

000235

Geheim
G 1-3

Deutsche Luftfahrtforschung

Forschungsbericht Nr. 1869

**Unterschiedliches Klopfverhalten von Kraftstoffen
verschiedenen chemischen Aufbaues
in den Motoren BMW 132 N und DB 601 E
Franke**

Verfaßt bei

**Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V.
Institut für Betriebsstoffforschung
Berlin-Adlershof**

**Zentrale für wissenschaftliches Berichtswesen
der Luftfahrtforschung des Generalluftzeugmeisters (ZWB)
Berlin-Adlershof**

000236

Dies ist ein Staatsgeheimnis im Sinne des § 88 des Reichs-
strafgesetzbuchs (Fassung vom 24. April 1934). Mißbrauch
wird nach den Bestimmungen dieses Gesetzes bestraft, so-
fern nicht andere Strafbestimmungen in Frage kommen.

Weitergabe nur verschlossen, bei Postbeförderung als „Ein-
schreiben“

Aufbewahrung unter Verantwortung des Empfängers unter
gesichertem Verschluß.

000237

Unterschiedliches Klopfverhalten von Kraftstoffen ver-
schiedenen chemischen Aufbaues in den Motoren BMW 132 N
und DB 601 E.

Übersicht: Versuche hatten ergeben, daß das Klopfverhalten von Kraftstoffen nicht nur durch die Temperatur des unverbrannten Gemischrestes und die dabei ablaufenden ketteneinleitenden Reaktionen bedingt ist. Auch während der Gemischaufbereitung im Verdichtungshub können sich an unverdampften Kraftstoffteilchen bereits Peröxyde bilden, die den Klopfvorgang weitgehend beeinflussen. Kennzeichnend für das Auftreten der ersten Art von Reaktionen ist eine Klopfgrenzkurve mit ihrem Minimum im Gebiet von $\lambda = 1,05$, während der zweite Vorgang je nach Temperaturzustand des Motors und der Art des Kraftstoffes niedrigste Klopfestigkeit im Reichgebiet und von da aus ständiges Ansteigen der Klopfestigkeit zeigt. Da die Prüfung von Flugmotorenkraftstoffen im BMW 132 N Motor nach dem DVL Überladeverfahren Klopfgrenzkurven mit dem Tiefstpunkt bei $\lambda = 1,05$ ergibt, so war festzustellen, ob eine Übereinstimmung der Bewertung von Kraftstoffen mit Klopfgrenzkurven, deren Minimum im Reichgebiet liegt, erzielbar ist. Zahlreiche Kraftstoffe möglichst verschiedener chemischer Zusammensetzung und unterschiedlicher Klopfestigkeit wurden im Motor BMW 132 N und DB 601 A und DB 601 E auf ihr Klopfverhalten untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, daß zum Teil ganz erhebliche Abweichungen, sowohl in der absoluten Höhe der Klopfestigkeit als auch in der Reihenfolge der Bewertung der einzelnen Stoffe untereinander bestehen. Die Rückwirkung dieser Versuche auf die Beurteilung von Kraftstoffen nach dem DVL-Überladeverfahren wird besprochen, sowie auf die Notwendigkeit hingewiesen, zweckmäßigerweise Klopfuntersuchungen von prinzipieller Bedeutung auch in einem Motor vorzunehmen, der Klopfgrenzkurven anderer Art mit Tiefstpunkt im Reichgebiet ergibt.

Der Bericht umfaßt

33 Seiten
10 Abbildungen
2 Zahlentafeln

Institut für Betriebstofforschung
der

Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, E. V.

Der Bearbeiter:

K. Franke

K. Franke

Berlin-Adlershof, den 15. Juli 1944

BSf 460/8d

Gliederung:

- I. Einleitung
- II. Allgemeines über Klopfverhalten und Klopfgrenzkurven
- III. Versuchsdurchführung
- IV. Versuchsergebnisse
- V. Zusammenfassung

I. Einleitung.

Die ständig fortschreitende Entwicklung im Flugmotoren-
bau und das Bestreben, aus einem gegebenen Zylindervolumen ein
Maximum an Leistung herauszuholen, führten unter anderem auch
dazu, die Ventilüberschneidung zu vergrößern. Mit dieser Maßnahme
konnten die sonst im Zylinder verbleibenden Restgase ausgespült
und damit eine Vergrößerung der Arbeit leistenden Füllung des
Motors erzielt werden. Darüber hinaus wurde durch die während
der Überschneidungsperiode durch den Verbrennungsraum hindurch-
gehende Spülluft eine wirksame Kühlung von Ventilen, Kolben
und Brennraumwänden erzielt. Trotz der jetzt im selben Zylinder-
volumen erzielbaren höheren Leistung wurde dadurch der thermi-
sche Gesamtzustand des Zylinders herabgesetzt.

Diese an und für sich begrüßenswerte Tatsache zeigte jedoch
beim Klopfverhalten des Motors bisher ungewohnte Auswirkungen.
Der verhältnismäßige kältere Zustand des Motors beeinträchtigt
in gewissen Bereichen des Luftverhältnisses die Verdampfung
des Kraftstoffes, womit durch die an den unverdampften Kraftstoff-
teilchen auftretenden Vorreaktionen eine grundsätzliche Beein-
flussung des Kopfverhaltens und eine von der bisherigen Gestal-
tung der Klopfgrenzkurve abweichende Form erhalten wurde. Die
Prüfung von Flugmotorenkraftstoffen nach dem DVL Überladever-
fahren erfolgt aber nach den bisher bekannten Formen von Klopf-
grenzkurven mit dem Tiefpunkt bei $\lambda = 1,05$. Die Reihenfolge
der Bewertung wird nach der absoluten Höhenlage dieses Punktes
im Vergleich zu anderen Kraftstoffen vorgenommen. Es war anzu-

nehmen, daß diesbezüglich mit Motoren, die andersgeartete Klopfgrenzkurven ergeben, keine Übereinstimmung zu erzielen ist, nicht nur in der Reihenfolge der Bewertung, sondern auch in der absoluten Höhenlage der Klopfestigkeit.

~~Chemisch möglichst verschiedenartige Kraftstoffe unterschiedlicher Klopfestigkeit wurden auf ihr Klopfverhalten nach dem DVL Überladeverfahren in einem BMW 132 N Motor untersucht. Dieselben Stoffe wurden dann in einem Motor, der sowohl Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Reichgebiet als auch solche mit Tiefstpunkt bei $\lambda = 1,05$ ergibt, geprüft. Damit war die Möglichkeit gegeben, festzustellen, ob Abweichungen in der Bewertung der Kraftstoffe auf die unterschiedlichen Motoren oder auf die verschiedenartig gestalteten Formen der Klopfgrenzkurven zurückzuführen sind. Die daraus zu ziehenden Folgerungen hatten sich damit zu befassen, ob das DVL Überladeverfahren im BMW 132 N Motor als Bewertung von Kraftstoffen genügt oder ob gegebenenfalls die Prüfung auf ein anderes Motorenbaumuster ausgedehnt werden muß.~~

II. Allgemeines über Klopfverhalten und Klopf- grenzkurven.

~~An flüssigkeitsgekühlten Motoren durchgeführte Versuchsreihen zur Feststellung ihres Klopfverhaltens unter den einzelnen Betriebsbedingungen und mit verschiedenen Kraftstoffen ergaben zum Teil Klopfgrenzkurven, die mit dem gewohnten Bild solcher Kurven keine Ähnlichkeit mehr hatten. Die bisher allgemein gültig anerkannte Auffassung, daß unter allen Umständen, unabhängig von den Kraftstoffen und Betriebsbedingungen, die Klopfgrenzkurve nur in einer Form auftreten könnte, ließ sich auf Grund der durchgeführten Versuche nicht länger aufrecht erhalten.~~

Die bisher an Motoren erhaltenen Klopfgrenzkurven waren dadurch ausgezeichnet, daß unter allen Umständen der sogenannte Tiefstpunkt der Kurve, das ist jener Punkt, in welchem beim niedrigsten Ladedruck über den ganzen Bereich der Gemischein-

stellung noch Klopfen eintritt, in der Gegend des Luftverhältnisses von $\lambda = 1,05$ liegt. Von diesem Tiefpunkt aus nahm nun die Klopfestigkeit des Kraftstoffes in mehr oder minder geringem Maße zu und ergab das bekannte Bild von Klopfgrenzkurven. Sowohl die Lage des Tiefpunktes als auch der Anstieg der Klopfestigkeit konnte mit den Theorien und Überlegungen, die das Klopfen überhaupt zu deuten suchen, erklärt werden.

Von den verschiedenen Annahmen, die für die klopfende Abreaktion eines mehr oder minder großen Gemischrestes getroffen wurden, hat sich am besten die Verdichtungstheorie bewährt. Danach erhöht die von der Zündkerze ausgehende Flammenfront, die mit einer von der Güte der Gemischaufbereitung, dem Druck, der Temperatur, dem Luftüberschuß und letzten Endes der Verwirbelung abhängigen Geschwindigkeit fortschreitet, den Druck und die Temperatur des unverbrannten Gemisches. Dadurch treten in diesem Teile des noch nicht verbrannten Gemischrestes Reaktionen auf, die durch Bildung instabiler Produkte ketteneinleitend wirken und zu einer raschen Umsetzung führen. Der hierbei auftretende plötzliche Druckanstieg und seine Expansion im Verbrennungsraum erzeugte beim Auftreten der Gasmassen auf die Zylinderwände und den Kolben die für diesen Zustand charakteristischen Klopfgeräusche.

Nach der Verdichtungstheorie ist für das Einsetzen des Klopfens der thermodynamische Zustand des unverbrannten Kraftstoff-Luftgemisches maßgebend. Die Größen, welche die zur Selbstzündung des Kraftstoffes im unverbrannten Gemisch führende Temperaturgrenze bedingen, sind die Dichte und deren zeitliche Änderung, die Temperatur und deren zeitliche und örtliche Änderung, sowie die Gemischzusammensetzung und deren Veränderung. Wenn gleiche Betriebsbedingungen angenommen werden, z.B. beim Fahren einer sogenannten Kraftstoffschleife, so kann durch bloßes Verändern der Gemischzusammensetzung der Motor unter geeigneten Bedingungen aus dem klopfreien Gebiet zum Klopfen gebracht werden oder umgekehrt. Die Beeinflussung des Klopfverhaltens durch die Gemischzusammensetzung ergibt sich durch die Verschiedenheit der Endtemperatur des unverbrannten Gemischrestes, die durch

die Änderung des Quotienten C_p/C_v und durch die Unterschiede der Verbrennungstemperatur selbst hervorgerufen wird. Berechnungen über die Höhe der auftretenden Temperaturwerte und deren Veränderung wurden von Jost und seinen Mitarbeitern durchgeführt. Für ein Benzin mit dem mittleren Molgewicht 100 und der Zusammensetzung $(CH_2)_n$ fanden sie unter Berücksichtigung der Dissoziation der Verbrennungsgase und des genauen Verlaufes der spezifischen Wärme in Abhängigkeit des Luftverhältnisses die in Abb. 1 ersichtlichen Werte für die Endtemperatur des unverbrannten Gemischrestes. Die für die Einleitung des Klopfens höchste Temperatur des unverbrannten Gemisches liegt in der Gegend von $\lambda = 1,05$. Übereinstimmend damit zeigt auch eine in dieselbe Abbildung eingetragene Kraftstoffschleife erstmaligen Klopfereinsatz in dieser Gegend, sobald die den Klopfereinsatz begünstigenden Betriebsbedingungen überhaupt erreicht werden und das Klopfen selbst nur durch die Vorgänge im unverbrannten Gemischrest bedingt ist.

