

Technischer Prüfstand

**Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers**

F.3

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 105/1942

**Erfahrungen und Ergebnisse mit einer Einrichtung
zur Untersuchung von Spülvorgängen in
Zweitaktmaschinen**

Bericht aus den Instituten

**für Maschinenelemente
und Kraftwagen**

für Strömungsmaschinen

an der Technischen Hochschule Karlsruhe

Prof. H. Kluge

Prof. W. Spannhake

Technischer Prüfstand

Deutsche Kraftfahrtforschung

im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 105/1942

**Erfahrungen und Ergebnisse mit einer Einrichtung
zur Untersuchung von Spülvorgängen in
Zweitaktmaschinen**

Bericht aus den Instituten

für Maschinenelemente
und Kraftwagen

für Strömungsmaschinen

an der Technischen Hochschule Karlsruhe

Prof. H. Kluge

Prof. W. Spannhake

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Ver-
schluß zu halten.

6095

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
1. Beleuchtungs- und Aufnahmetechnik	1
2. Einstreumaterial zur Sichtbarmachung der Spülbilder	6
3. Aufladung des Zylinders zur Nachahmung des Expansionsenddruckes	9
4. Versuchseinrichtung mit vollem Kolbenhub und Kurbelkastenspülung	11
5. Versuchseinrichtung mit reduziertem Kolbenhub und nachgeahmter Kurbelkastenspülung	13
6. Ergebnisse	14
a) Vergleich der benutzten Einrichtungen untereinander	14
b) Verwendung der beschriebenen Versuchseinrichtungen zu grundsätzlichen Untersuchungen und zu Modellversuchen	16
c) Einige grundsätzliche Ergebnisse	24

Erfahrungen und Ergebnisse mit einer Einrichtung zur Untersuchung von Spülvorgängen in Zweitaktmaschinen

Von H. Kluge VDI und W. Spannhake VDI, Karlsruhe

Einleitung

In unserer Veröffentlichung "Einrichtung für die Untersuchung des Spülvorganges in kleinen Zweitakt-Schnellläuferzylindern"^{x)} haben wir eine Einrichtung beschrieben, die der Aufgabe dient, den Spülvorgang in kleinen Zweitakt-Schnellläufern bis herunter zu den bei Motorrädern üblichen Grössen unter möglicher Angleichung an die Wirklichkeit noch bei einigen Tausend Umdrehungen pro Minute durch ein stroboskopisches Verfahren sichtbar zu machen, so dass er sowohl mit dem Auge verfolgt, wie photographisch aufgenommen werden kann. Dabei wurde der Kolben durch ein Rastgetriebe bewegt, so dass sich die Kolbenbewegung nur über den Bereich der Spül- und Auslassschlitze erstreckte. Die Spülluft wurde dem Zylinder mit konstantem Druck aus einem Vorratskessel, in den ein unabhängig angetriebener Kompressor förderte, zugeführt. Wir haben damals schon mitgeteilt, dass wir die Einrichtung weiter entwickeln bzw. neue Einrichtungen schaffen würden, in denen der Spülvorgang mehr und mehr dem wirklichen angenähert werden sollte.

Wir werden nachstehend über diese Entwicklung und über einige Ergebnisse, die insbesondere den Einfluss von Spüldruck und Drehzahl auf das Spülbild betreffen, berichten. Hierbei wird die Kenntnis der oben genannten Veröffentlichung vorausgesetzt.

1.) Beleuchtungs- und Aufnahmetechnik.

Die früher beschriebene Beleuchtungsanlage ist grundsätzlich die gleiche geblieben, doch wurde die s.Zt. benutzte Bogenlampe durch eine andere ersetzt und damit eine Lichtstärke von $1,7 \cdot 10^6$ Lux

^{x)} Heft 7 der Kraftfahrtechnischen Forschungsarbeiten.

gemessen in der mittleren Querschnittsfläche der den Zylinder durchsetzenden Lichtschicht, erreicht.

Dabei hat es sich als zweckmässig herausgestellt, die Lichtschicht, nicht wie früher beschrieben, unmittelbar durch den Zylinder fallen, sondern unter Zwischenschaltung eines Spiegels unter 45° von oben her in den Zylinder eintreten zu lassen, weil dadurch die Bildung von Lichtreflexen an den ausserhalb der Lichtschicht liegenden Wänden des Zylinders erheblich herabgesetzt wird. Bild Nr.1 zeigt das entsprechende Schema der Lichtführung. Dabei ergibt sich noch der Vorteil, dass die Lichtschicht stets bis auf den Kolbenboden herunterreicht. Dies kann ausgenutzt werden, um durch schräge Beobachtung mit dem Auge oder mittels der Kamera, Bilder zu erhalten, welche die Spülströmung auch unmittelbar am Kolbenboden erfassen, obwohl der durchsichtige Teil des Zylinders nicht bis auf die tiefste Stellung des Kolbenbodens heruntergeht. Das ist besonders dann vorteilhaft, wenn die Strömung an den Ein- oder Auslassöffnungen beobachtet werden soll und die Lichtschicht zu diesem Zweck entsprechend nahe an diese Öffnungen gelegt wird. Man erkennt dies in Bild Nr.2, auf dem die Lichtschicht unmittelbar vor der Mündung eines Spülkanals liegt. Dabei ergibt sich durch das tiefere Eindringen des Lichtstrahls in das Zylinderinnere nach unten, wie Bild Nr.3 zeigt, auch noch der Vorteil, dass bei Lage der Lichtschicht in der Mittelebene des Zylinders eine indirekte Beleuchtung von seitlich liegenden Kanälen zustande kommt, so dass auch die Stellung des Kolbens im Verhältnis zu diesen Kanälen mit dem Auge und auch im Lichtbild deutlich erkannt werden kann. Als Spiegel empfiehlt es sich zwecks Herabsetzung der Lichtverluste und Vermeidung von Reflexen, einen Oberflächenspiegel, z.B.

mit Rhodiumbelag, zu verwenden.

Die Aufnahmen werden zweckmässigerweise mit einer normalen Kleinbildkamera z.B. Contax oder Leica gemacht, denn

- 1.) zeichnet sich diese durch Handlichkeit gegenüber Apparaten grösseren Formates aus
- 2.) hat sie eine geringe Brennweite und darum bei geringem Kameraabstand vom Objektiv eine noch genügend grosse Schärfentiefe
- 3.) hat sie im Verhältnis zu ihrer geringen Brennweite eine grosse Objektivöffnung und lässt darum geringe Belichtungszeiten zu.

