

Der Verbrennungsvorgang im Explosionsmotor¹⁾.

Von DR. v. PHILIPPOVICH.

Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, Berlin-Adlershof.

(Eingeg. 17. Juni 1936.)

Inhalt.

- I. Zweck des Vortrages.
- II. Arbeitsverfahren.
- III. Verbrennung im Otto-Motor.
 - a) Normale und klopfende Verbrennung.
 - 1. Chemische Einflüsse.
 - 2. Physikalische Einflüsse.
 - 3. Einfluß der Motorbedingungen auf das Klopfen.
 - b) Motorische Einflüsse auf die Verbrennungsbedingungen.
 - 1. Einflüsse auf die mittlere Verbrennungstemperatur.
 - 2. Einflüsse auf den Verdichtungsenddruck und Verbrennungsdruck.
 - 3. Einflüsse auf die Verbrennungsgeschwindigkeit.
 - c) Messung der Klopfestigkeit.
- IV. Vorgänge bei der Verbrennung im Dieselmotor.
- a) Normale und klopfende Verbrennung.
- b) Motorische Einflüsse auf die Verbrennungsbedingungen.
 - 1. Mittlere Verdichtungsendtemperatur und mittlere Verbrennungsraumtemperatur.
 - 2. Verdichtungsenddruck.
 - 3. Wärmeübergang.
 - 4. Katalytische Einflüsse.
- c) Messung der Verbrennungseigenschaften von Dieselkraftstoffen.
- V. Praktische Anwendung der Temperaturmessung im Motor.
- VI. Forschungsmöglichkeiten.

I. Zweck des Vortrages.

Im Rahmen dieser dem Verbrennungsvorgang gewidmeten Tagung sollen die nachstehenden Ausführungen die wichtigsten Arbeitsverfahren der Verbrennungsmotoren erläutern, die bisherigen Kenntnisse über die Einflüsse der Kraftstoffzusammensetzung und vor allem der Betriebsbedingungen auf den Verbrennungsablauf feststellen und dann Hinweise geben, in welcher Richtung Forschungsaufgaben für die weitere Verbesserung der Energieausnutzung im Explosionsmotor liegen.

Bei dem heutigen Stand der Technik sehen wir Entwicklungen innerhalb kurzer Zeiten bis zu einem Stand fortschreiten, der die wichtigsten praktischen Wünsche weitgehend erfüllt. Die Neuerungen nähern Maschinen, Verfahren und Stoffe asymptotisch dem Ideal, das nur dann Abwandlungen erfährt, wenn sich seine Voraussetzungen ändern. Dementsprechend sind Fortschritte im Entwicklungszustand im Anfang rasch und vielfach empirisch erreichbar, später aber immer langsamer und nur auf Grund eingehender Forschung möglich. Das beste Beispiel für diesen Vorgang sind die Verbrennungsmaschinen und die damit betriebenen Verkehrsmittel. Wie sich die Entwicklungsarbeit bei den Motoren im Leistungsgewicht, d. h. kg/PS spiegelt, zeigt Abb. 1.

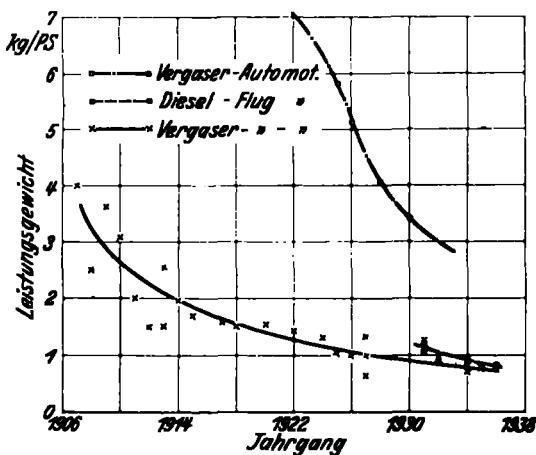


Abb. 1. Entwicklung des Leistungsgewichts beim Flugmotor.

Die weitere Entwicklung geht natürlich nicht nur in der Richtung größerer Leistung und geringeren Leistungsgewichts.

¹⁾ Vortrag auf der Tagung der Deutschen Bunsengesellschaft in Düsseldorf, Mai 1936.

gewichtetes, sondern auch der erhöhte Betriebssicherheit; Voraussetzung dafür ist engste Zusammenarbeit von Ingenieur, Chemiker und Physiker. Der Vortrag soll einen Beitrag in diesem Sinne geben.

II. Arbeitsverfahren.

Der Grundgedanke der Explosions- oder Verbrennungsmotoren besteht darin, die bei der chemischen Umwandlung verschiedener Stoffe freigemachte Wärmenergie in nutzbare mechanische Arbeit umzusetzen; das arbeitende Medium ist dabei das sich ausdehnende Gas. Verschiedentlich ist — bis auf den heutigen Tag — daran gedacht worden, für diesen Zweck Explosivstoffe zu verwenden. Sowohl die Schwierigkeit, die Geschwindigkeit der Umsetzung zu beherrschen, als auch die verhältnismäßig geringe Energie, die in diesen Stoffen enthalten ist, führten neben anderen Umständen zur Verwendung der Verbrennung als energieliefernder Reaktion. Diese hat nicht nur den Vorteil größerer Billigkeit, sondern auch den, daß der Reaktionsauerstoff der umgebenden Luft entnommen werden kann und deshalb ungleich größere Energiemengen im Form von Brennstoff mitgeführt werden können. Tabelle 1 veranschaulicht dies für Sprengmittel und Brennstoffe (mit und ohne theoretische Verbrennungsluft bzw. Sauerstoff).

Tabelle 1.
Verbrennungs-Energien von Sprengstoffen und Brennstoffen je kg (mit und ohne Verbrennungsluft, bzw. Sauerstoff).

Stoff	Obere Heizwerte cal/kg	je kg Gemisch	
		mit Luft	mit Sauerstoff
Sprenggelatine	1520	—	—
Nitroglycerin	1450	—	—
Schießbaumwolle	1050 (13,4% N)	—	—
Pikrinsäure	800	—	—
Trinitrotoluol	720	—	—
Schwarzpulver	600—700	—	—
Knallquecksilber	420	—	—
Wasserstoff	34,180	963	3798
Kohlenstoff	7859	1379	2143
Hexan	11,501	709	2539
Methylalkohol	5,322	714	2130
Äthylalkohol	7,068	708	2291
Acetylen	12,112	851	2975

Bei der Verwendung der Verbrennung als motorischer Kraftquelle ist es notwendig, zuerst in dem Verbrennungsraum ein zündbares Luft-Kraftstoff-Gemisch herzustellen

und es dann so zu zünden, daß es mit bester Wärmeausnutzung verbrennt. Die Gemischbereitung geschieht in Gasmotoren in Mischkammern, in Otto-Motoren mit Vergasern in diesen, in Otto-Motoren mit Einspritzung dagegen durch Zerstäuben des Kraftstoffes im Ansaugrohr oder im Zylinder (im Ansaughub), beim Dieselmotor im Zylinder im letzten Abschnitt des Verdichtungshubes. Der Kohlenstaubmotor stellt sein Brennstoff-Luft-Gemisch — nach vorangegangener Aufbereitung in einer Mischkammer — im Arbeitshub selbst her.

Außer nach dem dazu verwendeten Mischapparat kann man die Gemischbereitung danach einteilen, in welchem zeitlichen Ablauf das Gemisch hergestellt wird. Es gibt Zweitakter (1. Luft- und Kraftstoffverdichtung [Otto] oder Luftverdichtung allein [Diesel], 2. Verbrennung bzw. Verbrennung nach Einspritzung [Diesel] und Auspuffen), Vierstakter (1. Luft- und Kraftstoffansaugung oder Luftsaugung allein, 2. Verdichtung [und Einspritzung], 3. Explosion, 4. Auspuffen) und versuchsmäßig auch Sechstakter²⁾ (1. Luft- und Kraftstoffansaugung, 2. Verdichtung, 3. Zündung und unvollkommene Verbrennung zu brennbarem Gas, 4. neuerliche Verdichtung mit Zusatzluft, 5. Zündung und Explosion, 6. Auspuffen).

Der thermische Wirkungsgrad läßt sich theoretisch berechnen, wenn man bestimmte, allerdings praktisch nicht erfüllte Annahmen macht, wie die, daß der Otto-Motor eine Gleichraumverbrennung und der Dieselmotor eine Gleichdruckverbrennung verwendet. Dann sind die thermischen Wirkungsgrade

$$\text{des Otto-Motors} \quad \eta = 1 - \epsilon^{1-x}$$

$$\text{des Diesel-Motors} \quad \eta = 1 - \epsilon^{1-x} \cdot \delta$$

worin x das Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und Volumen darstellt³⁾. Mit steigender Verdichtung nehmen die Leistungen beider Motorenarten zu, gleichzeitig steigt der thermische Wirkungsgrad; derzeit ist aber das Maximum der Verdichtung bei den verbreiteten Otto-Motoren etwa 8:1, bei Diesel-Motoren etwa 18:1. Eine weitere Steigerung dürfte beim Diesel-Motor wegen mechanischer Schwierigkeiten und thermischer Verluste keine Vorteile mehr bieten, beim Otto-Motor ist ihr durch die Gefahr der Selbstzündung eine Grenze gesetzt.

Außer der Verdichtungserhöhung gibt es Möglichkeiten besseren thermischen Wirkungsgrades in der Verwendung möglichst magerer Gemische, in einer Verlängerung des Arbeitshubes und beim Diesel-Motor im Betrieb mit geringer Leistung und verkürzter Einspritzdauer.

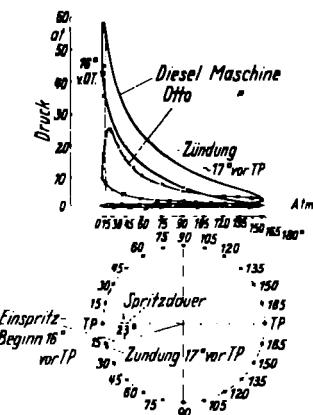


Abb. 2. Diagramme der Otto- und Dieselmaschine.

des Arbeitshubes und beim Diesel-Motor im Betrieb mit geringer Leistung und verkürzter Einspritzdauer.

