

DAS STRAHLUNGSVERMÖGEN DER DIESELMOTORISCHEN FLAMME

Von

G. SITKEI und G. V. RAMANAIAH

Lehrstuhl für Landmaschinenbau, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 10. September, 1971)

Vorgelegt von Prof. A. ZALKA

Bisherige Untersuchungen

Der erhebliche Einfluß der Flammenstrahlung auf die Wärmebelastung des Dieselmotors wurde in verschiedenen Untersuchungen mehrmals beobachtet. Es wurde aber kaum versucht, das Strahlungsvermögen der dieselmotorischen Flamme in Abhängigkeit von dem Kurbelwinkel versuchsmäßig zu bestimmen und ein neues Strahlungsglied in die Rechenmethoden einzuschalten.

Zuerst wurden von BELINSKIJ [1] direkte Messungen an einem Einzylindermotor mit direkter Einspritzung durchgeführt, bei denen er die Verteilung der gesamten ausgestrahlten Energie in Abhängigkeit von dem Kurbelwinkel bei verschiedenen Belastungen maß. Bedauerlicherweise wurde aber der Schwärzegrad der Flamme bei diesen Messungen nicht berechnet und dadurch wurden die theoretisch angegebenen Werte des Schwärzgrades nicht bestätigt.

Vom Verfasser wurden aus den Meßergebnissen von BELINSKIJ die Schwärzgrade berechnet und die Ergebnisse mit den theoretischen Werten von BELINSKIJ zusammen in Abb. 1 dargestellt. Wie man sieht, weichen die Kurven erheblich voneinander ab.

Laut der Meßergebnisse von BELINSKIJ werden 20—25% der Gesamtwärme durch Flammenstrahlung ins Kühlwasser übertragen.

Später haben EBERSOLE, MYERS und UYEHARA [2] Strahlungsmessungen durchgeführt, wobei sie das Verhältnis der Strahlungsenergie zu der gesamten übertragenen Wärmemenge mit speziellen Strahlungsmeßelementen bestimmten. Die Meßergebnisse sind in Abb. 2 wiedergegeben. Hier erkennt man wieder, daß die durch Flammenstrahlung übertragene Wärmemenge 20—30% der gesamten ins Kühlwasser übertragenen Wärmemenge ausmacht. Aus diesen Meßergebnissen kann der Schwärzegrad der Flamme überhaupt nicht berechnet werden und die Anwendung der Meßergebnisse auf andere Motoren ist ziemlich schwierig.

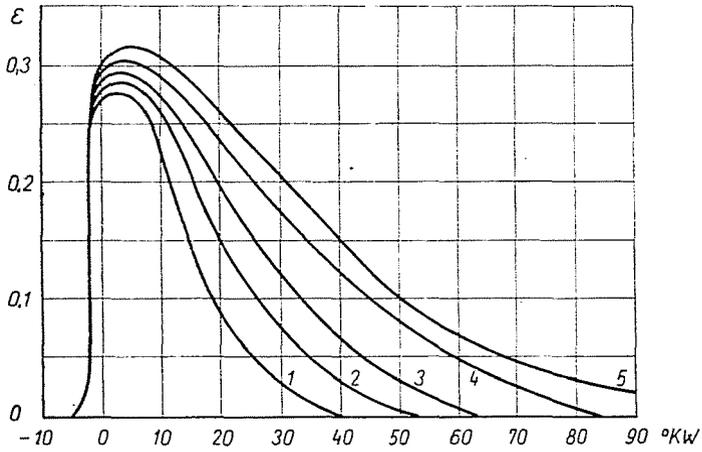
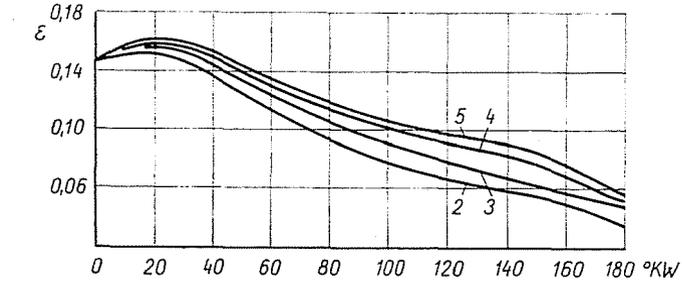


