

ohne Genehmigung
gestaltet
blare nur durch
bersetzer

Übersetzung aus der japanischen Zeitschrift

"Nainen Kikan" (Die Brennkraftmaschine)

Band 11, Nr.122, April 1972, Seite 57 - 68

ustav Kraut

ermbronn Die Verbrennungsschwankungen in den Fremdzündungsmotoren

Im Gäßle 16

von Prof.Dr.-Ing. S.Matsuoka
(Professor an der Industrie-
Hochschule Tokyo)

1. Vorwort

Bei einem Fremdzündungsmotor möchte man erreichen, daß die Umwandlung der Energie des Kraftstoffes in mechanische Energie bei jedem einzelnen Arbeitszyklus und in jedem einzelnen Zylinder genau in der gleichen Weise abläuft. Wenn dies nicht der Fall ist, muß man den Motor so einregulieren, daß er jeweils dem niedrigsten der bei den einzelnen Zylindern oder in den einzelnen Arbeitszyklen gemessenen Werte, oder aber einem niedrigen Mittelwert angepaßt ist, und man muß sich mit einem über den gesamten Motor und seinen Gesamtbetriebszustand genommenen Mittelwert begnügen, und man kann also die einzelnen Teile des mit viel Arbeitsaufwand entwickelten und konstruierten Motors nicht optimal ausnützen. Bisher kam es jedoch selten vor, daß von diesem Gesichtspunkt aus die Verbrennungsschwankungen praktisch zu einem großen Problem wurden; erst in der neuesten Zeit brachten es die Vorschriften über die Auspuffgase, und insbesondere über die Reduzierung von NOx mit sich, daß durch die außerordentlich mageren bzw. durch die allzu fetten Gasgemische, und auch durch die Anwendung von EGR oder dergleichen Verbrennungsschwankungen hervorgerufen werden, die ein ernsthaftes Problem darstellen, dessen Lösung man sich heute nicht mehr entziehen kann.

TTGART

Z. 1984

ftenstelle

Glücklicherweise hat die in der neuesten Zeit äußerst dringlich gewordene Forderung nach Forschungsarbeiten über die Verbrennungsschwankung bereits weithin einen großen Widerhall gefunden, und überall in den einzelnen Ländern haben sich die Forscher dazu bereit gefunden; auch bei uns hier in Japan haben allen voran die verschiedenen Aus-

schüsse des Japanischen Automobilingenieurverbandes, so der Ausschuß für Antriebsleistung, und neuerdings der Ausschuß für die Verbrennungsabgase (JARI) durch ganz besonders hervorragende Forschungsarbeiten^{1,2)} ihre Bereitschaft zur Mitwirkung an der Lösung dieses Problemes unter Beweis gestellt, wöüber wir uns sehr freuen können. Diese Forschungsarbeiten haben sich die Klärung des Problemes der Verbrennungsschwankungen zum Ziel gesetzt, diese Arbeiten sind zu einer wichtigen Kraft geworden, die im voraus zur Klärung der Gemischverbrennung beigetragen hat, und sie sind zu einer vorwärtstreibenden Kraft bei der Analyse der Verbrennung geworden, welche letzten Endes den Schlüssel liefert für die Klärung des Abgasproblemes. Leider ist jedoch nach dem heutigen Stand der Untersuchungen der Zusammenhang zwischen den Verbrennungsschwankungen und den Abgasen immer noch nicht in ausreichendem Maße geklärt und auch bei der vorliegenden Forschungsarbeit ist es nicht gelungen dieses Problem zu lösen. Der vorliegende Bericht gibt einen zusammenfassenden Überblick über die bisherigen Forschungsarbeiten, welche sich auf die Verbrennungsschwankungen in den Fremdzündungsmotoren beziehen, sowie auf die allerneuesten Forschungsarbeiten des Verfassers³⁾ und außerdem soll versucht werden, das Problem der Verbrennungsschwankungen systematisch zu erklären.

