

Verbrennungsmotoren

von

Dr.-Ing. Wilhelm Endres

o. Prof. an der Techn. Hochschule München (em.)

II

Gaswechselfvorgang. Aufladen. Leistung, mittl. Druck,
Reibung. Wirkungsgrade u. Kraftstoffverbrauch.

Mit 62 Abbildungen



Sammlung Götschen Band 1184/1184 a

Walter de Gruyter & Co. Berlin 1966

vormals G. J. Götschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag,
Verlagsbuchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp



Copyright 1966 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen-
sche Verlagshandlung — J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung — Georg
Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp., Berlin 30. — Alle Rechte,
einschl. der Rechte der Herstellung von Photokopien und Mikrofilmen,
von der Verlagshandlung vorbehalten. — Archiv-Nr.: 79 33 668. —
Satz und Druck: Deutsche Zentraldruckerei, Berlin. — Printed in Germany.

Inhaltsverzeichnis

A bis E siehe Band I Sammlung Göschen Band 1076/1076a).

F. Der Gaswechselfvorgang beim (nicht aufgeladenen) Verbrennungsmotor

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|-------|
| 1. Aufgabe und Bedeutung | 5 |
| 2. Der Gaswechselfvorgang beim <i>Viertaktmotor</i> . Beschreibung .. | 5 |
| 3. Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des Gaswechsels beim <i>Viertaktmotor</i> | 8 |
| 4. Der Erfolg des Gaswechselfvorgangs beim <i>Viertaktmotor</i> . Der Liefergrad λ_l des Einsaughubs | 10 |
| 5. Der Gaswechselfvorgang des <i>Zweitaktmotors</i> (<i>die Spülung</i>). Grundformen a—f von Spülanordnungen | 13 |
| 6. Der örtliche Verlauf der Schleifenspülung im Zylinder. Querspülung, Umkehrspülung. — Modellversuche, Erfahrungen, Praktisches | 23 |
| 7. Der zeitliche Ablauf der Spülung bei einer großen <i>Zweitaktmaschine</i> mit Spülgebläse | 32 |
| 8. Der kleine <i>Zweitaktmotor</i> mit Kurbelkastenpumpe | 36 |
| 9. Zeitlicher Ablauf der Spülung beim <i>Kurbelkastenmotor</i> nach 8. | 40 |
| 10. Kenngrößen der <i>Zweitaktspülung</i> . a) Luftaufwand k (S. 43), b) Ladegrad, Spülgrad, Liefergrad und Fanggrad (S. 44) | 43 |
| 11. Zusammenhang zwischen Spüldruck p_s und Schlitzabmessungen bei gegebenem Luftauswand k der Spülung. Einfluß der Drehzahl n und des Zyl.-Durchm. D | 47 |
| 12. Instationäre Strömungen in <i>Einsaug-, Spül- und Auspuffleitungen bei 4- und 2-Taktmotoren</i> . a) Allgemeines (S. 50), b) <i>Einsaugen</i> durch ein kurzes Rohr (S. 52), c) <i>Lauf</i> von Druckwellen in <i>Auspuffleitungen</i> (S. 55), d) <i>Resonanzschwingungen</i> in der <i>Auspuffleitung</i> eines <i>Mehrzylindermotors</i> (S. 61) | 50 |
| 13. <i>Abgase</i> von <i>Verbrennungsmotoren</i> . a) <i>Drücke</i> (S. 65), b) <i>Temperatur</i> t_u (S. 65), c) <i>Chemische Zusammensetzung</i> ; <i>Belästigung</i> und <i>Gefährdung</i> von <i>Personen</i> (S. 68), d) <i>Ausnutzung</i> der <i>Energie</i> (S. 72) | 65 |

G. Das Aufladen von Verbrennungsmotoren

| | |
|---|----|
| 1. Überblick | 73 |
| 2. Das Aufladen des <i>Viertaktmotors</i> . Die für die Leistungssteigerung maßgebenden Einflüsse a bis d. Der <i>Abgasturbolader</i> (d). <i>Stoß- und Staubetrieb</i> | 76 |
| 3. Das Aufladen des <i>Zweitaktmotors</i> | 85 |
| 4. <i>Beanspruchung</i> des <i>Motors</i> und des <i>Laders</i> beim Aufladen .. | 91 |
| 5. <i>Beispiele</i> für ausgeführte aufgeladene Motoren | 95 |

