

Die Pulsation der Rauchkonzentration in den  
Auspuffgasen der Dieselmotoren

von Prof.Dr.Ing. Masaaki Kawada  
und Zenjiro Kitayama  
Techn.Fakultät der Universität Toky

Die Rauchkonzentration in den Auspuffgasen der Dieselmotoren wird zwar gewöhnlich als Mittelwert über die Zeit angegeben, tatsächlich sind jedoch die Auspuffgase einer Pulsation unterworfen; somit pulsiert auch der schwarze Rauch. Der Hauptzweck der vorliegenden Forschungsarbeit besteht darin, herauszufinden, welche Beziehung zwischen der mittleren Konzentration des schwarzen Rauches und seinen Pulsationswellen besteht. Weiterhin hat man bei der Arbeit die Möglichkeit wahrgenommen, durch die Messung der Pulsation des Rauches die verschiedenen Erscheinungen im Auspuff des Motors näher kennenzulernen.

1. Vorwort

Für die quantitative Messung der Konzentration des schwarzen Rauches in den Auspuffgasen eines Dieselmotors sind bereits eine ganze Reihe verschiedener Rauchmeßgeräte entwickelt worden, sie werden zur Erforschung der Verbrennung in den Motoren und zur Bestimmung ihrer Leistungsgrenzen verwendet.

Von den heute da und dort angewandten Rauchkonzentrationsmeßgeräten hat zwar jedes seine besonderen Vorteile und die einzelnen Geräte sind verschieden in der Messung der Wechselbeziehungen der Konzentration, in den Meßfehlern und in der Bedienung, wenn es sich jedoch um die Messung der Pulsation des schwarzen Rauches handelt, dann ist das Verfahren besonders günstig, bei welchem man den Grad der Abschwächung eines durchfallenden Lichtes durch den

Rauch benützt.

Bei den Messungen haben wir den Rauchgaskonzentrationsmesser entweder unmittelbar an der Auspufföffnung des Motors oder an der Austrittsöffnung einer Auspuffleitung von verschiedener Länge befestigt und wir haben so durch unsere Arbeit auch einen Beitrag zur Erforschung der Vorgänge und Erscheinungen im Auspuffsystem geleistet.

## 2. Die mit durchfallendem Licht arbeitenden Rauchgaskonzentrationsmesser und ihre Leistung

Derartige Rauchgaskonzentrationsmesser haben allerdings ihre Schwierigkeiten; die Teile, durch welche das Licht hindurchfällt, werden verschmutzt und beim Messen des Photostromes entstehen Fehler infolge der Wärme der Abgase. Diese problematischen Punkte hat man jedoch dadurch beseitigt, daß man das optische System in einem eigenen Behälter untergebracht und so von den Auspuffrauchgasen vollständig abgetrennt hat. In der Abb. 1 ist dieser Rauchgaskonzentrationsmesser schematisch dargestellt.

Als Lichtquelle dient eine Kraftfahrzeugglühlampe, besondere Beachtung hat man den Schwankungen der Spannung der Stromquelle geschenkt. Als Lichtempfänger wird ein Phototransistor verwendet, dessen spezifische Empfindlichkeit in der Spitze  $14000 \text{ Å}$  erreicht und normal  $5000-9000 \text{ Å}$ , also 30-50% beträgt, man hat Hitzdrähte bis zu  $1.5 \mu$  zum Gegenstand gemacht (?).

Die Ansprechgeschwindigkeit beträgt  $0.06 \text{ m/sec}$ , die Beziehung zwischen der aufgenommenen Lichtmenge und der abgegebenen Leistung ist experimentell nachgeprüft worden. Die durch die Wärme der Auspuffgase bedingten Fehler in der

Messung des Fotostromes liegen, wie man aus der Abb.2 ersehen kann, bei hoher Auspufftemperatur des Motors höchstens bei ungefähr 2% des Auspuffrauchfotostromes, sie sind also nicht problematisch, trotzdem haben wir diese Abweichung bei unseren Ergebnissen korrigiert. Der Druck der Auspuffgase und der Rauch der Auspuffgase entströmen dem Motor, wie man aus der Abb.3 sieht, pulsierend. Die Abb.3 zeigt die Pulsation der Konzentration des Auspuffrauches an den Auspufföffnungen eines Zweitakt-Einzyylinder-Dieselmotors und eines Viertaktsechszylinder-Dieselmotors.

