

EINIGE PROBLEME DER BESTIMMUNG DER MECHANISCHEN VERLUSTE VON VERBRENNUNGSMOTOREN

Von
E. PÁSZTOR

Lehrstuhl für Wärmekraftmaschinen, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 18. Juni, 1965)

Vorgelegt v. Prof. dr. D. BRODSZKY

I. Problemstellung und Bedeutung des Problems

Für die Entwicklung der Verbrennungsmotoren, für die Erforschung und Vervollkommnung ihrer Arbeitprozesse wird in der ganzen Welt sehr viel Energie und wissenschaftliche Arbeit aufgewendet. Die Untersuchung der mechanischen Verluste von Verbrennungsmotoren, in erster Linie von Dieselmotoren, die Untersuchung der Möglichkeiten zur Senkung dieser Verluste, die Erforschung der Zusammenhänge zwischen den thermischen und den mechanischen Verlusten wurde aber bis jetzt nicht als Schwerpunktfrage der Forschungsarbeit behandelt. Der mechanische Verlust des Motors ist aber annähernd ebenso groß, wie der indizierte Verlust. Den Untersuchungen über die Ursachen der mechanischen Verluste, der Untersuchung, wie man die mechanischen Verluste bestimmen und sie vermindern kann, kommt also für die Entwicklung der Verbrennungsmotoren und für die Erhöhung ihrer Wirtschaftlichkeit die gleiche Bedeutung zu wie den gleichartigen Untersuchungen über den indizierten Wirkungsgrad.

Die grundlegende Zielsetzung der in den letzten Jahrzehnten immer stärker werdenden Dieselforschungsarbeit ist die Untersuchung der thermischen Vorgänge im Motor mit dem Ziel, die thermischen Verluste neben einer Steigerung der pro Arbeitsspiel vom Motor abgegebenen Leistung möglichst auf ein Minimum zu vermindern. Die Erforschung dieser Verluste wurde aber nicht hinreichend mit der Untersuchung der mechanischen Verluste verbunden, obwohl diese beiden Verlustarten in untrennbarer, enger Verbindung miteinander auftreten. Die mechanischen Verluste werden in hohem Maße eben durch die thermischen Kennwerte des Arbeitsprozesses bestimmt.

Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeit soll es sein, daß beide Verluste ein Minimum werden. Dazu muß aber mindestens die Tendenz des Zusammenhangs zwischen diesen beiden Verlusten bekannt sein.

2. Grundlegende Zusammenhänge zwischen dem thermischen Arbeitsprozeß und dem Reibungsverlust

Der Reibungsverlust bzw. der dem Reibungsverlust gleichwertige Reibungsmitteldruck (p_i) ist von den Parametern des Motorarbeitsprozesses nicht unabhängig. Die Art seiner Änderung hängt in erster Linie von der Änderung des Durchschnittsdruckes (p_d) des Arbeitsprozesses ab. Der Begriff Durchschnittsdruck entspricht nicht dem Begriff des indizierten Mitteldruckes p_i . Der letztere ist vielmehr für die aus dem Arbeitsprozeß gewinnbare Arbeit charakteristisch.

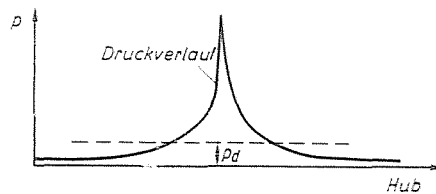


Abb. 1

Der Durchschnittsdruck der Verbrennungsmotoren (p_d) kann als Quotient der Fläche des in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel oder vom Kolbenweg aufgetragenen Indikatordiagrammes einerseits (Abb. 1) und der Bezugsgröße andererseits definiert werden. Die Reibungsverluste sind unabhängig davon, ob der Gasdruck, durch den sie hervorgerufen werden, im Arbeitsprozeß eine negative oder positive Arbeit leistet. Deshalb wird die Änderung des mittleren Reibungsdruckes maßgeblich durch den oben definierten Durchschnittsdruck bestimmt.

Der Reibungsverlust wird außer vom Durchschnittsdruck in geringerem Maße auch durch andere Parameter des Arbeitsprozesses beeinflusst, so zum Beispiel durch das Verhältnis des maximalen zum minimalen Druck des Arbeitsprozesses. Diese Verhältniszahl wird in erster Linie durch den Grad der eventuellen Aufladung, durch das Kompressionsverhältnis, durch das Luftverhältnis, durch den Zündzeitpunkt und durch den Verbrennungsvorlauf bestimmt.