Der erhöhte Explosionsdruck muß erst nach dem Totpunkt auftreten. Da aber bis zu seiner Erreichung nach der Zündung einige Zeit vergeht, ist man gezwungen, den Beginn der Verbrennung durch Funkenzündung oder Einspritzen von Kraftstoff schon früher einzuleiten. Abb. 2 („Voreilen der Zündung“) veranschaulicht dies für einen Otto- und einen Diesel-Motor.

²⁾ Terres, diese Ztschr. 44, 509 [1931].

³⁾ Genauer wird die Berechnung des thermischen Wirkungsgrades bei Berücksichtigung der Dissoziation und der Veränderung der spez. Wärme, die allerdings bei Diesel-Motoren wegen ihres hohen Luftüberschusses meist keine Rolle spielt. Vgl. Kühl, VDI-Forschungsheft 373, VDI-Verlag 1935, u. F. Schmidt, Z. VDI 80, 769 [1936].

Um die Leistungen der Motoren zu steigern, wird neben der Verdichtung auch die Drehzahl erhöht. Die Möglichkeit, die Leistungen gegebener Motoren durch Vergrößerung des Füllungsgrades mittels Überladung, d. h. Zuführung vorverdichteter Luft, in den Ansaughub zu erhöhen, wurde erst verhältnismäßig spät in größerem Umfang benutzt. Ihre Entwicklung hat beim Automobilmotor eingesetzt und ist hauptsächlich beim Flugmotor von großer Bedeutung, weil die Leistungsabnahme mit abnehmender Luftdichte dadurch in einem gewissen Grade vermieden werden kann. Der Unterschied der Leistungssteigerung durch Höherverdichtung und durch Überladung besteht vor allem darin, daß man mit jener den spezifischen Kraftstoffverbrauch verringert, mit dieser aber erhöht, wie Tabelle 2 zeigt.

Tabelle 2. Leistungssteigerung und Verbrauchsänderung durch Höherverdichtung und Überladung (n. Schey u. Rollin)

Verdichtung ϵ	Mittl. wirksamer Druck kg/cm ²	Spez. Kraftstoffverbrauch g/PS h	Unterschied Δ
3,5	7,0	337	—
7,5	10,0	218	-35,3 %
3,5 mit 254 mm Hg Überladung	10,1	342	+1,5 %

Indirekt sind Leistungssteigerungen dadurch möglich, daß man schädliche Widerstände verringert, beim Flugmotor z. B., indem man an Stelle der Wasserkühlung Luftkühlung oder zur Verkleinerung der notwendigen Kühlfläche Siede- oder Heißkühlung verwendet.

Die erwähnten Mittel zur Erhöhung der Leistung äußern sich in einer Steigerung der Betriebstemperatur oder der Verbrennungsdrucke; auf die Ausnahmestellung der Drehzahl wird im folgenden eingegangen. Die Ansprüche der Motoren an die Kraftstoffe werden deshalb immer höher. In welcher Weise sich Änderungen der Betriebsbedingungen auf Druck und Temperaturen im Motor auswirken, wird in der Folge für Otto-Motoren und Diesel-Motoren (oder Gemischverdichter und Luftverdichter) als die wichtigsten Vertreter der Verbrennungsmotoren besprochen. Weder der Gleichkopfmotor noch der Kohlenstaubmotor spielen ja eine Rolle, die derjenigen der beiden anderen Motoren auch nur annähernd gleichkommt. Auch der sogenannte Mitteldruckmotor, ein Mittelding zwischen Otto- und Diesel-Motor, der mit Luftverdichtung, Kraftstoffeinspritzung und Fremdzündung arbeitet, konnte in diesem Zusammenhang ausgelassen werden.

III. Verbrennung im Otto-Motor⁴⁾.

a) Normale und kloppende Verbrennung.

Die Gleichraumverbrennung des Otto-Motors gelte so vor sich, daß das Gemisch gebildet, verdichtet, zu einem bestimmten Zeitpunkt (elektrisch) geziündet und danach wieder ausgepufft wird; dazu werden zwei oder vier Takte (versuchsmäßig 6) verwendet. Die Verbrennung ist als chemischer Vorgang in ihrem Ablauf bestimmt durch die Art der reagierenden Stoffe (vor allem Kraftstoffe) und durch die herrschenden Bedingungen. Egerton⁵⁾ faßt die Verbrennung als einen rein chemischen Vorgang auf, bei dem physikalische Einflüsse nur insofern von Bedeutung sind, als sie die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussen.

Die Verbrennung im Otto-Motor verläuft nach spektroskopischer Beobachtung und nach chemischer Analyse

⁴⁾ Vgl. a. H. List, Z. Ver. dtsch. Ing. 79, 1447 [1935]; R. Pye: Die Brennkraftmaschinen, Berlin, J. Springer 1933.

⁵⁾ A. Egerton, Philos. Trans. Roy. Soc. London 234, 513 [1935].

entsprechend dem Wassergasgleichgewicht, und es ist möglich, aus der Messung einer oder mehrerer Abgaskomponenten z. B. nach Ostwald auf das Gemischverhältnis Luft-Kraftstoff rückzuschließen; in neueren Untersuchungen von Raßweiler und Withrow wurde spektroskopisch festgestellt, daß sich im unverbraunten Gasrest beim Klopfen stets Formaldehyd befindet, aber auch in manchen Fällen bei nichtklopfender Verbrennung. Im letzteren Falle verschwindet der Formaldehyd, wenn man klopfsteteres Benzin verwendet oder die Motorbedingungen entsprechend ändert. Formaldehyd selbst bewirkt kein Klopfen, seine Menge wird auch bei der klopfenden Verbrennung durch Zusatz von Bleitetraäthyl nicht merklich verringert, wenn auch Anilin dies bewirkt. Sehr interessant ist die Feststellung von

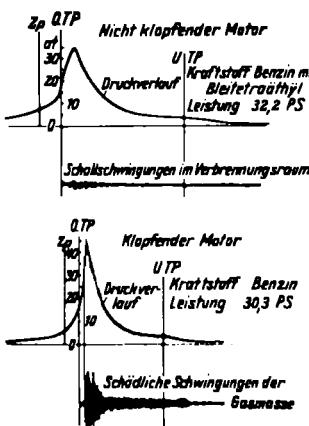


Abb. 3. Druckverlauf eines nichtklopfenden und klopfenden Verbrennungsvorganges.

Raßweiler und Withrow, daß in der Vorverbrennung bei Verwendung von Bleitetraäthyl die Linien des atomaren Bleies erscheinen. Ob die Annahme berechtigt ist, daß das Blei beim thermischen Zerfall des Bleitetraäthyls erst in Bleioxid und dann durch Reduktion wiederum in den atomaren Zustand übergeht, erscheint allerdings fraglich⁷⁾.

Verbrennung, direkte Beobachtung und Bestimmung der Flammenausbreitung mittels Ionisation einwandfrei festgestellt^{9,10)}. Gegenüber Verbrennungsgeschwindigkeiten von 2—6 m/s in der Bombe beträgt die normale Verbrennungsgeschwindigkeit in einem Flugmotorenzylinder nach Versuchen von Schnauffer bei Drehzahlen bis 1900/min 12 bis 23 m/s, bei der klopfenden Verbrennung aber bis zu 300 m/s¹¹⁾, nach Versuchen von Serruys bis zu 500 m/s. Die Auswirkung des Klopfens auf den Motor sind Steigerung der Drucke, Motortemperaturen und Leistungsabfall; dabei spielt die Temperatursteigerung, besonders bei Motoren hoher Leistung, die größere Rolle, während die Drucke sich nicht so ungünstig auswirken. Ob sie durch erhöhten Wärmeübergang infolge der Wirbelung oder veränderte Strahlung eintritt, ist bisher noch nicht sichergestellt. Abb. 3 zeigt die Diagramme eines Flugmotorenzylinders bei normaler und bei klopfender Verbrennung¹²⁾, Abb. 4 die Unterschiede in der mittleren Verbrennungsraumtemperatur¹³⁾ in einem Flugmotorenzylinder, Abb. 5 den Abfall der Leistung eines Motors mit sinkender Oktanzahl über die Zeit. Die Temperaturen im Verbrennungsraum steigen mit der Verdichtung und beim Klopfen, gleichzeitig sinken die Auspufftemperaturen. Diese Erscheinung, sowie die Erhöhung der Leistung und Verringerung des Verbrauches zeigt Abb. 6 nach Versuchen von Dr. Seeger in der DVL.

Zur Erklärung des Klopfvorganges gibt es eine Reihe von Deutungen, die chemische, physikalische oder konstruktive Einflüsse verantwortlich machen. Die — meist motorisch erhaltenen — Versuchsergebnisse werden in der Folge besprochen.

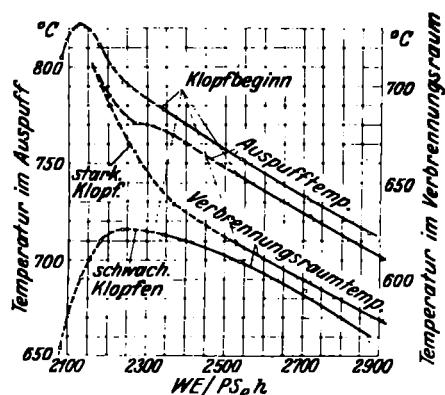


Abb. 4. Auspuff- und Verbrennungsraumtemperaturen abhängig vom spezifischen Verbrauch, aufgenommen am BMW 6 DVL-Einzylinder-Prüfstand.

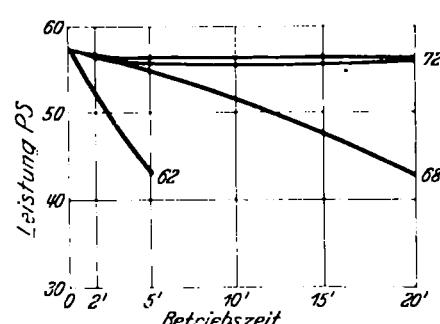


Abb. 5. Leistungsabfall bei ungenügender Oktanzahl (nach Pontremoli).