Abb. 1. Theoretische Schwarzgrade von BELINSKIJ (a) und Schwarzgrade aus den Meßergebnissen von BELINSKIJ berechnet (b). 1 — $B_e = 2,0$ kp/h (Leerlauf); 2 — $B_e = 3,8$ kp/h; 3 — $B_e = 5,5$ kp/h; 4 — $B_e = 8,4$ kp/h; 5 — $B_e = 10$ kp/h (Vollast)

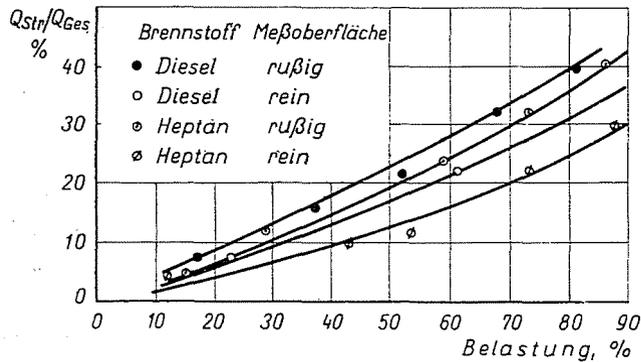


Abb. 2. Das Verhältnis der Strahlungsenergie zu der gesamten übertragenen Wärmemenge in Abhängigkeit von der Belastung [2]

Theoretische Überlegungen

Die Untersuchungen von BELINSKIJ [1] haben also gezeigt, daß sich das Verhältnis der Gastemperatur T_g zu der Flammentemperatur T_F in Abhängigkeit von der Boltzmann-Zahl bei gasölgefeuerten Kesseln und Dieselmotoren in ganz ähnlicher Weise ändert. Das bedeutet, daß man die bei gasölgefeuerten Kesseln gefundenen Ergebnisse in erster Annäherung auch auf Dieselmotoren anwenden darf.

Für grau strahlende Körper ist die ausgestrahlte Energie bei gegebener Temperatur

$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot E_{0\lambda} d\lambda$$

wo ε_{λ} — der spektrale Schwärzegrad ist.

Der spektrale Schwärzegrad ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - e^{-k_{\lambda}l}$$

wobei k_{λ} — Koeffizient, der die Schwächung bzw. Absorption der Wärmestrahlen beim Durchgang durch irgendein Medium charakterisiert,

l — die Dicke der Flammenschicht ist.

Der Koeffizient k_{λ} hängt von der Wellenlänge ab: im Bereiche des sichtbaren Lichtes ist

$$k_{\lambda} = c \cdot \lambda^{-n}$$

während im Bereiche der infraroten Strahlung

$$k_{\lambda} = c \cdot \lambda^{-(n-m \cdot l g \lambda)}$$

gilt, wo λ die Wellenlänge bedeutet und c , n und m Konstanten sind.

Der Koeffizient k_{λ} ist eine Funktion der Temperatur des Mediums, des Durchmessers und der Konzentration der Kohle- und Rußpartikeln. Auf Grund der bisherigen Untersuchungen ändert sich die Konzentration der Rußteilchen zwischen 0,2—1,0 g/m³, mit einem Durchmesserbereich zwischen 20—100 μ , wobei der Medianwert in der Nähe der unteren Grenze liegt.

Eine Rechenmethode, bei der der spektrale Schwärzegrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge integriert werden muß, scheint heute für praktische Zwecke unsicher und kompliziert zu sein. Es ist zweckmäßig, an Stelle des spektralen Schwärzegrades dessen Integralwert anzuwenden, wodurch die Rechnung viel einfacher wird.

Der Integralwert des Schwärzegrades ist bei einem gegebenen Druck p durch die Beziehung

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 - e^{-kpl}) \quad (1)$$

gegeben, wobei

ε_0 — der Schwärzegrad der unendlich dicken Flammenschichte (mit einem Wert von 0,8 für Gasöl) ist.

