

Nur für den Dienstgebrauch

G 11 3

Deutsche Luftfahrtforschung

Forschungsbericht Nr. 1150

*Klopfmessung mit dem DVL-Verfahren
der Druckbeschleunigung*

F. Seeber / F. Lichtenberger

Verfaßt bei

Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, E. V.

Institut für Betriebstofforschung

Berlin-Adlershof

6237

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb dieses Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen.

Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen.

Der Bericht ist unter Stahlblechverschluß

mit Patentschloß zu halten.

Klopfmessung mit dem DVL-Verfahren

der Druckbeschleunigung.

Übersicht: Das DVL-Druckbeschleunigungs-Verfahren wird in seiner Anwendung eingehend beschrieben; bei der Behandlung der theoretischen Grundlagen wird der Stand der wichtigsten Klopfmeßverfahren beleuchtet.

Mit Versuchsreihen am CFR- und BMW 132-Einzylin-der-Motor, bei denen der Einfluß zahlreicher Betriebsbedin-gungen auf das Klopfverhalten untersucht wurde, konnte mit der d^2p/dt^2 -Messung bei gleichem Kraftstoff ein sinngemäßes Verhalten nachgewiesen werden.

Die Klopfgrenzkurven von vier in ihrer chemischen Zusammensetzung verschiedenen Kraftstoffen, die nach dem DVL-Überladeprüfverfahren durch Abhören gefunden waren, konnten mit noch größerer Sicherheit durch die d^2p/dt^2 -Messung bestätigt werden. Das DVL-Druckbeschleunigungs-Verfahren bringt damit die Erfüllung des lang gehegten Wun-sches, den Klopfbeginn objektiv zu messen, d.h. unabhängig von der Unsicherheit des Gehörs.

Der Bericht umfaßt:

33 Seiten mit
10 Abbildungen

Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, E.V.

Institut für
Betriebsstoffforschung

J. Seeber

Seeber

Institut für
Triebwerksgestaltung

Die Bearbeiter:

J. Lichtenberger

Lichtenberger

Berlin-Adlershof, den 18.12.39

BSf 500/53 und

BSf 500/62

- Gliederung:
- I. Einleitung
 - II. Beschreibung des DVL-Verfahrens der Druckbeschleunigung
 - III. Physikalische Zusammenhänge.
 1. Amplituden der Druckfunktionen
 2. Theoretische Begründung des den Klopfbeginn kennzeichnenden Knickes
 - IV. Motorische Versuche
 1. Physikalisch-chemische Eigenschaften der untersuchten Kraftstoffe und ihre Octanzahlen
 2. Prüfmotoren und Versuchsbedingungen
 3. Versuchsergebnisse
 - a) Einfluß verschiedener Versuchsbedingungen auf den Klopfbeginn eines Kraftstoffes
 - b) Klopfgrenzkurven verschiedener Kraftstoffe nach der Druckbeschleunigungs- und nach dem Abhörverfahren
 - V. Kritik und Folgerungen
 - VI. Schrifttum

I. Einleitung.

=====

Trotz jahrzehntelanger Motorenforschung, scheint es erst in der letzten Zeit gelungen zu sein, das Wesen des Klopfens in Otto-Motoren, wenigstens physikalisch zu enträtseln, und hauptsächlich die heißumstrittene Frage zu klären, ob beim Klopfen eine richtige Detonation mit Überschallgeschwindigkeit und entsprechenden Überdrücken auftritt. ¹⁾ Obgleich, besonders im Auslande, das Klopfen kurz mit Detonation bezeichnet wird, ist nun durch neuere Arbeiten, hauptsächlich Weinhart ²⁾ gezeigt worden, daß das Klopfen nichts mit einer Detonation zu tun hat, sondern durch Selbstzündung zu erklären ist. Demnach hat man sich den Klopfvorgang so vorzustellen, daß beim Vorwärtslaufen der Flammenfront im Verbrennungsraum das restliche Gas-

misch immer mehr komprimiert und erhitzt wird, bis schließlich die zur Selbstzündung notwendigen Drücke und Temperaturen erreicht sind. In diesem Augenblick verbrennt der Gemischrest einigermaßen gleichzeitig, wodurch eine (im allgemeinen kleine) plötzliche Druckerhöhung entsteht, welche den ganzen Gaskörper in seiner Eigenschwingung anregt. Da die Schallgeschwindigkeit bei den Verbrennungstemperaturen in der Gegend um 1000 m/s liegt, und die Verbrennungsräume im allgemeinen Durchmesser von rd. 10 cm besitzen, beträgt die Eigenschwingung einige tausend Hertz und macht sich nach außen als harter Schlag bemerkbar.

Während sich für die Klopftheorie im einzelnen mehr die Wissenschaftler interessieren, ist es der Praxis um die Schaffung eines einwandfreien und genügend genauen Klopfmeßgerätes zu tun, das das noch weit verbreitete "Abhören" durch einen objektiven Instrumentenausschlag ersetzt. Vor allem interessiert die Grenze des Klopfbeginns, d.h. der Überladung, Verdichtung usw., bis zu der man den Motor noch ohne Gefahr beanspruchen darf. Die klassische Methode der Klopfmessung ist die der Octanzahlbestimmung mit Hilfe eines Klopfstabes, die jedoch der berechtigten allgemeinen Kritik (s. A. v. Philippovich³⁾, sowie G. Schütz⁴⁾) nicht mehr lange standhalten dürfte. Eingehende Versuche, die oben erwähnten Gasschwingungen zur Klopfmessung heranzuziehen, sind an vielen Stellen und mit großer Ausdauer gemacht worden. Grundsätzlich ist dazu zu sagen, daß die Schwingungen zwar im allgemeinen die Folge des Klopfens sind, daß sie aber nicht zur Definition der Selbstzündung, d.h. des Klopfens, herangezogen werden können. Es wäre ohne weiteres denkbar, daß Klopfen auch ohne Schwingungen auftreten kann, und es ist auch schon nachgewiesen worden (Boerlage, Broeze, van Driel, Peletier⁵⁾), daß selbst bei sehr starken Klopf-schwingungen gewisse Stellen des Verbrennungsraumes Knotenpunkte darstellen und die Schwingungsamplitude Null aufweisen. Aber auch abgesehen davon, ist die Schwingungsmessung infolge der notwendigen Aussiebung bestimmter Frequenzen sehr kompliziert: Wie Stanton und Mac Coull⁶⁾ fest-

gestellt haben, ändert sich die mit Mikrophon oder dergl. gemessene" Klopfstärke sehr mit dem gewählten Frequenzbereich. Ebenso kann man den Klopfbeginn, je nachdem ein mehr oder weniger empfindlicher Verstärker benutzt wird, bei sehr verschiedenen Verdichtungen oder Überladungen feststellen, d.h. also bei keinem einwandfrei festliegenden Punkte. Auch Schütz⁴⁾ kommt zu ähnlichen Folgerungen und weist besonders noch auf die Möglichkeit von Störungen durch Maschinenerschütterungen hin. Immerhin bietet dieses Verfahren bei Fehlen einer zusätzlichen Indikatorbohrung die einzige Möglichkeit, die Klopfstärke wenigstens ungefähr zu bestimmen (s.A.W.Schmidt⁷⁾). Einen ganz anderen Weg verfolgen die verschiedenen Versuche, das Klopfen aus Veränderungen im Druckdiagramm festzustellen. Daß durch nicht zu starkes Klopfen hervorgerufene Änderungen im Druck-Zeit-Diagramm sehr klein und nur für ein geübtes Auge zu erkennen sind, war schon lange bekannt. Deshalb wurde von Dodds⁸⁾ und Illgen u. Hintze⁹⁾ die elektrische Differentiation des Druckdiagrammes durchgeführt, und dadurch schon ein gewisser Amplitudenunterschied zwischen Klopfen und Nichtklopfen erreicht. Nach eigenen Versuchen der Verfasser, wie auch von Schütz⁴⁾, sind diese Unterschiede jedoch nicht groß genug, um die Abhörmethode ersetzen zu können. Die Verfasser¹⁰⁾ haben daher in einer früheren Arbeit vorgeschlagen, d^2p/dt^2 zu bilden, also eine zweite elektrische Differentiation vorzunehmen, welche die Unterschiede zwischen Klopfen und Nichtklopfen um eine Größenordnung wachsen läßt, und welche außerdem eine objektive Feststellung des Klopfbeginns ermöglicht; trägt man nämlich die d^2p/dt^2 -Amplituden über dem Ladedruck auf, so erhält man eine Kurve, welche beim Klopfbeginn einen einwandfreien Knick zeigt. Die bisher erwähnten Verfahren ergaben alle nur einen Amplitudenanstieg der Klopfstärke, deren (dem Klopfbeginn entsprechender) Schwellwert jedes Mal noch extra willkürlich festgesetzt werden mußte. Im Gegensatz hierzu liefert der Knick in der d^2p/dt^2 -Kurve eine einwandfreie Druckgrenze; sobald der Ladedruck diese Grenzlinie über-

schreitet, klopft der Motor, bei niedrigeren Drücken findet klopfreie Verbrennung statt.

Bevor zum Hauptteil dieser Arbeit, nämlich der Beschreibung u. Anwendung dieses Verfahrens übergegangen wird, soll noch ein sehr interessanter Vorschlag von Schütz⁴⁾ erwähnt werden, welcher die Brenngeschwindigkeitsmessung nach Schnauffer¹¹⁾ durch eine praktische Schaltung so vereinfacht hat, daß sie unmittelbar zur Klopfmessung benutzt werden kann. Auch Schütz⁴⁾ stellt mit seiner Methode einen Knick in der Verdichtungs- oder Überladungskurve fest, der letzten Endes derselbe sein dürfte, den auch das d^2p/dt^2 -Verfahren ergibt, wie weiter unten ausgeführt wird.

II. Beschreibung des DVL-Verfahrens der

Druckbeschleunigung.

Als Druckgeber zur Diagrammaufzeichnung kann jeder elektrische Indikator verwendet werden, wenn er eine ausreichende Stoßempfindlichkeit und Widerstandsfähigkeit gegen die Klopfbeanspruchung besitzt.¹²⁾ Auf Grund solcher Eigenschaften hat sich besonders der Quarz-Indikator bewährt, der hier ausschließlich dafür verwendet wird; bei einem anderen System müßte u.U. der Eingang des Verstärkers entsprechend abgeändert werden.