Man könnte meinen, dass es auf eine geringe Belichtungszeit nicht ankommt, da ja durch die stroboskopische Beleuchtung ein zu einer bestimmten Kolbenstellung gehöriges Bild beliebig lang festgehalten werden kann. Man muss aber bedenken, dass dieses scheinbare Dauerbild sich aus lauter hintereinander, und zwar bei jeder Umdrehung einmal erscheinenden Einzelbildern zusammensetzt. Wenn man daher zu lange belichtet, erscheinen zu viele Bahnen von Teilchen des Einstreumaterials, und das Bild wird verschwommen; andererseits ist es auch nicht angängig, unter eine gewisse Belichtungszeit herunterzugehen, da sonst zu wenig Bahnen von Einzelteilchen erscheinen, um noch ein genügend deutliches Gesamtbild der Strömung im ganzen Strömungsfeld zu erhalten. Zu beachten ist ferner, dass man durch eine Belichtungszeit, die länger als die Dauer einer Umdrehung ist, die Notwendigkeit umgeht, die Öffnung der Kamera mit dem Vorbeipassieren des rotierenden Schlitzes vor dem festem Schlitz der stroboskopischen Einrichtung zu synchronisieren. Als Zahl der Bilder, die übereinander photographiert werden müssen, um ein gutes, genügend dichtes Gesamtbild

der Strömung zu bekommen, hat sich bei unserer Einrichtung etwa 10 bewährt, d.h. die Kamera muss während der Dauer von 10 Umdrehungen offen bleiben. Dies entspricht z.B. bei 1000 U/min einer Öffnungszeit der Kamera von 0,6 Sekunden und bei 2000 U/min einer Öffnungszeit von etwa 0,3 Sekunden. Auf jede einzelne Umdrehung entfällt daher eine Öffnungszeit der Kamera von 0,06 bzw 0,03 Sekunden. Da nun bei der vorhandenen Schlitzbreite während jeder Umdrehung nur ein Lichtblitz von der Dauer von etwa $1/100$ einer Umdrehung in die Kamera gelangt, so ergibt sich als Belichtungszeit eines einzelnen auf der Platte erscheinenden Einstreuteilchens die Zeit von 0,0006 Sekunden bei 1000 U/min und von 0,0003 Sekunden bei 2000 U/min, vorausgesetzt, dass die Bahn dieses Teilchens während der genannten Zeit vollkommen in der Beleuchtungsschicht liegt.

Es ist zweckmässig, die Kamera zusammen mit einer Vorsatzlinse zu benutzen. Dadurch wird es möglich, den Abstand vom Objektiv zur Kamerarückwand erheblich zu verkleinern und damit Bildwinkel und Abbildungsstab entsprechend zu vergrössern. Die praktisch notwendige Schärfentiefe, die die Dicke der Lichtschicht wir haben im allgemeinen 8 mm gewählt - etwas übertreffen muss, lässt sich dann durch Abblenden erreichen.

Bei unseren Versuchen, bei denen es sich um die Gewinnung der Spülbilder von Zylindern mit einem Hubvolumen von 200 - 350 cm³ handelte, haben wir eine Contax benutzt mit dem Objektiv Sonnar 1:1,5 mit einer Vorsatzlinse Proxar 2x42, einem Objektivabstand von Mitte der Lichtschicht bis Scheitel der Vorsatzlinse von 315 mm bei der Blende 1:4. Selbstverständlich sind diese Einstellungen und Ziffern nicht ohne weiteres auf andere Fälle, bei denen grössere Zylinder, andere Lichtschichtdicken, andere

Optiken und andere Beleuchtungsstärken verwendet werden, Übertragbar, man muss vielmehr von Fall zu Fall die günstigsten Verhältnisse durch Überlegung und Versuch ermitteln.

Als gut geeignetes Filmmaterial erwies sich Agfa-Ultra-Isopanfilm mit einer Empfindlichkeit von $23/10^0$ Din.

Um die trotz aller Sorgfalt der Lichtführung noch verbleibenden Lichtreflexe, die sich im photographischen Bild infolge von Lichthofbildungen sehr störend bemerkbar machen, zu beseitigen, ist es zweckmässig, den Glaszylinder innen und aussen so weit mit schwarzem Mattlack zu bestreichen, dass nur die jeweils für das Eindringen der Lichtschicht und für das Beobachten und Photographieren notwendigen Glasflächen frei bleiben. Bei gewölbtem Kolbenboden empfiehlt es sich, auch diesen mit Mattlack anzustreichen. Schliesslich ist es auch zweckmässig, eine Maske aus schwarzer Pappe nach Bild 4 vor den Zylinder zu setzen, so dass die Öffnung, durch welche beobachtet oder photographiert wird, durch diese Maske eingerahmt wird.

Zur genauen Anzeige der jeweils durch die stroboskopische Beleuchtung erscheinenden Kolbenstellung wurde eine Einrichtung ausgeführt, deren Schema aus Bild 5 hervorgeht. Auf der rotierenden Schlitzscheibe ist ein Kontaktstreifen a angebracht. Dieser ist mit einem ebenfalls auf der Scheibe sitzenden Schleifring b, auf dem dauernd der Schleifkontakt c läuft, leitend verbunden. Im Augenblick, wo der Kontaktstreifen a vor dem Schleifkontakt d vorbeigeht, kann der Strom von der Batterie über die Leitung L_1 zu Leitung L_2 fliessen und von hier weiter über den Schleifkontakt e auf den Schleifring f und auf den über den halben Umfang einer mit der Kurbelwelle umlaufenden Trommel schraubenförmig aufgewickelten Kontaktstreifen g. Von diesem wird er durch

den Schleifkontakt h abgenommen, durch die Leitung L_3 über die Glimmlampe i und durch die Leitung L_4 zur Batterie zurückgeführt. Stromschluss ist also nur vorhanden, wenn die beiden Schleifkontakte d bzw. h gleichzeitig auf den Kontaktstreifen a bzw. g schleifen. Nun ist aber der Schleifkontakt h in der in der Skizze angegebenen Weise verschiebbar angebracht; wird der Stator, des die Schlitzscheibe antreibenden Synchronmotors verdreht und damit die Phase der jeweils beleuchteten Kolbenstellung verändert, so muss auch der Schleifkontakt h in der entsprechenden Richtung verschoben werden, damit die Glimmlampe aufleuchtet. Für die Stellung des Schleifkontaktes h ist eine Skala vorgesehen, die nach entsprechender Eichung die jeweils beleuchtete Kolbenstellung und damit auch die momentane Eröffnung der Spülkanäle angibt.

2.) Einstreumaterial zur Sichtbarmachung der Spülbilder.

Wir haben s.Zt. berichtet, dass sich als geeignetes Einstreumaterial sogenannter Zellenleim in fein geschrotetem Zustand als brauchbar erwiesen hat. In den letzten Jahren ist nun für ähnliche Zwecke vielfach das unter dem Namen Hartspiritus bekannte Metaldenhyd verwendet worden, weil sich daraus Teilchen von sehr geringer Sinkgeschwindigkeit erzeugen lassen, die der Bewegung der Luft genau folgen. Auch wir haben dieses Material für unsere Zwecke zu verwenden versucht, mussten es aber wieder verlassen, weil es bei den in unserer Versuchseinrichtung vorkommenden hohen Luftgeschwindigkeiten so zerblasen wurde, dass die Strombahnen nicht mehr erkennbar waren.