Das bekannte Bild von Klopfgrenzkurven nach dem DVL-Überladeverfahren kann man sich dann so entstanden denken, daß aus einer Anzahl von Kraftstoffschleifen bei verschiedenen, jedoch konstanten Ladedrücken die Punkte des jeweiligen Klopfereinsatzes und Austrittes entnommen und über dem Luftverhältnis aufgetragen worden sind. Der Tiefpunkt liegt analog dem erstmaligen Klopfereinsatz auf der Kraftstoffschleife ebenfalls bei $\lambda = 1,05$, wovon nach beiden Seiten ansteigend, entsprechend den bei höheren Ladedrücken früher einsetzenden und vom Kraftstoff und den sonstigen Betriebsbedingungen abhängigen Klopfereinsatz der weitere Kurvenzug ausgeht und den bekannten Kurvenverlauf einer Klopfgrenze ergibt.

Abweichend von dieser Form von Klopfgrenzkurven konnten solche gefunden werden, deren Tiefpunkt im extremen Reichgebiet liegend, einen fast geradlinigen Anstieg der Klopfestigkeit über den ganzen, mit dem Motor noch fahrbaren Bereich des Luftverhältnisses erkennen lassen. Eingehende Versuche mit verschiedenen Kraftstoffen und bei den unterschiedlichsten Bedingungen ergaben erschöpfend Aufschluß über die Ursachen, die diese Abweichungen vom normalen Klopfverhalten bedingen. Es zeigte sich, daß neben der chemischen Konstitution des Kraftstoffes einzig

und allein der thermische Zustand des Motors für diese Art von Klopfgrenzkurven verantwortlich ist. Sie sind daher nicht an das Vorhandensein eines flüssigkeitsgekühlten Motors gebunden. Genau so, wie es flüssigkeitsgekühlte Motoren, jedoch älterer Bauart oder bei besonderen Bedingungen gibt, die zufolge ihres hohen thermischen Gesamtzustandes Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt in der Gegend $\lambda = 1,05$ ergeben, können umgekehrt an luftgekühlten Motoren Kurven erhalten werden, deren Tiefstpunkt im extremen Reichgebiet liegt. Die für die Aufklärung des Verhaltens herangezogene Tröpfchentheorie von Callendar bot eine wertvolle Unterstützung und erlaubt die Deutung sämtlicher damit im Zusammenhang stehenden Erscheinungen. Es ist an dieser Stelle nicht möglich, die gesamte Abhängigkeit von Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Reichgebiet zu erläutern, noch die eingehende Theorie von Callendar und die daraus gezogenen Folgerungen zu bringen. Bloß auf die zur Erklärung der Erscheinung unbedingt nötige Tatsache soll hier eingegangen werden.

Die von Callendar nachgewiesene Steigerung der Peroxydbildung bei Gegenwart unverdampfter Kraftstofftröpfchen ist nach Abschluß größerer Versuchsreihen als maßgebend anzusehen für die Veränderung des Aussehens von Klopfgrenzkurven. In Abb. 2 sind zwei Klopfgrenzkurven aufgetragen, die von Motoren stammen, die eine gewisse konstruktive Ähnlichkeit miteinander besitzen und damit unmittelbar den Vergleich ermöglichen und die Unterschiede der Kurven erkennen lassen. Die eine Klopfgrenzkurve stammt vom DB 612 Schieber-Motor und zeigt das bisher bekannte Verhalten mit dem Tiefstpunkt in der Gegend von $\lambda = 1,05$. Ein konstruktiv ähnlicher Motor, der sich vom vorhergehenden nur durch die Ausbildung der Steuerung und die Größe der Ventilüberschneidung unterscheidet, der DB 601 E, ergab unter passend gewählten Betriebsbedingungen eine im Armgebiet nahezu gleiche Klopfgrenzkurve und ein Zusammenfallen seiner absoluten Klopfestigkeit in mm Hg Ladedruck im tiefsten Punkt mit der Klopfgrenzkurve des DB 612-Schiebermotors. Während hingegen der Schieber-Motor von seinem Tiefstpunkt aus den auf Grund der Abnahme des Temperaturwertes des Restgemisches erkennbaren Anstieg an Klopfestigkeit zeigt, fällt der DB 601 E

Motor von diesem Punkt weiter ab in seiner Klopfestigkeit und erreicht seinen Tiefstpunkt in der Gegend von $\lambda = 0,7$. Es ist ohne weiteres verständlich, daß die beiden einander ähnlichen Äste der Klopfgrenzkurve im Armgebiet durch dieselben Ursachen im Motor bedingt sind, wobei den verschiedenen thermischen Zuständen und der anders gearteten Steuerung der Motoren durch Wahl verschiedener Ladelufttemperatur Rechnung getragen ist. Von dem Augenblick jedoch an, in dem sich die beiden Kurven trennen, liegen die Verhältnisse grundsätzlich anders. Dem normalen Anstieg der Klopfestigkeit des Schiebermotors im Reichgebiet, bedingt durch die Temperatursenkung des unverbrannten Gemischrestes infolge Gemischanreicherung, steht der weiterhin abfallende Kurvenzug des Ventilmotors mit größerer Überschneidung der Steuerzeiten entgegen. Diese große Ventilüberschneidung von 120°KW im oberen Totpunkt ist jedoch als verantwortlich dafür anzusehen, daß infolge der vollkommenen Restgasausspülung und der zusätzlich kühlenden Wirkung der Spülluft der gesamte thermische Zustand des Motors niedriger geworden ist. Der während des Einspritzvorganges in den Zylinder gebrachte Kraftstoff hat daher nicht die Möglichkeit, während der ihm zur Verfügung stehenden Zeit restlos zu verdampfen. Vielmehr bleibt ein Teil des Kraftstoffes, der vom Grade der Gemischanreicherung und von den von außen einstellbaren Betriebsbedingungen abhängig ist, in unverdampfter Form, sozusagen in Tröpfchen vorhanden. Diese unverdampften Kraftstoffanteile bilden nun während des Verdichtungshubes gemäß der Theorie von Callendar und infolge der mit der Verdichtung hervorgerufenen Temperaturerhöhung Peroxyde, jene Substanzen, die als instabile Produkte für den Einsatz des Klopfvorganges als maßgebend anzusehen sind. Es ist infolge dessen durchaus verständlich, daß in einem Motor, welcher die das Klopfen erregenden instabilen chemischen Verbindungen nicht erst während der Flammenfortpflanzung im Brennraum bildet, sondern dieselben schon teilweise aus der Verdichtungsperiode und mithin aus den noch nicht gezündeten Gemisch mitbringt, das Klopfen damit wesentlich früher einsetzt. Dieser Zustand tritt an der in Abb. 2 aufgetragenen Kurve des Ventilmotors DB 601 E umso mehr in Erscheinung, je mehr der Motor durch Gemischanreicherung in das Gebiet des Kraftstoffüberschusses gebracht wird.

Es sind dann nämlich, bedingt durch den immer reichlicher eingespritzten Kraftstoff, der außerdem durch seine Verdampfungswärme die Temperatur der Füllung weiter erniedrigt, die unverdampften Kraftstoffteilchen als die Urheber der an ihnen auftretenden Peroxyde in einer größeren Anzahl vorhanden. Die Folge davon ist, daß der Ladedruck des Motors bei sonst gleich bleibenden Betriebsbedingungen immer mehr erniedrigt werden muß, um die klopf erzeugende Wirkung der Peroxyde zu kompensieren und den Motor gerade nur an der Klopfgrenze zu halten.

Betrachtet man nun an Hand der Abb.2 die Auswirkungen, die solche Vorreaktionen im Gemisch während des Verdichtungsstages auf die absolute Lage von Klopfgrenzkurven haben, ergibt sich folgendes. Wie bereits vorher erwähnt worden war, konnten Kurven verschiedenen Klopfverhaltens nur dadurch mit ungefähr gemeinsam gleicher Höhe im Gebiet $\lambda = 1,05$ erhalten werden, daß man solche verschiedener Ladelufttemperatur zum Vergleich genommen hat. Es ist die Klopfgrenzkurve des Schiebermotors bei 130°C Ladelufttemperatur eingezeichnet; den gleichen Verlauf und fast dieselbe absolute Klopfbarkeit im Armgebiet hat die Kurve des Ventilmotors bei 80°C Ladelufttemperatur. Dieser Unterschied in der Ladelufttemperatur zur Erreichung der gleichen Klopfbarkeit liegt trotz des aus dem Kurvenverlauf ersichtlichen höheren thermischen Zustandes des Schiebermotors in der Tatsache begründet, daß Motoren mit Schiebersteuerung bei gleicher Ausbildung des Verbrennungsraumes klopfbarer sind als solche mit Ventilen. Bei dieser angenommenen Lage gleichen Klopfverhaltens beider Motoren im Armgebiet ist die zwischen den beiden Kurven liegende Fläche ab des Bereiches $\lambda = 1,05$ als Verlust an Klopfbarkeit zu bezeichnen, der durch die infolge des niedrigeren Temperaturzustandes des Zylinders auftretende Peroxyde an den unverdampften Kraftstoffteilchen bedingt ist.

Betrachtet man vergleichsweise die ebenfalls in die Abb.2 eingetragene Klopfgrenzkurve des DB 601 E Motors bei 130°C Ladelufttemperatur, so fällt zuerst einmal der Anstieg an Klopfbarkeit mit zunehmender Ladelufttemperatur auf. Dadurch ist

wohl unter denselben Betriebsbedingungen der durch die schraffierte Fläche dargestellte Verlust an Klopfestigkeit geringer geworden. Völlig unerklärlich ist es jedoch auf den ersten Blick, wieso auf einmal mit zunehmender Ladelufttemperatur eine Erhöhung der Klopfestigkeit auftritt, eine Erscheinung, die mit der reinen Verdichtungstheorie als klopferegende Ursache nicht in Einklang zu bringen ist. Vergewärtigt man sich jedoch die vorher gebrachten Ausführungen über das Zustandekommen der Klopfgrenzkurve mit Tiefstpunkt im Reichgebiet, so wird das Verhalten durchaus verständlich. Da nämlich mit zunehmender Ladelufttemperatur die Verdampfung des Kraftstoffes während seiner Einbringung und Gemischaufbereitung eine bessere wird, nimmt der Anteil unverdampfter Teilchen ab, im gleichen Maße die an den Tröpfchen entstehenden Peroxyde und damit kann bei gleicher Gemischeinstellung der zur Erreichung derselben Klopfstärke nötige Ladedruck erhöht werden.