Grundsätzlich ist eine Differentiation des Druckdiagrammes auch auf graphischem Wege möglich, und besonders zur Ermittlung der absoluten Größe in at/sec. bzw. at/sec² ist dieser Weg vorläufig vorzuziehen. Für den praktischen Gebrauch ist das graphische Verfahren aber viel zu umständlich und muß deshalb durch eine selbsttätige, nämlich elektrische Differentiation ersetzt werden. Diese kann

grundsätzlich nach Abb.1 erfolgen: Der Meßwert, z.B. dp/dt wird auf das Gitter eines Verstärkerrohres gegeben, sodaß dessen Anodenstrom i sich genau proportional dp/dt verhält. Schaltet man nun in den Anodenkreis eine Drosselspule, so ist die Spannung an deren Enden $L \cdot di/dt$ bzw. proportional d^2p/dt^2 . Diese Differentiation ist in so weiten Grenzen genau, als die Drossel noch einen vernachlässigbaren Widerstand und geringe Kapazität besitzt und andererseits eine Rückwirkung auf den Anodenstrom nicht stattfindet. Die Ausgangsspannung, welche d^2p/dt^2 entspricht, wird nun auf den Oszillographen (Kathodenstrahlrohr) gegeben und dort beobachtet bzw. photographiert. Dabei hat sich ergeben, daß die Ausschläge der einzelnen Verbrennungsdiagramme sehr stark schwanken, bei Klopfen sogar um mehr als das Doppelte. Anfangs wurden nun etwa 30 Verbrennungsdiagramme auf eine Aufnahme photographiert und der graphische Mittelwert gezogen. Später wurde auch diese Arbeit elektrisch ausgeführt und zwar durch einen Kondensator, der durch die Klopfimpulse langsam aufgeladen wird und dessen Spannung über eine Verstärkeröhre durch ein Meßgerät angezeigt wird. Dieses Verfahren arbeitet nach Abgleichen der Widerstände und Kondensatoren so gut, daß der Stromwert, der also dem Klopfen entspricht, einfach auf ein Schreibgerät gegeben werden kann, welches selbsttätig während der ganzen Meßreihe die Klopfstärke aufzeichnet. Abb.2 zeigt einen solchen Meßstreifen, der nicht nur den Vorteil einer objektiven Aufzeichnung bringt, sondern auch einen Aufschluß über das oft schwankende Verhalten des Motors während der Messungen ergibt. Aus der Streuung der einzelnen Punkte kann man erkennen, daß teilweise während des Ablaufens des Kraftstoffes aus dem Meßglase für die Verbrauchsmessungen der Motor sein Verhalten noch geändert hat, ein Vorgang, der ohne Schreiber leicht übersehen wird und zu ungenauen Kurven führt. Überhaupt hat die außerordentlich empfindliche d^2p/dt^2 -Messung zu einer immer sorgfältigeren Motoreinstellung geführt und hat gezeigt, daß bei genauen Klopfmessungen nicht nur die Luftüberschusszahl auf rund 2% ein-

gehalten werden muß, sondern auch die Gemischtemperatur, die Wandtemperatur des Zylinders usw. genau konstant bleiben müssen.

Zur Bestimmung des Klopfbeginns wird eine ganze Reihe von Einstellungen mit steigendem Ladedruck aufgenommen, und die d^2p/dt^2 -Mittelwerte werden dann über dem Ladedruck aufgetragen. Man kann statt des Ladedruckes grundsätzlich auch jede andere Motorgröße benutzen, welche bei Erhöhung eindeutig das Klopfen steigert, z.B. die Verdichtung oder den effektiven Mitteldruck. Wenn sich auch theoretisch begründen läßt, daß die Überladung als Abszisse ein klareres Bild ergeben muß, so kann doch in vielen Fällen zur Veranschaulichung der erreichten Mitteldrucke die Auftragung über p_{me} vorteilhafter sein. In der so eingezeichneten Kurve entsteht nun beim Klopfbeginn ein Knick oder eine Unstetigkeit, wie es auch aus zahlreichen Abbildungen im letzten Abschnitt dieser Arbeit hervorgeht. Einen großen Einfluß auf die sichere Erkennbarkeit des Knickes spielt dabei nach DVL-Erfahrungen erstens die Genauigkeit der Aufnahme, zweitens der Abstand von Meßpunkt zu Meßpunkt und drittens der Maßstab von Abszisse und Ordinate. In Zweifelsfällen konnte eine Wiederholung der Meßreihe immer klare Verhältnisse schaffen, wobei betont werden muß, daß die Reproduzierbarkeit des Verfahrens durch quantitative Übereinstimmung nach mehreren Monaten nachgewiesen werden konnte¹⁰⁾; die Wiederholung in unsicheren Fällen ergab entweder die Verbesserung eines vielleicht fraglichen Meßpunktes oder es stellte sich heraus, daß der Motor sein Klopfverhalten verändert hatte, was auf die Nichtbeachtung einer Motorgröße zurückzuführen war. Die Genauigkeit der Feststellung des Klopfbeginns beträgt selbst in den ungünstigsten Fällen noch rd. ± 20 mm Hg, während sie bei der Mehrzahl der Messungen ± 5 mm Hg erreichte, einen Wert, der bei schwierigeren Motoren, wie dem CFR-Motor, die Fehlergrenze des Abhörens weit unterbietet. Vorausgesetzt ist allerdings dabei, daß die Änderung der Überladung in kleinen Stufen erfolgt (30 bis 50 mm Hg), was natürlich mit

einem entsprechenden Mehraufwand an Zeit verbunden ist.

III. Physikalische Zusammenhänge.

1. Amplituden der Druck-Funktionen.

Zur richtigen Beurteilung des Verfahrens ist eine Klärung der physikalischen Zusammenhänge erforderlich. Zu diesem Zwecke wurden mit größter Sorgfalt Einzelaufnahmen der p - t , dp/dt und d^2p/dt^2 -Diagramme bei verschiedenen Überladungen im CFR-Motor mit einem handelsüblichen Kraftstoff OZ 87 hergestellt, welche die Veränderung der einzelnen Funktionen mit der Stärke des Klopfens deutlich erkennen lassen. Die Amplituden dieser drei Funktionen zeigt Abb.3 (s.F. Seeber 13). Die Meßwerte von $p=f(t)$ und dp/dt zeigen mit Erhöhung des Ladedruckes einer entweder geradlinigen oder kurvenförmigen Anstieg. Irgendeine Unstetigkeit im Verlauf dieser Kennlinien ist nicht festzustellen. Dagegen zeigt die Messung von d^2p/dt^2 einen deutlichen Knickpunkt. Die Zahlenwerte sind in Abb.3 graphisch aus dem p - t bzw. dp/dt -Diagramm ausgewertet und in guter Übereinstimmung mit der elektrisch differenzierten dp/dt bzw. d^2p/dt^2 -Messung. Während bei Nichtklopfen das Druckdiagramm überall weiche Rundungen aufweist (Abb.4), erscheinen mit zunehmender Klopfstärke immer größere Steilheiten, besonders die Umkehr der Kurve in der Druckspitze nach dem oberen Totpunkt wird immer schärfer. Entsprechend verhalten sich die Ableitungen: dp/dt nimmt von Nichtklopfen ($1 \cdot 10^4$ at/sec) zu starkem Klopfen auf das Doppelte oder Dreifache ($3 \cdot 10^4$ at/sec) zu, wobei die Stelle der größten Druckänderungsgeschwindigkeit von dem Steilanstieg in die Spitze wandert (Abb.4). Wie schon anfangs erwähnt, reicht aber diese Amplitudensteigerung für eine genaue Klopfmessung noch nicht aus, da sie bei kleineren Klopfunterschieden in den allgemeinen Schwankungen jedes Otto-Motors untergeht. Viel größere Unterschiede ergibt die zweite Ableitung, die entsprechend Abb.4 von $6,5 \cdot 10^6$ auf $55 \cdot 10^6$ at/sec² zunimmt (diese Zahlen entsprechen dem negativen Ausschlag,

der positive nimmt sogar im Verhältnis 1:20 zu). Der größte Ausschlag von d^2p/dt^2 liegt entsprechend Abb.4 auch bei Nichtklopfen in der Druckspitze und nicht in der Anstiegskrümmung, wie Schütz⁴⁾ vermutet. Die ganze Wirkung der d^2p/dt^2 -Messung geht also darauf zurück, daß die Zuspitzung der Druckkurve nach dem oberen Totpunkt quantitativ auf einfache Weise, nämlich durch die zweite Ableitung erfaßt wird, welche ja mathematisch mit dem Krümmungsradius eng zusammenhängt.

Die oben erwähnte Versuchsreihe wurde später mit einem klopfesteren Kraftstoff bei höherer Drehzahl und vor allem mit empfindlicherem Verstärker wiederholt. Augenblickswerte der jeweiligen Diagramme bei den verschiedenen Überladungen sind in Abb.5 zusammengestellt. Das Einzelbild $p - 100$ mm Hg ist leider mit einem etwas größeren Druckmaßstab aufgenommen worden. In dem Diagramm $p + 300$ mm Hg sind im Original auf der Expansionskurve Klopferschwingungen von rund 5000 Hz zu erkennen. Auf Wunsch stehen deutlichere Abzüge dieses Diagrammes zur Verfügung. Mit diesen tatsächlichen Klopferschwingungen dürfen die Wellen in der Null-Linie der Bilder dp/dt und $d^2p/dt^2 + 300$ mm nicht verwechselt werden, welche durch mechanische Gitterschwingungen der Verstärkerrohre verursacht sind. Diese Diagramme zeigen Amplituden-Unterschiede von 1:10 für dp/dt und sogar über 1:100 für d^2p/dt^2 . Die abs. Größen at/sec und at/sec^2 sind am rechten Rande aufgetragen, die einfachen Druckwerte (at) sind in die Diagramme eingeschrieben.

2. Theoretische Begründung des den Klopfbeginn kennzeichnenden Knickes.

W. Jost, Freiherr v. Müffling, W. Rohrman¹⁴⁾ und W. Jost¹⁵⁾ sowie F.A.F. Schmidt¹⁶⁾ stellten rechnerische Beziehungen über die Verbrennung von Gasgemischen auf, von denen für die vorliegenden Zwecke nur die grundlegenden Formeln wichtig sind.

Nach Vornahme einiger Rechenarbeit läßt sich daraus ein Ausdruck für die durch die fortschreitende Verbrennung erfolgende Druckerhöhung gewinnen, wobei hier auf die Rechnung im einzelnen nicht näher eingegangen werden soll, zumal derartig weitgehende Vereinfachungen notwendig sind, daß eine quantitative Übereinstimmung mit praktischen Werten doch nicht zu erwarten ist. Es genügt für die vorliegende Betrachtung, daß man eine Abhängigkeit

$$p = f(t, p_0, T_0).$$

aufstellen kann, wobei p den jeweiligen Zylinderdruck, t die Zeit, p_0 den Anfangsdruck (Ansaugedruck) und T_0 die Anfangstemperatur bedeuten. Diese Funktion f , in der übrigens noch die Verdichtungszunahme durch die Kolbenbewegung und sehr viele motorische Veränderliche enthalten sind, die also nur für eine bestimmte Motoreneinstellung gilt, entspricht Verbrennungsgesetzen, welche durch die oben erwähnten zugrundeliegenden Formeln mathematisch festgelegt sind. Sobald sich nun die Verbrennungsart grundsätzlich ändert, indem Klopfen eintritt und zwar bei einem Punkt, der durch die Selbstzündung gegeben ist, so tritt an die Stelle der Funktion f eine andere:

$$p = F(t, p_0, T_0)$$

wobei natürlich die Werte von p für den Moment der Selbstzündung für beide Funktionen gleich sein müssen. Wie schon bei der praktischen Ausführung erwähnt, sind die Amplitudenunterschiede der p -Funktionen sehr gering, was auch einleuchtet, da selbst bei starkem Klopfen die Selbstzündung erst im letzten Teil der Gemischverbrennung eintritt und nur die Geschwindigkeit der Verbrennung ändern kann; die zur Verfügung stehende Verbrennungsenergie (Heizwert in Kalorien) ist auch beim Klopfen dieselbe, es kann also nur dadurch eine gewisse Druckerhöhung gegenüber Nichtklopfen entstehen, daß der Umsatz der letzten Verbrennungskalorien in größerer Nähe des Totpunktes, also bei höherer Verdichtung stattfindet. Von örtlichen Druckerhöhungen soll hier abgesehen werden, denn diese sind wegen des mit Schallge-

schwindigkeit verlaufenden Druckausgleiches nur denkbar, wenn man Vorgänge betrachtet, die viel kürzer als 10^{-4} sec andauern und infolgedessen von den meisten Indikatoren nicht mehr richtig erfaßt werden.