2. Die Definition des Begriffes der Verbrennungsschwankung - die charakteristischen Werte der Verbrennung

Wenn wir bei einem Fremdzündungsmotor die Indikatordiagramme für die einzelnen Zylinder oder für die einzelnen Arbeitszyklen in den Zylindern aufnehmen, dann stellen wir nicht selten ganz erhebliche Unterschiede fest. Die Schwankungen des Indikatordiagrammes bezeichnet man in diesem Falle ganz allgemein als Verbrennungsschwankungen; tatsächlich ist es auch ganz klar, daß die charakteristischen Werte der Verbrennung, wie sie durch die charakteristischen Eigenschaften eines derartigen Indikatordiagrammes repräsentiert werden, mehr oder weniger schwanken, so wie z.B. die Werte des Druckes P_{θ} in jedem einzelnen Winkelgrad, die Werte des prozentualen Druckanstieges $(dp/dt)_{\theta}$, wie auch die Maximalwerte P_{\max} , $(dp/dt)_{\max} = R_{\max}$, die Zeit

$T_{P_{max}}$, welche vom Zündzeitpunkt bis P_{max} verstreicht, die Verbrennungszeit T oder die Zeit, welche vom Zündzeitpunkt bis zum Beginn des Druckanstieges verstreicht, und welche gleich der Druckzündverzögerung T_{pv} ist usw. Weiterhin schwanken auch die nach dem Ionenspaltverfahren gemessenen Werte der Zündverzögerung T_{iv} , der Flammenausbreitungszeit $T_{i(1-n)}$ und der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit $f_{v(1-n)}$, sowie die durch Berechnung aus dem Indikatorgramm erhaltenen Werte des prozentualen Verbrennungsanteiles. Außerdem wird auch die aufgrund der Flammenleitabgreifung gemessene Zündverzögerung T_{sv} als Schwankungsgröße durch Messung erhalten (eine derartige Zündverzögerung wird insbesondere als Flammenausbreitungsverzögerung bezeichnet, um hierbei jedoch eine Verwechslung mit der Flammenausbreitungszeit zu vermeiden, sprechen wir hier von Zündverzögerung). Da die verschiedenen oben aufgeführten für die Verbrennung charakteristischen Werte bald ein jeweils verschiedenes Verhalten zeigen oder auch ein ganz ähnliches Verhalten zeigen, muß man, um zu einer genauen Diskussion der Verbrennungsschwankungen zu kommen, die verschiedenen charakteristischen Werte beim Namen nennen und die Zusammenhänge ihrer Ursachen und ihrer Wirkungen aufzeigen.

Bei der Diskussion über die Probleme der Verbrennungsschwankungen unter Verwendung der verschiedenen oben aufgeführten für die Verbrennung charakteristischen Werte ist es außerordentlich wichtig, wenn die Problempunkte der Diskussion die Verbrennung selbst betreffen, charakteristische Werte wie etwa R_{max} , $T_{P_{max}}$, T , $T_{i(1-n)}$, $f_{v(1-n)}$ zu verwenden, und dann, wenn die Problempunkte den reibungslosen Ablauf der Fahrt des Kraftfahrzeuges betreffen, P_{max} zu verwenden und so die Diskussion über die Schwankungseigenschaften in jedem einzelnen Fall zu führen.