Auf Grund von Gl. (1) hat der Verfasser die an einem gasölgelieferten Kessel gewonnenen Meßergebnisse von TEREENTJEW [3] bearbeitet und für den Koeffizienten k ergab sich der Wert von 1,8 ~ 2,0 in dem für uns in Frage kommenden Temperaturbereich.

Der obige k -Wert gilt für stationäre Flammen. In Dieselmotoren ändern sich aber das relative Volumen und die Struktur der Flamme in Abhängigkeit von dem Kurbelwinkel. Das bedeutet, daß man entweder keinen konstanten k -Wert benutzen darf, oder wenigstens die Volumenänderung der Flamme berücksichtigen muß. Letzteres ermöglichte dem Verfasser früher eine Rechenmethode zu entwickeln [4].

Bei dieser Rechenmethode wurde angenommen, daß der ε -Wert in erster Annäherung in dem Maße verringert werden muß, wie sich der wirkliche Rauminhalt der Flamme zum ganzen Verbrennungsraum im gegebenen Zeitpunkt verhält. Damit wurde der scheinbare Schwärzegrad der Flamme in der Form

$$\varepsilon' = x \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_w \quad (2)$$

geschrieben, wobei

x — der relative Rauminhalt der Flamme zur gegebenen Zeit,

ε_w — der Schwärzegrad der Wand (mit dem angenommenen Wert von 0,9) ist.

Der Wert von x ändert sich entlang des Hubes; das Maximum wird am Anfang der Verbrennung erreicht. In erster Annäherung kann angenommen

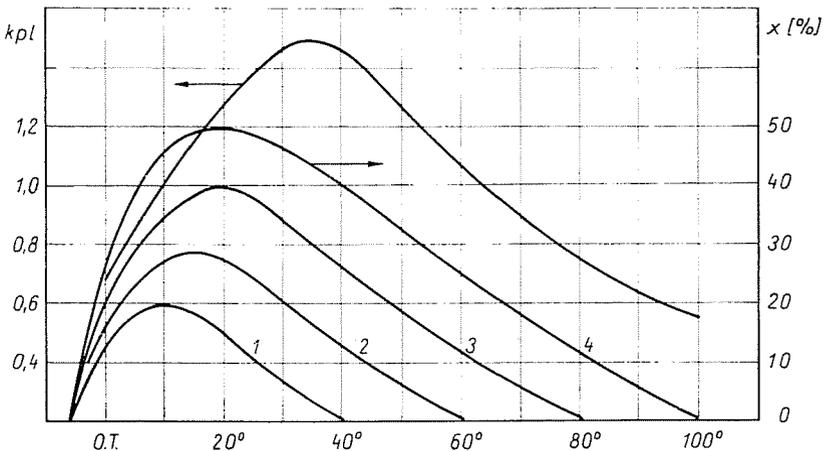


Abb. 3. Relativer Rauminhalt der Flamme als Funktion des Kurbelwinkels. 1 — Leerlauf; 2 — $1/3 N_e$; 3 — $2/3 N_e$; 4 — Vollast

werden, daß x der Massengeschwindigkeit der Verbrennung proportional ist (Abb. 3).

Mit Hilfe der hier gezeigten Rechenmethode wurde der Schwärzegrad der Flamme und die durch Flammenstrahlung übertragene Wärmemenge für einen Steyr Dieselmotor berechnet (Abb. 4 und 5).

Aus den Rechnungsergebnissen geht hervor, daß die obige theoretische Methode ganz annehmbare Resultate liefert. Der Verlauf der ε -Kurven ist ähnlich, wie die durch Messungen ermittelten Kurven in Abb. 1, und die errechneten Werte von Q_F machten 20—25% der gesamten ins Kühlwasser übertragenen Wärmemenge bei Vollast aus.