Die absolute, vom Durchschnittsdruck abhängige Änderung des Reibungsverlustes wird auch von der Motorkonstruktion und vom Wärmezustand des Motors beeinflusst, die prozentuale (auf einen gegebenen Betriebszustand bezogene) Änderung des Reibungsverlustes ist aber von der Konstruktion, vom Wärmezustand mit guter Näherung unabhängig. Um das einwandfreie zu beweisen, sind weitere Versuche, d. h. Messungen mit verschiedenen Motoren nötig.

Die Änderung des mittleren Reibungsdruckes wird in der dem Verfasser bekannten einschlägigen Literatur zumeist entweder mit dem indizierten Mitteldruck oder mit der Änderung des niedrigsten Druckes des Arbeitsprozesses [1], [2], [3], mit dem Druckmaximum [4] bzw. mit der Drehzahl [5], [6], [8] in Zusammenhang gebracht. Diese und ähnliche Parameter beeinflussen die Reibungsverluste maßgeblich, doch gestalten sie die Bestimmung des Zusammenhanges zwischen dem thermischen Arbeitsprozeß des Motors und dem Reibungsverlust unsicher.

Mit steigendem indiziertem Mitteldruck erhöht sich notwendigerweise auch der Durchschnittsdruck. Der verwickelte Zusammenhang, der zwischen dem indizierten Mitteldruck und dem Durchschnittsdruck besteht, wird durch den thermischen Arbeitsprozeß bestimmt, der von vielen in gegenseitiger Wechselwirkung stehenden Parametern abhängt.

Bei einem gegebenen Motor kann man durch die Veränderung der den thermischen Arbeitsprozeß bestimmenden Parametern (Zündzeitpunkt, Verbrennungsgesetz, Luftverhältnis usw.) den gleichen indizierten Mitteldruck durch Arbeitsprozesse unterschiedlichen Durchschnittsdruckes erreichen. Es ist offensichtlich, daß sich in solchen Fällen nicht nur der thermische Verlust, sondern auch der mittlere Reibungsdruck ändert.

Damit hat man die Möglichkeit, die Änderung der Motorreibungsverluste in Abhängigkeit vom indizierten Mitteldruck mit Hilfe eines Zwischenparameters, des Durchschnittsdruckes, zu untersuchen. Bei grundlegenden Untersuchungen, besonders dann, wenn vom gegebenen Motortyp noch keine konkreten Meßdaten vorliegen, genügt es, den Reibungsverlust als Funktion des Durchschnittsdruckes anzusehen. Die wichtigste Voraussetzung für diese Annäherung besteht darin, daß sowohl der zu untersuchende als auch der Versuchsmotor, der die konkreten Werte des Reibungsverlustes geliefert hat, einen ähnlichen Arbeitsprozeß haben.

3. Die Möglichkeit der Untersuchung der mechanischen Verluste mit Hilfe des Durchschnittsdruckes bei der Änderung der Motorleistung

Die mechanischen Verluste (p_m) sind nur mit Hilfe des aus dem Indikator-
diagramm errechneten indizierten Mitteldruckes (p_i) und des beim Abbremsen gewonnenen effektiven Mitteldruckes (p_e) exakt zu bestimmen. Diese Tatsache stellt das größte Problem dar.

$$p_m = p_i - p_e$$

Der für die mechanischen Verluste charakteristische Reibungsdruck p_m ergibt sich in diesem Falle aus dem geringen Unterschied zweier verhältnismäßig großer Drücke. Dadurch ist eine sehr große Ungenauigkeit des Ver-

fahrens gegeben. Mit den heutigen technischen Mittel kann das Indikator-diagramm nur mit beschränkter Genauigkeit aufgenommen werden. Damit ist auch die Genauigkeit des p_i -Wertes festgelegt. Diese Tatsache erschwert die genauere Analyse der auf diesem Wege ermittelten mechanischen Verluste.

Ein besseres, reelleres Bild von der Änderung der Reibungsverluste erhält man, wenn man sich der Ergebnisse aus der Analyse der Willans-Linie bedient, die beim Abbremsen des Motors aufgenommen wurde. Dabei sind die in der Einleitung genannten Zusammenhänge zwischen Reibungs-, indiziertem und Durchschnittsdruck zu beachten.