Da nun gegen die Verwendung des Zellenleims gelegentlich eingewendet wurde, dass er zu schwer sei und durch seine Massen-

wirkung das Strömungsbild verfälschen könnte, haben wir nach dieser Richtung hin einige Versuche angestellt. So haben wir z.B. Vergleichsversuche mit Zellenleim einerseits und dem am Pappelsamen sitzenden ausserordentlich leichten Flaum andererseits gemacht und dabei festgestellt, dass ein merkbarer Unterschied in den Strömungsbildern nicht vorhanden war.

Wir haben einen weiteren Versuch mit einem Zylinder, bei welchem Spülkanäle so gegeneinander gerichtet waren, dass die aus ihnen ausströmende Luft nach dem Zusammentreffen in einen gemeinsamen Strom weiterfloss, in der Weise durchgeführt, dass wir bei abgenommener Glashaube der durch einen Spülkanal fliessenden Luft Rauch und der durch den anderen Spülkanal fliessenden Luft Zellenleim beigemischt haben. Dabei zeigte sich, dass der gemeinsam nach dem Zusammentreffen entstandene Strom gleichmässig von Rauch und Zellenleim erfüllt war, d.h. also, dass der Zellenleim nicht etwa durch seine Massenwirkung aus dem Bereich des Luftstromes hinausschoss, sondern in ihm ebenso wie der Rauch gehalten wurde. Bei aufgesetzter Haube lassen sich Versuche mit Rauch nicht durchführen, da sich der Raum ganz damit füllt und Strahlengrenzen nicht erkennbar sind.

Wir sehen ferner einen Beweis für die Brauchbarkeit des Zellenleimes als Einstreumaterial in dem Ergebnis des folgenden von uns durchgeführten Versuches. In einem dicht oberhalb der Spülkanäle abgeschnittenen Zündapp-Zylinder wurde allein durch die unter 30° gegen die Vertikale einmündenden hinteren Spülkanäle mit Zellenleim versetzte Spülluft geblasen. Dabei entstand bei ruhendem Kolben und voll geöffneten Spülkanälen das in Bild 6 dargestellte Freistrahnbild. Wurde dann, ohne den Spülstrom zu unterbrechen, ein oben offener Glaszylinder auf den abgeschnittenen

Motorzylinder gesetzt, so ergab sich das in Bild 7 dargestellte Strömungsbild. Man sieht in Bild 6, dass der Freistrah, entsprechend der Mündungsrichtung der Spülkanäle nach der Mitte des Zylinders zu geneigt ist, während er sich bei aufgesetztem Glaszylinder aufgerichtet und an die benachbarte Wand angelehnt hat; die Teilchen folgen also auch einer so geringen Ablenkungswirkung, wie sie von einer benachbarten Wand auf einen Luftstrahl ausgeübt wird.

Nach allen diesen Ergebnissen haben wir uns entschlossen, bei der Verwendung von Zellenleim als Einstreumaterial zu bleiben, umso mehr, als die Herstellerfirma uns neuerdings ein Material dieser Art zur Verfügung gestellt hat, das noch erheblich leichter als das bei den beschriebenen Versuchen verwendete ist. Die Sinkgeschwindigkeit der Zellenleimteilchen beträgt je nach dem Grad der Schrotung 10 - 30 cm/sec.

Das Einstreumaterial wurde bei der ersten Einrichtung (Heft 7 der Kraftfahrtechnischen Forschungsarbeiten) aus einem dicht vor dem Zylinder auf die Luftzuführungsleitung aufgesetzten Vorratskessel entnommen, wobei seine Menge durch einen von Hand betätigten Schieber reguliert wurde. Dabei wurde sein Zufließen zum Zylinder dadurch unterstützt, dass die Spülluft auch den Vorratskessel auflud, beim Öffnen der Spülkanäle aus dem Vorratskessel etwas expandierte und dabei das Material mitnahm.

Bei der in Abschnitt 4 beschriebenen Versuchseinrichtung mit vollem Kolbenhub und Kurbelkastenspülung wurde das Einstreumaterial aus einem am Ansaugestutzen angeschlossenen Vorratsbehälter entnommen, also im wesentlichen durch Ansaugen gefördert.

Bei diesem Vorgang liess sich naturgemäss keine so gleichmässige Beimischung des Einstreumaterials erreichen wie bei dem vorher beschriebenen Verfahren. Infolgedessen fallen die Bilder bei der Einrichtung mit Rastgetriebe und Fremdspülung im allgemeinen ausgeprägter und klarer aus als bei der Einrichtung mit Kurbelkastenspülung (vergl. hierzu auch Abschnitt 6a).

Bei beiden Einrichtungen war es auch möglich, das Einstreumaterial unmittelbar in die Spülkanäle einzuführen und zwar durch Anschliessen einer mit diesem Material gefüllten Flasche. Dabei bewirkte das Pulsieren des Druckes eine nicht ganz so gute aber immer noch genügend gleichmässige Beimischung des Materials zu der Spülluft. Verwendet wurde dieses Verfahren, um die Spülkanäle einzeln mit Einstreumaterial zu beschicken, so dass die aus dem betreffenden Kanal kommende Teilströmung beobachtet werden konnte. Dieses Verfahren ist in erster Linie bei der Einrichtung mit Fremdspülung brauchbar; bei Einrichtung mit Kurbelkastenspülung wird die Verwendungsmöglichkeit dieses Verfahrens dadurch eingeschränkt, dass durch das Anschliessen der Flasche unmittelbar an einen Spülkanal eine Vergrösserung des Kurbelkastenraumes und damit eine Veränderung des Spüldruckverlaufes bewirkt wird.

3.) Aufladung des Zylinders zur Nachahmung des Expansionsenddruckes.

Um den Expansionsenddruck nachzuahmen, der im Zylinder im Augenblick der Eröffnung der Auslasskanäle vorhanden ist und das Spülbild beeinflussen kann, haben wir die nachstehend beschriebene Aufladeeinrichtung ausgeführt (Bild 8). Diese Druckaufladung

wurde sowohl bei der schon in Heft 7 der Kraftfahrtechnischen Forschungsarbeiten beschriebenen Einrichtung wie bei den in den Abschnitten 4 und 5 geschilderten vorgesehen.

In die Plexiglashaube wurde ein Ventil eingebaut, das von einem Nocken auf der Kurbelwelle über ein Kipphebelgestänge betätigt wurde. Der Nocken war auf der Kurbelwelle verdrehbar, so dass Beginn und Ende der Aufladezeit verstellt werden konnten. Das Ventil war seitlich am oberen Teil der Haube angebracht, damit die von oben einfallende, in der Hauptsymmetrieebene liegende Lichtschicht nicht gestört wird. Die Ausführung der Zylinderhaube aus Plexiglas ermöglicht ohne weiteres an beliebiger Stelle ein Aufschrauben von Verstärkungsflanschen und damit die Anbringung des Ventiles.