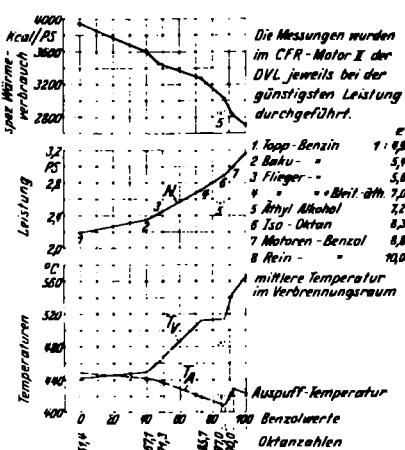


Abb. 6. Leistung, Temperatur und Wärmeverbrauch in Abhängigkeit von der Oktanzahl.

Die beim Klopfen besonders starken CH- und C₂-Banden im Flammenspektrum werden durch Bleizusatz wieder auf die normale Intensität zurückgebracht.

Bei der normalen Verbrennung schreitet die Flamme von der Zündstelle aus mit annähernd gleicher Geschwindigkeit und entsprechendem Druckanstieg durch das ganze Gemisch; nur bei besonders gestalteten Verbrennungsräumen kann sie stark variieren⁸⁾. Im Gegensatz dazu beginnt die klopfende Verbrennung in gleicher Weise wie die nichtklopfende, wird aber dann plötzlich sehr rasch, indem der unverbraunte Gasrest praktisch auf einmal entflammt wird. Diese Tatsache ist durch Gasanalyse während der

⁶⁾ D'Allera u. Lovell, SAE Journal 38, 90 [1936]; eine neuere Bestätigung des Ostwaldschen Diagrammes von Gerrisch u. Teßmann, N.A.C.A. Report 476, Washington 1933; vgl. auch Gleeson und Paul, Nat. Petrol. News 28, Nr. 8, 28 [1936].

⁷⁾ Raßweiler u. Withrow, J. Ind. Eng. Chem. 27, 872 [1935].

⁸⁾ Glyde, J. Instn. Petrol. Technologists 16, 756 [1930].

1. Chemische Einflüsse.

Für die Beurteilung der Bedeutung chemischer Struktur der Kohlenwasserstoffe auf ihre Verbrennung sind die Untersuchungen von Campbell, Lovell und Boyd von größter Bedeutung. Sie verglichen dabei die Wirkung von molaren Zusätzen reiner Kohlenwasserstoffe zu einem Benzin mit derjenigen von Anilin, ausgedrückt in Zentigramm-Mol/Liter unter den Bedingungen der Research-Methode. Das Ergebnis kann hier nur kurz angedeutet werden. Danach ist bei Paraffinen, paraffinischen Olefinen und Naphthenen Absinken der Klopfestigkeit mit zunehmendem Molekulargewicht verbunden, während bei den Benzinen die Klopfestigkeit mit zunehmendem Molekulargewicht zunimmt.

⁹⁾ Withrow u. Boyd, Ind. Engng. Chem. 23, 539 [1931]; Withrow, Lovell u. Boyd, ebenda 29, 945 [1930].

¹⁰⁾ Schnauffer, Z. Ver. dtsch. Ing. 75, 455 [1931].

¹¹⁾ Derselbe, J. Soc. Autom. Eng. 34, 17 [1934].

¹²⁾ Vgl. Nielsen, Arch. techn. Messcn, J 137—3 [Jan. 1936].

¹³⁾ Alle folgenden Temperaturmessungen beziehen sich auf Mittelwerte, die nur dem Vergleich dienen sollen.

gewicht erkennbar. Bei Aromaten (Benzol und Homologen) steigt sie erst bis zum Propyl in der Seitenkette, um dann abzufallen. Einführung einer Methylgruppe steigert die Klopffestigkeit i. allg., ebenso Konzentration des Moleküls. Die Einführung von Seitenketten wirkt sich je nach dem Eintrittsort verschieden aus: bei Naphthenen ist so die Lage der Seitenkettenbindung von größerer Bedeutung als die Art der Seitenkette; auch bei den Aromaten ist die Stellung der Seitenkette wesentlich, p-Stellung ist besser als m-Stellung, diese wieder besser als ortho-Stellung¹⁴⁾. In ähnlicher Richtung ließen die Untersuchungen von Garner und Mitarb., die zeigten, daß die Oktanzahl von Mischungen aus einem Benzin und aromatischen Kohlenwasserstoffen niedriger, aus einem Benzin und Olefinen dagegen höher liegen als die Rechnung aus den Oktanzahlen der Einzelbestandteile ergeben würde, und daß nur bei Molekülen mit mehr als 8 Kohlenstoffatomen die Klopffestigkeit (Oktanzahl) bei 149° Kühltemperatur in manchen Fällen über der bei 100° Kühltemperatur gefundenen lag¹⁵⁾. Diese Ergebnisse beweisen sowohl die enge Beziehung zwischen chemischem Aufbau der Kohlenwasserstoffe und ihrem Verhalten im Motor als auch die chemisch-physikalische Bedeutung der Oktanzahlmessung. Die physikalischen Eigenschaften der Kraftstoffe weisen ebenfalls einen Zusammenhang mit dem Motorverhalten auf, wenn er auch noch nicht genügend geklärt erscheint, um die Beurteilung darauf zu gründen. Marder¹⁶⁾ hat gezeigt, daß der Parachor (aus Oberflächenspannung und spez. Gew. bei 20° erhalten) dazu geeignet ist, über die Klopffestigkeit von Vergaser- und die Zündwilligkeit von Diesel-Kraftstoffen Auskunft zu geben; auch seine Erklärung der Abweichungen von Oktanzahlmessungen in verschiedenen Motoren durch Gegenüberstellung von Oktanzahl (korrig.) und Dichte und Parachor ist interessant.

Die Selbstzündungstemperatur der Kraftstoffe stellt in einem gewissen Zusammenhang zur Klopfnigung, wenn auch im Motor Klopfen und unfreiwillige Selbstzündung (preignition) scharf unterschieden werden müssen. Hopkinson war nach Mitteilung Ricardos der erste, der dies erkannte; der Unterschied äußert sich vor allem darin, daß die Selbstzündung nur rauen Gang, nicht aber das helle Klingeln bewirkt, und daß weder der Höchstdruck, noch der Druckanstieg über das bei der gewöhnlichen Verbrennung übliche Maß hinausgeht¹⁷⁾. Allerdings kann die unfreiwillige Selbstzündung wegen der Temperatursteigerung mit der Zeit zum Klopfen führen. I. allg. nimmt die Klopfnigung mit sinkender Selbstzündungstemperatur der Kraftstoffe zu. Aber man muß zur Beurteilung des motorischen Verhaltens nach der Selbstzündung auch den Zeitfaktor berücksichtigen, wie dies Hawkes als erster gemacht hat, oder den Druckanstieg nach der Zündung, wie Brown und Watkins¹⁸⁾ vorschlagen. Die Versuche von Jentsch, die Motorenverhältnisse durch Änderung der Sauerstoffkonzentration bei der Selbstzündungsbestimmung nachzuahmen, seien hier erwähnt. Vgl.¹⁹⁾. Interessant ist daran die Auffindung der Zündungslücke, die u. a. auch von Dykstra und Graham Edyar festgestellt wurde²⁰⁾. Es gibt verschiedene Selbstzündungstemperaturen: die adiabatische Verdichtung und die Zündung in einem Tiegel bei ähnlichen Sauerstoff-

konzentrationen geben ziemlich gleiche Werte, während die Messung der zur Zündung im Motor erforderlichen Glühzündungstemperatur ganz andere Verhältnisse schafft. In Abb. 7 sind Versuchsergebnisse von Schnaufer zusammengestellt, die zeigen, daß die Unterschiede zwischen Benzin und Benzol in den zur Glühzündung erforderlichen Aktivierungsenergien viel geringer sind als bei Messung ihrer adiabatischen Selbstzündungstemperatur²¹⁾ oder der Selbstzündung im Tiegel. Man sieht weiter, daß die Glühzündungstemperaturen mit zunehmender Drehzahl und Drosselung sowie mit abnehmender Verdichtung zunehmen, ein Ergebnis, das mit dem Klopferhalten durchaus übereinstimmt. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Motormustern kommen dabei gut zum Ausdruck, wenn es auch fraglich ist, ob man daraus Rückschlüsse auf die Klopffestigkeit der Motoren ziehen kann. Ricardo verteidigt die Ansicht, daß außer der Selbstzündungstemperatur noch die Zunahme der Brenngeschwindigkeit nach Überschreiten der Zündtemperatur (gewissermaßen die Reaktionsgeschwindigkeit) das Auftreten des Klopfens bedingen²²⁾. Weitere Untersuchungen in dieser Richtung erscheinen sehr wünschenswert.

Zur Deutung des Selbstzündungsvorganges haben schon Tausz und Schulte auf die Bildung von Moloxyden hingewiesen²³⁾. Diese Ansicht fand weiteren Ausbau durch Callendar, der zusätzlich die Bildung feiner Kraftstofftröpfchen im Verdichtungshub annahm, an deren Oberfläche sich die Peroxyde bildeten²⁴⁾, Moureu und Dufraisse²⁵⁾, Egerton und Gates²⁶⁾, und andere. Allerdings gibt es auch manche Einwände gegen diese Annahme. So klopfen auch permanente Gase, z. B. liefert Knallgas bei niedrigen Drucken mit Zusatz von Bleitetraäthyl mehr H_2O_2 als ohne dieses²⁷⁾. Auch fand Serruys im Motor trotz Klopfens keine Peroxyde²⁸⁾, ebenso wie Steele, der zwar ein "oxydising agent", aber kein Peroxyd feststellen konnte²⁹⁾. Nun ist aber in neueren Arbeiten von Egerton, Smith und Ubbelohde nachgewiesen worden, daß zwar beim Klopfen NO_2 entsteht, das als Peroxyd erscheinen kann und unter Umständen durch Verbrennungs- SO_2 unwirksam gemacht wird (z. B. bei schwefelhaltigem Motorenbenzol im Gegensatz zu reinem Benzol), daneben aber auch Alkylwasserstoffsperoxyd. Daraus scheinen Sauerstoffatome keine Rolle beim Klopfen von Kohlenwasserstoffen zu spielen; NO_2 , das solche liefert, rief nämlich kein Klopfen hervor³⁰⁾. Immerhin scheint die Mitwirkung von Stickstoff bei der klopfenden Verbrennung noch weiter aufklärungsbedürftig. So ergaben z. B. Bomben-

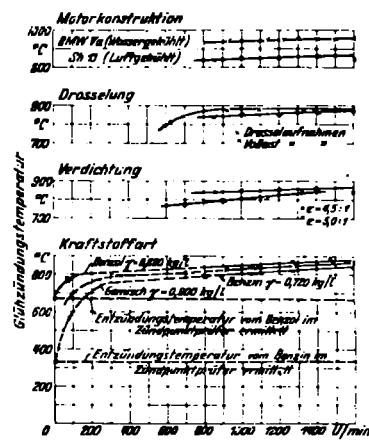


Abb. 7.
Glühzündungstemperaturen im Motor (nach Schnaufer).