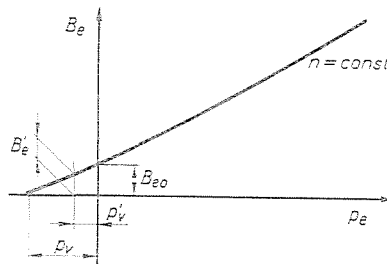


Abb. 2

Unter Verwendung der Daten des Motorkennlinienfeldes kann der Reibungsdruck in erster Näherung mit Hilfe der Willans-Linie ermittelt werden. Die Willans-Linie (Abb. 2) stellt den stündlichen Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom effektiven Mitteldruck bei konstanter Drehzahl $B_e = f(p_e)_n = \text{konst.}$ dar.

Der stündliche Kraftstoffverbrauch beim Punkt $p_e = 0$ ist für die Überwindung der Leerlaufverluste (thermische, mechanische und Strömungsverluste) erforderlich. Wenn der Kraftstoffverbrauch des Motors weiter herabgesetzt wird ($B'_e < B_{e0}$), dann ist der Motor nicht mehr in der Lage, den Leerlaufzustand aufrechtzuerhalten. Es ist eine dem aus der Willans-Linie durch Extrapolation gewonnenen Mitteldruck p'_v entsprechende äußere Leistung notwendig, um den Betriebszustand $n = \text{konst.}$ zu erhalten. Sinkt der Kraftstoffverbrauch auf Null ($B_e = 0$), kann der Motor nur mit Fremdantrieb in Betrieb gehalten werden. In diesem Falle muß der Motor mit einer dem Mitteldruck p_v entsprechenden Leistung angetrieben werden, um den Betriebszustand $n = \text{konst.}$ zu verwirklichen. Der Punkt $B_e = 0$ der Willans-Linie (im weiteren: Nullpunkt der Willans-Linie) entspricht dem Betriebszustand des Motors bei Fremdantrieb. Das ist von grundlegender Wichtigkeit, weil der Betriebszustand im Nullpunkt der Willans-Linie die gleichen charakteristischen Merkmale aufweist, wie der Betriebszustand bei Fremdantrieb.

Der Verlust, der sich mit Hilfe des Nullpunktes der Willans-Linie bestimmen läßt, setzt sich aus drei grundlegenden Komponenten zusammen:

a) Reibungsverluste (p_r).

b) Gaswechselverluste, die die negative Fläche der Gaswechselschleife darstellt (p_w). Die Gaswechselschleife bildet auch noch bei aufgeladenen Motoren unbedingt eine negative Arbeitsfläche. Deshalb ist ihre Wirkung nicht zu vernachlässigen.

c) Die Leistungsaufnahme der Hilfseinrichtungen (p_h), die für den Motorbetrieb notwendig sind.

Diese Leistungsaufnahme kann mit guter Näherung als vom Arbeitsprozeß unabhängig bezeichnet werden.

Den Gesamtverlust bei Fremdantrieb schreibt man

$$p_v = p_r + p_w + p_h.$$

Während des Arbeitsprozesses, der dem Nullpunkt der Willans-Linie entspricht, ist die vom Arbeitsmedium zur Zylinderwand fließende Wärmemenge mit guter Näherung gleich Null, weil die mittlere Temperatur des ohne Verbrennung vor sich gehenden Arbeitsprozesses — unter Berücksichtigung des Ansaug- und Auspuffprozesses — fast der Zylinderwandtemperatur gleich ist. Somit strömt nur die durch Reibung entstandene Wärmemenge in die Zylinderwand, wodurch ihre Temperatur steigt. Auch aus diesem Grunde kann die vom Arbeitsmedium zur Zylinderwand fließende Wärmeströmung vernachlässigt werden. Die vom Arbeitsmedium zur Zylinderwand strömende Wärmemenge ist um eine volle Größenordnung kleiner als die Reibungswärme, weshalb sie bei kleinen Kompressionsverhältnissen — mit Ausnahme von sehr genauen Anforderungen — bei der Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades vernachlässigt werden darf.

