

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 79 (1961)
Heft: 46

Artikel: Experimentelle Gaswechsel-Untersuchungen an einem schnelllaufenden Zweitakt-Motor
Autor: Bolli, B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-65629>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

beschränkt, und die möglichen Amplituden nahmen mit steigender Frequenz rasch ab. Daher wurde auch eine Anordnung mit nur $\frac{1}{4}$ des vorherigen Behältervolumens gemessen. In Bild 9a sind die Pumpunkte aus verschiedenen Messreihen zusammengefasst. Es wurde versucht, durch die nicht allzu zahlreichen Punkte eine Kurvenschar zu legen, die das Ergebnis recht übersichtlich macht. In Bild 9b sind zum Vergleich drei berechnete Kurven aufgetragen.

7. Mehrdimensionale, instationäre Erscheinungen in einem Verdichter

Es ist eigentlich erstaunlich, dass die entwickelte, einfache Theorie im Stande ist, so viele Erscheinungen zu erklären, denn was im einzelnen im Verdichter geschieht, ist sehr kompliziert. Um solche mehrdimensionale, zeitlich stark ändernde Zustände festzustellen, müssen Druck- und Geschwindigkeitssonden in den Verdichter eingebaut werden. Solche Messungen sind in der Anlage Bild 2 vorgesehen, wurden aber in der ersten Etappe noch nicht durchgeführt. Vorläufig muss daher auf eine interessante Publikation [5] zurückgegriffen werden. In dieser wurde erstmals eine übersichtliche Darstellung der vorher schwer verständlichen Beobachtungen gegeben. Dies gelang durch verfeinerte Messungen mit Indikatoren und Hitzdrähten an den Stellen A, B und C in Bild 10. Vorschalt- und Radialrad waren alte Stücke, die nicht gut aufeinander abgestimmt waren. Dies erklärt wohl zum Teil die komplizierten p, V -Kurven, während üblicherweise einfachere Verläufe beobachtet werden.

Es treten drei Kurventypen auf. Bei kleiner Drehzahl steigt die Kurve (mit abnehmender Durchflussmenge) über einen weiten Bereich flach an, um im Pumpgebiet abzubrechen. Bei mittleren Drehzahlen wird eine Doppelbuckel-Kurve gefunden. Es gibt eine «milde» Pumpzone und nachher

steigt der Druck nochmals an. Nach G. O. Ellis [4] ist dieser Wiederaufstieg möglicherweise eine Folge des induzierten Wirbels im schaufellosten Diffusor. Bei hoher Drehzahl wird der brauchbare Ast immer schmäler, und die beiden Pumpzonen sind in einer verschmolzen.

Nach Bild 10 tritt vor dem Pumpen ein Ablösen in rotierenden Zellen (Rotating Stall) ein. Man kann sich nun vorstellen, dass die Auswirkung von rotierenden Ablösezellen davon abhängt, was sich stromabwärts ereignet. Folgen im Diffusor scharfe Krümmen, so wird dort Ablösung erzeugt; die Strömung erholt sich möglicherweise nicht rasch genug und das eigentliche Pumpen setzt früher ein.

Es sei zum Abschluss nochmals darauf hingewiesen, dass Ablösen und Pumpen nicht das selbe sind. Vom Pumpen spricht man erst, wenn die über den ganzen Querschnitt gemittelte Strömung zeitliche Pulsationen ausführt.

Literaturverzeichnis:

- [1] E. Jenny: Berechnungen und Modellversuche über Druckwellen grosser Amplitude in Auspuffleitungen. Dissertation bei Prof. Dr. G. Eichelberg an der E. T. H. 1949.
- [2] M. R. Bidard: La Stabilité de Régime des Compresseurs «Association Technique Maritime et Aéronautique», Juin 1946. Le Pompage des Compresseurs, Résultats d'Essais «Association Technique Maritime et Aéronautique», Session 1950.
- [3] R. Dziallas: Untersuchungen an einer Kreiselpumpe mit labiler Kennlinie. VDI-Verlag, Berlin 1940.
- [4] A. S. M. E.: Symposium on Compressor Stall, Surge and System Response. Houston, Texas, March 6–9, 1960.
- [5] H. W. Emmons, C. E. Pearson, H. P. Grant: Compressor Surge and Stall Propagation. «Trans. of the ASME», Vol. 77, May 1955, Nr. 4, S. 455–469.

Experimentelle Gaswechsel-Untersuchungen an einem schnellaufenden Zweitakt-Motor

Von B. Bolli, Obering. bei der AG Adolph Saurer, Arbon

DK 621.436.13:621.43.052

1. Einleitung

Seit den ersten Anfängen vor bald vierzig Jahren hat der schnellaufende Dieselmotor bezüglich Anpassung an die Eigenheiten des Fahrzeugantriebs durch intensive Forschungsarbeiten in allen Industrieländern eine rasche aber stetige Weiterentwicklung erfahren. Auch in der Schweiz wurde auf diesem Gebiete sehr viel Pionierarbeit geleistet. Schon im frühen Entwicklungsstadium hat diese sparsame und für den Fahrzeugbetrieb besonders gut geeignete Maschine bei schwereren Nutzfahrzeugen Eingang gefunden; seit vielen Jahren ist sie nun zum fast ausschliesslichen Antriebsaggregat dieser Fahrzeuge geworden. Im Laufe der Entwicklung hat das fortwährend gesteigerte Bedürfnis nach höheren Fahrleistungen — diese sind ja heute bereits Gegenstand gesetzlicher Vorschriften geworden — zu immer grösseren im Fahrzeug einzubauenden Motorleistungen geführt. Bei diesem Vorgang der Leistungssteigerung musste danach getrachtet werden, die verlangte grössere Leistung ohne wesentliche Vergrösserung des Bauraumes und des Baugewichtes des Motors zu erreichen, um den Nutzraum des Fahrzeuges und die diesem zustehende Nutzlast wenn möglich nicht oder in nur geringem Masse zu beeinträchtigen, auf dass mit der erhöhten Motorleistung die Transportfähigkeit und die Fahreigenschaften eine möglichst grosse Verbesserung erfahren können.

Die verlangte Leistungserhöhung wurde beim Viertaktmotor wenn möglich ohne wesentliche Vergrösserung des Hubraumes angestrebt, und zwar durch Aufladung und Drehzahlsteigerung. Für die Aufladung kommen Abgasturbolader oder mechanisch angetriebene Ladegebläse in Frage; die Drehzahlsteigerung führte neuerdings zwecks Beschränkung der Kolbengeschwindigkeit zur Verringerung des Hub/Bohrungsverhältnisses, also zur Kurzhubigkeit. Mit diesen Massnahmen gelingt es, mit dem Viertaktmotor für das normale Strassenfahrzeug die gesteigerten Leistungsanforderungen ohne wesentliche Vergrösserung des Einbauraumes für das

Antriebsaggregat und mit nur geringfügiger Erhöhung des Baugewichtes zu befriedigen. Für noch weiteren Leistungsbedarf zeigen sich am Horizonte auch schon Anzeichen für eine Anwendung der Ladeluftkühlung beim Viertakt-Auflademotor auch im Strassenfahrzeug, eine Massnahme, die allerdings zur Unterbringung des Luftkühlers eine gewisse Vergrösserung des Einbauraumes verlangt. An dieser Stelle sei auch an die von der Aktiengesellschaft Adolph Saurer gewählte Lösung mit Aufladung ihrer Viertakt-Motoren durch ein vom Motor angetriebenes Schraubenradgebläse, welches mit sehr hohem Wirkungsgrad arbeitet, erinnert¹⁾. Mit dieser Anordnung lassen sich die Anforderungen, die insbesondere das schweizerische Strassenetz an die Fahrcharakteristik der schweren Lastfahrzeuge, Omnibusse und Reisecars stellt, in besonders vorteilhafter Weise erfüllen.

In der Voraussicht, dass einmal Sonderfälle sich einstellen können, bei denen der Einbauraum und das Baugewicht des Antriebsaggregates auf Werte beschränkt sind, die mit Viertakt-Motoren auch mit den oben angedeuteten Mitteln nicht mehr erfüllt werden können (denken wir z. B. an Anwendungen in Militärfahrzeugen, Panzern usw.) hat die Aktiengesellschaft Adolph Saurer für sich und ihre Lizenznehmer schon vor längerer Zeit in ihrer Forschungsabteilung Entwicklungsarbeiten an Motoren aufgenommen, die nach dem Zweitakt-Verfahren arbeiten. Man wollte damit Motoren mit möglichst grosser «Leistungsballung» schaffen, also Hochleistungs-Zweitakt-Motoren, die pro Leistungseinheit einen minimalen Bauraum beanspruchen. Schon vor einigen Jahren wiesen mehrere Prototypmotoren im praktischen Einsatz ihre Bewährung nach, und es konnten noch einige offene Fragen abgeklärt werden, so dass die grundsätzliche Entwicklung als abgeschlossen bezeichnet werden durfte.

¹⁾ SBZ 1957, Heft 24, S. 381/385

Während der langjährigen Entwicklungsarbeit waren eine grosse Zahl von interessanten, aber nicht immer leichten Problemen zu lösen, die alle näher zu schildern zu weit führen würde. Da sich Prof. Dr. G. Eichelberg im Rahmen häufiger Diskussionstage in Arbon immer rege für diese Zweitakt-Entwicklung interessiert und bei der Ueberwindung auftretender Schwierigkeiten seine wertvolle Hilfe zur Verfügung gestellt hat, möchten wir bei Anlass seines 70. Geburtstages in dankbarem Gedenken an interessante Stunden gemeinsamen Planens und Forschens aus dem dicken Buch dieser Entwicklungsgeschichte wenigstens ein Problem herausgreifen, das stets Gegenstand reger Diskussionen war, nämlich das *Problem der Spülung beim Zweitaktmotor*. Diesem wurde während der Entwicklung durch *experimentelle Gaswechseluntersuchungen* ganz besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Auch dieses Einzelproblem ist sehr komplex und kann im Rahmen dieses Aufsatzes nur mit einigen Streiflichtern beleuchtet werden, um wenigstens einen Einblick in die angewandten Untersuchungsmethoden und deren Ergebnisse zu vermitteln.