Um die Versuche zur Auffindung des Mittelwertes der pulsierenden Strömung durchzuführen, haben wir auf der einen Seite einer durch einen Elektromotor angetriebenen rotierenden kreisrunden Scheibe eine Lichtquelle und auf der anderen Seite dieser Scheibe einen Lichtempfänger angebracht, die kreisrunde Scheibe haben wir im voraus mit sektorförmigen Ausschnitten versehen und durch die Drehung der Scheibe haben wir eine vom Licht herrührende Pulsation hergestellt (siehe Abb.4.1).

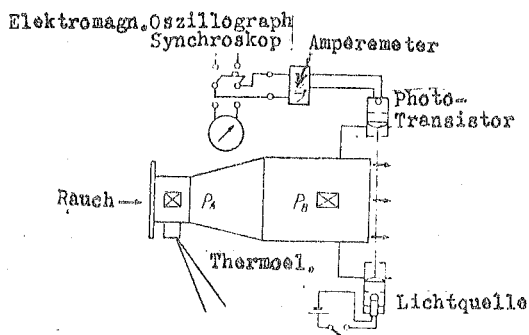


Abb.1 Gerät zum Messen der Konzentration des Auspuffrauches mit Hilfe des durchfallenden Lichtes

Auch dann, wenn wir die Drehzahl änderten, blieb doch die abgegebene Leistung des Lichtempfängers mit bezug auf den konstanten Zentriwinkel  $\alpha$  ( $\alpha/360$ ) des Sektorschlitzes konstant.

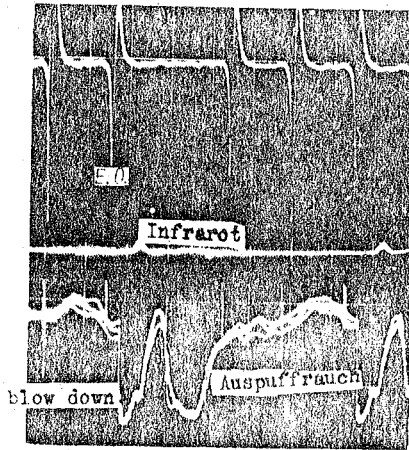


Abb.2 Der durch die Wärmestrahlen und den Rauch bedingte Fotostrom (die Empfindlichkeit des Synchroskopes betrug durchweg 1v/Div)

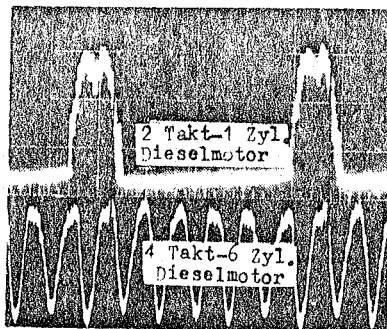


Abb.3 Die Pulsation des Auspuffrauches

Beim Auspuffrauch eines praktisch laufenden Motors wird trotz der Erhöhung der Motordrehzahl, ohne daß die Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung des Auspuffrauches zur Motordrehzahl proportional ist, die scheinbare Konzentration (die vom Instrument angezeigte Konzentration und die Pulsationskonzentration) höher (siehe Abb.4.2).

Um die abgegebene Leistung eines und desselben Konzentrationsmessers zu messen, haben wir die von einem anzeigenden Instrument abgelesene Konzentration mit der durch ein Synchroskop oder ein elektromagnetisches Oszilloskop aufgezeichneten Pulsationskonzentration verglichen (siehe Abb.4.2).

Sehr häufig haben die dabei festgestellten Abweichungen

ihre Ursache in der Differenz der kleinen sich ansammelnden Mengen von Rauch in den Teilen des Gerätes, durch welche das Licht hindurchfällt, die beiden erhaltenen Ergebnisse sind jedoch proportional.