Der mechanische Wirkungsgrad kann also wie folgt geschrieben werden:

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_e + (p_r + p_h)} = \frac{p_e}{p_e + (p_v - p_w)}.$$

Der neue Gedanke für die Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades, der in dieser Arbeit erörtert werden soll, ist, daß die Reibungsverluste nicht vom Arbeitsprozeß unabhängig, sondern in erster Näherung eine Funktion des Durchschnittsdruckes des Arbeitsprozesses sind. Am Lehrstuhl für Wärmekraftmaschinen der TU Budapest wird z. Zt. daran gearbeitet, einen möglichst allgemeinen Zusammenhang zwischen Reibungsverlust und Durchschnittsdruck bzw. anderen Parametern des Arbeitsprozesses zu ermitteln. In dieser Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen dem Reibungsmittel- und dem Durchschnittsdruck, auf Grund vorhandener, aber nur annähernd zu verallgemeinernder Versuchsergebnisse [7] aufgestellt. Das Ziel dieser Arbeit ist es in erster Linie, die reelle Möglichkeit der oben beschriebenen Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades zu demonstrieren und zu

beweisen, daß bei Außerachtlassung dieser Zusammenhänge ein falsches Bild von der Änderung des mechanischen Wirkungsgrades entsteht.

Der mechanische Wirkungsgrad kann also nach dem beschriebenen Verfahren wie folgt bestimmt werden:

a) Bestimmung des Gesamtverlustes (p_e) des zu untersuchenden Motors durch Fremdantrieb mit Hilfe der Willans-Linie.

b) Bestimmung des indizierten Mitteldruckes der negativen Gaswechselarbeit (p_w) in Abhängigkeit von p_e mit Hilfe des Schwachfederindikatordiagrammes, danach Bestimmung des indizierten Mitteldruckes im Nullpunkt der Willans-Linie durch Extrapolation.

c) Bestimmung der vom Arbeitsprozeß unabhängigen mechanischen Verluste bzw. deren Mitteldrücke (Hilfsaggregate, Steuerung usw.).

d) Bestimmung des Durchschnittsdruckes (p_d) des Arbeitsprozesses in Abhängigkeit von p_e , dann Extrapolation zum Nullpunkt der Willans-Linie.

e) Bestimmung der Abhängigkeit zwischen Reibungsverlust (p_r) und Durchschnittsdruck (p_d), $p_r = f(p_d)$.

f) Aufstellung der Funktion $p_r = f(p_e)$ mit Hilfe der Funktionen $p_r = f(p_d)$ und $p_d = f(p_e)$.

g) Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades:

$$\eta_m = \frac{p_c}{p_c + [p_r = f(p_e)] + p_h}$$

Diesem Rechnungsgang ist zu entnehmen, daß in diesem Verfahren der indizierte Mitteldruck, der die größte Unsicherheit bei der Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades verursacht, nicht verwendet wurde. Der Durchschnittsdruck des Arbeitsprozesses wird zwar aus dem Indikatordiagramm bestimmt, die verlangte Genauigkeit ist aber in diesem Falle in der Größenordnung kleiner als bei der Bestimmung des indizierten Mitteldruckes p_i . Deshalb reicht die Genauigkeit der mit den heutigen Mitteln aufgenommenen Indikatordiagramme für das Verfahren vollkommen aus.

Die Richtigkeit des beschriebenen Verfahrens wird dadurch bewiesen, daß mit ihm für die mechanischen Wirkungsgrade reelle, technisch richtige Werte erzielt werden, während sich bei Außerachtlassung der oben erörterten Gedanken bzw. bei ihrer falschen Auslegung irrealer Werte für die mechanischen Verluste und Wirkungsgrade ergeben. In dem folgenden Beispiel wird auch auf das eben Gesagte eingegangen.

4. Anwendung des Verfahrens

Am Lehrstuhl für Wärmekraftmaschinen der TU Budapest wurden im Rahmen eines Auftrages die mechanischen Verluste bzw. die Änderung des mechanischen Wirkungsgrades des Motors Typ 6 LD 315 RF der Maschinen-

fabrik Láng bei einer konstanten Drehzahl von $n = 400 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von der Leistung untersucht. Die Untersuchung wurde am Lehrstuhl nach dem obigen Verfahren durchgeführt; der Rechnungsgang und dessen wichtigste Schritte werden im folgenden gezeigt.