Die kleine Formänderung der p-t-Funktion wird durch Differenzieren in eine Amplitudenänderung verwandelt: Die plötzliche Verbrennung des Restteiles mit dem augenblicklichen Druckanstieg müßte theoretisch einen unendlich hohen Differentialquotienten ergeben. Tatsächlich dauert natürlich die Selbstzündung auch eine gewisse Zeit, sodaß selbst bei stärkstem Klopfen der Differentialquotient immer noch endlich bleibt.

Auf diese Unstetigkeit reagiert der 2. Differentialquotient erheblich stärker, ein noch höherer würde einen entsprechend größeren Ausschlag ergeben. Es ist aber mit Rücksicht auf zu große Verzerrungen besser, beim 2. Differentialquotienten zu bleiben, der noch ausreichend exakt dargestellt werden kann und der ja, wie die Versuche zeigen, für die Klopfmessung genügt. Trägt man nun in der oben beschriebenen Weise die $d^2 p / dt^2_{\max}$ Amplituden über dem Anfangsdruck p_0 auf, so entsteht entsprechend der Funktion $d^2 f / dt^2$ eine stetige Kurve. Sobald die Verbrennungsart gemäß der Funktion $d^2 F / dt^2$, also klopfend verläuft, bekommt die Kurve einen anderen Charakter, es tritt nun eine Unstetigkeit auf, die durch den oben erwähnten Knick dargestellt ist.

Die Erfassung des Klopfbeginns durch den Knick besteht also letzten Endes nur in der Sichtbarmachung der Unstetigkeit, die die Verbrennung bei dem Übergang in das Klopfen erleidet. Es ist einleuchtend, daß man außer der Druckfunktion auch eine andere, z.B. die Verbrennungsgeschwindigkeit oder die Verbrennungszeit auftragen kann, wie es Schütz⁴⁾ mit Erfolg versucht hat, der dabei ebenfalls einen bzw. denselben Knick findet. In der Praxis dürfte das Verfahren von Schütz allerdings den Nachteil haben, daß es 2 Zylinderbohrungen benötigt.

IV. Motorversuche.

Die praktische Anwendung des DVL-Verfahrens der zweiten Differentiation zur Bestimmung der Klopfneigung erfolgte an zwei verschiedenen Einzylinderprüfmotoren für Kraftstoffe der Octanzahl Klasse 87 und darüber. Beide, ein CFR-Motor und ein BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder, waren mit einer Überladevorrichtung ausgerüstet.

1. Physikalisch-chemische Eigenschaften der untersuchten Kraftstoffe und ihre Octanzahlen.

Zur Prüfung des DVL-Verfahrens der Druckbeschleunigung wurden 3 in ihrem chemischen Aufbau verschiedene Kraftstoffgemische der Octanzahlklasse 87 und ein Kraftstoff der Klasse OZ 100 gewählt. Die Eigenschaften sind in folgender Tafel gegenübergestellt:

Kraftstoffbezeichnung	techn. Iso-Octan	75V.% techn. Iso-Octan + 25 V.% Fliegerbenzin	75 V.% Benzol + 25 V.% Fliegerbenzin	47 V.% Äthylalk. + 53V.% Flieger-Bi
Protok.-Nr. (BMW-Klopfgrenzkurven)	216	218	221	222
Dichte b. 20°C	0,700	0,704	0,828	0,747
Refraktion b. 20°C	1,3980	1,3990	1,4732	1,3910
C/H-Verhältnis	5,4	5,6	8,9	5,1
theor. Luftbedarf kg/kg	15,02	14,95	13,66	12,44
Destillation nach ASTM-Verfahren				
Siedebeg. °C	96	70	67	51
bei 60°C V.%	-	-	-	4,0
70 " "	-	-	-	36,0
80 " "	-	2,0	-	96,0
90 " "	-	13,0	13,0	-
100 " "	5,0	41,0	55,0	-
110 " "	90,0	81,0	76,0	-
120 " "	-	94,5	85,0	-
121 " "	98,0	-	90,5	-
130 " "	-	-	-	-
135 " "	-	97,5	-	-
140 " "	-	98,3	94,5	-
141 " "	-	-	-	-
Rückstand "	-	-	-	98,0
Verlust "	1,3	1,0	98,2	-
	0,7	0,5	1,0	1,2
			0,8	0,8

Die Octanzahlen und die Verdichtung bei Klopfbeginn der 4 Kraftstoffe, die im CFR-Motor untersucht wurden, sind folgende:

Kraftstoff	Motor-Verfahren		Research-Verfahren	
	OZ	Klopfbeginn	OZ	Klopfbeginn
Techn. Iso-Octan	97,5	6,96:1	95,9	6,27:1
75 V. % Techn. Iso-Octan	88,7	5,81:1	89,1	5,70:1
25 " Flieger-Bi				
75 " Benzol	88,9	5,88:1	98,6	6,61:1
25 " Flieger-Bi				
47 " Äthyl-Alk.	89,7	5,82:1	99,8	6,81:1
53 " Flieger-Bi				

2. Prüfmotoren und Versuchsbedingungen.

Die wesentlichen Kennzeichen der zwei verwendeten Prüfmotoren sind folgende:

	CFR-Motor	BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder
Hubvolumen cm ³	611	3076
Verdichtung	6,5:1	6,5:1
Verbrennungsraumgestalt	scheibenförmig	Kelotte
Kolbenwerkstoff	Gußkolben	Leichtmetallkolben
Zündkerzen	1	2
Zündung	Batterie	Magnet
Kühlmittel	destilliertes Wasser	Luft
Einlaßventil	abgeschirmt	normal
Ventilüberschneidung	21 KW	41 KW
Vorwärmung	Gemischheizung	Luftheizung
Kraftstoffaufbereitung	Vergaserbetrieb	Einspritzbetrieb

Die bei der Prüfung der Kraftstoffe eingehaltenen Versuchsbedingungen zeigt die nachstehende Zusammenstellung.

	Versuchsbedingungen für	
	CFR-Motor	BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder
Drosselstellung	Vollgas	Vollgas
Drehzahl U/min	600	1600
Zündung °KW	konstant 12,5	veränderl. Bestzündung für $\lambda = 0,7; 0,9; 1,1; 1,3$ bei klopfreier Verbrennung
Kühlluftdruck mm WS	-	200
Kühlmitteltemp. °C	100	25 - 30
Ladelufttemp. °C	-	80
Gemischtemp. °C	80	-
Gemischstärke λ	0,7 - 1,3	0,7 - 1,3
Maß des Klopfens	1. Bestimmung der 2. Differentiation 2. Klopfbeginn nach Gehör	gleiche Klopfschlagzahl in der Minute
	erstes gleichmäßiges Klopfen	

3. Versuchsergebnisse

a) Einfluß verschiedener Versuchsbedingungen auf den Klopfbeginn eines Kraftstoffes:

Um über die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse des DVL-Verfahrens der Druckbeschleunigung Aufschluß zu erhalten, mußte zunächst festgestellt werden, wie durch Änderungen der motorischen Versuchsbedingungen auch die d^2p/dt^2 -Messung beeinflusst wurde.

Sämtliche Versuchsergebnisse, also auch die später beschriebenen Klopfgrenzkurven der verschiedenen Kraftstoffe wurden auf folgende Weise gefunden.

Die d^2p/dt^2 -Messung gestattet nicht, wie oben bereits erwähnt, eine sofortige Messung des Klopfbeginns, vielmehr muß für jeden Klopfbeginn bei einer bestimmten Luftüberschußzahl zunächst die d^2p/dt^2 -Kurve bei steigender Überladung gefahren werden. Für diese Hilfskurve müssen mindestens 5 bis 6 Meßpunkte bei verschiedener Überladung eingestellt werden, von denen 2 bis 3 im klopfreien Gebiet liegen. Verbindet man nun die einzelnen d^2p/dt^2 -Punkte, so liegt im

Knickpunkt der Kennlinie der gesuchte Klopfbeginn des Kraftstoffes, der durch einen bestimmten Wert in mm Hg Ladedruck oder in kg/cm^2 mittl. eff. Kolbendruck gekennzeichnet ist. Solche Kennkurven sind in Abb. 6 gezeigt. Für die Knickpunkte der Kennlinien kann man unmittelbar die Ladedrucke bzw. die mittleren eff. Kolbendrucke ablesen.

Man kann der Abb. 6 weiterhin entnehmen, daß die Luftüberschußzahl nur in geringen Grenzen von dem in diesem Beispiel einzuhaltenden Grundwert $\lambda = 0,9$ abweicht. Ferner zeigt diese Darstellung, daß der Knickpunkt der Kennlinien sich ungefähr immer dort einstellt, wo die mit dem Gehör festgestellte Klopfschlagzahl von 8 bis 10 scharfen Schlägen in der Minute ermittelt wurde. Diese Feststellung wurde für den BMW-Flugmotoren-Einzylinder bei allen übrigen Kennkurven stets bestätigt. In Abb. 7 sind nun für den Kraftstoff technisches Iso-Octan die d^2p/dt^2 -Kennkurven für die verschiedenen Änderungen der Versuchsbedingungen wiedergegeben, wie sie sich im BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder einstellten. Es wurde der Einfluß

der Luftüberschußzahl	} Luftüberschußzahl	
der Ladelufttemperatur		konst. 0,9
der Zündung		
der Verdichtung und		
der Drehzahl		

untersucht.