Aus der dem Oszillogramm zu entnehmenden Pulsationswellenform haben wir die Pulsationskonzentration  $c_p$  definiert, sie wird nach folgender Gleichung berechnet (siehe Abb.4.3)

$$c_p = \frac{\text{Impulsfläche } A / \text{Periode } T}{\text{maxim. abgegebene Fotoleistung } L} \times 100\% \quad \dots \quad (1)$$

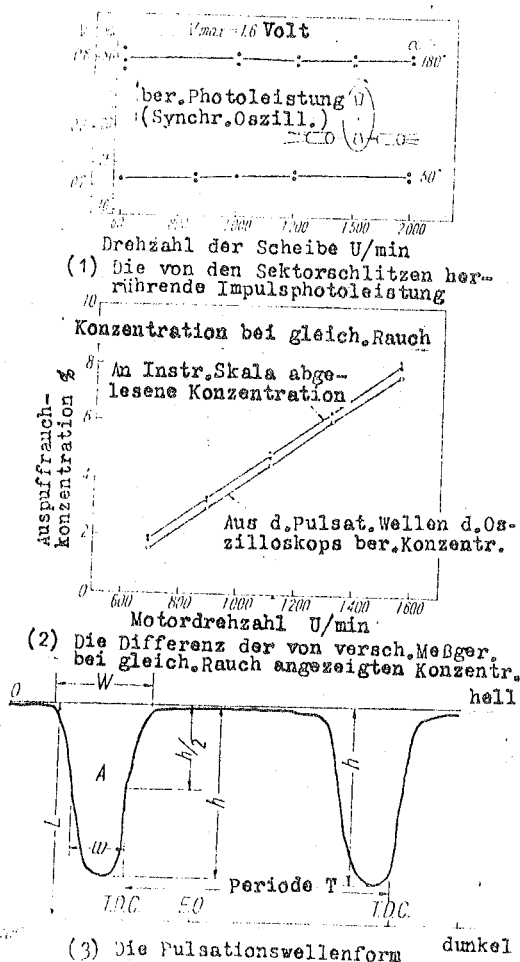


Abb.4 Die Pulsationskonzentration

Die Konzentrationsgrundlinien haben wir bei der Fotoleistung 0 und bei der Fotoleistung 100; die Fotoleistung 0 ist gegeben, wenn kein Rauch da ist und die Fotoleistung 100 haben wir, wenn kein Licht da ist, d.h. wenn alles

tief schwarz ist (siehe Abb.4.3). Die Pulsationswellenfläche wird durch die vom Rauch absorbierte Menge des einfallenden Lichtes und durch die Durchgangszeit des Auspuffrauches durch den Konzentrationsmesser bestimmt.

Die Geschwindigkeit des Rauches an der Austrittsöffnung der Auspuffleitung ändert sich in Abhängigkeit vom Druck in der Auspuffleitung und von der Temperatur der Auspuffgase; da diese Geschwindigkeit des Rauches an der Austrittsöffnung der Auspuffleitung sogar während eines Arbeitszyklus je nach dem "blow down" und je nach der Spülluft (siehe Abb.2) verschieden ist, so wird die Grundgeschwindigkeit bestimmt und auf diese umgerechnet werden die Konzentrationen verglichen.

Damit bekommen wir für die Gleichung (1) die nachstehende Form

$$c = c_p \cdot \frac{\text{Durchgangsgeschwindigkeit der zu messenden Impulse durch den Konzentrationsmesser}}{\text{Grundimpulsgeschwindigkeit}} \% \dots (2)$$

Die Durchgangszeit der Rauchimpulse durch den Konzentrationsmesser kann mit Hilfe des Konzentrationsmessers und eines Oszillographen, sowie mit Hilfe einer Schnellkamera gefunden werden.

### 3. Die Versuchseinrichtung und die Versuchsmethodik

Die Abb.5 zeigt eine schematische Darstellung der Versuchseinrichtung. Der in der Abbildung dargestellte, bei unseren Versuchen verwendete Motor war ein UD-Einzylinder-Zweitakt-Dieselmotor mit folgenden Betriebsdaten:

Zylinderdurchmesser und Hub	110 mm x 130 mm
Auspuffvolumen	1235 ccm
Kompressionsverhältnis	16
Verbrennungskammer	unmittelbare Kraftstoff-einspritzung

