mit Kraftstoffen anderer Zusammensetzung zu schaffen, haben wir auch diese Versuche mit dem bereits oben genannten Abadan sowie dem handelsüblichen Gemischkraftstoff durchgeführt. Die beiden genannten Kraftstoffe liegen bezüglich ihres Klopfverhaltens günstiger als die untersuchten Mischungen des R.V.-Kraftstoffes mit Kogasin, ergeben aber gleichzeitig auch die geringste Leistung. Dieses Ergebnis lässt sich mit der bekannten Tatsache vereinbaren, dass mit dem zündwilligsten Kraftstoff, den uns heute die Technik zur Verfügung stellt, nämlich mit Kogasin II, wohl ein guter weicher Lauf der Maschine erreicht wird, die

erzielbare Leistung dagegen einen geringeren Wert aufweist, als bei Betrieb mit üblichen Kraftstoffen. Wenn man aus einem gegebenen Dieselmotor eine genügende Leistung herausholen will, so muss ^{man} eben eine gewisse Klopfstärke zulassen und hat lediglich dafür zu sorgen, dass dieselbe noch in den für den praktischen Betrieb zulässigen Grenzen bleibt. Es darf sich dann naturgemäss nicht um eigentliches Klopfen handeln, sondern nur um einen mehr oder weniger rauhen Gang.¹⁾

Nach Klärung der Verbesserungsmöglichkeiten des R.V.-Kraftstoffes durch verschiedene Zusätze von Kogasin stand noch die Frage offen, inwieweit die motorischen Eigenschaften des R.V.-Kraftstoffes durch Abtrennung gewisser Siedeabschnitte beeinflussbar sind. Diese Angelegenheit schien deshalb bedeutungsvoll, weil sie in unmittelbarem Zusammenhang mit der Ausbeute, dem Raffinationsgrad und damit letzten Endes mit

1) Es ist beabsichtigt, diesem ausserordentlich wichtigen Punkt durch weitere Versuche besonderes Augenmerk zuzuwenden und ähnliche Untersuchungen vor allem auch an Mehrzylindermotoren durchzuführen.

den Erzeugungskosten des Kraftstoffes steht.

Zu diesem Zweck wurden vom R.V.-Grundkraftstoff, dessen Siedebereich zwischen 200 und 320° lag, die Siedeabschnitte 200 - 250, 200 - 270 und 200 - 290 abgetrennt und hinsichtlich ihrer Cetanzahl geprüft. Die gefundenen Werte lassen ersehen, dass sich bei sämtlichen Fraktionen keine ins Gewicht fallenden Unterschiede der Cetanzahlen ergaben.

Zwecks weiterer Klärung dieser Frage wendeten wir schliesslich auch unser neues Klopfmessverfahren an, indem wir die Klopfstärke und die Leistung bei zwei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ermittelten. Bei einer Betrachtung der in Abb. 17 und 18 dargestellten Ergebnisse fällt zunächst die Tatsache auf, dass bei 14 : 1 ebenfalls keine Unterschiede bezüglich der Klopfausschläge vorhanden sind, dass sich dagegen bei 18 : 1 die drei Fraktionen hinsichtlich ihrer Klopf Eigenschaften recht unterschiedlich verhalten. Die Fraktion 200 - 290 nähert sich am stärksten dem Verhalten des R.V.-Kraftstoffes, während die niedrigen Fraktionen mit fallendem Siedeendpunkt eine steigende Klopfneigung aufweisen.

Diese Ergebnisse bestätigen, dass die Cetanzahlbestimmung allein nicht immer eine ausreichende Bewertung darstellt.

Die Tatsache, dass bei 14 : 1 keine wesentlichen Unterschiede erkennbar sind, lässt sich mit den Ergebnissen der Cetanzahlbestimmung insofern vereinbaren, als das Verdichtungsverhältnis, das bei der Cetanzahlbestimmung eingestellt werden musste, in der Nähe von 14 : 1 lag.

Die Cetanzahlbestimmung allein berücksichtigt also nur die bei bestimmten Verdichtungsgraden vorhandenen Verhältnisse.

Aus diesen letzten Versuchen ist für diesen speziellen Fall die Folgerung zu ziehen, dass eine Abtrennung der schweren Siedeanteile keine Verbesserung des Kraftstoffverhaltens

mit sich bringt, dass dagegen niedrigsiedende Anteile das Klopfverhalten ungünstig beeinflussen.

II. Bewertung im Mehrzylindermotor.

Bei der Prüfung im Einzylindermotor geht man von dem Bestreben aus, den Kraftstoff so scharf zu fassen, als es nur möglich ist und die Eigenart der Maschine davon zu trennen. Man hat daher als Verbrennungsverfahren die unmittelbare Strahleinspritzung gewählt, weil hier die grösste Abhängigkeit des Zündverzuges vom Einspritzgesetz zu beobachten ist.

Nun gibt es aber eine Reihe von Brennverfahren, die den Nachteil eines ungünstigen Zündverzuges zu verwischen in der Lage sind. Wenn von zwei verschiedenen Maschinen des praktischen Betriebes die eine einen Kraftstoff gegebener Cetanzahl noch verarbeiten kann, während die andere mit Störungen behaftet ist, so liegt dieser Unterschied in der Bauart der Maschine begründet. Ein Kraftstoff bestimmter Cetanzahl kann also in Motoren verschiedener Bauart ein unterschiedliches Verhalten aufweisen.

Für die Praxis ist die Frage wichtig, welche Mindestansprüche ein bestimmter Motor an einen Kraftstoff stellt.

Die Verwendung eines Kraftstoffes, der eine höhere Cetanzahl besitzt als für den betreffenden Motor notwendig wäre, ist unangebracht, weil der Kraftstoff mit der höheren Cetanzahl mehr Geld kostet und obendrein sogar die Leistung dieses Motors verringern kann. Zwecks Erzielung einer günstigsten Leistungsausbeute müssen wir auch beim Dieselmotor nahe an die Klopfgrenze herangehen. Diese Verhältnisse drängen also dazu, in ähnlicher Weise wie beim Vergasermotor auch dem

Dieselmotor eine Bewertungszahl zu erteilen, die den Vergleich verschiedener Motorbauarten ermöglicht.

Da sich beim Mehrzylinderomotor die Anwendung des Indikators für die einzelnen Zylinder aus naheliegenden Gründen verbietet, ja in den meisten Fällen ohne umständliche Änderungen gar nicht möglich ist, wurde auf Anregung von Prof. A.W.Schmidt die Anwendungsmöglichkeit der elektro-akustischen Methode auch für diesen Fall geprüft.

Wie aus der unteren Kurve der Abb. 11 ersichtlich ist, besteht für einen gegebenen Kraftstoff ein bestimmter Zusammenhang zwischen Zündverzug und Klopfgeräusch und zwar dergestalt, dass verschiedene Kraftstoffe trotz gleichen Zündverzuges unterschiedliches Klopfgeräusch aufweisen können.¹⁾ Im Klopfgeräusch kommt also nicht nur der Zündverzug, sondern vor allem der unmittelbar nach der Zündung einsetzende Verbrennungsablauf zum Ausdruck.

Welche Bedeutung derartigen Klopfmessungen am Dieselmotor zugemessen werden muss, erhellt aus der Tatsache, dass im praktischen Betrieb nicht nach dem Zündverzug, sondern letzten Endes stets darnach gefragt werden wird, ob der Motor mit diesem oder jenem Kraftstoff "klopft". Mit dem Klopfen hängt die Betriebssicherheit, der durch Instandsetzungen bedingte Aufwand und die Lebensdauer der Maschine eng zusammen.

Versuche, die an einem vierzylinderigen Vorkammermotor Abb. 19 durchgeführt wurden, brachten nun tatsächlich das Ergebnis, dass hier Geräuschbilder erhalten wurden, die in gleicher Weise wie beim mehrzylinderigen Vergasermotor das Klopfverhalten der einzelnen Zylinder erkennen liessen. Während sich z. B. das Geräuschbild beim Betrieb mit einem sehr zündwilligen Kraftstoff kaum wesentlich von demjenigen der fremd angetriebenen Maschine unterschied, traten beim Be-

1) Anmerkung: Diese Zusammenhänge gelten nur, solange die Zündung vor oder in der Nähe des oberen Totpunktes erfolgt.

trieb mit schwereren Kraftstoffen erheblich grössere Klopfamplituden auf. Ausserdem zeigte sich auch hier, dass nicht alle Zylinder gleichmässig klopfen.

Diese letztere Tatsache kann durch Zusammenwirkung verschiedener Faktoren erklärt werden:

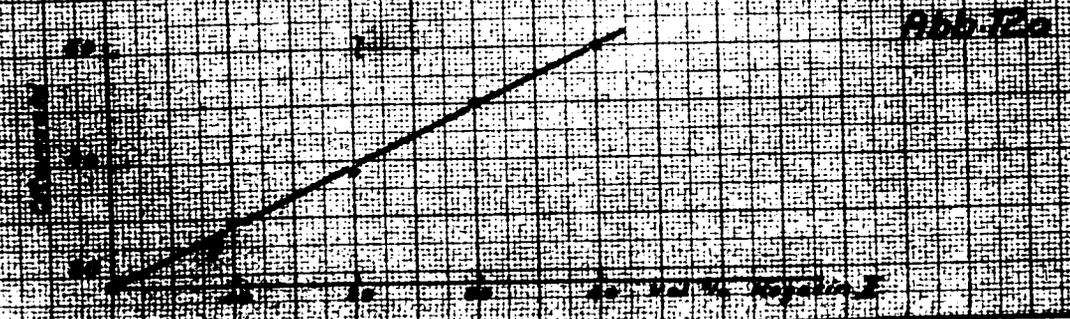
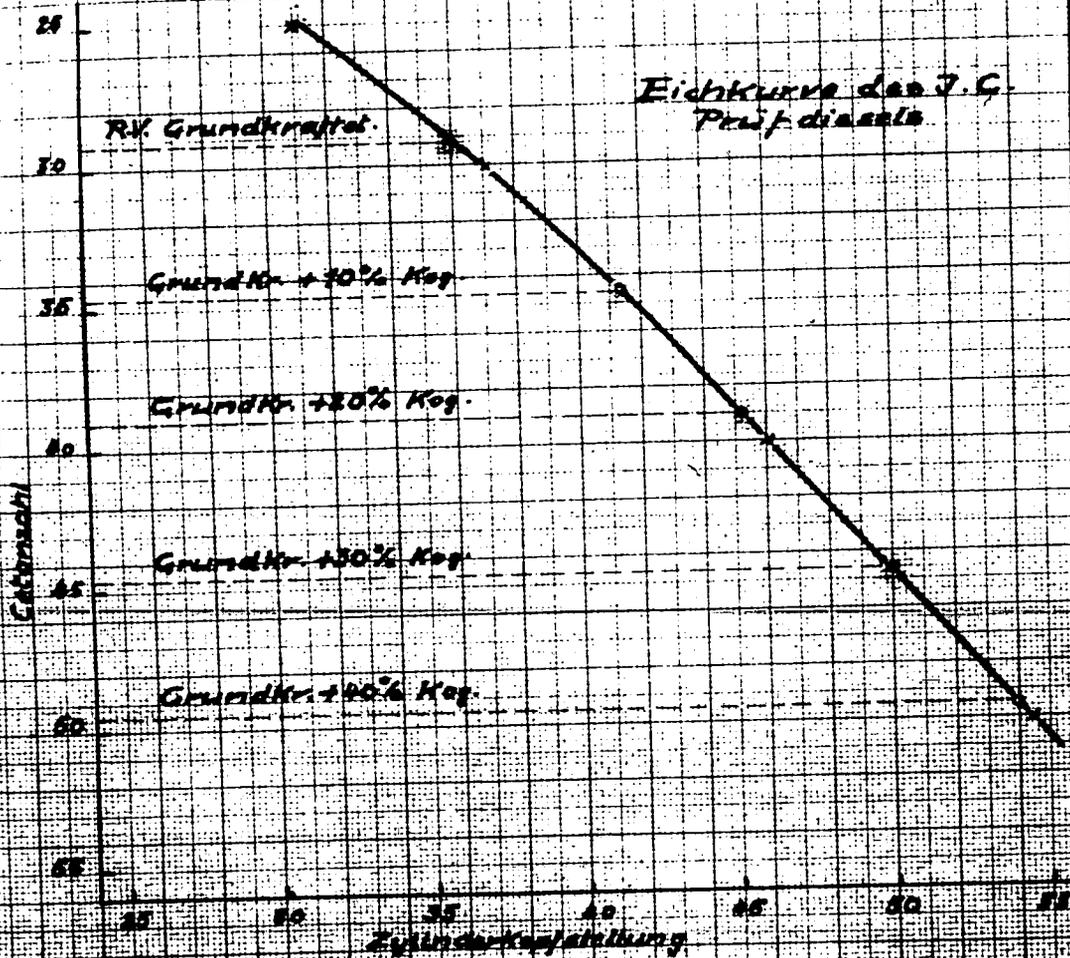
- a) ungleichmässige Luftfüllung der einzelnen Zylinder infolge der konstruktiven Gestaltung der Ansaugleitung,
- b) ungleichmässige Pumpenförderung,
- c) Unterschiede im Einspritzzeitpunkt,
- d) Unterschiede im Verdichtungsverhältnis, hervorgerufen durch Ölkohlebildung oder Durchblasen der Kolbenringe,
- e) ungleichmässige Kühlwassertemperatur.

S c h r i f t t u m .

- (1) W. Wentzel, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 1935 S. 105.
- (2) A.W.Schmidt, Brennstoff-und Wärmewirtschaft 1938 S.20.
- (3) H. Herele, Forschung Jan./Febr. 1939.
- (4) F.A.F.Schmidt, Forschungsheft d.VDI. Nr. 392.
- (5) R. Müller, Kraftfahrtechnische Forschungsarbeiten H.3
- (6) A.W.Schmidt und F.Kneule, Öl und Kohle 1938 S. 1034.
- (7) W.Wilke, Z.VDI. 1938 S.1135.

- (8) Erichsen, Forschungsheft des VDI Nr. 377.
- (9) Dicksee, Inst.of Autom.Engrs.,Adelphi 1932.
- (10) Nägel, Deutsche Kraftfahrtforschung, Zwischenbericht Nr. 36.
- (11) W.Lindner, Brennstoff-und Wärmewirtschaft 1937 S.1.
- (12) W.Wilke, MTZ 1939, Heft 2.

Abb. 12



Cetanzahl Bestimmung
Zu Zahl.Taf. 2

Zu Nr. 10130

27. II. 49.

Datum

Dr. Kneile

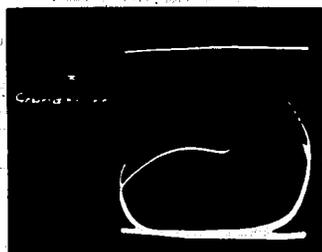
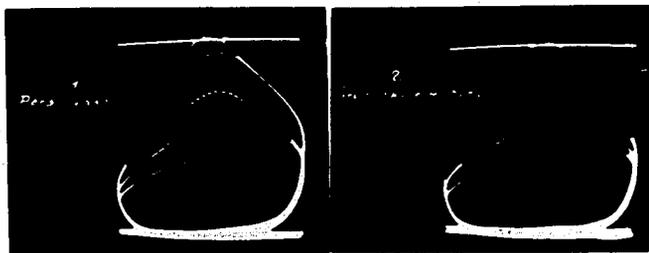
H. Frensch

(Unterschrift)

Professoren

T.H. München

Institut f. Chem. Technol.



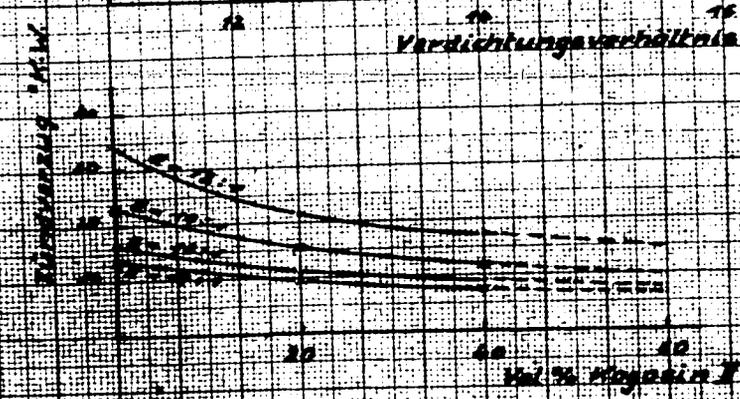
Druckverlaufslinien bei verschiedenen Verlastungs-
Verhältnissen.

----- Handelsüblicher Gemischdiel-Kraftstoff
 - - - - - Petrisches Gasöl

Abb. 14



Abb. 14a



Zündverzögerungskurven
 hierzu Abb. 13

Zu Nr. 10132

28. II. 41.
 Datum

Dr. Kucüle
 1. Finck

Unterschrift

Friedmann

TH München Institut f. Chem. Technol.

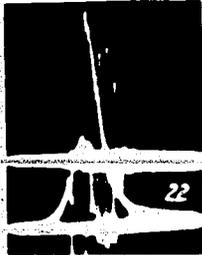
Druckverlauf und Klopfbeschlag

Verdichtungsverhältnisse

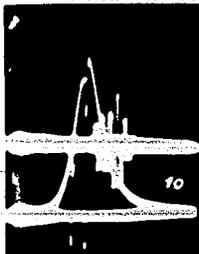
18 s 1

14 s 1

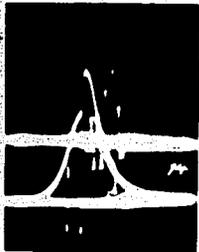
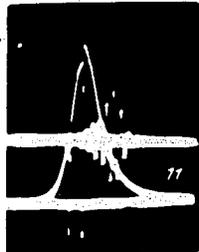
Kraftstoff



Schlin. Völklin. n
Grundkraftstoff

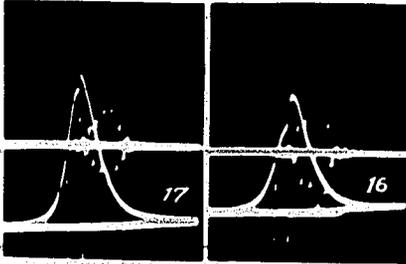


Grundkraftstoff
+ 20% Komprim.