Die bekannte Steigerung des zulässigen Ladedruckes mit sinkender Ladelufttemperatur, die Verringerung des Ladedruckes mit größerer Vorzündung werden genau so wie die starke Senkung des Ladedruckes mit steigender Verdichtung durch die Verlagerungen der Knickpunkte der Hilfskennkurven deutlich zum Ausdruck gebracht. Die Drehzahlerhöhung von 1200 auf 1600 U/Min verursacht gleichfalls eine, wenn auch nur geringe Ladedrucksteigerung. Dies entspricht den allgemeinen Anschauungen. Eine weitere Erhöhung der Drehzahl ergibt jedoch für den bei diesen Untersuchungen verwendeten Kraftstoff techn. Iso-Octan im BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder einen Abfall des Ladedruckes

an der Klopfgrenze. Inwieweit diese Feststellung vom Kraftstoff oder vom Prüfmotor abhängt, ist Aufgabe weiterer Untersuchungen, die über den Rahmen dieser Arbeit gehen. Untersuchungen in dieser Richtung sind im Gange. Aus den 4 Hilfskennkurven für den Kraftstoff techn. Iso-Octan kann weiterhin für die Luftüberschußzahlen $\lambda = 0,7; 0,9; 1,1$ und $1,3$ der jeweilige Überladewert bei Klopfbeginn (p_{me}) entnommen werden. Es ergibt sich die in der gleichen Abbildung gezeigte Klopfgrenzkurve in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl und vom mittleren eff. Druck. Für diese Klopfgrenzkurve gelten die schon aufgeführten Versuchsbedingungen des BMW 132-Flugmotoren-Einzylinders.

In Abb. 8 sind für den gleichen Kraftstoff techn. Iso-Octan die d^2p/dt^2 -Hilfskennlinien ebenfalls für die verschiedenen Änderungen der Versuchsbedingungen, wie sie sich im CFR-Motor einstellen, wiedergegeben. Zur Erfassung der einzelnen Änderungen wurde bei den CFR-Motorversuchen der absolute Ladedruck in mm Hg und nicht wie beim BMW-Prüfmotor der mittlere eff. Kolbendruck gewählt, da am CFR-Motor keine Leistungsmessungen durchgeführt wurden.

Mit Hilfe der vier Knickpunkte aus den Hilfskennkurven für die verschiedenen Luftüberschußzahlen kann wiederum die Klopfgrenzkurve über der Luftüberschußzahl aufgestellt werden. Diese Kennkurve ist ebenfalls in Abb. 8 eingetragen.

Das gleiche Ergebnis wie bei den Untersuchungen im BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder konnte nur bei der Veränderung der Verdichtung festgestellt werden. Die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses bedingt eine Senkung des Ladedruckes. Bei den untersuchten verschiedenen Gemischtemperaturen und Zündungen erreicht der abs. Ladedruck an der Klopfgrenze (mm Hg) bei 30°C Gemischtemperatur und bei $12,5^\circ\text{KW}$ Zündung v.o.T. einen Minimalwert. Der Minimalwert der Gemischtemperatur wird wahrscheinlich durch die Gemischaufbereitung im CFR-Motor bedingt sein. Diese Versuche wurden wiederholt und stets die gleiche Reihenfolge ge-

funden. Bei dem für diese Untersuchungen gewählten Drehzahländerungsbereich (600 bis 1200 U/min) konnte für das techn. Iso-Octan mit steigender Drehzahl stets eine Ladedruckerhöhung festgestellt werden. Schließlich wurde mit steigender Kühlstofftemperatur ein stetes Abfallen des Ladedruckes ermittelt.

Alle diese nach dem DVL-Druckbeschleunigungs-Verfahren durchgeführten Messungen zeigen, daß die verschiedensten Versuchsbedingungen auch Änderungen der Klopfanzeige zur Folge haben. Die d^2p/dt^2 -Messung spricht auf die verschiedensten Veränderungen der Versuchsbedingungen eindeutig an und kann demnach als zuverlässiger Beurteilungsmaßstab der Klopf Eigenschaften von Kraftstoffen verwendet werden, wenn man mit den Gehörmessungen Vergleiche zieht.

b) Klopfgrenzkurven verschiedener Kraftstoffe nach dem Druckbeschleunigungs- und Abhörverfahren:

Für die schon angeführten vier Kraftstoffe wurden nun im BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder und im CFR-Motor Klopfgrenzkurven bei verschiedenen Luftüberschusszahlen nach dem Druckbeschleunigungs- und nach dem Abhörverfahren bestimmt (s. Abb. 9). Die dabei eingehaltenen Versuchsbedingungen wurden schon im Abschnitt IV b angegeben.

Das Ergebnis dieser Prüfung zeigt erstens eine gute Übereinstimmung der Versuchspunkte nach dem DVL-Verfahren der Druckbeschleunigung und nach dem Abhörverfahren, besonders für die Untersuchungen im BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder. Im CFR-Motor war der Klopfbeginn nach Gehör, besonders für den vorwiegend aromatischen Kraftstoff (Kurve 3), meist sehr schwer bzw. nur verschwommen feststellbar. Hervorzuheben ist ferner, daß im Gebiet von 20 bis 30% Luftüberschuss im BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder der Klopfbeginn nach dem Druckbeschleunigungsverfahren stets früher festgestellt wurde als nach dem Abhörverfahren.

Zweitens ist festzustellen, daß in beiden Prüfmotoren die Bewertung der Prüfkraftstoffe in einer anderen Reihenfolge geschieht als es durch ihre CFR-Motor-Octan-

zahlen zu erwarten ist. Technisches Iso-Octan (OZ Kl.100) ist nach dem DVL-Verfahren der Überladbarkeit bei Klopfbeginn⁷⁾ in beiden Prüfmotoren weniger klopfest (Kurve 1) als die Kraftstoffgemische mit Motorenbenzol bzw. Äthyl-Alkohol (Kurve 3 u.4), obwohl letztere nur eine Octanzahl von 87 besitzen. Das vorwiegend iso-paraffinische Kraftstoffgemisch, das ebenfalls der Octanzahlklasse 87 angehört (Kurve 2), hat die geringste Überladbarkeit.

Schließlich ist drittens noch hervorzuheben, daß die Reihenfolge der Beurteilung der 4 Prüfkraftstoffe im BMW 132 Flugmotoren-Einzyylinder und im CFR-Motor die gleiche ist. Allerdings ist der Überladebereich für die untersuchten Kraftstoffe im BMW 132-Flugmotoren-Einzyylinder ungefähr um $\frac{1}{3}$ größer (225 mm) als im CFR-Prüfmotor. Dies dürfte besonders auf die konstruktive Verschiedenheit der beiden Prüfmotoren und auf die verschiedene Gemischaufbereitung bzw. Zündung zurückzuführen sein.

Besonders interessant ist, daß die Überschneidung der Kurve 3 und 4 bei praktisch dem gleichen Kraftstoffüberschuß erfolgt. Mit Hilfe des DVL-Druckbeschleunigungsverfahrens ist die Festlegung des Klopfbeginns ohne weiteres möglich, unabhängig davon, ob in einem Motor der Klopfbeginn nach Gehör eindeutig oder nur sehr schwer zu ermitteln ist.

In Abb.10 sind die Ergebnisse, die in beiden Prüfmotoren mit den 4 Versuchskraftstoffen nach dem DVL-Druckbeschleunigungs- und nach dem Abhörfverfahren ermittelt wurden, in Prozent der Überladung bei Klopfbeginn über der Luftüberschusszahl zusammengestellt. Als Bezugspunkt (100 %) wurde für beide Prüfmotoren die Überladung bei Klopfbeginn bei $\lambda = 1,1$ von technischem Iso-Octan gewählt. Die abs. Überladung in mm Hg beträgt für techn. Iso-Octan (Bezugspunkt) im BMW 132-Flugmotoren-Einzyylinder 960 mm, im CFR-Motor 795 mm Hg.

Diese Darstellungsweise hat den Vorzug, daß die Prüfergebnisse in beiden Motoren, beurteilt nach einer

gleichen Kraftstoff-Ausgangsbasis, verglichen werden können. Die Reihenfolge der Kraftstoffbeurteilung bleibt dieselbe wie in Abb.9. Jedoch zeigt diese Darstellung bei den hier zu Grunde gelegten Prüfbedingungen den verschiedenen Einfluß der Motorenkonstruktion. Der Vergleich der einzelnen Kennkurven kann ohne weiteres vorgenommen werden, da ja die einzelnen Versuchspunkte nach dem Abhörverfahren durch die objektive Messung des Klopfbeginns nach dem DVL-Druckbeschleunigungs-Verfahren einwandfrei bestätigt werden konnten.

IV. Kritik und Folgerungen.

=====

Zum Unterschied von anderen Vorschlägen, die Klopfstärke zu messen, ergibt das beschriebene Verfahren der Druckbeschleunigung nicht nur eine erheblich größere Empfindlichkeit, sondern vor allem eine objektive Anzeige des Klopfbeginnes. Darüber hinaus ist schon - wie in der früheren Arbeit der Verfasser ¹⁰⁾ erwähnt und in den Abb.3 und 5 ausgeführt - eine Angabe der Klopfstärke in absolutem Maß (at/sec^2) möglich, die einen Vergleich der Messungen an verschiedenen Orten erlaubt, ohne daß ein und dasselbe Meßgerät benutzt werden muß. Es kann z.B. eine amerikanische Messung mit elektromagnetischem Druckgeber zu einem hier aufgenommenen Quarzindikator-Diagramm in Beziehung gesetzt werden, wenn jedes Mal die Klopfstärke in at/sec^2 gemessen worden ist. Daß das Verfahren eine gute Reproduzierbarkeit über mehrere Monate aufweist, ist schon in der früheren Arbeit der Verfasser ¹⁰⁾ erwähnt worden und konnte aufs neue bestätigt werden.

Bei einem Vergleich der Klopfbeginn-Messungen am BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder einmal nach dem "Abhör-Verfahren", das andere Mal nach dem "DVL-Verfahren der Druckbeschleunigung" ergab sich bis zur Luftüberschusszahl $\lambda = 1,15$ eine Übereinstimmung innerhalb der Meßgenauigkeit des Abhörverfahrens, also ± 15 mm Hg. Nur bei hohen Luftüberschusszahlen (von 20 bis 30% Luftüberschuß) wurden gewisse Abweichungen festgestellt. In Anbetracht der Schwierigkeit des "Abhörverfahrens" gerade im hohen Luftüberschußgebiet ist

den Messungen nach dem objektiven Druckbeschleunigungsverfahren eine größere Zuverlässigkeit zuzusprechen. Wendet man auch im CFR-Motor das Abhörverfahren und das Verfahren der Druckbeschleunigung an, so kann bei verschiedenen Kraftstoffen ebenfalls eine Übereinstimmung erreicht werden, allerdings mußte bei einem vorwiegend aromatischen Kraftstoff, bei dem bekannter Weise der Klopfbeginn schwer zu ermitteln ist, eine größere Abweichung festgestellt werden.

Hervorzuheben ist, daß bei einwandfreier Übereinstimmung der Ergebnisse nach dem Druckbeschleunigungs- und dem Abhörverfahren der Klopfbeginn nach dem Verfahren der Druckbeschleunigung fast immer einer Klopfschlagzahl zwischen 5 und 10 scharfen Schlägen in der Minute entsprach. Für die Verhältnisse des BMW 132-Flugmotoren- Zylinder erfolgen bei 1600 U/min 800 Zündungen, von denen also rd. 8, d.h. 1%, eine klopfende Verbrennung einleiten.

