

5. Über quantitative Auswertung von Zeitlupenfilmen

des Spülströmungsvorganges

Von Dipl.-Ing. R. W i l l e , Berlin

Im folgenden soll über einige Gesetzmäßigkeiten der Spülluftbewegung im Zylinderinnern, die durch Aufnahme und Auswertung von Zeitdehnerfilmen gewonnen wurden, berichtet werden. Die Ergebnisse wurden an einer Modellanlage gewonnen und gelten für Maschinen mit Kurbelkammerspülpumpe.

1. Problemstellung

Um die Problemstellung erkennen zu lassen, sei als Einleitung ein kurzes Rechenbeispiel gebracht. Ein Motor von 350 cm³ Hubvolumen hat z. B. einen Hub von 80 mm und eine Bohrung von rund 74 mm. Stellt man sich einen idealisierten Weg der Spülluft im Zylinder vor, bei dem der Arbeitsraum entsprechend der heute üblichen Schlitzanordnung am unteren Zylinderende während der zur Verfügung stehenden Spülzeit einmal aufwärts und einmal abwärts durchlaufen werden soll, so ergibt sich ein idealer Gesamtpülweg von rund 200 mm. Bei einer Drehzahl von 3000 min⁻¹ ist mit einer Spülzeit von rund 1/150 sec. zu rechnen. Zum Durchlaufen des angegebenen Weges in der zur Verfügung stehenden Zeit müßte daher die Spülluftfront im Zylinder eine mittlere Vorschreitgeschwindigkeit von nur 30 msec⁻¹ besitzen. Demgegenüber hat aber bei Kurbelkammerspülpumpe die Luft in den Spülschlitzen eine anfängliche Eintrittsgeschwindigkeit von über 100 msec⁻¹. Würde im Zylinder diese hohe Strahlgeschwindigkeit beibehalten werden, so wären die Auspuffschlitze in kürzester Zeit erreicht, und hohe Spülmittelverluste wären die Folge. Es ist aber zu erwarten, daß die Strahlgeschwindigkeit sich im Zylinderinnern in starkem Maße verringert. Um eine Vorstellung über den Zusammenhang zwischen Strahlgeschwindigkeit an den Spülschlitzen und Bewegungsgeschwindigkeit der Spülluftfront im Zylinder zu gewinnen, wurde die Vorschreitgeschwindigkeit in einem Zylinder mit Kanalanordnung nach Schürle auf filmtechnischem Wege ausgemessen.

2. Versuchsanlage

Die Versuchsanlage des Instituts für Technische Strömungsforschung wurde bereits im Zwischenbericht Nr. 86 eingehend beschrieben. Zum besseren Verständnis der Ergebnisse sollen jedoch anhand von Bild 1 noch einmal die Hauptmerkmale erläutert werden. Es handelt sich um eine Modellmaschine mit 300 mm Zylinderdurchmesser und Spülluftförderung durch die Unterseite des Arbeitskolbens in Verbindung mit dem Kurbelraum. Die Bewegung der durch Metaldehydflocken sichtbar gemachten Spülluft konnte im Glaszylinder durch Filmaufnahmen im Normal- oder Zeitlupentempo verfolgt werden. Bei den vorliegenden Versuchen entsprach die Spülkanalführung des Modells der bekannten Kanalanordnung nach Schnürle, bei der zwei

symmetrisch liegende Spülkanäle zu beiden Seiten der Auspuffkanäle so angeordnet sind, daß die eintretende Spülluft unter flachgeneigtem Winkel quer durch den Zylinderraum in die vom Auspuff entfernt liegende Zylinderhälfte gelenkt wird. Es sind also zunächst zwei getrennte Ströme vorhanden, die sich dann in der Symmetrieebene des Zylinders vereinigen.

3. Strömungsbilder

Bild 2 zeigt einige charakteristische Phasen aus einem Zeitlupenfilmstreifen. Es stellt den Strömungsablauf in der Symmetrieebene dar. Die Auspuffschlitze sind links unten zu denken, während die Spülschlitze etwa auf Bildmitte vor und hinter der Bildebene liegen. Man erkennt, daß das Zusammentreffen der beiden seitlichen Ströme unmittelbar über dem Kolbenboden, etwa in Zylindermitte, erfolgt. Dort entsteht zunächst eine verbreiterte Frischluftzone, eine Art Staugebiet, aus dem auch Frischluftanteile nach links hinüber in den Auspuff entweichen können. Nach dem Durchlaufen dieses Anfahrzustandes, für den die Stauzone charakteristisch ist, bilden beide Ströme eine gemeinsame Spülluftfront und steigen an der den Auspuff gegenüberliegenden Zylinderwand hoch. Der kugelige Zylinderkopf wird durchlaufen und die Luft strömt dann zum Auspuff hinab.

Zeitlich betrachtet bestehen bei der Schürle-Spülung zwei ganz verschiedene charakteristische Strömungszustände, die im Bild 3 noch einmal einander gegenübergestellt sind. Der Anfahrzustand links, für den die Stauzone mit starken seitlichen Ausbreitungen typisch ist, und rechts die ausgebildete vollkommene Spülung mit dem Strömungsbild der Umkehrspülung.

Zur Bestimmung der Vorschreitgeschwindigkeit der Spülluftfront im Zylinder wurde jedes einzelne Bild der aufgenommenen Zeitlupenfilme ausgewertet. Insgesamt standen 14 Filmstreifen zur Verfügung, von denen je 100 Bilder ausmeßbar waren.

4. Auswertungsverfahren

Die Auswertung erfolgte im einzelnen so, daß für alle Filme unter dem Vergrößerungsapparat jeweils von jedem Einzelbild die Umrisse des von Metaldehydflocken erfüllten Gebietes nachgezeichnet wurden. Es entstanden so Folgen von "Spülluftfronten" in der Symmetrieebene des Zylinders.