Es hat sich als zweckmässig herausgestellt, die Aufladung erst nach dem oberen Totpunkt erfolgen zu lassen, da dann die Lässigkeitsverluste ziemlich klein bleiben und die Druckluft nur im Sinne der Kolbenbewegung wirkt. Dies war besonders wichtig bei der Einrichtung mit vollem Kolbenhub, die unter Abschnitt 4 beschrieben wird. Die Druckluft wurde in ähnlicher Weise wie die Spülluft einem Windkessel entnommen, in den ein Kompressor förderte. Durch Indizieren wurde nachgeprüft, ob zu Beginn des Auslassvorganges der gewünschte Druck im Zylinder vorhanden war. Die Expansion der Aufladeluft im Zylinder, insbesondere beim Ausströmen aus den Auslasschlitzen, bewirkt eine Abkühlung und infolgedessen eine Nebelbildung im Zylinder, die die Beobachtung störte. Es war deshalb notwendig, die Aufladeluft vorzuwärmen, was durch einen elektrischen Heizkörper in der Aufladeleitung unmittelbar vor dem Ventil geschah. Übrigens zeigte sich, dass die Plexiglashaube, an der sich unter Umständen die feinen Einstreu-

teilchen infolge Reibungselektrizität festsetzen, bei Druckaufladung besser sauber gehalten wurde als ohne diese.

Während eine mehr oder weniger gute Abdichtung des Kolbens gegenüber der Zylinderwand bei den Versuchen ohne Druckaufladung keine sehr erhebliche Bedeutung hat, muss natürlich bei Druckaufladung für eine sorgfältige Abdichtung des Kolbens durch selbstspannende Kolbenringe oder, wie in Abschnitt 4 beschrieben, durch einen Filzring erfolgen, damit die Lässigkeitsverluste nicht zu gross werden. Dies ist besonders wichtig bei Kurbelkastenspülung, damit keine zu grosse zusätzliche Aufladung im Kurbelkastenraum entsteht. Gelingt es nicht, eine genügende Abdichtung des Kolbens zu erzielen, so kann man sich durch Anbringen eines Abblaseventiles am Kurbelkastenraum helfen, dessen Feder so eingestellt wird, dass der Druck im Kurbelkastenraum den im wirklichen Betrieb vorhandenen nicht übersteigt.

4.) Versuchseinrichtung mit vollem Kolbenhub und Kurbelkastenspülung.

Um zu untersuchen, ob und wie weit die früher beschriebene Rasttriebseinrichtung mit reduziertem Kolbenhub Spülbilder ergibt, die mit den bei Betrieb eines Motors mit vollem Kolbenhub erhaltenen übereinstimmen, wurde eine weitere Versuchseinrichtung geschaffen, die im wesentlichen aus einem Original-DKW-Motor von 200 cm³ Hubvolumen bestand. Bei dieser Einrichtung würde bei unveränderter sonstiger Konstruktion auch der Teil des Kolbens, in dem sich der Kolbenbolzen befindet und der im wesentlichen einen Seitendruck auf die Zylinderwand ausübt, noch in den gläsernen Teil des Zylinders hineinlaufen. Um dies zu vermei-

den, wurde zwischen Zylinder und Kurbelkasten ein Zwischenstück eingebaut, und zwar von einer solchen Länge, dass der untere Teil des Kolbens mit dem Kolbenbolzen auch in der oberen Totlage noch im gusseisernen Teil des Zylinders blieb (Bild 9). Gleichzeitig mit Einfügen dieses Zwischenstückes musste eine entsprechende Verlängerung des Kolbens vorgesehen werden, damit das Zylindervolumen über dem Kolben gleich bleibt und die Spülkanäle richtig gesteuert werden. Wir haben die Kolbenverlängerung aus Leichtmetall oder Kunststoff mit geringem Spiel gegenüber dem Glaszylinder hergestellt und zur Erreichung einer genügenden Abdichtung mit einem gefetteten Filzdichtungsring versehen. Dieser Ring lief einwandfrei auf dem Plexiglaszylinder, ohne ihn zu verschmieren. Die durch die Verlängerung der Spülkanäle entstandene Vergrößerung des Kurbelkastenvolumens wurde durch entsprechendes Ausfüllen des Kolbeninnenraumes ausgeglichen. Da durch das Einsetzen des Zwischenstückes zwischen Zylinder und Kurbelgehäuse die Kolbenunterkante die Einlassschlitze nicht mehr steuern kann, mussten im Kolbenmantel (nach Bild 9) zwei weitere Öffnungen A eingeschnitten werden, die diese Aufgabe zu erfüllen haben.

Im Gegensatz zu der früheren Einrichtung mit verkürztem Kolbenhub, bei welcher die Spülluft dauernd bei konstantem Druck aus einem Windkessel, in den ein Kompressor förderte, zugeführt wurde, wurde hier die Luft in der beim Motor üblichen Weise vom Kolben durch den Kurbelkasten angesaugt.

Wie schon in Abschnitt 2 beschrieben, wurde das Einstreumaterial bei dieser Einrichtung dem Ansaugstutzen am Kurbelkasten aus einem Vorratsbehälter zugeführt. Dabei mussten die im Kurbelkasten befindlichen Wälzlager gut verkleidet werden, da sich das

Einstreumaterial sonst in ihnen festsetzte und den Betrieb der Maschine störte. Das im Pleuelstangenkopf der Maschine vorhandene Nadellager wurde durch ein Gleitlager ersetzt, weil das Einstreumaterial sich zwischen die Nadeln setzte und diese am Laufen hinderte. Die Einrichtung wurde von einem Elektromotor angetrieben. Die stroboskopische Beleuchtungseinrichtung war dieselbe wie bei der ersten Versuchseinrichtung.

Bei der Einrichtung mit vollem Kolbenhub, bei welcher naturgemäss grössere Gleitgeschwindigkeiten zwischen Kolben und Zylinderwand auftreten als bei der Einrichtung mit reduziertem Kolbenhub, ergaben sich gewisse Schwierigkeiten bezüglich der Schmierung des Kolbens. Diese wurden vermieden, indem im gusseisernen Teil des Zylinders einige Rillen eingedreht wurden, in die von aussen her Fett gepresst wurde (siehe Bild 9). Dabei entstand aber wieder die Gefahr des Verschmierens des Glaszylinders, so dass die Schmierung nur sehr sparsam vorgenommen werden durfte. Bei den Versuchen mit Druckaufladung trat allerdings das Verschmieren niemals auf, weil nach oben durchtretendes Schmierfett durch den Aufladedruck zusammen mit dem Einstreumaterial aus den Auslasskanälen herausgedrückt wurde.

5.) Versuchseinrichtung mit reduziertem Kolbenhub und nachgeahmter Kurbelkastenspülung.