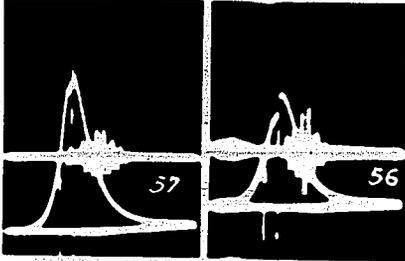


Grundkraftstoff
+ 30% Komprim.

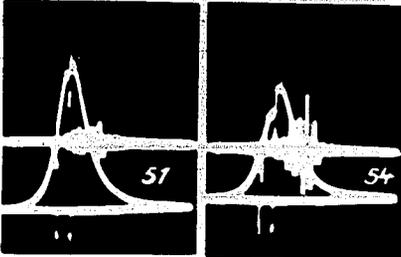
Verdichtungsverhältnis
18 : 1 14 : 1



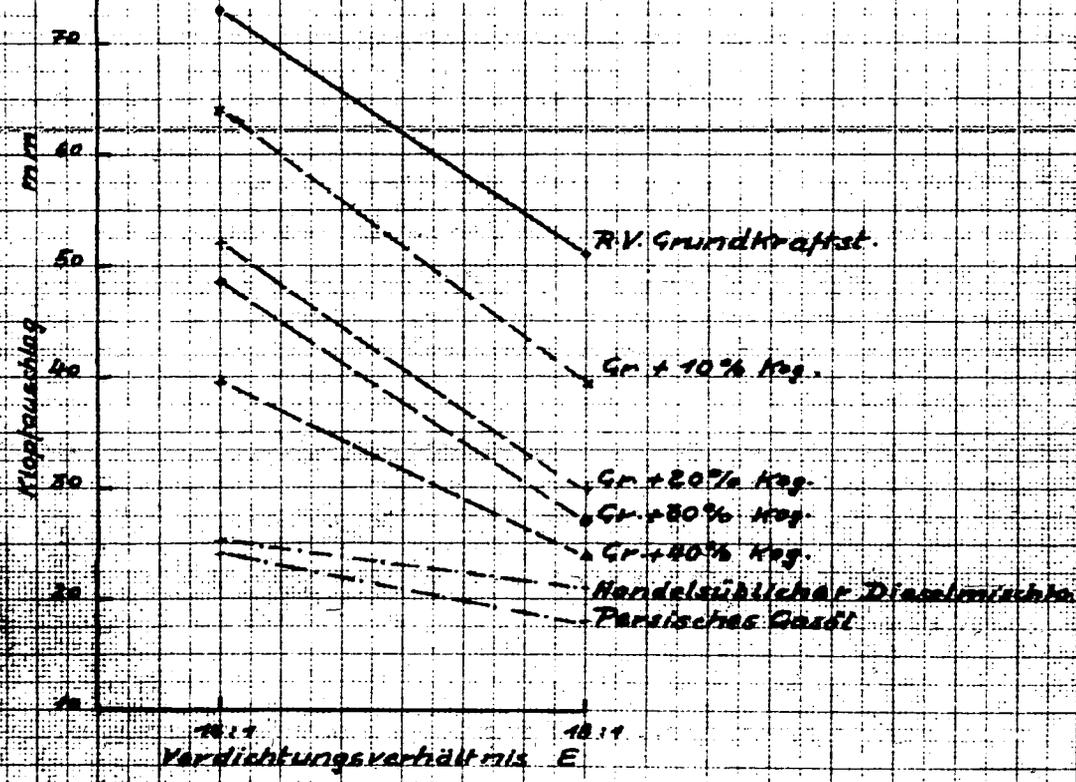
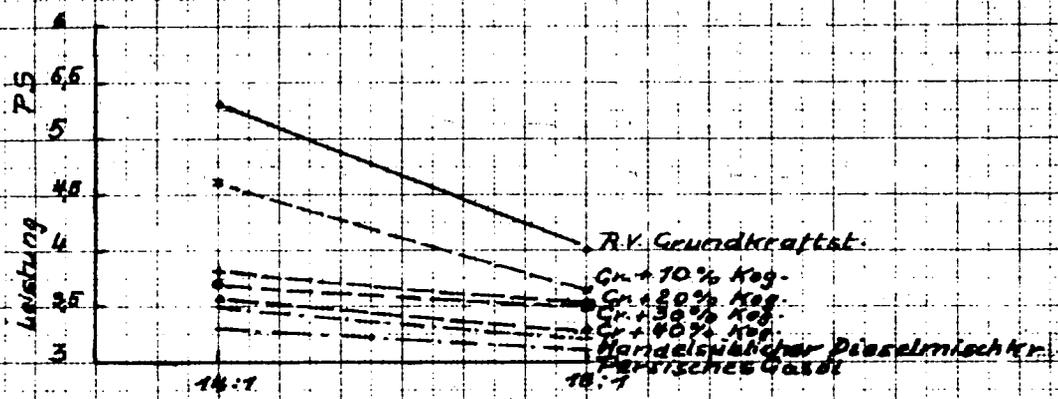
Chromatogramm
+ 1000 cm⁻¹



Fersinol n Gasöl



Handelsüblicher
Gemisch-Diesel-Kraft-
stoff



Klopfausschlag-Leistung
zu Zahl-Tafel 3

Zu Nr. 10132

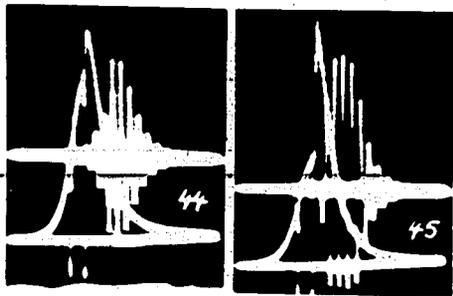
5.3.41.
Datum

Dr. Kneile
H. Frensch

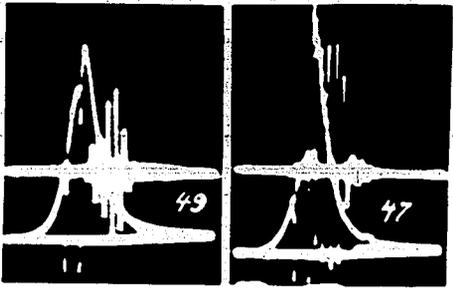
Unterschrift

Freilassen

TH München. Institut f. Chem. Technol.



Fraktion
60° - 70°



Fraktion
60° -

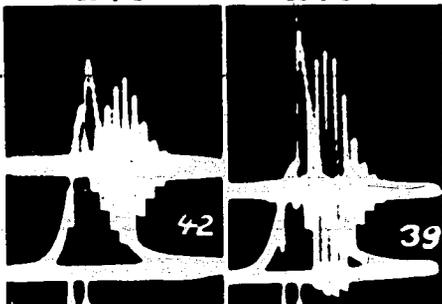
Druckverlauf und Klopfanschlag

Verdichtungsverhältnis

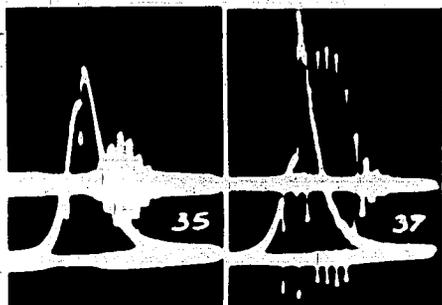
18 : 1

14 : 1

Kr ft tuff

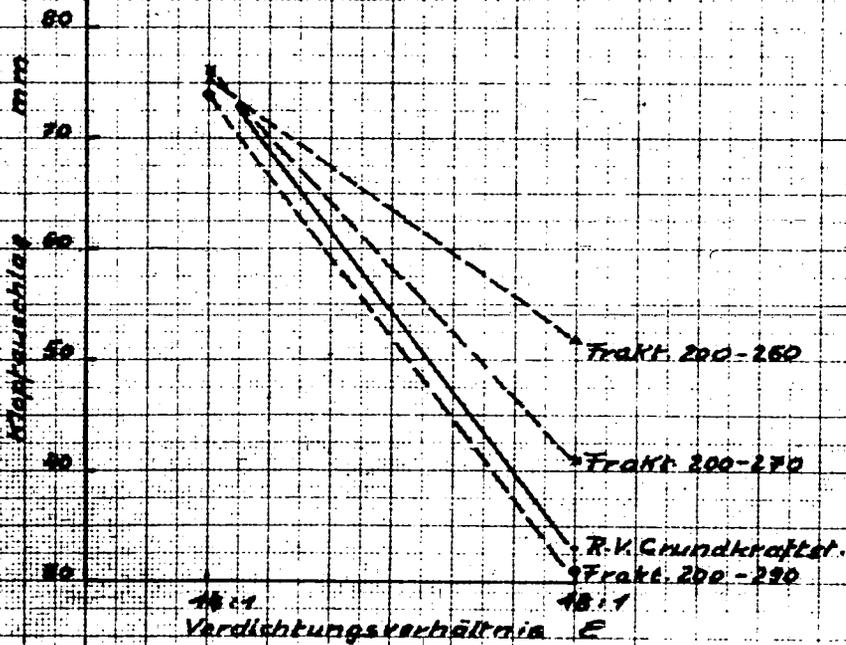
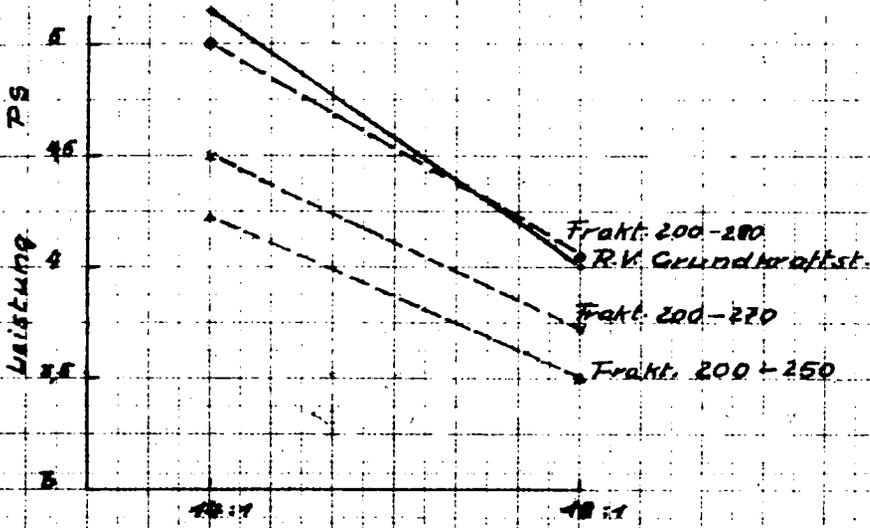


Eschlin: Völklinsen
Grundkraftstoff



Fraktion
200° - 190°

Abb. 18



Verdichtungsverhältnis ϵ

Fraktionen 250°-290°
Klopfausschlag u. Leistung

Zu Nr. 10133

5.3.41.
Datum

Dr. Kuehle
A. F...
Unterschrift

Frolenzen

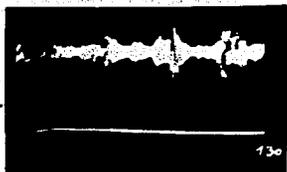
TH Muenchen Institut f Chem Technol

Unterschrift

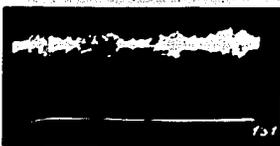
Laufgeräusche
eines 4-zyl. Vorkammerdiesel-
motors bei Betrieb mit verschie-
denen Kraftstoffen, $n = 920$ U



- 1) Geräuschbild der fremdange-
triebenen Maschine



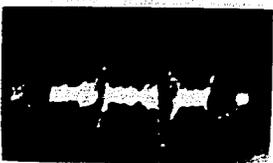
- 2) Betrieb mit einem Erdöl-
dieselmkraftstoff
Cetanzahl 63
Cetanzahl 54



- 3) Betrieb mit einem Gemisch
aus Steinkohlenterröl und
Fischer-Tropsch-Kraftstoff
Cetanzahl 68
Cetanzahl 56,5



- 4) Betrieb mit einem Braun-
kohlendieselmkraftstoff
Cetanzahl 45
Cetanzahl 39



- 5) Betrieb mit einem Hoch-
drucksynthesekraftstoff
Cetanzahl 50
Cetanzahl 43

Forschungsbericht über die Weiterentwicklung
des Klopfmessgerätes.

von Dipl.-Ing. P. Funck.

Forschungsbericht über die Weiterentwicklung des Klopf-
messgerätes.

Der vorliegende Bericht knüpft an die Arbeiten an, die im Institut für Chemische Technologie auf dem Gebiet der Untersuchung des Klopfverhaltens von Leichtkraftstoffen durchgeführt und in dem von Prof. A. W. Schmidt verfassten Aufsatz über "Untersuchungen über das Klopfverhalten von Kraftstoffen auf dem Prüfstand und im Fahrbetrieb" Oel und Kohle 1940 S. 350 veröffentlicht wurden.

Die Entwicklungsstufen, die zur Schaffung eines für den fahrenden Wagen geeigneten Klopfmessgerätes führten und in dem genannten Aufsatz eingehend erläutert sind, können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Ersatz der anfangs verwendeten Kondensatormikrophone durch elektromagnetische Membranmikrophone oder auch Kristallmikrophone. Wegen der stärkeren Mikrofonspannung konnte dadurch auf die unmittelbar am Mikrophon befindliche Verstärkerstufe verzichtet werden, wodurch sich neben der geringeren Empfindlichkeit gegen Erschütterungen der weitere Vorteil ergab, dass diese Mikrophone auch bei beschränkten Platzverhältnissen noch leicht untergebracht werden konnten.
2. Anwendung des Körperschalles für die Übertragung der Klopfgeräusche, die über einen Stahldraht dem Mikrophon zugeleitet werden.
3. Anwendung elektrischer Siebkreise zwecks Heraushebung der für das Klopfen charakteristischen Frequenzen und Beseitigung unerwünschter störender Nebengeräusche des

Motors.

4. Ersatz der im Laboratorium verwendeten Filmkamera durch ein normales Photogerät, das mittels eines lichtdichten Tubus mit seitlichen Beobachtungsstutzen über dem Leuchtschirm der Braun'schen Röhre aufgesetzt wird.

Bild 1 zeigt die nach diesen Gesichtspunkten entwickelte Apparatur, mittels der die im Bild 2 dargestellten Geräuschbilder von Mehrzylindermotoren im fahrenden Wagen erhalten wurden.

Es sei noch bemerkt, dass in der Zwischenzeit auch ein Flugversuch durchgeführt werden konnte, dessen Ergebnisse die grundsätzliche Eignung des Klopfmessgerätes auch für den Flugmotor zeigten.

Nachdem die genannten Versuche die Brauchbarkeit des Gerätes erwiesen haben und eine Fülle von weiteren Anwendungsmöglichkeiten ersehen liessen, eröffnete sich die Aufgabe zu prüfen, inwieweit das vorhandene Gerät, insbesondere das Verstärker- und Siebgerät, allen Anforderungen gerecht werden kann, und in welcher Weise Abänderungen bezw. Vereinfachungen vorgenommen werden sollten. Diese letztere Massnahme schien besonders deshalb notwendig, weil auf Grund der oben genannten Veröffentlichung von Prof. A. W. Schmidt verschiedene militärische und industrielle Kreise an das Institut mit dem Wunsch herangetreten sind, ein derartiges Gerät zu erwerben.

Die in dieser Richtung vom Verfasser vorgenommenen Arbeiten gliedern sich in folgende Teile:

1. Verbesserung des vorhandenen Gerätes zwecks Vornahme von Untersuchungen an Motoren verschiedenster Art unter besonderer Berücksichtigung von Flugmotoren und



Bild 1

Vorzündung
50 km/h
1/2 Gas



| 2 | 4 | 1 | 5 | 3 | 6 |

70 km/h



| 4 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1 |

Bild 2

Klopfgeräuschbilder eines Sechszylinder-
motors (aus Öl und Kohle 1940, S. 361).

Dieselmotoren.

2. Neuentwicklung eines vereinfachten Verstärker- und Siebgerätes.
3. Vorbereitende Arbeiten zur Schaffung eines Zeigerinstrumentes, das unter Mitbenützung oder auch unter Wegfall der Braun'schen Röhre einen der mittleren Klopfstärke proportionalen elektrischen Strom- oder Spannungswert unmittelbar auf einer Skala abzulesen gestattet.