Es verdient eine Folgerung an dieser Stelle kurz Erwähnung, die sich aus dieser offensichtlich umgekehrten Temperaturempfindlichkeit von Kraftstoffen ergibt. In dem Bestreben, bei Flugmotoren sowohl die Leistung als auch die Volldruckhöhe zu steigern, sind die Umfangsgeschwindigkeiten von Ladern zur Erreichung des notwendigen Druckverhältnisses mehr und mehr erhöht worden; damit stiegen aber auch die Ladelufttemperaturen an. Als Abhilfe dagegen werden Ladeluftkühler vorgeschlagen, weil beim üblichen Klopfverhalten der Motor aus dem normalen Betriebszustand mit zunehmender Ladelufttemperatur ins Klopfgebiet kommen kann. Ganz gegenteilig verhält sich in diesem Falle ein Motor, der Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Reichgebiet ergibt, da bei derartigem Klopfverhalten der Ladedruck mit zunehmender Ladelufttemperatur nicht herabgesetzt zu werden braucht, um Klopfen zu verhindern. Wie umfangreiche Versuche ergeben haben, kann bei einer ganzen Reihe zweckmäßig ausgewählter Kraftstoffe sogar der Ladedruck soweit gesteigert werden, daß die durch die Temperatursteigerung der Ladeluft hervorgerufene Füllungsverminderung bis zum Erreichen gleicher Leistung wieder ausgeglichen wird.

Dieses grundsätzlich andere Klopfverhalten von Motoren legte zwingend den Gedanken nahe, die Kraftstoffbewertung nach dem DVL-Überladeverfahren dahingehend zu untersuchen, Es ist ohne weiteres denkbar, daß wegen des fundamentalen Unterschiedes, wie die Klopfgrenzkurven zustande kommen, nicht nur Verschiedenheiten in der absoluten Höhe der Klopfbarkeit zwischen den nach dem DVL-Überladeverfahren im BMW 132 Motor geprüften und den im jeweiligen Motor verwendeten gleichen Kraftstoffen auftreten; auch die Reihenfolge der Bewertung von Kraftstoffen kann sich ändern. Unterschiede in der Höhe der Klopfbarkeit können sich dadurch ergeben, daß die Temperaturempfindlichkeit von Kraftstoffen bei den beiden verschiedenen Formen von Klopfgrenzkurven gerade umgekehrt ist. Während Stoffe, nach dem DVL-Überladeverfahren im BMW 132 Motor geprüft, mit wachsender Ladelufttemperatur eine Abnahme der Klopfbarkeit zeigen, geben dieselben Stoffe fast einheitlich, im DB 601 E Motor geprüft, eine Steigerung des für die Klopfgrenze nötigen Ladedruckes. Aus denselben Gründen kann auch die Reihenfolge der Kraftstoffe, die nach der Lage der Tiefpunkte zueinander bewertet wird, eine recht unterschiedliche sein. Es soll zugegeben werden, daß durch glückliche Wahl der Betriebsbedingungen beim Prüfverfahren, vor allem durch geeignete Ladelufttemperatur, eine für diese Ladelufttemperatur wohl so einigermaßen übereinstimmende Bewertung der Kraftstoffe erreicht wird. Niemals jedoch sind diese hierbei gefundenen Verhältnisse auf die Praxis übertragbar, so bald sich die Betriebsbedingungen des Vollmotors von denen des Prüfmotors weitgehend, vor allem in der Ladelufttemperatur oder Ventilüberschneidung unterscheiden und der Prüfmotor nach dem Klopfverhalten mit dem Tiefpunkt bei $\lambda = 1,05$ bewertet, der Vollmotor vielleicht aber Klopfgrenzkurven mit abfallender Klopfbarkeit bis im Reichgebiet ergibt.

Auch die anderen noch im Gebrauch befindlichen Verfahren der Kraftstoffprüfung dürften nur beim Zusammentreffen günstiger Betriebsbedingungen vergleichbare Werte der mit ihnen erzielten Ergebnisse und dem Verhalten im jeweiligen Motor bringen. Bei der Bestimmung der Oktanzahl im CFR- oder I.G.Motor wird bekanntlich auf stärkstes Klopfen im Gebiet von $\lambda = 1,05$ eingestellt und der Kraftstoff durch Vergleich mit Mischungen gleichen Klopfverhal-

tens bewertet. Die Übereinstimmung von Resultaten der O.Z.-Bewertung mit denen der Praxis war schon mit den bisher vorliegenden Ergebnissen des DVL-Überladeverfahrens keine besonders gute und dürfte sich aller Wahrscheinlichkeit für Motoren, die Klopfgrenzen mit Tiefstpunkt im Reichgebiet ergeben, kaum verbessern. Bezüglich der Bewertung von Kraftstoffen nach dem Oppauer Verfahren liegen vergleichende Ergebnisse nicht vor, doch dürfte man ähnlich argumentieren können. Auch dieses Prüfverfahren legt Klopfgrenzkurven mit dem Tiefstpunkt $\lambda = 1,05$ zu Grunde, weshalb die Übertragbarkeit von Ergebnissen auf Motoren mit andererarteter Klopfverhalten ebenfalls nur mit Einschränkungen und ohne Gewähr gegeben sein dürfte. Um die Abweichungen der Bewertungen untereinander festzustellen, wurde daraufhin eine größere Anzahl von Kraftstoffen mit möglichst unterschiedlichem chemischen Aufbau verschiedener Klopfbarkeit nur nach dem DVL-Überladeverfahren in beiden Motoren untersucht. Die Stoffe selbst sowie die dabei eingehaltenen Versuchsbedingungen sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

III. Versuchsdurchführung.

Motoren und Versuchsbedingungen waren durch den Rahmen der gestellten Aufgabe gegeben. Zur Bewertung der Kraftstoffe nach dem DVL-Überladeverfahren diente der BMW 132 N-Motor, auf einem Vollmotoren Sterngehäuse aufgebaut unter den bekannten Bedingungen. Diese sind der Vollständigkeit halber im Motordatenblatt I eingetragen.

Als Vergleichsmotor diente ein flüssigkeitsgekühlter Zylinder des Baumusters DB 601, aufgebaut auf einem DVL-Einzylinder-Prüfstand, der durch Wahl passender Betriebsbedingungen dahin gebracht werden war, Klopfgrenzkurven von Kraftstoffen mit dem Tiefstpunkt im Reichgebiet zu liefern. Zu diesem Zweck wurde die Ventilüberschneidung auf 120°KW im oberen Totpunkt vergrößert und damit ein genügend kühler thermischer Zustand des Motors erreicht trotz Beibehaltung der Ladelufttemperatur des DVL-Überladeverfahrens von 130°C . Um die absoluten Ladedrücke nicht übermäßig ansteigen zu lassen, wurde zur Absenkung der Klopfbarkeit der Kraftstoffe die Verdichtung um einen geringen Betrag auf $\epsilon = 7,2$

erhöht. Mit dieser Maßnahme wurde erreicht, daß sogar von sehr klopfesten Kraftstoffen noch soviel Punkte gefahren werden konnten, um ein einwandfreies Durchziehen der Kurven durch die Meßpunkte zu gewährleisten. Wesentliche Unterschiede in der Bewertung der Kraftstoffe durch diese geringfügige Erhöhung der Verdichtung waren auf Grund durchgeführter Versuche in der DVL nicht zu befürchten. Im Rahmen der gestellten Versuchsaufgabe war es wichtig, das Verhalten des flüssigkeitsgekühlten Motors zu untersuchen, nicht nur im Hinblick auf sein Klopfverhalten mit Tiefstpunkt im Reichgebiet, sondern auch bei normaler Lage des Tiefpunktes der Klopfgrenzkurve bei $\lambda = 1,05$. Zu diesem Zwecke wurde unter Beibehaltung seiner sämtlichen übrigen Betriebsbedingungen sein thermischer Zustand auf ein höheres Niveau gebracht durch Verkleinerung der Ventilüberschneidung. Mit einer solchen von 40°KW im oberen Totpunkt konnten sämtliche Klopfgrenzkurven mit dem Tiefstpunkt bei $\lambda = 1,05$ erhalten werden.

Die übrigen Daten des DB 601 Motors sowie die anderen eventuell interessierenden Angaben des Motors sowie beider Prüfstände und Nebeneinrichtungen sind in dem bereits erwähnten Motordatenblatt I mit verzeichnet.

Bei der Auswahl der Kraftstoffe wurde hauptsächlich das Augenmerk auf möglichst unterschiedliche chemische Zusammensetzung sowie auf verschiedene Klopfestigkeit gelegt. Die nach diesem Gesichtspunkten ausgesuchten Betriebsstoffe, teils als reine Stoffe, teils als Gemische aus 2 und mehr Komponenten verwendet, sind nebst ihren wichtigsten Analysendaten in der Tafel II zu finden. Richtungsweisend für die Analyse der Kraftstoffe waren die Bauvorschriften für Flugmotoren, Prüfvorschriften für Flugmotorenkraftstoffe, Ausgabe Oktober 1940.

IV. Versuchsergebnisse.

Die in der Tafel II verzeichneten Kraftstoffe wurden unter den in der "Versuchsdurchführung" beschriebenen Bedingungen in den einzelnen Motoren gefahren. Die erhaltenen Klopfgrenz-

kurven sind für je eine Gruppe von Kraftstoffen in den folgenden Abbildungen aufgetragen, wobei zur besseren Gegenüberstellung die gleichen Kraftstoffe, jedoch für die verschiedenen Motortypen, in einem Bild zusammengefaßt sind. So zeigt Abb. 3 die Klopfgrenzkurven in mm Hg Ladedruck über dem Luftverhältnis für die einheitlichen Stoffe und die BS-Gemische für die Motoren BMW 132 B⁺) mit 40^oKW und DB 601 mit 40^oKW und 120^oKW Ventilüberschneidung. Abb. 4 bringt die aus 2 oder mehr Einzelkomponenten hergestellten Gemische, alle mit 0,12 Vol.-% BTA-Gehalt für dieselben Motortypen und in der gleichen Auftragungsform.

~~Bevor auf die Diskussion der Abbildungen im einzelnen eingegangen wird, soll kurz auf die in diesem Falle zweckmäßige Auftragung der Klopfgrenzkurven in mm-Hg-Ladedruck über der Luftüberschusszahl sowie auf die Fehler, die sich aus der Art der Bestimmung des Luftverhältnisses ergeben, eingegangen werden.~~

~~Früher durchgeführte Versuche zur Feststellung des Einflusses der Ventilüberschneidung haben ergeben, daß beim Vorliegen von Klopfgrenzkurven mit dem Tiefpunkt im Reichgebiet der mittlere, an der Klopfgrenze selbst erzielbare Nutzdruck keine zweckmäßige Bewertungsgrundlage mehr bietet. Es hatte sich nämlich hierbei herausgestellt, daß die Klopfgrenzkurven derartiger Charakteristik, sobald sie in p_{me} über λ aufgetragen werden, gänzlich unbeeinflusst von der Verschiedenheit der jeweils gefahrenen Ladelufttemperatur bleiben und über den größten Teil des interessierenden Bereiches der Luftüberschusszahl zur Deckung kommen. Damit wäre im vorliegenden Falle eine Bewertung von Kraftstoffen nach der absoluten Höhe ihrer Klopfbarkeit oder ein Vergleich der Reihenfolge der Kraftstoffe untereinander noch weitgehend erschwert worden, wenn nicht gar unmöglich gewesen. Es sind nämlich bei Vorhandensein von Klopfgrenzkurven mit dem Tiefpunkt bei $\lambda = 1,05$ die absoluten Höhen in Bezug auf Klopfbarkeit neben anderen Umständen weitgehend von der mehr oder minder großen Temperaturempfindlichkeit der Kraftstoffe bestimmt, gleichgültig, ob die Werte in mm Hg Ladedruck oder in kg/cm^2 mittlerer Nutzdruck aufgetragen sind.~~

+) Die Werte wurden von Dr. F. Seeber ermittelt.