Um die einfache Einrichtung mit reduziertem Kolbenhub auch zur Untersuchung der Kurbelkastenspülung benutzen zu können, haben wir eine Einrichtung nach Bild 10 geschaffen. Bei dieser wurde die Kurbelkastenspülung in folgender Weise nachgeahmt:

Unter dem Zylinder wurde ein Raum A gebildet, dessen Inhalt

gleich dem des Kurbelkastenraumes ist. Die Verbindung des Kolbens mit dem Triebwerk wurde durch eine Kolbenstange hergestellt. Diese wurde in der Buchse B, die zugleich die Abdichtung des Raumes A gegen das Triebwerk vornimmt, geführt. Die Spülluft wurde aus dem Windkessel mit konstantem Druck entnommen und gelangte durch den Vergaserschluss in den Kanal D und durch zusätzliche Kolbenfenster E in den oben erwähnten Raum A. Diese zusätzlichen Fenster E waren erforderlich, weil der Kolben nicht seinen ganzen Hub, sondern infolge der Ausbildung des Triebwerkes als Rastgetriebe nur einen Hub von 34 mm machte, so dass der Kanal D nicht, wie sonst üblich, von der Unterkante des Kolbens gesteuert werden konnte. Aus dem gleichen Grunde, bzw. weil der Kolben seines geringen Hubes wegen im Raum A weder genügend Luft ansaugen, noch diese auf den notwendigen Spüldruck komprimieren kann, musste die Spülluft aus einem Windkessel mit einem gewissen Anfangsdruck zugeführt werden. Dieser Druck wurde durch Indizieren so bestimmt, dass der Verlauf des Spüldruckes während der Spülperiode demjenigen bei einem wirklichen Motor mit Kurbelkastenspülung glich. Hierbei ergab sich durch die Verwendung von Fremdluft aus einem Windkessel der in Abschnitt 2 erwähnte Vorteil, dass das Einstreumaterial durch Aufladung des Vorratsbehälters und Expansion aus demselben dem Zylinder zugeführt wurde.

6.) Ergebnisse.

a) Vergleich der benutzten Einrichtungen untereinander.

Die Spülbilder bei den Versuchen mit Rastgetriebe und Fremdspülung und die bei dem Motor mit Kurbelkastenspülung sind einander praktisch gleich bis kurz vor voller Eröffnung der Spül-

schlitze bzw. bis kurz vor dem unteren Totpunkt des Kolbens, bis wohin sich auch im allgemeinen das Spülbild voll entwickelt hat. Bild 11 und 12 zeigen z.B. den Strömungsvorgang bei einem DKW-Zylinder mit etwas abgeänderter Schnürle-Umkehrspülung bei $\frac{2}{3}$ Eröffnung der Spülschlitze und zwar Bild 11 für die Rastgetriebeeinrichtung und Fremdspülung und Bild 12 für die Einrichtung mit vollem Kolbenhub und Kurbelkastenspülung. Man sieht, dass beide Bilder praktisch gleich sind, wenn auch das Bild beim Rastgetriebe etwas klarer und ausgeprägter ist. Dies liegt, wie schon in Abschnitt 2 gesagt, daran, dass die Beimischung des Einstreumaterials beim Kurbelkastenmotor ungleichmässiger ausfällt als bei der Einrichtung mit Fremdspülung. Bei aufwärtsgehendem Kolben verschwindet das Spülbild bei der Kurbelkastenspülung rasch, während es bei der Vorrichtung mit Rastgetriebe und Fremdspülung auch beim Aufwärtsgang des Kolbens in irgendeiner Form bestehen bleibt. Wendet man beim Rastgetriebe die in Abschnitt 5 beschriebene Einrichtung zur Nachahmung der Kurbelkastenspülung an, so ergibt sich über die ganze Spülperiode der gleiche Verlauf der Spülbilder wie bei der Kurbelkastenspülung mit vollem Hub.

Man kann also die Einrichtung mit Rastgetriebe und Fremdspülung, die sich durch ihre grosse Einfachheit, bequeme Betriebsweise und klare Bilder auszeichnet, verwenden:

- a) zur Sichtbarmachung der Spülströmungen in Motoren mit Fremdspülung
- b) aber auch zu Untersuchungen der Spülströmungen in Motoren mit Kurbelkastenspülung, wenn man sich hier auf die Betrachtung der Strömungen bis etwa zur vollen Eröffnung bzw. bis zum unteren Totpunkt des Kolbens beschränkt.

Auch die Druckaufladung kann bei der Einrichtung mit Eastgetriebe häufig entbehrt werden, da sie auf das endgültig entwickelte Spülbild ohne wesentlichen Einfluss bleibt. Die Druckaufladung hat jedoch den Vorteil, dass sie das störende, vorübergehende Rückströmen aus der Auslassleitung nach Eröffnung der Auslassschlitze, das bei fehlendem Expansionsenddruck auftritt und auf Bild 13 sichtbar ist, verhindert (vergl. Abschnitt 3). Dieses Rückströmen ist übrigens auch im Auspuffrohr selbst bei geeigneter stroboskopischer Beleuchtung sichtbar.

Das Rückströmen aus dem Auspuffrohr kann, wie besondere Versuche gezeigt haben, durch Einbau einer leichten Rückschlagklappe in die Auspuffleitung unmittelbar am Zylinder verhindert werden, ohne dass dadurch der Verlauf der Spülung beeinflusst wird.

b) Verwendung der beschriebenen Versuchseinrichtungen zu grundsätzlichen Untersuchungen und zu Modellversuchen.

Wenn die beschriebenen Einrichtungen in erster Linie auch nur für die Untersuchung des Spülvorganges in kleinen Zweitakt-schnellläufern in Originalgrösse und bis zu den, mit der Versuchseinrichtung erreichbaren Drehzahlen bestimmt waren, so lassen sich mit ihnen doch auch Modellversuche zur Erforschung des Spülvorganges in Motoren mit gleichen Abmessungen aber noch höheren Drehzahlen bzw. in Maschinen mit grösseren Abmessungen und niedrigeren Drehzahlen und allgemeine Untersuchungen über den Spülvorgang durchführen. Hierbei ist es notwendig, sich über die einzuhaltenden, auf den hydrodynamischen Ähnlichkeitsgesetzen beruhenden Modellregeln klar zu werden.