H. Leistung N_e des Verbrennungsmotors und ihre Berechnung. Mittl. Druck p_e , Drehmoment M_d , mittl. Kolbengeschwind. c_m , Literleistung. Die Reibung. Atmosphäreinfluß. Leistungsbezeichnungen

| | Seite |
|---|-------|
| 1. p - V -Diagramm, Arbeit L_i , mittl. indizierter Druck p_i | 95 |
| 2. Mittl. nutzbarer (effektiver) Druck p_e . Reibungsdruck p_r , mechanischer Wirkungsgrad η_m . Nutzbare (effektive) Leistung N_e | 98 |
| 3. Näheres über den mittleren nutzbaren Druck p_e . Tabellen .. | 101 |
| 4. Drehmoment M_d | 104 |
| 5. Mittl. Kolbengeschwindigkeit c_m . Grenzen der Steigerung der Drehzahl n | 106 |
| 6. Literleistung N_e /Hubvolumen | 108 |
| 7. Die Reibung im Verbrennungsmotor (p_r und η_m) | 109 |
| 8. Einfluß der umgebenden Atmosphäre auf Leistung und Kraftstoffverbrauch. Die Reduktionsformeln | 114 |
| 9. Leistungsbezeichnungen. Leistungs- und Laststufen | 119 |

J. Wirkungsgrade und Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors

| | |
|---|-----|
| 1. Wirkungsgrade | 122 |
| 2. Wärmeverbrauch W (kcal/h). Kraftstoffverbrauch B (kg/h) sowie b_e und b_i (g/PSh) | 124 |
| 3. Zahlenwerte des Kraftstoffverbrauchs und der Wirkungsgrade bei Nennlast. Ihre Gewinnung auf dem Prüfstand und durch Rechnung | 125 |
| 4. Der Kraftstoffverbrauch von ortsfesten Motoren konstanter Drehzahl bei Teillast | 128 |
| 5. Die Kennlinie von Schiffsmotoren. Ihr Kraftstoffverbrauch .. | 129 |
| 6. Das n - M_d -Kennfeld der Motoren von Kraftwagen und von anderen Räderfahrzeugen. a) Kennfeld n - M_d (S. 131), b) Das N_e - n -Diagramm (S. 133), c) Kraftstoffverbrauch im Kennfeld (S. 134), d) Pro Betriebsstunde gerechneter Verbrauch an Kraftstoff B und an Luft L . Beziehung zu Luftverhältnis λ der Verbrennung (S. 137) | 131 |
| 7. Auffindung des Betriebspunkts (n und M_d) eines in ein laufendes Fahrzeug eingebauten Motors. Der Kraftstoffverbrauch b_e des Motors und des k Fahrzeugs in Liter/100 km. Die Fahrlinie b auf ebener Straße. Der Kraftstoffnormverbrauch | 138 |

Schrifttum

Nachweis der Bilder und Tafeln, soweit diese aus Zeitschriften, Büchern, Werkmittelungen entnommen sind....

Sachregister

Band III wird den konstruktiven Aufbau der Verbrennungsmotoren behandeln (Abschnitte K. L. u. s. f.).

F. Der Gaswechselfvorgang beim (nicht aufgeladenen) Verbrennungsmotor

1. Aufgabe und Bedeutung

Die Aufgabe des Gaswechselfvorgangs ist die, die Verbrennungsgase möglichst vollständig aus dem Zylinder zu entfernen und dafür diesen mit einer möglichst großen Menge von Frischladung zu füllen, nämlich brennbarem Gemisch (Ottomotor) oder Luft (Dieselmotor), die dann für die folgende Verbrennung zur Verfügung steht. Je größer diese Menge, um so mehr Leistung entsteht bei der Verbrennung in einem Zylinder gegebener Größe. Wird umgekehrt eine bestimmte Leistung verlangt, so bedeutet ein gut arbeitender Gaswechsel, daß man mit einem verhältnismäßig kleinen Zylinder auskommt, d. h. der Motor wird klein und leicht sowie billig in der Herstellung.

Die Zuführung großer Mengen flüssigen Kraftstoffs in den Motor ist einfach; sie hat aber nur insoweit einen Sinn, als es gelingt, den anderen Rohstoff der Verbrennungsreaktion, die Luft, in genügender Menge zuzuführen; sei es als Hauptbestandteil des brennbaren Gemisches (Ottomotor) oder als reine Luft (Dieselmotor).

Einleitendes über Viertakt und Zweitakt s. Band I Bilder 2, 3 und 4. Im folgenden ist in F 2 bis 4 der Gaswechselfvorgang beim Viertakt, in F 5 bis 11 beim Zweitakt behandelt, immer für nicht aufgeladene („selbstansaugende“) Motoren; bei aufgeladenen Motoren siehe unter G. Instationäre Vorgänge s. F 12, Abgase F 13.