Durchmesser der Auspuffleitung 75 mm

bei den Versuchen angewandte  
Auspuffrohrängen

0,6, 2.18, 2.69, 4.1 u.10.4 m

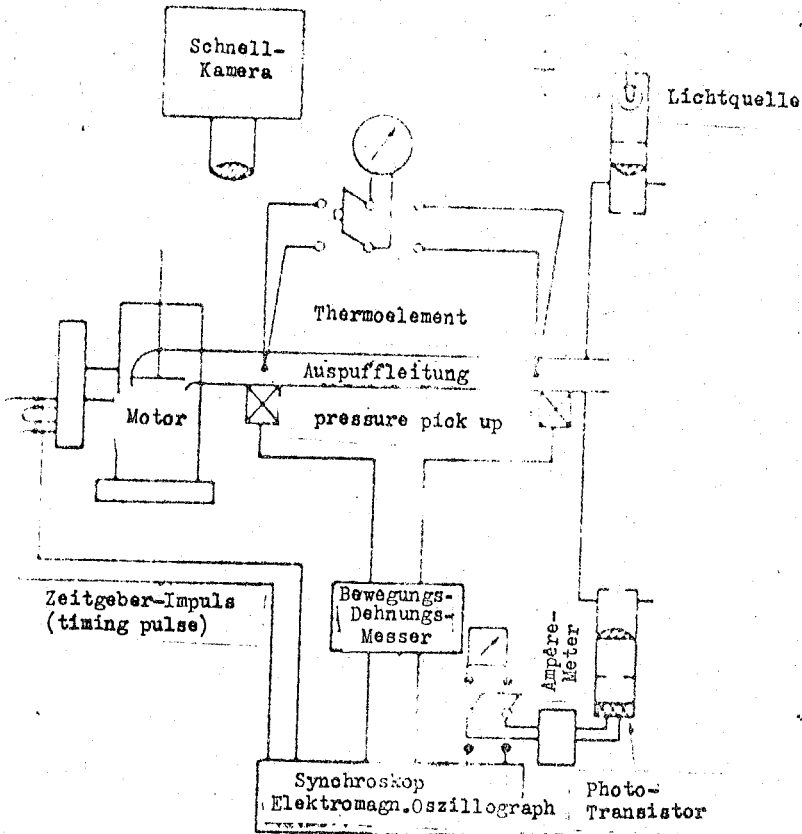


Abb.5 Die Hauptteile der Versuchseinrichtung

Zur Messung der abgegebenen Leistung haben wir ein elektrisches Dynamometer verwendet, für die Messung der Temperatur der Auspuffgase haben wir ein Almel-Chromel-Thermoelement verwendet, wir haben jeweils in einer Entfernung von 200 mm vom Auspuffventil und in einer Entfernung von 0.5 m von der Auspuffleitungsöffnung, sowie nötigenfalls auch an anderen Stellen gemessen; die Schwankungen des Druckes in der Auspuffleitung haben wir mit Hilfe eines Widerstandsdraht-"pick up" ( $P_A$  u.  $P_B$  der Abb.7) gemessen. Mit Hilfe eines Synchroskops und eines elektromagnetischen Oszilloskopes haben wir die Wellenform beobachtet und aufgezeichnet.

Wir haben 2 verschiedene Einspritzmengen von  $72 \text{ mm}^3$  und  $57 \text{ mm}^3$  verwendet (die maximale Einspritzmenge betrug ungefähr  $85 \text{ mm}^3$ ); bei jeder einzelnen Auspuffrohrlänge haben wir unsere Messungen bei 4 verschiedenen Motordrehzahlen durchgeführt, nämlich bei 1500 U/Min, 1300 U/Min, 1100 U/Min und 800 U/Min.

Wir haben 6 verschiedene Ansauggasgemischverhältnisse verwendet, welche auf den Bereich von 0.6 - 1.5 verteilt waren; dabei haben wir unsere Messungen bei den Auspuffrohrlängen 0.6 m und 4.5 m, und bei den Drehzahlen 1500 U/Min und 1300 U/Min durchgeführt.

Ohne Auspuffrohr, sowie bei den einzelnen Auspuffrohrlängen haben wir den Zustand der Auspuffgase am offenen Ende der Auspuffleitung für die einzelnen Motordrehzahlen mit einer Schnellkamera fotografiert und auf diese Weise die Diffusion des ausströmenden Rauches, sowie seine Geschwindigkeit beobachtet.