2. Wahl des Steuerungs- und Spülsystems

Nach eingehenden Untersuchungen und Ueberlegungen über das für einen möglichst einfachen, leistungsfähigen, dem aufgeladenen Viertakt-Motor bezüglich Hubraumleistung, Bauraum und Baugewicht überlegenen Zweitaktmotor zu wählende Steuerungs- und Spülsystem wurde der ventillosen Bauart, mit vom Kolben gesteuerten Ein- und Auslass-Oeffnungen der Vorzug gegeben. Dabei wurden grosse Hoffnungen auf die Entwicklungsmöglichkeit einer für diese Bauart geeigneten, möglichst wirksamen Spülform gesetzt. Da die Konzeption auf einen schnellaufenden Motor mit einer Betriebsdrehzahl von 2000 bis 2200 U/min und mit 110 bis 120 mm Bohrung ausgerichtet war, also auf eine Maschine mit einer recht hohen Spülzahl $D \times n$ von 240 bis 264, zeigte sich die Notwendigkeit, einen möglichst grossen Teil des Zylinderumfangs für die Anbringung von Steueröffnungen auszunutzen. Mit der als sehr wirksam bekannten Umkehrspülung konnte der erforderliche Zeitquerschnitt nicht erreicht werden, und es musste die den Auslass-Schlitzen gegenüberliegende Zylinderwand auch noch für die Anbringung von Einlassöffnungen benutzt werden. Als Spülform wurde also eine Kombination von Quer- und Umkehrspülung gewählt und, wie gezeigt werden wird, zum Gegenstand sehr eingehender und umfangreicher Entwicklungsarbeiten gemacht. Da aber eine solche Maschine mit ihrem symmetrischen Steuerdiagramm nur bescheidene Mitteldrücke von kaum mehr als 4,5 bis 5 at ergibt, wurde aus den verschiedenen Möglichkeiten zur Erzielung einer asymmetrischen Steuerung die Lösung mit im Auslasskanal angeordnetem Steuerorgan gewählt. Mit einer solchen Aus-

lassteuerung gelingt es, im Zylinder ein wesentlich grösseres Frischluftgewicht zurückzuhalten, als ohne sie. Da der Abschluss des Auslasses vor dem Schliessen des Einlasses erfolgt, kann der Zylinderraum noch mit Frischluft nachgeladen werden. Als Abschlussorgan hat sich die Drehklappe als besonders geeignet erwiesen.

Die gewählte Steueranordnung ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Es sei noch auf einige Möglichkeiten dieses Steuerungssystems hingewiesen. Wie in Bild 1 unten angedeutet, können durch Verändern der Schliessphase der kontinuierlich sich mit halber Motordrehzahl drehenden Klappe der Zeitquerschnitt der Spülschlitze und damit der Spülluftdurchsatz sowie in Verbindung mit der Charakteristik des Spülgebläses der Ladedruck verändert und für gewünschte Verhältnisse auf ein Optimum eingestellt werden. Da die Drehklappe zu ihrem Antrieb nur eine ganz geringfügige Leistung aufnimmt, kann bei Bedarf auch eine automatische Verstellung der Schliessphase verwirklicht werden, so z. B. eine Verstellung in Abhängigkeit der Motordrehzahl zur Erzielung eines günstigen Drehmomentverlaufes, oder eine Verstellung in Abhängigkeit der Motorbelastung, womit bei Teillast der Motor geöffnet, der Ladedruck gesenkt und an Antriebsleistung für das Gebläse gespart werden kann, was sich im Brennstoff-Verbrauch der Maschine bei Teillast günstig bemerkbar macht. Es liess sich auch eine Kombination beider Steuereingriffe verwirklichen.

Durch Aufnahme von Schwachfederdiagrammen wurde an einem Einzylinder-Versuchsmotor der Druckverlauf im Spülluftbehälter, im Zylinder und im Raum zwischen Zylinder und Drehklappe untersucht. Als Beispiel sind in Bild 2 diese Druckverläufe für einen Betriebspunkt ($p_e = 5,4$ at, 1800 U/min) wiedergegeben. Die günstige Auswirkung der Auslass-Steuerung auf das im Zylinder zurückgehaltene Frischluftgewicht ist bei Betrachtung des erzielten Druckverlaufs im Zylinder deutlich ersichtlich. Da die Drehklappe in diesem Falle bei einem Kurbelwinkel (KW) von 40° nach UTP schliesst, wird bis zum Schliessen der Einlassschlitze durch den Kolben (bei 57° KW nach UTP), im Zylinder fast der im Spülluftreceiver herrschende Druck erreicht; beim Abschluss der Auslass-Schlitze, bei 70° KW nach UTP, liegt der Zylinderdruck wegen der Vorkompression bereits mehr als 0,1 at. über dem Spüldruck (Punkt A). Ist keine Drehklappe vorhanden, so liegt bei Auslass-Schluss der Druck im Zylinder wesentlich tiefer als der Spüldruck (Punkt B). Der tiefe Zylinderdruck wird durch den Luftverlust verursacht, der sich nach Schliessen der Einlassöffnungen durch Ausströmen von Luft durch die noch offen stehenden Auslass-Schlitze einstellt. Bei dem gezeigten Beispiel wird mit Drehklappensteuerung des Auslasses im Zylinder ein Frischluftgewicht eingeschlossen, das etwa um

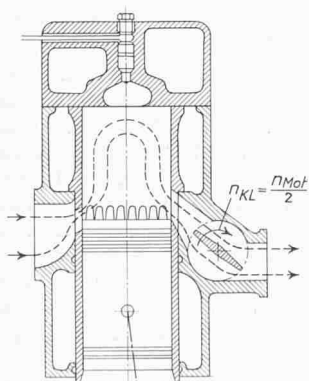


Bild 1 (links). Schematischer Querschnitt durch den Saurer-Zweitakt-Fahrzeug-Dieselmotor mit Quer-Umkehrspülung und Drehklappe im Auslasskanal f. Nachladung

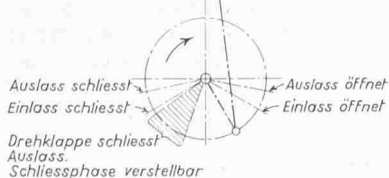
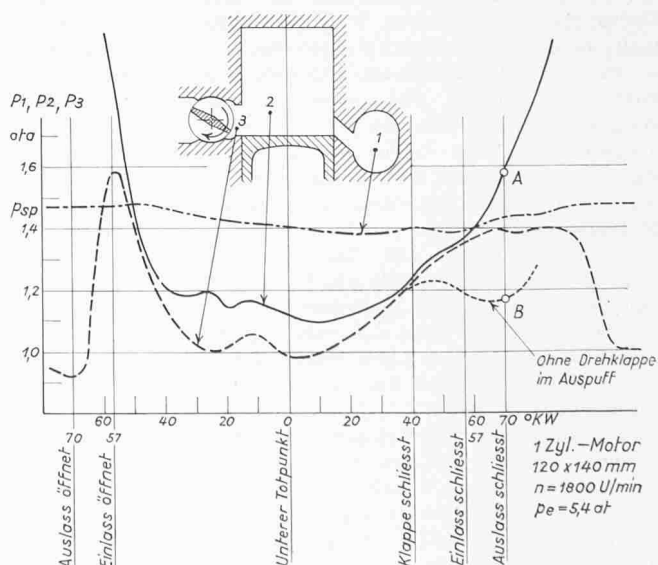


Bild 2 (rechts). Druckverlauf in Funktion des Kurbelwinkels im Spülluft-Behälter 1, im Zylinder 2, und im Auslasskanal vor der Klappe 3, aufgenommen an einem einzylindrigen Versuchsmotor



35 % grösser ist als dasjenige ohne diese Einrichtung. Da erfahrungsgemäss bei einer Maschine mit symmetrischem Steuerdiagramm ein effektiver Mitteldruck von 4,5 bis 5 at erreicht werden kann, bedeutet dies, dass mit dieser einfachen Steuereinrichtung ein solcher Druck von 6,1 bis 6,8 at erzielbar sein sollte. Wie weiter unten noch gezeigt werden kann, haben sich diese Erwartungen mehr als erfüllt, konnten doch an Mehrzylinder-Prototypmotoren an der Rauchgrenze mittlere effektive Drücke von etwa 7 at (bei 2000 U/min) bis 7,5 at (bei 1200 bis 1400 U/min) erzielt werden. Diese ausgezeichneten Ergebnisse sind zum Teil auf die Verwendung eines Spülgebläses mit sehr gutem Wirkungsgrad (Saurer Schraubenradgebläse) zurückzuführen, zur Hauptsache äussert sich aber darin die Sorgfalt, die auf die Erzielung eines bestmöglichen Spülerfolges angewendet wurde. Damit darf wohl festgestellt werden, dass die Wahl eines ventillosen Steuerungssystems richtig war, liegen doch die erzielten Mitteldrücke etwa bei den Werten, die mit Längsspülung und mit Auslassventilen im Zylinderkopf erreicht werden. Motoren dieser Bauart sind aber baulich wesentlich aufwendiger, bezüglich Bauraum (Bauhöhe) ungünstiger und bieten bezüglich Anordnung des Brennraumes wesentlich weniger Freiheit. Wie angedeutet, ist der erzielte Erfolg auf das gewählte Steuerungssystem, auf das gute Spülgebläse und zu einem guten Teil aber auch auf eine sorgfältige Entwicklung der Spülanordnung zurückzuführen. Diesem interessanten Teil-Problem der Zweitakt-Entwicklung wurde mit viel Geduld und Beharrlichkeit zu Leibe gerückt; der hiezu erforderliche messtechnische Aufwand war natürlich recht gross; rückblickend haben sich aber die Anstrengungen und Aufwendungen unbedingt gelohnt. Die nachstehenden Ausführungen sollen einige Einblicke in die angewandten Untersuchungsmethoden und in die erzielten Ergebnisse vermitteln.