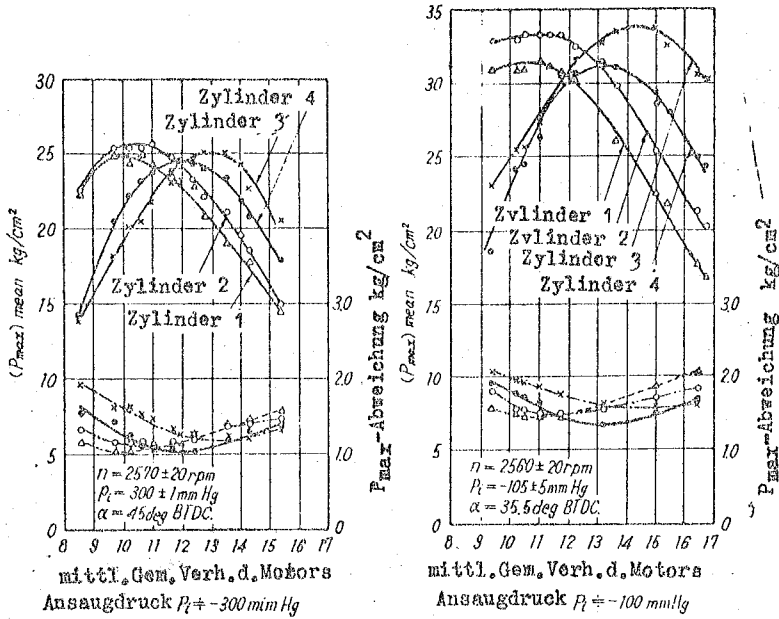
Aus den rein empirischen Untersuchungen und Prüfungen der Kraftfahrzeughersteller wissen wir, daß der reibungslose Ablauf der Fahrt des Kraftfahrzeuges in der Hauptsache eine Frage der starken Wechselbeziehung mit den Schwankungen von P_{max} ist. In der Literatur sind bis jetzt noch kaum Forschungsarbeiten veröffentlicht worden, in denen der Zusammenhang der verschiedenen für die Verbrennung

charakteristischen Werte mit dem reibungslosen Ablauf der Fahrt des Kraftfahrzeuges geklärt wurde; der Fahrkomfort des Kraftfahrzeuges, seine Antriebsleistungskennlinien und seine mechanischen Kennlinien müßten Gegenstand einer zusammenhängenden Forschungsarbeit sein. Derjenige Faktor, der den stärksten Einfluß auf P_{max} ausübt, ist die Verbrennungsgeschwindigkeit; dadurch jedoch, daß die Verbrennungsgeschwindigkeit mit dem Zündzeitpunkt, d.h. also mit der Verbrennungszeit kombiniert ist, zeigen die Schwankungen von P_{max} ein Verhalten, das sich sehr stark von den Schwankungen der Verbrennungsgeschwindigkeit unterscheidet. Dies zeigt deutlich, daß man, um die Fahreigenschaften eines Wagens (driveability) zu verbessern, insbesondere die Schwankungen von P_{max} verringern muß, dabei sollte man jedoch bedenken, daß man um dieses Ziel näherzukommen, die Verbrennungerscheinungen noch viel gründlicher untersuchen muß, daß man die Schwankungen der Verbrennungsgeschwindigkeit reduzieren muß und daß man darüberhinaus die der Regelung der Motorleistung dienenden veränderlichen Teile steuern muß und so die Schwankungen von P_{max} reduzieren kann. Damit ist gesagt, daß zwischen P_{max} und der Verbrennungsgeschwindigkeit ein inniger organischer Zusammenhang besteht, und daß P_{max} in der gleichen Weise wie R_{max} einen Wert der Verbrennungscharakteristik darstellt, der durchaus nicht immer vollkommen den Zustand der Verbrennung anzeigt.

3. Die von dem von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus schwankenden Gemischverhältnis herrührende Schwankung der Verbrennung

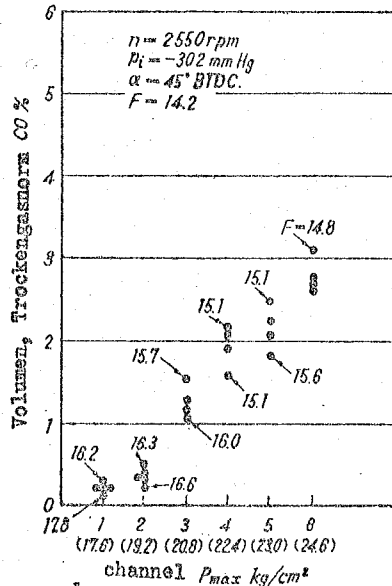
Selbst dann, wenn man durch eine Technik die verschiedenen Faktoren, welche die Ursache der Verbrennungsschwankung bilden, soweit das irgend möglich ist verringern könnte, so muß man sich doch darüber im klaren sein, daß es überaus schwierig ist, die Änderung zweier Faktoren, nämlich die Änderung der Gemischzusammensetzung und die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit und der Störungen der Strömung (Gastemperatur), denen doch ein außerordentlich starker Einfluß auf die Verbrennung zukommt, vollständig auszuschalten. In diesem Abschnitt wollen wir in der Hauptsache den Zusammenhang zwischen der Änderung der Gemisch-

zusammensetzung und der Verbrennungsschwankung betrachten.