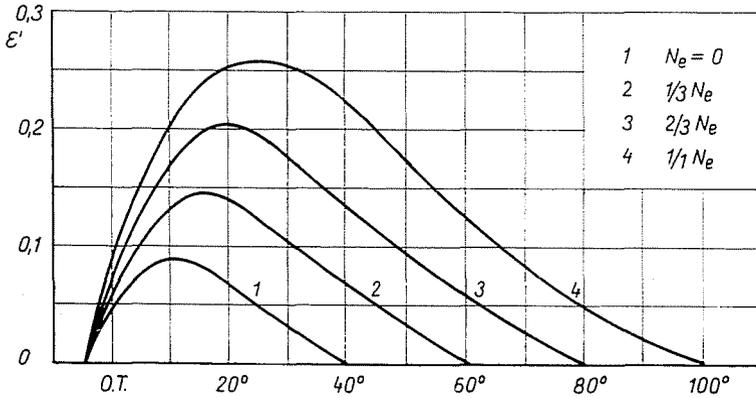


Abb. 4. Schwärzegrad der Flamme in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel

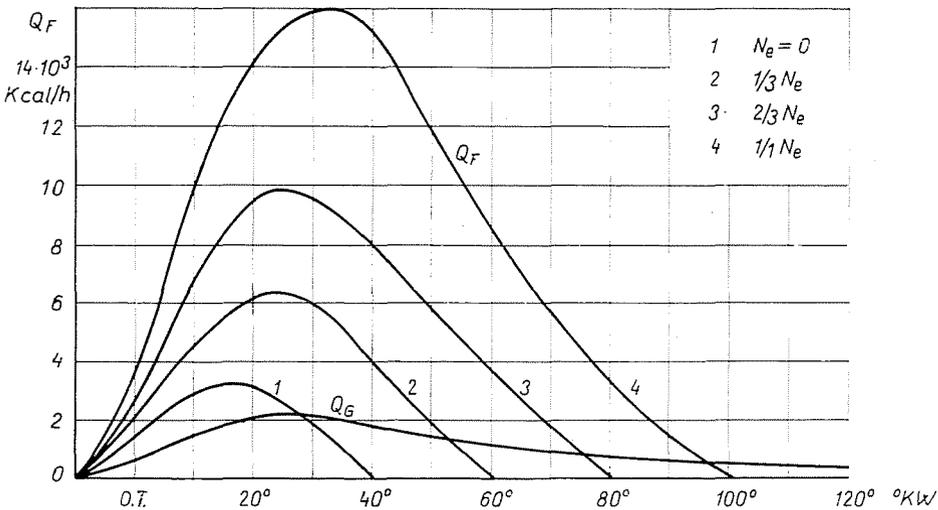


Abb. 5. Die durch Flammen- und Gasstrahlung übertragene Wärmemenge als Funktion des Kurbelwinkels

Diese Rechnungsmethode wurde aber durch direkte Messungen nicht bestätigt. Daher setzten wir uns zum Ziele, das Strahlungsvermögen der Flamme versuchsmäßig zu bestimmen.

Versuchseinrichtung

Ein Einzylinder-Versuchsmotor (Bauart Steyr, Bohrung 110 mm, Hub 140 mm, Verdichtungsverhältnis 18, Drehzahlbereich 1000—1800 U/Min) wurde für die Messungen vorbereitet. Es wurde ein geeigneter Zylinderkopf mit Wirbelkammer geschweißt ausgeführt und die Wirbelkammer konnte beiderseitig mit Quarzfenster versehen werden. Die Gemischbildungsqualität in der Wirbelkammer war ganz annehmbar und die Rauchgrenze des Motors lag bei $p_e = 6,0 \text{ kp/cm}^2$.

Um die Verteilung der Flammenstrahlung in Abhängigkeit von dem Kurbelwinkel messen zu können, wurde ein mechanischer Stroboskop zwischen dem Quarzfenster und dem Foster Strahlungsmesser angebracht. Die Stroboskop-Scheibe hatte einen Öffnungsquerschnitt, der einer Öffnungsperiode von 10° KW entsprach. Die Öffnungszeit konnte einfach umgestellt werden. Die Versuchseinrichtung ist in Abb. 6 zu sehen.

Die Meßsignale wurden an einem Kathodenstrahloszilloskop sichtbar gemacht und die Amplituden abgelesen. Die Eichung der Meßeinrichtung erfolgte mit einer Cambridge Pyrometer-Eichlampe, zusammen mit der Stroboskop-Scheibe. Die Eichkurve ist in Abb. 7 wiedergegeben.