¹⁴⁾ Campbell, Lovell u. Boyd, Ind. Engng. Chem. **23**, 26, 555 [1931] (Paraffine); **25**, 1107 [1933] (Naphthene); **26**, 475, 1105 [1934] (Aromaten); m. Signaigo, ebenda **27**, 593 [1935].

¹⁵⁾ F. H. Garner u. Mitarb., Proc. World Petr. Congr. II, 170 [1933].

¹⁶⁾ Marder, Öl u. Kohle **11**, 1ff., 923 [1935]. Heinze u. Marder, Brennstoff-Chem. **16**, 286 [1935].

¹⁷⁾ Ricardo, Engineer **160**, 433 [1935].

¹⁸⁾ Brown u. Watkins, Ind. Engng. Chem. **19**, 280 [1927].

¹⁹⁾ Zerbe u. Eckert, diese Ztschr. **45**, 593 [1932]; **46**, 659 [1933]; Öl u. Kohle, **2**, 112 [1934].

²⁰⁾ Dykstra u. Graham Edgar, Ind. Engng. Chem. **26**, 509 [1934].

²¹⁾ Schnaufer, Z. Ver. dtsch. Ing. **77**, 927 [1933].

²²⁾ Ricardo: Schnellaufende Verbrennungsmotoren, Berlin, J. Springer 1932.

²³⁾ Tausz u. Schulte, Z. Ver. dtsch. Ing. **68**, 574 [1924].

²⁴⁾ Callendar, Engineering **121**, 457 [1926]; **123**, 147ff. [1927].

²⁵⁾ Moureu u. Dufraisse, J. Office nat.-comb. liqu. **2**, 233 [1927].

²⁶⁾ Egerton u. Gates, J. Instn. Petrol. Technologists **13**, 244, 281 [1927].

²⁷⁾ Tanner, J. Amer. chem. Soc. **56**, 2250 [1924].

²⁸⁾ Serruys, Genie Civil CIV, 453 [1934].

²⁹⁾ Steele, Ind. Engng. Chem., Analyt. Edit. **5**, 202 [1933].

³⁰⁾ Egerton, Smith u. Ubbelohde, Philos. Trans. Roy. Soc., London, Ser. A, **234**, 433 [1935]; Ubbelohde, E. Drinkwater u. Egerton, Proc. Roy. Soc., London, Ser. A, **153**, 103 [1935].

versuche von *Thompson* und *Wheeler*³¹⁾ eine vollkommen verschiedene Verbrennung bei Verwendung von Argon und von Helium an Stelle von Stickstoff in explosiven Kohlenwasserstoffgemischen. Die Geschwindigkeit der Verbrennung stieg zwar unter sonst gleichen Umständen, wenn der Luftstickstoff durch Argon ersetzt wurde, auf das Doppelte an, die früher stark klopfende Verbrennung ging aber in eine ruhige mit gleichmäßigem Druckanstieg über. Auch *Maß* und *Eweing* fanden bei Verwendung von Argon statt Stickstoff Übergang von einer detonierenden zu einer normalen Verbrennung³²⁾. In einem gewissen Widerspruch zu der von *Egerton* angenommenen Wirkungslosigkeit von Sauerstoffatomen steht die starke Förderung des Klopfens durch Ozon, die *Brooks* feststellte³³⁾.

Die Unstimmigkeiten der Peroxydtheorie führten *Boerlage* und *van Dyck* dazu, die Zerfallsneigung der Kohlenwasserstoffe als Maß der Zündeigenschaften von Vergaser- und Diesel-Kraftstoffen zu wählen, die allerdings noch durch die Reaktionsgeschwindigkeit der Bruchstücke mit Luft ergänzt werden müssen³⁴⁾.

Während der Einfluß der chemischen Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe, die Rolle der Selbstzündung und der Vorgang der Oxydation vielfach untersucht worden sind, gibt es nur wenig Versuche, die sich mit der Einwirkung der Oberflächen des Verbrennungsraumes auf den Verbrennungsablauf beschäftigen, wie z. B. die Arbeit von *Ubbelohde*, *Drinkwater* und *Egerton*, in der festgestellt wird, daß sich das NO_2 nicht in der Flamme, sondern an der Oberfläche heißer Ventile bildet³⁵⁾. Wenn Vorschläge zur Verwendung anderer als der üblichen Baustoffe gemacht wurden, bezwecken sie entweder Verringerung der Ölkleibildung, z. B. durch Verzinnung, oder Verringerung der Korrosion (Nickel-Chromstahl für Laufflächen). Weitere Untersuchungen erscheinen wünschenswert.

2. Physikalische Einflüsse.

Die Tatsache, daß die Zugabe von Hemmstoffen in sehr geringer Menge die klopfende in nichtklopfende Verbrennung umwandeln kann, ohne daß dabei eine wesentliche Änderung der physikalischen Verhältnisse wahrscheinlich ist, spricht für die chemische Natur des Klopfvorganges. Die physikalischen Einflüsse sind also wohl unter dem Gesichtswinkel zu betrachten, inwiefern sie sich auf die chemische Reaktion auswirken.

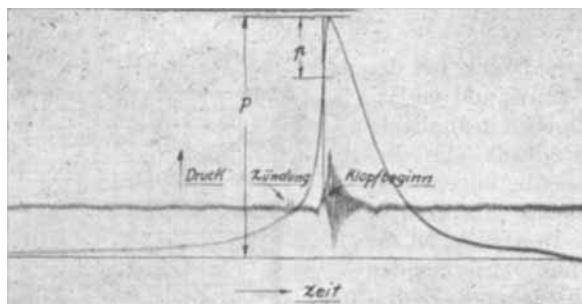


Abb. 8. Piezometrisches Indicator-Diagramm.

Die adiabatische Verdichtung des unverbrannten Restgases wird verschiedentlich in gleicher Weise wie für die eigentliche Detonation auch für das Klopfen verantwortlich gemacht. Im Gegensatz zu den zahllosen Bombenversuchen gibt es nur wenige Motorversuche in dieser

Richtung. *Schnauffer* hat allerdings durch die Bestimmung der Verbrennungsgeschwindigkeit beim Klopfen von etwa 300 m/s gezeigt, daß wirkliche Detonation nicht vorliegt. Andererseits hat *Nielsen* in Bomben- und Motorversuchen gefunden, daß schon vor Einsetzen der klopfenden Verbrennung Gasschwingungen auftreten, die erst durch Erhöhung der inneren Energie der Moleküle die Auslösung der überraschen Verbrennung bewirken³⁶⁾ (Abb. 8). Auch *Serruys*³⁷⁾ ist auf Grund seiner Versuche am Motor der Überzeugung, daß eine Detonationswelle im Sinne *Berthelots* das Klopfen auslöste.

Über die Rolle der Strahlung sind die Ergebnisse bisher nicht ganz schlüssig. *Serruys* (a. a. O.) erhielt beim Bestrahlen des Verbrennungsraumes mit 80 000 Lux kein Klopfen, fand aber mit *Pontremoli*, daß Bleizusatz zwar die Geschwindigkeit der Verbrennung nicht, die Strahlung aber recht erheblich beeinflußt³⁸⁾. *Raßweiler* und *Withrow*³⁹⁾ stellten zwar eine stärkere kontinuierliche Strahlung im roten Ende des Emissionsspektrums fest, die für eine Erhöhung der Schwarzkörperstrahlung beim Klopfen spricht, die Versuche von *Marvin*, *Caldwell* und *Steele* ergaben aber bei quantitativer Nachmessung für gewöhnliche und klopfende Verbrennung nur einen sehr geringen Betrag für diese Strahlung⁴⁰⁾.

Die Ionisation ist als Ursache des Klopfens wenig untersucht⁴¹⁾. Die ganze Frage der physikalischen Beeinflussung der Verbrennung wird mit den verfeinerten Meßverfahren (Kathodenstrahlloszillograph, Stahlungsmessung, Flammenionisation) eingehend verfolgt werden müssen, ehe ein endgültiges Urteil möglich ist.

3. Einfluß der Motorbedingungen auf das Klopfen.

Anderungen von Reaktionsdruck, Temperatur und Zeit durch entsprechende Betriebsbedingungen äußern sich in ausgedehntem Maß im Klopfverhalten der Kraftstoffe. In welchem Sinne die verschiedenen Einflüsse auf das Klopfen einwirken, zeigt folgende Zusammenstellung:

Das Klopfen wird verstärkt durch:

- Erhöhung der Verdichtung,
- Erhöhung der Vorzündung,
- Erhöhung der Kühl-*) und Gemischttemperatur,
- Erhöhung d. Füllungsgrades,
- Vergroßerung d. Hubraumes,
- Vergroßerung des Flammenweges.

*) Allerdings nur bei hochbeanspruchten Motoren in neuemswert. Umfang.

Das Klopfen wird verringert durch:

- Erhöhung der Drehzahl (Wirbelung),
- Vergroßerung d. Oberfläche.

Einige solcher Einflüsse wurden bei 4 Kraftstoffen von *Seeber*⁴²⁾ untersucht. (Abb. 9).

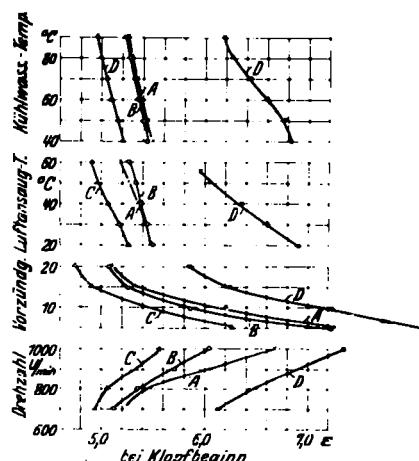


Abb. 9. Motorische Einflüsse auf die Verdichtung bei Klopfbeginn (nach Seeber).