Ähnliche Strömungen können nur in geometrisch ähnlichen Strömungsräumen zustande kommen. Die Spülströmung ist eine nicht-

stationäre Strömung, die durch eine Aufeinanderfolge von momentanen Stromlinienbildern, wie sie durch das stroboskopische Beobachtungsverfahren geliefert werden und deren jedes einer bestimmten Kolbenstellung zugehört, beschrieben wird. Wenn man also von ähnlichen Strömungsbildern spricht, so können damit nur solche gemeint sein, die in geometrisch ähnlichen Zylindern mit ähnlichen Kolbenformen und Spülkanalanordnungen bei ähnlichen, d.h. verhältnismässig gleichen Kolbenstellungen vorkommen. Aber auch die in diesem Falle eintretende geometrische Ähnlichkeit der Strömungsräume genügt noch nicht für die Möglichkeit des Zustandekommens ähnlicher Strömungsfelder. Es kommt vielmehr eine weitere sogenannte Randbedingung und zwar eine kinematische hinzu. In zwei ähnlichen Strömungsfeldern müssen nämlich die Geschwindigkeiten mit allen ihren Komponenten in beliebigen, ähnlich gelegenen Punkten des Strömungsfeldes in gleichem Verhältnis zu einander stehen. Nun ist eine Wand des Strömungsraumes, nämlich der Kolbenboden, bewegt und die Geschwindigkeitskomponenten der Spülströmung am Kolbenboden normal zu diesem müssen gleich der momentanen Kolbengeschwindigkeit sein. Daraus folgt, dass in ähnlichen Spülströmungen das Verhältnis der momentanen Kolbengeschwindigkeit zu der Strömungsgeschwindigkeit an irgend welchen beliebig ausgesuchten, aber in den verglichenen Strömungsfeldern ähnlich gelegenen Punkten das gleiche sein muss. Sowohl für die Kolbengeschwindigkeit als auch für die Spülgeschwindigkeiten kann man die zeitlichen Mittelwerte nehmen, da alle örtlichen und zeitlichen Sonderwerte dieser Grössen bei ähnlichen Vorgängen untereinander und zu den Mittelwerten in einem festen Verhältnis stehen. Bezeichnet man den Mittelwert der Spülgeschwindigkeit an irgendeiner Stelle, z.B. in den Spülkanälen mit c_s und die mittlere Kolbengeschwindigkeit mit c_k , so ist Gleichheit des Verhältnisses $\frac{c_s}{c_k}$ die kinematische

Bedingung für die Möglichkeit des Zustandekommens ähnlicher momentaner Strömungsbilder bei verhältnismässig gleichen Kolbenstellungen. Hieraus erhellt bereits, dass Strömungsbilder bei bewegtem Kolben nicht denjenigen, die man bei gleicher Kolbenstellung, aber stillstehendem Kolben erhält, ähnlich sein können; mit anderen Worten: Die Form der bei gleichen Kolbenstellungen zustandekommenden Strömungsbilder ist von dem Verhältnis $\frac{c_s}{c_k}$ abhängig.

Zu dieser Abhängigkeit der Strömungsbilder von den genannten geometrischen und kinematischen Randbedingungen tritt nunmehr noch die Abhängigkeit von dem Verhältnis der massgebenden Kräfte. Diese sind, da die Spülströmungen in geschlossenen Räumen ohne freie Oberflächen verlaufen, die Trägheits- und Reibungskräfte. Deren Verhältnis muss daher an ähnlich gelegenen Punkten der verglichenen Strömungsfelder das gleiche sein. Nun ist dieses Verhältnis aber, wie sich leicht zeigen lässt, für alle Punkte proportional der sogenannten Reynolds'schen Zahl. Diese ist aus einer charakteristischen Geschwindigkeit des Strömungsfeldes, in unserem Fall am besten c_s , einer charakteristischen Längenabmessung des Strömungsraumes, in unserem Falle dem Zylinderdurchmesser d , und der kinematischen Zähigkeit ν des Strömungsmittels in der Form

$$\text{Rey} = \frac{c_s \cdot d}{\nu}$$

zu bilden. Das sogenannte Reynolds'sche Ähnlichkeitsgesetz sagt nun aus:

In ähnlichen Strömungsräumen tritt bei Einhaltung ähnlicher kinematischer Randbedingungen Ähnlichkeit der Strömungsbilder nur dann ein, wenn die Reynolds'sche Zahl für die verglichenen Strömungsvorgänge die gleiche ist. Ist aber die Ähnlichkeit durch

Gleichheit der Reynolds'schen Zahl wirklich gewährleistet, so ist auch das Verhältnis der Druckkräfte zu den Trägheitskräften an ähnlich gelegenen Punkten das gleiche und deshalb wachsen dann die Druckunterschiede zwischen ähnlich gelegenen Punkten der verglichenen Strömungsfelder im gleichen Verhältnis zum Quadrat einer beliebig, aber in den verglichenen Feldern gleich ausgewählten Geschwindigkeit, wofür man in unserem Falle auch wieder am besten c_s nimmt. Mit anderen Worten:

Für den Druckunterschied Δp_{m-n} zwischen den ähnlich gelegenen Punkten m und n mehrerer verglichener Strömungsfelder kann die Gleichung

$$\Delta p_{m-n} = \lambda_{m-n} \cdot s \cdot \frac{c_s^2}{\lambda}$$

angeschrieben werden; wobei λ_{m-n} für verschiedene Punktpaare m, n selbstverständlich verschieden, aber für ähnlich gelegene Punktpaare in allen verglichenen Strömungsfeldern das gleiche ist, wenn die Reynolds'sche Zahl die gleiche ist. Jedes beliebige λ_{m-n} wird sich also im allgemeinen mit der Reynolds'schen Zahl ändern, es ist also eine Funktion der Reynolds'schen Zahl.

Da die Messung solcher Beiwerte λ durch Druckmessungen verhältnismässig leicht auszuführen ist, so kann man hierdurch am schnellsten prüfen, in welcher Weise die Strömungen in ähnlichen Räumen bei ähnlichen kinematischen Randbedingungen von der Reynolds'schen Zahl abhängen, worüber das Reynolds'sche Gesetz selbst nichts aussagt. Ergibt sich in ähnlichen Strömungsräumen bei ähnlichen kinematischen Randbedingungen Unabhängigkeit der Beiwerte λ von der Reynolds'schen Zahl, so heisst das: Die Form der Strömungsbilder ist ebenfalls von Rey unabhängig.

Es ist nützlich, die Zahl der in Frage kommenden unabhängigen Variablen nochmals zusammenzustellen. Diese sind:

1.) Form und Anordnung der Strömungsräume.

Im Grossen wird diese durch Angabe einer Reihe von Verhältniszahlen beschrieben z.B. Hub s zu Durchmesser d , Spülquerschnitt f_s zu Zylinderquerschnitt f_k , Spülkanallänge l_s zu Zylinderdurchmesser und dergl. mehr. Im Kleinen gehören aber hierzu auch die Rauigkeitsverhältnisse der Wände, die in erster Annäherung durch das Verhältnis der mittleren Grösse r der Rauigkeitserhebungen zum Zylinderdurchmesser d erfasst werden.

Ferner wird die Form des Strömungsraumes auch durch Angabe der verhältnismässigen Kolbenstellung $\frac{x_k}{d}$ beschrieben.

2.) Lage der Punkte, zwischen denen der Druckunterschied betrachtet wird und die durch verhältnismässige Koordinaten $\frac{x_m}{d}$ u.s.w. beschrieben wird.