2. Der Gaswechselfvorgang beim Viertaktmotor. Beschreibung

Das Auslaßventil A öffnet, bewegt von einem Nocken, bereits 30° — 60° Kurbelwinkel vor unterem Totpunkt (u. T.), also vor Beginn des Auslaßhubs, Bild 1 und 2. Dieser „Vorauslaßwinkel“ wird bei schnellaufendem Motor größer gewählt als bei langsamlaufendem, um die für

6 F. Gaswechselfvorgang beim Verbrennungsmotor

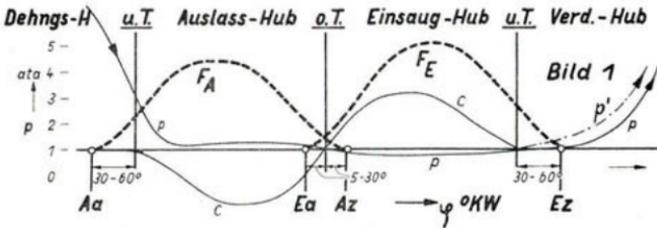


Bild 1. Ladungswechsel beim Viertaktmotor. Über dem Kurbelwinkel φ sind die Öffnungsquerschnitte F_A und F_E des Auslaß- und Einlaß-Ventils, der Druck p im Zylinder und die Kolbengeschwindigkeit c eingetragen. u. T. und o. T. unterer und oberer Totpunkt. Zeiger a und z: Ventil macht auf, zu.

den Ausschub nötige Zeit zu gewinnen. Nach Bd. I A 8 ist ja $t = \varphi/6n$, wobei t Zeit in Sekunden, φ Kurbelwinkel in Grad, n Drehzahl in Umdrehungen je Minute. Wenn das Ventil, zunächst nur einen kleinen Querschnitt freigebend, noch am Ende des Dehnungshubs öffnet, herrscht im Zylinder bei Nennlast noch ein Druck von 3 bis 6 atü; da in der Auspuffleitung nur etwa 1 atü oder 0 atü vorhanden sind, stellt sich im Ventilspalt ein über-

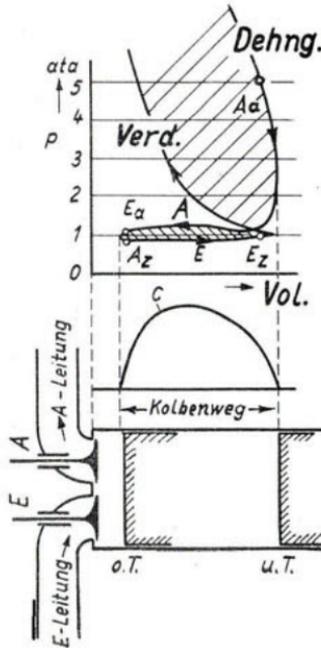


Bild 2 Ladungswechsel beim Viertaktmotor. Unten waagrechter Zylinder. Über den Kolbenweg ist oben der Druck p im Zylinder, in der Mitte die Kolbengeschwindigkeit c aufgetragen. A Auslaß, E Einlaß.

kritisches Druckverhältnis und Schallgeschwindigkeit (F 12) der Auspuffgase ein. In der Auspuffleitung entsteht dadurch eine örtliche Druckerhöhung, welche zur Ursache einer in der Leitung weglaufenden Druckwelle (F 12) wird. Im Zylinder sinkt durch das Ausströmen der Druck, bald wird deshalb das Druckverhältnis unterkritisch. Beim weiteren Ausströmen ist zu bedenken, daß die Kolbengeschwindigkeit c nach dem Gesetz des Kurbeltriebs in der Mitte des Kolbenhubs groß, an seinem Ende klein ist und damit auch die Menge der je Zeiteinheit ausgeschobenen Gase. Da im Ventil eine gewisse Drosselung entsteht, ist der Druck während des Auslaßhubs im Zylinder im allgemeinen höher als der Außendruck (z. B. um 0,1 bis 0,3 at), s. Bild 1 und 2; allerdings sind dort alle Drucklinien nur schematisch eingezeichnet; die wirklichen Linien während des A- u. E-Hubs sind diesen gegenüber meist ziemlich verändert, hervorgerufen besonders durch dynamische Vorgänge (F 12).

Meist schließt das Auslaßventil erst einige Grad nach dem oberen Totpunkt, o. T. ($5-30^\circ$; bei Rennmotoren mehr; aufgeladene Motoren s. G 2). Da in der Regel das Einsaugventil auch einige Grad (Zahlenwerte ähnlich) vor o. T. öffnet, sind in diesem Totpunkt („Ladungswechsel—o. T.“, im Gegensatz zum „Zünd—o. T.“) beide Ventile etwas geöffnet: „Ventilüberschneidung“. Zweck s. unter b). Der Kolben muß in diesem Fall so tief liegen oder solche Aussparungen haben, daß die Ventile an ihm nicht anstoßen.

Das *Einsaugventil E* läßt beim Einsaughub das Ladungsgas (brennbares Gemisch beim Ottomotor, Luft beim Dieselmotor) eintreten, das vom abwärtsgehenden Kolben angesaugt wird. Wegen der Drosselwirkung des E-Ventils ist jetzt der Druck im Zylinder etwas niedriger als der Außendruck, s. die schematische Kurve. Auch während des Einsaughubs ändert sich die Kolbengeschwindigkeit c . Das E-Ventil schließt erst nach u. T., also zu Beginn des Verdichtungshubs; der Winkel beträgt meist $20-60^\circ$ nach u. T., wobei bei raschlaufenden Ma-

schinen die größeren Zahlen gelten; Zweck s. unter F 3. Mit Schließen des *E*-Ventils beginnt die Verdichtung; Druckverlauf *p*.