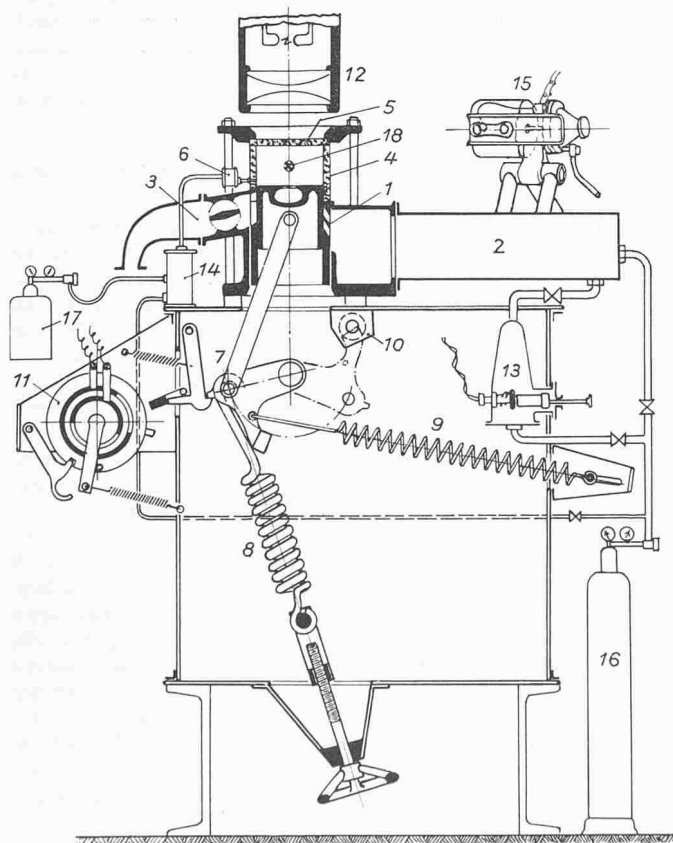


Bild 3. Abschussmodell zur Untersuchung der Spülströmung in Zweitakt-Zylindern

1 Zylinderbüchse mit Spülanordnung, 2 Spülbehälter, 3 Auspuff, möglicherweise mit Drehklappe, 4 Plexiglaszylinder, 5 Plexiglasdeckel, 6 Regulier-Schnellventil, 7 Kubeltrieb, 8 1200 kg-Feder, 9 30 kg-Feder, 10 Bremse, 11 Steuerscheibe, 12 Funkenstrecke, 13 Rauch, 14 Azetylen-Luft-Mischer, 15 Stereotrommelkamera, 16 Druckluft, 17 Azetylen, 18 Zündkerze

3. Untersuchungsmethoden zur Beobachtung der Spülströmung in einer Modell-Apparatur

Auf der Suche nach der besten Methode zur Untersuchung der Spülströmungen in Zweitakt-Zylindermodellen wurden eine ganze Reihe von Möglichkeiten ausprobiert und auf deren Eignung bezüglich Koordination mit den Motorergebnissen geprüft. Es würde zu weit führen, hier im einzelnen auf den Werdegang der Untersuchungsmethoden einzugehen. Vom statisch mit Luftdurchblasung betriebenen Glaszylinder führte der Weg zu einem flachen Modell mit von einem Kolben gesteuerten Schlitzen, an den mit Metaldehydflocken zur Sichtbarmachung verschiedene grundsätzliche Fragen studiert werden konnten, so z. B. der Einfluss des Verhältnisses zwischen Durchmesser und Länge der Spülöffnung, oder die für Hochrichtung der Strömung erforderliche Neigung der Spülöffnungen gegenüber der Zylinderaxe, oder die Richtwirkung der Kolbenkante beim Uebersteuern der Öffnungen und der Einfluss von Abrundungen an der oberen Schlitzkante. In einer dritten Stufe der Entwicklung wurde ein kontinuierlich laufendes dynamisches Spülmodell mit von einem Rastgetriebe betätigten Kolben gebaut mit stroboskopisch beleuchteten Schichtebenen im Modell-Zylinder und mit Metaldehydflocken durchsetzter Spülluft. Da die mit dieser Einrichtung gewonnenen photographischen Aufnahmen nur unklar und der Deutung schlecht zugänglich waren, wurde auch diese Methode bald verlassen.

In einer vierten und letzten Stufe wurde schliesslich eine Apparatur gebaut, mit welcher ein *einmaliger* Spülvorgang mit Hilfe einer Funkenzeitlupe photographisch in einem Reihenbild festgehalten werden kann, dies unter Bedingungen, die mit grosser Annäherung mit denen am Motor übereinstimmen. Es handelt sich um das sog. *Abschuss-Modell*. Mit dieser Einrichtung gelang es, nach entsprechender Entwicklung der Sichtbarmachungs- und Aufnahmetechnik wirklich aufschlussreiche Reihenbilder von Spülvorgängen zu gewinnen und die optimalen Schlitzanordnungen zu finden, die dann auch am Motor die besten Verhältnisse ergaben. Der schematische Aufbau dieser Apparatur geht aus Bild 3 hervor. In Verbindung mit der dort gegebenen Legende sei die Funktion dieser Einrichtung kurz beschrieben. Angetrieben von zwei Federn führt der die Auslass- und Einlassöffnungen steuernde Kolben eine einmalige Steuerbewegung aus. Durch Wahl der Federanspannungen und des Hebelverhältnisses kann das Kolbenweg-Zeit-Diagramm im Bereich des Steuerweges für die beabsichtigte Drehzahl genau den Verhältnissen am Motor angeglichen werden. Aufnahmen von Weg-Zeit-Diagrammen auf einem Kathodenstrahloszillographen dienen der Kontrolle der richtigen Einstellung des Mechanismus. Vor der Aufnahme wird der Kolben mit den Antriebsorganen in der oberen Totlage, die etwas über dem Vorauslass-Beginn gelegen ist, durch eine Verriegelung festgehalten, die mit einer Steuerscheibe verbunden ist. Nach Durchlaufen der Steuerbewegung werden Kolben und Antriebssteile in der Nähe der oberen Steuerlage durch eine Bremse abgefangen und wieder blockiert. Nach dem «Abschuss», d. h. nach der Auslösung der Verriegelung durch die Steuerscheibe vollführt also der Kolben eine einmalige Steuerbewegung. Dabei öffnet er zunächst die Auslass-Schlitze des Modellzylinders, durchläuft den Vorauslasshub, öffnet die Einlass-Schlitze, durchläuft den unteren Totpunkt, schliesst die Einlass-Schlitze wieder und kommt nach Abschluss der Auslassöffnungen in der Bremse zum Stillstand. Zu Beginn dieses Vorganges wird der Hochspannungsschalter der Funkenzeitlupe, der von einem Zeitrelais gesteuert wird, geschlossen, womit die Funkenserie, die diese liefert, zum Ablauf kommt. Diese Funkenserie besteht aus 15 bis 20 Hochspannungsfunken, die sich je nach Einstellung des Schwingkreises mit einer Frequenz von 1000 bis 3000 Hertz folgen. Gleichzeitig öffnet sich automatisch die Blende der vorher durch eine kleine Luftturbine in Drehung versetzten Stereo-Trommelkamera (3000 bis 6000 U/min), so dass auf den beiden in der Kamera befindlichen Filmstreifen je ein Reihenbild entsteht. Die Stereo-Aufnahmen erleichtern beträchtlich die visuelle Aus-

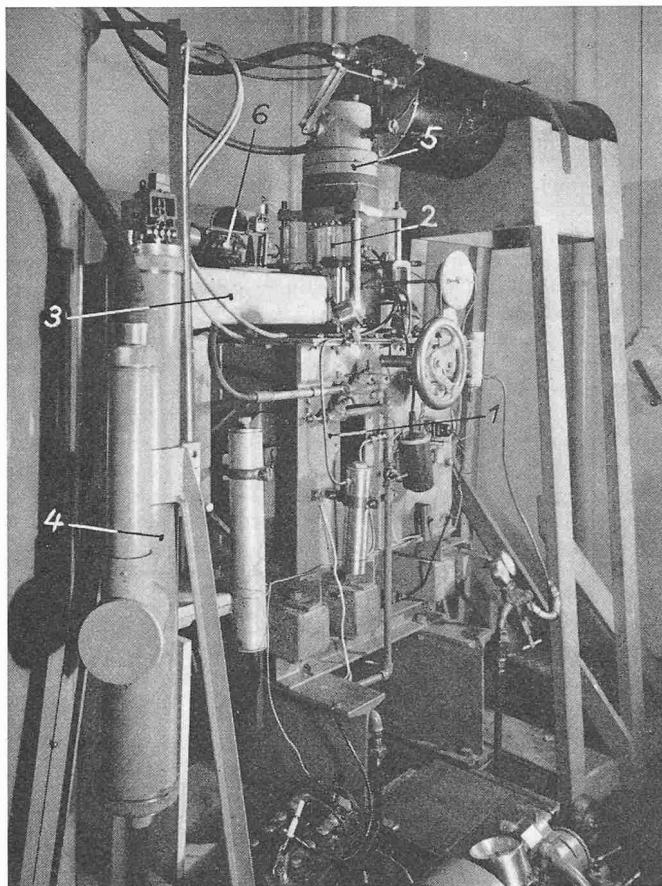


Bild 4. Ansicht des Abschussmodells. 1 Abschuss-Einrichtung, 2 Plexiglaszylinder, 3 Spülluft-Behälter, 4 Funken-Erzeugungsvorrichtung, 5 Funken-Strecke, 6 Stereoskop-Trommelkamera

wertung der räumlichen Spülströmung. Die Beleuchtung des Plexiglaszylinders, der auf die zu untersuchende Steuerbüchse gestellt ist, erfolgt axial von oben, die photographische Aufnahme quer zur Zylinderaxe und zur Spülströmung. Zur Reproduktion des Vorauslasses, der für den Einsatz und die Ausbildung der Spülströmung von grosser Wichtigkeit ist, wird der Zylinder bei hochgestelltem Kolben vor dem Abschuss mit Druckluft von 3,5 bis 6 at gefüllt. Der Ueberdruck im Zylinder ergibt eine zusätzliche Antriebskraft für den Kolben, die bei der Einstellung der Federspannung auf eine gewünschte Drehzahl zu berücksichtigen ist. Bild 4 zeigt eine Ansicht der ganzen Versuchsanlage.