Dieser Fall würde eintreten beim BMW 132 Motor und beim DB 601 Motor mit 40°KW Ventilüberschneidung und der Ladelufttemperatur von 130° C. Klopfgrenskurven des DB 601 Motors mit 120°KW Ventilüberschneidung zeigen jedoch bei der Auftragung in p_{me} über λ für aromatenarme Stoffe gänzliche Temperaturunempfindlichkeit. Während nun bei Vorliegen von Klopfgrenskurven mit gleichgeartetem Verhalten auch bei wechselnder Ladelufttemperatur ein Vergleich von Kraftstoffen in nicht zu unterschiedlichen Motoren mit Rücksicht auf ihre Bewertungsreihenfolge ohne zu große Einschränkungen noch möglich ist, fehlt sie in anderen Falle ganz. Es könnte nicht mehr als zweckmäßig bezeichnet werden, eine durch die Temperatur und Auftragsform bedingte Höhe der Klopfestigkeit eines Kraftstoffes in einem Motor mit der Kurve desselben Kraftstoffes, jedoch mit Charakteristik, Tiefpunkte im Reichgebiet, zu vergleichen, die vom dem Werte der gefahrenen Ladelufttemperatur unabhängig ist. Selbst bei geringen Änderungen der Ladelufttemperatur wäre die Bewertungsreihenfolge jedesmal eine andere. Aus diesen Gesichtspunkten heraus wurde auf die Eintragung der p_{me} Werte im vorliegenden Bericht erstmalig gänzlich verzichtet.

Zur Bestimmung der Luftüberschußzahl aus den tatsächlich am Motor gemessenen Werten wäre folgendes zu sagen. So zweckmäßig der Vergleich von Klopfgrenzkurven untereinander in der Auftragsform über λ ist, da sie leistungsmäßige Unterschiede der Motoren untereinander, Unterschiede der Hubraumgrößen und Verschiedenartigkeiten der Betriebsbedingungen weitestgehend außer Acht läßt, so schmerzlich muß es jedoch empfunden werden, daß die Werte des gerechneten Luftverhältnisses falsch sind. Mit der bisherigen Methode der Berechnung wird die gesamte durch den Motor gehende und vom Luftmengenmeßgerät angezeigte Luftmenge zum gemessenen Kraftstoff ins Verhältnis gesetzt. In dieser Luftmenge ist jedoch auch der Spülluftanteil enthalten, der nicht nur von der Größe der Ventilüberschneidung und der Drehzahl, sondern auch vom Verhältnis Ladedruck zu Auspuffgedruck verschieden ist, d.h. beim Fahren von Klopfgrenskurven mit den dabei auftretenden unterschiedlichen Ladedrücken ist der gerechnete Wert des Luftverhältnisses sogar jedesmal um einen anderen Betrag falsch. Versuche, die da-

hingehend unternommen wurden, aus vorliegenden Kurvenblättern den jeweiligen Spülluftanteil größenordnungsmäßig für die einzelnen Motortypen zu erfassen und damit aus der gemessenen Gesamtluftmenge zu eliminieren, brachten wenig erfreuliche Resultate und wurden nach einiger Zeit als zwecklos aufgegeben. Solange nicht eine einwandfreie Möglichkeit zur Bestimmung des tatsächlich vom Motor zur Verbrennung benötigten Luftgewichtes vorhanden ist, wird man sich daher wohl oder übel mit den Unzulänglichkeiten der bisherigen Auftragsform abfinden müssen.

Im vorliegenden Falle sind daher die nachfolgend gezogenen Feststellungen aus dem Klopfverhalten nur dann als absolut einwandfrei zu bezeichnen, sobald es sich um die Bewertungsreihenfolge tatsächlicher Tiefpunkte bei $\lambda = 1,05$ handelt. Diese Punkte mögen sogar auch falsch gerechnete λ -Werte besitzen, aber zufolge ihrer eindeutigen Höhenlage sind sie als Bewertungsmaßstab untereinander durchaus zu gebrauchen. Nicht mehr als völlig einwandfrei sind hingegen die aus den Klopfgrenskurven mit Tiefpunkt im Reichgebiet entnommenen und zum Vergleich bei $\lambda = 1,05$ genommenen Werte zu bezeichnen. Es ist daher dieser Punkt bei Betrachtung der nachfolgenden Abbildungen mit in Betracht zu ziehen.

Zuerst sind in Abb. 5 die tatsächlichen Tiefpunkte beider Motoren zueinander ins Verhältnis gesetzt. In diesem Falle sind auf eine Achse die Werte der Klopfestigkeit bei $\lambda = 1,05$ für den BMW-132-N-Motor aufgetragen, während die andere Achse die beim DB 601 Motor mit 40⁰ KW Ventilüberschneidung erhaltenen Tiefpunkte enthält. Bei einer oberflächlichen Betrachtung könnte man ohne weiteres annehmen, daß bei der verhältnismäßig guten Lage der einzelnen Punkte der Klopfestigkeit die Übereinstimmung in der Bewertung eine recht gute ist. Mit wenigen Ausnahmen liegen sämtliche Punkte auf einer Kurve; einige Kraftstoffe fallen wohl heraus, und es würde sich ohne weiteres der Mühe lohnen, die Ursache dieser Unregelmäßigkeiten zu erforschen und aufzuklären, warum gerade dieser oder jener Kraftstoff die ansonsten auf den ersten Blick zweifelsohne vorhandene Gesetzmäßigkeit stört. Vorher

soll jedoch noch eine Betrachtung der Ergebnisse des BMW 132 N und des DB 601 E Motors erfolgen. Abb.6 zeigt in der analogen Gegenüberstellung die im Gebiet $\lambda = 1,05$ erhaltenen Werte der Klopfestigkeit, wobei jedoch nochmals in Erinnerung gebracht werden soll, daß beim BMW 132 N Motor in der Gegend des stöchiometrischen Luftverhältnisses tatsächlich ein Tiefstpunkt vorhanden ist, beim DB 601 E Motor jedoch bei der gefahrenen Ladelufttemperatur von 130°C von einem Tiefstpunkt bei $\lambda = 1,05$ zufolge der Eigenart der hierbei erhaltenen Klopfgrenzkurven nicht mehr gesprochen werden kann. Unabhängig von der Unmöglichkeit, bei Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Reichgebiet den exakten $\lambda = 1,05$ Punkt zu ermitteln, sollen die aus den Kurven entnommenen Werte auch nur den Beweis dafür erbringen, ob ein Vergleich der an beiden Motoren erhaltenen Werte als gegeben anzusehen ist. Ein Blick auf die Abb.6 zeigt wieder, daß fast sämtliche Punkte der entnommenen Klopfestigkeitswerte recht gut auf einer Kurve liegen und nur wenige Kraftstoffe aus der Reihe fallen. Die Stoffe, die herausfallen, sind zwar andere als in Abb.5, nachdem dort z.B. die Kraftstoffgemische K 151 und K 132 im BMW Motor recht gut, im DB 601 dafür ziemlich schlecht bewertet werden. In Abb.6 liegen die beiden oben genannten Gemische recht ordentlich auf der Kurve, dafür sind jedoch das B1/Bo Gemisch und Bich C 3 im DB 601 recht günstig bewertet gegenüber dem BMW 132 Motor und fallen weit heraus. Es ließe sich bei entsprechenden durchgeführten Versuchen auch hierfür eine exakte Erklärung finden; vorweggenommen kann jedoch bereits werden, daß gerade das Herausfallen von zwei aromatenhaltigen Kraftstoffgemischen, B1/Bo und C 3, seinen Grund in ihrer sogenannten Temperaturempfindlichkeit haben kann. Als flüssigkeitagekühlter Motor neuerer Konstruktion besitzt der DB 601 zweifelsohne einen niedrigeren thermischen Gesamtzustand bei sonst gleichen Betriebsbedingungen, und damit ist auch bei der großen Temperaturempfindlichkeit von hoch aromatenhaltigen Kraftstoffgemischen ohne weiteres die vorläufig genügende Erklärung für ihr Herausfallen aus der Kurve gegeben.

Ein Umstand, der jedoch an der Abb.6 Grund zu Bedenken gibt im Vergleich mit Abb.5, ist die Tatsache, daß die Neigung der Kurve, auf der die einzelnen Meßpunkte liegen, eine völlig andere geworden ist. Theoretisch müßte sich bei völliger Übereinstimmung der aus beiden Motoren erhaltenen Ergebnisse eine Gerade ergeben, die bei gleicher Bewertung der Kraftstoffe in beiden Motoren und bei gleichem Auftragsmaßstab unter 45° geneigt ist und durch den Schnittpunkt des Achsenkreuzes geht. Abb.5 zeigt Abweichungen hiervon; die Gerade geht erstens nicht durch den Schnittpunkt, was zweifelsohne in der durch die Verschiedenartigkeit der Konstruktion bedingten unterschiedlichen Bewertung der Kraftstoffe in beiden Motoren begründet ist. Durch passende Wahl der Betriebsbedingungen wurde zwar ein annähernd gleiches Verhalten des als Bezugskraftstoff genommenen Eich-B-4 im BMW 132-N, DB 601 A und DB 601 E erreicht, deshalb ist die Verschiebung der Geraden gegenüber dem Ursprung auch relativ gering; es bewertet in Abb.5 der BMW 132 Zylinder die Kraftstoffe günstiger, und es ist ohne weiteres verständlich, daß für den Fall, in dem bei den verhältnismäßig niederen Ladedrücken schon keine Übereinstimmung des Bezugskraftstoffes zu erreichen war, mit zunehmender Überladung die Abweichungen der anderen Kraftstoffe zu mindestens im selben Ausmaß erhalten bleiben oder wahrscheinlich sogar größer werden. Damit wäre eine Abweichung der gefundenen Kurve in ihrer Neigung gegenüber der Sollkurve erklärt, und es könnte sehr einfach für das Verhalten von Kraftstoffen in beiden Motoren in Bezug auf die Bewertung ihrer Klopfestigkeit im Tiefstpunkt ein konstanter Wert gefunden werden, der zur Umrechnung der in einem Motor gefundenen Werte auf den anderen dient. Diese einfache Methode wird jedoch sofort hinfällig, wenn man Abb.6 und die durch die Lage der entnommenen Meßpunkte bedingte Kurve betrachtet. Daß die gefundene Kurve nicht durch den Ursprung geht und diesmal eine Abweichung nach der anderen Seite zeigt, d.h. hier der DB 601 E Zylinder die Kraftstoffe günstiger in Bezug auf ihr Klopfverhalten bewertet, könnte noch mit der durch die hohe Ventilüberschneidung bedingten Herabsetzung des thermischen Gesamtzustandes des Zylinders argumentiert werden. Die andere, allerdings recht bedeutungsvolle Tatsache ist darin zu sehen,