In Bild 4 ein Beispiel: Die ausgezogenen Linien stellen Kurven gleicher Zeiten der vorschreitenden sichtbaren Spülluft dar. Die Umrise entstehen zeitlich nacheinander. Man erkennt wieder die breite "Stauzone", aus der sich die Umkehrspülung entwickelt. Der punktiert eingezeichnete Kurvenzug kennzeichnet die mittlere Bahn der Spülluftfront, längs der die Weg-Zeit-Kurve ermittelt wurde. Die zu den einzelnen Spülluftfronten gehörigen Zeiten waren durch die auf dem Film aufgezeichnete Lichtmarke für 1/1000 Sek. bekannt. Als Nullpunkt der laufenden Zeit wurde der Augenblick der Öffnung der Spülschlitze durch die Kolbenoberkante angenommen. Dieser Punkt war auf den Zeitdehnerfilmen durch ein besonderes Lichtzeichen markiert worden.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Bestimmung von $s = f(t)$ zunächst nur für die beleuchtete Symmetrieebene des Zylinders erfolgte. Der Strömungsablauf in der Symmetrieebene ist charakteristisch für den Zylinder und das Spülverfahren.

Der Weg s wurde von der auf Bild 4 durch einen Kreis gekennzeichneten Stelle am unteren Bildrand an gezählt. Die Auswertung begann also erst nach der Vereinigung der beiden seitlichen Ströme zu einer gemeinsamen Spülluftfront. Unmittelbar über dem Kolben und im Zylinderkopf blieb die Strömung unsichtbar, zur Ausmessung gelangten daher nur der "aufsteigende" und "absteigende" Ast der Spülluft.

Über das Verhalten der beiden seitlichen Ströme von der Schlitzmündung bis zur Vereinigung in der Symmetrieebene konnte am räumlichen Zylindermodell keine Vorstellung gewonnen werden. Um einige Anhaltspunkte zur Beurteilung des Strömungsablaufs in diesem Gebiet zu erhalten, müssen Ergebnisse einfacher Grundlagenversuche über nichtstationäre Strahlabbildung an Schlitzmündungen herangezogen werden.

5. Weg und Geschwindigkeit der Spülluftfront

Für die Schnürle-Umkehrspülung sind die Ergebnisse der Zeitlupenauswertung dreier Filme im Bild 5 dargestellt. Die Auftragung der Meßwerte erfolgte dimensionsfrei, und zwar ist als Abszisse die Zeit, durch Multiplikation mit der Drehzahl n dimensionslos gemacht, gewählt worden. Als Ordinate dient der ausgemessene Weg s , der durch Division durch den Zylinderdurchmesser d dimensionslos gemacht wurde. Die drei Kurvenbilder zeigen zunächst einen nahezu gleichen Verlauf der "Weg"-Kurve über der Zeit. Der Gesamtweg der Umkehrspülung in der Symmetrieebene des Zylinders wurde als s/d ges. bezeichnet, und stellt sich als horizontale Linie dar. Der Zahlenwert von s/d ges. liegt bei den vorliegenden Zylinderabmessungen bei 2,7.

Die drei ausgewerteten Filme wurden bei etwas verschiedenen Drehzahlen aufgenommen, bei Film 8 betrug sie $n = 1,1 \text{ sec}^{-1}$, bei Film 11 $n = 1,05 \text{ sec}^{-1}$ und bei Film 13 $n = 0,98 \text{ sec}^{-1}$. Der Zeitpunkt für u_T liegt daher auf verschiedenen $t \cdot n$ -Werten. Der anfängliche Spüldruck P_k war jedoch stets gleich.

Unter der gemessenen Wegkurve ist jeweils die durch Differentiation gewonnene Geschwindigkeitskurve eingezeichnet. Die Auftragung erfolgte wieder dimensionslos. Als Ordinate ist die Vorschreitgeschwindigkeit W der Spülluftfront im Zylinder gewählt worden, die durch Division mit der Zylinderbohrung d und der Drehzahl n dimensionsfrei wird. Die W -Kurven zeigen für die drei Fälle einen ähnlichen allgemeinen Verlauf. Es treten jeweils zwei starke Geschwindigkeitserhöhungen hervor, die allerdings bei den verschiedenen Filmen bei je anderen Zeitwerten liegen.

Diese Geschwindigkeitsschwankungen, die charakteristischerweise im aufsteigenden Strom auftreten, zeigen an, daß die Spülluft sich ruckweise im Zylinder vorwärts bewegt, eine Erscheinung, die bei Vorführung der Zeitlupenfilme unmittelbar ins Auge fällt. Die Geschwindigkeitsschwankungen sind zunächst auf die starke Turbulenz der Strömung zurückzuführen, haben aber ihre Ursache haupt-

sächlich in Unstabilitätserscheinungen beim scharfen Aufeinanderprallen der beiden seitlichen Spülströme. Im absteigenden Spülstrom haben sich die Geschwindigkeitsschwankungen im wesentlichen ausgeglichen.

Als "mittlere Vorschreitgeschwindigkeit" ergab sich der Wert w_{mi} , der als gestrichelte waagerechte Linie gleichfalls auf den Bildern eingetragen ist. Sein Zahlenwert liegt zwischen $w_{mi} = 21$ und 23 , ist also für die drei Filme trotz verschiedener Versuchsdrehzahlen praktisch gleich.

Am Beispiel des Films 8 sollen noch einige Zahlenergebnisse genannt werden. An der Modellversuchsanlage von $d = 300$ mm Zylinderdurchmesser betrug die Drehzahl $n = 1,1 \text{ sec}^{-1}$ und der anfängliche Spüldruck im Kurbelkasten $P_k = 110 \text{ mm WS} = 0,011 \text{ kg cm}^{-2}$. Der absolute Gesamtweg beträgt $s = 0,795 \text{ m}$; die Öffnungszeit der Spülschlitze $t_{sp} = 0,252 \text{ sec}$. Zum Durchlaufen des Weges s ges. würde demnach eine rechnerische mittlere Vorschreitgeschwindigkeit von $w_{th} = 3,15 \text{ m sec}^{-1}$ genügen. Demgegenüber ergibt sich eine gemessene mittlere Vorschreitgeschwindigkeit von $w_{mi} = 6,93 \text{ msec}^{-1}$.