1. Verbesserungen des vorhandenen Gerätes.

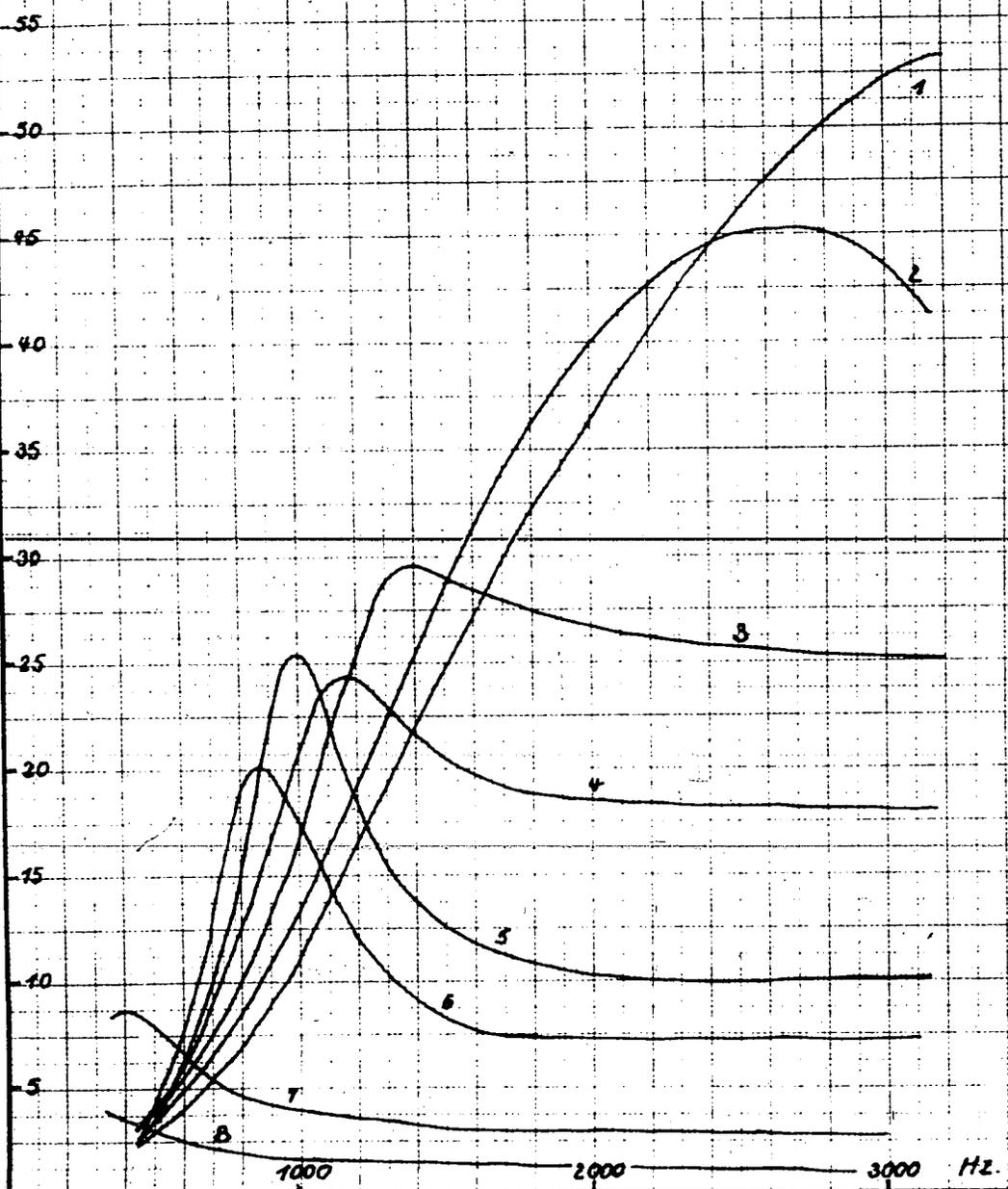
Bei den elektroakustischen Klopfuntersuchungen, die im Versuchslaboratorium für Mineralöle gemacht werden, ist den Verstärkern eine wichtige Aufgabe gestellt. Die Klopf-schwingungen, welche unmittelbar vom Motorblock von einem Kristallmikrophon aufgenommen werden, müssen in einem Röhrenvorverstärker verstärkt werden, ehe sie auf einen Kathodenstrahloszillographen zur Sichtbarmachung geleitet werden. Gleichzeitig sollen sie so verstärkt werden, dass auf dem Röhrenschirm ein Bild entsteht, in welchem sich die Klopfstöße deutlich von dem Geräuschband abheben. Das bedeutet, dass insbesondere die Schwingungen aus dem Frequenzband der Klopföne verstärkt werden, deren Amplituden beim Klopfen am stärksten anwachsen. Verstärker, die diesen Anforderungen genügen, sind selektive Verstärker, im folgenden kurz Siebgeräte genannt.

Um über die auftretenden Schwingungen Klarheit zu erhalten und für die Weiterentwicklung Grundlagen zu bekommen, wurde von dem vorhandenen Siebgerät, im folgenden als L-Gerät

bezeichnet, ein Frequenzbild über den Bereich von 500 bis 3000 Hz aufgenommen, s. Anlage 2. Hierzu sei bemerkt, dass die Frequenzgrenze von 3000 Hz seinerzeit deshalb gewählt worden war, weil die damaligen im Institut vorhandenen Motoren charakteristische Klopf Frequenzen von maximal 3000 Hz aufwiesen, wie aus dem Aufsatz von Prof. A. W. Schmidt "Untersuchungen über den Klopfvorgang in Mehrzylindermotoren", VDI-Zeitschrift 1940 S. 435 zu entnehmen ist. In Anlage 2 ist die Amplitude der Schwingungen in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen und zwar für die auf der Frontplatte des L-Gerätes befindlichen Schalterstellungen 1 - 8 der Abstimmkreise. Das Bild zeigt ein starkes Abfallen der Amplituden zu den niedrigen Frequenzen hin. Motorische Versuche zeigten brauchbare Ergebnisse bei dem "klingelnden" Klopfen eines Vierzylinder-Ottomotors, wie auch aus dem Frequenzbild zu erwarten war. Bei einem langsam laufenden Einzylinder-Prüfmotor war jedoch das Ergebnis mit diesem Gerät negativ. Da das Gerät auch zu Klopfversuchen an einem dumpfer klopfenden Dieselmotor Verwendung finden sollte, war es wichtig, zu untersuchen, warum die tiefen Frequenzen nicht genügend verstärkt wurden.

Nachdem das Siebgerät auseinander genommen war, wurde ein Schaltbild aufgenommen. Dann wurde der dreistufige Aufbau nachgeprüft und festgestellt, dass einer der zwei getrennt regulierbaren Siebkreise nicht in Ordnung war. Nach Beseitigung schlechter Kontakte wurde erneut ein Frequenzbild aufgenommen, welches dann alle Merkmale eines guten selektiven Verstärkers zeigte, s. Anlage 3. Leider machte sich bei diesen Versuchen eine unerwünschte Eigenschwingung bemerkbar, welche durch wilde Rückkoppelung hervorgerufen war. Erklärlich durch die nun erfolgte Abstimmung des zweiten Kreises, war die Rückkoppelung noch durch den schlecht geschirmten Aufbau des Gerätes begünstigt. Es wurden daher

Amplitude



Siebwirkung.
Siebgerät Firma L.
Benennung

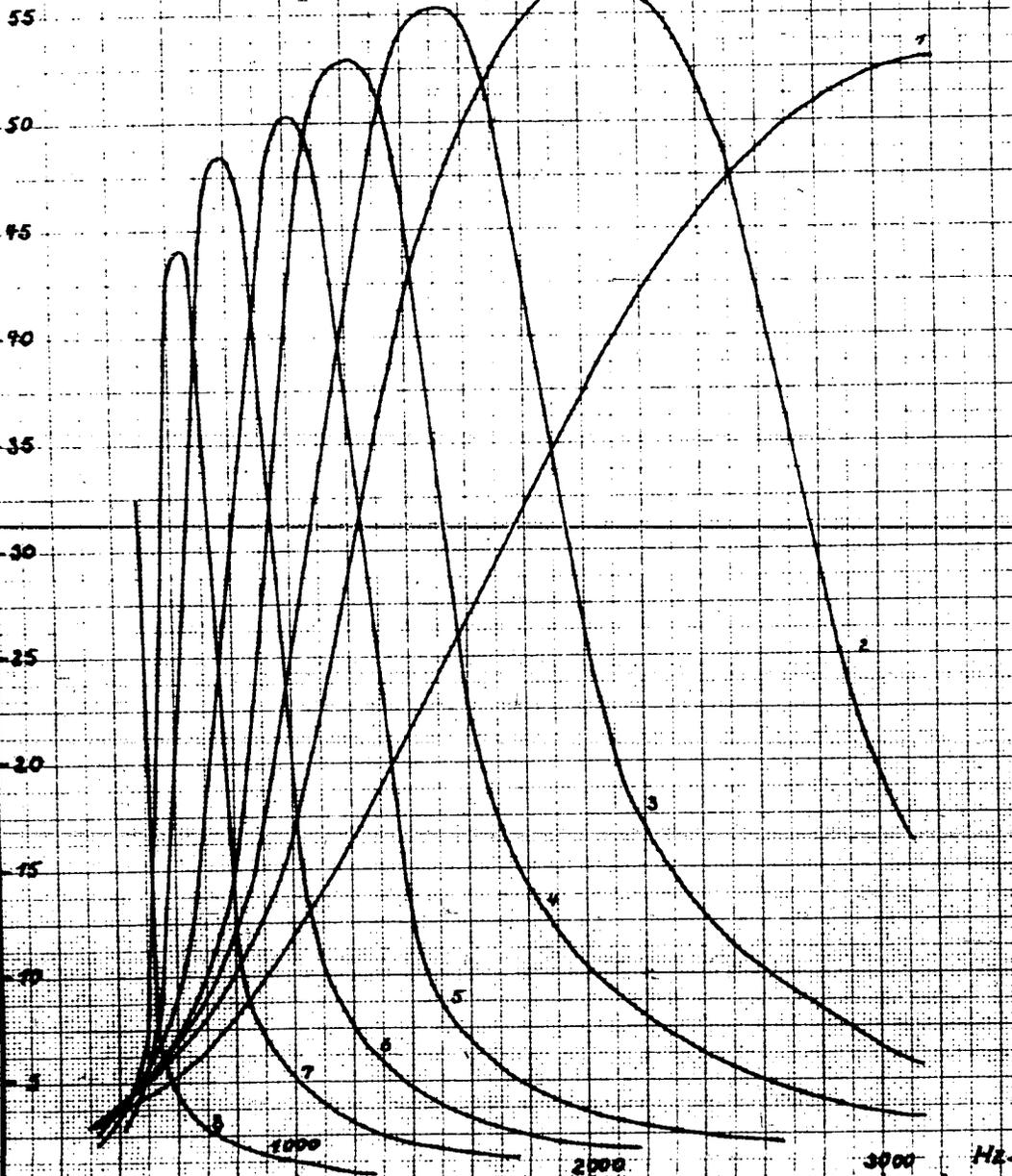
Zu Nr. 1014
20.11.40.
Datum

Inst. für chemische Technologie.
Institut

Freilassen

Unterschrift

Amplitude.



Siebwirkung nach Umbau.
Siebgerät Firma L.
Benennung

Inst. für chemische Technologie.

Institut

Zu Nr. 10137

20. 11. 40.
Datum

Unterschrift

Freilassen

alle Wechselspannung führenden Leitungen und Widerstände sorgfältig abgeschirmt, was zum Teil in dem fertigen Gerät grosse Schwierigkeiten bereitete. Jedoch gelang es hierdurch die Schwingneigung fast vollständig zu beseitigen, so dass Schwingungen bei den Versuchen nicht mehr störend in Erscheinung traten.

Zunächst wurden mit dem Siebgerät Versuche an einem Vierzylindermotor vorgenommen, deren Ergebnisse wie vordem gut waren, s. Anlage 4. Es gelang jetzt aber auch an dummer klopfenden Motoren gute Klopfbilder zu erhalten.

Versuche an einem Prüfdiesel-Motor.

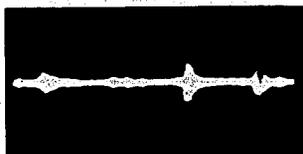
Nachdem der Frequenzbereich von 500 bis 3000 Hz infolge der Instandsetzung in Ordnung war, konnten auch Versuche an dem I.G.-Prüfdieselmotor gemacht werden. A. Schmid hatte in seiner Dissertationsarbeit "Motorische Bewertung von Dieselkraftstoffen" T.H. München 1940 gezeigt, dass an diesem Motor bei der Tonaufnahme durch Luftschall die wirklichen Klopf Frequenzen in der Nähe von 1300 Hz liegen. Bei den vorliegenden Versuchen diente zur Aufnahme der Klopf-schwingungen ein elektromagnetisches Mikrophon, dessen Membran über einen kurzen Draht an einer günstigen Stelle des Motorblocks befestigt war und den Körperschall aufnahm. Das so erhaltene Klopfbild, Anlage 5, zeigt, wie sich der Klopfstoss deutlich aus dem allgemeinen Motorgeräusch heraushebt, Jedoch waren die Motorgeräusche in dem Bild sehr störend, was bei der niedrigen Frequenz des Klopfens, die in das Band der Geräuschfrequenzen fällt, erklärlich ist. Es wurde nämlich an Hand der Siebbereichkurve und der Einstellung der Abstimmkreise festgestellt, dass die Frequenzen, die ihre Amplitude beim Klopfen am meisten ändern, um 700 bis 800 Hz liegen. Da es hier nicht gelang, die Klopfstösse ähnlich wie beim Ottomotor aus dem Geräuschband her-

Klopfbilder an Vierzylinder Ottomotor.

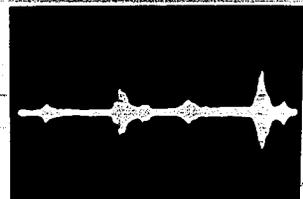
Verbessertes L-Gerät.



1. Ruhiger Lauf

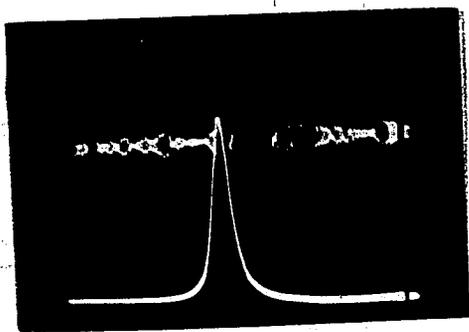


2. Leichtes Klopfen

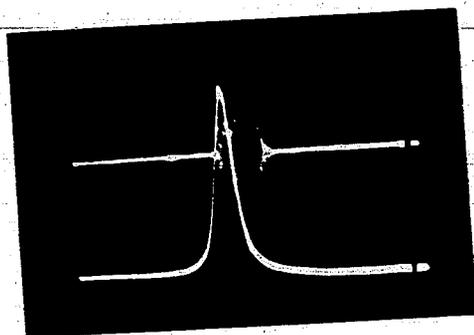


3. Starkes Klopfen

Klopfbilder vom Einzylinder Prüfdiesel.
Gerät der Firma L.



a. Gesamtes Geräuschbild.



b. Verstärkereingang nur während
des Klopfens geöffnet.

10150

aus zu sieben, wurde der Verstärkereingang durch einen vom Motor betriebenen Kontakt nur während des Klopfstosses geöffnet und während der übrigen Zeit kurzgeschlossen, s. Anlage 5 unten. Diese Massnahme war bereits am Klopfprüfmotor des Institutes mit Erfolg eingeführt und ist in dem Forschungsbericht Nr. 1 vom 26.3.40 "Entwicklung neuer Prüfmethoden für Leichtkraftstoffe" von A.W.Schmidt und F.Kneule beschrieben worden.

Das auf diese Weise erhaltene Klopfbild gibt zwar keine Aufschlüsse über die Dauer des Klopfens, zeigt jedoch genau die Lautstärke d.h. die Amplitude der Schwingung, die für die Beurteilung des Kraftstoffes das wesentlichste Merkmal darstellt. Mit dieser Anordnung wurden verschiedene Reihenversuche durchgeführt, deren Ergebnisse recht anschaulich waren und sehr interessante und neuartige Erkenntnisse brachten, vergleiche Bericht über die motorische Bewertung von Dieselmotoren vom 1.4.41, Bearbeiter: F.Kneule.

Die benötigten Reihenaufnahmen wurden mit einer Kleinkamera gemacht und zwar 2 Aufnahmen von jedem Zustand. Trotzdem wiesen die Werte zum Teil ziemliche Streuung auf. Bei der Verschiedenartigkeit der einzelnen Klopfstösse ist diese Feststellung ohne weiteres erklärlich. Es erweist sich daher als wichtig, auch hier eine elektrische Mittelwertanzeige anzuwenden, wie sie beim Einzylinder-Ottoprüfmotor bereits mit gutem Erfolg benützt wurde.

2. Neuentwicklung eines vereinfachten Verstärker- und Siebgerätes.

Nach der Instandsetzung des L-Gerätes wurden auch die Versuche im fahrenden Wagen wieder fortgesetzt. Die erhaltenen Klopfbilder waren befriedigend, vergleiche den Bericht des Bearbeiters: Herbert Funck. Das Gewicht des Gerätes und

Klopfbilder am Vierzylinder Ottomotor.

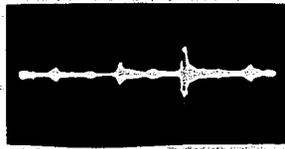
Kleines Siebgerät.



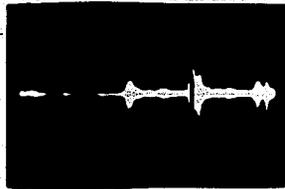
1. Ruhiger Lauf.



2. Beginnendes Klopfen (nicht hörbar)



3. Schwaches Klopfen



4. Starkes Klopfen

seiner Zubehörteile (24 Volt-Batterien und ein Umformer 24 Volt = / 220 Volt-) erwies sich jedoch bei dem wiederholten Ein- und Ausbau in verschiedenen Wagen sehr störend, s. Anlage 6. Diese Verhältnisse liessen schon bald den Wunsch nach einem kleineren Gerät aufkommen.

Dieses neue Gerät sollte folgende Anforderungen erfüllen:

Geringeres Gewicht und kleinere Ausmasse gegenüber dem L-Gerät.

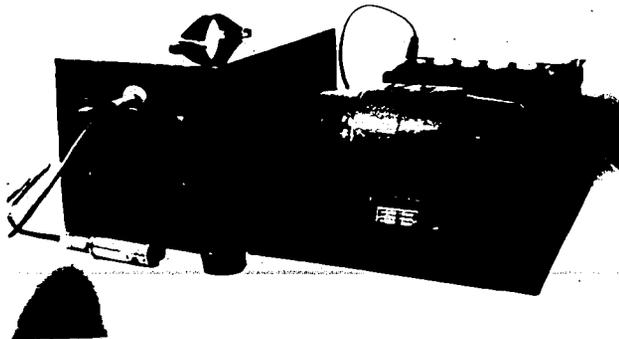
Eingebaute Stromversorgung.

Erhöhter Frequenzbereich, da in der Zwischenzeit auch Motoren untersucht wurden, deren Klopf Frequenzen über 3000 Hz lagen.

Einfache Bedienung.