Das Verfahren der Druckbeschleunigung entspricht der schon mehrfach geäußerten Forderung, das Klopfverhalten eines Kraftstoffes nicht durch einen Punkt (Octanzahl), sondern durch eine Kurve festzulegen. Der Zeitaufwand für die eigentliche d^2p/dt^2 -Messung ist bei Verwendung eines Schreibgerätes praktisch gleich Null, da die Aufzeichnung selbsttätig während der Motoreinstellung erfolgt. Der notwendige Zeitaufwand für eine Klopfbeginnmessung ist vielmehr durch die Einstellung der Luftüberschußzahl usw. gegeben, wobei auf die Erreichung des Kräftegleichgewichtes von Meßpunkt zu Meßpunkt besonders bei luftgekühlten Motoren Rücksicht zu nehmen ist.

Die Bestrebungen gehen zur Zeit dahin, den erforderlichen Verstärker mit einem kleinen Kathodenstrahlrohr zur Beobachtung, einem Ausschlaginstrument zur Ableseung und einem angeschlossenen Schreibgerät zur völlig objektiven Aufzeichnung so handlich zusammenzustellen, daß nach Aufstellung der Anlage an einem Motor auch nicht fachmännische Kräfte einwandfreie Klopfmessungen vornehmen können.

Schrifttum

1. J.J.Broeze; H.v.Driell, L.A.Peletier; Betrachtungen über den Klopfvorgang im Otto-Motor. Deutsche Akademie der Luftfahrtforschung, Vorbericht zur öffentl.Sitzung am 10.u.11.Mai 1939.
2. H.Weinhart; Das Klopfen im Otto-Motor. Luftfahrtforschung Bd. 16 (1939), Lfg. 2, S.74
3. A.v.Philippovich; Der Verbrennungsvorgang im Explosionsmotor. Luftfahrtforschung Bd. 13(1936), VDI-Verlag.
4. R.Schütz; Messung der Klopfestigkeit an Otto-Motoren. Dtsch.Kraftfahrtforschung Heft 31 (1939), VDI-Verlag.
5. G.D.Boerlage, J.J.Broeze, Dr.H.v.Driel, L.A.Peletier; Detonation and stationary gas waves in petrol engines; Engineering Bd. 143(1937), S.254
6. N.Mac Coull and G.T.Stanton; The measurement of engine knock by electro-acoustic instruments; SAE-Journal Bd.38 (1936), S.70
7. A.W.Schmidt u. K.Generlich; Untersuchung der Klopfgeräusche mit elektro-akustischen Meßgeräten; Dt.Kraftfahrtforschung Heft 33 (1939), VDI-Verlag
8. E.M.Dodds; Some results obtained on the cathode ray engine indicator; J.Roy.Aeronaut.Soc. Bd.41, (Febr. 1937) Nr.314, S.132
9. H.Illgen u.H.Hintze; Beitrag zur Prüfung von Bremsstoffen mittels des piezoelektrischen Indikators; Dt.Motor-Zeitschr. Bd.14 (1937), Heft 10,S.234
10. F.Lichtenberger u. F.Seeber; Beitrag zur Frage der Klopfmeßverfahren; ATZ Bd.41 (1938), Heft 14, S.372
11. K.Schnauffer; Das Klopfen von Zündermotoren; Z.VDI Bd.75 (1931) S.455
12. F.Lichtenberger; Bewertung und Prüfung von elektrischen Motorindikatoren; ATZ Jahrg. 42 (1939) S.451
13. F.Seeber; Neuere Verfahren der Kraftstoffprüfung, Luftfahrtforschung Bd.16 (1939) Lfg.8, S.434
14. W.Jost, L.Freih.v.Müffling, W.Rohrmann; Beitrag zum Oxydationsmechanismus von Kohlenwasserstoffen; Zeitschrift f.Elektrochemie Bd.42 (1939)S.488

15. W. Jost; Verbrennungsvorgänge in Gasen, Angew.Chemie Jahrg. 51 (1938) Nr.40, S.687
16. F.A.F. Schmidt; Beitrag zur theoretischen und experimentellen Untersuchung von Verbrennungsvorgängen in Zünder- und Dieselmotor. Luftfahrtforschung Bd.14 (1937) Lfg.12, S.641
17. F.Seeber; Prüfung hochklopfester Kraftstoffe im Flugmotoren-Einzylinder, Luftfahrtforschung Bd.16, (1939), Lfg. 1, S.18

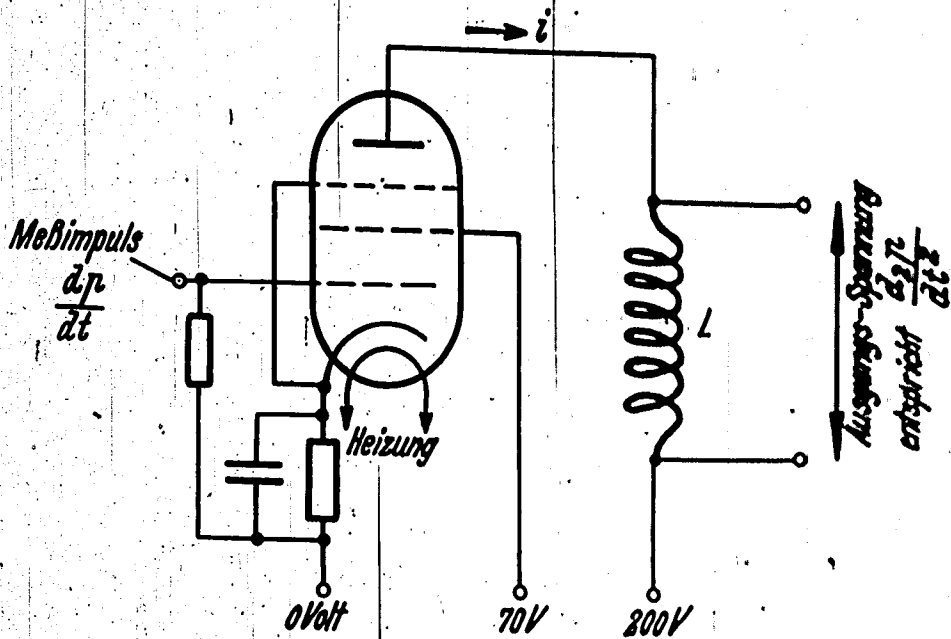


Abb.1: Schaltstufe zur elektrischen Differentiation.

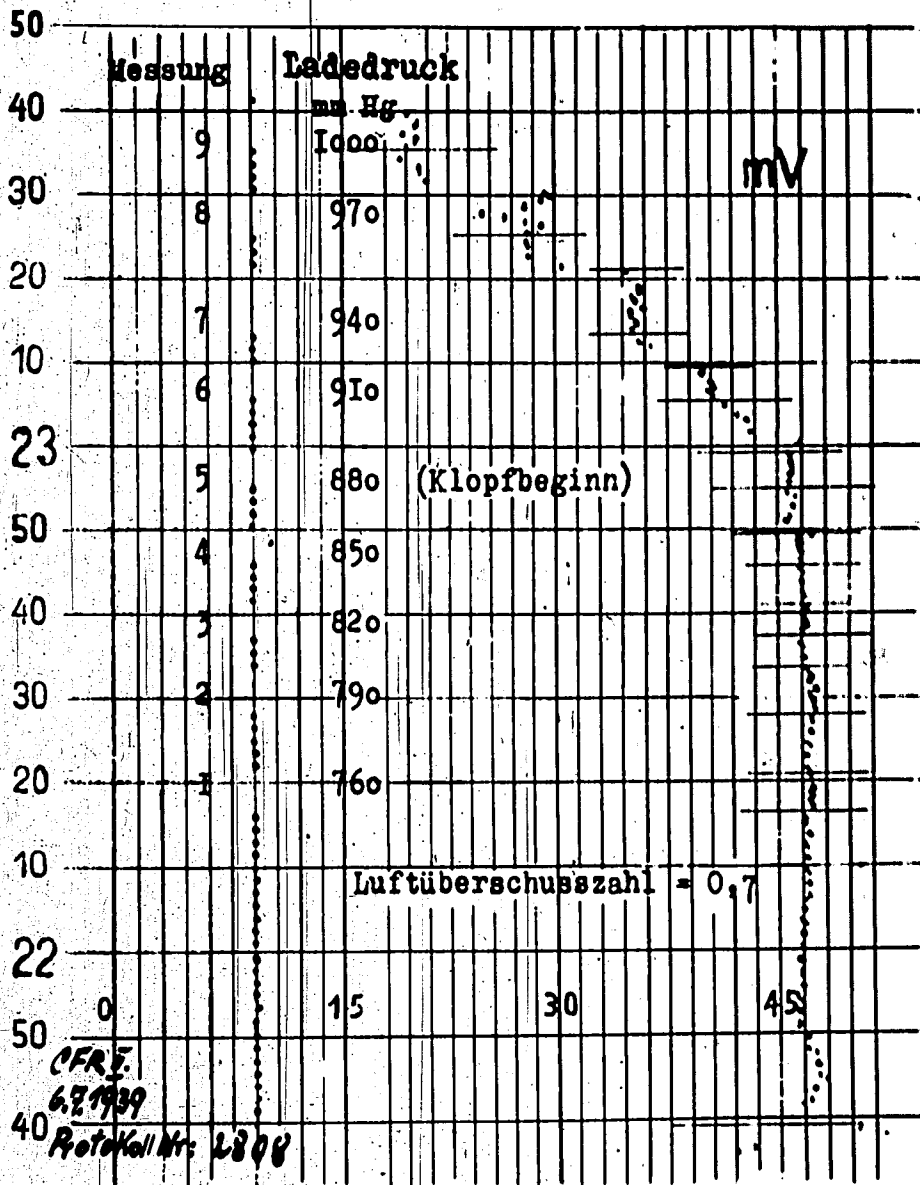


Abb.2: Meßstreifen mit selbstätiger Aufzeichnung der Druckbeschleunigung.

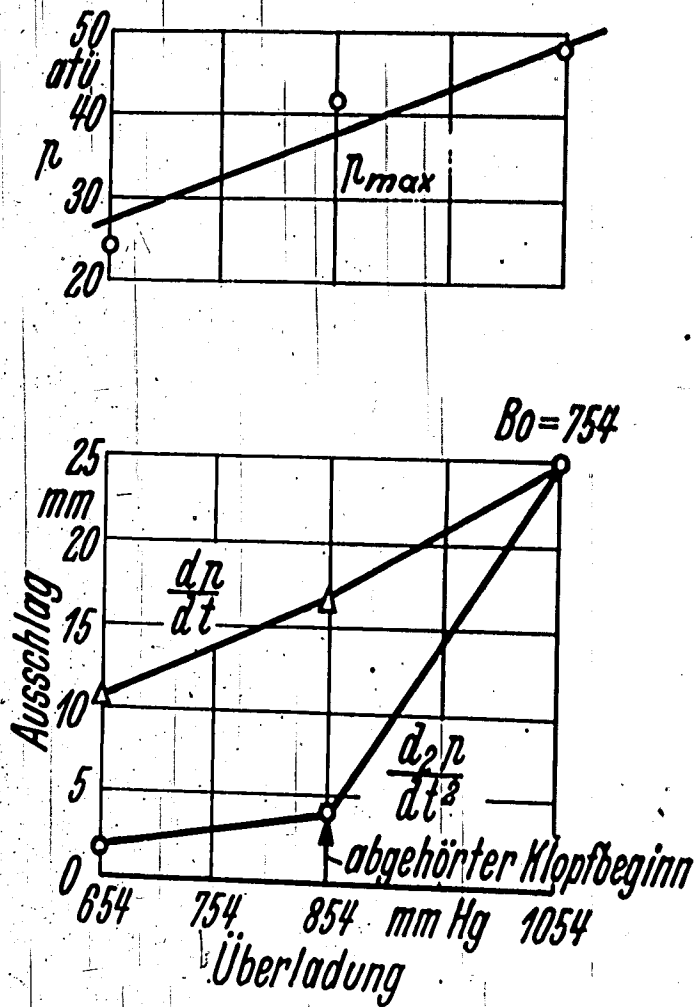


Abb. 3: Messung des absoluten Klopfbeginnes im CFR-Motor, Kraftstoff OZ 87, Drehzahl 600 U/Min., Luftüberschusszahl 0,9, Verdichtungsverhältnis 6,5:1.