Unter Zugrundelegung der Ähnlichkeitsgesetze gelten die im Bild dargestellten Kurven auch für einen kleineren Motorradzylinder mit $d = 60 \text{ mm } \phi$ bei einer Drehzahl von $n = 27,5 \text{ sec}^{-1}$ und einem anfänglichen Spüldruck von $P_k = 0,275 \text{ kg cm}^{-2}$. Die mittlere Vorschreitgeschwindigkeit der Spülluft im Zylinder würde $w_{mi} = 34,6$ gegenüber einer rechnerisch erforderlichen von nur $w_{th} = 15,75 \text{ m sec}^{-1}$ betragen.

6. Frontgeschwindigkeit und Druckverlauf

Anhand des Bildes 6 sollen nun Vorschreitgeschwindigkeit im Zylinder und Druckverlauf im Kurbelkasten miteinander verglichen werden.

Der zeitliche Verlauf des Druckes gilt für die Drehzahl $n = 1,08 \text{ sec}^{-1}$. Er wurde mit Hilfe des optischen Mehrfachschreibers der Askania-Werke aufgezeichnet. Die Weg- und Geschwindigkeitskurven gelten für die fast gleiche Modelldrehzahl von $n = 1,1 \text{ sec}^{-1}$. Aus dem Verlauf der Druckkurve kann auf die zeitliche Änderung der Spülluftgeschwindigkeit in den Schlitzen geschlossen werden, die am Anfang sehr hoch ist, dann aber rasch abnimmt und bei $t = 9,6$ zu Null wird. Eine genaue zahlenmäßige Berechnung der Geschwindigkeit war nicht möglich, da die zeitliche Änderung des Druckes im Zylinder nicht gemessen werden konnte. Aus dem Vergleich der P-Kurve mit der W-Kurve erkennt man, daß zu einem Zeitpunkt, wo die Geschwindigkeit der Luft in den Schlitzen zu Null geworden sein muß, die Vorschreitgeschwindigkeit der Spülluftfront im Zylinder noch eine erheblich positive Größe aufweist und keine Neigung zeigt, abzunehmen.

Wenn auch die zahlenmäßige Errechnung des Geschwindigkeitsverlaufs an den Schlitzen nicht möglich war, so ließ sich doch aus dem geförderten Luftvolumen und der Größe des Zeitquerschnitts eine mittlere Überströmgeschwindigkeit abschätzen. Zur Unterscheidung von der Vorschreitgeschwindigkeit w der Luft im Zylinder soll die Geschwindigkeit in den Schlitzen mit v bezeichnet werden. Mit

dem aus dem Druckverlauf berechneten Spülluftvolumen und dem zugehörigen Integral des Zeitquerschnitts des Modells ergab sich eine mittlere Schlitzgeschwindigkeit für den Modellzylinder von $v = 26 \text{ msec}^{-1}$. Sie ist rund 3,8 mal so groß wie die gemessene mittlere Vorschreitgeschwindigkeit w_{mi} der Spülluft im Zylinder.

Das Verhältnis $w_{mi}/v_{mi} = 1/3,8$ gibt nur den charakteristischen Mittelwert an. Zu Beginn der Spülung überwiegt die Schlitzgeschwindigkeit, gegen Ende die Vorschreitgeschwindigkeit der Front. Die Weiterbewegung der Luftmasse im Zylinder unterliegt ja ganz anderen Gesetzen als der erste Einströmvorgang an den Schlitzen. Die Trägheit des Luftumlaufs im Zylinder ist von überwiegendem Einfluß.

Im Bild 6 ist über der Zeit-Weg-Kurve der Spülluftfront noch der Zahlenwert für den Gesamtweg eingetragen. Man erkennt, daß die Spülluftfront erst nach der unteren Totpunktstellung des Kolbens ihre Gesamtbahn durchlaufen hat. Demgegenüber ist aber der Kurbelkammerdruck bereits vor uT auf Null abgesunken. Vom Zeitpunkt 9 6 ab wird keine weitere Luft mehr in den Zylinder nachgeschoben. Die Luft bewegt sich dort lediglich infolge ihrer Trägheit weiter. Eine Verdrängung der Abgase kann dann nur noch bei Volumenvergrößerung des Frischluftanteils erfolgen; ist diese beendet, so bestehen nur noch Mischbewegungen.

Im betrachteten Beispiel erreicht die Spülfront die Auspuffschlitze vor dem Wiederabschluß derselben. Da zu diesem Zeitpunkt das Nachschieben der Luft aus dem Kurbelraum schon aufgehört hat und ein Druckunterschied zwischen Zylinder und Auspuffrohr nicht mehr zu erwarten ist, werden die Spülmittelverluste nur gering sein. Anders ist es, wenn etwa nachträglich eine Saugwirkung des Auspuffs eintritt. Ein sehr schnelles Überschieben der gesamten Spülluft in den Zylinder braucht sich nicht nachteilig auf den Spülerfolg auszuwirken, wenn es gelingt, die Vorschreitgeschwindigkeit der Spülfront so weit herabzusetzen, daß die Spülfront erst nach Beendigung des Überschiebens den Auspuff erreicht.

7. Ergebnisse der Auswertung

Unter Berücksichtigung der Arbeitsverhältnisse einer Kurbelkammerspülpumpe läßt sich das Ergebnis einer solchen Filmauswertung wie folgt zusammenfassen:

Bei der Modellversuchsanlage ist die Höhe des anfänglichen Spüldrucks im Kurbelraum durch die Volumenverhältnisse des Systems Kurbelraum plus Kolbenunterseite festgelegt und ist, bei gleichbleibender Füllung, in weiten Grenzen von der Drehzahl unabhängig. Die Überströmgeschwindigkeit der Luft in den Spülschlitzen ist abhängig von der Druckdifferenz Kurbelkastendruck minus Zylinderdruck. Im Zylinder setzt sich die hohe Strahlgeschwindigkeit in die niedrigere Vorschreitgeschwindigkeit der Spülluftfront um. An der Front macht sich die Druckabsenkung im Kurbelraum und die Abnahme der Schlitzgeschwindigkeit nur anfänglich bemerkbar; später ist die Trägheit der Luftmasse von überwiegendem Einfluß.