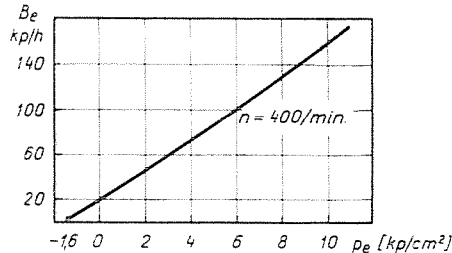


Abb. 3

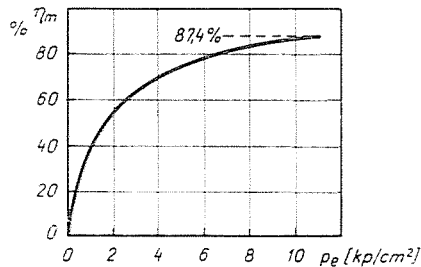


Abb. 4

Die wichtigsten technischen Daten des Motors sind:

Leistung $N_e = 1000 \text{ Ps}$

Zahl der Zylinder $z = 6$

$D = 315 \text{ mm}$; $S = 450 \text{ mm}$; $n = 400 \text{ min}^{-1}$

Zylindervolumen $35,08 \text{ dm}^3$ Taktzahl: 4

Luftdruck des Aufladers vor dem Einlaßventil bei Vollast $1,81 \text{ ata}$,
 $p_e = 10,7 \text{ kp/cm}^2$.

4.1 Aufnahme der Willans-Linie

Die bei den Motormessungen aufgenommene Willans-Linie ist aus Abb. 3 ersichtlich. Der Gesamtverlust des Motors beim Fremdantrieb ist $p_e = 1,6 \text{ kp/cm}^2$.

Nach der einfachsten, von der Wirklichkeit jedoch am weitesten entfernten und bisher allgemein angewandten Methode zur Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades wird angenommen, daß der Gesamtverlust

von der Belastung unabhängig ist. Danach kann man den mechanischen Wirkungsgrad durch die Definitionsgleichung

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_e + P_v}$$

ausdrücken.

Der nach dieser Formel berechnete Verlauf des Wertes η_m ist der Abb. 4 zu entnehmen. Wie man sieht, ist der mechanische Wirkungsgrad unreal, d. h. zu gut (der Spitzenwert liegt um 87,5%). Bei Motoren solcher Leistung und solchen Aufbaues (ohne Kreuzkopf) treten solche günstigen Wirkungsgrade nicht auf.

4.2 Bestimmung des Mitteldruckes des Gaswechsels

Nach dem in dieser Arbeit erörterten Verfahren ist — als nächster Schritt — der indizierte Mitteldruck p_w der Gaswechselschleife zu bestimmen. Den aus der Auswertung des Schwachfederdiagrammes erhaltenen indizierten Mitteldruck der Gaswechselschleife veranschaulicht die Abb. 5. Er ist im ganzen Belastungsintervall negativ. Das ist mit der sehr günstigen niedrigen Abgastemperatur zu erklären. Der indizierte Mitteldruck der Gaswechselschleife im Nullpunkt der Willans-Linie wurde durch Extrapolation bestimmt. Er beträgt 0,38 kp/cm².

4.3 Bestimmung des Durchschnittsdruckes

Der auf das Hubvolumen bezogene Durchschnittsdruck des Motorarbeitsprozesses (p_d) wird in Abhängigkeit von p_e (Abb. 5) aus dem Indikator-

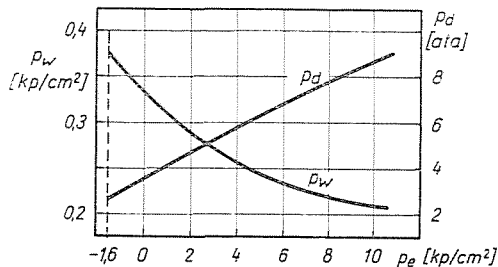


Abb. 5

diagramm bestimmt, das in dem untersuchten Belastungszustand aufgenommen wurde. Es sei bemerkt, daß der nach dem Kurbelwinkel ausgewertete Durchschnittsdruck dem obigen Durchschnittsdruck nicht gleich ist. Die beiden Begriffe sind voneinander zu trennen.