daß die Neigung der aus den Meßpunkten entnommenen Kurve gegenüber der Sollkurve (45°) eine andere geworden ist, und zwar derartig, daß diesmal der DB 601 Zylinder mit 120⁰ KW Ventilüberschneidung die Kraftstoffe bezüglich ihres Klopfverhaltens günstiger bewertet. Es könnte hierbei allerdings noch geltend gemacht werden, daß die Entnahme der $\lambda = 1,05$ Tiefpunkte aus den Klopfgrenzkurven des BMW 132 N Motors von tatsächlich vorhandenen niedrigsten Werten der Klopfgrenzkurve erfolgt ist, unabhängig davon, ob das Luftverhältnis falsch oder richtig ermittelt worden ist und daher vollauf zu Recht besteht. Da der DB 601 E Motor in der Gegend des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses keinen Tiefpunkt bei den gefahrenen Betriebsbedingungen besitzt und die Punkte aus gerechneten $\lambda = 1,05$ Werten entnommen wurden, besteht die Wahrscheinlichkeit, daß hierdurch die Neigung der Kurve in Abb.6 verfälscht worden ist. Nimmt man eine unrichtige λ -Bestimmung von 10% an und würde diese Werte in die Abb.6 eintragen, so erhält man wohl eine geringere Steigung der Kurve; sie ist jedoch noch wesentlich steiler als die Kurve in Abb.5 und würde die Umrechnung der gefundenen Kraftstoffwerte des BMW 132 N Motors nur unter Zuhilfenahme einer anderen Konstanten ermöglichen.

Es soll noch der Versuch gemacht werden, die tatsächlich vorhandenen Tiefpunkte beider Motoren ins Verhältnis zu setzen. In Abb.7 sind hierzu die aus den Klopfgrenzkurven des BMW 132 N Motors bei $\lambda = 1,05$ vorhandenen geringsten Werte der Klopfbarkeit in mm Hg Ladedruck und die vom DB 601 E Motor stammenden Tiefpunkte der Klopfgrenzkurven, die im Reichgebiet liegen, ins Verhältnis gesetzt. Man sieht, daß die durch die entnommenen Meßpunkte gelegte Kurve diesmal fast durch den Nullpunkt geht und der geforderten 45-grädigen Neigung der Sollkurve am nächsten kommt. Gegenüber den Abb.5 und 6 bedeutet dies jedoch eine abermalige Abweichung, und es würde sich damit auch diesmal eine andere Konstante für die Umrechnung der Klopfbarkeit der Kraftstoffe in den beiden Motoren ergeben. Man kann daher mit Bestimmtheit die Unzulänglichkeit des Beginns, die Kraftstoffbewertung in Bezug auf absolute

Werte der Klopfestigkeit nach dem DVL-Überladeverfahren im BMW 132 N auf Motore mit anders gearteten Klopfgrenzkurven unter Zuhilfenahme eines Umrechnungsfaktors zu übertragen, zum Ausdruck bringen. Bei der Verschiedenartigkeit der Umstände, die das Zustandekommen des Klopfens an beiden Motoren bedingen, ist es auch ausgeschlossen, jemals eine vollständige Übereinstimmung der Bewertungsreihenfolge oder der Höhe der Klopfestigkeitswerte selbst zu erzielen. Die teilweise vorhandenen Ansätze zu einem günstigen Resultat, die vielleicht aus den Abb. 5 bis 7 herauszulesen sind, sind ein verhängnisvoller Irrtum, der im Folgenden eindeutig bewiesen werden soll.

Man muß sich nochmals vergegenwärtigen, daß nach der Verdichtungstheorie für die Erklärung des Klopfens der thermodynamische Zustand des unverbrannten Kraftstoff-Luftgemischrestes maßgebend ist und sich Klopfgrenzkurven, entstanden vorwiegend durch Reaktionen im Gemischrest, mit Tiefpunkt bei $\lambda = 1,05$ ergeben. Die Temperaturgrenze, die zur klopfenden Abreaktion des Gemischrestes führt, wird bei Erhöhung der Ladelufttemperatur schneller erreicht. Mit anderen Worten, eine Erhöhung der Ladelufttemperatur erfordert eine Herabsetzung des Ladedruckes, um denselben thermodynamischen Zustand des Gemischrestes, seine erstmalige Abreaktion an der Klopfgrenze, zu erreichen. Nach der Arbeitshypothese des Einflusses von Kraftstofftröpfchen werden in dem Zustand beginnender Vorreaktionen während der Verdichtungsperiode dieselben umso mehr vermindert, je geringer die Menge unverdampfter und zu Vorreaktionen neigender Anteile des Kraftstoffes ist, d.h. bei Temperatursteigerung der Ladeluft. Um diesmal denselben, zur erstmaligen Abreaktion an der Klopfgrenze führenden Zustand des Gemischrestes zu erreichen, muß der Ladedruck gesteigert werden trotz gleichzeitiger Temperaturerhöhung der Ladeluft.

Es sind nun 2 Motoren vorhanden, von denen der eine ein Klopfverhalten in bisher bekanntem Sinne der Art zeigt, daß mit zunehmender Ladelufttemperatur die Klopfestigkeit der Kraftstoffe abnimmt. Der andere Motor verhält sich gegenteilig und läßt mit zunehmender Ladelufttemperatur ein An-

wachsen der Klopfestigkeit erkennen. Ein Vergleich ein und desselben Kraftstoffes in Bezug auf sein Klopfverhalten in diesen beiden Motoren ist dann schwer durchzuführen. Die Prüfung eines beliebigen Kraftstoffes erfolge einmal in beiden Motoren bei verhältnismäßig geringen Werten der Ladelufttemperatur, beispielsweise 50°C , ein Wert, der in der Praxis an Vollmotoren ohne weiteres anzutreffen ist. In diesem Fall wird der Motor mit normalem Klopfverhalten den Kraftstoff recht gut bewerten, während die Klopfestigkeit desselben Kraftstoffes, ausgedrückt in mm Hg Ladedruck im anderen Motor, mit aller Wahrscheinlichkeit darunter liegen wird. - Und eine ganze Reihe von Kraftstoffen mit verschiedener Klopfestigkeit in diesen beiden Motoren bewertet, gibt einen Kurvenzug, der eine wesentlich flachere Neigung haben wird als die bei gleichem Auftragsmaßstab und gleicher Bewertung der Kraftstoffe zu erwartende Sollkurve unter 45° Neigung. Ein nächstes Mal soll die Prüfung desselben Kraftstoffes bei hoher Ladelufttemperatur erfolgen, angenommen 160°C , ein ebenfalls an Vollmotoren noch anzutreffender Wert. Der Motor mit dem normalen Klopfverhalten wird jetzt zufolge der hohen Ladelufttemperatur diesen Kraftstoff schon rechtungünstig in seiner Klopfestigkeit bewerten, während in dem Motor mit den Vorreaktionen an unverdampften Kraftstoffteilchen während der Gemischauflbereitung zufolge des Rückganges an Kraftstofftröpfchen durch die hohe Ladelufttemperatur eine im Verhältnis zum anderen Motor recht günstige Klopfestigkeit erreichbar ist. Die Prüfung, abermals auf eine Reihe von Kraftstoffen ausgedehnt, ergibt einen Kurvenzug mit größerer Neigung als die Sollkurve. Diese Versuche könnte man nun auf einige dazwischen liegende Ladelufttemperaturen ausdehnen, und es wird sich dann auch bei passend gewählter Ladelufttemperatur der Fall ereignen, daß die aus den Vergleichsversuchen stammende Kurve mit der Sollkurve in der Neigung übereinstimmt. Dies ist jedoch ein Einzelfall, der für die betreffende Ladelufttemperatur Gültigkeit hat und nicht dazu verleiten darf, dieses einmalige Zusammentreffen von Sollkurve und Versuchskurve gleicher Neigung dahin auszulegen, daß nun die Kraftstoffbewertung von einem Motor mit Klopfgrenzkurven bei $\lambda = 1,05$ auf einen anderen Motor mit Klopfgrenzkurven, deren Tiefstpunkt im Reichgebiet liegt, übertragen werden darf.

Eine abschliessende Versuchsreihe mit verschiedenen Kraftstoffen bestätigte vollinhaltlich die oben gemachten Überlegungen und soll im Folgenden noch kurz kommentiert werden. Abb.8 enthält die Klopfgrenzkurven über einen größeren Bereich der Ladelufttemperaturen für den Motor BMW 132 N und die Kraftstoffe C 1, C 3 und VT 702, Abb.9 dieselben Kraftstoffe im Motor DB 601 mit 120°KW Ventilüberschneidung. Ein Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, daß die Klopfgrenzkurven aller Kraftstoffe im BMW 132 N Motor ihren Tiefstpunkt bei $\lambda = 1,05$ haben und dementsprechend mit steigender Ladelufttemperatur eine Abnahme der Klopfestigkeit festzustellen ist. Umgekehrt sieht man an den Klopfgrenzkurven des DB 601 8 Zylinders in Abb.9 das Abwandern des Tiefstpunktes in das Reichgebiet und damit die zunehmende Klopfestigkeit aller Kraftstoffe mit steigender Ladelufttemperatur. Für das Gebiet des stöchiometrischen Luftverhältnisses wurden aus den Klopfgrenzkurven die Werte des Ladedruckes in mm Hg Ladedruck entnommen und in Abb.10 einander gegenübergestellt. Wie man sieht, sind die zugehörigen Punkte gleicher Ladelufttemperatur gut durch eine Kurve zu verbinden, die jedoch für jede Ladelufttemperatur eine andere Neigung hat. Der Sollkurve entspricht ungefähr die Kurve, die durch die Punkte für 130°C Ladelufttemperatur gezogen ist. Die Punkte der anderen Ladelufttemperaturen liegen mehr oder minder geneigt gegen die Sollkurve, und die Größe der Abweichung der Neigung gegenüber der Sollkurve gibt einen Anhaltspunkt dafür, wie groß die unterschiedliche Bewertung der Temperaturabhängigkeit ein und desselben Kraftstoffes in den zwei verschiedenen Motoren ist. Es geht aus der Abb.10 mit aller Deutlichkeit hervor, daß bei der Ladelufttemperatur von 130°C , wie sie beim DVL-Überladeverfahren angewendet wird, ein zufälliges, mehr oder minder günstiges Übereinstimmen der Klopfestigkeitswerte von Kraftstoffen in verschiedenen Motoren erreicht werden kann, sobald nur die Tiefstpunkte zueinander in Beziehung gebracht werden. Jede allerdings darüber oder darunter liegende Ladelufttemperatur bringt Abweichungen, die umso größer werden, je mehr die Ladelufttemperatur von der Prüftemperatur von 130°C abweicht.