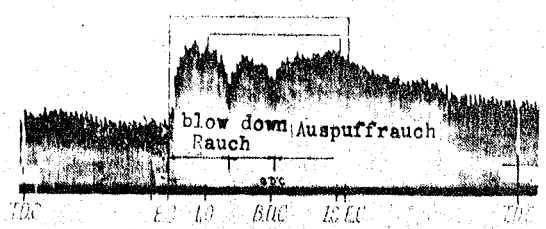


Abb.6

4. Die Versuchsergebnisse und ihre Beurteilung

4.1 Die Auspuffkonzentration, wenn kein Auspuffrohr vorhanden ist

Mit Hilfe einer Schnellkamera haben wir den Ausströmzustand des Rauches in einer Entfernung von der Auspuffrohrbefestigungsfläche des Motors von bis zu 25 cm fotografiert; weiterhin hat man an der Austrittsöffnung der Auspuffgase einen Foto transistor angebracht, dessen abgege-



bene Leistung man in einen elektromagnetischen Oszillographen hineingab, wobei man dann die in der Abb.6 dargestellte Wellenform des Auspuffrauches erhielt.

Diese Abbildung ist mit 1100 U/Min bei 3500 Koma/sec aufgenommen worden, die Höhe der Wellen zeigt die Konzentration des Rauches an. Diese Aufnahme besteht zwar aus einem "blow down"-Rauchimpuls und 2 Spülrauchimpulsen, bei höheren Drehzahlen (1500 U/Min) werden jedoch die Spülrauchimpulse einander nahezu überlagert, so daß man nur 1 Impuls beobachtet.

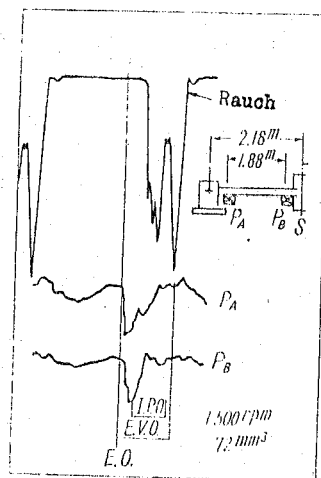
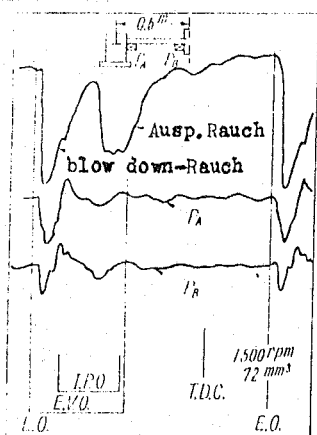


Abb.7 Der Zusammenhang zwischen dem Rauch und dem Druck bei einer Auspuffrohrlänge von 0.6 m

Abb.8 Der Zusammenhang zwischen dem Rauch und dem Druck bei einer Auspuffrohrlänge von 2.18 m

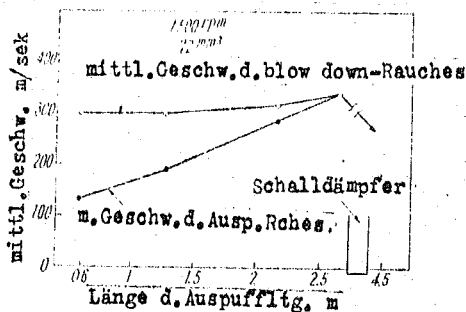


Abb.9 Die Änderung der Auspuffrauchgeschwindigkeit

Der Auspuffrauch wird zwar ausgestoßen und diffundiert (siehe Abb.14.1), der Rauch im "blow down" jedoch besitzt eine hohe Geschwindigkeit und ist sehr schnell im Raum verfliegen. Der Spülluftrauch besitzt nur eine niedrige Ge-

schwindigkeit.

Aus dieser Abbildung können wir im wesentlichen die jeweilige Konzentration und die Zeit, welche nach dem Öffnen des Ventils bis zum Ausströmen des Rauches verstreicht, sowie die den jeweiligen Entfernungen entsprechende mittlere Geschwindigkeit ausrechnen und erhalten so ein ungefähres Bild von der Diffusionsgeschwindigkeit in der Luft.