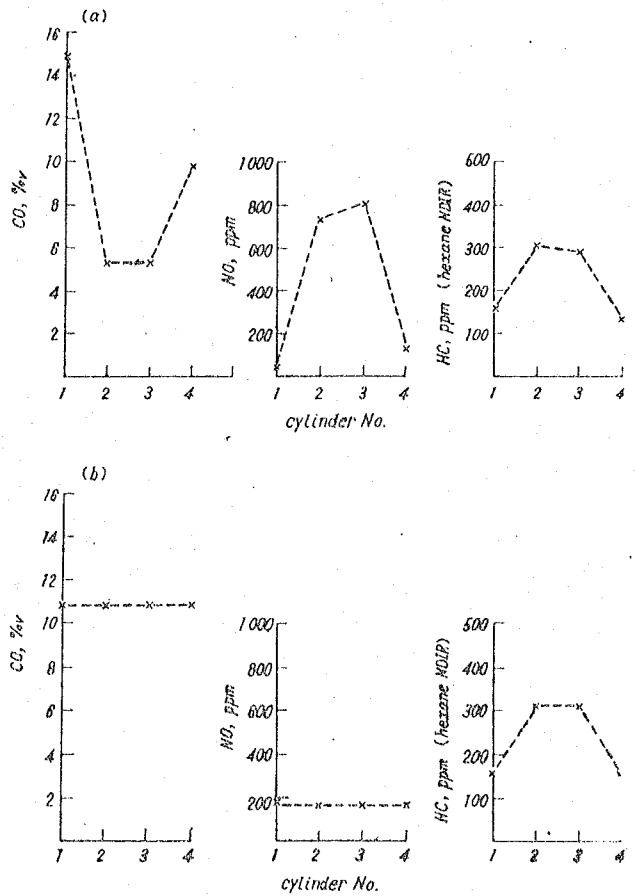
(Vergleiche die Zeitschrift "Nihon Kikai Gakkai Rombunshu", Bd.33,Nr.256, Dezember 1967)

Abb.1 Die Normabweichung der P_{max} -Werte in den einzelnen Zylindern von dem P_{max} Arbeitszyklusmittelwert $P_{max,mean}$.
 (Die Einflüsse der Last (des Ansaugunterdruckes) und des Motorgemischverhältnisses)



(Vergleiche "Nihon Kikai Gakkai Rombunshu", Bd.33, Nr.256, Dezember 1967)

Abb.2 P_{max} bei den einzelnen Arbeitszyklen und das dabei vorhandene Luftkraftstoffverhältnis.



Comparison of cylinder-to-cylinder variations in exhaust emission between carburetor and mixture generator at 3000 rpm, full throttle.
 (a) carburetor (air/fuel ratio=13.7)
 (b) mixture generator (air/fuel ratio=10.7)
 (SAE Paper 710523, 1971-6)

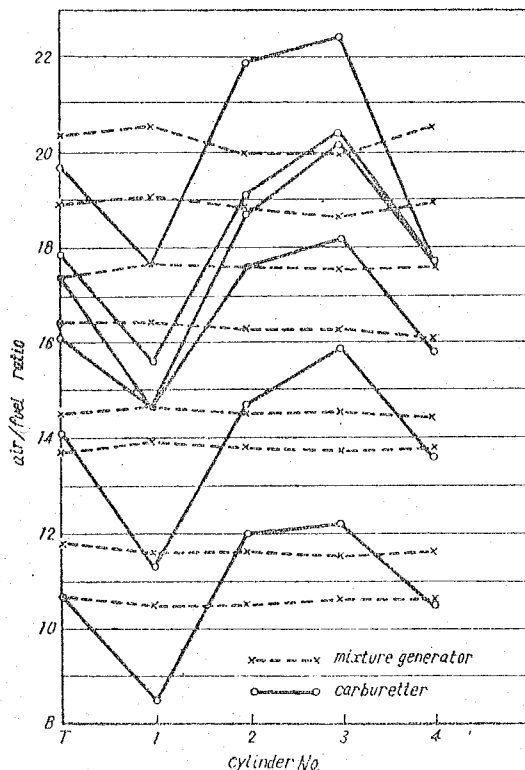
Abb.3 Die von den Verbrennungsschwankungen herrührenden Unterschiede in der Auspuffgaszusammensetzung in den einzelnen Zylindern für den Fall, daß man einen Vergaser und einen Gemischvervollkommnungsapparat verwendet hat.