8. Druckverlauf im Kurbelraum

Über den zeitlichen Abfall des Druckes im Kurbelraum und damit über die Zeitdauer für das Überschieben des zur Verfügung stehenden Spülluftvolumens ist kurz folgendes zu sagen: Vergleichende Messungen an der Modellmaschine bei Drehzahlen von 65 min^{-1} und 95 min^{-1} zeigten nur geringe Abweichungen in der zeitlichen Druckänderung im Kurbelraum. Bild 7 läßt erkennen, daß bei einer um 50 % höheren Drehzahl die Kurbelraumentleerung nur wenig schneller erfolgte. Der Zeitpunkt für vollkommene Kurbelraumentleerung fällt daher bei verschiedenen Drehzahlen stets mit anderen Kolbenstellungen zusammen. Druckverlauf im Kurbelraum und das Vorschreiten der Luft im Zylinder sind selbständig ablaufende Naturvorgänge, die ihren Anstoß wohl durch den zwangsläufig aufgeprägten Takt der Kolbenbewegung erhalten, die aber einmal ausgelöst nur wenig von dieser beeinflusst werden.

Für einen nur durch Volumenverhältnisse festliegenden Anfangs-spüldruck kann es nur eine Drehzahl geben, bei der die Spülluft in der zur Verfügung stehenden Öffnungszeit gerade den Zylinder durchlaufen hat. Ist die Drehzahl geringer, so hat die Luft die Auspuffschlitze bereits vor Widerabschluß derselben erreicht; ist sie höher, so bleibt das Spülströmungsbild unvollkommen.

9. "Bahn" und "Vorschreitgeschwindigkeit"

Es leuchtet ein, daß der Erfolg der Spülung von der Bewegungsform der Frischluft im Zylinderinnern abhängig ist. Es genügt aber nicht, der Luft eine günstige Bahn aufzuzwingen, sondern darüber hinaus muß auch dafür gesorgt werden, daß auf dieser günstigen Bahn mit dem zu Verfügung stehenden begrenzten Spülluftvolumen in der möglichen Spülzeit tatsächlich der gesamte Zylinder bestrichen wird. Diese beiden Faktoren seien durch die Begriffe: "Bahn" der Spülluft und "Vorschreitgeschwindigkeit der Front" gekennzeichnet. Bei gleicher Strömungsbahn kann trotzdem die Vorschreitgeschwindigkeit verschieden sein, je nachdem es gelingt, die Anfangsstrahlgeschwindigkeit herabzusetzen.

10. Gesetzmäßigkeiten der Spülluftfront

Für die Weiterentwicklung guter Spülungen ist es wohl sicher von Wichtigkeit, die Gesetze der Spülluftfrontausbildung von Grund aus zu studieren. Wenn die Einflüsse bekannt sind, die das Fortschreiten der Spülfronten im Innern des Zylinders, also nach dem Verlassen der Spülschlitze bestimmen, so lassen sich hieraus auch Rückschlüsse auf die Schlitzkonstruktion und Bemessung ziehen.

Zur Erforschung der Elemente, aus denen sich die Spülfront zusammensetzt, wurden im Institut von Prof. Föttinger bereits einige Grundlagenversuche angestellt. Für das nichtstationäre Anlaufen eines Gasstrahles, wie es im Falle der Spülung vorliegt, ist die Bildung des bekannten Pilswirbels charakteristisch. Diesen interessanten Vorgang möchte ich noch durch zwei Bilder in Erinnerung bringen.

Bild 8 zeigt die fortschreitende Entwicklung des Strahlkopfes beim Austritt eines rechteckigen Strahles in freie Luft senkrecht zur Wand. Infolge des plötzlichen Antriebs der Luftmasse werden die Kanten der Mündung einen kurzen Augenblick tatsächlich umflossen, und die Luft breitet sich zunächst potentialströmungsartig nach allen Seiten über den Schlitzrand hin aus. Darauf setzt aber sofort an den Kanten die Ablösung ein, und es rollen sich ringsum in bekannter Weise Spiralwirbel auf. Im Lichtschnitt sind natürlich nur zwei seitliche Wirbel zu erkennen, da der um die Schlitzmündung herum aufgerollte Wirbel gleichsam durchschnitten erscheint.

Vom dritten Teilbild an treten die Wirbel deutlich in Erscheinung. Sie vergrößern sich schnell und wickeln dabei ruhende Luft der Umgebung mit ein. Dieser Vorgang ist zugleich der Grundtyp eines Mischvorganges, der hier unvermeidbar ist.

An der Front findet einfache Verdrängung der ruhenden Luft statt; an den Rändern wird diese jedoch beim spiralförmigen Einrollen des Wirbelgebildes mit erfaßt. Der ausgebildete Wirbelring löst sich dann vom Entstehungsort und bildet beim weiteren Vorschreiten den Strahlkopf.

Es sei in diesem Zusammenhang daran erinnert, daß die Bildung ähnlicher Wirbelringe bei vielen nichtstationären Strömungserscheinungen beobachtet werden kann, so zum Beispiel am Lokomotiv-Schornstein, am Auspuff des Lanz-Bulldogg oder beim Blasen der Rauchringe.

Das Ausströmen der Luft aus einem Spalt mit kurzen schrägen Wänden zeigt Bild 9. Der Anfahrvorgang verläuft entsprechend dem früheren Versuch. Man erkennt wieder die typische Verbreiterung des Strahlkopfes und das Aufrollen der Wirbel. Die Luftgeschwindigkeit war hier höher als bei dem vorhergehenden Bild, die Aufnahmefrequenz jedoch die gleiche. Der Anfahrvorgang ist daher nicht mit allen Einzelheiten festgehalten, und die Wirbel erscheinen durch die relativ längere Belichtungszeit etwas verzerrt.

11. Zusammenfassung

Durch Sichtbarmachung der nichtstationären Spülströmung im Zylindermodell besteht die Möglichkeit, mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen die Vorschreitgeschwindigkeit der Spülluftfront im Zylinderinnern zu ermitteln und sie mit der in den Spülschlitzen herrschenden Strahlgeschwindigkeit zu vergleichen. Zur Aufdeckung der Gesetzmäßigkeiten der Spülfrontbewegung müssen einfache Grundlagenversuche über die nichtstationäre Strahlbildung herangezogen werden.