³¹⁾ *Thompson* u. *Wheeler*, J. Instn. Petrol. Technologists **19**, 931 [1933].

³²⁾ *Maß* u. *Eweing*, J. physic. Chem. **37**, 13 [1933].

³³⁾ *Brooks*, J. Instn. Petrol. Technologists **19**, 835 [1933].

³⁴⁾ *Boerlage* u. *van Dyck*, ebenda **21**, 40 [1935].

³⁵⁾ 1. c.

³⁶⁾ *Nielsen*, Z. Forsch. auf dem Gebiete d. Ingenieurwes. IV, 300/307 [1933].

³⁷⁾ *M. Serruys*, C. R. hebdo. Séances Acad. Sci. **197**, 1592 [1933].

³⁸⁾ *J. Pontremoli* u. *M. Serruys*, Genie civil **CV**, 47 [1934].

³⁹⁾ *Withrow* u. *Raßweiler*, J. Soc. Autom. Engng. **36**, 125 [1935].

⁴⁰⁾ *Marvin*, *Caldwell*, *Steele*, Nat. Advis. Committ. Aeron. Nr 486 [1934].

⁴¹⁾ *Wendt* u. *Grimm*, Ind. Engng. Chem. **16**, 890 [1924].

⁴²⁾ *F. Seeber*, „Untersuchungen über die Auswirkungen mechanischer u. physikal. Einflüsse auf die Kompressionsbeständigkeit v. Kraftstoffen“, Diss. Breslau 1932.

Den Einfluß der Wirbelung untersuchte *Ricardo* (a. a. O.), indem er durch Ausbildung eines halbkugeligen Verbrennungsraumes über den Ventilen starke Gasbewegung und damit Kühlung erzielte. Bei Veränderung der Wirbelung durch verschiedene starke Drosselung im Übergang vom Verbrennungsraum zum eigentlichen Zylinder schwankte das für ein bestimmtes Benzin (Shell 1) zulässige Verdichtungsverhältnis in weiten Grenzen.

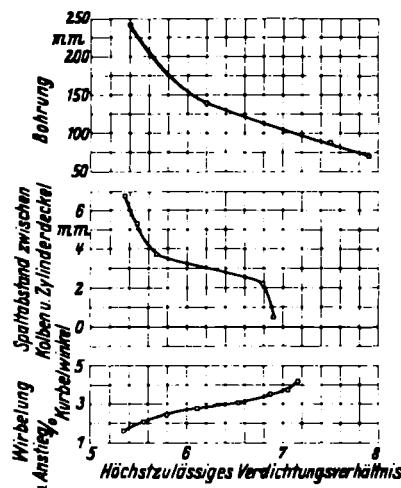


Abb. 10. Konstruktive Einflüsse auf die Klopfnigung (nach *Ricardo*).

Den Einfluß der Zylindergröße auf die Klopfnigung untersuchte ebenfalls *Ricardo* mit Zylinderköpfen vergleichbarer Form (Abb. 10).

Stellt man die Betriebsbedingungen und ihren Einfluß auf Druck, Temperatur und Zeit, sowie Klopfen zusammen, so erhält man folgendes Bild:

Tabelle 3.
Auswirkung der Betriebsbedingungen.

Betriebsbedingung	Einfluß auf			
	Temperatur	Druck	Zeit	Klopfen
Erhöhte:				
Verdichtung	+	+		+
Vorzündung	+	+		+
Kühl (Gemisch) Temp. .	+	+		+
Füllungsgrad	+	+		+
Hubraum	+	+	+	+
Flammenweg				+
Drehzahl	+	—	—	—
Oberfläche	—			—

Daß Steigerung der Drehzahl trotz höherer Temperaturen eine Verringerung des Klopfnens bewirkt, ist durch die Verringerung des Verdichtungsenddruckes und der Reaktionszeit begründet.

b) Motorische Einflüsse auf die Verbrennungsbedingungen.

1. Einflüsse auf die mittlere Verbrennungsraumtemperatur.

Den Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen auf die mittlere Verbrennungsraumtemperatur eines CFR-Motors zeigt Abb. 11 nach Messungen von Dr. *Seeber* in der DVI.⁴³⁾ Wenn auch die einfache Übertragung dieser Werte auf Motoren gänzlich anderer Bauart nicht ohne weiteres zulässig ist, kann man doch die verschiedene Bedeutung der einzelnen Bedingungen danach beurteilen. Das Verdichtungsverhältnis und die Drosselstellung, Zündung und Drehzahl haben sehr starken Einfluß auf die mittlere Verbrennungsraumtemperatur, die Gemischtemperatur einen

⁴³⁾ Die Versuche mit einer Pendeldynamo wurden bei der Vergasereinstellung für $\epsilon = 6,0$ und starker Klopfen bei den Bedingungen der Motor-Methode durchgeführt, um Grundlagen für die Beurteilung der Oktanzahlbestimmung zu schaffen.

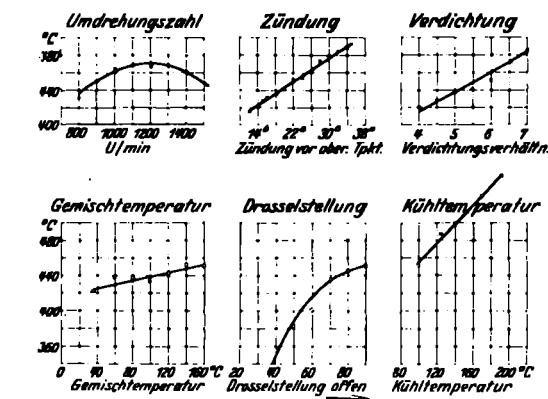


Abb. 11. Abhängigkeit der mittleren Temperaturen im Verbrennungsraum von verschiedenen Betriebsbedingungen, gemessen im CFR-Vergasermotor.

viel geringeren, während die Kühlwassertemperatur den Wärmezustand des Motors am meisten ändert, sofern man die verwendete Meßstelle (Zündkerze) als charakteristisch annimmt. Der Einfluß der Gemischstärke wurde bereits in Abb. 4 für einen anderen Motor gezeigt. Die Zunahme der mittleren Verbrennungsraumtemperatur mit der Verdichtung wird dadurch mitverursacht, daß um so weniger temperaturerniedrigende Restgase nach der Verbrennung im Zylinder hinterbleiben, je höher die Verdichtung ist⁴⁴⁾.

2. Einflüsse auf den Verdichtungsenddruck und den Verbrennungsdruck.

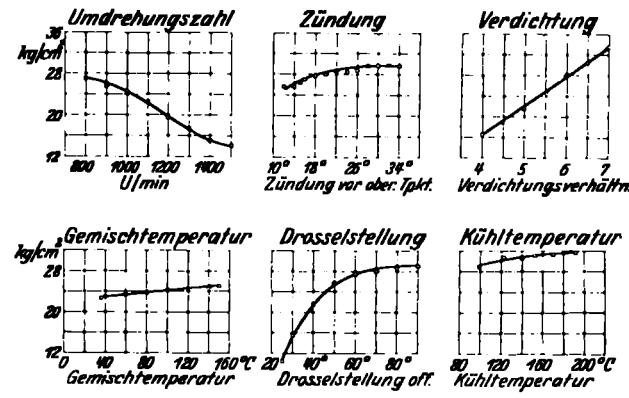


Abb. 12. Abhängigkeit des Verbrennungsenddruckes von verschiedenen Betriebsbedingungen n , gemessen im CFR-Vergasermotor.

Der Druck bei der Verdichtung und der Explosionsdruck wird in ähnlicher Weise durch die Betriebsbedingungen verändert wie die Temperatur. In Abb. 12 ist die Beziehung zwischen den verschiedenen Bedingungen und Explosionsdruck, in Abb. 13 der Zusammenhang zwischen Überladendruck und Explosionsdruck für eine Vergasereinstellung verzeichnet.

Bei sehr rascher Verbrennung (Detonation) erfolgt der Druckausgleich nicht unbedingt mit derselben Geschwin-

⁴⁴⁾ S. *Pye*, 1. c., S. 127.

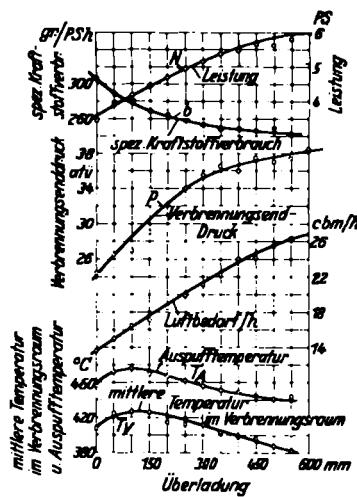


Abb. 13. Änderung der Betriebsverhältnisse im CFR-Motor bei Überladung, Drehzahl 1200 min⁻¹. Kraftstoff: Fliegerbenzin. Eine Vergasereinstellung.

digkeit, sodaß erhebliche Druckunterschiede auftreten können. Aber auch ohne Detonation kann der Lauf des Motors infolge zu raschen Druckanstieges hart werden, wenn z. B. infolge übermäßigiger Wirbelung die Verbrennungsgeschwindigkeit zu groß wird. Die Beherrschung des Druckanstieges wird deshalb auf verschiedene Weise versucht. *Ricardo* lässt 15—25 % des Gemisches langsam, den Rest rasch verbrennen, während *Janeaway* die Ansicht vertritt, daß das Verhältnis von durchlaufenem Flammenweg zum Gemischvolumen so sein sollte, daß nach Zurücklegung von 50 % des Weges bereits 50 % des Gemisches verbrannt sind. *Taub* hat auf Grund dieser Auffassung ein graphisches Verfahren zur Ausmessung von Verbrennungsräumen ausgearbeitet, das sich anscheinend gut bewährt, obwohl es die Wirbelung außer acht läßt und nur die räumlichen Abmessungen berücksichtigt⁴⁵⁾.