3.1 Die Schwankung der Gemischzusammensetzung nach Kim Kim¹⁾ hat bei seinen Versuchen einen Viertakt-Vierzylinder-Benzinmotor der üblichen Bauart verwendet; er hat nachgewiesen, daß die Schwankung des Gemischverhältnisses am stärksten durch die Änderungen von P_{max} beeinflusst wird. Kim hat für jeden einzelnen Zylinder den Zusammenhang zwischen P_{max} und seiner Schwankung einerseits und dem Gemischverhältnis andererseits (Abb.1), sowie, indem er bei den einzelnen Arbeitszyklen P_{max} maß und gleichzeitig Gasproben entnahm und diese einer Analyse unterwarf, den Einfluß der Änderung des Gasgemisches auf P_{max} und seine Schwankungen in jedem einzelnen Arbeitszyklus festgestellt (Abb.2); auf diese Weise hat Kim gezeigt, daß die Schwankung von P_{max} in hohem Maße von den Änderungen des Gasgemisches abhängig ist; Kim hat ganz klar nachgewiesen, daß die Ursache der

Schwankungen von P_{max} bei einem Motor der üblichen Bauart, wie er heute ganz allgemein praktisch verwendet wird, in der Hauptsache in den Schwankungen des Gasgemisches bei den einzelnen Arbeitszyklen des Motors und in der Ungleichmäßigkeit der Kraftstoffzuteilung auf die einzelnen Zylinder zu suchen ist.

3.2 Der Zusammenhang zwischen der Gasgemischzusammensetzung und den Auspuffgasdaten nach Lindsay

R. Lindsay u.a.⁵⁾ von Shell Res. haben durch Verwendung einer großen Vorgemischvervollkommnungseinrichtung die Gemischverteilung auf die einzelnen Zylinder eines Vierzylindermotors vervollkommen und dadurch erreicht, daß die CO-Konzentration und die NOx-Konzentration in den Auspuffgasen bei den einzelnen Zylindern gleichmäßiger wurden (Abb.3)⁵⁾. Die Abb.4 zeigt den Unterschied in der Gemischverhältnisverteilung auf die 4 Zylinder des Motors, der sich ergibt, wenn man auf der einen Seite für die Gemischbereitung einen Vergaser verwendet, und auf der anderen Seite eine Gemischvervollkommnungseinrichtung.



(SAE Paper 710588 1971-6)

图-4 Distribution of air/fuel ratio at 3 000 rpm, full throttle

Man kann sich leicht vorstellen, daß derartige Schwankungen des Gemischverhältnisses ganz selbstverständlich außer-

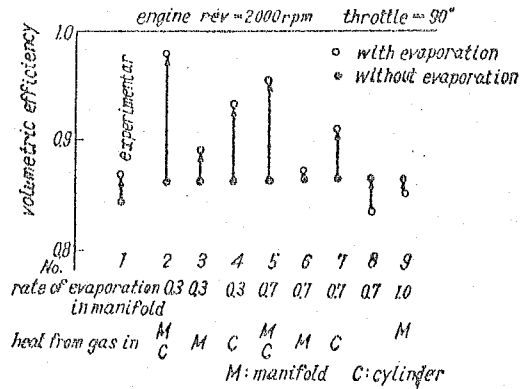
ordentlich starke Schwankungen der Verbrennung in den einzelnen Zylindern zur Folge haben.