Der Durchschnittsdruck im Nullpunkt der Willans-Linie läßt sich nicht nur durch Extrapolation, sondern auch nach den folgenden zwei Verfahren bestimmen:

a) Der im Nullpunkt der Willans-Linie vorhandene Durchschnittsdruck des Arbeitsprozesses ohne Wärmezufuhr ist dem Durchschnittsdruck des Arbeitsprozesses eines Zylinders des laufenden Motors proportional, wenn die Kraftstoffeinspritzung in den zu untersuchenden Zylinder eingestellt wird. Der Proportionalitätsfaktor ist das Verhältnis zwischen den Anfangsdrücken (vor dem Einlaßventil) der beiden Arbeitsprozesse. Der obige Zusammenhang hat nur für Arbeitsprozesse ohne Wärmezufuhr Gültigkeit, wo das Verhältnis der Drücke in beliebigen, aber gleichen Punkten der Arbeitsprozesse dem Verhältnis der Anfangsdrücke gleich ist.

b) Die andere Möglichkeit besteht darin, den Durchschnittsdruck des Arbeitsprozesses im Nullpunkt der Willans-Linie mit thermodynamischen Mitteln, auf Grund der bekannten Motordaten zu bestimmen. Der Anfangsdruck des Arbeitsprozesses kann, wie im vorigen Punkt gezeigt wurde, durch Extrapolation der Funktion des Druckes vor dem Einlaßventil in Abhängigkeit von p_e bis zum Nullpunkt der Willans-Linie bestimmt werden.

Am Lehrstuhl wurde der Durchschnittsdruck im Nullpunkt der Willans-Linie nach allen 3 Verfahren ermittelt. Alle Verfahren erbrachten Ergebnisse, die innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen.

4.4 Bestimmung der vom Arbeitsprozeß unabhängigen mechanischen Verluste

Die Leistungsaufnahme der Hilfsaggregate und der Steuerung des Motors ist bei konstanter Drehzahl mit sehr guter Näherung von der Leistung bzw. vom Arbeitsprozeß unabhängig. Auf Grund von Berechnungen, von Messungen und von Erfahrungswerten beträgt der vom Arbeitsprozeß unabhängige mechanische Verlust 35 PS bzw., durch einen Mitteldruckwert ausgedrückt, $p_h = 0,3745 \text{ kp/cm}^2$.

Die genaue Bestimmung des vom Arbeitsprozeß unabhängigen mechanischen Verlustes ist im Interesse der genauen Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades von großer Wichtigkeit. Je größer der Anteil, den der vom Arbeitsprozeß unabhängige mechanische Verlust an dem mit Hilfe der Willans-Linie gemessenen Gesamtverlust hat, desto besser ist der mechanische Wirkungsgrad, weil der mechanische Verlust in Abhängigkeit von p_e einen geringeren Zuwachs erfährt.

4.5 Bestimmung des funktionellen Zusammenhanges zwischen dem vom Durchschnittsdruck abhängigen Reibungsverlust und dem Durchschnittsdruck

Der funktionelle Zusammenhang zwischen dem vom Durchschnittsdruck abhängigen Reibungsverlust und dem Durchschnittsdruck kann aus Versuchsergebnissen bestimmt werden. Die Änderung des Reibungsmitteldruckes in Abhängigkeit vom Durchschnittsdruck kann bestimmt werden, indem man den

Durchschnittsdruck ändert und die Reibungsleistungsaufnahme im Motor mißt. Auf Grund der in Abb. 6 [7] aufgetragenen Meßergebnisse kann obiger funktioneller Zusammenhang, von der Motordrehzahl unabhängig, als linear angenommen werden. In die Abb. 6 wurde die lineare Änderung, die für die besprochene Berechnung verwendet wurde, mit einer punktierten Linie eingezeichnet.

Die Verwendung der in Abb. 6 dargestellten Versuchsergebnisse beruht auf dem Prinzip, daß das Verhältnis der Reibungsdruckänderung, auf gleiche

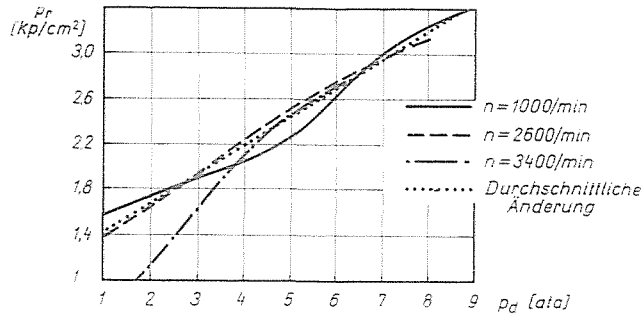


Abb. 6

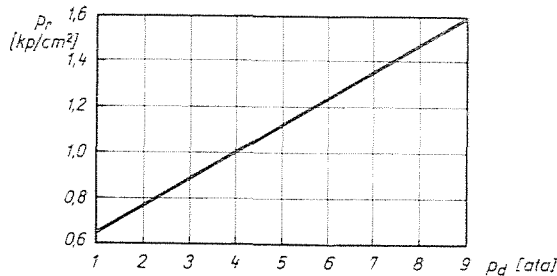


Abb. 7

Durchschnittsdruckänderung bezogen, bei Motoren konstant ist. Der Reibungsmitteldruck im Nullpunkt der Willans-Linie hängt vom Motortyp, vom Aufbau des Motors usw. ab. Das Verhältnis der Reibungsmitteldrücke ist jedoch bei gleichen Durchschnittsdrücken mit guter Näherung konstant.