Die Sichtbarmachung des Spülvorganges und die Versuchsmethode haben im Laufe der Zeit und im Zusammenhang mit der Koordinierung der Modell-Ergebnisse mit denen am Motor eine interessante Entwicklung durchgemacht. Nach anfänglichen unbefriedigenden Versuchen mit Metaldehydflocken wurde eine Sichtbarmachung durch Zigarrenrauch eingeführt; dieser ist ganz trägheitslos und photographisch gut erfassbar. Bei den Untersuchungen gelangten zwei Methoden zur Sichtbarmachung der Spülströmung zur Anwendung, von denen schliesslich die zweite fast ausschliesslich benutzt wurde, weil sie die Motorverhältnisse mit grösster Annäherung wiedergibt. Bei der ersten Methode, der *indirekten Sichtbarmachung*, wird der in den Zylinder eingefüllten Druckluft Rauch beigemischt und die im Receiver vorgelagerte Spülluft wird rein belassen. Beim Abschuss verdrängt die reine Spülluft den mit Rauch gefärbten Zylinderinhalt. So eindrücklich die nach dieser Methode aufgenommenen Reihenbilder auf den Beschauer wirkten, so wenig waren damit die Bezüge mit den Motorverhältnissen gewahrt. Eine richtige Beurteilung einer Schlitzanordnung war damit nicht möglich, indem häufig Zylinderbüchsen, die sich am Modell als sehr gut erwiesen, sich am Motor als richtige Versager entpuppten. Weder

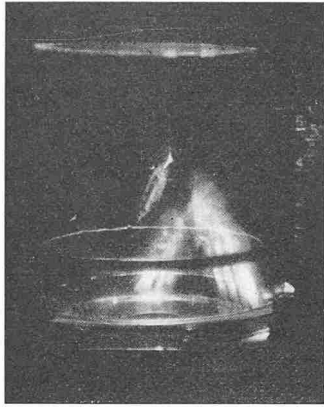
die Spülströmung, noch der Spülerfolg, der auf Grund der Reinheit des Zylinderinhaltes nach der Spülung zum Ausdruck kam, erlaubten eindeutige Rückschlüsse. Diese zuerst am Abschussmodell angewandte Methode ergab deshalb keine richtigen Ergebnisse, weil bei ihr der Zustand der Zylinderladung bei Auslassbeginn vom Zustand, der zum betreffenden Zeitpunkt im Motorzylinder herrscht, zu stark abwich. Die *kalte* Zylinderladung hat ein mehrfaches Gewicht des bei Auslassbeginn im Motor vorhandenen heissen Gasinhaltes.

Es hat sich bei diesen Versuchen deutlich gezeigt, dass zur Erzielung einwandfreier Resultate am Modell eine möglichst vollständige Angleichung des Zustandes der Zylinderladung vor Auslassbeginn an die Verhältnisse im Motor erforderlich ist. Es wurde deshalb anschliessend mit *heisser* Zylinderfüllung gearbeitet. Druck und Temperatur der Zylinderladung wurden durch die Verbrennung eines Azetylen-Luftgemisches auf die im Motor bei Vorauslass herrschenden Werte gebracht. Die Wahl ist deshalb auf dieses Brenngas gefallen, weil seine Zündfähigkeit sich auf einen sehr weiten Mischungsbereich erstreckt ($\lambda_v = 1,5$ bis 80 Vol. % Gas in Luft). Diese Eigenschaft hat die richtige Dosierung der Ladung auf die nach der Verbrennung gewünschten Druck- und Temperaturverhältnisse wesentlich erleichtert. Die Zündung erfolgte mit einer im Plexiglaszylinder eingebauten Zündkerze unmittelbar vor Auslösung des «Abschusses». Versuche, das «heisse» Verfahren bei der Methode der indirekten Sichtbarmachung anzuwenden, scheiterten an dem Umstand, dass bei Durchsetzung der Ladung mit Rauch, abgesehen von Zündungsschwierigkeiten, ein Abbrand der Rauchpartikel während der Verbrennung des Azetylen-Luft-Gemisches sich bemerkbar machte, was zu einer zu günstigen Beurteilung des Spülerfolges führte. Veranlasst durch diese Erfahrungen wurde in der Folge von einer weiteren Anwendung der indirekten Sichtbarmachung Abstand genommen und durch Uebergang zur direkten Sichtbarmachung am Modell nur noch die Ausbildung der Spülströmung studiert, während der Spülerfolg mit einer andern Untersuchungsmethode unmittelbar an einem hierfür hergerichteten Einzylindermotor bestimmt wurde, worüber weiter unten noch berichtet werden soll.

4. Untersuchungsmethode für die direkte Sichtbarmachung der Spülströmung

Bei dieser Methode wird nicht dem Zylinderinhalt, sondern dem im Receiver vorgelagerten Spülluftvorrat Rauch zugemischt; zur bessern Beobachtung der Spülströmung war es erforderlich, den Receiver in zwei Kammern zu unterteilen, die in der Aufnahmerichtung gesehen je eine Zylinderhälfte mit Spülluft beschickten; damit kann nur eine, mit Vorteil die der Aufnahmekamera zugekehrte Zylinderhälfte, mit rauchgefärbter Spülluft beaufschlagt werden, während der anderen Zylinderhälfte reine Spülluft zuströmt. In den Zylinder wird Druckluft ohne Rauch, aber mit Azetylenzusatz eingefüllt, um wie bei der vorhergehenden Methode eine *heisse* Zylinderladung zu erzeugen. Vordruck und Gemischzusammensetzung werden so dosiert, dass bei Auslassbeginn im Zylinder ein Vordruck von 5 bis 6 at und eine Temperatur von 600 bis 800° C herrschen. Ladungsgewicht und Ladungsdichte entsprechen dann etwa den Verhältnissen bei Auslassbeginn im Motor. Da die Temperaturspitze nur ganz kurzzeitig vorhanden ist, besteht für den Plexiglaszylinder und damit für den Betrachter keine direkte Gefahr. Mit der Zeit zeigten sich an der Innenfläche des Plexiglaszylinders leichte poröse Anfresungen, die aber mühelos wieder herauspoliert werden konnten. Erst nach einigen hundert Abschüssen war ein Ersatz des Zylinders erforderlich.

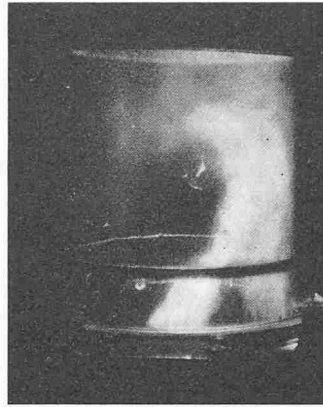
Meistens wurde mit einer Kolbenweg-Zeitkurve gearbeitet, die einer Motordrehzahl von 1500 U/min entspricht. In diesem Falle wickelt sich der ganze Spülvorgang in etwa $\frac{1}{75}$ Sekunden ab. Bei der direkten Sichtbarmachung hat man in der Regel nur die erste Hälfte des Spülvorganges aufgenommen, weil für den Spülverlauf der Spüleintritt, die erste Ausbildungs-Phase der Spülfront und deren Fortschreiten entscheidend sind; entsprechend der Anzahl



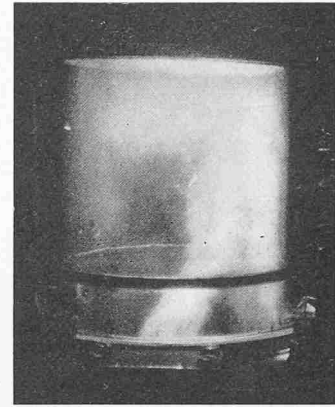
rd. 55° vor unt. Totpunkt



rd. 44°

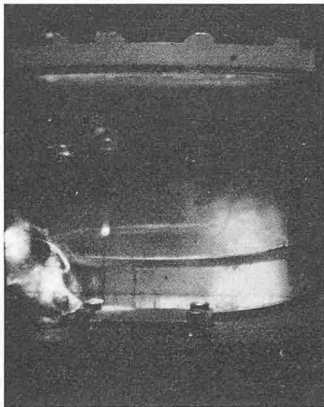


rd. 40°

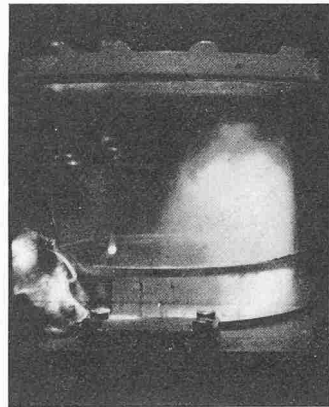


rd. 30°

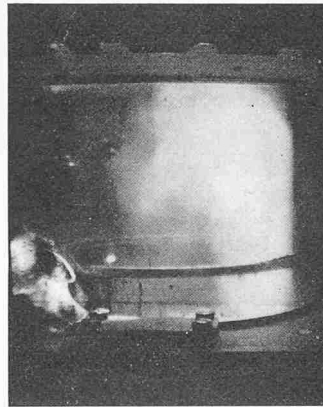
Bild 5. Einzelbilder aus einem Filmstreifen, der am Abschussmodell mit der Büchse X (Bild 8) aufgenommen wurde. Motordrehzahl 1500 U/min, Kameradrehzahl 6000 U/min, Bildfrequenz 1600 Bilder/Sek., Spüldruck 0,4 atü, Zylinder: C_2H_2 -Vorverbrennung, Vordruck 6 atü, die Spülluft ist rauchdurchsetzt



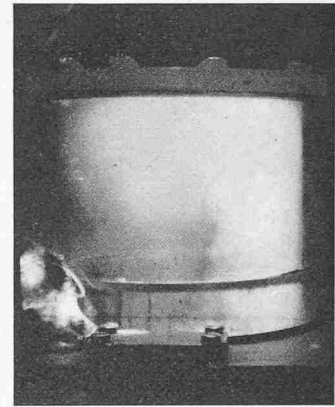
rd. 53° vor unt. Totpunkt



rd. 46°



rd. 40°



rd. 34°

Bild 6. Wie Bild 5, jedoch mit Büchse Y (Bild 8). Motordrehzahl 1100 U/min, Kameradrehzahl 4000 U/min, Bildfrequenz 1600 Bilder/Sek., Spüldruck 0,4 atü, Zylinder: C_2H_2 -Vorverbrennung, Vordruck 3,5 atü, die Spülluft ist rauchdurchsetzt

der von der Zeitlupe gelieferten Funkenserie konnten so 14 bis 16 Bilder der ersten Hälfte des Spülvorganges auf dem Filmstreifen festgehalten werden und zwar während einem Zeitintervall von nur $\frac{1}{150}$ Sekunde. Die Drehzahl der Trommelkamera betrug 6000 U/min, die Zeitlupe wurde auf eine Frequenz von 1600 Bildern pro Sekunde eingestellt. Dank der sehr kurzen Belichtungszeit durch Funken (etwa 1 Millionstel Sekunde) und deren Leuchtstärke konnten sehr scharfe und kontrastreiche Reihenbilder erzielt werden, die es erlaubten, die Auswirkungen verschiedener Modifikationen bezüglich Richtung, Grösse und Anordnung der Spüloffnungen zu verfolgen und deren gegenseitige Beeinflussung zu beobachten. Ohne Zweifel haben diese Bilder bei der Konzeption und Ausfeilung der Spülanordnung grosse Dienste geleistet. Im Laufe der Entwicklung sind gegen tausend Filmstreifen aufgenommen worden.