#### 4.2 Die Konzentration der Auspuffgase bei Vorhandensein einer Auspuffleitung

Wie aus der Abb.7 zu sehen ist, haben wir in der Auspuffleitung 2 Druckentnehmer (pressure pick up) angebracht; die Entfernung vom Auspuffventil bis zu der optischen Achse des Konzentrationsmessers beträgt 0.6 m, der "blow down"-Rauch im Auspuffrauch ist in der Abb.14.3 zu erkennen; der Luftwiderstand innerhalb und außerhalb der Auspuffleitung wird aufgenommen, die Rauchspitze (wörtlich: der Rauchkopf) wird eben. Die Konzentration nimmt zu und schreitet und verläuft geradeaus nach vorne. Der sich in der Spülluft befindende Rauch ist ein Rauch von ganz geringer Energie. Die Geschwindigkeit des Rauches beim "blow down" beträgt ungefähr 300 m/sec, während die Geschwindigkeit des Rauches beim Spülen ungefähr 150 m/sec beträgt. Wenn wir uns deshalb bei der Pulsationskonzentration in den beiden Fällen auf die Konzentrationsberechnung unmittelbar aus der Wellenform des Oszillographen stützen, dann zeigt es sich, daß die Spülrauchkonzentration tatsächlich ungefähr doppelt so stark ist wie die Konzentration des "blow down"-Rauches, zu den gleichen Ergebnissen kommen wir auch bei der am Instrument abgelesenen Konzentration.

Die Abb.8 zeigt den Fall der Verwendung einer Auspuffleitung von 2.18 m Länge (Abb.14.4). In der Abb.9 sehen wir, wie der Rauch beim "blow down" ganz langsam, und wie er beim Spülen ganz schnell beschleunigt wird, bei 2.18 m Auspuffleitungslänge nähern sich die beiden Linien einander und bei 2.69 m Auspuffleitungslänge kommen sie ganz zusammen.

In den Abb.10 und 11 sehen wir, bei einer Länge der Auspuffleitung von 4.5 m (Abb.14.5), wie bei Verwendung eines Schalldämpfers die Druckwellen sehr stark abnehmen, und wie auch die Pulsation ganz erheblich verringert wird.

Die Abb.12 zeigt den Fall einer 10.4 m langen Auspuffleitung mit Schalldämpfer (Abb.14.6). Die oben beschriebenen Untersuchungen hat man für die verschiedenen Längen der Auspuffleitung durchgeführt, wobei man festgestellt hat, daß sich die Konzentration des Rauches im wesentlichen nach seiner Geschwindigkeit richtet. Dieser Zusammenhang ist in der Abb.13 dargestellt.

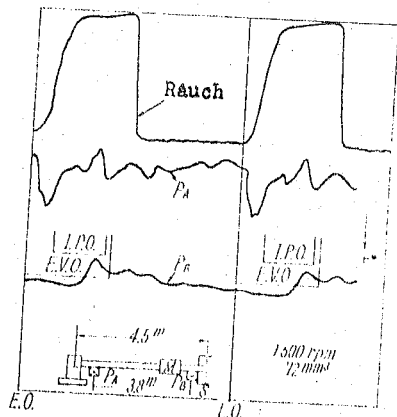
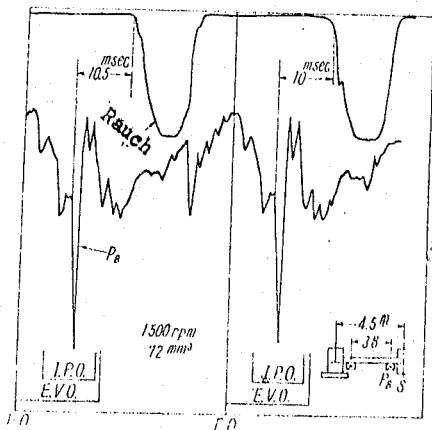


Abb.10 Der Zusammenhang zwischen dem Auspuffrauch und den Druckwellen bei einer Auspuffrohrlänge von 4.5 m ohne Schalldämpfer