Die Rußbildung auf der Fenster-Oberfläche hat einen wesentlichen Einfluß auf die registrierbaren Meßwerte. Wir haben aber gefunden, daß bei größeren Belastungen auf der Quarzoberfläche keine wesentliche Rußbildung entstand. Die Meßwerte für kleinere Belastungen wurden immer nach einem längeren Lauf bei Vollast schnell aufgenommen.

Mit dem Foster Strahlungsmesser wurde die Temperatur eines schwarzen Körpers gemessen, dessen Strahlungsvermögen gleich dem der untersuchten Flamme ist. D. h. es gilt der folgende Zusammenhang:

$$\sigma_0 T_b^4 = \varepsilon \sigma_0 T_F^4$$

oder

$$T_b = \sqrt[4]{\varepsilon} \cdot T_F \quad (3)$$

wobei T_b — die gemessene schwarze Temperatur $^\circ\text{K}$,

T_F — die Temperatur der Flamme $^\circ\text{K}$ ist.

Zur Bearbeitung der Meßergebnisse benötigte man die Temperatur der Flamme in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel. Die Flammentemperaturmessungen von BELINSKIJ [1] und MYERS—UYEHARA [5] zeigten, daß die Flammentemperatur von der Belastung wenig abhängt und die Flammentemperaturen

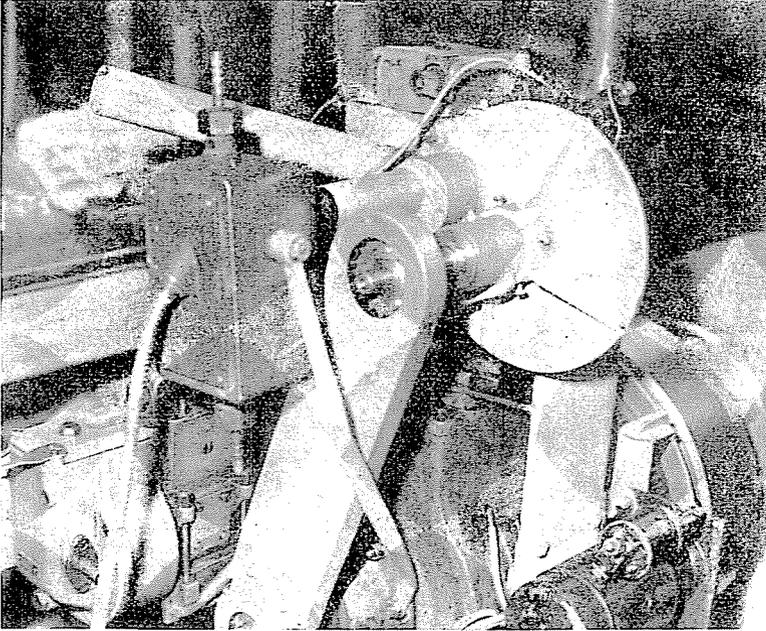


Abb. 6. Versuchseinrichtung

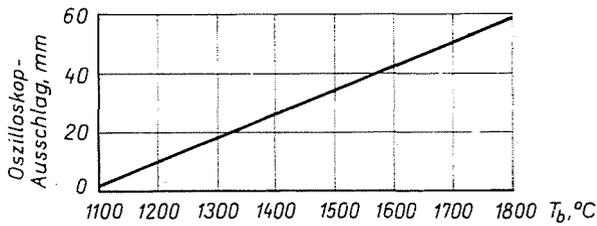


Abb. 7. Die Eichkurve des Strahlungsmessers

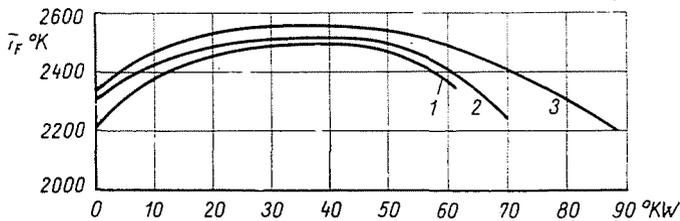


Abb. 8. Die Temperatur der Flamme in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel. 1 — Leerlauf; 2 — halbe Belastung; 3 — Vollast

in den verschiedenen Motoren beinahe dieselben sind. Daher wurden die Meßergebnisse von BELINSKIJ (Abb. 8) zur Bearbeitung unserer Meßdaten angenommen.