Gute Spülsergebnisse sind zu erwarten, wenn die Vorschreitgeschwindigkeit richtig auf die Motordrehzahl abgestimmt ist.

Aussprache

Im Anschluß an den Vortrag von Wille, Berlin, führte E. Schmidt, Braunschweig, folgendes aus:

Im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig, wurde von O. Lutz ein neues Verfahren zur Aufnahme von Spülströmungen benutzt. Es handelt sich dabei um ein Interferenz-Verfahren, das von W. Zobel im aerodynamischen Institut der Luftfahrtforschungsanstalt entwickelt wurde, um bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten Strömungsfelder auszumessen, ohne Sonden in die Strömung einführen zu müssen, da diese sich bei Annäherung an die Schallgeschwindigkeit als besonders störend erweisen.

Die Apparatur entspricht einem Interferenzgerät nach Mach-Zehnder. Das Licht tritt von einer Lichtquelle durch einen halbversilberten Spiegel und wird in 2 Strahlen aufgespalten. Der eine Strahl durchläuft das zu untersuchende Strömungsfeld und wird dann durch einen zweiten halbversilberten Spiegel wiederum mit dem anderen Strahl vereinigt und einem photographischen Aufnahmeapparat zugeführt. In dem Spülmodell, bei dem das räumliche Problem zu einem ebenen vereinfacht ist, werden durch die Dichte-Unterschiede im Strömungsfeld Gangunterschiede der Lichtwellen gegenüber dem ungestörten Lichtweg hervorgerufen. Diese Gangunterschiede rufen Verschiebungen der Interferenzstreifen hervor, die als Maß der Dichteänderungen dienen.

Die Spülkammer ist ein rechteckiger Raum, den vorn und hinten Glasscheiben begrenzen. Die Abmessungen sind senkrecht zur Richtung des Lichtstrahles etwa 10 x 15 cm. Dementsprechend ist das Strömungsfeld ein ebenes und kein räumliches wie im wirklichen Zylinder.

Die Aufnahme des Interferenzbildes zeigt, wenn keine Strömung vorhanden ist, ein System von geraden Interferenzstreifen, deren Abstand und Richtung durch kleine Verkantungen der Spiegelebenen willkürlich eingestellt werden kann. Wenn an einer Stelle die Luftdichte etwas anders ist als in der Umgebung, dann wird der vorher gerade Interferenzstreifen dort etwas ausgebeult, und die Verschiebung des Interferenzstreifens aus der geraden Linie dient als Maß der Änderung des Luftzustandes. Bei isentropischer Strömung ist die Verschiebung des Streifens ein Maß für die Geschwindigkeit, jedoch nur für deren Größe, unabhängig von der Richtung.

Wie die vorgeführten Aufnahmen erkennen lassen, ist die Streifenverschiebung nicht groß, immerhin sind die Änderungen deutlich erkennbar. Die Auswertung ist dadurch erschwert, daß nur die Größe, nicht die Richtung der Geschwindigkeit angezeigt wird.

Die Bestimmung thermischer Unterschiede ist dagegen wesentlich einfacher. Spült man z. B. mit erwärmter Luft, so ist die Verschiebung der Linien auch in diesem Falle ein Maß für die Dichteänderung, aber diese hängt wesentlich von thermischen Mischvorgängen ab.

Das besprochene Verfahren zeigt einen neuen Weg für die Beobachtung von Spülströmungen. Die weitere Versuchserfahrung muß zeigen, wie weit sich dieser Weg gegenüber anderen schon vorliegenden Methoden bewährt.

Schulz-Grunow, Aachen, führt dazu aus, daß man gerade den ebenen Spülvorgang auch theoretisch behandeln kann. Die Spülfront kann als Unstetigkeitsfläche aufgefaßt und von ihrem Anbeginn aus die Aufrollung der Spülfläche zu einem Einzelwirbel rechnerisch verfolgt werden.

Endress, Chemnitz, führt die Bewegung der Spülluft im Zylinderinnern nach Aufhören der Strömung in den Spülschlitzten u. a. auf Dichte-Unterschiede der Luft, hervorgerufen durch Wärmeunterschiede und dergleichen, zurück.

Wille, Berlin, bemerkt dazu, daß selbstverständlich auch Geschwindigkeiten herrschen können, wenn keine Druckunterschiede in der Front vorhanden sind.

Spannhake, Karlsruhe, bemerkt dazu, daß trotz der Massenwirkung innerhalb des Zylinders noch Druckunterschiede vorhanden sein können, welche sich ebenfalls geltend machen müssen.

Schnürle, Köln, schlägt vor, die Umsetzung des Druckes in Geschwindigkeit und Wärme im Verlauf des Spülstromes durch den Zylinder meßtechnisch genau zu verfolgen, worauf Föttinger, Berlin, auf die großen meßtechnischen Schwierigkeiten dieser Aufgabe hinweist. Zur Durchführung des vorgeschlagenen Versuches empfiehlt Lindner, Breslau, die Messung der Energie durch Bestimmung des Temperaturanstieges mit Hilfe sehr dünndrähtiger Thermolemente.

Endress, Chemnitz, weist darauf hin, daß die Auswertung der Meßversuche im Zylinder gewisse Schwierigkeiten dadurch bereitet, daß die Spülungen fast sämtlich dazu neigen, etwas aus der Symmetrie-Ebene hinauszuwandern. Das hat dann zur Folge, daß der Hauptspülstrom nicht lediglich in der Mittelebene wandert, sondern allmählich etwas herausläuft und sich teilweise außerhalb dieser Ebene befindet. Es muß deshalb darauf geachtet werden, daß die Abbildungsebene der Ebene des Spülstromes folgt. Hierzu erklärt Wille, Berlin, daß er aus diesem Grunde besonders viele Aufnahmen gemacht habe, aber derartige Beobachtungen sich kaum ergeben hätten. Auch Spannhake, Köln, weist darauf hin, daß er bei Versuchen außerhalb der Symmetrieebene verlaufende Strömungen gehabt habe, welche durch ungleichmäßigen Ausfall der Spülkanäle entstehen können. Er weist darauf hin, daß er bei extrem niedrigen Reynolds'schen Zahlen Instabilitätserscheinungen insofern beobachtet habe, als die Spülung nicht recht zur Ausbildung kam.