5. Einige Beispiele von Spülaufnahmen

Zur Veranschaulichung seien einige Spülbilder wiedergegeben. Es handelt sich um Aufnahmen, die nach der letzten Methode, also mit direkter Sichtbarmachung und mit Verbrennung von C_2H_2 gewonnen wurden. Aus zwei Filmstreifen sind je vier markante Bilder herausgegriffen worden, die über den Spüleintritt, die Ausbildung der Spülf front und deren Fortschreiten Aufschluss geben. Die Bilderserie in Bild 5 stammt von einer Büchse, die am Motor über dem ganzen Drehzahlbereich sehr gute Leistungswerte ergeben hat; es ist die selbe Büchse, die bei den weiter unten noch behandelten Untersuchungen über den Spülerfolg am Motor die dort gezeigten ausgezeichneten Reinheitswerte lieferte. Die Aufnahmedaten sind in der Legende angegeben. Die gewählte Spülform, eine Kombination zwischen Querspülung und Umkehrspülung, kommt in diesen Bildern sehr gut

zum Ausdruck. Es ist auffallend, wie wirksam die Spülluftstrahlen der Umkehrkomponente die Spülluftstrahlen der Querkomponente bei der Hochrichtung und der Erzeugung einer scharf begrenzten Spülf front unterstützen, die eine günstige Verdrängungsspülung sicherstellt, fast ohne Vermischungszone auf der rechten Zylinderseite bis zum Zylinderdeckel hochsteigt und dort umgelenkt der linken Zylinderwand entlang nach unten den Auslass-Schlitz zu strebt. Bei der in Bild 5 gezeigten Anordnung ist der Umkehrspülung der Vorrang gegeben; es sind ihr rund 67 % des ganzen Einlassquerschnittes zugewiesen. Wie weiter unten gezeigt wird, wurde mit dieser Büchsenausführung, die dort mit X bezeichnet ist, ein sehr guter Reinheitsgrad erzielt, der über dem ganzen Drehzahlbereich des Motors, von 1000 bis 2000 U/min auf seinem hohen Wert erhalten bleibt.

Als zweites Beispiel zeigt Bild 6 eine Reihe von Spülbildern, die aus einer Büchsenausführung gewonnen wurden, bei welcher der Einlassquerschnitt zu Gunsten der Querspülungskomponente aufgeteilt wurde; der Umkehrspülung sind nur etwa 40 % des Querschnittes zugewiesen. Bei dieser Anordnung zeigt sich deutlich das Ueberwiegen der Querkomponente; der aufsteigende Luftstrom ist breiter, hat aber nicht mehr die scharfe Kontur, wie beim ersten Beispiel. Die Ränder der Spülf front sind eher diffus und deuten in diesen Partien auf teilweise Vermischung hin. Obschon die Spülluft vom dritten Bild an den Zylinderdeckel erreicht und von diesem umgelenkt wird, also die Hochspülung sichergestellt ist, zeigt im zweiten und dritten Bild ein Teil der Spülf front eine leichte Tendenz zum diagonalen Abströmen direkt auf die links liegenden Auslass-Schlitze zu. Im vierten Bild hat sich die Spülung wieder einigermaßen von dieser separatistischen Tendenz erholt.

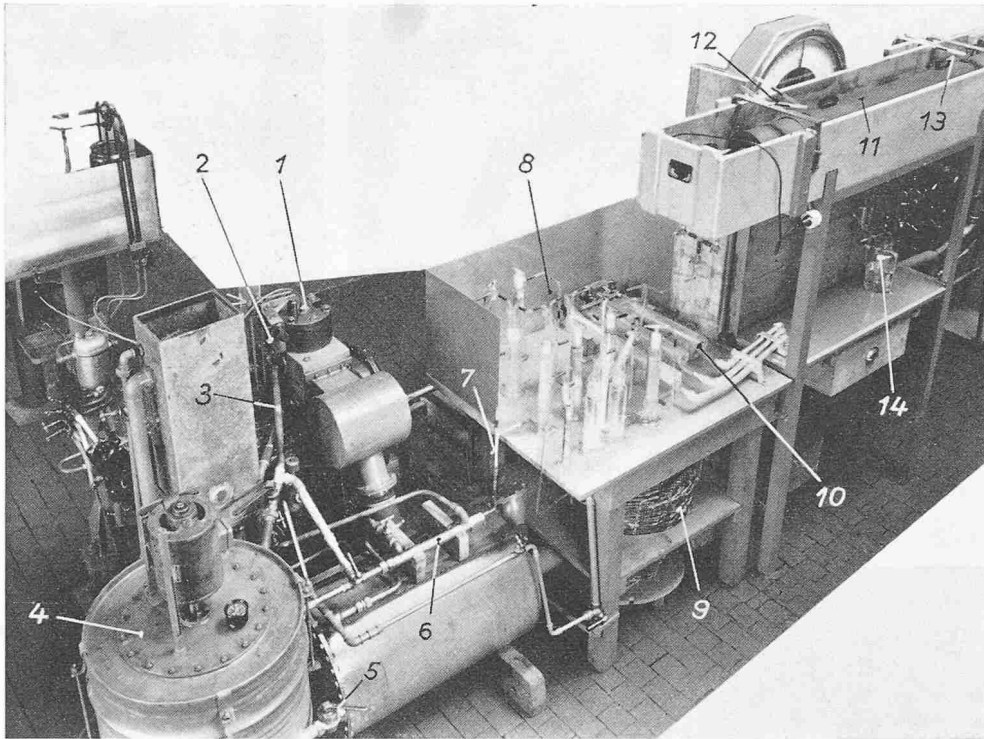


Bild 7. Versuchsanlage zur Messung der Spüleinheit am Einzylinder

- 1 Zylinderkopf mit Entnahmeventilen
- 2 Stosstangen zur Betätigung der Entnahmeventile
- 3 Entnahme-Gasleitung z. Mischer
- 4 Misch-Kübel mit Rührwerk
- 5 Überlauf-Hahn zur Auspuffleitung
- 6 Gas-Kühler
- 7 Temperatur-Messung
- 8 Glas-Apparatur zur Filtrierung, Trocknung, CO_2 -Absorption
- 9 Luftflasche
- 10 Temperierkühler
- 11 Interferometer
- 12 Gas-Zuführung z. Interferometer
- 13 Gas-Wegführung vom Interferometer
- 14 Regulier-Einrichtung für Gasmenge

Am Motor hat diese Spülanordnung nicht jene guten Werte ergeben, wie diejenige des ersten Beispiels. Insbesondere war eine gewisse Drehzahlempfindlichkeit festzustellen. Weiter unten beschriebene Spülerfolgsmessungen am Motor wurden auch mit dieser Büchse durchgeführt (dort mit Büchse Y bezeichnet); der Reinheitsgrad α fällt im unteren und oberen Drehzahlbereich deutlich ab, zeigt also nicht die Konstanz, wie sie beim ersten Beispiel vorhanden ist.

Bei den gezeigten Spülaufnahmen wurden Modellbüchsen verwendet, bei denen die Einlassöffnungen aus Löchern von verhältnismässig kleinem Durchmesser bestanden, die in mehreren Lagen gebohrt waren (sog. Siebspülung). Wegen der Verschmutzungsgefahr erfolgte die Weiterentwicklung in Richtung einer Zusammenlegung einzelner Lochgruppen in grössere, in die Büchse gefräste Schlitzte. Die als notwendig erkannte Führungslänge wurde durch entsprechende Verdickung der Wandpartie erreicht. Spülaufnahmen mit solchen Büchsen am Modell zeigten, dass bei analoger Richtungsgebung und richtiger Aufteilung des Einlassquerschnitt-

tes auf die Quer- und Umkehrkomponente eine ebenso wirksame und stabile Spülströmung erreicht werden konnte, wie sie beim guten Beispiel von Bild 5 erzielt wurde. Auch am Motor war mit diesen Schlitzbüchsen kein Rückschritt zu verzeichnen, es wurde aber mit diesen die Verschmutzungsgefahr wesentlich verringert.