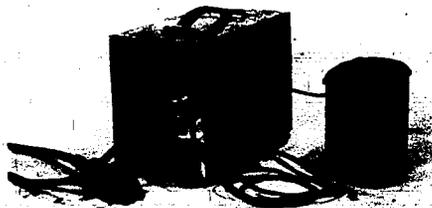
Nach diesen Anforderungen wurde ein kleines Sieb- und Verstärkergerät, im folgenden mit F-Gerät bezeichnet, entworfen und gebaut. Seine Ausmasse betragen in Übereinstimmung mit dem kleinen AEG-Oszillographen 27 x 20 x 15 cm, sein betriebsbereites Gewicht beträgt einschliesslich eines Akkus für den Heizstrom 10,7 kg, s. Anlage 6 unten. Das F-Gerät besitzt 2 Röhren und ist als zweistufiger Spannungsverstärker ausgeführt. Im Gegensatz zu dem grossen L-Gerät werden die beiden Abstimmkreise parallel geregelt, womit 2 Bedienungsknöpfe fortfallen. Der gesamte Siebbereich ist 4-fach unterteilt, s. Anlage 7. Die vier Stufen können mit einem Drehknopf wahlweise eingeschaltet und mit einem zweiten Knopf fein abgestimmt werden. Ein dritter Drehknopf dient zum Einschalten der Heizung und zur Regelung der Verstärkung. Das Gerät ist vorerst nur im Zusammenwirken mit einem Oszillographen zu benutzen. Zunächst wurden mit diesem neuen F.-Gerät Untersuchungen an einem Vierzylinder-

Siebgerät der Firma L.



Gewicht: 89,2 Kg

Kleines Siebgerät



Gewicht: 10,7 Kg

10154

kHz.

5

4

3

2

Bereich I

II

III

IV

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Kleines Siebgerät.
Siebbereiche.
Benennung

Zu Nr. 1015

10. 3. 41.
Datum

Inst. für chemische Technologie.

Institut

Frottieren

Unterschrift

motor vorgenommen, da ja das Gerät für den besonderen Fall der Fahrzeugmotore gebaut wurde. Die hierbei erhaltenen Aufnahmen, s. Anlage 8, zeigen sehr schöne Klopfstöße über einem ganz schmalen Geräuschband. Das erste Bild zeigt einen ruhigen normalen Lauf. Der schmale Strich auf der linken Seite ist der Zündpunkt des Zylinders Nr. 1, von der Anwerfseite aus gesehen. Die kleinen Erhebungen im Geräuschband sind als Ventilgeräusche zudeuten. Durch langsames Vorstellen der Zündung wurde der Motor zum Klopfen gebracht. Bild 2 zeigt den Beginn des Klopfens, der infolge des Motorengeräusches gehörmässig nicht festzustellen war. Die Bilder 3 und 4 zeigen mittleres bzw. starkes Klopfen. Bei allen Bildern war die Drehzahl des Motors und der Verstärkungsgrad des Gerätes gleich.

3. Vorbereitende Arbeiten zur Schaffung eines Zeigerinstrumentes.

Im Anschluss an die vorgenannten Arbeiten wurden noch Versuche mit einem Zeigerinstrument gemacht, wobei vorläufig mit einem sog. Millivoltmeter gearbeitet wurde. Die Ergebnisse waren bereits erfolgversprechend; es konnte lediglich noch kein genügender Zeigerstillstand erreicht werden. Jedenfalls zeigte dieser Versuch, dass auch im Falle von Mehrzylindermotoren die elektrische Anzeige der mittleren Klopfstärke auf einer Skala erstrebenswert und erreichbar ist.

Plan für eine Weiterentwicklung der Klopfmessgeräte.

Auf Grund der im Institut bisher durchgeführten Arbeiten erweist es sich als zweckmässig, zwei Arten von Klopfmessgeräten beizubehalten, von denen das eine für die Prüfstände, das andere für den Fahr- bzw. Flugbetrieb besonders geeignet ist.

A Prüfstandsgerät.

Das L-Gerät wäre für den Betrieb mit einem Anzeigeelement umzubauen, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass die Leistung der bereits eingebauten Endstufe zur Aussteuerung des Klopfstromumformers möglicherweise nicht ausreicht. Ausserdem ist beim L-Gerät die Leistungsverstärkung nicht regelbar und somit der Ausschlag des Zeigerinstrumentes von der Gesamtverstärkung abhängig. Trotzdem wäre es vorerst erwünscht, einen entsprechenden Umbau des L-Gerätes vorzunehmen, da hieraus Erfahrungen für den Neubau eines Prüfstandsgerätes gewonnen werden könnten, das dann allen Anforderungen gerecht werden kann. Da bei diesem neuen Gerät das Anzeigeelement mit eingebaut wäre, würde somit eine geschlossene Einheit entstehen, die sowohl für den Einzylinder- als auch Mehrzylinder-Motor zu verwenden wäre. Die Motorenart (Otto- bzw. Dieselmotor) könnte ebenfalls bei diesem Gerät berücksichtigt werden.

B Betriebsgerät.

Die Entwicklung der Geräte für Versuche im fahrenden Wagen zielt auf eine weitere Verkleinerung der Einheiten hin. Die Anforderungen an ein neues Gerät wären etwa folgende:

Geringes Gewicht und kleine Ausmasse.
Einbau der Spannungs- und Heizstromquelle und
damit vollkommene Unabhängigkeit von Strom-
quellen ausserhalb.

Einknopfabstimmung.

Eingebautes Zeigerinstrument.

Mit einem solchen Gerät wären Klopfuntersuchungen im Fahr-
zeug einfach und sicher durchzuführen.

Um für Versuche im Flugzeug genügende Unterlagen zu erhal-
ten, wäre es wünschenswert, dass noch mehr Untersuchungen
an Flugmotorprüfständen gemacht werden könnten. Diese Un-
tersuchungen müssten Näheres über die Art und die Frequenz
des Klopfens der Flugmotoren geben.

Versuchsbericht

über die Anwendung der elektroakustischen Klopfmass-
methode an Ein- und Mehrzylindermotoren, auf dem Prüf-
stand und im Fahrbetrieb.

von Dipl. Ing. H. Funck.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
<u>I. Versuchsapparaturen</u>	
1. Am Einzylinder	88
2. Am Mehrzylinder.	89
3. Im Fahrzeug	89
4. Motoren	91
<u>II. Versuche</u>	
1. Am Einzylinderprüfstand.	92
a) Klopfkurven	92
b) Mikrophone am Einzylinder	95
c) Mikrophon am I.G.Prüfmotor.	98
2. Versuche an Mehrzylindermotoren.	99
a) Am Mercedes 1,7 Ltr.	99
b) Am Peugeot 2,1 Ltr.	103
c) Versuche im fahrenden Wagen	106
d) Bau eines Kristallmikrophons.	108
e) Bau eines Zündzeitpunktmessgerätes.	108
f) Klopfgeräuschfrequenzen	109

Versuchsbericht über die Anwendung der elektroakustischen Klopfmessmethode an Ein- und Mehrzylindermotoren, auf dem Prüfstand und im Fahrbetrieb.

I. Versuchsapparaturen:

1. Am Einzylinder:

Zu den Versuchen wurde die im Institut entwickelte elektroakustische Klopfmessmethode verwendet.¹⁾ Die Apparatur hat folgenden grundsätzlichen Aufbau: Die von einem elektromagnetischen Membranmikrophon, das in einem sehr kleinen Abstand von Motorgehäuse aufgehängt ist, durch Luftschall aufgenommenen Geräuschströme werden in einem Verstärker mit eingebauten Siebkreisen derartig gesiebt, dass nur die sich von den Frequenzen der normalen Motorgeräusche am stärksten unterscheidenden Frequenzen der Klopfgeräusche, verstärkt auf die Ablenkplatten einer Braun'schen Röhre gelangen, wo sie als Ausschläge des Kathodenstrahles sichtbar werden. Parallel zur Braun'schen Röhre gelangen die Klopfströme über einen Leistungsverstärker und einen als Dämpfungsglied wirkenden Thermoumformer auf ein Millivoltmeter, wo der jeweilige Mittelwert der Klopf ausschläge an einem ruhig stehenden Zeiger abgelesen werden kann.²⁾ Zur Ausschaltung der störenden Motorengeräusche werden die verstärkten Mikrophonströme über einen, an der Nockenwelle des Motors angebrachten Unterbrecher geleitet, der nur für den kurzen Augenblick des Klopfschlages den Stromkreis schliesst.

1) A.W.Schmidt, Öl und Kohle 1940 S. 350.

2) A.W.Schmidt und F. Kneule, Forschungsbericht 1 über "Entwicklung neuer Prüfmethode für Leichtkraftstoffe" v.26.3.40.

2. Am Mehrzylinder:

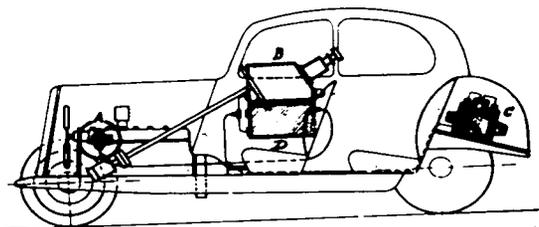
Am Mehrzylinder wird ein sehr empfindliches Kristallmikrophon mit Körperschallübertragung benutzt. Die Klopfströme gelangen wiederum über ein entsprechend abgeschirmtes Siebgerät verstärkt auf die Ablenkplatten der Braun'schen Röhre. Auf dem Schirm der Braun'schen Röhre werden die Klopfausschläge aller Zylinder und der Zündfunke einer nicht abgeschirmten Kerze entsprechend dem Arbeitsspiel und der Zündfolge des Motors sichtbar.

Durch einen mit halber Motordrehzahl umlaufenden drehbaren Unterbrecher ist es möglich, den Klopfausschlag jedes einzelnen Zylinders allein sichtbar zu machen und seinen mittleren Klopfausschlag auf dem oben erwähnten Messinstrument abzulesen.

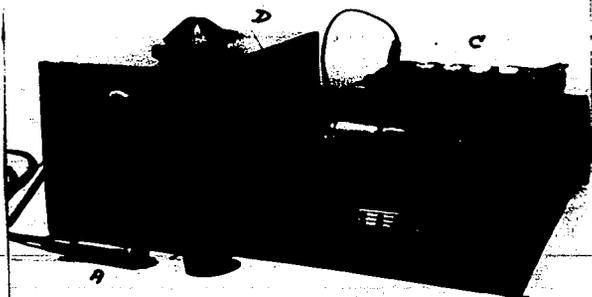
3. Im Fahrzeug:

Im fahrenden Wagen wird die im hiesigen Institut entwickelte Wagenapparatur mit Kristallmikrophon, Siebgerät, Verstärker und Oszillograph mit Photoaufsatz verwendet. Die zum Betrieb der einzelnen Instrumente notwendigen Ströme und Spannungen liefern zwei 12 V. Batterien und ein Einankerumformer 12 V. = auf 220 V. .

Wagenapparatur



Klopfwerkgerät im Fahrzeug



- A = Mikrophon
- B = Oszillograph mit Photoaufsatz
- C = Stromquelle
- D = Siebgerät

4. Motoren:

Die Prüfstandversuche wurden ausgeführt an folgenden Motoren:

An einem Einzylinder-Kraftstoffprüfmotor nach Bauart A.W. Schmidt mit veränderlichem Verdichtungsverhältnis. Der Motor hat folgende Abmessungen und Daten:

Zylinderzahl		1
Bohrung	mm	78,6
Hub	mm	104
Hubraum	cm ³	500

~~Verdichtungs-
verhältnis veränderlich von = 4:1 - 10:1~~

Am Mehrzylinderprüfstand stand ein seitengesteuerter Mercedes 4-Zylindermotor mit stehenden Ventilen zur Verfügung. Der Motor hat folgende Abmessungen und Daten:

Zylinderzahl		4
Bohrung	mm	73,5
Hub	mm	100
Hubraum/Zylinder	cm ³	425
Gesamthubraum	cm ³	1700
Verdichtungs- verhältnis		1:6
Leistung	PS	38
Hubraumleistung	PS/l	22,5

Weiterhin wurden Versuche an einem französischen oben gesteuerten 4-Zylindermotor mit hängenden Ventilen und Stoßstangensteuerung gemacht. Der Motor hat folgende Abmessungen und Daten:

Zylinderzahl		4
Bohrung	mm	83
Hub	mm	99
Hubraum/Zylinder	cm ³	534
Verdichtungsverhältnis		1:6,7
Leistung	PS	62
Hubraumleistung	PS/l	29

II. Versuche:

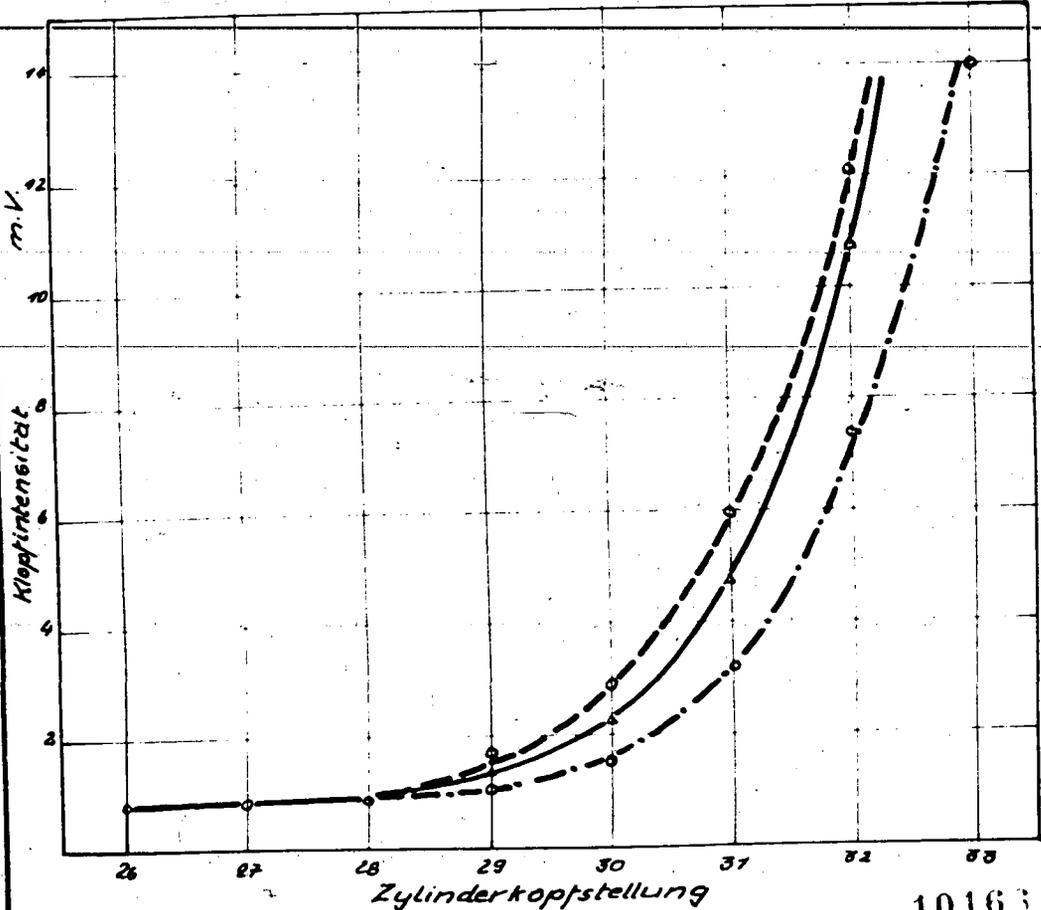
1. Am Einzylinderprüfstand:

- a) Klopfkurven. Am Einzylinderprüfmotor mit veränderlichem Verdichtungsverhältnis ist es durch die elektroakustische Klopfmessmethode möglich, durch laufende Veränderung der Verdichtung, die mittlere Stärke des Klopfausschlages für jede Zylinderkopfstellung zu ermitteln. Man bekommt auf diese Weise für jeden Kraftstoff eine Kurve, deren Lage und Gestalt ausschlaggebend zur Beurteilung des Kraftstoffes ist. Setzt man diese Kraftstoffklopfkurve in Beziehung zu den Klopfkurven zweier Testkraftstoffe, so ist es möglich die Oktanzahl des Versuchskraftstoffes einwandfrei zu bestimmen. S.Abb.1. Diese Abbildung zeigt die Klopfkurve eines rumänischen Erdölbenzins eingegrenzt durch die Klopfkurven zweier Eichkraftstoffe

Klopfkurven am Einzylinder

- O.Z. 60
- .-.- O.Z. 70
- Rumän. Erdöl Benzin

bei zunehmender Verdichtung

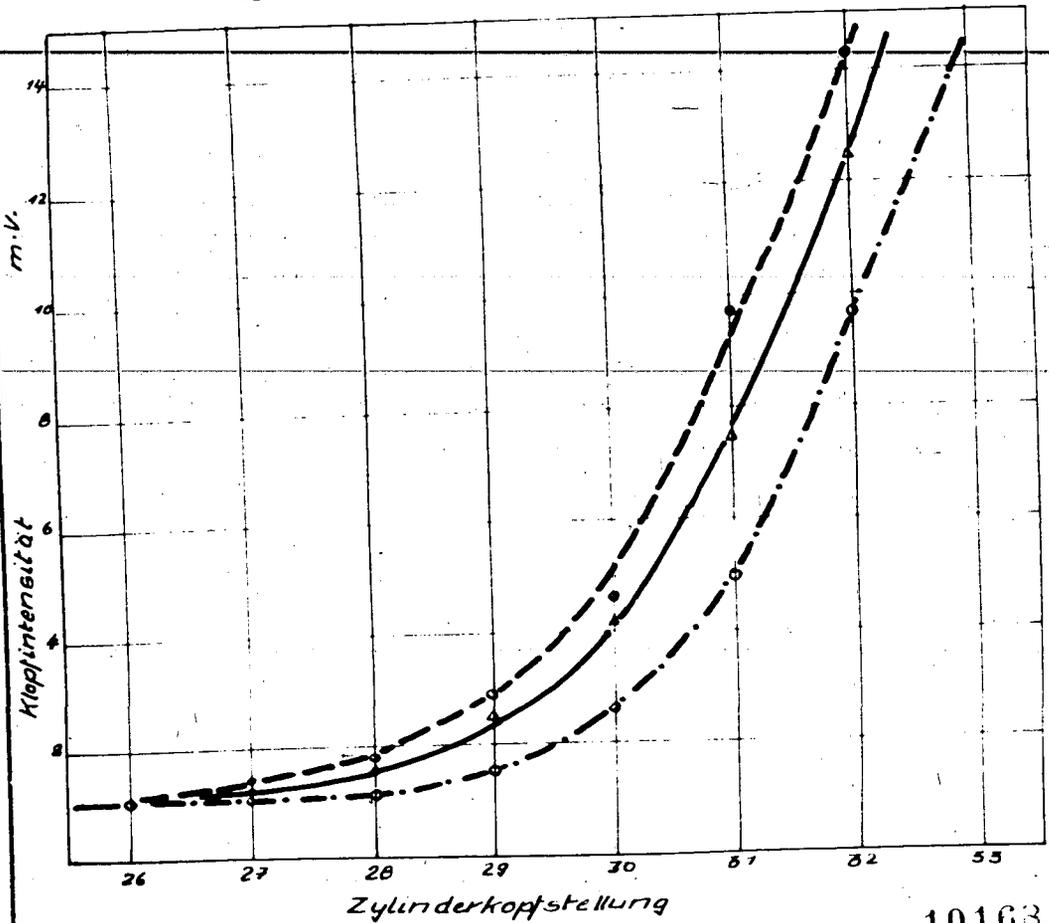


mit einer Oktanzahl von 80 und 80. Es galt nun die günstigste Methode zur Aufstellung dieser Klopfkurven zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden dieselben einmal bei ansteigender und einmal bei fallender Verdichtung (Abb. 2) aufgenommen. Es zeigte sich, dass die Kurven ähnliche Lage aufweisen, dass aber die bei fallender Verdichtung aufgenommenen Kurven erwartungsgemäss einen etwas flacheren Verlauf haben. Es zeigte sich weiter, dass die bei fallender Verdichtung aufgenommenen Kurven in ihren Werten eine etwas grössere Streuung aufweisen. Dieser Unterschied, ist aus der Trägheit des Klopfmessinstrumentes, und aus dem sich nur langsam verändernden Wärmezustand des Motors zu erklären. Nun wurde die zur Aufstellung der Klopfkurven günstigste Methode aufgesucht. Es wurden die Zeitabstände der Ablesungen und die der Verdichtungsverstellung geändert. Als günstigste Lösung fand sich folgende: Das Verdichtungsverhältnis des Motors wird von Minute zu Minute um ein gewisses kleines Mass, und zwar in steigendem Sinne, geändert. Da der Zeiger des Mittelwertinstrumentes während einer Minute nicht Zeit hat auf den jeweiligen Klopfwert einzuspielen, wird die Ablesung jeweils kurz vor Änderung des Verdichtungsverhältnisses, also auch genau in Zeitabstand von einer Minute, vorgenommen. Die erhaltenen Klopfwerte werden dann über der Zylinderkopfstellung, welche eine Funktion des Verdichtungsverhältnisses ist, zu Klopfkurven aufgetragen. In Abb. 3 sind Oszillographenbilder des Klopf-ausschlages, die während der Aufstellung einer Klopfkurve aufgenommen wurden, im Sinne des steigenden Verdichtungsverhältnisses zusammengestellt.