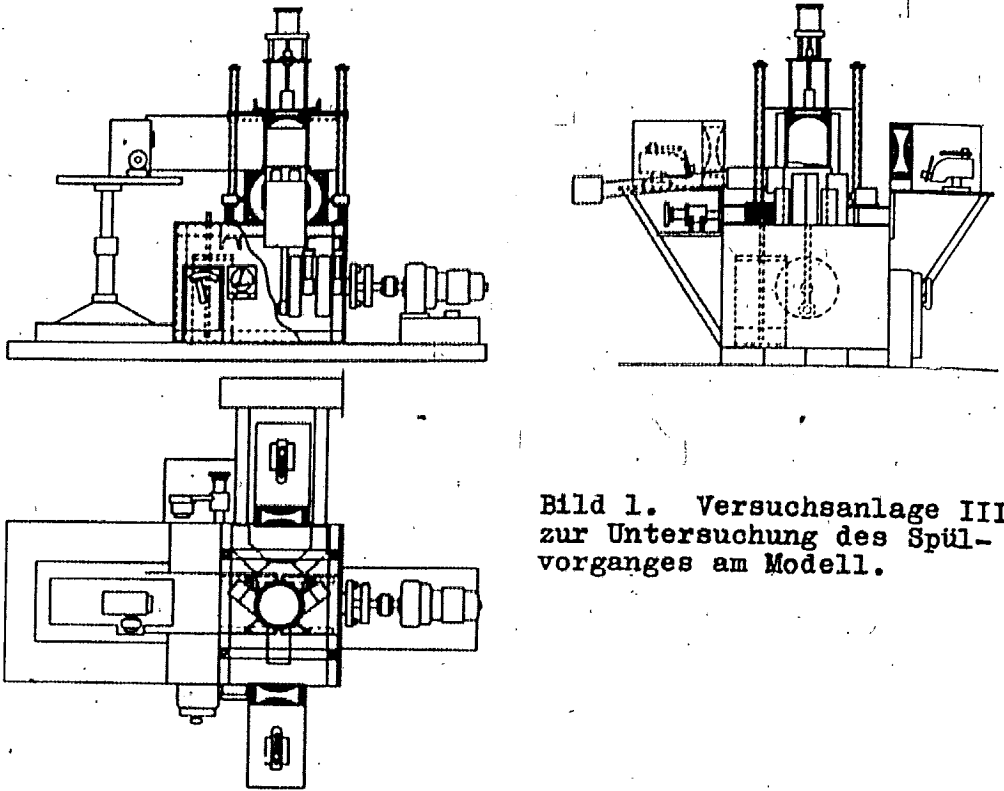


Bild 1. Versuchsanlage III zur Untersuchung des Spülvorganges am Modell.

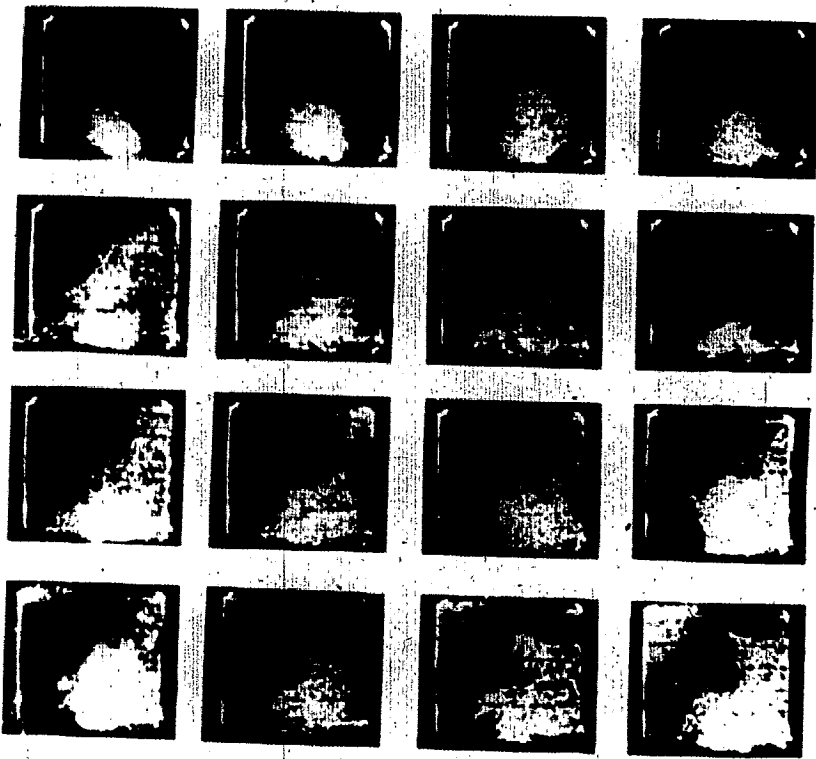
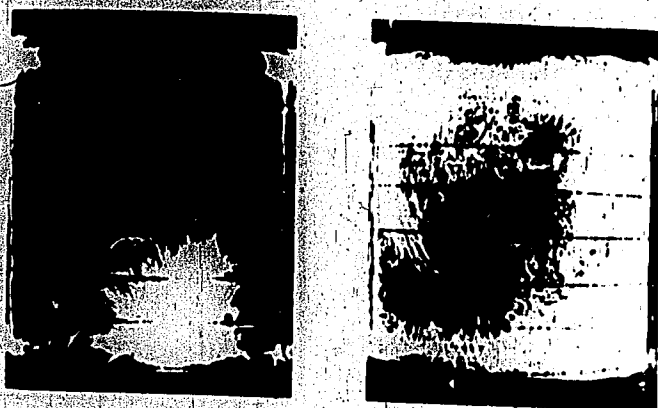


Bild 2. Einzelne Phasen aus einem Zeitdehnerfilm der Schnürle-Umkehrspülung. Auspuffschlitze jeweils links unten. Spülschlitze vor und hinter Bildebene etwa auf Bildmitte.



Anfahrzustand (Stauzone)

ausgebildete Spülströmung

Bild 3. Zwei charakteristische Phasen der Schnürle-Spülung.