Meßergebnisse

Die Messungen wurden bei verschiedenen Belastungen in Abhängigkeit von der Kurbelstellung durchgeführt. Die Drehzahl des Motors betrug 1100 U/Min. Eine höhere Drehzahl verursachte keine wesentliche Änderung im Strahlungsvermögen der Flamme, vorausgesetzt, daß sich die Gemischbildungsqualität nicht änderte.

Die Änderung des Schwärzgrades ist in Abhängigkeit von dem Kurbelwinkel bzw. der Belastung in Abb. 9 und 10 zu sehen. Diese Werte gelten für die Wirbelkammer mit einem konstanten Strahlungsweg von $l = 2,6$ cm.

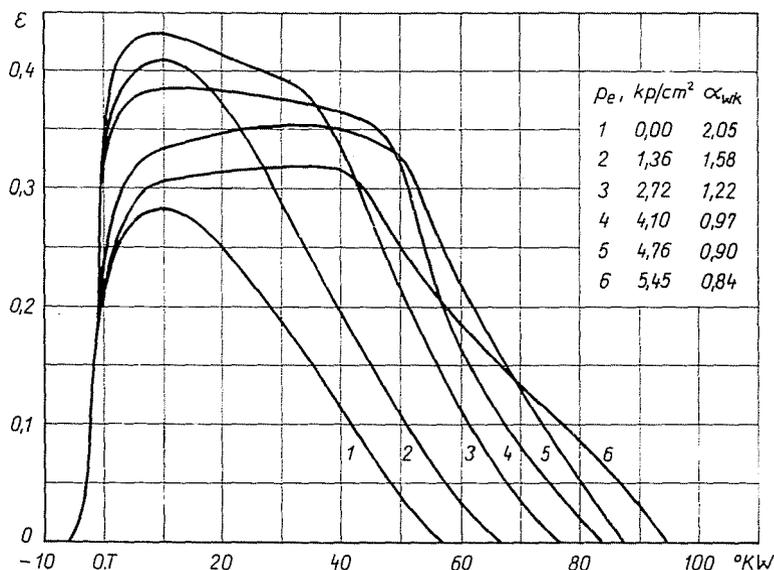


Abb. 9. Der Schwärzgrad der Flamme in der Wirbelkammer in Abhängigkeit von dem Kurbelwinkel

Bei unseren Versuchen wurde das Strahlungsvermögen der Flamme in der Wirbelkammer gemessen, wo die örtliche Luftüberschußzahl niedriger ist als die mittlere Luftüberschußzahl auf den ganzen Verbrennungsraum bezogen. Daher wurden die örtlichen Luftüberschußzahlen der Wirbelkammer berechnet und die Meßergebnisse abhängig von dieser Luftüberschußzahl dargestellt (Abb. 11).

Wie man sieht, hat die Luftüberschußzahl einen wesentlichen Einfluß auf das Strahlungsvermögen der Flamme. Der größte Wert für ϵ ergab sich bei Luftüberschußzahlen von 1,0—1,2 in Abhängigkeit von der Kurbelstellung. Mit zunehmendem Luftmangel wird das Strahlungsvermögen immer kleiner. Diese Erscheinung ist dadurch zu erklären, daß die Absorption der nicht-verbrennten Zwischenprodukte zunimmt.

Im weiteren wurden die k -Werte auf Grund von Gl. (1) berechnet und in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl dargestellt (Abb. 12). Aus dieser Darstellung können die k -Werte für beliebige Luftüberschußzahlen abgelesen und eine andere Darstellung in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel konstruiert werden. Abb. 13 zeigt die Änderung der k -Werte in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel für verschiedene in der Praxis vorkommende Luftüberschußzahlen.