Das kann man nur in erster Näherung annehmen, weil hierbei die weiteren Parameter des Arbeitsprozesses (Verhältnis zwischen maximalen und minimalen Drücken, Kompressionsverhältnis u. a.) sowie die Eigenschaften der Motorkonstruktion nicht berücksichtigt sind. Versuchsergebnisse in dieser Richtung stehen erstens noch nicht zur Verfügung, zweitens wird der Gang der Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades auf diese Art und Weise auch durch das vorliegende Näherungsverfahren gut demonstriert.

Die Änderung des Reibungsmitteldruckes im untersuchten Motor wurde aus den Versuchsergebnissen unter Beachtung obiger Gedanken ermittelt und in Abb. 7 dargestellt. Dem bisher Gesagten entsprechend ändert sich in Abhängigkeit vom Durchschnittsdruck nur jener Anteil des Gesamtverlustes, der sich um den der negativen Gaswechsellarbeit entsprechenden Mitteldruck p_w und den für den Antrieb der Hilfsaggregate notwendigen Mitteldruck p_h verkleinert.

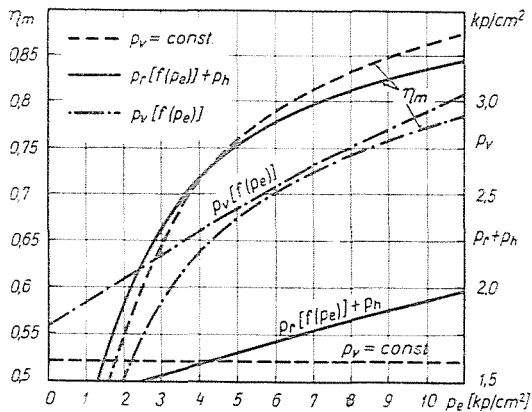


Abb. 8

Weil zwischen dem effektiven Mitteldruck p_e und dem Durchschnittsdruck p_d ein eindeutiger funktioneller Zusammenhang besteht (Abb. 5), kann auch ein eindeutiger funktioneller Zusammenhang zwischen dem Reibungsmitteldruck p_r und dem effektiven Mitteldruck p_e aufgestellt werden.

4.6 Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades

Der mechanische Wirkungsgrad errechnet sich auf Grund des erläuterten Verfahrens zu

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_e + [p_r = f(p_e)] + p_h}$$

Durch die ausgezogene (—) Linie ist in Abb. 8 der auf Grund der obigen Überlegungen berechnete mechanische Wirkungsgrad dargestellt. Der Höchstwert des mechanischen Wirkungsgrades beträgt $\eta_m = 0,846$. Er ist technisch real.

Wenn der mit Hilfe des Nullpunktes der Willans-Linie bestimmte Gesamtverlust p_e in Abhängigkeit von p_e als konstant angenommen wird, erhält man den durch die gestrichelte Linie (- - -) dargestellten Wirkungsgradverlauf. Es ist ersichtlich, daß dieses Verfahren einen unwahrscheinlich

guten Wirkungsgrad ergibt. Der Vollständigkeit halber wurde auch die Änderung der durch den Mitteldruck ausgedrückten Verluste, dargestellt. Der nach dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren bestimmte Gesamtreibungsverlust $p_r = f(p_e) + p_h$ ist anfänglich kleiner als der im Nullpunkt der Willans-Linie gemessene Gesamtverlust, danach nimmt er mit wachsendem p_e gleichfalls zu, und nach dem Wert $p_e = 4,2 \text{ kp/cm}^2$ ist $p_r = f(p_e) + p_h > p_e$. Entsprechend schneiden sich die nach den verschiedenen Verfahren ermittelten Wirkungsgradkurven.