Im *p*-*V*-Diagramm Bild 2 entsteht so eine im Uhrzeiger-Gegensinn verlaufende *Schleife*, d. h. eine negative, einen Verlust bedeutende Arbeit. Da es sich dabei um einen Über- oder Unterdruck von wenigen Zehntel at handelt, ist diese Arbeit im Vergleich zu der von den Linien des Verdichtungs- und Dehnungshubs dargestellten positiven Arbeit gering, aber immerhin bemerkbar. Oft rechnet man sie einfach zur Reibungsarbeit, s. H 7. Die Drucklinien beim *A*- und *E*-Hub lassen sich von Indikatoren nur dann aufzeichnen, wenn diese für kleine Drücke eigens eingerichtet sind.

3. Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des Gaswechsels beim Viertaktmotor

Damit in kurzer Zeit durch die Ventile viel Gas hindurchströmt, was eine Vorbedingung für den erfolgreichen Bau von Motoren mit hoher Drehzahl ist, müssen die Ventile groß sein, insbesondere das *E*-Ventil; letzteres wird oft etwas größer als das *A*-Ventil gemacht. Auch der Hub und die Öffnungsdauer, von der Nockenform bestimmt, müssen groß genug sein. — Konstruktives über Durchmesser und Hub des Ventils, Beschleunigung des Ventils, Gasgeschwindigkeit im Ventil, Motoren mit zwei *E*- oder zwei *A*-Ventilen s. Bd. III.

Besondere Möglichkeiten der Verbesserung des Gaswechsels liegen in der Ventilüberschneidung und im Spätschluß des *E*-Ventils:

Ventil-Überschneidung. Im Verdichtungsraum verbleibt, vom Kolben am Ende des *A*-Hubs nicht erreicht, ein Abgasrest; Bild 2. Wenn auch sein Volumen und, wegen der hohen Temperatur, auch seine Dichte nicht groß ist, vermindert er doch die Frischladung. Durch die Ventilüberschneidung kann es mit Hilfe der kinetischen Energie der Auspuffgase gelingen, ihn auszuspülen: Der vom ersten Auspuffstoß nach F 2 in der Auslaßleitung

erzeugten örtlichen Druckerhöhung mit abwandernder Druckwelle folgt oft an derselben Stelle der Leitung eine *Druckherabsetzung*. Wenn nun im Ladungswechsel — o. T. beide Ventile etwas geöffnet sind, herrscht dann also vor dem *E*-Ventil ein höherer Druck als hinter dem *A*-Ventil; es entsteht eine Strömung, welche den Abgasrest in die Auslaßleitung ausspülen kann. Man spricht bei diesem Vorgang auch von der nachsaugenden Wirkung der Auspuffgase; die Abgassäule wird zwischen den vorseilenden schnellen und den nachkommenden langsamen Teilchen auseinandergezogen, wodurch in der Leitung nahe dem Zylinder ein Unterdruck entsteht. — Diese Vorgänge können allerdings durch Schwingungen in der Auslaßleitung sehr verändert, auch gestört werden, s. F 12c. — Überschneidung bei Aufladung siehe G 2, Bild 39.

Bei *Ottomotoren* mit ihrer Mengenregelung (Begriff siehe Band I Bild 4 und A 4, letzter Absatz; in diesem Band siehe Bild 62) herrscht bei kleiner Belastung in der Saugleitung Unterdruck. Infolgedessen strömt bei der Überschneidung u. U. umgekehrt Gas aus der *A*-Leitung in den Zylinder und von dort in die Einsaugleitung und kann dort, namentlich bei kleinem *n*, ein stoßweises Rückströmen und das sog. *Vergasersprühen* hervorrufen.

Am Ende des *E*-Hubs läßt sich *durch Spätschluß des E-Ventils* folgendes erreichen: Die Gas- bzw. Luftsäule im Ansaugrohr wurde bei der hohen Kolbengeschwindigkeit *c* in Mitte des *E*-Hubs in große Geschwindigkeit versetzt. Gegen Ende des Hubs läuft der Kolben langsam; die Säule zwischen Saugrohr und Zylinder hat also dann ein langsam bewegtes vorderes und ein sich noch rasch bewegendes hinteres Ende; sie wird zusammengeschoben, verdichtet; Druckkurve *p'* tritt an Stelle von *p*. Um diesem erwünschten Vorgang genug Zeit zu lassen, schließen wir das *E*-Ventil spät, aber nicht zu spät: Wenn nämlich einige Zeit nach u. T. alle Bewegung abklingt, würde dieser bisher durch Beschleunigungskräfte bewirkte Zustand erhöhter Dichte zu Ende gehen und die Ladung im Zylinder würde anfangen, infolge ihres statischen

10 F. Gaswechselfvorgang beim Verbrennungsmotor

Überdrucks wieder in die E -Leitung abzuströmen. Dazu kommt, daß jetzt der steigende Kolben die Ladung hinausdrängen will. Um dies zu verhindern, schließen wir in diesem Augenblick das E -Ventil; es gelingt dadurch, eine größere Luftmenge als bei a im Zylinder festzuhalten; denn bei „ E zu“ ist der Druck p' größer als p . S. Bild 1.