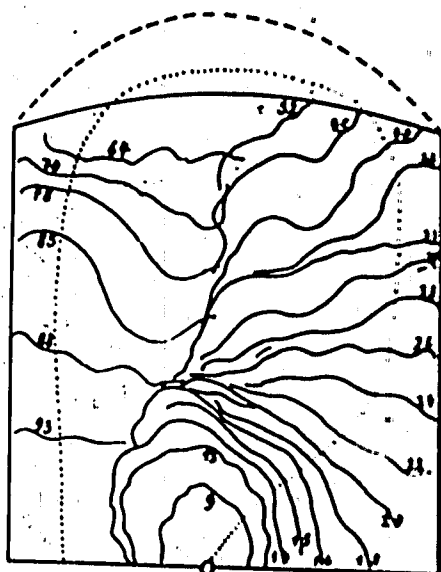


Bild 4. Spülluftfronten in der Symmetrieebene des Zylinders.

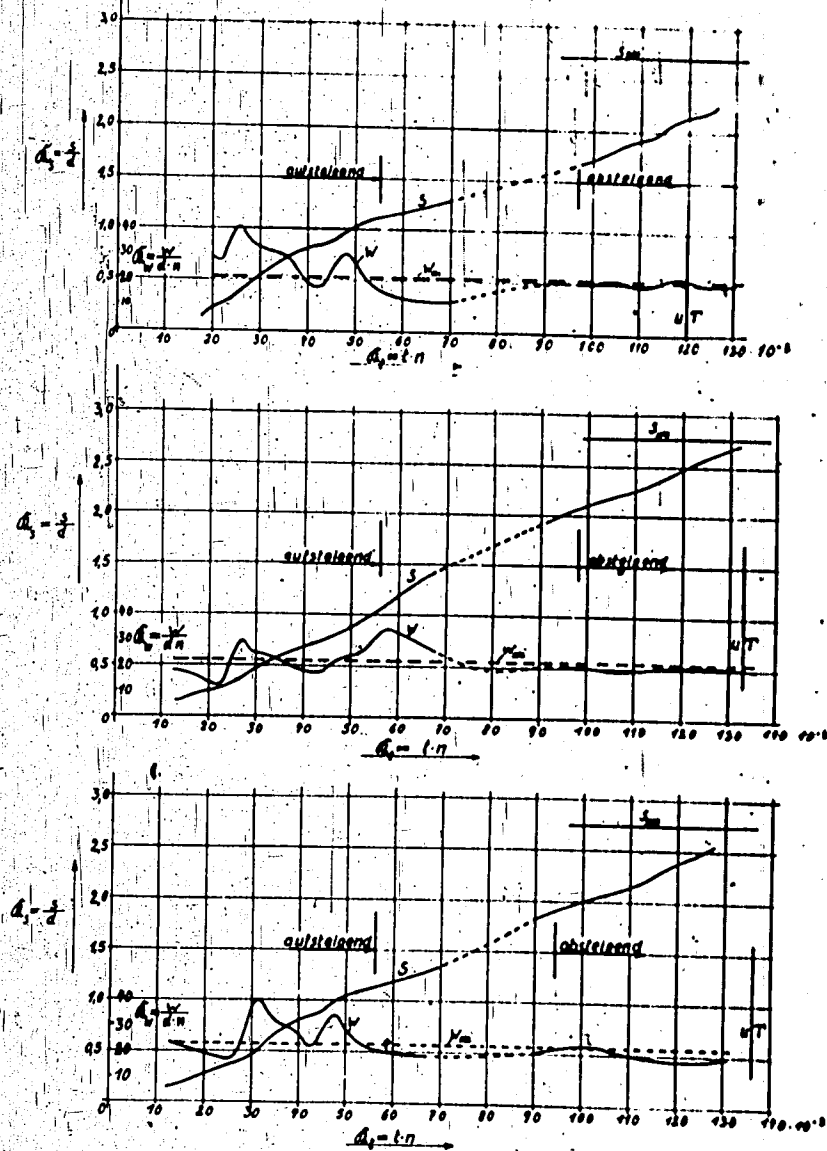


Bild 5. Weg und Geschwindigkeit der Spülluftfront.

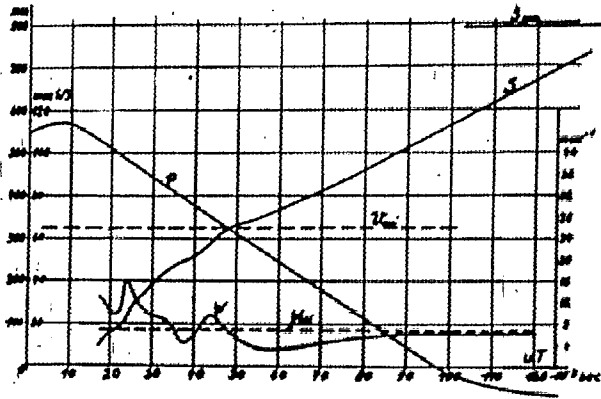


Bild 6. Druckverlauf im Kurbelraum und Vorschreitgeschwindigkeit der Spülluftfront im Zylinder.

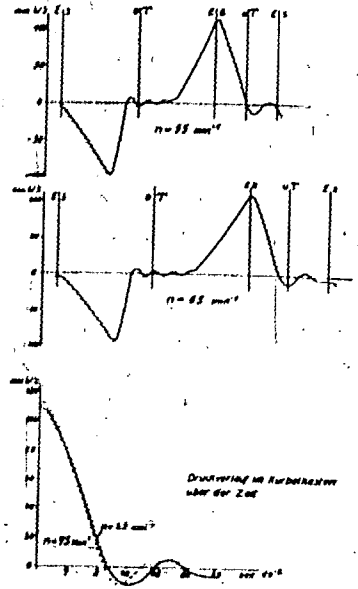


Bild 7. Druckverlauf im Kurbelraum.