Klopfkurven am Einzylinder

- OZ. 60
- · - · - OZ. 70
- Rumän. Erdöl Benzin

bei abnehmender Verdichtung



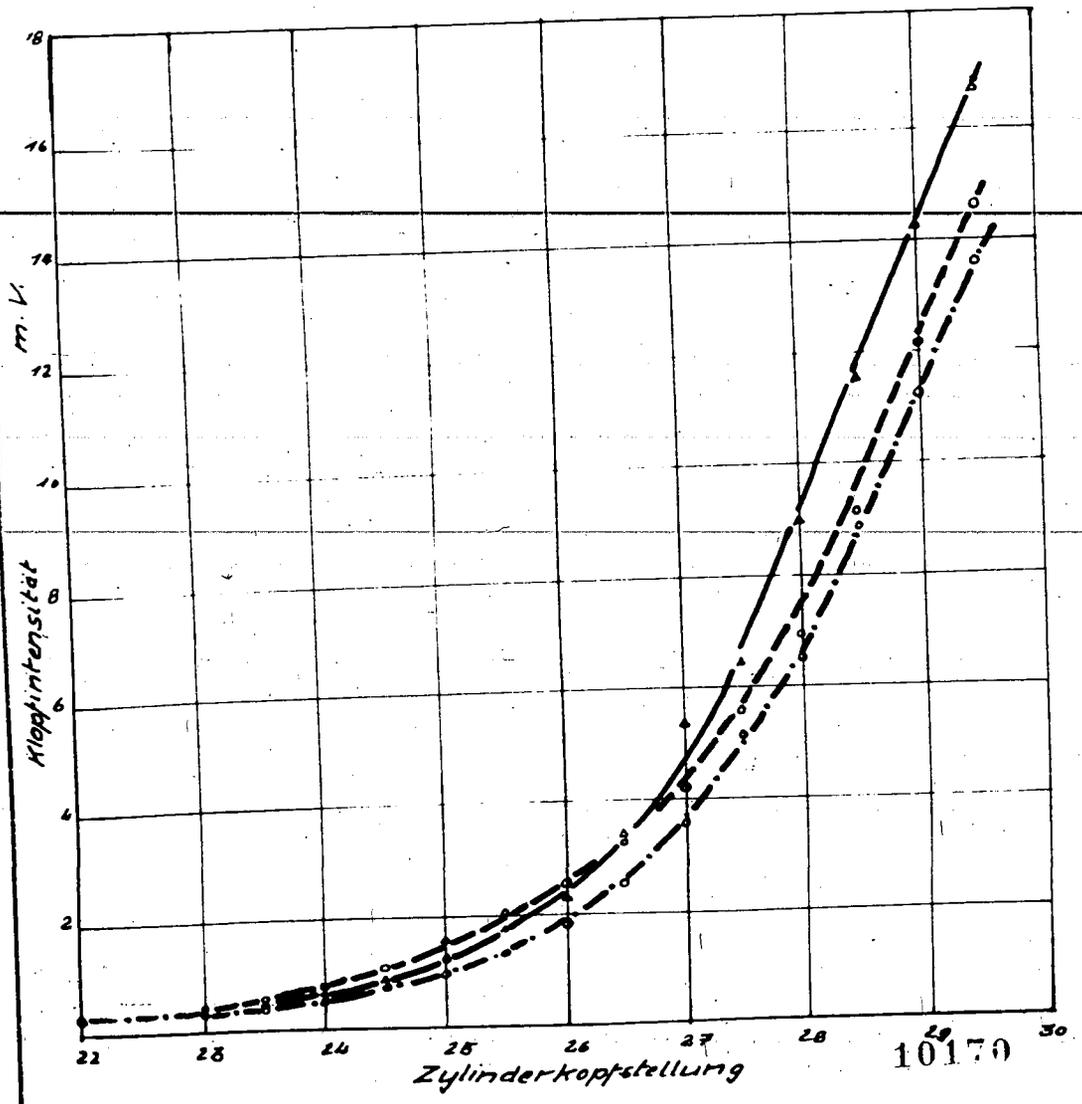
966 3



In Abb. 4 ist nun der Vorteil der kurvenmässigen Beurteilung von Kraftstoffen gegenüber der nach der Einpunktoktan-zahlbestimmung der C.F.R.-Methode klar ersichtlich. In diesem Bilde sind Klopfkurven zweier Eichkraftstoffe und die eines Ruhrgrundbenzins aufgetragen. Die Kurve des Grundbenzins zeigt im unteren Teil einen flacheren und im oberen Teil einen steileren Verlauf als die der Eichkraftstoffe. Bei der Auswertung des Bildes ergibt sich folgendes. Würde die Oktanzahlbestimmung, nach den üblichen Methoden C.F.R. und I.G. bei einer bestimmten mittleren Klopfintensität von etwa 4 m.V., was einem normalen Oktanzahlklopfen entsprechen würde, vorgenommen, so würde dem

Klopfkurven am Einzylinder

- O.Z. 46
- .-.- O.Z. 50
- Ruhr Benzin



Kraftstoff eine Oktanzahl von 46 gegeben werden müssen. Aus dem Bild der Kurven ergibt sich aber, dass diese Bewertung für starkes Klopfen, also für hohe Verdichtungsverhältnisse zu günstig ist, dass die Oktanzahl bei einem Klopfwert von 8 m.V. nur annähernd 30 beträgt und weiterhin, dass der Kraftstoff bei sehr geringem, kaum hörbarem Klopfen von etwa 1 m.V., also in dem Gebiete, das für die Praxis am wichtigsten ist, unterbewertet wird. Man müsste ihm für dieses Gebiet eine Oktanzahl von ungefähr 48 zubilligen.

Es ist somit gezeigt worden, dass Gestalt und Lage der Klopfkurven aufschlussreiche und vielseitige Beurteilungsmöglichkeiten für Kraftstoffe bieten. Es ist aber erforderlich, dass auf diesem Gebiete noch grundlegende und eingehende Versuche gemacht werden.

b) Mikrophone an Einsylinder. Im hiesigen Institut wurden zur Aufnahme der Klopfgeräusche zwei Verfahren entwickelt.

1. Die Motorgeräusche werden mittels Luftschall auf ein in sehr geringem Abstand vom Motorgehäuse aufgehängenes elektromagnetisches Membrankrofon¹⁾ übertragen und von diesem als Geräuschströme der Sieb- und Verstärkeranrichtung zugeführt.
2. Die Motorgeräusche werden über einen fest mit dem Motorgehäuse verbundenen Stahldraht auf ein Kristallmikrofon durch Körperschall übertragen. Die hier erzeugten Geräuschströme werden derselben Apparatur wie im ersten Falle zugeführt.

1) A.W.Schmidt, Z.V.DI 1940 S. 435.

Empfindlichkeit der Mikrophone

- Kristall Mikrophon
-.- Membran Mikrophon

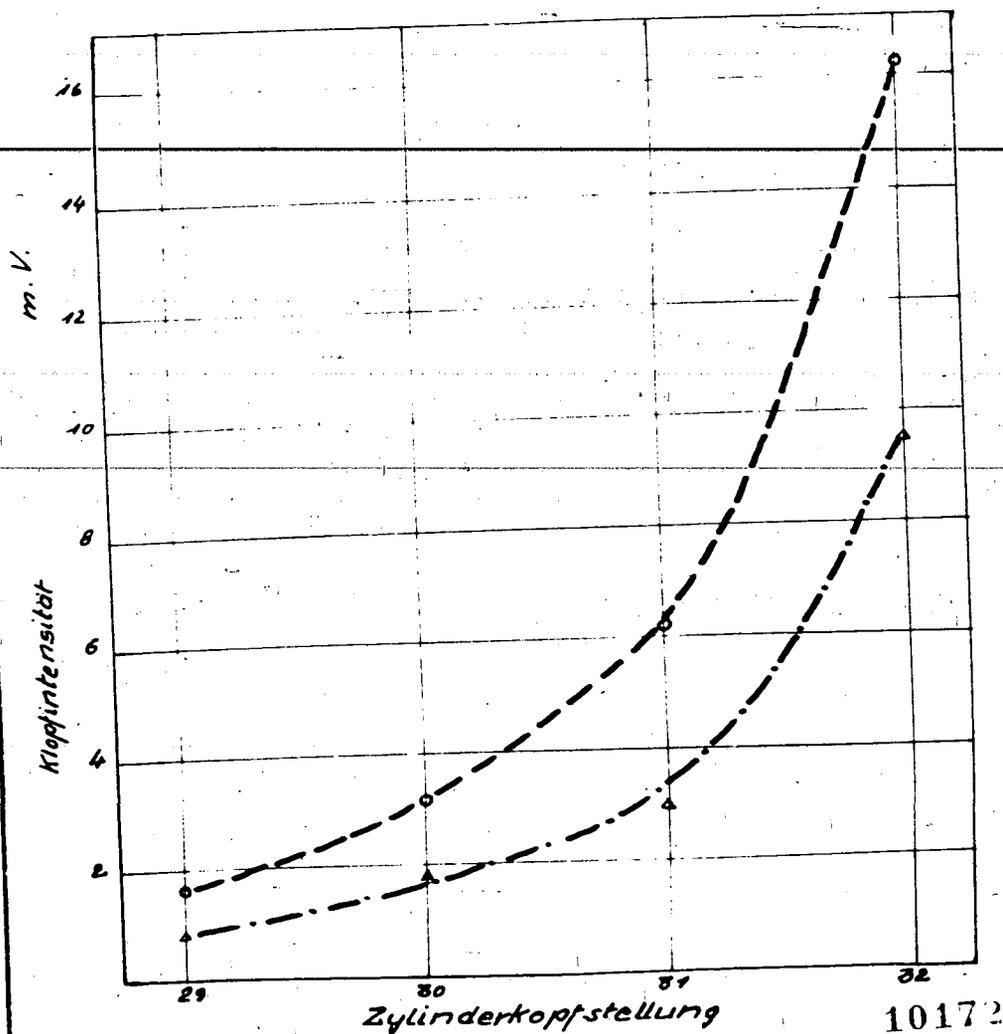
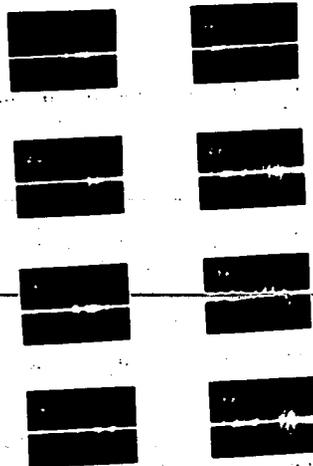


Abb. 6



In Auswertung der gewonnenen Ergebnisse kann man feststellen, dass das Kristallmikrophon etwa durchschnittlich die doppelte Empfindlichkeit des Membranmikrophons aufweist. Bei Betrachtung der aufgenommenen Bilder (Abb.6) zeigt sich, dass beim Kristallmikrophon erstens die Amplituden und zweitens auch die aufgenommenen Frequenzen des Klopf ausschlages höher als beim Membranmikrophon erscheinen. Die beim Membranmikrophon besonders gut sichtbare, nicht proportional mit der Verdichtung und mit dem mittleren Klopfwert wachsende Amplitudenhöhe des Klopf ausschlages, rührt von der bei der gleichen mittleren Klopfstärke sehr stark unterschiedlichen Lautstärke des einzelnen Klopf ausschlages her. Allgemein ist zu sagen, dass sich das Kristallmikrophon

wegen seiner hohen Empfindlichkeit besonders gut für sehr geringes Klopfen, also für das besonders wichtige Gebiet des kaum hörbaren Klopfens, verwendet werden muss.

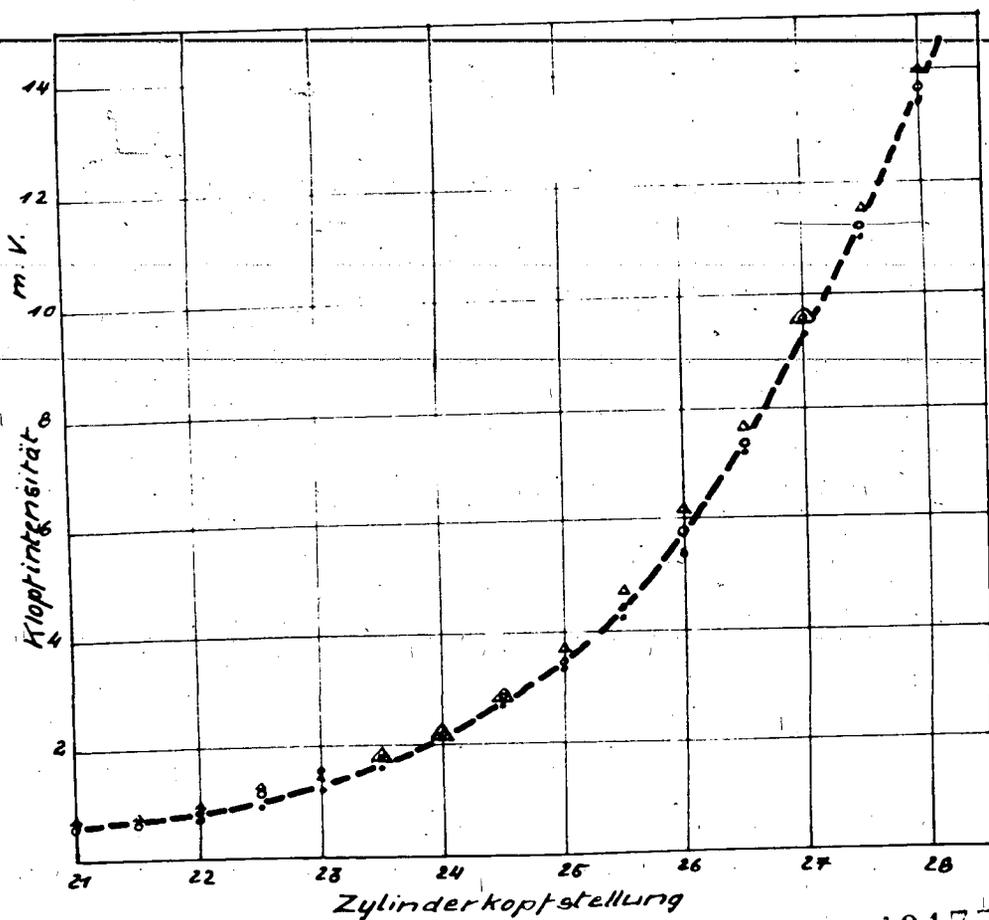
Es wurde gefunden, dass die Lage der Klopfkurven mit verschiedenen Mikrofonen sich entsprechend der Empfindlichkeit des Mikrophones ändert. Es ist nun wichtig zu erfahren, ob die Gestalt der Kurven von der Art des Mikrophones abhängig ist, oder ob sie wie oben erwähnt nur eine Funktion des Klopfverhaltens eines Kraftstoffes ist. Zu diesem Zweck wurde die Empfindlichkeit des Kristallmikrophones durch anderen Einbau der des Membranmikrophones angeglichen, und dann bei gleicher Verstärkereinstellung und bei gleichen Motorbedingungen (siehe oben) die Klopfkurven, die in Abb. 7 aufgetragen sind, in folgender zeitlicher Folge aufgenommen: Kristallmikrofon 1. Messung, Membranmikrofon, Kristallmikrofon 2. Messung. Die eingezeichnete Klopfkurve zeigt eine vollkommen gleichmäßig gekrümmte Gestalt und sieht für alle Messungen gleichmäßig aus. Die einzelnen Messpunkte für die beiden Mikrophone zeigen nur eine geringfügige durchaus zulässige Streuung.

c) Mikrofon an I.C. Prüfmotor. Da sich die elektroakustische Klopfanzeige am Zylinderdemotor nach A.W. Schmidt besonders bewährt hat, wurde versucht auch am I.C.-Kraftstoffprüfmotor ein Mikrofon¹⁾ zum Klopfanzeige anzubringen. Es wurde hierzu das Kristallmikrofon verwendet. Der Schallübertragungsdraht wurde unter einer Zylinderkopfschraube fest eingespannt. Nach Anschluss an Verstärker und Braun'sches Rohr

¹⁾ Siehe hierzu: F. Kneule, Habilitationsschrift T.H. München 1933 und A. Schmid Dissertation T.H. München 1931.