3. Einflüsse auf die Verbrennungsgeschwindigkeit.

Die Verbrennungsgeschwindigkeit wird, außer von Druck und Temperatur, von konstruktiven Verhältnissen deshalb stark beeinflußt, weil diese die Gasbewegung (Wirbelung) verändern. Die Ursachen der Gasbewegung

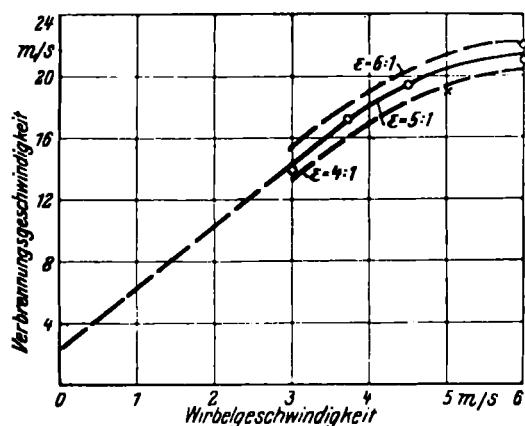


Abb. 14. Mittlere Verbrennungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wirbelgeschwindigkeit (Benzol) nach Schnauffer.

sind dreifache: die Strömung am Einlaßventil, die Verdrängung des Gases durch den Kolben bei der Verdichtung und bei der Flammenausbreitung. Versuche von *Schnauffer* zeigen durch unmittelbare Messung der Flammenionisation, daß die Verbrennungsgeschwindigkeit in etwa linearer Abhängigkeit von der Drehzahl ansteigt⁴⁶⁾ (Abb. 14). Daß Steigerung der Drehzahl trotz höherer Temperaturen eine Verringerung des Klopfens bewirkt, ist durch die Verringerung des Verdichtungsenddruckes und der Reaktionszeit begründet. Gegenklopfmittel, wie Bleitetraäthyl, ändern die Verbrennungsgeschwindigkeit von Kraftstoffen bei nichtklopfendem Betrieb nicht⁴⁷⁾.

c) Messung der Klopfestigkeit.

Die Schwierigkeiten, die bald nach Einführung der motorischen Kraftstoffprüfung erkannt wurden, in verschiedenen und sogar gleichen Motoren übereinstimmende Ergebnisse zu erhalten, führten zum Vergleich des Verhaltens der Kraftstoffe mit dem reiner Bezugskraftstoffe, wie n-Heptan und Iso-Oktan, unter festgelegten Bedingungen. Trotz der damit erreichten Möglichkeit, die zahlenmäßige Bestimmung der Klopfestigkeit durchzuführen,

⁴⁵⁾ Vgl. C. C. Minter, J. Soc. Autom. Engng. **36**, 89 [1935]; *Janeaway*, SAE Journal **24**, 498 [1929].

⁴⁶⁾ Dieselmotoren V. Berlin, VDI-Verlag 1931, 127.

⁴⁷⁾ Withrow u. Boyd, Ind. Engng. **23**, 539 [1931].

befriedigte die Lösung nicht restlos. Einerseits kann sich die Reihenfolge der Bewertung von Kraftstoffen bei verschiedenen Betriebs- oder Prüfbedingungen ändern⁴⁸⁾ und ist es fraglich, welche Bedingungen zur Beurteilung der Verwendbarkeit in einem bestimmten Motor herangezogen werden sollen, andererseits ist es in der Natur der Wertangabe nach Volumprozenten begründet, daß man eine asymptotische Kurve erhält, bei der 1 Vol.-% Unterschied an einem Ende eine ganz andere Bedeutung besitzt als am anderen. Solange die Kraftstoffe in einem Bereich von etwa 60—70 Oktan (Motornmethode) lagen, störte dies weniger. Anders wird es jetzt, wo Flugmotorenkraftstoffe mit 87,92, ja 100 Oktan praktisch verwendet werden. Neuerdings wird deshalb an Stelle des chemischen ein physikalisches oder technisches Maß gesucht. So schlägt *Boerlage* die beim Klopfbeginn zulässige Überladung in Millimeter Hg, *Evans*, *Dodd* und *Garner* den beim Klopfbeginn messbaren Verbrennungshöchstdruck in Pfund/Zoll², *Serruys* die Leistung bei Überladung unter bestimmten Bedingungen vor^{49, 50, 51)}. Das Wichtigste an einem praktisch bedeutungsvollen Maß ist seine Anwendbarkeit auf die Praxis, in diesem Falle auf Auto- und Flugzeugmotoren. Diese sehr umfangreiche Arbeit wird derzeit — vor allem in USA — durchgeführt, wobei sich ergibt, daß CFR-Motorwerte und Automobilergebnisse zwar im Mittel übereinstimmen, im Einzelwert aber starke Abweichungen zeigen können. Deutsche Versuche sprechen für bessere Eignung der Research-Methode, wenn Benzol- und Alkoholgemische in Frage kommen⁵²⁾. Der Vergleich zwischen CFR-Motor und Flugmotor hat bisher recht gute Übereinstimmung der Motor-Methode für Naturbenzine (mit und ohne Bleizusatz) ergeben, während Benzolgemische und Crackbenzine nach Ansicht der Amerikaner im CFR-Motor zu günstig abschneiden. Ein Vergleich der neu vorgeschlagenen Verfahren mit dem Ergebnis des Flugmotors liegt bisher nicht vor. Solange aber die Betriebsbedingungen von Prüfmotor und Auto- oder Flugmotor nicht genauer analysiert werden, ist es wahrscheinlich, daß Abweichungen auftreten werden, für die eine Erklärung fehlt.

An dieser Stelle sei betont, daß Temperaturmessungen allein kein Maß einer klopfenden oder nichtklopfenden Verbrennung bilden. Kraftstoffe mit niedrigem Wasserstoffgehalt geben z. B. höhere mittlere Verbrennungstemperaturen als Benzine mit und ohne Bleizusatz, auch wenn sie noch weit von klopfender Verbrennung entfernt sind.

IV. Vorgänge bei der Verbrennung im Dieselmotor.

a) Normale und klopfende Verbrennung (rauher Gang) im Dieselmotor.

Der Diesel-Motor arbeitet theoretisch nach dem Gleichdruckverfahren, d. h. infolge der während der Verbrennung erfolgenden Einspritzung sollte über einen längeren Kurbelwinkel gleicher Druck herrschen. Während diese Annahme für langsam laufende mit Lufteininspritzung arbeitende Motoren angenähert zutrifft, ist sie bei Schnellläufern mit direkter Einspritzung nicht erfüllt. Ihre Voraussetzung ist, daß die Zündung möglichst bald nach der Einspritzung

⁴⁸⁾ Vor allem wegen der verschiedenen Auswirkung der Temperatur auf verschiedene Kraftstoffe, vgl. *Peletier*, Proc. World Petr. Congress **II**, 165 [1933].

⁴⁹⁾ *Boerlage*, *Peletier* u. *Tops*, Aircraft Engineering **82**, 306/308 [1935].

⁵⁰⁾ *Evans*, *Dodd* u. *Garner*, J. Instn. Petrol. Technologists **21**, 1000—1012 [1935].

⁵¹⁾ *Serruys*, C. R. hebdom. Séances Acad. Sci. **201**, 815 [1936].

⁵²⁾ Die CFR-Motor-Methode verwendet 150° Gemischtemp., 900 U/min, die Research-Methode keine Gemischvorwärmung und 600 U/min.

erfolgt, denn anderenfalls befindet sich im Verbrennungsraum eine zu große Energiemenge, die bei der endlich einsetzenden Zündung zu rasch frei wird und übermäßige Drucke bzw. Druckanstiege verursacht. Da die Verdichtungsenddrucke der Diesel-Motoren viel höher liegen als die der Otto-Motoren, sind auch die Explosionsdrücke erheblich größer und ist ihre weitere Steigerung durch ungeeignete Verbrennung bedenklich. Vor allem verursachen die höheren Drücke schwerere Bauart und infolgedessen höhere Gewichte; ihre Senkung ist aber nur durch bessere Beherrschung der Verbrennung möglich. Ebenso, wie bei Vergasermotoren durch geeignete motorische Maßnahmen das Klopfen verringert oder verhindert werden kann, kann man bei Diesel-Motoren durch höhere Verdichtung, höheren Temperaturzustand (Ansaugluft, Kühlwasser, Glühstelle) das Klopfen und den rauen Gang vermeiden.

Die Dieselverbrennung ist vor allem dadurch gekennzeichnet, daß der Kraftstoff nicht (oder nur zu einem kleinen Bruchteil) verdampft oder vergast, sondern flüssig mit der Verbrennungsluft genügend entzündet wird. Dementsprechend erkennt man in Dieseldiagrammen deutlich

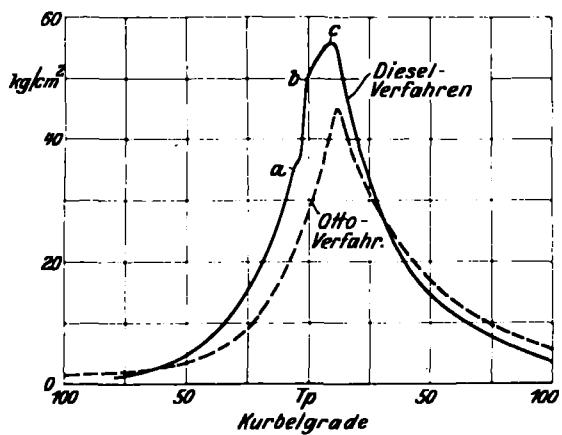


Abb. 15. Diagramme des Otto- und Diesel-Verfahrens.

die Abschnitte: a) Beginn der Einspritzung bis zur Zündung, d. h. die Vorbereitung zur Zündung durch Anoxydieren der zerstäubten Teilchen); b) Zündung und sehr rascher Druckanstieg (der beherrschte Teil der Verbrennung); c) Druckänderung je nach Charakteristik der Brennstoffpumpe (beherrschter Teil der Verbrennung), vgl. Abb. 15.

Je steiler der Druckanstieg nach der Zündung ist, um so härter wird der Lauf des Motors; begünstigt wird dies „Klopfen“ durch spätes Einsetzen der Zündung und außerdem durch zu rasche Kraftstoffzuführung. Die unmittelbare Ursache ist dennach in der Verzögerung der Zündung zu suchen. Dieser Zündverzug selbst spielt eine um so geringere Rolle, je langsamer und größer die Dieselmotoren sind, wogegen er bei hohen Drehzahlen oder geringem Ansaugdruck von großer Bedeutung werden kann. Die normale Verbrennung geht also allmählich in den rauen Gang bzw. das Dieselklopfen über, wenn der Zündverzug wächst.