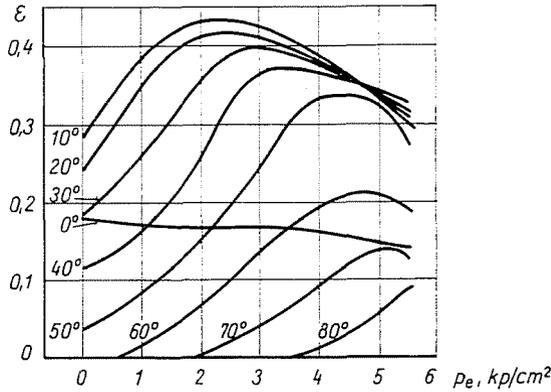


Abb. 10. Der Schwärzgrad der Flamme in der Wirbelkammer in Abhängigkeit von der Belastung

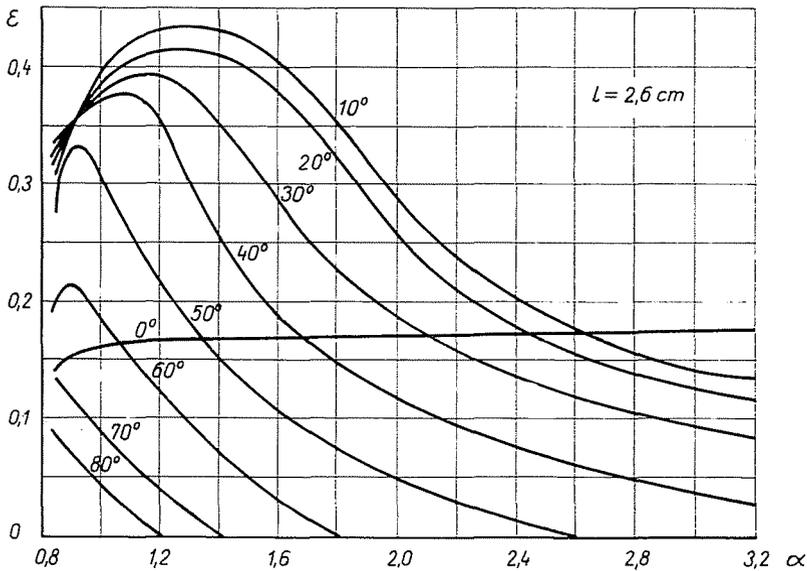


Abb. 11. Der Schwärzgrad der Flamme in der Wirbelkammer als Funktion der Luftüberschußzahl

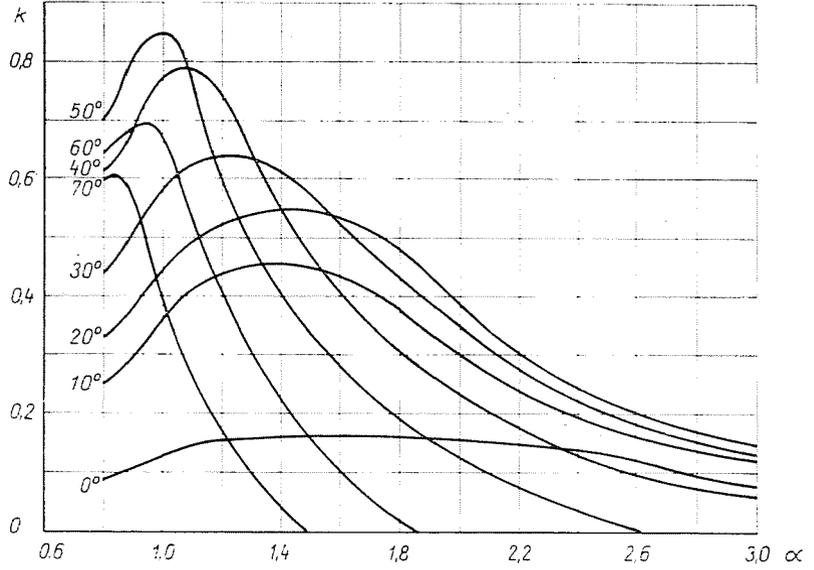


Abb. 12. Die Änderung der k -Werte in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl

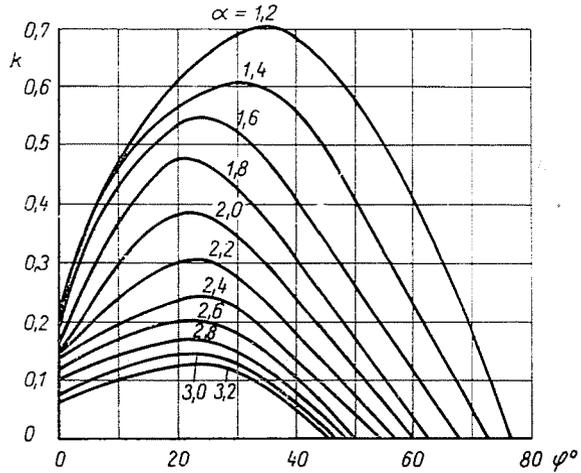


Abb. 13. Die Änderung der k -Werte als Funktion des Kurbelwinkels für verschiedene Luftüberschußzahlen

Rechnungsmethode

Die durch Flammenstrahlung übertragene Wärmemenge kann mit dem wohlbekannten Zusammenhang berechnet werden:

$$Q_F = \sum \varepsilon \sigma_0 \left[\left(\frac{T_F}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] F \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Der ε -Wert soll aus Gl. (1) unter Anwendung der Abb. 12 berechnet werden. Die Flammentemperatur ist aus Abb. 8 zu entnehmen. Es ist zweckmäßig, die Rechnungen für die Haupt- und Nebenbrennräume getrennt durchzuführen.

Die mittlere Strahlänge (l) im Brennraum läßt sich — wie im allgemeinen — aus der Formel

$$l = 3,6 \frac{V}{F}$$

berechnen, wobei

V — der momentane Rauminhalt des Brennraumes,

F — die momentane Oberfläche des Brennraumes ist.

Es ist hier noch zu bemerken, daß das verwendete Quarzfenster im Empfindlichkeitsbereich des Strahlungsmessers eine Durchlässigkeit von 90—91% hatte. Das bedeutet, daß die hier angegebenen ε -Werte um 10% kleiner sind als die effektiven Werte. Wenn man aber berücksichtigt, daß der Schwärzegrad der Wand etwa 0,9 ist, werden die beiden Wirkungen ausgeglichen. In Fällen, wenn der Schwärzegrad der Wand kleiner als 0,9 ist (z. B. für Zylinderbüchse mit Ölfilm), müssen die beiden obengenannten Wirkungen getrennt in Betracht genommen werden.

Die hier gezeigten Ergebnisse tragen wesentlich dazu bei, die bisherige Rechnungsmethode zur Bestimmung des Wärmeüberganges in Dieselmotoren zu vervollkommen.

Zusammenfassung

Es liegen heute sehr wenig direkte Messungen über das Strahlungsvermögen der dieselmotorischen Flamme vor. Von Verfassern wurden an einem Einzylinder-Versuchsmotor mit großem Quarzfenster Messungen durchgeführt, bei denen die Strahlungsintensität der Flamme in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel mit einem hochempfindlichen elektronischen Strahlungsmesser registriert wurde.

Die Messungen zeigten, daß die Flammenstrahlung einen wesentlichen Anteil der gesamten in das Kühlwasser übertragenen Wärmemenge ausmacht. Eine andere wesentliche Beobachtung ist, daß die Flammenstrahlung auch von der Gemischbildungsqualität erheblich abhängt.

Literatur

1. BELINSKIJ, L.: Wärmestrahlung im Verbrennungsraum des Dieselmotors. Schriftensammlung NILD, No. 1, 1955.
2. EBERSOLE, G. et al.: The radiant and convective components of Diesel engine heat transfer. Paper No. 701C, Int. Summer Meeting, Montreal, 1963.
3. MITOR, V.: Wärmeübertragung in Dampfkesseln. Moskau, 1963.
4. SITKEI, G.: Einige Berechnungsprobleme des Wärmeüberganges und der Wärmebelastung in Vorkammer-Dieselmotoren. Acta Technica Acad. Sci. Hung. **58**, 301—312 (1967).
5. UYEHARA, O. and P. MYERS: Diesel combustion temperatures. — Influence of fuels. SAE Trans. **3**, 178—186 (1949).
6. SITKEI, G.: Beitrag zur Theorie des Wärmeüberganges im Motor. Konstruktion **14**, 67—71 (1962).

Dr. György SITKEI, Budapest XI., Bertalan L. u. 1. Ungarn.

Dr. G. V. RAMANAIAH, Central Mechanical Engineering Research Institute,
Durgapur-9, India