Klopfkurve am Einzylinder

- △ Membran Mikrophon
- Kristall Mikrophon 1. Mes.
- Kristall Mikrophon 2. Mes.



ergaben sich deutlich sichtbare Klopfausschläge.

Weitere eingehende Versuche müssen zeigen, inwieweit die elektroakustische Klopfanzeige mit der an sich sehr empfindlicher und doch die üblichen Klopfanzeige des Springstiftapparates (boundary-pin) der F.O. und G.P.R.-Kraftstoffprüfstände übereinstimmt.

2. Versuche an Mehrzylindermotoren.

a) Am Mercedes-1,7 Ltr. Für die Mehrzylinderversuche wurde aus den am Einzylinder gewonnenen oben erwähnten Erfahrungen des Kristallmikrophon¹⁾ als besonders günstig befunden. Diese Erfahrungen bestätigten sich bei den Versuchen sehr bald. Die besonderen Vorzüge des Mikrophons sind:

Starke Befestigung am Motor selbst, Körperschallübertragung durch Stahlträger, hohe Empfindlichkeit und Nichtaufnahme störender Geräusche von ausserhalb.

Für die Versuche auf dem Prüfstand stand ein Mercedes 4-Zylinder 1,7 Ltr. Motor zur Verfügung. Er wird durch eine elektrische Strombremse abgebremst. Da klopfender Betrieb nicht durch Veränderung des Verdichtungsverhältnisses herbeigeführt werden könnte, musste dieses durch zeitgehende Vorstellung der Zündung erfolgen. Aus diesem Grunde wurde der Verteiler auf Handvorstellung in weiten Grenzen umgebaut. Das Mikrophon wurde am Motor befestigt und die erhaltenen Geräuschströme über einen Siebverstärker dem

1) A.W. Schmidt, Öl und Kohle 1940 S. 350.

Kathodenstrahlószillographen, zugeleitet. Zur Entfernung der störenden Einflüsse der Zündfunken wurden die Zündkerzen abgeschirmt. Zur Kenntlichmachung des Beginns des Arbeitsspiels wurde die erste Zündkerze ohne Abschirmung gelassen. Nach diesen Massnahmen erscheint auf dem Schirm der Braun'schen Röhre nach Abb. 13 bei klopfendem Betrieb ein feiner Ausschlag des Kathodenstrahles herrührend vom Zündfunken der unabgeschirmten ersten Zündkerze und anschliessend die Klopfausschläge der einzelnen Zylinder geordnet nach der Zündfolge des Motors. Auf dem Messinstrument stellt sich dann der Mittelwert der Klopfausschläge aller 4-Zylinder ein.¹⁾ Um den Mittelwert des Klopfausschlages jedes einzelnen Zylinders zu erhalten, werden die verstärkten Klopfströme über einen mit halber Motordrehzahl laufenden drehbaren Unterbrecher geleitet, der den Stromkreis zum Oszillographen und zum Messinstrument nur während der kurzen Zeit des Klopfstosses eines Zylinders schliesst. Durch Drehung des Unterbrechers kann man den Klopfausschlag jedes einzelnen Zylinders getrennt auf dem Schirm der Braun'schen Röhre sichtbar machen und den Mittelwert seiner Klopfstärke am Messinstrument ablesen.²⁾

In einem Versuch, dessen Ergebnis in Abb. 8 aufgetragen ist, wurde die Vorzündung des Motors laufend vergrössert und die mittlere Klopfstärke jedes einzelnen Zylinders abgelesen. Die Motorenbetriebsbedingungen waren folgende:

Kühlwassertemperatur	70°C
Belastung const.	40 Ampere
Drosselklappenstellung const.	1/4 Gas
Drehzahl ungefähr =	1200 U/Min.

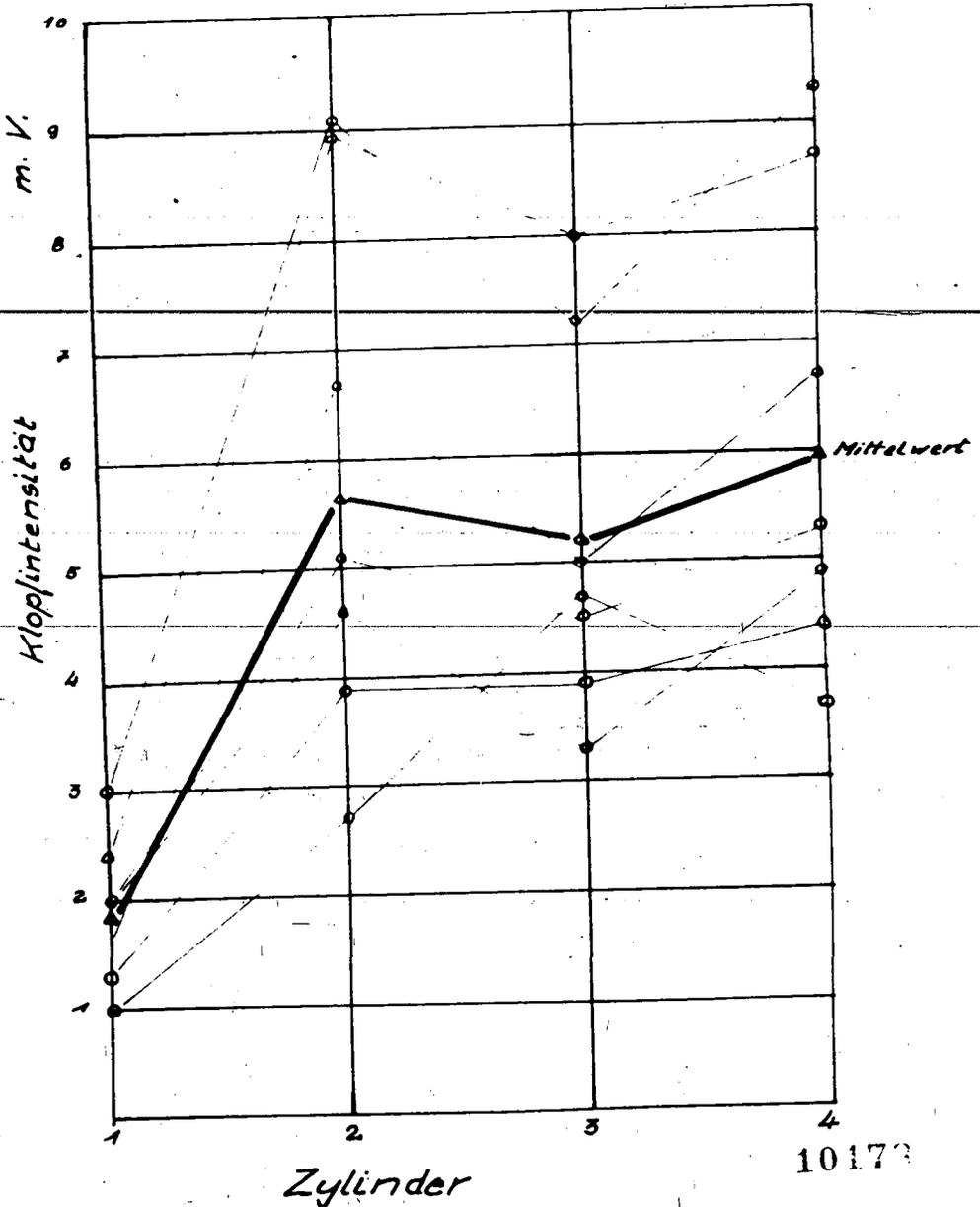
1) Vgl. Forschungsbericht über die "Weiterentwicklung des Klopfmessgerätes", Bearbeiter: Paul Funck.

2) K. Regel, Dissertation T.H. München 1939.

Klopftversuch am Mehrzylinder.

Kraftstoff: O.Z. 66

Vorzündung geändert



Es zeigt sich, dass die einzelnen Zylinder des Motors ganz verschiedene Klopfstärken aufweisen. So zeigt z.B. der Zylinder 4 ein stärkstes zum Klopfen, während Zylinder 1 nur eine schwache Klopfneigung zeigt.

Im ersten Hauptversuch (Abb. 3) wurde dann das Klopfverhalten der einzelnen Zylinder über der Vorzündung aufgenommen. Die Versuchsbedingungen waren wie folgt:

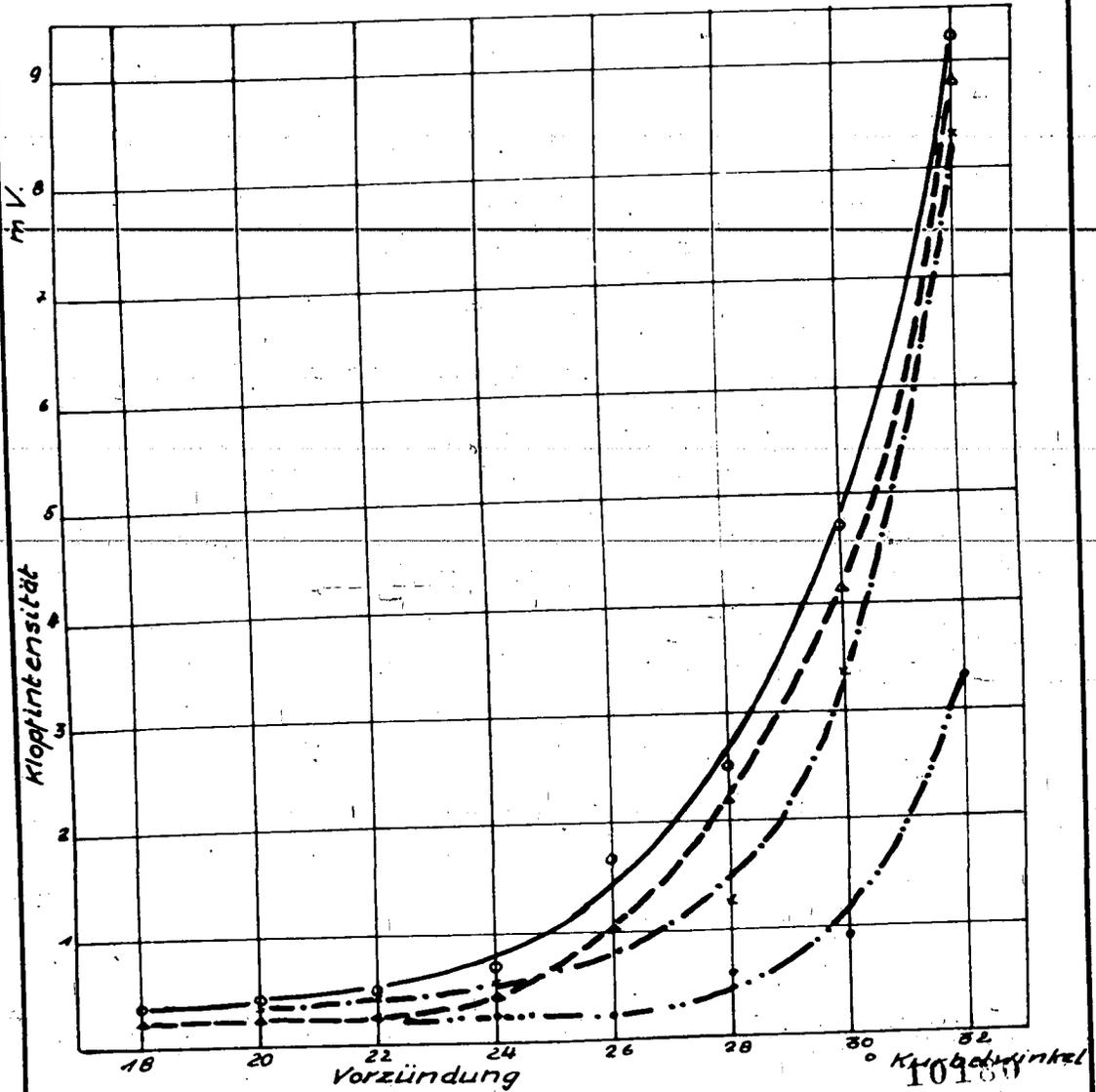
Kühlwassertemperatur	70°C
Belastung const.	40 Ampere
Drehzahl const.	1200 U/Min.
Vorzündung von	2 zu 2°
Kurbelwinkel vor O.T. geändert.	

Die Auswertung des Versuches zeigt nun folgendes:

Das stark unterschiedliche Klopfverhalten der einzelnen Zylinder tritt wie im Vorversuch klar hervor. Wieder zeigen Zylinder 4, 3 und 2 starkes Klopfen, während der Zylinder 1 nur geringe Klopfneigung zeigt. Da nun diese Klopfkurven ähnliche Kurven darstellen wie die am Einzylinder aufgenommenen Klopfkurven, so wird man die am Einzylinder gewonnenen Erkenntnisse in gewissem Sinne auch auf den Mehrzylinder übertragen können. Man wird also die Klopfkurven nach Lage und Gestalt, d.h. nach Klopfstärke und Klopfverhalten des in den Zylindern vorhandenen Kraftstoffes beurteilen können. Die Beurteilung der Kurven nach ihrer Lage ist hinsichtlich der verschiedenen Bewertung der einzelnen Zylinder in Bezug auf Klopfintensität schon erfolgt. Bei Beurteilung der Gestalt der Kurven ist es durchaus augenfällig, dass die Krümmung der Kurven der Zylinder 1 und 2 durchaus ähnlich, aber vollkommen verschieden von der der Zylinder 3 und 4 ist, die unter sich wieder eine sehr ähnliche Krümmung der Klopfkurven

Klopfkurven am Mehrzylindermotor

- Zylinder 1
 - - - Zylinder 2
 - Zylinder 3
 - Zylinder 4
- Kraftstoff :
O.Z. 74



aufweisen. Wenn wir den Schluss von der Gestalt der Kurven auf das Klopfverhalten und somit auf die Zusammensetzung des jeweiligen Kraftstoffes zulassen, so würde das bedeuten, dass die beiden Zylinder 1 und 2 ein ähnlich zusammengesetztes Brennstoffgemisch erhalten, was aber in seiner Zusammensetzung durchaus verschieden ist von dem, welches Zylinder 3 und 4 bekommen, das wieder unter sich sehr ähnlich zu sein scheint. Der Gedankengang scheint sehr gewagt zu sein, er findet aber eine gewisse Bestätigung, wenn man bedenkt, dass der Motor von einem Vergaser, dass aber Zylinder 1 und 2 von einem gemeinsamen und, dass Zylinder 3 und 4 von einem weiteren gemeinsamen Ansaugrohrstrutzen gespeist werden. Jedenfalls müssten weitere eingehende Versuche am Ein- und Mehrzylindermotor diese Theorie bestätigen.

In einem weiteren Versuch wurde die Klopfstärke der einzelnen Zylinder in Abhängigkeit von der Motorbelastung aufgenommen. Die Versuchsbedingungen waren wie folgt:

Kühlwassertemperatur	70°C
Vorzündung const.	30°K.W.v.O.T.
Drehzahl const.	1200 U/Min.

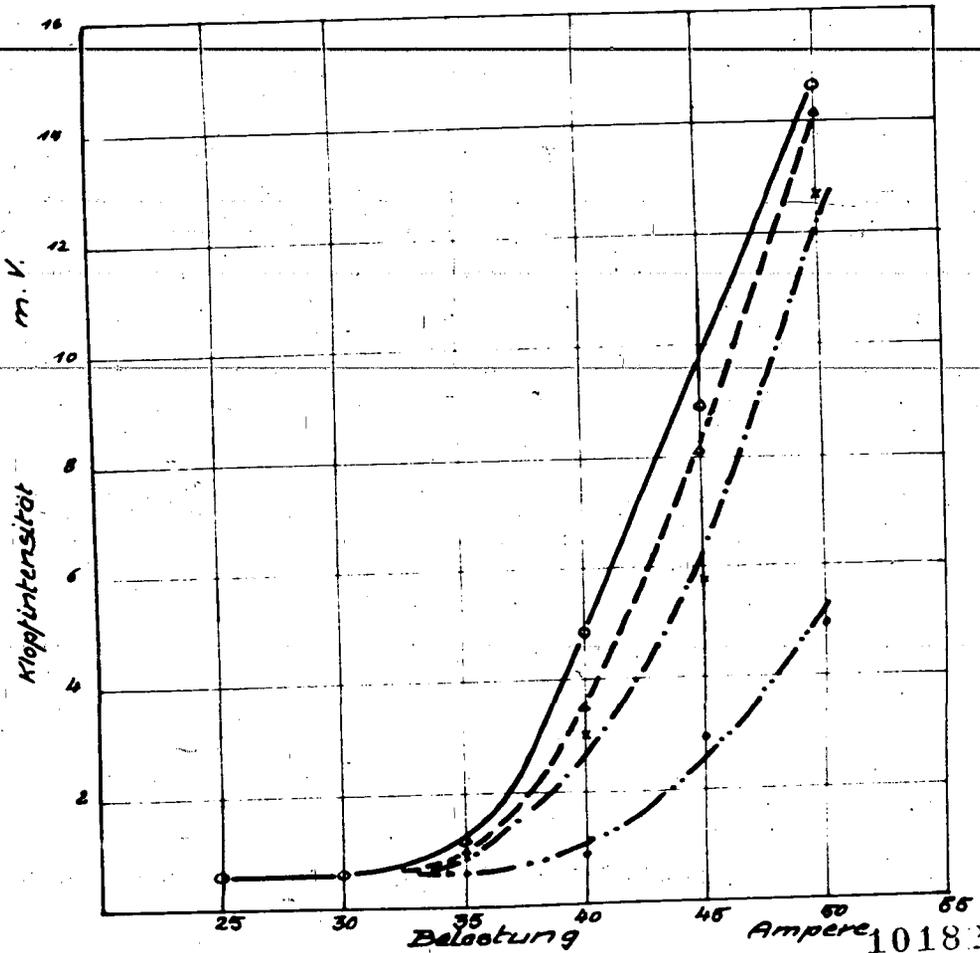
Die Belastung wurde von 5m5 Ampère geändert und die Drosselklappenstellung so nachreguliert, dass die Drehzahl konstant blieb. Somit wuchs die Motorleistung direkt proportional mit der Belastung. Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abb. 10 aufgetragen. Das Bild zeigt wieder das übliche Verhalten der Klopfstärken der einzelnen Zylinder. Weiterhin kann man erschen, dass bei einer angenommenen gleichmäßigen Klopfstärke aller Zylinder von etwa 5 m.V. der Zylinder 4 um ein beträchtliches Mass weniger belastet werden würde als Zylinder 1, also auch entsprechend weniger leisten würde. Oder anders ausgedrückt, falls die Leistungsfähigkeit des Motors begrenzt wäre durch den am

Klopfen am Mehrzylindermotor

- Zylinder 1
- .-.- Zylinder 2
- Zylinder 3
- Zylinder 4

$n = \text{const.} = 1200 \frac{\text{U}}{\text{min}}$

Kraftstoff : O.Z. 74



stärksten klopfenden Zylinder 4 bei einer Belastung von etwa 45 Ampère, so würde der Zylinder 1 sczudagen überhaupt kein Klopfen aufweisen und so wäre die Leistungsausbeute des Kraftstoffes in diesem Zylinder nur sehr gering.