Der Zündverzug wird einerseits durch die chemische Konstitution der Kraftstoffe, andererseits durch die im Motor herrschenden Bedingungen bestimmt. Die Eignung der Dieselkraftstoffe ist der für den Vergaserbetrieb i. allg. umgekehrt proportional, am besten bewähren sich also rein paraffinische Öle, schlechter naphthenische, am schlechtesten aromatische, wenn man von der Art der Gemischbildung absieht, oder sie für den Vergleich als gegeben annimmt. Entscheidend ist der Vorgang der Selbstzündung unter den Bedingungen des Motors. Wie er im einzelnen verläuft, ist noch nicht klar. Tausz und Schulte haben

darauf hingewiesen, daß sich als Zwischenprodukte Moloxyde bilden können, doch wird andererseits die Ansicht vertreten, daß die Motortemperaturen zu hoch und die verfügbaren Zeiten zu kurz für ihre Bildung wären, so daß der thermische Zerfall der Kohlenwasserstoffe und die Reaktionsfähigkeit der entstandenen Bruchstücke ausschlaggebend für ihre Zündfähigkeit wären⁵³⁾. Neumann hat neuerdings gezeigt, daß der Verbrennungsablauf im Dieselmotor eine Funktion von Aktivierungswärme, Aktionskonstante und Temperatur ist und nur durch die Katalyse von C und H₂O genügend rasch (nach der Wassergasreaktion) verläuft. Da bei der spektroskopischen Beobachtung keine oder nur wenig Banden vorkommen, wie sie in der Flamme zu beobachten sind (Methin, Dicarbon, Hydroxyl), nimmt er an, daß offenbar zuerst ein Dehydrierungsprozeß beginnt, ähnlich, wie das für Vergaserkraftstoffe von Lewis und von Berl mit seinen Mitarbeitern vorausgesetzt worden ist⁵⁴⁾. Aus der Messung der Aktivierungswärme schließt Neumann, daß eine Aufspaltung des Sauerstoffmoleküls nicht in Frage kommt; die Tatsache, daß Stoffe wie Amylnitrit eine sehr starke Wirkung auf die Selbstzündung besitzen, läßt sich damit vereinen, da der aktive Sauerstoff aus dem Amylnitrit ja keine so hohe Aktivierungsenergie benötigt, um zu entstehen. Im übrigen sei auf die sehr interessanten Arbeiten von Neumann hingewiesen, da sie hier nur ganz kurz erwähnt werden können. Die weitere Untersuchung dieser Vorgänge erscheint für die Aufklärung des Verbrennungsverganges im Motor von größter Bedeutung.

b) Motorische Einflüsse auf die Verbrennungsbedingungen.

1. Mittlere Verdichtungsendtemperatur und mittlere Verbrennungsraumtemperatur.

Die wichtigste Bedingung für die Verdichtungsend- und die mittlere Verbrennungsraumtemperatur ist die Verdichtung. Abb. 16 zeigt nach Magg die Verdichtungsendtemperaturen in Abhängigkeit von der Verdichtung. Versuchsergebnisse von Dipl.-Ing. Slowak, die er bei Messungen in der DVL in einem Einzylinder-Versuchsmotor eigener Konstruktion erhielt, sind in Abb. 17 zusammengestellt. Die normalen Betriebsbedingungen waren dabei: $n = 700/\text{min}$, Spritzbeginn $17^\circ \text{ v. o. T.}$, $\epsilon = 14.0$, Ansauglufttemperatur 35° , Kühlwassertemperatur 70° , Belastung $3/4$. Man sieht daraus, daß die Zylinder-temperatur (im Mittel) am stärksten mit Drehzahl, Verdichtung und Einspritzbeginn steigt, weniger mit Ansauglufttemperatur und Kühlwassertemperatur, kaum aber mit der Belastung, während die Auspufftemperatur sehr stark mit der Belastung, erheblich mit der Ansauglufttemperatur und der Drehzahl und wenig mit der Kühlwassertemperatur zunimmt.

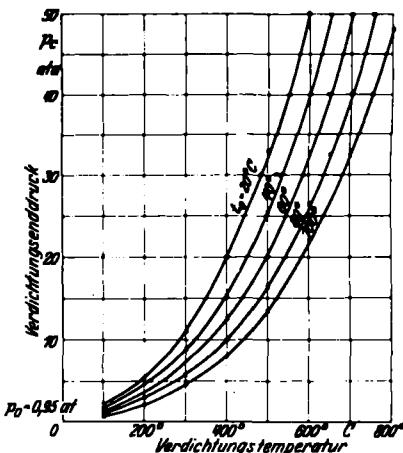


Abb. 16. Verdichtungsenddruck und Temperatur im Dieselmotor (nach Magg).

⁵³⁾ Boerlage u. van Dyck, J. Instn. Petrol. Technologists 21, 40 [1935].

⁵⁴⁾ K. Neumann, Forschg. 7, 57 [1936].

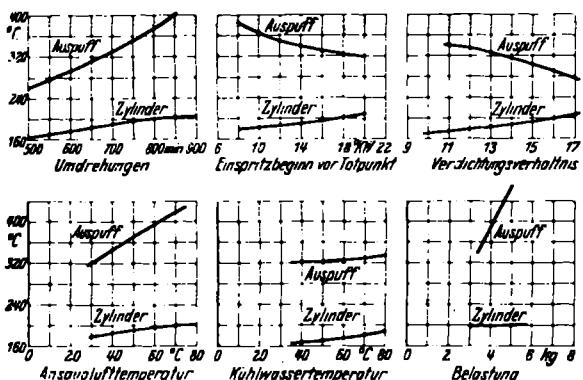


Abb. 17. Abhängigkeit der Temperaturen eines Dieselprüfmotors von verschiedenen Betriebsbedingungen.

2. Verdichtungsenddruck.

Der Druck spielt für die Selbstentzündung eine kaum weniger wichtige Rolle als die Temperatur. Der Verbrennungsenddruck steigt natürlich mit der Verdichtung

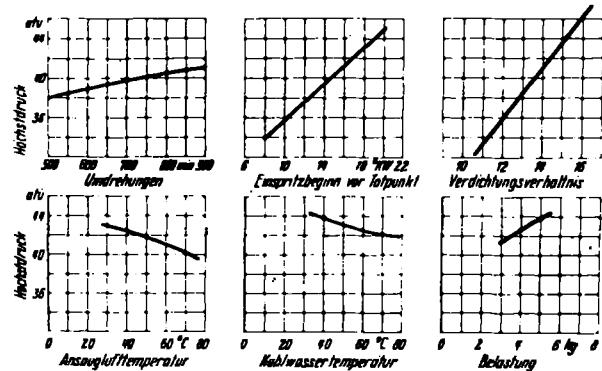


Abb. 18. Abhängigkeit des Höchstdruckes eines Dieselprüfmotors von verschiedenen Betriebsbedingungen.

am stärksten, wird durch den Einspritzbeginn, die Belastung und endlich die Drehzahl gesteigert, während die Erhöhung der Ansaugluft- und Kühltemperatur eine Senkung des Druckes bewirkt (Abb. 18).

3. Wärmeübergang.

Je kleiner bei einem gegebenen Hubraum die gekühlte oder umgekehrt, je größer die nicht gekühlte Oberfläche ist, um so geringer wird die Wärmeableitung, d. h. um so besser die Zündung sein. Dieser Einfluß ist der weitaus überwiegende, wie die Vielfalt der praktisch angewendeten Verbrennungsräume beweist⁵⁵⁾. Der Einfluß der Drehzahl auf Druck und Temperatur wurde bereits besprochen; bei kleinem Hubraum wird sich die Drehzahlsteigerung meistens ungünstiger auswirken als bei großem, weil der Wärmeübergang an die Wände dabei unverhältnismäßig größer wird. I. allg. sind die Verhältnisse bei gleicher Drehzahl um so günstiger, je größer das Hubvolumen ist, ähnlich wie bei den Otto-Motoren mit wachsendem Hubvolumen die Klopfneigung zunimmt.

4. Katalytische Einflüsse.

Broche⁵⁶⁾ hat geglaubt, durch Verwendung von katalytisch wirksamen Stoffen in wärmetauenden Teilen wesentliche Zündverbesserungen erzielen zu können, es hat sich aber gezeigt, daß die Verwendbarkeit von Teeröl nicht auf Katalyse, sondern auf die Wärmezufuhr durch diese Teile zurückzuführen war, wie sie auch bei Vorkammermaschinen erfolgt. Weitere Versuche erscheinen aber wünschenswert.

⁵⁵⁾ Vgl. Zinner, Z. Ver. dtsch. Ing. 79, 1319 [1935].⁵⁶⁾ Broche, Ehmann u. Scheer, Glückauf 68, 965 [1932].

c) Messung der Verbrennungseigenschaften von Dieselkraftstoffen.

Die motorische Messung der Verbrennungseigenschaften von Dieselkraftstoffen benutzt bisher verschiedene Verfahren und Bewertungsgrundlagen, wie Tabelle 4 zeigt:

Tabelle 4.
Verfahren zur Messung der Zündneigung von Dieselkraftstoffen.