~~Über die Möglichkeit, das DVL-Überladeverfahren in seiner bisherigen Form beizubehalten, und in welchen Bereichen es als unzureichend anzusehen ist, kann abschliessend folgendes ausgesagt werden. Sobald es sich bloß darum handelt, sich überhaupt ein Bild über die Klopfestigkeit zu machen, ist die bisherige Art der Durchführung der Überladeprüfung in einem einzigen Motorenzylinder ohne weiteres zu vertreten. Es mögen die Unterschiede der Bewertung eines Kraftstoffes in verschiedenen Motoren noch so groß sein oder sich gar ein gegensätzliches Temperaturverhalten in den jeweiligen Zylindern einstellen, einen Anhaltspunkt für die Klopfestigkeit an und für sich gibt das DVL-Überladeverfahren im BMW 132 N-Zylinder immer. Eine Bestimmung der Reihenfolge der Bewertung von Kraftstoffen nach ihrem Klopfverhalten in einem anderen Motor, der Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Reichgebiet ergibt, auf Grund von Ergebnissen des DVL-Überladeverfahrens im BMW 132 N-Zylinder ist teilweise möglich, wobei folgende Einschränkungen zu beachten sind. Stoffe mit geringen Aromatengehalten verändern, wie Abb. 5 bis 7 zeigten, ihre Bewertungsreihenfolge nicht, ob sie nun im BMW oder DB-Zylinder untersucht wurden. Mit zunehmendem Aromatengehalt sind jedoch Abweichungen zu erkennen, die bei Hocharomaten ganz beträchtliche Ausmaße annehmen können. Man braucht bloß die Abb. 5 bis 7 zur Betrachtung heranziehen, in denen die Kraftstoffe Eich C 3, das Bi/Bo Gemisch und die beiden isoproyl-benzolhaltigen Gemische M 131 und M 132 völlig aus dem Rahmen herausfallen. Hierbei ist für die Kraftstoffe C 3 und Bi/Bo noch eine Erklärung zu finden, da ihre außerordentlich günstige Bewertung in Bezug auf Klopfestigkeit auf die durch den Aromatengehalt bedingte Temperaturempfindlichkeit zurückzuführen ist. Die Motore BMW 132 N und DB 601 A mit annähernd gleichem Temperaturniveau ergeben fast gleiche Werte der Klopfestigkeit, wie Abb. 5 zeigt und das starke Absinken der thermischen Innenbelastung beim DB 601 E läßt die in den Abb. 6 und 7 erkennbare Zunahme der Klopfestigkeit dieser temperaturempfindlichen Stoffe für diesen Motor erkennen. Unerklärlich hingegen ist das Verhalten der Gemische M 131 und M 132, die laut Abb. 5 im BMW Motor recht günstig bewertet werden, jedoch den ihrer~~

~~Wärmeempfindlichkeit zukommenden entsprechenden Anstieg~~
der Klopfestigkeit im kühleren DB 601 E Zylinder vermissen
lassen. Für die Feststellung der Klopfestigkeit nach dem
DVL-Überladeverfahren ergibt sich, daß B1/Bo und C 3 un-
terbewertet wird und daher die Beurteilung auf der siche-
ren Seite liegt. Hingegen wurden Gemische mit höherem Gehalt
an Isopropyl-Benzol zu günstig beurteilt, sodaß sich beim
Zusammentreffen ungünstiger Umstände im DB-601-Motor Störun-
gen einstellen können. Inwiefern ähnliche Erscheinungen bei
anderen Kraftstoffen noch auftreten werden, müssen weitere
Untersuchungen ergeben. Es sei an dieser Stelle nur nach-
drücklich auf diese Möglichkeit hingewiesen. Stoffe, die aller-
Voraussicht nach derartige Abweichungen zeigen werden, lassen
sich auf Grund einer einfachen chemischen Aromatenbestimmung
im vorhinein dementsprechend eliminieren und es dürfen dann
ihre Klopfestigkeitswerte aus den am BMW 132 N-Zylinder er-
haltenen Klopfgrenzkurven nicht mehr zur Feststellung der Be-
wertungsreihenfolge verwendet werden.

~~Nicht verwechselt mit der Bewertungsreihenfolge darf~~
~~jedoch die absolute Höhe der Klopfestigkeit werden. Und dieses~~
~~ist einer der Punkte, bei denen die Übertragbarkeit der Ergeb-~~
~~nisse aus dem Überladeverfahren im BMW-Zylinder unsicher zu~~
~~werden beginnt. Bei den heutigen leistungsgezüchteten Flugmo-~~
~~toren, deren Regelkurve unter geschicktester Auslegung aller~~
~~möglichen Feinheiten oft in bedenklicher Nähe eines Klopfge-~~
~~bietes liegt, sind Klopfestigkeitswerte auf Grund der bloßen~~
~~Übertragung von Meßwerten als höchst bedenklich zu bezeichnen.~~
~~In diesem speziellen Falle sind Untersuchungen des Kraftstoffes~~
~~über sein Klopfverhalten in den interessierenden Bereichen~~
~~in dem betreffenden Motorenbaumuster unerlässlich. Es ist~~
~~schliesslich ganz ausgeschlossen, aus dem temperaturmäßigen~~
~~Verhalten eines Kraftstoffes im BMW-Zylinder Rückschlüsse auf~~
~~die Temperaturabhängigkeit in Motoren zu ziehen, die zufolge~~
~~ihrer geringeren thermischen Innenbelastung anders geartete~~
~~Klopfgrenzkurven mit verändertem Temperaturverhalten ergeben.~~
~~Es müßte daher bei allen Fragen, die das Temperaturverhalten~~
~~und die Erstreckung des Klopfgebietes für beide Formen von~~
~~Klopfgrenzkurven über einen größeren Bereich des Luftverhält-~~
~~nisses betreffen, unbedingt die Untersuchung des Kraftstoffes~~

auch in einem Motorenzylinder anderer Bauart vorgenommen werden, der über den ganzen interessierenden Bereich die Erscheinung von Klopfgrenzkurven ähnlicher Art gibt.

V. Zusammenfassung.

Die nach der reinen Verdichtungstheorie über die Erscheinung des Klopfens entstehenden Klopfgrenzkurven haben zufolge der im Gebiet des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses auftretenden Temperaturspitze des unverbrannten Gemischrestes an dieser Stelle ihren Tiefstpunkt. Bei geringerem Temperaturniveau des Zylinders können jedoch Klopfgrenzkurven entstehen, die zufolge der Peroxybildung an unverdampften Kraftstoffteilchen, besonders im Gebiet des Luftmangels, eine Verschiebung des Tiefstpunktes in das Reichgebiet zeigen. Das Temperaturverhalten beider Formen von Klopfgrenzkurven ist gegensätzlich. Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Bereich $\lambda = 1,05$ zeigen mit zunehmender Ladelufttemperatur eine Abnahme der Klopfestigkeit, wogegen Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Reichgebiet mit Steigerung der Ladelufttemperatur eine Zunahme der Klopfestigkeit erkennen lassen.

Das DVI-Überladeverfahren zur Prüfung von Flugmotorenkraftstoffen bewertet dieselben nach ihrem Klopfverhalten an Hand der im BMW 132 N Motor entstehenden Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt bei $\lambda = 1,05$. Neuzeitliche flüssigkeitsgekühlte Flugmotoren hoher Ventilüberschneidung erbringen jedoch zufolge ihres niedrigen Temperaturniveaus größtenteils Klopfgrenzkurven mit Tiefstpunkt im Reichgebiet. Es wurde daher untersucht, ob die Bewertung von Kraftstoffen nach dem DVL-Überladeverfahren im BMW-Zylinder auf flüssigkeitsgekühlte Motoren übertragbar ist.

Mit einer großen Anzahl verschiedenartigster Kraftstoffe durchgeführte Versuche in einem BMW 132 N und DB 601 Zylinder erbrachten als Ergebnis, daß die Übertragbarkeit der Bewertungsreihenfolge der Klopfestigkeit für Stoffe mit geringem Aromatengehalt gegeben ist. Höher aromatenhaltige Stoffe fallen mitunter beträchtlich heraus und ergeben keine eindeutigen Beziehungen in der Reihenfolge ihrer Bewertung. Die

in einem Kurvenblatt eingetragenen einander entsprechenden Meßwerte der Klopfestigkeit lassen sich gut durch eine Gerade verbinden. Es bedeutet zwar im allgemeinen eine gute Lage der Meßpunkte auf der Geraden eine Übertragbarkeit der Bewertungsreihenfolge; sie ist jedoch nur dann ein Maßstab für gleiches Klopfverhalten in beiden Motoren, wenn die Neigung dieser Verbindungsgeraden gleich der einer Sollkurve unter 45° ist.

Die Bedeutung verschiedener Neigung der Kurven wurde aus abschliessenden Versuchen mit einigen typischen Kraftstoffen bei verschiedener Ladelufttemperatur erkennbar, wobei die Größe der Kurvensteilheit ein Maß für die Über- oder Unterbewertung der einzelnen Kraftstoffe in den Motoren gibt. Durch günstige Wahl der Ladelufttemperatur bei einem Prüfverfahren, z.B. beim DVL-Überladeverfahren mit 130°C , kann wohl für diesen Temperaturbereich eine ungefähre Übereinstimmung erzielt werden, jedoch zeigt der Kraftstoff bei jeder darüber oder darunter liegenden Ladelufttemperatur Abweichungen.

Das DVL-Überladeverfahren im BMW 132 N Zylinder bei 130°C Ladelufttemperatur ist daher für die allgemeine Bewertung der Klopfestigkeit eines beliebigen Kraftstoffes in der bisherigen Form anwendbar. Eine Feststellung der Bewertungsreihenfolge aus den Ergebnissen des BMW 132 N Zylinders auf Motore mit anders gearteten Klopfgrenzkurven ist für aromatenarme Stoffe durchführbar, versagt jedoch bei höher aromatenhaltigen Kraftstoffen. Prinzipielle Untersuchungen über die Erstreckung des Klopfgebietes eines Kraftstoffes und seine Temperaturabhängigkeit bei Verwendung in einem Motor niedrigeren Temperaturniveaus müßten jedoch in einem entsprechenden Motorenzylinder, unter Umständen auch anderer Bauart, vorgenommen werden, da die Ergebnisse des DVL-Überladeverfahrens im BMW 132 Zylinder keine exakten Rückschlüsse erlauben und daher in diesem Falle unzureichend sind. Die Auslegung einer Reglerkurve mit Rücksicht auf Klopfverhalten erfordert nach wie vor die Untersuchung in dem betreffenden (identischen) Zylinder. Wegen der gegenseitigen Be-

einflussung der Zylinder bei Reihenmotoren und der durch die Kinematik des Kurbeltriebes bedingten Totpunktverschiebung bei Sternmotoren sowie unterschiedlicher Kühlungsverhältnisse ist hierbei sogar der Vollmotor kaum zu umgehen.