Offenbar muß bei diesem instationären Vorgang (siehe F 12b) die Zeit t , um welche der Ventilschluß dem u. T. nacheilt, richtig bemessen sein. Wir können den das Ventil steuernden Nocken so formen, daß für eine bestimmte Drehzahl n die Zeit nach der Gleichung $t = \varphi/6n$ die richtige ist. Allerdings wird dann bei anderen Drehzahlen n (Fahrzeugmotor) die Zeit t nicht die richtige sein und deshalb die Ladung und Leistung des Motors etwas geringer ausfallen. Ein später Schluß des E -Ventils bedeutet, daß die Ladung und das p bei hoher Drehzahl hoch ausfällt, aber auf Kosten dieser Werte und des glatten Laufs des Motors bei niedriger Drehzahl; umgekehrt bei frühem Schluß.

Derartige Maßnahmen bewirken Verbesserungen der Ladung in der Größenordnung von mehreren Prozenten. Im Grund ist aber der Gaswechsel auch ohne solche Feinheiten gesichert, weil der Kolben immer seine verdrängende und ansaugende Wirkung hat. Dies ist ein Vorzug des Viertakts vor dem Zweitakt.

4. Der Erfolg des Gaswechselforgangs beim 4-Takt-Motor. Der Liefergrad λ_l des Einsaughubs

Es kommt darauf an, daß im Augenblick des Schließens des E -Ventils eine möglichst große Ladungsmenge im Zylinder ist; brennbares Gemisch beim Ottomotor, Luft beim Dieselmotor. Die Menge wird im alten Technischen Maßsystem in G Kraftkilogramm, bzw. im neuen physikalischen „Internationalen System“ in m Massenkilogramm ausgedrückt. In diesen Maßsystemen lautet die Zustandsgleichung für Gase:

$$G = PV/RT, \quad m = PV/RT. \quad (1)$$

4. Erfolg des Gaswechselforganges (Viertaktmotor) Liefergrad λ_l des Einsaughubs

11

Dabei P Druck in kp/m^2 , V nutzbares Volum in m^3 , T Temperatur absolut in Grad Kelvin, R Gaskonstante in $\text{mkp}/(\text{kg} \cdot \text{Grad Kelvin})$; für Luft $R = 29,3$. — Bei der rechtsstehenden Gleichung wird also, wie das jetzt in vielen Büchern mit Rücksicht auf die einmal eingeführten Größen geschieht, der Druck P in kp/m^2 dargestellt und nicht etwa N/m^2 (Newton je Quadratmeter), wie dies bei vollkommener Einführung des Internationalen Systems folgerichtig wäre. $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$.

Es kommt also darauf an, P und V groß zu machen, T klein zu halten. Steigerung von P siehe F 3. Das nutzbare Volum V wird durch Spätschluß des E -Ventils zwar kleiner (z. B. bei 60° nach u. T. 20% kleiner), was aber bei richtiger Bemessung durch vergrößertes P mehr als ausgeglichen wird; Ausspülen des Verdichtungsraumes wirkt wie vergrößertes nutzbares V . Daß T erheblich höher als die Außentemperatur wird, läßt sich nicht vermeiden, weil die einströmende Ladung durch Berührung mit den warmen Wänden am Ventil und im Zylinder sowie durch Beimischung des Abgasrestes erwärmt wird, insbesondere bei hoch belastetem, heißem Motor; dabei wird T um 50 bis 100° über die Außentemperatur angehoben, steigt bei 20° C Außentemperatur (gleich 293° K) als Beispiel auf 360° K , d. h. um etwas mehr als 20% ; diese Erwärmung ist bei luftgekühltem Motor oft etwas größer als bei wassergekühltem. Bei Vergasermotoren etwas günstiger, weil beim Brennstoff-Luft-Gemisch die Temperatur durch Verdampfungskühlung (z. B. stark bei Spiritusbetrieb) reduziert wird.