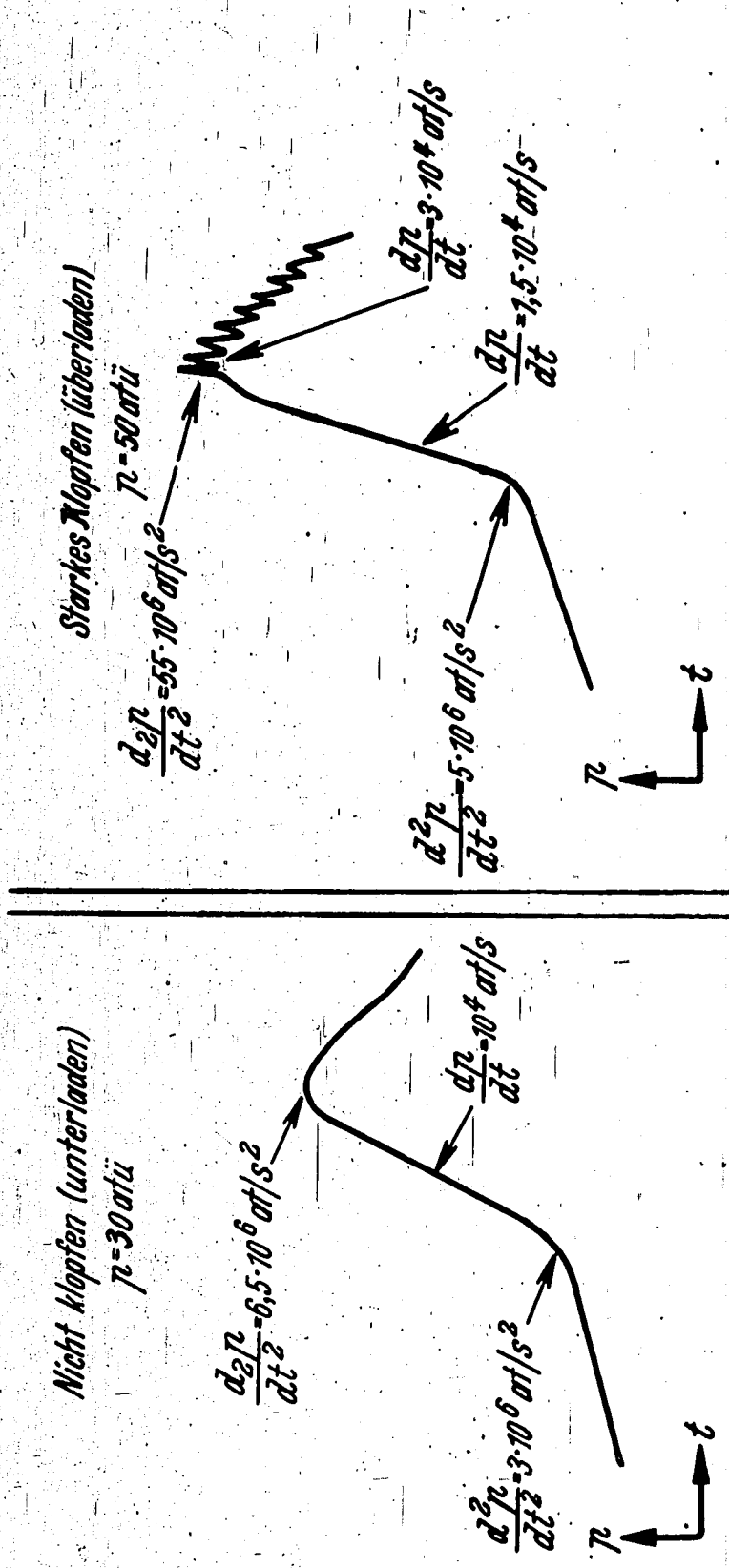
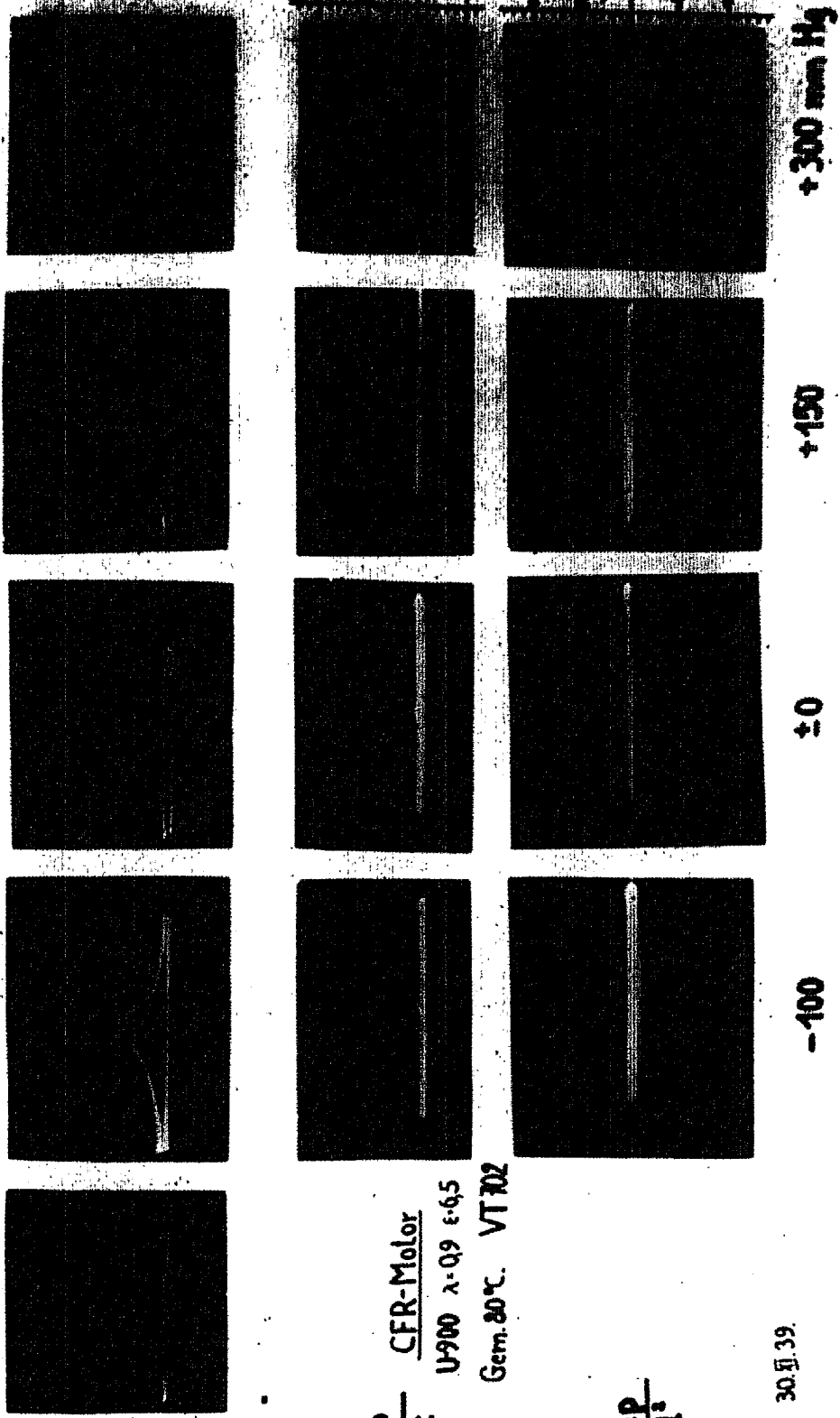


Abb. 4: Schematische Darstellung des Anstieges von $p, dp/dt,$
 $d^2 p/dt^2, n = 600 \text{ 1/min}$

Verdichtung

← Zeit



P

$\frac{dp}{dt}$

CFR-Motor
U900 $\lambda \cdot 09$ $\epsilon \cdot 05$
Gem. 20°C. VT702

$\frac{dp}{dt}$

6264

30. II. 39.

Abb. 5 Amplitudenverhältnisse der einzelnen Druckfunktionen bei verschiedenen Scharfschritten (Augenblickswerte).

Knickpunkt der $\frac{d^2p}{dt^2}$ Kennlinie und Klopfschlagzahl

a) 130°C			b) 80°C			c) 35°C		
Nr.	KSt/min	λ	Nr.	KSt/min	λ	Nr.	KSt/min	λ
1	0	0,963	1	0	0,894	1	0	0,90
2	0	0,905	2	0	0,892	2	0	0,887
3	4	0,903	3	1	0,90	3	1	0,886
4	10	0,898	4	8	0,878	4	8	0,890
5	~50	0,875	5	10	0,913	5	~50	0,884
			6	20	0,895			
			7	~50	0,90			