6. Messung des Spülerfolges

Wie mitgeteilt, liessen sich am Abschuss-Modell mit der «heissen» Methode der direkten Sichtbarmachung wohl aufschlussreiche Aufnahmen der Spülströmung erzielen und die beste Schlitzanordnung herausfinden, quantitative Angaben über den Spülerfolg, über den erzielten Reinheitsgrad, konnten aber damit nicht gewonnen werden. Wohl gaben die Motorresultate Auskunft über die verhältnismässige Güte einer Spülanordnung gegenüber einer andern, absolute Werte des mit den besten Büchsenausführungen erzielten Reinheitsgrades fehlten aber noch. Auch eine Standortbestimmung des Erreichten im Vergleich zu andern Maschinenbauarten drängte sich auf. Es wurden deshalb anschliessend an die Modellversuche noch Anstrengungen unternommen, um auch hierüber Klarheit zu schaffen. Hierzu dienten Reinheitsmessungen, die an einem für diesen Zweck

modifizierten Einzylinder - Motor durchgeführt wurden. Für genaue Bestimmungen des Spülerfolges ist es erforderlich, dass insbesondere nach Spülende ein möglichst grosser Teil der Zylinderladung einer Gasanalyse zugänglich gemacht wird. Der Zylinderkopf des Versuchsmotors wurde zu diesem Zweck mit Gasentnahme-Ventilen ausgerüstet, die über Stössel, Stosstangen und Kipphebel von einer Nockenscheibe betätigt wurden, die mit $\frac{1}{3}$ der Motordrehzahl umlief. Während jeder dritten Motorumdrehung wurden die Ventile angehoben, je nach Einstellung entweder unmittelbar vor dem Vorauslass (Gasanalyse vor der Spülung) oder nach

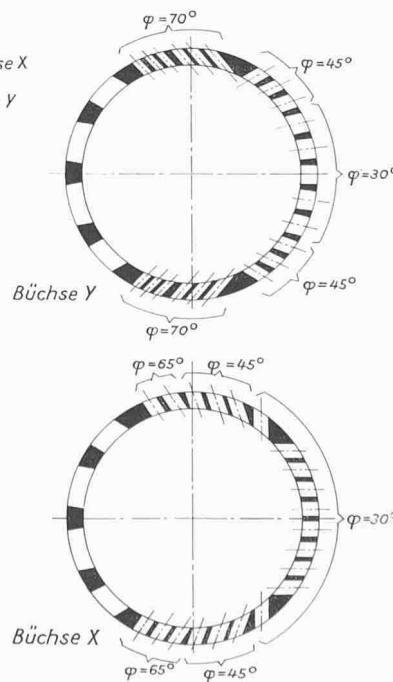
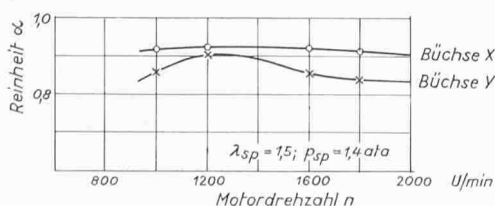
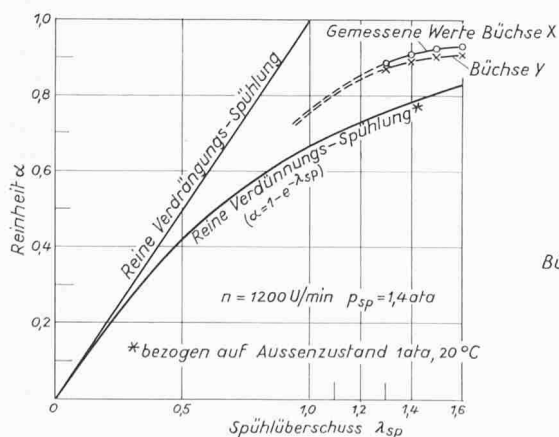


Bild 8. Reinheitsmessungen der Spülung am einzylindrigen Versuchsmotor mit Quer-Umkehrspülung und Drehklappe im Auslasskanal. Bei der Zylinderbüchse X beträgt der Querschnitt der Umkehrschlitze das 0,7fache desjenigen der Querspülchlitze, bei der Büchse Y das Doppelte; φ bezeichnet den Winkel, den die Lochachsen mit der vertikalen Zylinderaxe bilden

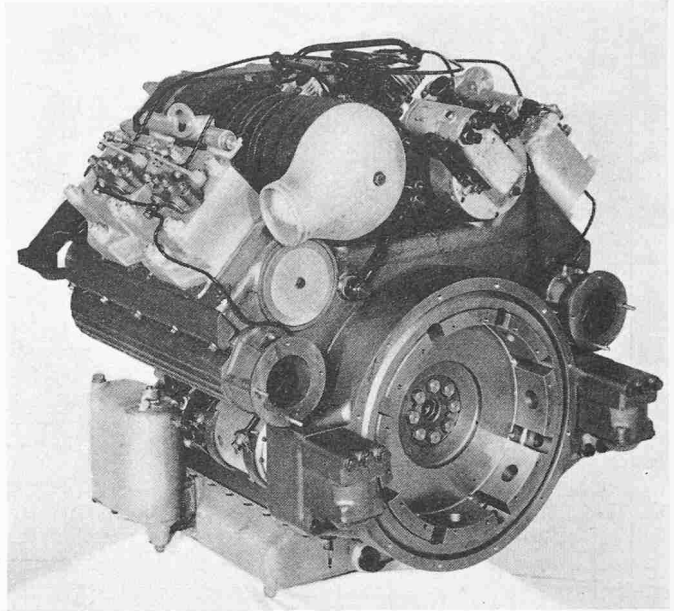
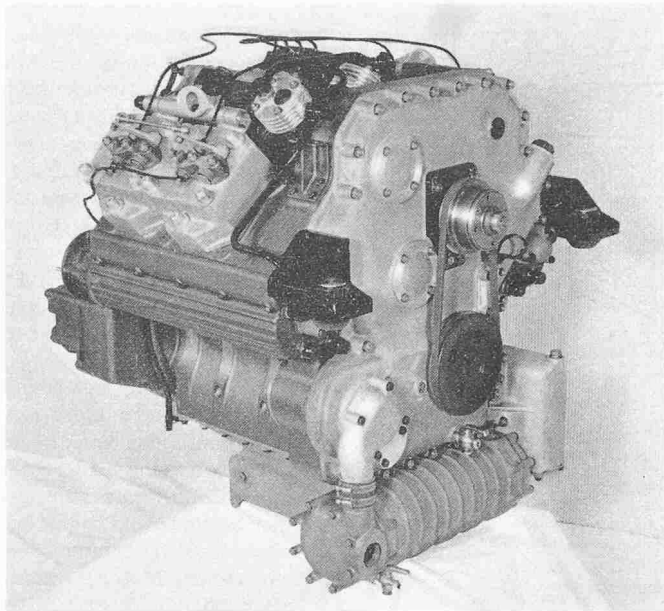


Bild 9. Prototyp des Saurer-Vierzylinder-Zweitakt-Dieselmotors; Bohrung 120 mm, Hub 140 mm, Hubvolumen 6,32 l, Leistung 180 bis 200 PS bei $n = 2000$ U/min. Der Motor bildet die Grundlage für den zwölfzylindrigen Typ, der zum Antrieb von Spezialfahrzeugen vorgesehen ist

vollzogener Spülung (Gasanalyse der neuen Zylinderfüllung). Während zwei Umdrehungen arbeitete der Motor normal, während der dritten Umdrehung fand Gasentnahme statt. Für diese wurden die folgenden Steuerzeiten gewählt: Für die Rauchgasentnahme von 113° v. UTP bis 69° v. UTP; für die Entnahme des gespülten Zylinderinhaltes von 74° n. UTP bis 18° v. OTP. In diesem Fall wurde also ein grosser Teil des Zylinderinhaltes nach der Spülung ausgestossen, womit ein guter Mittelwert des Reinheitsgrades der neuen Zylinderfüllung gewonnen wurde. Auf eine möglichst genaue Analyse der auf diese Weise entnommenen Gasproben wurde besonderer Wert gelegt. Da der Gehalt an CO_2 , insbesondere bei den nach der Spülung entnommenen Proben, bei gutem Spülerfolg, wie er ja angestrebt wird, nur äusserst klein (1 bis 1,5 %) ist, erwies sich die Orsat-Methode als zu unempfindlich. Es wurde deshalb für die Gasanalyse ein Zeiss-Interferometer verwendet, welches mit einer Genauigkeit von etwa 0,01 % arbeitet. Wichtig ist eine sorgfältige Konditionierung der zu untersuchenden Gase vor Eintritt in das Interferometer bezüglich Temperatur, Druck und Feuchtigkeitsgehalt. Zur Erreichung genauer Analysenwerte musste auch die Umgebungstemperatur während der Zeit einer Messung, die jeweils 4 bis 5 Stunden dauerte, möglichst konstant gehalten werden. Man führte deshalb die Untersuchungen während der Nacht durch. Bild 7 zeigt die Versuchsanlage.

Einige der nach dem geschilderten Verfahren gewonnenen Resultate sind in Bild 8 zusammengestellt. Es handelt sich um Messungen des Spülerfolges mit den beiden weiter oben erwähnten Zylinderbüchsen-Varianten X und Y, von denen die Bilder 5 und 6 einige Spülbilder zeigen. In Bild 8 sind für beide Büchsen die mit verschiedenen Spülüberschusszahlen $\lambda_{sp} = 1,3, 1,4, 1,5$ und $1,6$ gemessenen Reinheitswerte α aufgetragen. Zur Erleichterung der Beurteilung sind über λ_{sp} auch die Grenzkurven von α für reine Verdrängungsspülung und für reine Verdünnungsspülung ($\alpha = 1 - e^{-\lambda}$) eingezeichnet. Der erreichte Reinheitsgrad ist bei beiden Büchsen recht hoch; von $\lambda_{sp} = 1,4$ an liegen beide Kurven bei 90 % und darüber. Büchse X ist Büchse Y deutlich überlegen. Die in Bild 8 oben gezeigten Werte für α wurden bei einer Motordrehzahl von 1200 U/min aufgenommen. Unten sind auch noch die Messpunkte zu sehen, die mit beiden Büchsen in Abhängigkeit von der Drehzahl, von 1000 bis 1800 U/min bestimmt wurden. Hier tritt die Überlegenheit der Büchse X klar in Erscheinung, bleibt doch bei ihr der Spülerfolg über dem ganzen Drehzahlbereich konstant auf 92 %, während die Büchse Y deutlich eine

gewisse Drehzahlempfindlichkeit zeigt, fällt doch bei ihr der α -Wert von etwa 90 % bei 1200 bis 1400 U/min auf 86 % bei 1000 U/min und auf 84 % bei 1800 U/min ab. Büchse X zeigt also sowohl am Modell wie bei der Reinheitsmessung ein ausgezeichnetes Verhalten. Die gehegte Hoffnung, dass durch intensive Spülentwicklung auch an einer Maschine mit vom Kolben gesteuerten Ein- und Auslass, also bei einer mechanisch einfachen Bauart, mit üblichem Spülüberschuss Reinheitswerte erreichbar sein sollten, wie bei mechanisch komplizierteren Motoren mit Längsspülung, konnte also erfüllt werden, liegen doch bei diesen bei gut durchgebildeter Spülform die α -Werte bei $\lambda_{sp} = 1,5$ auch in der Gegend von 90 %. Im Rahmen von Versuchen mit einer grösseren Zylindereinheit (170 mm Bohrung, 200 mm Hub) konnte auch die Übertragbarkeit der gefundenen Spülkombination auf andere Zylinderdimensionen mit Erfolg bestätigt werden.