Um die Realität der einzelnen Methoden vergleichen zu können, wurde der mechanische Wirkungsgrad auch für den Fall untersucht, daß sich der Gesamtverlust p_r nach den in dieser Arbeit dargelegten Prinzipien in Abhängigkeit von p_e ändert. Für diesen Fall wurde die Änderung des Verlustes und des mechanischen Wirkungsgrades durch strichpunktitierte Linien (— · — · —) dargestellt. Wie sich zeigt, ist der auf diese Art und Weise bestimmte mechanische Wirkungsgrad unwahrscheinlich ungünstig, sein Höchstwert liegt um $\eta_m = 78,4\%$. Der in diesem Fall erhaltene ungünstige mechanische Verlust zeigt, daß der mit Hilfe der Willans-Linie ermittelte Gesamtverlust nicht ganz von p_e abhängt, doch kann er auch nicht konstant sein. Vielmehr wird der reelle mechanische Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschinen durch Untersuchung der einzelnen Glieder des Gesamtverlustes p_e zu ermitteln sein.

Den besten Beweis für die Realität der in dieser Arbeit erläuterten Methode liefert die Tatsache, daß man reale Werte für den mechanischen Wirkungsgrad bzw. für die mechanischen Verluste nur dann erhält, wenn der Gesamtverlust p_r nach dem oben erörterten Verfahren in Komponenten aufgeteilt wird. Danach sind deren Zusammenhänge mit dem Arbeitsprozeß bzw. mit dessen Parametern, in erster Linie mit dem effektiven bzw. dem Durchschnittsdruck zu untersuchen. Dann kann man, im Besitz der obigen Zusammenhänge, die Änderung der mechanischen Verluste der Verbrennungsmotoren untersuchen.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde der Zusammenhang zwischen den mechanischen Verlusten bzw. dem Reibungsmitteldruck und dem Motorarbeitsprozeß untersucht. Es wurde gezeigt, daß der Reibungsmitteldruck in erster Linie vom Durchschnittsdruck des Arbeitsprozesses abhängt. Die spezifische Änderung des Reibungsmitteldruckes bei Motoren verschiedener Konstruktion und für verschiedene Verwendungszwecke ist bei gleichem Durchschnittsdruck mit guter Näherung gleich. Das ist eine Tatsache, die bei der Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom effektiven Mitteldruck bzw. von der Leistung genutzt werden kann. In der Studie wird bewiesen, daß der mit Hilfe der Willans-Linie ermittelte Gesamtverlust nicht konstant ist und daß der auf diese Art und Weise ermittelte mechanische Wirkungsgrad den tatsächlichen Verhältnissen nicht entspricht. Die richtige Methode zur Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades eines gegebenen Motors besteht darin, daß der mit Hilfe der Willans-Linie ermittelte Gesamtverlust in seine Komponenten zerlegt und dann die Abhängigkeit der einzelnen Komponenten vom effektiven Mitteldruck mit Hilfe des Durchschnittsdruckes und anderer Parameter des Arbeitsprozesses bestimmt wird.

Literatur

1. ZINNER, K.: Die Umrechnung der Leistung von Verbrennungsmotoren, insbesondere Dieselmotoren, in Abhängigkeit vom atmosphärischen Zustand. MTZ **5**, 109 (1950).
2. PETERSEN, H.: Die mechanischen Verluste der Mittel- und Großdieselmotoren. MTZ **5**, 118 (1950).
3. PETERSEN, H.: Bestimmung der mechanischen Verluste bei Mittel- und Großdieselmotoren. MTZ **5**, 122 (1950).
4. OEMICHEN, M.: Betrachtungen zur Brennraumgestaltung von Dieselmotoren mit kleinem Brennraum. Die Technik **10**, 434 (1951).
5. Какуевичкий, В. А.: Внутренние потери в дизелях. Тракторы и сельхозмашины № 2. 1960.
6. Какуевичкий, В. А.: Потери на трение в автомобильных карбюраторных двигателях. Автомобильная и тракторная промышленность. № 10. 1952.
7. Васильев, Б. Н.: Механические потери двигателя автомобиля «Москвич». Автомобильная и тракторная промышленность. № 2. 1954.
Dtsch in: Kraftfahrzeugtechnik. 1955. 390—393 Seite.
8. Муравьев, В. Д.: Использование метода выбега для определения внутренних потерь двигателя внутреннего сгорания. Автомобильная и тракторная промышленность. № 11. 1963.
Dtsch in: MTZ. 1964. Heft 9. 345—346 Seite.

Dr. Endre PÁSZTOR, Budapest XI. Műegyetem rkp. 3. Ungarn.