Autor	Motor	Motorisches Maß	Bezugs-kraftstoffe
Boerlage	Thomassen	Zündverzug in °	Ceten-Methyl-naphthalin
Pope ⁵⁷⁾	CFR-Motor (Diesel)	Mindestverdich-tung für Zündung	—
Stansfield	Gardner	Drosselöffnung	Ceten-Methyl-naphthalin
Dumanois	CFR-Motor	b. Zündaussetzer bouncing pin	Oktanzahl der 20%ig. Mischung in Benzin

Als Maß des Zündverhaltens wird also bei diesen Motorversuchen die Reaktionszeit mit Luft bis zur Zündung, die Temperatur und der Druck, die mindestens zur Zündung erforderlich sind, entweder durch Änderung des Verdichtungsenddruckes mittels des Verdichtungsverhältnisses oder mittels der Drossel und die Reaktionsgeschwindigkeit (Druckanstieg) bei der Verbrennung verwendet. Mit Ausnahme des Verfahrens von Dumanois sind trotzdem die Ergebnisse weniger verschieden als man erwarten sollte, wenn auch vereinzelt ganz erhebliche Abweichungen

- 1 — Aussetzer Verfahren (DVL)
- 2 — Zündverzug —
- 3 — Erste Zündung im CFR-Dieselmotor
- 4 — — — mit Drosselung (DVL)
- 5 — — — „Körting Motor“ Olex

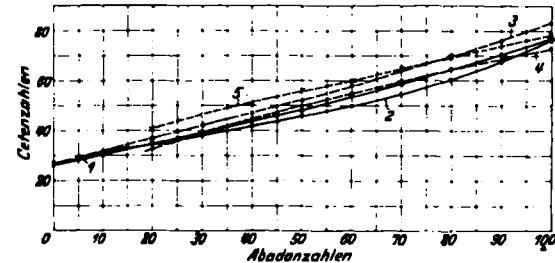


Abb. 19. Eichung von Diesel-Kraftstoffen nach verschiedenen Verfahren.

einsetzen. Abb. 19 zeigt die nach verschiedenen Verfahren für gleiche Bezugskraftstoffe und Standardkraftstoffe erhaltenen Eichkurven. Es scheint so, als spielt für die Vergleichsmessung die Wärmeübertragung von der verdichteten Luft auf den eingespritzten Kraftstoff eine so überragende Rolle, daß dagegen andere Umstände, wie Drehzahl, Hubvolumen, Wärmeübergang auf die Wände zurücktreten. Ebenso, wie bei Vergasermotoren, ist es aber wünschenswert, daß zur Beurteilung der Brauchbarkeit bestimmter Kraftstoffe in einem gegebenen Motor dessen physikalische Charakteristik wesentlich genauer durchgeführt wird als bisher.

Auch bei den Dieselkraftstoffen muß darauf hingewiesen werden, daß der Versuch, durch Verwendung von Bezugskraftstoffen Schwankungen der Ergebnisse zu vermeiden, nicht restlos geglückt ist. Wahrscheinlich wird dieses Ziel nur dann erreichbar sein, wenn man die Betriebsbedingungen im erwähnten Sinne nach Temperatur, Druck,

⁵⁷⁾ Die Messung im CFR-Motor scheint neuerdings auch auf die Bestimmung des Zündverzuges und die Verwendung von Cetan zurückzugreifen, vgl. Schaezler u. Hetzel, sowie Rendel, J. Soc. Autom. Engng. 38, Febr. 21 [1936].

Reaktionszeiten und Wärmetransfer genau festlegt. Zweifellos ist die Ausmessung eines Motors in dieser Weise nicht einfach und ebensowenig die Prüfung eines Kraftstoffes derart, daß das Ergebnis für die verschiedenen Betriebsbedingungen anwendbar ist. Erst eingehende Messungen in dieser Richtung werden aber weitere Grundlagen zur Beurteilung des Vor- und Nachteiles konstruktiver Maßnahmen geben und die restlose Anpassung von Motor an den Kraftstoff und umgekehrt ermöglichen. *Boerlage* und *van Dyck* halten die Bestimmung der Temperatur für den wichtigsten Umstand und wollen sie deshalb auf verschiedene Weise versuchen. Eine Erfassung der anderen Betriebsbedingungen wird zusammen mit der Messung der Temperaturen wohl die Entwicklung der Verbrennungsforschung in der von *Neumann* erfolgreich beschrittenen Richtung so weit fördern, daß die günstigste Verwertung gegebener Kraftstoffe möglich wird.

V. Praktische Anwendung der Temperaturmessung im Motor.

Ein gutes Beispiel für die Brauchbarkeit der Temperaturmessung zur Erkennung des sonst schwer erklärbaren Verhaltens von Motoren bildet die Untersuchung eines CFR-Motors der DVI, (I), der stets zu niedrige Oktanzahlen ergab, obwohl er bei Verwendung gleicher Bezugskraftstoffe

dieselben Benzolwerte lieferte wie andere Motoren. Die Messung der Verbrennungsraumnitteltemperaturen zeigte, daß unter gleichen Bedingungen der Motor I um 10 bis 15° höhere Temperaturen hatte als der Motor II. Dagegen waren seine Auspufftemperaturen um etwa den gleichen Betrag niedriger (vgl. Abb. 20). Im CFR-Motor I wird also offenbar mehr Wärme aufgenommen als im Motor II, so daß die mittlere Temperatur entsprechend steigt und aus diesem Grunde nied-

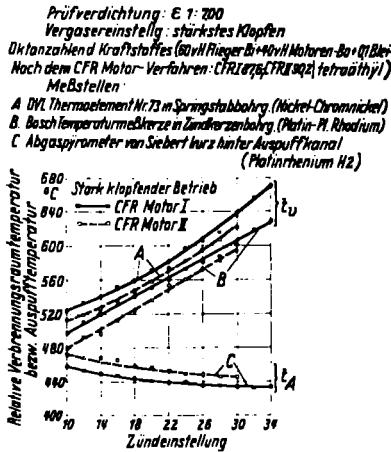


Abb. 20.

Mittlere Verbrennungsraum- und Auspufftemperaturen in 2 CFR-Motoren.

rig Oktanzahlen zur Folge hat: Oktan erleidet ja bei höheren Temperaturen weniger Einbuße an Klopffestigkeit als die meisten anderen Kraftstoffe. Die beiden CFR-Motoren zeigten auch eine andere Eigentümlichkeit: während mit demselben Kraftstoff der CFR-Motor I erst bei 6,07 Verdichtung zu klopfen begann, trat dies beim CFR-Motor II schon bei 5,91 ein. Dagegen lag die für die Prüfung notwendige Verdichtung im Motor I bei 6,91, im Motor II aber erst bei 7,18. Nimmt man die gleiche Empfindlichkeit des *bouncing pin* in beiden Motoren an, was zulässig erscheint, so ergibt sich auch daraus, daß beim Klopfen der CFR-Motor I mehr Wärme aufnimmt als der CFR-Motor II. Erwähnt sei noch, daß bei gleichem Verdichtungsverhältnis 1:7,0 der Motor I einen Verdichtungsenddruck von 144 Pfund/Zoll² hatte, der Motor II 140, also fast denselben. — Die Temperaturmessung zeigt also, daß beim Klopfbetrieb der Motor I stärker wärmebelastet ist als der Motor II, was durch andere Messungen nicht erfaßbar war; diese Wärmebelastung verursacht wiederum ein anderes Verhalten der Kraftstoffe und ist zur Beurteilung von Motoren im allgemeinen, der von CFR-Motoren im besonderen von ausschlaggebender Bedeutung.

VI. Forschungsmöglichkeiten.

Teilt man das Gebiet der motorischen Verbrennung in die vier Gruppen: 1. Kraftstoff, 2. Verbrennungsluft, 3. Motor, 4. Verbrennung, so zeigen sich folgende Möglichkeiten für weitere Untersuchungen:

1. Kraftstoffe: Die bisher bekanntgewordenen Ergebnisse umfassen nur einen Teil der Kohlenwasserstoffe. Erweiterung der Klopfmessungen mit unvermischten Kohlenwasserstoffen darüber hinaus ist erwünscht. Ebenso verhalten sich manche Gemische aus Kohlenwasserstoffen günstiger, als aus dem Verhalten der reinen Stoffe zu folgern wäre. So sind die Mischungsoktanzahlen von Polymerbenzinen ganz erheblich höher als ihre in unvermischem Zustand bestimmten Oktanzahlen. — Auch Dieselsöle sollten in Form reiner Kohlenwasserstoffe untersucht werden, um den Einfluß der Struktur auf den Verbrennungsvorgang gut verfolgen zu können. Dazu wäre die Herstellung solcher Kohlenwasserstoffe erforderlich (Siedebereich 250°-350°). Die Dieselsöle des Handels müßten ebenfalls genauer auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht werden. Sowohl Diesel- wie Vergaserkraftstoffe müßten weiter auf ihr Oxydations- und Selbstzündungsverhalten untersucht werden; die Beziehungen zwischen chemisch-physikalischen Eigenschaften und Motorverhalten sind zu verfolgen.
2. Verbrennungsluft: Die Tatsache, daß Ozon stark klopffördernd, Argon an Stelle von Stickstoff stark klopfhindernd wirkt, legt Versuche nahe, sich mit der Beeinflussung der Verbrennung durch Veränderung des Luftanteiles des explosiven Gemisches zu befassen.
3. Motor: Da die Wände einen Einfluß auf den Ablauf der Verbrennung besitzen, sind Untersuchungen über die Frage erwünscht, wie sich Oberflächengestaltung und -art auf die Verbrennung auswirken. Besonders bei der Vorkammermaschine dürfte er dann von Bedeutung sein, wenn die Temperaturen oder die Reaktionszeiten zu niedrig sind.
4. Verbrennung bzw. Betriebsbedingungen: Weitere Verfolgung des Verbrennungsvorganges mit chemisch-physikalischen Mitteln ist notwendig. Die Erkenntnis, daß der Klopfvorgang im unvermischten Gasrest eintritt, läßt an Versuche denken, diesen Teil der Verbrennung besonders zu beeinflussen. Dazu gehört die Herstellung des bestzündenden Kraftstoff-Luft-Gemisches (Mikro- und Makroverteilung nach *Boerlage*) im Dieselmotor.

Für die Entwicklung sowohl der Kraftstoffe als auch der Motoren wird es notwendig sein, die chemisch-physikalischen Vorgänge im Motor (z. B. auf dem von Prof. *Neumann* erfolgreich beschrittenen Wege) zu verfolgen und zu dem praktischen Verhalten der Kraftstoffe in Beziehung zu setzen. Dabei ist insbesondere Wert darauf zu legen, daß das Prüfverfahren im kleinen Motor so ausgearbeitet wird, daß es für die verschiedenen Verhältnisse der großen Motoren anwendbar ist. Hierzu wird es notwendig sein, die Prüfung nicht nur auf eine einzige Standardbedingung zu beschränken, sondern die Betriebstemperaturen, -drucke und Reaktionszeiten (Drehzahlen) über den in Frage kommenden Bereich zu ändern. Die Übertragbarkeit der auf diese Weise gewonnenen Werte auf bestimmte Motoren anderer Bauart wird allerdings davon abhängig sein, daß man deren Betriebsbedingungen physikalisch genau kennt, so daß diese Ausmessung für die wichtigsten Motoren durchgeführt werden müßte. Aber erst auf dieser Grundlage werden sowohl Motoren als Kraftstoffe in der genauesten Weise geprüft und damit auch weiterentwickelt werden können.