Die Ursachen der Verbrennungsschwankung in den einzelnen Arbeitszyklen und in den einzelnen Zylindern des Motors beim heutigen Zustand eines praktisch laufenden Motors werden als im wesentlichen durch die Schwankungen des Gemischverhältnisses infolge einer ungleichmäßigen Kraftstoffaufteilung angesehen, und wir müssen zunächst daran denken, welche Gegenmaßnahmen in dieser Richtung zu ergreifen sind. Im Hinblick auf diese Gegenmaßnahmen ist zunächst, wenn es sich um einen flüssigen Kraftstoff handelt, die Beschleunigung der Verdampfung ein sehr wichtiges Problem. Wenn wir darauf ausgehen, die Verdampfung eines flüssigen Kraftstoffes zu fördern, dann müssen wir vor allem dafür sorgen, daß die Temperatur des eine Flüssigkeit darstellenden Kraftstoffes schnell ansteigt. Um diesen Zweck zu erreichen, hat man daran gedacht, 2 Verfahren in gemischter Form anzuwenden, und zwar einmal das Verfahren, bei welchem man den Kraftstoff zerstäubt, um ihm dadurch eine möglichst große Oberfläche zu verleihen, bei dem man dem Kraftstoff eine möglichst große Relativgeschwindigkeit verleiht, wobei man die Temperatur des den Kraftstoff umgebenden Gases erhöht und ihm so von diesem Gas her Wärme zuführt, während das andere Verfahren darin besteht, daß der Kraftstoff ganz dünn und weithin auf die Wandfläche aufgesprüht wird, daß er zu einem sehr schnellen Strömen gebracht wird, daß man die Temperatur der Wandfläche erhöht und dem Kraftstoff so vom festen Körper her Wärme zuführt.

3.3 Die Untersuchung des Einflusses der Vergasung beim Ansaugvorgang durch Matsuoka u.a.⁶⁾

Dem Verfasser ist es zusammen mit anderen gelungen, durch neueste Forschungen auf dem Wege der Simulation des Ansaugvorganges durch Rechnung und Versuch die nachstehend aufgeführten Tatsachen zu klären. Die Abb.5 zeigt auf der linken Seite ein erstes Beispiel von Versuchswerten, die man mit einem Einzylindermotor erhalten hat; die mit schwarzen Kreischen bezeichneten Werte hat man beim Betrieb mit gasförmigem Kraftstoff erhalten, während man die mit weißen Kreischen bezeichneten Werte bei Verwendung von

flüssigem Kraftstoff erhalten hat, und man sieht dabei den Einfluß der Erscheinung der Kraftstoffvergasung; in beiden Fällen war der Betriebszustand des Motors nahezu der gleiche, so daß es keine Schwierigkeiten bereitet, die Ergebnisse einander vergleichend gegenüberzustellen.



(Sammlung der Referate der Herbsttagung 1971 der Jap. Automobilingenieurgesellschaft)

Abb. 5 Prozentualer Vergasungsanteil und Volumenwirkungsgrad

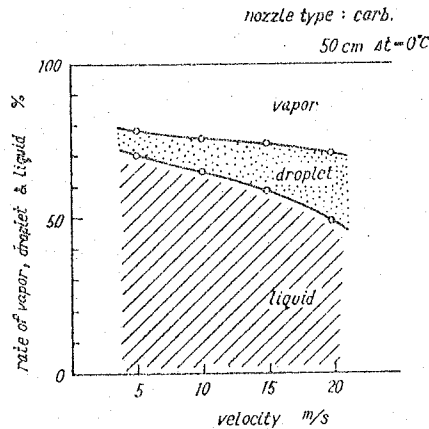
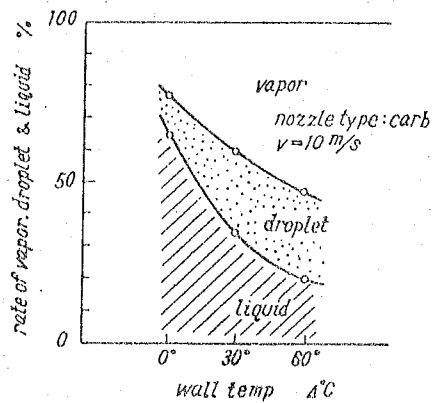


Abb. 6 Prozentuale Anteile des Dampfes, der Flüssigkeitstropfen und der Flüssigkeit (Änderung der Strömungsgeschwindigkeit)

Der Volumenwirkungsgrad war in dem zuletzt genannten Fall um ungefähr 4% höher, weil man die Temperatur der angesaugten Luft konstant gehalten hatte. Wir wollen versuchen, diesen Fall anhand der Beispiele 2, 3 und 4 durch Vergleich mit den berechneten und durch Schlußfolgerung gefundenen Werten näher zu untersuchen.