Ermutigt durch die am Einzylinder-Versuchsmotor erzielten recht günstigen Ergebnisse wurden einige Mehrzylinder-Prototypmotoren hergestellt. Nach einem Vierzylinder-Reihenmotor mit den Zylinderdimensionen 110×140 mm, der bei 2000 U/min 150 PS leistete, wurden einige Vierzylinder-V-Motoren mit einem Gabelwinkel von 90° gebaut; ein solcher ist für Zweitakt-Motoren besonders günstig, weil er eine einfache Ausgleichsmöglichkeit für die freien Kippmomente durch Anbringen von Gegengewichten an der Kurbelwelle bietet. Diese Motoren mit der Zylinderdimension 120×140 mm können die Grundlage bilden für eine Typenreihe leistungsfähiger Spezialmotoren, insbesondere sind sie als Vorstufe für eine projektierte grössere Leistungseinheit, eine Zwölf-Zylindermaschine mit rund 600 PS, zu betrachten, die für besondere Verwendungszwecke, z. B. für den Antrieb von Panzerfahrzeugen, Interesse bietet. Die gebauten Vierzylinder-Motoren stellen $\frac{1}{3}$ dieser 600 PS-Einheit dar; mit ihnen konnte am Prüfstand wie auch im Fahrzeug die Bewährung des gewählten Zweitaktverfahrens im praktischen Betriebe abgeklärt und die vielen Einzelprobleme mechanischer und thermischer Natur gelöst werden. So liess sich, um nur eines dieser Probleme zu erwähnen, die sonst bei dieser Maschinenart gefürchtete Schlitzverschmutzung durch entsprechende Massnahmen weitgehend beseitigen.

Bild 9 zeigt zwei Ansichten eines Vierzylinder-Prototypmotors mit einer Leistung von 200 PS, aus denen der gedrängte Aufbau deutlich hervorgeht. Die damit erzielten Leistungs- und Verbrauchsdaten sind in Bild 10 zusammengestellt. Die Einbaumasse dieser Maschine ergeben mit

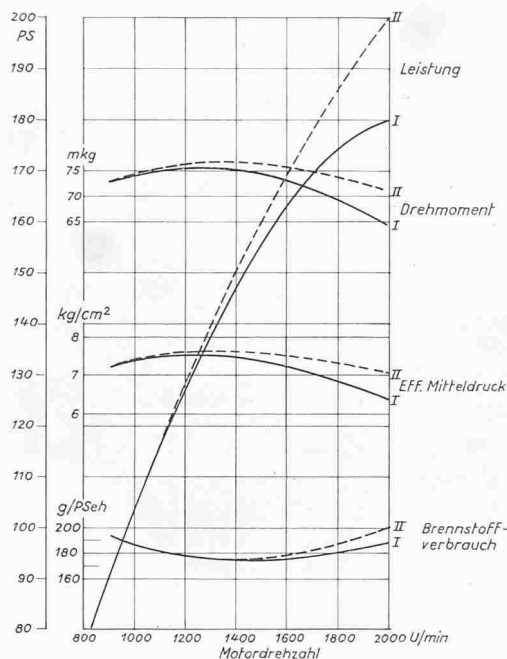


Bild 10. Versuchsergebnisse, gemessen am Motor nach Bild 9. I Einstellung für Fahrzeugbetrieb, II Maximale Leistung an der Rauchgrenze

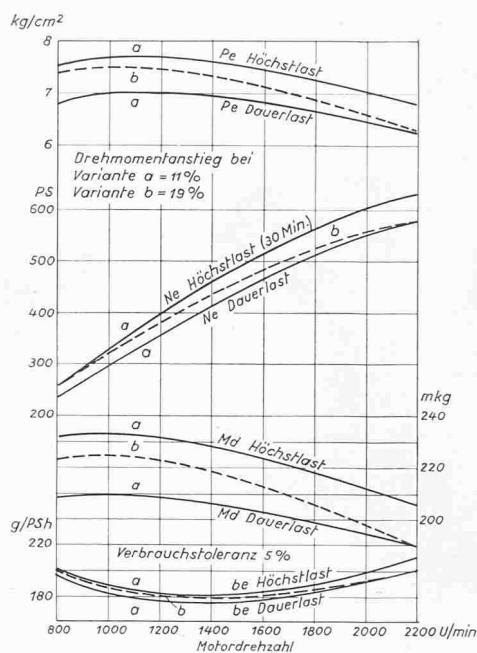


Bild 12. Zu erwartende Leistungs- u. Verbrauchsdaten des zwölfzylindrigen Motors nach Bild 11

einer Baulänge (von Hinterkante Schwungrad bis Vorderkante Ventilator gemessen) von nur 900 mm, einer Breite von 950 mm und einer Höhe von 1000 mm einen umschriebenen Einbauraum von 850 dm³, was bei der erzielten Leistung von 200 PS einem spezifischen Einbauvolumen von 4,25 dm³/PS entspricht. Die angestrebte Leistungsballung ist damit deutlich dokumentiert, beansprucht doch ein aufgeladener Viertaktmotor mit etwa der selben Leistung mit der gleichen Höchstdrehzahl (8-Zyl. V-Motor mit ebenfalls 90° Gabelwinkel) einen spezifischen Einbauraum von 6,1 dm³/PS. Während beim aufgeladenen Viertaktmotor bei einer mittleren Kolbengeschwindigkeit von 9,3 m/s eine spezifische Hubraumleistung von rund 20 PS/l erreicht wird, konnte bei diesem Zweitakt-Prototypmotor bei gleicher Kolbengeschwindigkeit eine solche von 31,5 PS/l erzielt werden.

Die Leistungs- und Verbrauchsdaten, welche für diesen Motor auf Grund der Prototyp-Ergebnisse vorausgesetzt werden können, sind in Bild 12 zusammengestellt. Wie dort ersichtlich, kann durch entsprechende Beeinflussung der maximalen Einspritzmenge im Regler und Reduktion der Leistung bei Volldrehzahl auf die Dauerlast von 580 PS ein für den Antrieb von Spezialfahrzeugen, wie z. B. Panzer, sehr günstiger Drehmomentverlauf erzielt werden (Kurve b mit Drehmomentanstieg von 19 %).

Mit den obigen Darlegungen wurde versucht, nach einer kurzen Erwähnung der Ueberlegungen, die der geschilderten Motorkonzeption zu Grunde gelegt wurden, einen Einblick in die langjährige Entwicklungsarbeit zu vermitteln, die zur befriedigenden Lösung eines Teilproblems der Gesamtaufgabe aufzuwenden war. Daneben stellten sich

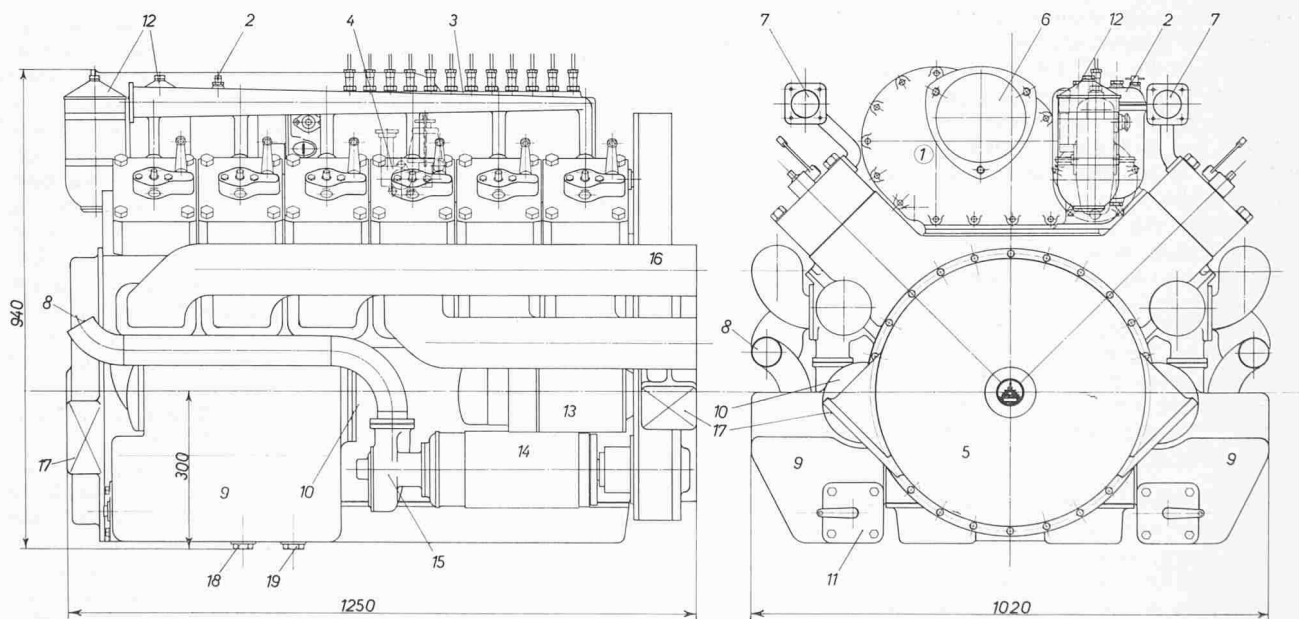


Bild 11. Einbauzeichnung des projektierten zwölfzylindrigen Saurer-Zweitakt-Dieselmotors. Bohrung 120 mm, Hub 140 mm, Drehzahl 2200 U/min, Kolbengeschwindigkeit 10,3 m/s, volle Dauerleistung 580 PS, Höchstleistung 630 PS, Leistungsgew. 2,4 kg/PS

- | | | | |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1 Gebläse | 6 Lufteintrittsleitung | 11 Hauptstrom-Spaltfilter | 16 Auspuffleitung |
| 2 Brennstofffilter | 7 Wasseraustrittsleitung | 12 Nebenstrom-Oelfeinfiler | 17 Motoraufhängung |
| 3 Brennstoffpumpe | 8 Wassereintrittsleitung | 13 Scintilla-Anlasser | 18 Schlammablassschraube |
| 4 Brennstoffförderpumpe | 9 Oeltank | 14 Scintilla-Dynamo | 19 Oelablassschraube |
| 5 Schwingungsdämpfer | 10 Oelkühler | 15 Wasserpumpe | |

natürlich noch viele andere Aufgaben mechanischer, thermischer und verbrennungstechnischer Natur, zu deren Lösung es ebenfalls grosser Beharrlichkeit und eines ähnlichen Aufwandes bedurfte. Erst nach der Abklärung all dieser Probleme konnte ein befriedigendes Ganzes, ein betriebsicherer Motor mit grosser Leistungshallung, entstehen.