3.) Verhältnis $\frac{c_s}{c_k}$

4.) Reynolds'sche Zahl $\frac{c_s \cdot d}{\nu}$

Für λ_{m-n} erhält man also die Gleichung:

$$\lambda_{m-n} = f\left(\frac{s}{d}, \frac{f_s}{f_k}, \frac{l_s}{d} \text{ u.s.w.}, \frac{r}{d}; \frac{x_k}{d}, \frac{x_m}{d} \text{ u.s.w.}, \frac{c_s}{c_k}, \frac{c_s \cdot d}{\nu}\right)$$

Im allgemeinen kommt zu diesen unabhängigen Variablen noch die Zeit hinzu. Wie aber schon oben bemerkt, darf man unter c_s und c_k auch zeitliche Mittelwerte verstehen. c_s ist also der Quotient $\frac{Q_s}{f_s}$, worin Q_s den zeitlichen Mittelwert der sekundlich geförderten Spülluftmenge bedeutet. Unter Δp ist dann die Differenz: Spüldruck minus Auslassdruck zu verstehen; diese beiden Drücke sind möglichst an solchen Stellen zu messen, die von dem bei bewegtem Kolben gegebenen nichtstationären Charakter des Durchflusses durch den Zylinder nicht mehr berührt werden. (Hierzu

müssen bei den Versuchseinrichtungen unter Umständen Ausgleichsbehälter in die Spül- und Auspuffleitung eingebaut werden.) Aus der Anzahl der unabhängigen Variablen in der letzten Gleichung verschwindet dann naturgemäss das Verhältnis $\frac{x_k}{d}$ (die Kolbenstellung) und m und n sind speziell festgelegt.

Weitere Ähnlichkeitsbedingungen und einflussnehmende Grössen bestehen nicht. Da nämlich die auftretenden Geschwindigkeiten von der Grössenordnung der Hälfte der Schallgeschwindigkeit sind, so kann man die Spülströmungen als Strömungen einer unzusammendrückbaren Flüssigkeit ansehen. Erst wenn man bei Modellversuchen die Reynolds'sche Zahl so weit steigern würde, dass man die Geschwindigkeiten der Schallgeschwindigkeit stark nähert, käme als weitere Ähnlichkeitsbedingung die Gleichheit der Machschen Zahl $\frac{\text{Spülgeschwindigkeit}}{\text{Schallgeschwindigkeit}}$ in Frage. Dies wird man aber vermeiden. Von thermischen Einflüssen ist hier ganz abgesehen.

Über die Form der Abhängigkeit des Beiwertes λ von den genannten Grössen sagt, wie bereits erwähnt, das Reynolds'sche Ähnlichkeitsgesetz grundsätzlich nichts aus; hierüber kann nur die Erfahrung Aufschluss geben. Dabei können die einzelnen Abhängigkeiten untereinander verknüpft sein. So kann z.B. der Einfluss der Reynolds'schen Zahl bei verschiedenen Verhältnissen $\frac{c_s}{c_k}$ verschieden sein. Es ist daher bei grundsätzlichen Versuchen immer nötig, alle massgebenden Ähnlichkeitskennwerte, insbesondere auch die Reynolds'sche Zahl möglichst weitgehend zu verändern.

Die Reynolds'sche Zahl kann durch Änderung der Abmessungen des Versuchsobjekts unter Erhaltung der Ähnlichkeit oder durch Steigerung der Geschwindigkeiten und damit der Spüldrücke oder durch Änderung der kinematischen Zähigkeit geändert werden. Am einfachsten ist die Änderung der Geschwindigkeiten an ein und dem-

selben Objekt; schwieriger ist schon die Änderung der Zähigkeit, besonders, wenn man am gleichen Objekt mit verschiedenen Flüssigkeiten arbeiten will. Verhältnismässig einfach ist es noch, Luft als Arbeitsmittel beizubehalten und ihre kinematische Zähigkeit, die ja der Dichte umgekehrt proportional ist und daher mit steigendem Druck abnimmt, dadurch zu verändern, dass man den ganzen Spülvorgang durch Änderung des Spül- und Auslassdruckes um den gleichen Betrag in verschiedenen hohen Druckgebieten ablaufen lässt. Die Reynolds'sche Zahl wächst dann mit steigendem Druckniveau. Dieses Mittel haben wir bei unserer Einrichtung unter anderem auch angewendet und zwar so, dass wir bei verschiedenen Drehzahlen das mittlere Druckniveau im Zylinder durch Drosseln der Auspuffleitung verschieden hoch einstellten und dabei den Spüldruck, d.h. die Druckdifferenz zwischen Einlass und Auslass durch zusätzliche Änderung des Einlassdruckes variierten. Es gelang uns, im Zylinder ein mittleres Druckniveau von $3 \frac{1}{2}$ ata zu erreichen, gleichzeitig den Spüldruck Δp in den Grenzen von 0,04 bis 0,3 atü und damit die Spülgeschwindigkeit etwa im Verhältnis 1 : 2,75 zu ändern. Andererseits konnten wir mit Drehzahlen zwischen 500 und 3000 U/min fahren und so die Kenngrösse $\frac{c_B}{c_k}$ im Verhältnis 1 : 6 ändern. Die Reynolds'sche Zahl wurde durch diese Massnahmen etwa im Verhältnis 1 : 16 variiert. Die Änderung der Abmessungen des Versuchsobjektes bleibt als letztes, allerdings umständliches Mittel zur Veränderung der Reynolds'schen Zahl.

Der Einfluss der Reynolds'schen Zahl lässt sich, wie bereits bemerkt, am leichtesten an der Veränderlichkeit des Beiwertes λ nachweisen. Im Zusammenhang mit der Veränderung von λ muss natürlich eine Veränderung der Strömungsform stehen. Die letztere ist aber im allgemeinen weit schwerer nachzuweisen als die von λ

und tritt bei unmittelbarer Beobachtung oder im Lichtbild fast nur in solchen Fällen deutlich in Erscheinung, wo ein sogenannter "kritischer Wert" der Reynolds'schen Zahl auftritt, bei dem das Strömungsbild deutlich in eine wesentlich andere Form umschlägt und sich der λ - Wert unstetig ändert. Die Feststellung, ob im Gang der Versuchswerte mit der Reynolds'schen Zahl eine solche kritische Stelle auftritt, ist immer sehr wichtig. Wenn sich nämlich λ stetig und langsam mit Rey ändert, so ändert sich das Strömungsbild merklich nur in den Grenzschichten an den Wänden, was aber mit dem Auge oder durch das Lichtbild kaum, sondern nur durch feine Druck- und Geschwindigkeitsmessungen an den Wänden festgestellt werden kann.

Zusammenfassend kann man Folgendes sagen: Wenn man eine Spülung grundsätzlich untersuchen will, so wird man schon aus dem Wunsch heraus, für ihre spätere Anwendung genügend Spielraum zu haben, zunächst verschiedene Verhältnisse $\frac{c_s}{c_k}$ durchprobieren; dabei wird man sowohl die entstehenden Spülbilder beobachten und im Lichtbild festhalten, als auch durch Messung des Spüldruckes und der Spülluftmenge den Beiwert λ bestimmen. Hält man dabei c_k und damit die Drehzahl konstant, so muss man c_s und damit Δp variieren, was sofort auch Variation der Reynolds'schen Zahl in der oben festgesetzten Form bedeutet. Hat man eine solche Versuchsreihe gefahren, so wird man die Drehzahl mehrmals verändern und bei diesen neuen, wiederum konstant gehaltenen Drehzahlen dieselben Änderungen von $\frac{c_s}{c_k}$ vornehmen wie zuvor. Dies bedeutet eine Erweiterung des Bereiches der Reynolds'schen Zahlen im Verhältnis der Drehzahlen; dabei müssen die Spüldrücke mit geändert werden. Erscheint der so gewonnene Bereich von Rey noch ungenügend, so kann man zur Erhöhung des Druckniveaus im Zylinder oder zur

Vergrößerung der Abmessungen des Versuchsobjektes schreiten.