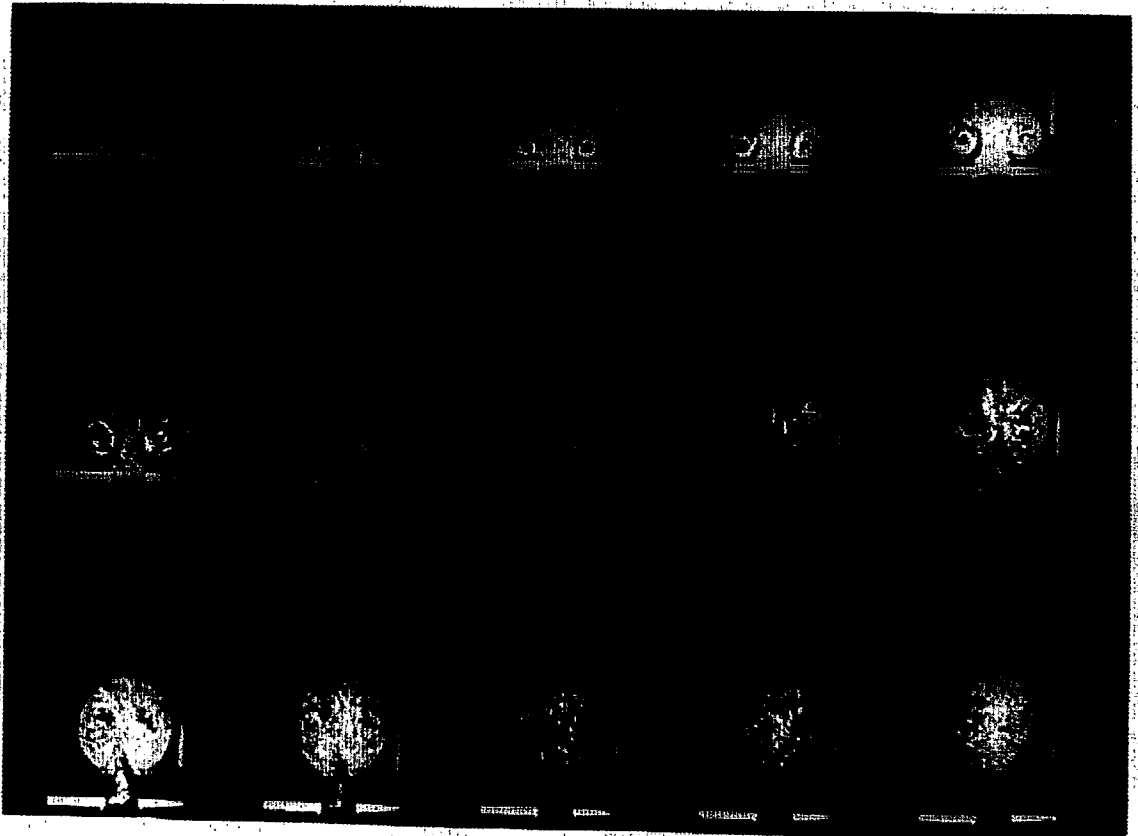


Bild 8. Bildung des pilzförmigen Frontwirbels beim nichtstationären Ausströmen von Luft senkrecht zur Wand.

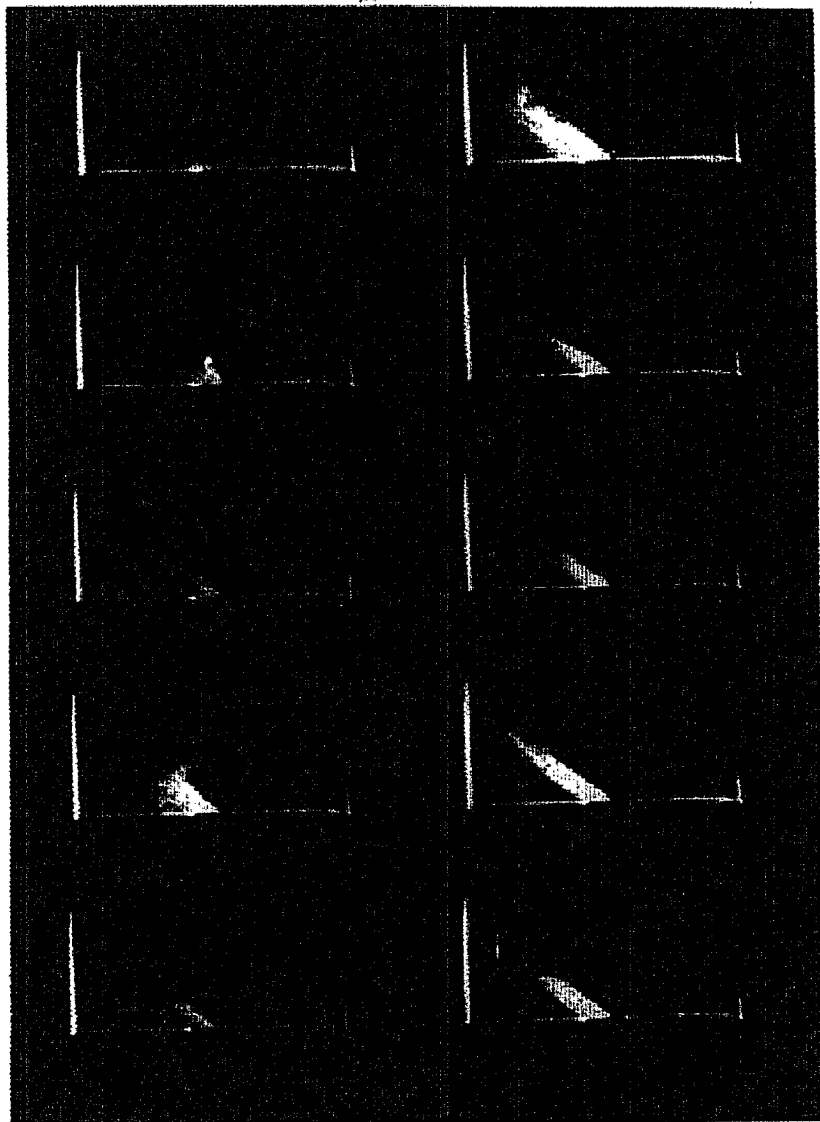


Bild 9. Bildung des pilzförmigen Frontwirbels beim nichtstationären Ausströmen von Luft aus einem schrägen Schlitz.