(Referate auf der Herbsttagung 1971 der Jap. Automobilingenieurgesellschaft)

Abb. 7 Die prozentualen Anteile des Dampfes, der Flüssigkeitstropfen und der Flüssigkeit (Änderung der Wandtemperatur)

Die Abb. 6 und 7 zeigen die bei den grundlegenden Versuchen über die Verdampfungsmenge in einer Strömung in Rohrleitungen beim stationären Zustand erhaltenen Werte. Aus diesen Werten können wir den Schluß ziehen, daß die Kraftstoffverdampfungsmenge in der Ansaugleitung mit ungefähr 30% angenommen werden kann und damit dem wirklichen Wert ziemlich nahekommt; wir haben auch eine Berechnung versucht und dabei die in der Abb. 5 durch die Beispiele 2, 3 und 4 dargestellten Werte erhalten, die Beispiele 5 bis 8 dieser Abbildung stellen den Fall einer Verdampfung von 70% in der Ansaugleitung dar. Die untere Stufe der Abb. 5 zeigt die Stelle, wo der Kraftstoff vom Gas her die Wärmemenge aufgenommen hat, darüberhinaus haben wir auch die Wärmemenge berechnet, die von der Wandfläche her aufgenommen wurde. Somit haben wir beim Beispiel 2 in M (manifold) 30%, und 70% in C (cylinder), dies ist in beiden Fällen die vom Gas her aufgenommene Wärmemenge, woraus wir eine Erhöhung des Volumenwirkungsgrades um 12% entnehmen konnten. Beim Beispiel 3 hat nur M und beim Beispiel 4 nur C vom Gas her eine Wärmemenge empfangen, und wenn wir in der Ansaugleitung eine Verdampfung von 30% hatten und die restlichen 70% im Zylinder verdampft sind, dann können wir mit einer Erhöhung des Volumenwirkungsgrades von ungefähr 4% im Falle des Beispiels 3, und von ungefähr 9% im Falle des Beispiels 4 rechnen. Wenn wir diese beiden Steigerungen zusammennehmen, dann kommen wir auf eine Erhöhung des Volumenwirkungsgrades um $4\% + 9\% = 13\%$; diese

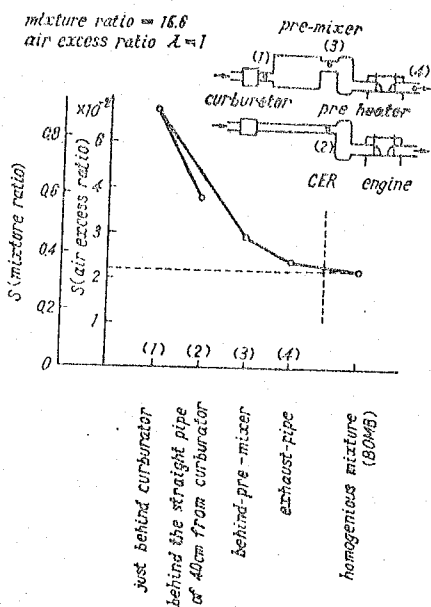
Erhöhung des Volumenwirkungsgrades stimmt ungefähr mit der errechneten Erhöhung des Volumenwirkungsgrades um 12% im Falle des Beispiels 2 überein. Die Temperatur der Gase in der Ansaugleitung sinkt, wenn der Kraftstoff von dem Gas die Wärmemenge aufnimmt und verdampft, erheblich ab, bei einem praktisch laufenden Motor jedoch sinkt die Temperatur der Gase nahezu überhaupt nicht ab, und auch dann, wenn wir die von der Wandfläche her aufgenommene Wärme mitrechnen, sinkt die Temperatur nahezu überhaupt nicht ab. Wenn wir diese festgestellten Tatsachen zusammennehmen, und wenn wir auch die Tatsache mit berücksichtigen, daß bei einem praktisch laufenden Motor unter Einbeziehung der Kraftstoffverdampfungserscheinung der Volumenwirkungsgrad höchstens um 4% erhöht wird, dann kommen wir zu dem Schluß, daß zumindest bei unserem Versuchsmotor der größte Teil der Verdampfung des Kraftstoffes diese Verdampfung der Wärmeaufnahme von der Wandfläche her verdankt; und ausgehend von der Tatsache, daß der Wärmeübergang aus dem Festkörper der Wand in die Flüssigkeit einen bei weitem höheren Wirkungsgrad besitzt als der Wärmeübergang aus dem Gas in die Flüssigkeit, können wir den Schluß ziehen, daß es zum Zwecke der Beschleunigung und Förderung der Vergasung des Kraftstoffes wahrscheinlich wirksamer ist, den Kraftstoff auf die Wand der Ansaugleitung möglichst weithin und möglichst dünn aufzublasen und die Ansaugleitung zu erhitzen als den Kraftstoff zu zerstäuben und die Ansaugluft zu erhitzen.