Liefergrad λ_l . Bei einem bezüglich des Einsaugens idealen Viertaktmotor würde sich das ganze Hubvolumen V_H mit Ladung (Otto: brennbares Gemisch, Diesel: Luft) vom Außenzustand (d. h. von dessen spez. Gewicht bzw. Dichte) füllen. Der tatsächliche Motor saugt aus den oben genannten Gründen weniger an, was man sich anschaulich so vorstellen kann, wie wenn er zwar auch Ladung vom Außenzustand aufnehmen würde, dafür aber ein (gedachtes) kleineres Hubvolumen V'_H hätte. Man

vergleicht V'_H mit V_H , indem man das Verhältnis V'_H/V_H bildet; es ist gleich dem *Liefergrad*, also

$$\lambda_l = V'_H/V_H. \quad (2)$$

Wenn man Zähler und Nenner mit dem auf den Außenzustand bezogenen spez. Gewicht γ (Techn. Maßsystem) bzw. der Dichte ρ (Internat. Maßsystem) multipliziert, erhält man im Zähler die tatsächlich angesaugte, im Nenner die vom idealen Motor angesaugte Menge, ausgedrückt in Gewicht (Kraftkilogramm) bzw. Masse (Massekilogramm).

Der Liefergrad ist leicht zu messen. Findet man z. B. bei einem 6-Zylinder-Dieselmotor von $V_H = 8,4$ Liter Hubvolumen (jeder Zylinder 1,4 Liter) und $n = 2000$ Umdr./min (bei 4-Takt 1000 Arbeitsspiele/min), daß er, mit Meßdüse, Meßblende oder Luftpuhr gemessen, in 1 Minute 6800 Liter Luft vom Außenzustand angesaugt hat, so hat er pro Arbeitsspiel $6800/1000 = 6,8$ Liter = V'_H angesaugt. Dann ist der Liefergrad gleich $V'_H/V_H = 6,8/8,4 = 0,81$ oder 81%. — Mit Hilfe eines geschätzten Liefergrads kann man voraussagen, wieviel Luft ein zu konstruierender Motor aufnehmen wird.

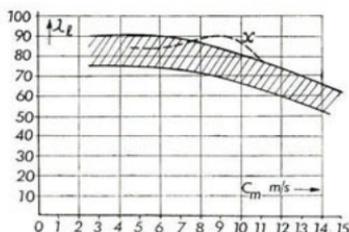
Wenn von einem Motor das Volumen $V'_H = \lambda_l V_H$ angesaugt wurde, heißt das jedoch nicht, daß genau dieselbe Menge der Verbrennung zugeführt wird. Denn ein Teil geht vorher durch die Verdichtungsraumspülung und die Undichtheit der Kolben verloren; andererseits kann in nicht ausgespülten Abgasresten noch Luft zusätzlich vorhanden sein.

Bild 3 zeigt die Zone, in welcher die Liefergrade meist liegen. Die Abszisse ist die mittlere Kolbengeschwindigkeit c_m , s. Abschnitt H 5. Bei einem bestimmten Motor kann man sich an ihrer Stelle einfach die Drehzahl denken. Im allgemeinen nimmt der Liefergrad mit steigender Drehzahl ab, weil mit zunehmender Gasgeschwindigkeit die Drosselung in den Ventilen und Leitungen größer wird; vergl. H 5 Schluß. Doch kann es auch vor-

kommen, daß in einem bestimmten Drehzahlbereich das Gegenteil eintritt, s. die gemessene Kurve α [nach 3]; dynamische Vorgänge im Saugrohr sind die Ursache, wie in F 3 kurz (Spätschluß des E-Ventils) und in F 12 etwas ausführlicher beschrieben.

Bild 3. Zone des Liefergrads abhängig von der mittleren Kolbengeschwindigkeit

$c_m = s \cdot n / 30$. — Bei Nennlast.



Der Liefergrad des Saughubs λ_l ändert sich nicht nur mit der Drehzahl, sondern auch mit der Belastung p_e . Bei Dieselmotoren wird er mit abnehmender Belastung etwas größer, weil die Einsaugtemperatur T bei kühlerer Maschine kleiner wird. Bei Ottomotoren mit ihrer Mengenregelung (Begriff s. F 3, kleingedruckter Absatz) wird er bei abnehmender Belastung viel kleiner, weil die Drosselklappe mehr geschlossen wird; auch in Bild 61 erkennbar.

Schrifttum [15—19]. Neue Wege: [82 a].

5. Der Gaswechselfvorgang des 2-Takt-Motors (die Spülung). Grundformen a-f von Spülungen

Beim Zweitaktmotor (vergl. Bd. I, Bild 3) beginnt der Ladungswechsel damit, daß einige Zeit vor dem unteren Totpunkt (z. B. 70° Kurbelwinkel vor u. T.) durch den Kolben ein Schlitz unten im Zylinder freigelegt oder daß ein Ventil geöffnet wird, so daß nun die Verbrennungsgase zu einem Teil in die Auspuffleitung entweichen. Danach werden vom abwärtsgehenden Kolben die Spül-schlitze freigelegt; durch sie strömt das unter „Spüldruck“ stehende Spülmittel in den Zylinder ein, nämlich beim Dieselmotor Luft und beim Ottomotor mit Vergaser Benzin-Luftgemisch; es verdrängt möglichst den Rest der

Verbrennungsgase und füllt als neue Ladung den Zylinder („Spülung“). Der nach dem u. T. wieder aufwärtsgehende Kolben verschließt die Schlitze (bzw. der Nocken das Ventil), und mit dem Abschluß des Zylinders (z. B. 70° nach u. T.) beginnt die Verdichtung.