Schrifttum
=====

- 1) K.Franke: Einfluß der Ventilüberschneidung auf die Klopfgrenze verschiedener Kraftstoffe beim Motor
DB 601; DVL-Bericht FB 1657
- 2) W.Lindner: Entzündung und Verbrennung von Gas- und Brennstoffdampfgemischen; VDI Verlag Berlin 1931
- 3) H.Rögener: Versuche über Selbstzündung und Verbrennung u.U.v.Weber: von Kohlenwasserstoffen; Bericht des Phys. Chem.-Inst. der Universität Leipzig 1941
- 4) W.Jost: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen; Springer Verlag 1939
- 5) W.Wilke u. P.Jantsch: Die Eigenschaften der Flugkraftstoffe und ihre Prüfung; Ringbuch der Luftfahrtforschung IV. C.12
- 6) Bauvorschriften für Flugmotoren - BVM Oktober 1940
Prüfvorschriften für Flugmotorenkraftstoffe
- 7) F.A.F. Schmidt: Verbrennungsmotoren. Thermodynamische und veruchsmäßige Grundlagen unter besonderer Berücksichtigung der Flugmotoren; Springer Verlag Berlin 1939
- 8) F.Seeber: Neue Verfahren der Kraftstoffprüfung; Luftfahrtforschung 1, 39, Band 16.

Tafel 1

Motordatenblatt

Motor-Type:	BMW 132 K	DB 601
Daten:		
Hub	162 mm	160 mm
Bohrung	155,5 mm	150 mm
Verdichtung	$\epsilon = 6,5$	$\epsilon = 7,2$
Hubraum	3,076 Ltr.	2,828 Ltr.
Kompressionsraum	559 cm ³	456 cm ³
Steuerzeiten:	Ventilüberschneidung:	40° K ₁ 110° K ₂
E. o.	16° v. o. T.	24° v. o. T. 71° v. o. T.
E s	78° n. u. T.	56° n. u. T. 56° n. u. T.
A. o.	72° v. u. T.	52° v. u. T. 69° v. u. T.
A s	22° n. o. T.	16° n. o. T. 49° n. o. T.
Gemischaufrichtung:	Einspritzung	Einspritzung
Pumpe	Bosch PZ 2/100	Bosch PZ 2/100 V402 (Nockenpumpe)
Düse	Bosch DE 40 N 50 - 6	L'Orange 6/38 9-2029 A
Zündvorrichtung:		
Kerzen	Bosch W 260 T 1	Bosch W 260 T 1
Magnet	Bosch FJ 1 R 36 FJ 1 L 36	Bosch FJ 1 R 36 FJ 1 L 36
Ladeluft:		
Gebläse	Klein, Schanzlin & Becker Kompressor, 1934, 1 Atm 1450 U/min	Klein, Schanzlin & Becker 1,5 Atm, 450 m ³ /h
Lufterhitzer	2 Stück je 10,5 kW	DVL 24,5 K4
Kühlstoff:	Luft	Wasser
Gebläse	Hermil-Hochdruckgebläse	
Pumpe		Maschinenfabrik Odessa Typ S 30/160 135 l/min
Auspuffanlage:	Haka-Auspufftopf, Ab- sauggebläse	DVL, über Schalldämpfer, Absauggebläse
Bremsmittel:	Pendelmachine Siemens- Schuckert, Type AG 247, Belastung 145 kW	Siemens-Generator, Typ AG 247

Tafel 2

Nr.	Kraftstoff	Ausgangsstoffe der Mischungen Chalt in Vol.-%	Spes. Gew.	Refra- ktion	c/H Verh.	Lo	MOZ Gew.-%	Arom. BTA Gew.-%
1	Eich B4	-	0,714	1,4011	5,71	14,67	89,3	12,6
2	Eich C3 IIe	-	0,791	1,4419	7,54	14,14	92,8	44,8
3	Beuterkraftstoff	-	0,716	1,4050	5,71	14,86	99,4	16,2
4	BS 2	75% ET 100	0,707	1,4025	5,45	15,0	88,7	5,2
5	BS 3	75% VT 302	0,829	1,4691	9,20	13,7	88,9	82,3
6	BS 4	47% Athanol	0,750	1,3825	4,98	12,08	89,7	11,8
7	ET 110	-	0,704	1,3998	5,53	14,95	97	2,0
8	ET 120	-	0,707	1,4013	5,62	14,92	95,6	4,8
9	M 130 + 0,12 BTA	20% ET 110	0,730	1,4138	5,94	14,74	95,7	20,0
10	M 131 + 0,12	40% VT 702	0,770	1,4409	6,87	14,35	118	49,1
11	M 132 + 0,12	60% VT 702	0,761	1,4373	6,63	14,45	113	39,8
12	M 133 + 0,12	60% VT 702	0,743	1,4226	6,24	14,62	97,9	30,1
13	M 134 + 0,12	70% VT 702	0,727	1,4135	5,90	14,77	95,8	20,1
14	M 135 + 0,12	70% VT 810	0,732	1,4158	6,02	14,72	91,2	31,8
15	M 136 + 0,12	80% VT 810	0,731	1,4132	5,99	14,73	89,4	26,9
16	M 137 + 0,12	80% DHD VT 340	0,746	1,4372	6,30	14,59	95,6	52,7
17	M 138 + 0,12	80% DHD VT 340	0,752	1,4378	6,40	14,54	97,0	52,7
18	M 139 + 0,12	80% Frans. Iso- oktan	0,764	1,4375	6,69	14,42	96,8	52,7

Ein- fr.	215/43	183/43	284/43	121/43	263/42	264/42	236/42	273/42	236/42	104/42	194/42	236/42	104/42	271/42
-------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Mischungen	40% Isoopro- pyl Iso	30%	20%	10%	10% VT 303	40% Isoopro- pyl Iso	30%	20%	10%
------------	-------------------------	-----	-----	-----	------------	-------------------------	-----	-----	-----

Kraftstoff	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

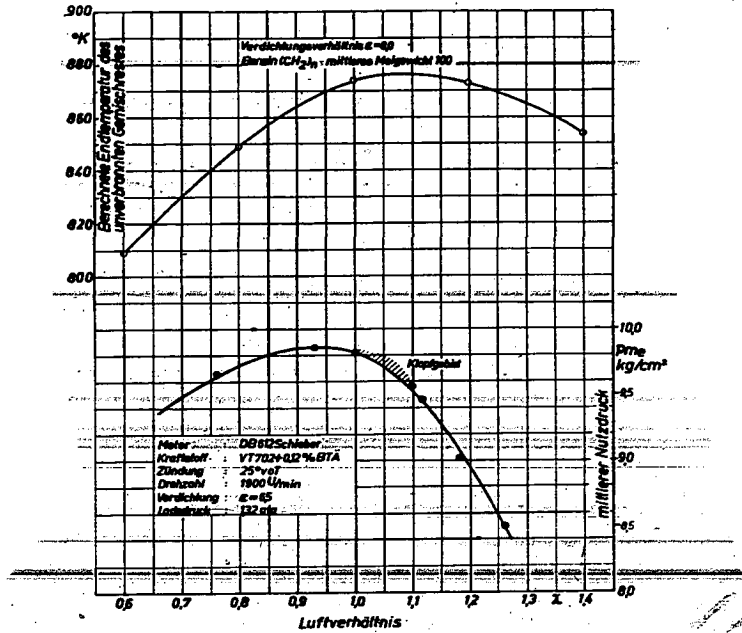


Abb. 1: Zusammenhang zwischen der Endtemperatur des unverbrannten Gemischrestes und dem erstmaligen Klopfbeginn bei $\lambda = 1,05$.

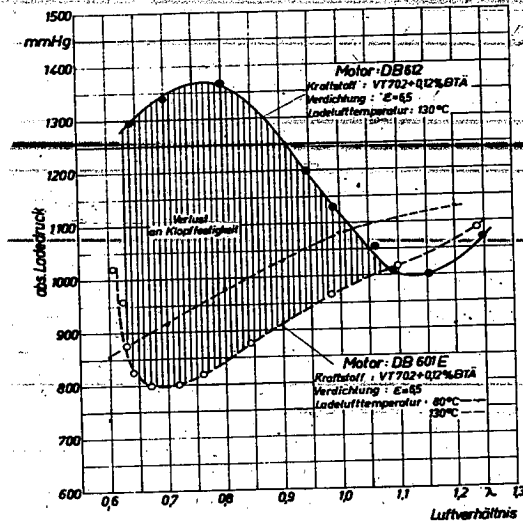


Abb. 2: Erweiterung des Klopfbereiches im Reichgebiet bei annähernd gleicher Höhenlage der Klopfgrenzkurven ab $\lambda = 1,05$ durch Vorreaktionen während der Gemischaufbereitung.

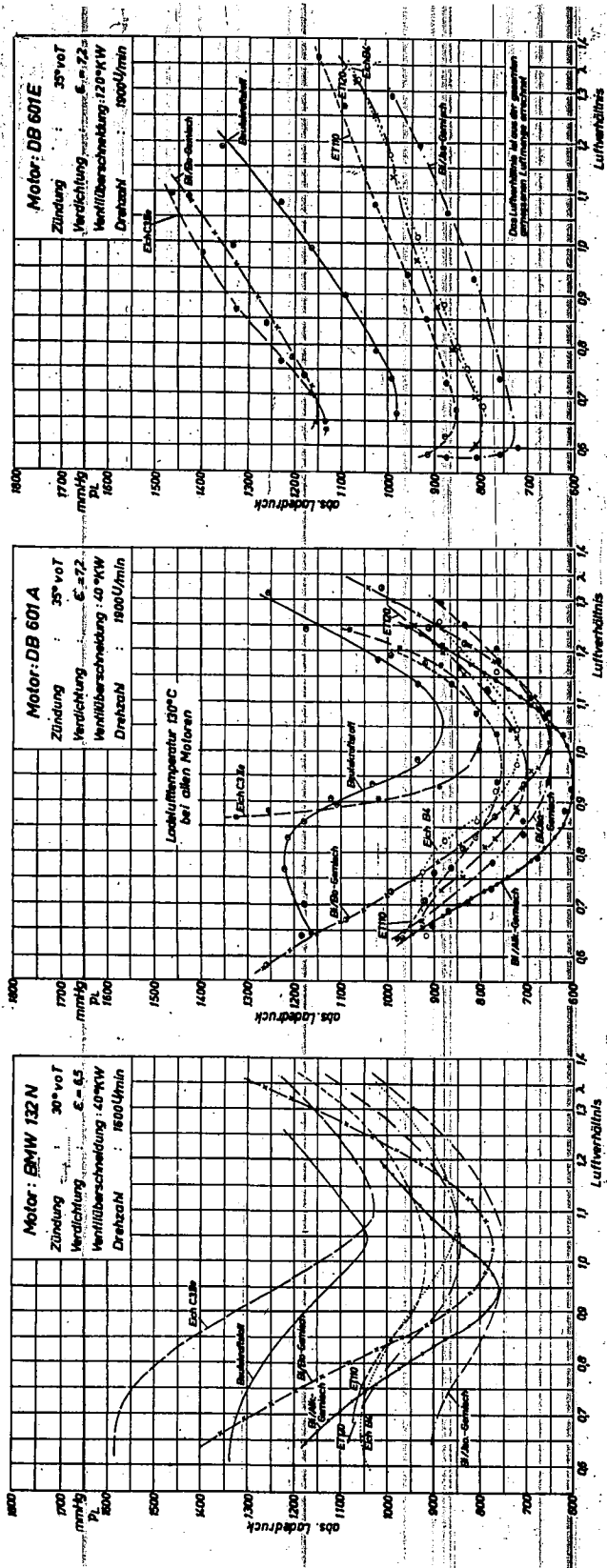


Abb. 3: Klopfgrenzkurven verschiedener Kraftstoffe in den Motoren BMW 132 N, DB 601 A und DB 601 E.