Die Arbeitsgruppe, die mit grosser Geduld diese Entwicklung vorantrieb und dabei vielen Rückschlägen und

häufiger Skepsis trotzte, war von der Denkart und der Handlungsweise beseelt, wie sie Prof. Eichelberg seinen Schülern zu vermitteln versuchte: nach klarer Konzeption des zu Schaffenden wird die Lösung der sich stellenden Einzelprobleme im Rahmen des gesuchten Ganzen durch kombinierte theoretische und experimentelle Bearbeitung in Angriff genommen und mit Ausdauer und Beharrlichkeit zum erstrebten Ziel geführt.

Neue Anwendungen der «dynamischen Spülung» an Viertakt-Verbrennungsmotoren

Von Dr. René Feiss, Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik (SLM), Winterthur

DK 621.43.031

Wird bei einem Verbrennungsmotor die Auspuffleitung in ihrer Länge zweckdienlich abgestimmt, so ist es möglich, den als Unterdruckwelle reflektierten Auspuff-Vorauslass-Stoss zur Durchspülung des Brennraumes mit Frischluft nutzbar zu machen. Da ein solches Druckwellensystem praktisch ohne Verzögerung auf Drehzahl- und Laständerungen am Motor anspricht, ist dessen Anwendung insbesondere bei Verschiebelokomotiven gegeben. Ein weiteres Anwendungsgebiet, das ebenfalls beschrieben wird, ist jenes der Gasmotoren, wo die Ausspülung der Restgase aus dem Brennraum, wie auch die Kühlung der Brennraumwände durch Spülluft sehr erwünscht ist. Die gemessene Leistungssteigerung am Kupplungsflansch der Motorwelle kann ohne Erhöhung der thermischen Belastung bis zu 25 % betragen.

Einleitung

Im Brennraum des Verbrennungsmotors herrscht bei Oeffnungsbeginn des Auslassventiles ein gewisser Ueberdruck. Die mit grosser Geschwindigkeit ausströmenden Gase erzeugen daher im Auspuffrohr eine Verdichtungswelle. Diese bewegt sich gegen das Rohrende; dort angelangt wird sie reflektiert und läuft als Verdünnungswelle zum Zylinder zurück. Wird im Moment, da diese im Zylinder anlangt, das Einlassorgan geöffnet, so strömt infolge des im Zylinder herrschenden Unterdruckes Frischluft in den Brennraum. Hält die Sogwirkung im Auspuffrohr genügend lange an, so kann der Zylinder von Verbrennungsrestgasen weitgehend befreit und mit Frischluft gefüllt werden.

Die Ausnützung dieses Effektes wurde von Kadenacy [1] erstmals mit Erfolg auf Zweitakt-Verbrennungsmotoren angewandt. Viele Patente zeugen von den Bemühungen des Erfinders, alle dem Zweck dienlichen Auspuffleitungsformen zu schützen, die sich bei genauer Kenntnis der Strömungsvorgänge auf einen einfachen Nenner bringen lassen. Seither hat man Methoden entwickelt, welche gestatten, den Druckverlauf in Auspuffleitungen, auch mit Druckschwankungen grosser Amplitude, wie sie beim Abgas-Vorauslass-Stoss auftreten, zu berechnen [2]. Versuche können sich daher heute darauf beschränken, die Randbedingungen bei besonderen Anwendungen zu ergründen.

Beim Viertakt-Verbrennungsmotor ist die «dynamische Spülung» verschiedentlich zur Anwendung gelangt, um bei Rennmotoren gegebenen Hubraumes eine Leistungssteigerung zu erzielen, doch ist diese unbedeutend, wenn man nicht dafür sorgt, dass die Ventilerrhebung von Auslass und Einlass eine genügend grosse zeitliche Ueberschneidung aufweisen; denn erst diese ermöglicht die wirksame Ausspülung des Brennraumes. Im Unterschied zum Zweitakt-Verfahren, bei dem die Spülphase im Bereich des unteren Kolben-Totpunktes erfolgt, muss hier im Bereich der oberen Totlage des Arbeitskolbens gespült werden. In diesem Zeitpunkt nähert sich der Raum zwischen Kolben und Zylinderdeckel einem Kleinstwert, daher kann mit einem geringeren Luftdurchsatz ein verhältnismässig grosser Erfolg erzielt werden.

Um die industrielle Verwertung der dynamischen Spülung bei Viertakt-Motoren abzuklären, hat die SLM vor über zehn Jahren ausgedehnte Versuche durchgeführt [3], deren Auswertung zu einer Abgrenzung des Anwendungsgebietes führte. Es zeigte sich, dass der Leistungsbereich des atmosphärisch ansaugenden Motors ausgedehnt werden kann bis zu jenem Punkt, bei dem die Aufladung des Brennraumes durch Abgasturbolader wirtschaftlich interessant wird, d. h. bis zu einem effektiven Arbeits-Mitteldruck von $p_{me} =$

7 kp/cm². Eine weitere Erstreckung ist ferner möglich, wenn man jedem Zylinder eine in der Länge ebenfalls zweckdienlich abgestimmte Einlassleitung vorschaltet [4], was eine bescheidene Aufladung des Zylinders durch eine Frischluft-Verdichtungswelle gestattet. Allerdings wird dadurch u. U. die Zugänglichkeit zu den übrigen Organen des Motors behindert. Man wird also insbesondere die dynamische Spülung überall dort mit Vorteil anwenden, wo man bisher eine Leistungssteigerung durch geringfügige Aufladung des Arbeitszylinders mit einem von der Kurbelwelle aus angetriebenen Gebläse mit all seinen Komplikationen anstrebte.

Geht man von den seinerzeit geheimnisumwobenen Versuchen aus, die Kadenacy an längsgespülten Zweitakt-Motoren ausgeführt hat, so zeigt die Durchsicht der vielen auf seinen Namen lautenden Patentschriften ein Hauptmerkmal, nämlich ein gegen das Ende hin mit einem Diffusor versehenes Auspuffkanal-System. Diese Anordnung hat E. Jenny [5] in seine Untersuchungen einbezogen und verschiedene Oeffnungswinkel bzw. Längen des Diffusors durchgerechnet, gemessen und mit dem Rohr von durchgehend konstantem Querschnitt verglichen. Darnach gestattet der Diffusor eine erhebliche Steigerung der Saugwirkung, was seinen Grund darin hat, dass beim zylindrischen Rohr die Umsetzung der Energie mit geringerem Wirkungsgrad erfolgt. Das heisst, dass bei ihm die nicht als Verdünnungswelle zurückgesandte Energie verwirbelt, während sie beim Diffusor als Druckwelle weiterläuft und von neuem Saugwellen erzeugt. Wesentlich ist hierbei, dass die Länge des zylindrischen Rohrteils richtig bemessen ist: Die Verdünnungswelle soll beim Zylinder anlangen, wenn das Einlassventil öffnet. Diese rücklaufende Welle wird ausgelöst, wenn die Verdichtungswelle in den Diffusor eintritt.

Die Versuche bei der SLM haben diese Erkenntnis bestätigt und ausserdem gezeigt, dass bei Mehrzylindermotoren im Falle sinkender Drehzahl die Verdünnungswelle geringere Höhe hat, dafür aber über einen grösseren Kurbelwinkel wirksam ist. Eine Verstimmung des Systems tritt also nicht so rasch ein, wie wenn ein Auspuffrohr durchgehend konstanten Querschnittes verwendet wird. Die Abstimmung erfolgt hierbei auf die höchste im Betrieb vorkommende Drehzahl, weil dabei die Leitungslänge konstanten Querschnittes am kürzesten ist. Die Länge des Diffusors ergibt sich aus der Dauer der angestrebten Spülphase, wobei darauf zu achten ist, dass bei sinkender Drehzahl die Dauer, die zur Spülung zur Verfügung steht, grösser wird und somit ein Kriterium für die Diffusorlänge ist. Ganz analog wird bei Motoren mit konstanter Drehzahl die Abstimmung auf die grösste Last ausgerichtet, da bei dieser die höchste Auspufftemperatur auftritt und somit wiederum die Leitung konstanten Querschnittes am kürzesten wird. Den Diffusor legt man in diesem Fall so aus, dass das Maximum der Verdünnungswelle dann am Auslassventil vorhanden ist, wenn der kombinierte Zeitquerschnitt von Ein- und Auslassventil den Höchstwert erreicht.

Industrielle Anwendungen

Die genauen Kenntnisse der Vorgänge während des Gaswechsels bei Mehrzylindermotoren ermöglichen die Frage zu beantworten, wo die dynamische Spülung mit Erfolg angewandt werden kann. Es ist dies vor allem dort der Fall, wo mit sinkender Drehzahl das Drehmoment stark abfällt, also überall dort, wo die Belastung der Propellercharakteristik folgt. Dynamische Spülung ist auch bei stossweiser Be-