In Abb. 11 ist die Belastung des Motors über der Verzündung aufgetragen. Die Versuchsbedingungen waren folgende:

Kühlwassertemperatur.	70°C
Drehzahl const.	1200 U/Min.
Klopfstärke const.	1,2 n.V.

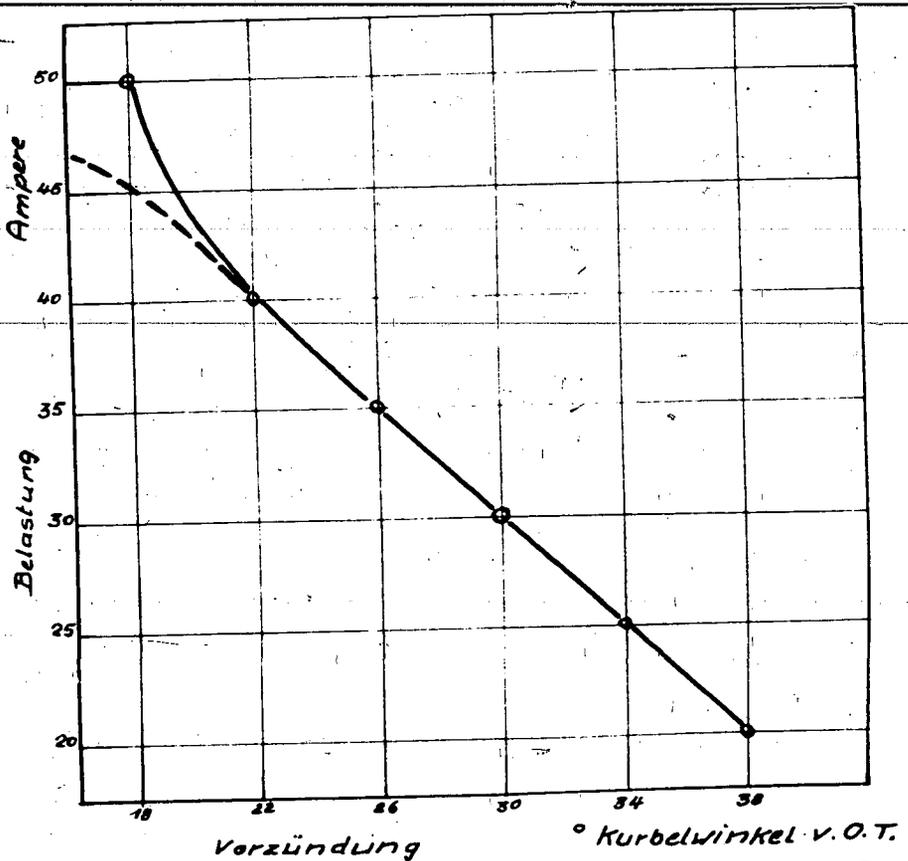
Es soll gezeigt werden, dass die Belastungsfähigkeit, und da die Motordrehzahl konstant gehalten wurde, auch die Leistungsfähigkeit des Motors durch Auftreten des nicht sehr grossen Klopfens, mit zunehmender Verzündung sehr stark absinkt. Die Verzündungsänderung wurde bei diesem Versuch in den normalen Grenzen des im Fahrbetrieb üblicher Verzündungen geändert.

- b) Am Peugeot 2,1 ltr. Der zweite zur Verfügung stehende Prüfstandmotor war ein französischer 4-Zylinder Peugeot-Motor. An ihm sollten ähnliche Versuche wie am Mercedes Motor zu Vergleichszwecken vorgenommen werden. Zunächst wurde der Zylinderkopf des Motors abgenommen, um die angegebenen Daten zu prüfen. Weiterhin wurden die Verbrennungsräume ausgelitert, um etwaige Unterschiede im Verdichtungsverhältnis der einzelnen Zylinder, welches unterschiedliches Klopfen hervorrufen könnte, festzustellen. Bei diesen Messungen ergaben sich folgende Werte:

Klopfen am Mehrzylindermotor

Klopfintensität = const. = 1,2 m.V

$n = \text{const.} = 1200 \frac{U}{\text{min}}$



	Angabe des Werkes	Tatsächliche Daten
Zylinderzahl	4	
Bohrung	mm 83	83,5
Hub	mm 99	99
Kolbenfläche	cm ² 54	54,8
Hubraum/Zylinder	cm ³ 534	542,5
Gesamthubraum	cm ³ 2140	2145

Kompressionsraum	I	cm ³	95,7
"	II	cm ³	94,3
"	III	cm ³	94,3
"	IV	cm ³	95,4

Verdichtung	I		6,67
"	II		6,78
"	III		6,78
"	IV		6,7

Gesamtverdichtung		6,7	6,74
-------------------	--	-----	------

Leistung PS 62

Nach betriebsfertiger Aufstellung des Motors musste der Mikrophanbau vorgenommen werden, der sich insofern als schwierig erwies, als der Motor ein kopfgesteuertes Modell mit hängenden Ventilen war und einen sehr harten Gang auf-

wies. Hierdurch gelangten viele störende Nebengeräusche auf den Schirm der Braun'schen Röhre. Durch Abtasten mit uneingespanntem Mikrophon musste die Stelle der günstigsten Klopfgeräuschaufnahme ermittelt werden, an der dann das Mikrophon fest angebracht werden konnte. Nach Anschaltung an den Verstärker und nach einer entsprechenden Siebung, die wesentlich anders als beim Mercedesmotor war, konnten die Klopfausschläge auf dem Schirm des Braun'schen Rohres gut sichtbar gemacht werden. Auch hier zeigte sich wieder eine sehr starke Verschiedenheit der Klopfstärke der einzelnen Zylinder. Die sehr geringen Unterschiede im Verdichtungsverhältnis können hierfür nicht verantwortlich gemacht werden. Die Ermittlung der Gründe des unterschiedlichen Klopfverhaltens der Zylinder wird der Zweck einer längeren eingehenden Versuchsreihe sein.

Die aufgenommenen Oszillogramme der Klopfbilder von Mercedes und Peugeot sind in Bild 12 und 13 zusammengestellt.

Abb. 12

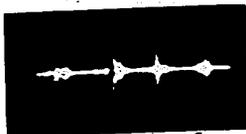
Abb. 13



ruhiger Lauf



mittleres Klopfen



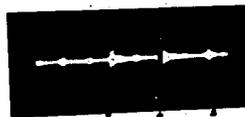
starkes Klopfen



ruhiger Lauf



mittleres Klopfen



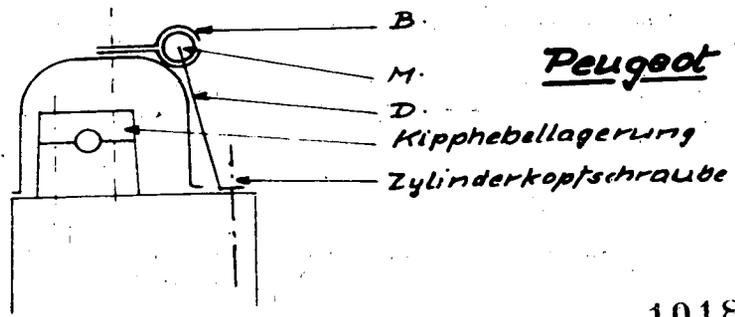
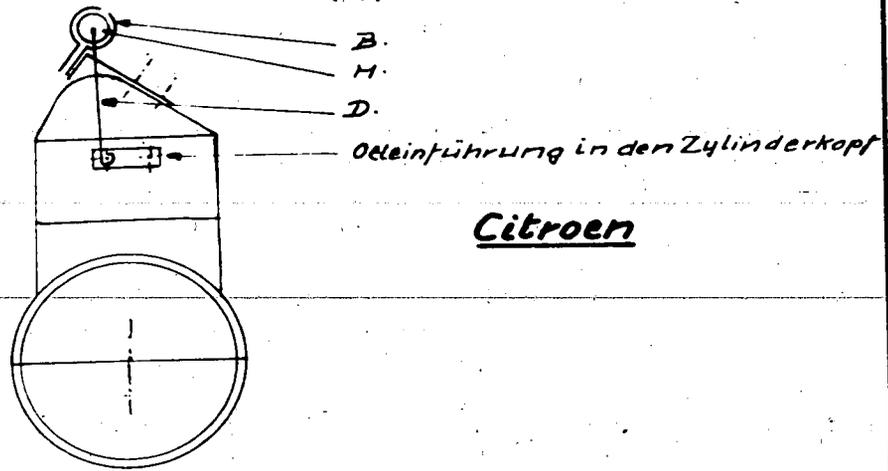
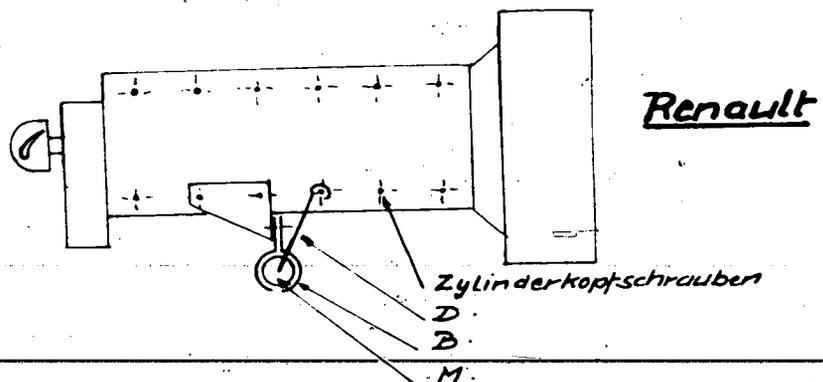
starkes Klopfen

c) Versuche im fahrenden Wagen. Für die Fahrversuche standen folgende Fahrzeuge zur Verfügung: 3 französische Beute-Personenkraftwagen, ein Peugeot 2,1 Ltr., ein Renault 2,4 Ltr., ein Citroen 2,9 Ltr. und ein deutscher Adler 2,5 Ltr.

Durch die schon erwähnten Eigenschaften der Mikrophone zeigte sich wieder das Kristallmikrophon als für die Wagenversuche am besten geeignet. Beim Einbau des Mikrophons machten sich folgende Schwierigkeiten besonders bemerkbar. Erstens der notwendige überaus starre Einbau des Mikrophonbefestigungsbügels, zweitens der kleine vorhandene Einbauraum unter der Motorhaube und drittens die grosse Verschiedenartigkeit der Motorentypen. Die Einbauarten an den 3 französischen Beutemotoren sind in Abb. 14 aufgezeichnet. Hierbei wurden folgende Erfahrungen, die auch schon die Prüfstandversuche gelehrt hatten, bestätigt. Bei den ruhig laufenden seitengesteuerten Maschinen, Adler 2,5 Ltr., Renault 2,4 Ltr., war der Einbau des Mikrophons sehr einfach, weil die Zylinderkopfschrauben sämtlich oben aus dem Zylinderkopfdeckel herausragen. Die Arbeitsweise des Mikrophons war deshalb besonders zufriedenstellend, weil die störende Ventil- und Motorge-räusche durch die Zylinderkopfdichtung nur stark gedämpft auf den Zylinderkopfdeckel selber, an dem der Klopfeschall abgenommen wird, übertragen werden. Bei den oben gesteuerten Motoren hingegen, wo die Zylinderkopfschrauben ganz oder zum Teil vom Zylinderkopfdeckel verdeckt sind, ist erstens der Anbau des Mikrophons sehr schwierig und zweitens die Arbeitsbedingung des Mikrophons sehr un-

Mikrofonbefestigungen an Motoren

M = Mikrophon
 D = Schallübertragungsdraht
 B = Befestigungsbügel



günstig, da die starke Geräuschstörungen hervorgerufenen Ventile im Zylinderkopf selbst angeordnet sind. Um klopfenden Betrieb leicht hervorrufen zu können, wurde in jedem Wagen der Zündverteiler auf in weiten Grenzen regelbare Handzündverstellung umgebaut. Nach Einbau der Klopfmessapparatur mit Siebverstärker und Oszillograph mit Photoaufsatz und nach einigen Vorversuchen wurde mit dem Renault 2,4 Ltr. und dem Adler 2,5 Ltr. auf der Autobahn München-Augsburg auf einem geraden ebenen Stück von 10 km Länge auf Hin- und Herweg ein Fahrversuch gemacht. Es handelte sich darum, die Klopfneigung der einzelnen Motore festzustellen. Es wurden bei zwei Vorzündungseinstellungen I und II jeweils bei zwei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten 80 und 100 km/h, also auch bei zwei verschiedenen Motorbelastungen, Aufnahmen der Geräuschbilder gemacht. Die Zündeneinstellung I entspricht der des normalen Fahrbetriebes. Die Zündeneinstellung II liegt um 10° KW früher. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abb. 15, 16 und 17 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass der französische Renault bei einem Benzin von der OZ 60, bei sämtlichen Motorzuständen ruhigen Lauf aufweist (Abb. 15). Bei demselben Kraftstoff hingegen und denselben Motorzuständen zeigt der untersuchte Adlerwagen bei Zündeneinstellung I und 100 km Geschwindigkeit schon leichtes Klopfen. Bei Zündeneinstellung II wird dieses Klopfen sehr stark und für den Motor unzutraglich. (Abb. 16) In Abb. 16 zeigt sich dieses Klopfen als kräftige Ausschläge zwischen den schmalen Ausschlägen der Zündpunkte. Zum Vergleich wurde noch eine Versuchsreihe im Adler 2,5 Ltr. mit einem deutschen handelsüblichen Benzin von der OZ 74 gefahren. (Abb. 17) Hierbei zeigt es sich, dass bei diesem besseren Benzin erst bei Zündeneinstellung II und höchster Geschwindigkeit mittleres Klopfen auftritt.

Aufnahmen der Strassenversuche.

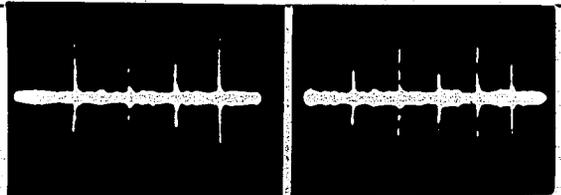
Renault 2,4 Ltr.

Zündeneinstellung I = normaler Fahrbetrieb
Zündeneinstellung II = 10° K \bar{v} früher

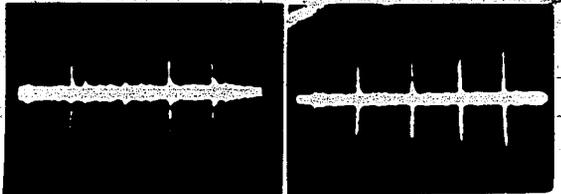
Abb. 15

Kraftstoff OZ 65

80 $\frac{km}{h}$



100 $\frac{km}{h}$



Aufnahmen der Strassenversuche.

Adler 2,5 Ltr.