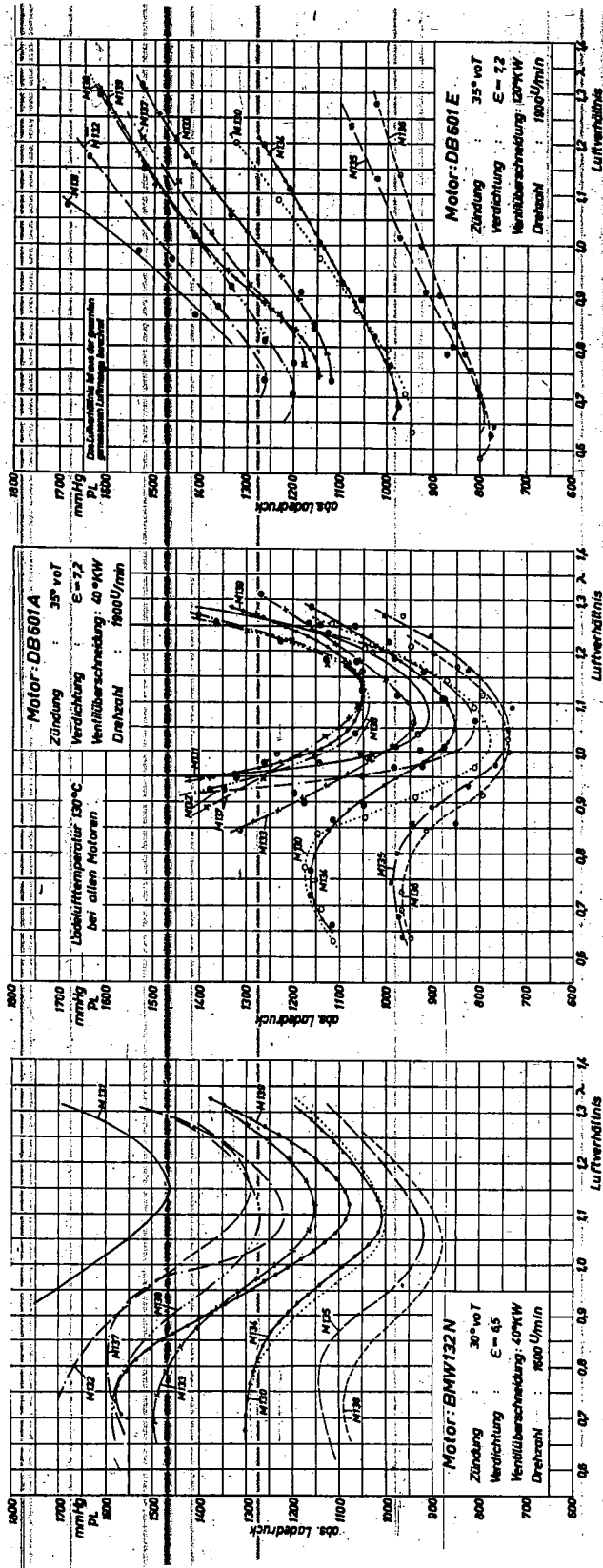


Abb. 4: Klopfgrenzkurven verschiedener Kraftstoffe in den Motoren BMW 132 F, DB 601 A und DB 601 E.

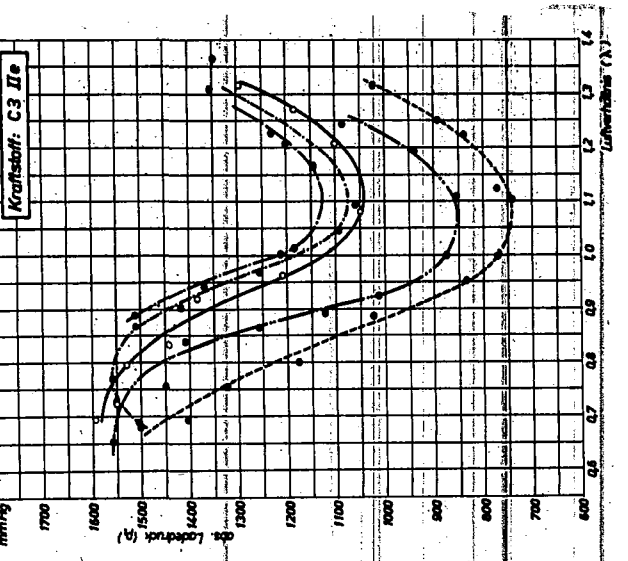
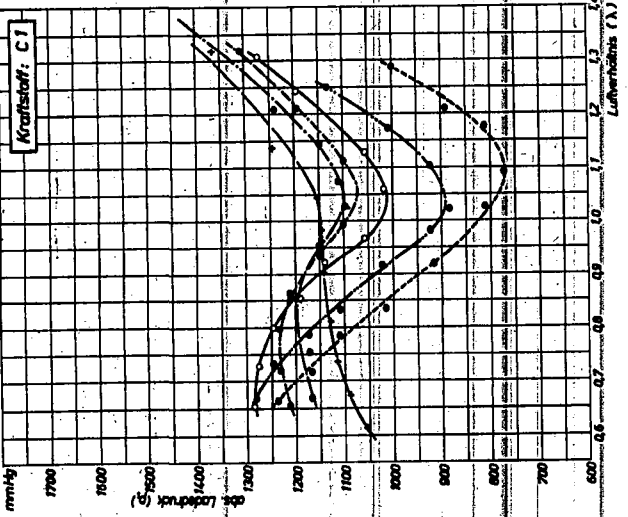
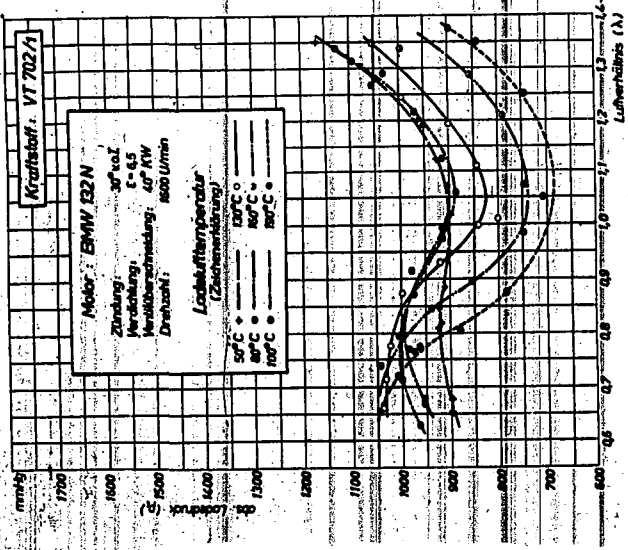


Abb. 8: Klopfgrenzkurven der Kraftstoffe C 1, C 3 und VT 702 im Motor BMW 132-N bei verschiedenen Ladeflufttemperaturen.

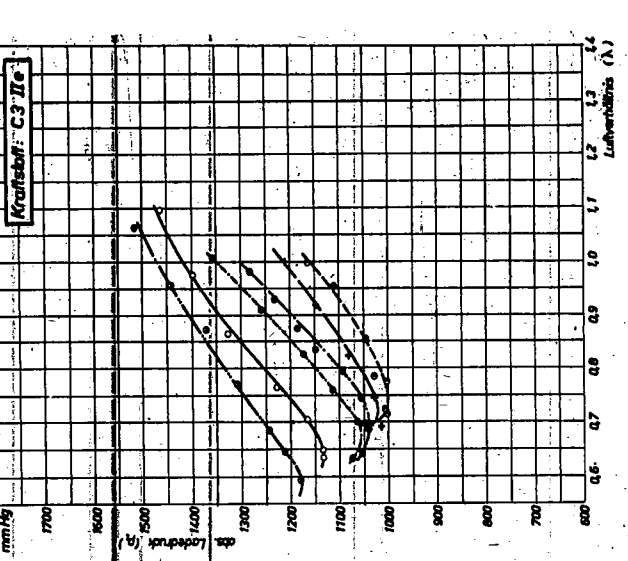
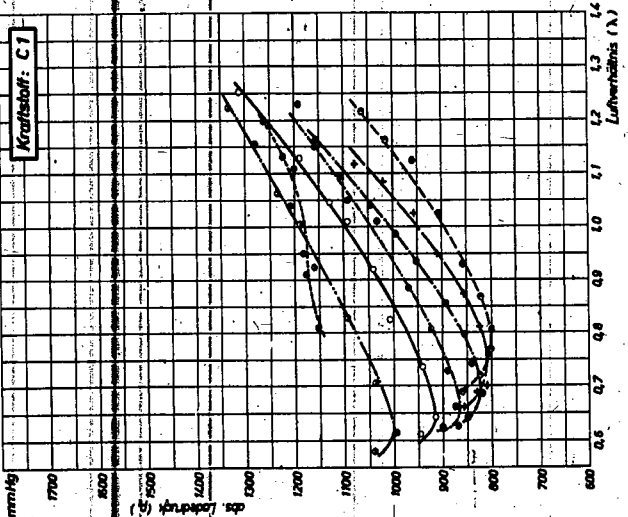
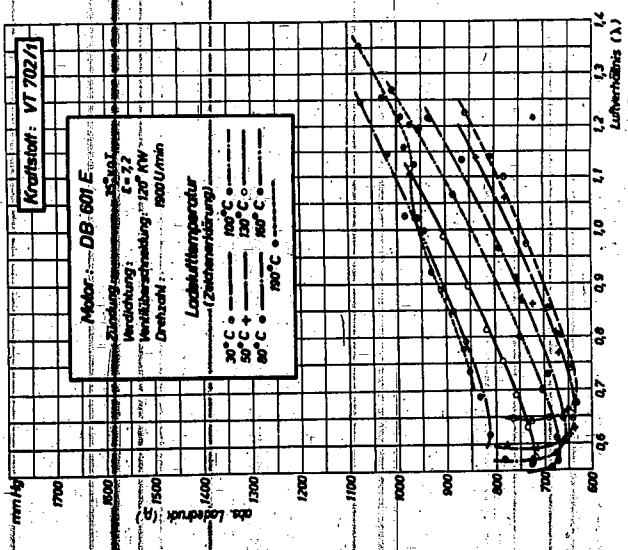


Abb. 9: Klopfgrenzkurven der Kraftstoffe C 1, C 3 und VT 702 im Motor DB 601 E bei verschiedenen Ladeflufttemperaturen.