Abb.11 Der Zusammenhang zwischen dem Auspuffrauch und den Druckwellen bei einer Auspuffrohrlänge von 4.5 m mit Schalldämpfer (M)

5. Die Aufnahme des Auspuffrauches mit der Schnellkamera

Die Abb.14 zeigt die mit der Schnellkamera gemachten Aufnahmen des Auspuffrauches unmittelbar nach dem Ausströmen am Ende der Auspufföffnung der einzelnen Auspuffleitungslängen. Bei einer kurzen Auspuffleitung ist die Phasendifferenz zwischen dem Rauch beim "blow down" und dem Druck nur ganz gering (siehe Abb.6); der ausströmende Rauch zeigt die in der Abb.14 Nr.1-Nr.3 aufgenommenen Formen; bei den längeren Auspuffleitungen eilen die Phasen des Rauches der Abb.8 u.10 den Druckwellen nach, und von diesem Gasstrom getragen strömt der Rauch aus, wie wir dies in den Abb.14 Nr.4 und Nr.5 sehen. Die Abb.14 Nr.6 zeigt den Rauch, welcher durch einen Schalldämpfer hindurchgegangen ist, zwischen dem Rauch und den Druckwellen besteht nahezu überhaupt keine Phasendifferenz.

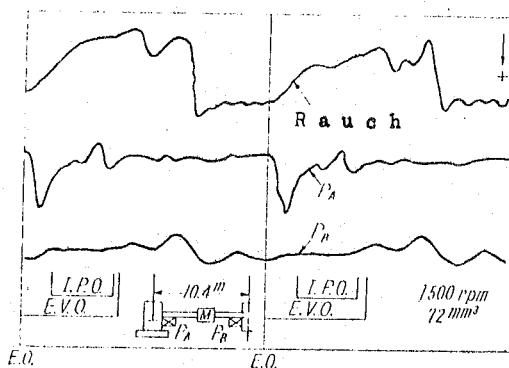


Abb.12 Der Zusammenhang zwischen dem Auspuffrauch und den Druckwellen bei einer Auspuffrohrlänge von 10.4 m mit Schalldämpfer (M)

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Forschungsarbeit haben wir die verschiedenen Faktoren zu klären versucht, durch welche die mit Hilfe des durchfallenden Lichtes gemessenen Werte der Konzentration des Auspuffrauches beeinflusst werden.

Praktisch ändert sich die scheinbare Konzentration des Rauches in der Hauptsache mit seiner Geschwindigkeit. Bei

der Messung der wirklichen Konzentration muß man unter allen Umständen eine möglichst stationäre Strömung herstellen. Zum Schluß unserer Versuchsarbeit wollen wir nicht versäumen, allen Herren, die uns dabei durch wertvolle Hinweise oder durch tatkräftige Unterstützung geholfen haben, unseren herzlichsten Dank auszusprechen.

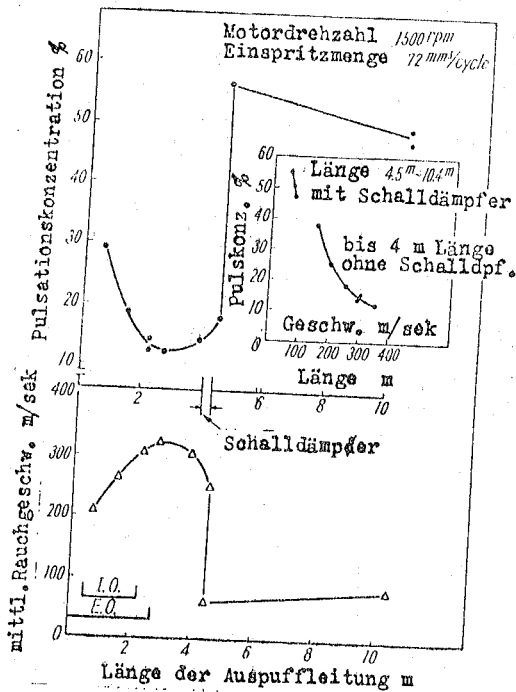


Abb. 13 Die mittlere Geschwindigkeit des Rauches und die Pulsationskonzentration, bezogen auf die Auspuffrohrlänge