+) Klopfschläge in der Minute (nach Abhörverf.) = KSt/min

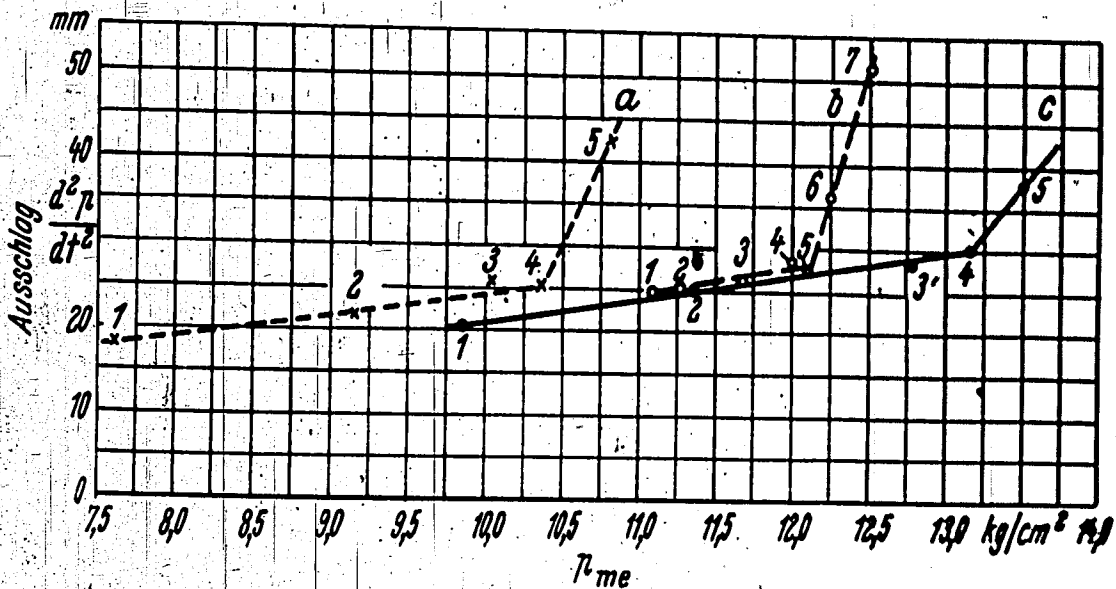
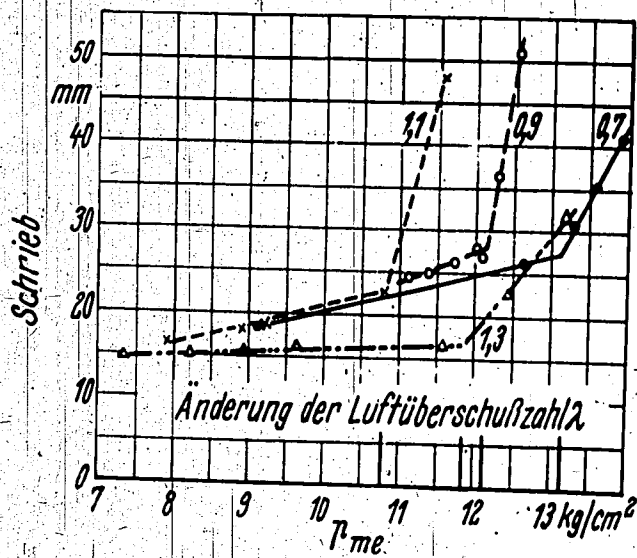


Abb. 6: Beziehung zwischen Knickpunkt der $\frac{d^2p}{dt^2}$ -Kennlinie und der Klopfschlagzahl (BMW 132).



Klopfgrenzkurve für techn. Iso-Oktan
 OVL - Überladeprüfbedingung
 (BMW 132 F Flugmot. - Einzylinder)

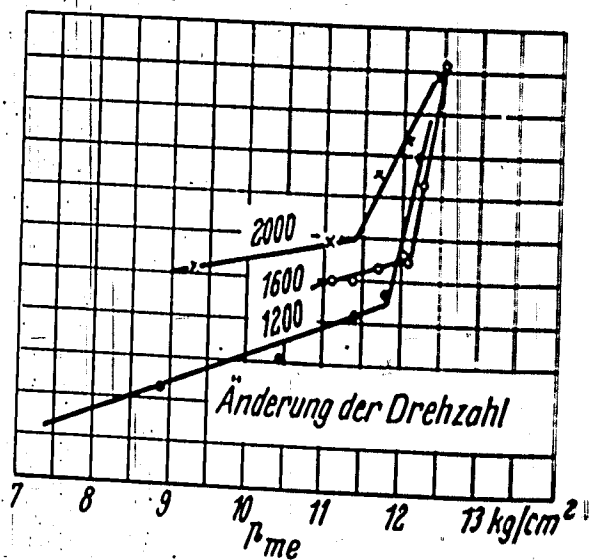
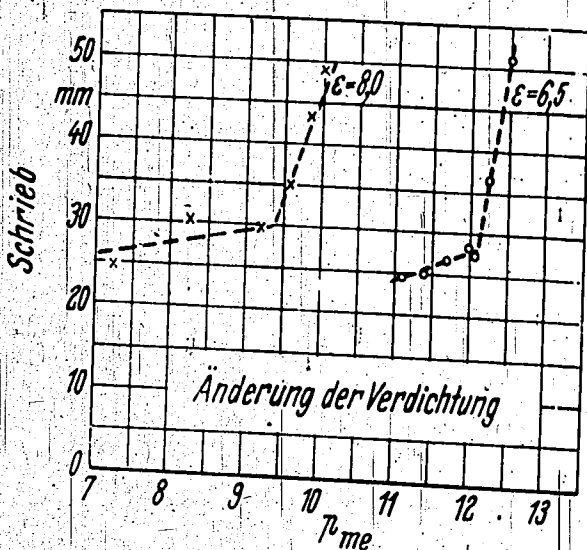
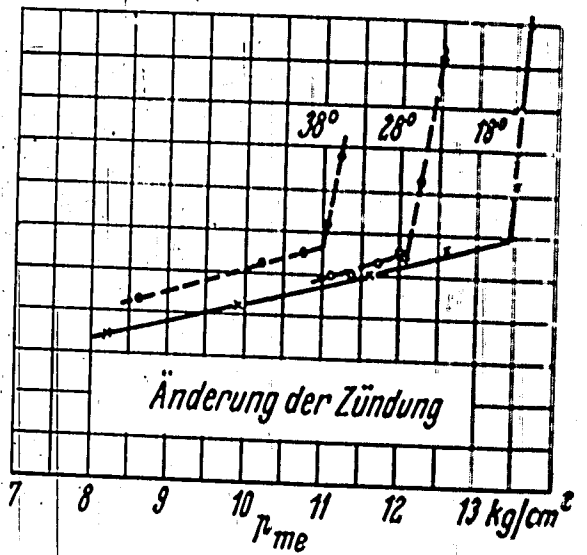
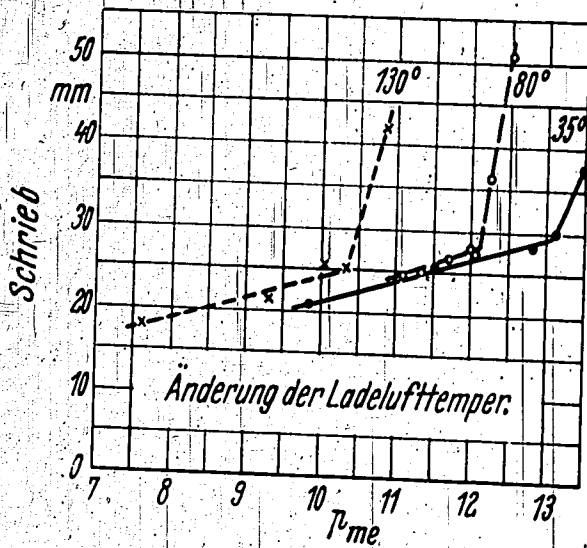
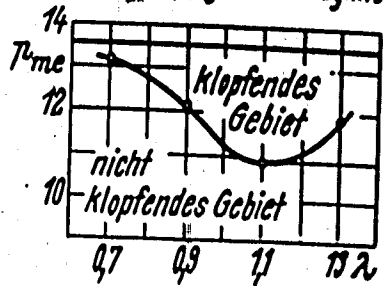


Abb. 7: Änderung der $d^2 p/dt^2$ -Kennlinie durch verschiedene Versuchsbedingungen im BMW 132-Flugmotoren-Einzylinder.

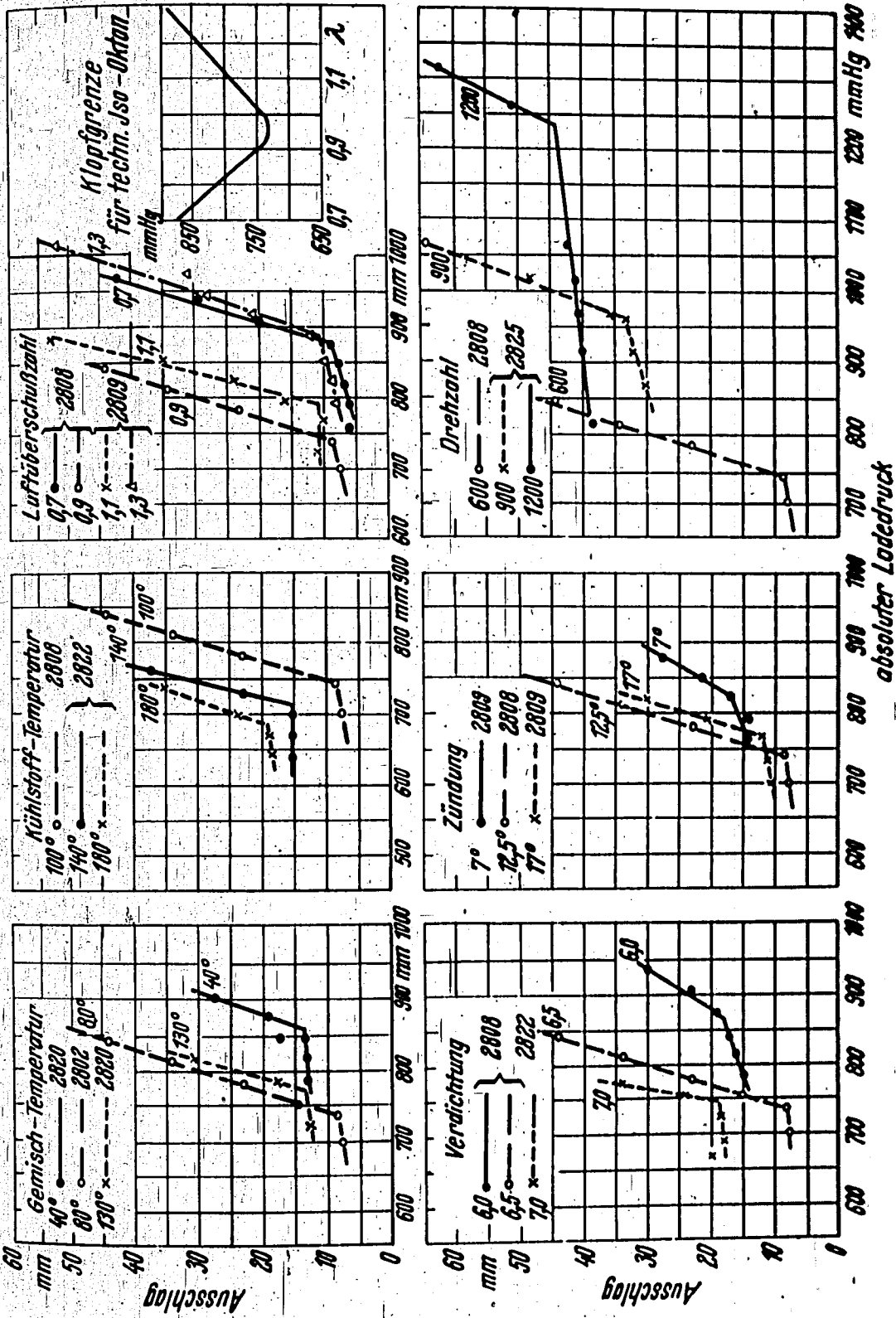


Abb. 8: Änderung der d^2p/dt^2 -Kennlinie durch verschiedene Ver-
suchbedingungen im CFR-Motor.