Um das Spülmittel unter Druck zu setzen, benötigt ein Zweitaktmotor eine Spülpumpe. Diese sind bei mittleren und großen Motoren Kolbenpumpen oder umlaufende Kapselgebläse (z. B. Roots-G.) oder Kreiselgebläse. Deren Konstruktion wird in Bd. III beschrieben werden; über Kreiselgebläse s. auch G. Bei kleinen Zweitaktmotoren wird jedoch einfach die Zylinderunterseite als Spülpumpe benutzt; diese s. unter F 8 und 9.

Im Vergleich zum Viertaktmotor (s. F 3 letzter Satz) ist es beim Zweitaktmotor schwieriger, den Ladungswechsel erfolgreich durchzuführen, namentlich auch wegen der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit. Ein Zweitaktmotor wird praktisch erst brauchbar und kann den Wettbewerb mit dem Viertaktmotor nur dann bestehen oder gewinnen, wenn er eine gute Spülung hat; die Geschichte des Zweitaktmotors beweist das. Daher wurde viel Mühe auf die einzelnen Spülsysteme verwendet, die untereinander recht verschiedene Eigenschaften aufweisen, wie sich im folgenden zeigt.

*a) Zweitaktmotor mit Auspuffventil (Gleichstromspülung)
Bild 4.*

Der Zylinder hat unten Spülschlitze S, oben ein Auspuffventil A (oder deren mehrere). Bevor der nach der Zündung abwärtsgehende Kolben die gestrichelte Lage erreicht hat, öffnet der Nocken N das Ventil A; die Verbrennungsgase entweichen durch ihren Überdruck größtenteils in die Auspuffleitung AL. Etwas später, wenn der Druck im Zylinder abgesunken ist, beginnt die Oberkante des Kolbens (gestrichelt) die Spülschlitze freizulegen, die über den ganzen Zylinderumfang verteilt sein können. Die vom Spülgebläse SG vorverdichtete Luft dringt in den Zylinder ein und schiebt die restlichen Ver-

brennungsgase nach oben durch das Ventil A hinaus. Wenn nach dem unteren Totpunkt (u. T.) der Kolben sich wieder nach oben bewegt, wird meist zunächst das A-Ventil vom Nocken geschlossen, bald darauf der Spülschlitz durch den Kolben; dieser bläst also bis zuletzt. Danach beginnt die Verdichtung.

Das *Steuerdiagramm* (Bild 4 unten) zeigt schematisch den Öffnungsquerschnitt F des A-Ventils und der Spülschlitze über dem Kurbelwinkel φ . Der Punkt Sa (Spülschlitz auf) liegt um denselben Winkel φ_s vor dem unteren Totpunkt wie der Schließpunkt Sz (zu) nach ihm; z. B. um $\varphi_s = 50^\circ$. Grund: Der Kurbeltrieb ist (mit seltenen Ausnahmen) symmetrisch um die Mittellinie $M-M$ gebaut. Im Gegensatz dazu kann das von dem ziemlich beliebig formbaren Nocken N bewegte A-Ventil „unsymmetrisch“ arbeiten; z. B. kann es etwa 70° vor u. T. öffnen (Aa), 45° nach u. T. schließen (Az).

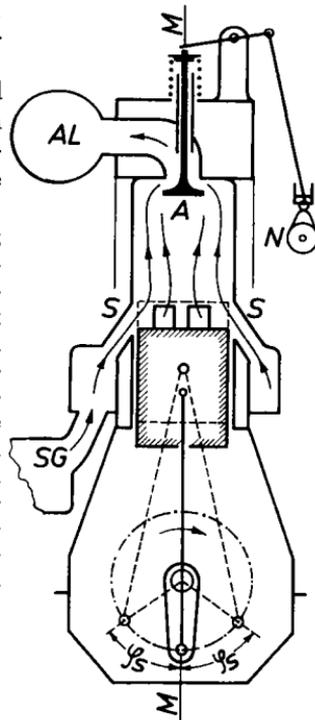
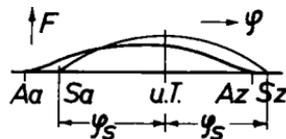


Bild 4. Gleichstromspülung. A Auspuffventil, S Spülschlitze, SG Spülgebläse, AL Auspuffleitung. φ Kurbelwinkel, F Öffnungsquerschnitt; a auf, z zu.