3.4 Die von Matsuoka und Yamaguchi bei der Untersuchung der Schwankung der Zusammensetzung des Kraftstoff-Luftgemisches im Ansaugsystem erhaltenen Ergebnisse

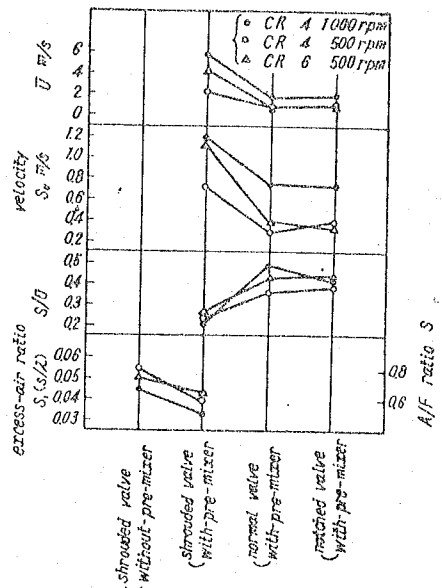
Ein weiteres wichtiges Problem ist die Mischung von Kraftstoffdampf und Luft. Die Abb.8 zeigt die Ergebnisse der von den Verfassern durchgeführten Versuche³⁾, aus denen wir die Schwankung des Gemischverhältnisses in den einzelnen Teilen des Ansaugsystemes ansehen können. Wir erkennen aus dieser Abbildung den von der Mischeinrichtung her bedingten Unterschied im Grad der Mischung bei gleicher Länge der Ansaugleitung. In der Abbildung 9 unten links sehen wir 2 Beispiele, welche einen Vergleich des Falles einer

mit Mischapparatur arbeitenden Anlage und einer ohne diese Apparatur arbeitenden Anlage zeigen, dabei hat man die Gaszusammensetzung im angetriebenen Zustand eines mit "shroud" Ventil versehenen CFR-Motors an der Stelle der Zündkerze abgegriffen. In diesem Falle haben wir nahezu überhaupt keine Schwankung der mittleren Gaszusammensetzung von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus, bei den in dieser Abbildung gezeigten Ergebnissen jedoch ist die lokale Schwankung der Gaszusammensetzung im Zylinder von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus infolge der umrührenden Wirkung der von dem "shroud"-Ventil herrührenden Wirbelströmung im Zylinder nicht allzu stark verwischt, durch das von der Mischapparatur vor den Ansaugventilen herrührende Umrühren wird die lokale Schwankung im Zylinder beseitigt.

(Der Rest dieser Arbeit ist nicht übersetzt worden).



(SAE Paper 710586 1971-6, Referatesammlg. d. JSME No. 706~69-3, No. 710~71-4)



(SAE Paper 710586 1971-6, Referatesammlg. d. JSME No. 706~69-3, No. 710~71-4)