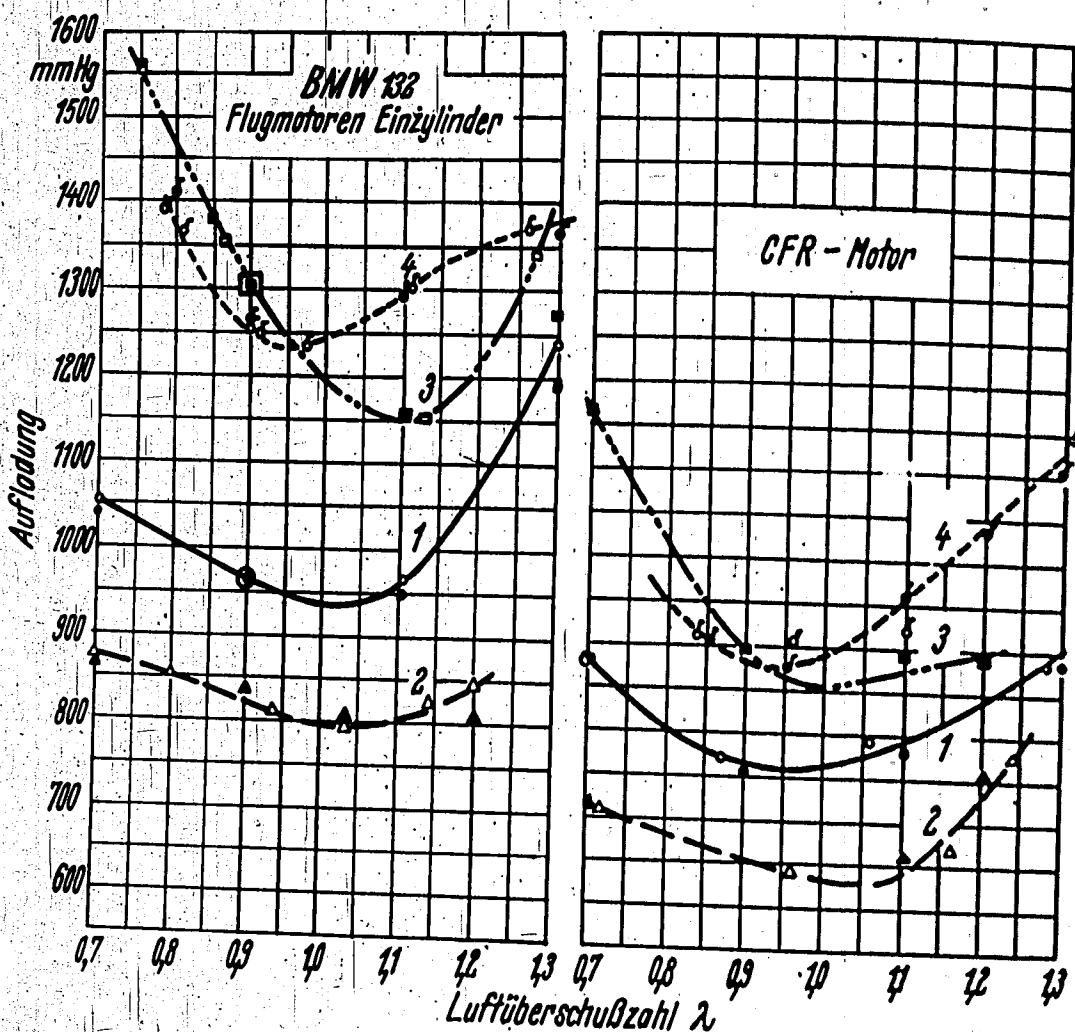
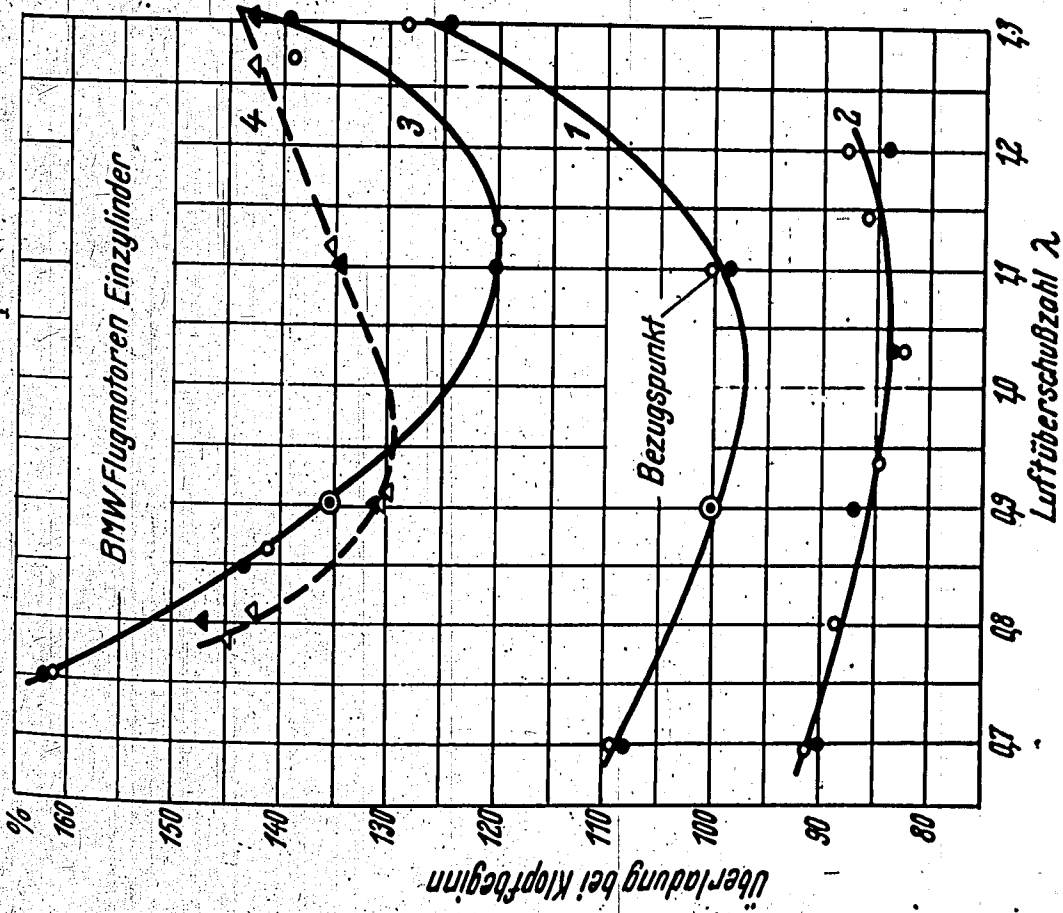


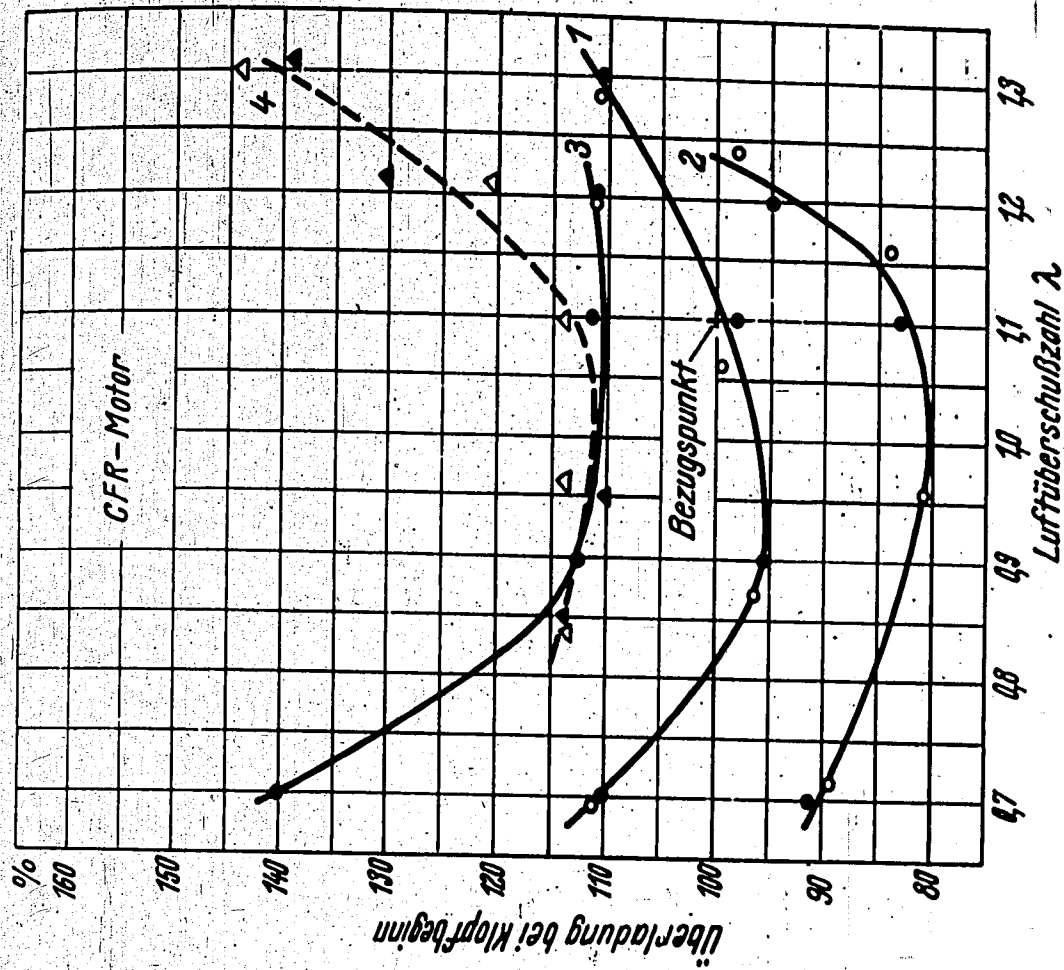
Abb. 9: Klopfgrenzkurven verschiedener Kraftstoffe nach dem Druckbeschleunigungs- und nach dem Abhörverfahren.

Zeichenerklärung: Messung nach:

Nr.	Gehör	$d^2 p/dt^2$	Kraftstoffe
1	○	●	Techn. Iso-Octan
2	△	▲	75 V% Techn. Iso-Octan + 25 V% Flieger-Bi
3	□	■	75 " Motorenbenzol + 25 V% Flieger-Bi
4	♯	♯	47 " Äthylalkohol + 53 V% Flieger-Bi



Bezugspunkt (100%) Überladung
(960 mm Hg) von techn. Iso-Oktan
bei $\lambda = 1,1$



Bezugspunkt (100%) Überladung
(795 mmHg) techn. Iso-Oktan
bei $\lambda = 1,1$

Vergleich der Überladbarkeit von 4 Kraftstoffen an der Klopfgrenze.