Abb. 16

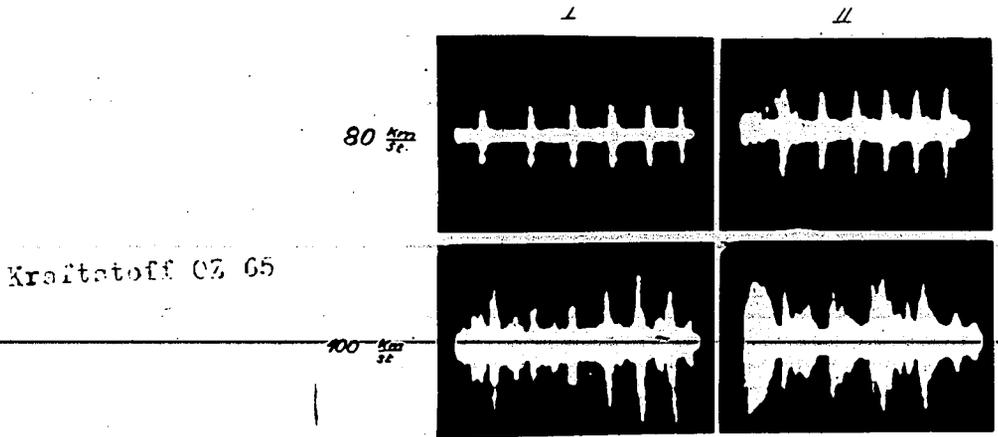
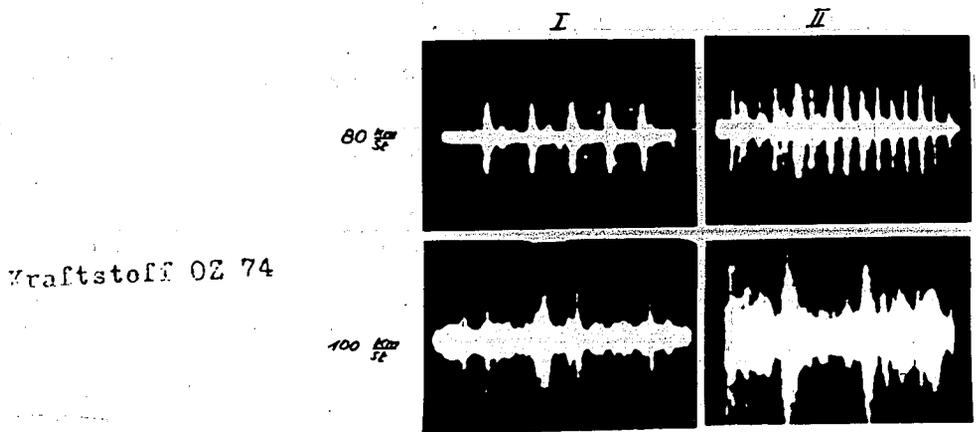


Abb. 17

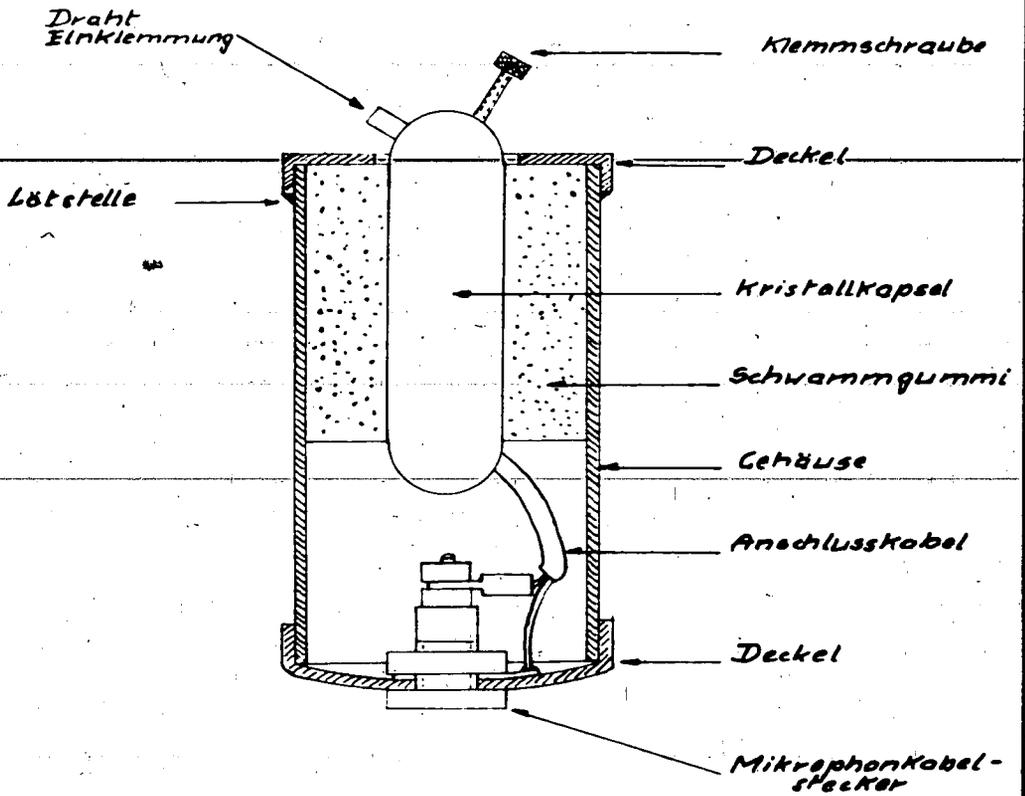


Es ist also einstweilen zusammenfassend zu sagen, dass der französische Renault 2,4 Ltr. eine robustere, auch einem schlechteren Benzin gewachsene. . Konstruktion darstellt als der Adler 2,5 Ltr. Motor, der für das in Deutschland übliche gute Benzin mit einer OZ 74 gebaut ist. Weitere Versuche an anderen französischen Wagen werden einen weitgehenden Einblick in dieses Problem zulassen.

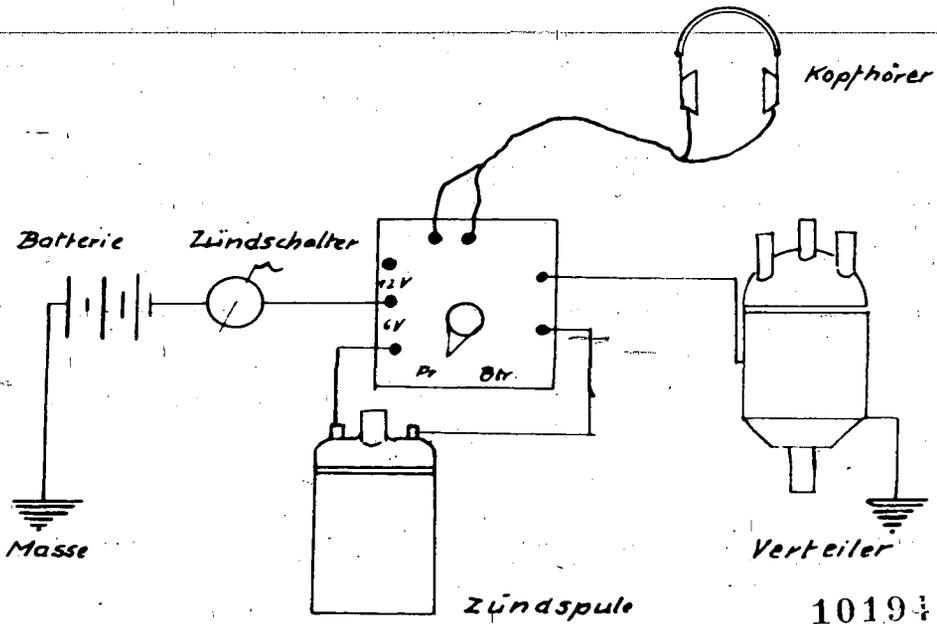
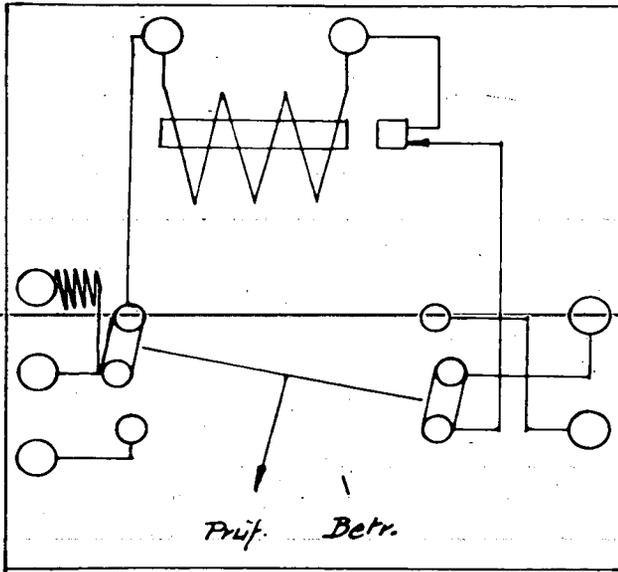
Es sei noch erwähnt, dass auch an diesen Bildern die verschiedene Klopffstärke der einzelnen Zylinder eines Motors deutlich zu erkennen ist.

- d) Bau eines Kristallmikrophons. Angeregt von den Fahrversuchen wurde die dort gemachten Erfahrungen berücksichtigend, ein Kristallmikrophon gebaut, das gegenüber der bisherigen Ausführungsform abgeändert und folgenden Anforderungen genügen sollte: Kleinere Abmessungen, geringeres Gewicht, weiche Aufhängung des Kristallkörpers und leichtere Einführungsmöglichkeit des Schallübertragungsdrahtes in die Klemmschraube des Mikrophons. Die Ausführung des Mikrophons ist in Abb. 20 wiedergegeben.
- e) Bau eines Zündzeitpunktmessgerätes. Zur genauen Ermittlung des Zündzeitpunktes von Motoren auf dem Prüfstand und im Fahrzeug wurde ein Zündzeitpunktmessgerät nach Angaben der A.T.Z. (Jahrgang 44, Heft 3 Seite 65) gebaut. Das Gerät beruht auf der

Kristallmikrophon.



Zündzeitpunktmessgerät



Feststellung, dass im menschlichen Ohr im Gegensatz zum Auge in der Lage ist kleinste Zeitunterschiede in der Gröszenordnung von $1/500000$ Sec festzustellen. Aus diesem Grunde wird ein elektrischer Summen unter gleichzeitiger Ausschaltung der Zündspulienwicklung in den Batteriekreis eingeschaltet, dessen Summen mit einem Kopfhörer abgehört werden kann, und der im Augenblick des Zündzeitpunktes, also der Unterbrecheröffnung abreißt. Der Augenblick des Abreissens des Summens kann durch Hin- und Herdrehen des Schwungrades genau ermittelt werden. Das Schaltschema der Anlage ist in Abb. 2 wiedergegeben.

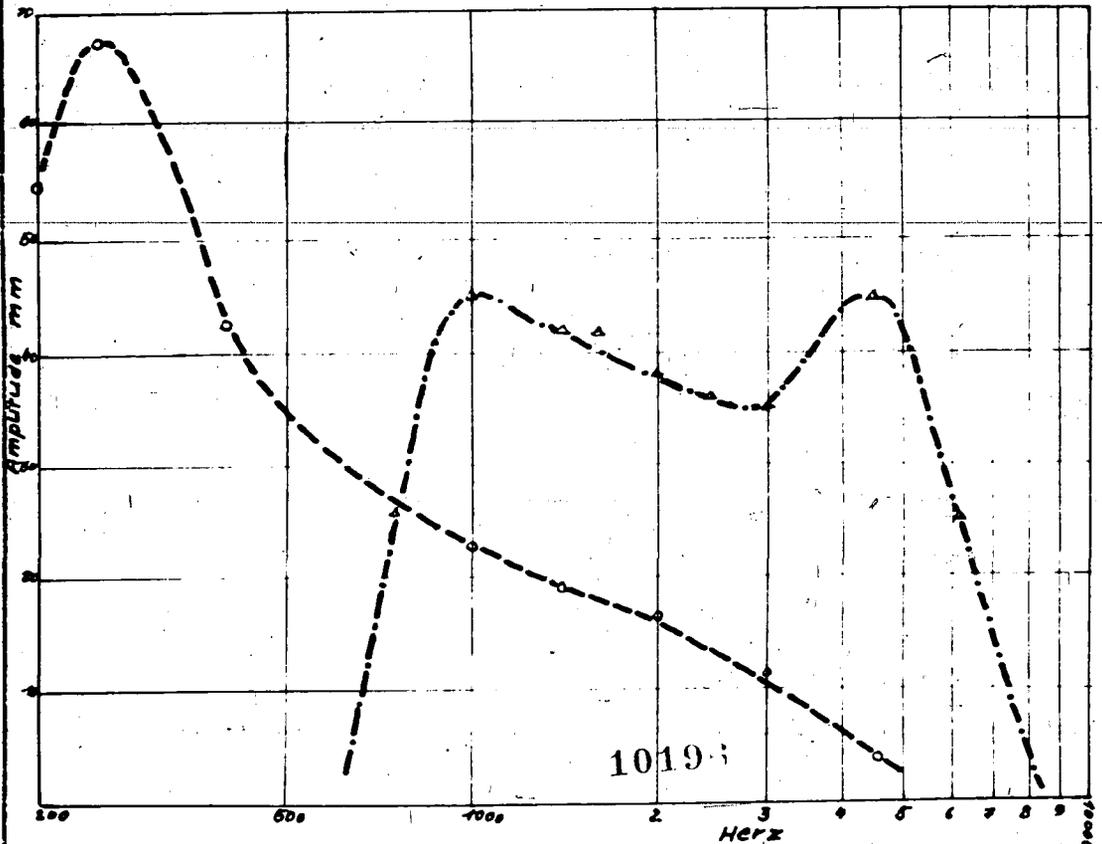
1) Klopfgeräuschfrequenzen an verschiedenen Motoren.

Bei den Versuchen auf dem Prüfstand an den 2 verschiedenen 4-Zylindermotoren Mercedes 1,7 Ltr. und Peugeot 2,1 Ltr. wurde festgestellt, dass an beiden Motoren mit verschiedenen Oszillographen verschiedene Klopferschläge erhalten wurden. Z.B. brachten die beiden Oszillographen Bauart Martin Nier und Bauart Leybold an Mercedes 1,7 Ltr. die Klopfgeräusche gleichmässig gut, während an Peugeot 2,1 Ltr. nur mit dem Oszillographen Bauart Leybold gute Ergebnisse erhalten werden konnten. Da nun bei Aufnahme der Klopfgeräusche durch günstige Siebung nur die Frequenzen des Klopfens, die sich am meisten in ihrer Amplitude von denen der normalen Motorgeräusche abheben, dem Oszillographen zugeführt werden, so lässt die oben gefundene Tatsache folgende Schlüsse zu:

1. Die eingebauten Verstärker der Oszillographen haben eine verschiedene, teilweise nicht erwünschte Siebwirkung.
2. Die Frequenzen der Klopfgeräusche der beiden Motoren sind verschieden.

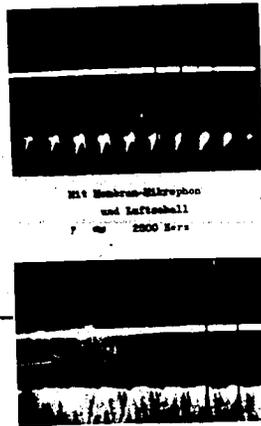
Siebkurven :

- Verstärker des Nier-Oszillogr.
 -.-.- Verstärker des alten-Oszillogr.



Zur Aufklärung der Verhältnisse wurden die Siebkurven der beiden Oszillogrammen aufgenommen, die sich tatsächlich als sehr verschieden erweisen und in Abb. 22 wiedergegeben sind. Die an den beiden Motoren auftretende Erscheinung liesse sich aus Abb. 22 erklären, wenn die Klopfrequenzen des Mercedesmotors zwischen 200 und 6000 Hz., und die des Peugeotmotors zwischen 6000 und 9000 Hz. lägen. Angeregt aus diesen Betrachtungen wurden ausgedehnte Klopfgeräuschfrequenz-Messungen an verschiedenen Motoren und auf verschiedene Schallübertragungsarten vorgenommen. Zur Bestimmung der Frequenzen wurde folgender Versuchsaufbau benutzt. Auf dem unteren Strahl eines Kathodendoppelstrahlenszillographen wurde mit Hilfe eines gleichmässig mit 78 U/Min. laufenden Sprengapparates und mit Hilfe von im Handel erhältlichen Frequenzplatten eine konstante Frequenz von 1000 Hz. aufgebracht. Auf den oberen Strahl wurde wie üblich der Klopfgeräuschstrom aufgebracht. Dann wurde durch Vergrößerung der gleichmässigen Kippgeschwindigkeit der beiden Kathodenstrahlen, der Klopfgeräuschschlag so weit auseinander gezogen, dass seine Perioden abzählbar waren. Die Aufnahmen dieses Bildes liessen sich dann leicht durch Abzählung der zwischen einer Ganzschwingung der 1000 Herz-Frequenz liegenden Schwingungen des Klopferschlages auswerten. Klopfgeräuschfrequenzen wurden gemessen am 2-Zylinder Prüfmotor mit Luft- und Körperschallübertragung und an den Mercedes 2,7 Ltr. und Peugeot 2,1 Ltr. 4-Zylindermotoren. Die Ergebnisse sind in Abb. 23 - 25 aufgezeigt.

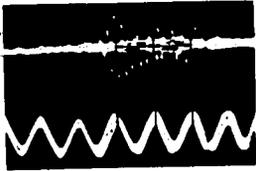
Abb. 23



Es fand sich, dass die am Einzylinder mit Luftschall aufgenommenen Frequenzen, wie schon frühere Untersuchungen gezeigt hatten, zwischen 2000 und 3000 Hz. liegen. Die mit Körperschall aufgenommenen Frequenzen liegen wesentlich höher bei etwa 6 - 7000 Hz. Dieses lässt sich dadurch erklären, dass beim Durchtritt der Geräusche durch Luft die hohen Frequenzen sehr rasch absorbiert werden und dass der Schalldruck, der zur Anregung der Schwingungen einer Membran in Luft notwendig ist, bei hohen Frequenzen wesentlich geringer ist als bei tiefen.

Abb. 24

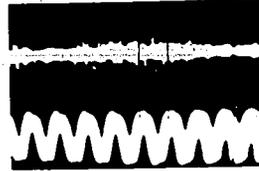
Klopffrequenz
an 4-Zylinder
Mercedes 1,7 Liter



Klopffrequenz
an 4-Zylinder
Peugeot 2,1 Liter

Klopffrequenz Frequenz
an 4-Zylinder
Peugeot 2,1 Liter

Abb. 25



Klopffrequenz Frequenz
an 4-Zylinder
Mercedes 1,7 Liter



Klopffrequenz Frequenz
an 4-Zylinder
Peugeot 2,1 Liter

An den beiden 4-Zylinder Motoren zeigten die Klopffrequenzen wie erwartet war, einen sehr grossen Unterschied und zwar liegen die Frequenzen des Mercedes 1,7 Ltr. Motors bei 5500 Hz., während die des Peugeot 2,1 Ltr. Motors die Grössenordnung von 9500 Hz. erreichen. Die Erklärung dieses Unterschiedes ist vielleicht darin zu finden, dass der Mercedes-Motor aus einem Graugussblock besteht, der eine wesentlich grössere Masse darstellt als der sehr leichte Leichtmetallzylinderkopf des Peugeotmotors. Man kann sich also vorstellen, dass der Zylinderkopf des Peugeotmotors leichter zu hohen Schwingungen angeregt werden kann als der Zylinderblock des Mercedesmotors.

Diese Erkenntnisse über die Frequenzen der Klopfgeräusche waren insofern sehr aufschlussreich als sie grundlegende Erfahrungen zum Neubau einiger Klopfmessgeräte gewinnen liessen. 1)

Auch auf diesem Gebiete sollen noch vielseitige Versuche über das Klopfgeräusch selbst als Anreger der Klopf Frequenzen Aufklärung bringen.

1) Vergl. Forschungsbericht "Weiterentwicklung des Klopfmessgerätes"; Bearbeiter: P. Funck.