Das ganze Steuerdiagramm im Bild wird als „unsymmetrisch“ bezeichnet und bietet vor dem „symmetrischen“ (s. unter c) Vorteile: Bei aufwärtsgehenden Kolben füllt der Spülschlitz bis zuletzt Luft ein, die wegen des schon geschlossenen Auspuffventils nicht mehr entweichen kann, so daß die Ladung vermehrt wird.

Spülwirkung: gut, da im Zylinder alles nur in *einer* Richtung von unten nach oben strömt; „Gleichstromspülung“; der Gedanke, daß die Spülluft, möglichst wenig mit Abgasen verwirbelt, fast wie ein geschlossener Körper die Abgase nach oben drängt und danach allein den (gut gereinigten) Zylinder ausfüllt, wird bei einer Gleichstromspülung einigermaßen verwirklicht. — Gefördert wird die Stabilität und gleichmäßige Querschnittsausfüllung meist durch tangentielle S-Schlitze ähnlich wie in Bild 8; bewirken schraubenförmige Luftbewegung nach oben.

Erwärmung: Schlitze kühl, Kolbenboden durch Berührung mit Spülluft etwas gekühlt. Auspuffventil durch heiße Abgase erwärmt, und zwar stärker als beim Viertaktmotor, da bei Zweitakt bei *jeder* Umdrehung ein Auspuffvorgang; mit den heutigen Ventilstählen und bei geeigneter Konstruktion noch beherrschbar.

Bauaufwand: Beträchtlich, da das Auspuffventil einen Antrieb mit Nocken, Stößeln und Hebeln braucht, ähnlich wie beim Viertaktmotor. Da die Öffnungsdauer des Ventils kürzer ist als beim Viertaktmotor, ist es auch schwieriger, den benötigten Zeitquerschnitt bei zulässigen Beschleunigungen aufzubringen.

Verbreitung: Diese Bauart, besser spülend, aber aufwendiger als die Schlitzspülmotoren (c), hat eine ziemlich große Verbreitung gefunden. Vergleich mit c s. [3, 30, 84].

b) Zweitaktmotor mit Spülventil (Gleichstromspülung).

Ähnlich dem Motor nach Bild 4, jedoch dient jetzt das Ventil der Zuführung der Spülluft, die nach unten strömt; Schlitze sind Auspuffschlitze. Ventil kühl, Kolben wärmer

als bei a). Führung der durch Ventil eintretenden Spül-
luft im Zylinder schwieriger als bei Lufteintritt durch
Schlitze. Spülventilmaschinen werden nach dem Wissen
des Verfassers nicht mehr gebaut.

c) Zweitaktmotor mit unten angeordneten Schlitzen
(Schleifenspülung). Bilder 5, 14 und 15.

Es sind keine Ventile, sondern nur Schlitze im Unter-
teil des Zylinders vorhanden. Es gibt mehrere Möglich-
keiten für die Anordnung dieser Spül- und Auslaßschlitze,
die wegen der Bedeutung der Spülschlitze-Motoren in F 6
noch genauer besprochen werden, s. dort Bild 14 und 15.
Hier sei als Beispiel die sog. Querspülung nach Bild 5
betrachtet: Bei abwärtsgehendem Kolben werden zuerst

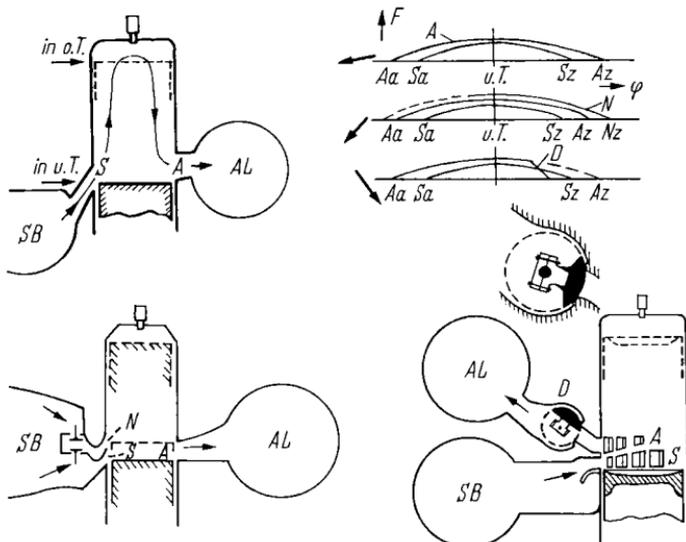


Bild 5. Links oben: Schlitzpülmotor (Querspülung). SB Spülbehälter.

Bild 6. Links unten: Dasselbe mit Nachladeschlitzen N.

Bild 7. Rechts unten: Schlitzpülmotor (Umkehrspülung) mit
Auspuffdrehschieber. — Buchstaben siehe auch Bild 4.