So gewinnt man die Form der Abhängigkeit

$$\lambda = f \left(\frac{c_s}{c_k}; \frac{c_s \cdot d}{v} \right)$$

für die spezielle Spülanordnung, wobei der Fall $c_k = 0$ ($n = 0$) für die praktischen Anwendungen ausscheidet. (Will man ihn mit untersuchen, so müssen die Werte von λ bei verschiedenen Kolbenstellungen beobachtet und ihre Mittelwerte für alle Kolbenstellungen bei verschiedenen Reynolds'schen Zahlen mit den Werten bei laufendem Kolben verglichen werden.) In dem beobachteten Bereich von $\frac{c_s}{c_k}$ und $\frac{c_s \cdot d}{v}$ können die Versuchsergebnisse sofort auf ähnliche Ausführungen und Betriebsverhältnisse übertragen werden, bei einer Extrapolation nach oben oder unten ist aber Vorsicht geboten, weil in den unerforschten Bereichen kritische Stellen liegen können, bei denen die Strömungsbilder umschlagen oder die λ -Werte sich un stetig ändern.

c.) Einige grundsätzliche Ergebnisse.

Bei der Kurbelkastenspülung ist eine willkürliche Variation des maximalen Spüldruckes nicht möglich, bzw. man wird den Kurbelkastenraum so klein wie möglich gestalten, damit der Spüldruck so gross wie möglich wird.

Schon Klüsener hat durch Indizieren des Kurbelkastenraumes von kleinen Zweitaktmotoren^{x)} festgestellt, dass sich der höchste Druck im Kurbelkasten mit steigender Drehzahl nach einer späteren Kolbenstellung hin verschiebt und dass dieser Druck ausserdem gleichzeitig mit der Drehzahl etwas ansteigt.

In Übereinstimmung hiermit haben wir bei unserer Rastgetriebeeinrichtung mit nachgeahmter Kurbelkastenspülung und Druckaufladung zur Nachahmung des Expansionsenddruckes ein ähnliches

^{x)} VDI-Forschungsheft 343, 1930, Seite 42

Verhalten des Spüldruckes in Abhängigkeit von der Drehzahl durch Indizieren festgestellt, und zwar haben sich unsere Versuche auf Drehzahlen in den Grenzen von 1000-2500 U/min. erstreckt. Diese Erscheinung wurde deutlich durch die Beobachtung des Spülbildes bestätigt und zwar insofern, als sich das Spülbild bei höheren Drehzahlen später entwickelt und dafür länger bestehen bleibt. So zeigte sich z.B. bei einer Kurbelkasten-Umkehrspülung nach Art der Schnürlespülung, dass bei einer Drehzahl von 1000 U/min das Spülbild schon bei $\frac{1}{3}$ der Öffnung der Spülkanäle deutlich im Entstehen begriffen war, während es bei 2500 U/min bei der gleichen Kolbenstellung noch nicht im geringsten in Erscheinung trat. Dafür verschwand es bei 1000 U/min kurz nach dem unteren Totpunkt, während es bei 2500 U/min auch noch bei aufwärts gehendem Kolben deutlich bestand.

Diese Erscheinungen haben ihre Ursache im wesentlichen darin, dass der Gasdruck im Zylinder im Augenblick der Eröffnung der Spülkanäle noch höher als der Kurbelkastendruck ist, und dass infolgedessen zunächst eine Rückströmung vom Zylinder zum Kurbelkasten stattfindet. Dies wirkt sich umso stärker aus, je höher die Drehzahl ist.

Bei Fremdspülung kann man den während der ganzen Spülperiode konstanten Spüldruck grundsätzlich in weiten Grenzen beliebig variieren. Wir haben dies auf unserer Einrichtung weitgehend getan und dabei folgendes festgestellt: Wenn man den Spüldruck mit dem Quadrat der Kolbengeschwindigkeit c_k verändert, also das Verhältnis des Spüldruckes zum Quadrat der Kolbengeschwindigkeit konstant hält, so erhält man, soweit sich das mit dem Auge oder im Lichtbild feststellen lässt, bei gleichen Kolbenstellungen gleiche Spülbilder, also im grossen Ganzen ähnliche Strömungen,

so dass man zunächst gleichbleibendes Verhältnis $\frac{c_s}{c_k}$ und daher Unabhängigkeit von der Reynolds'schen Zahl vermutet. Eine Abhängigkeit erkennt man aber bei näherem Zusehen doch. Lutz und Noeggerath untersuchten den Beiwert λ sowohl bei stillstehendem Kolben und verschiedenen Kolbenstellungen als auch bei bewegtem Kolben.^{x)} Sie fanden an Zylindern von etwa 220 m/m Durchmesser bei Drehzahlen bis etwa 250 U/min mit Umkehr- bzw. Querspülung eine ausgeprägte Abhängigkeit $\lambda = f(\text{Rey})$ und zwar in verschiedenem Sinne, je nachdem der Kolben stillstand oder bewegt war. Bei stillstehendem Kolben ergab sich mit wachsendem Rey eine Zunahme von λ , bei laufendem dagegen eine Abnahme. Bei stillstehendem Kolben war die Zunahme von λ mit Rey für alle Kolbenstellungen gleich stark, bei laufendem Kolben war die Stärke der Abnahme von λ mit zunehmendem Rey von der Drehzahl und damit von $\frac{c_s}{c_k}$ abhängig.

Diese Versuche haben wir auf unserer Rastgetriebe-Einrichtung an einem Zylinder von 60 m/m Durchmesser mit Schnürle-Umkehrspülung bei Stillstand und mit Drehzahlen bis zu 2000 U/min wiederholt und das gleiche Verhalten von λ gefunden. Die Resultate mit bewegtem Kolben sind nicht weiter verwunderlich, dagegen überrascht die Tatsache, dass bei stillstehendem Kolben λ mit Rey wächst; eine Erklärung hierfür haben wir bisher, auch nach Vornahme einer Reihe von Druckmessungen an den Zylinderwänden, noch nicht gefunden.

Wenn man das Verhältnis des Spüldurckes zum Quadrat der Kolbengeschwindigkeit variiert, so tritt im allgemeinen das ein, was man vernünftiger Weise erwartet, nämlich: Es erscheint ein bis zu einem bestimmten Grad entwickeltes Spülbild bei einer

^{x)} Deutsche Kraftfahrtforschung Heft 23, VDI Verlag 1939.

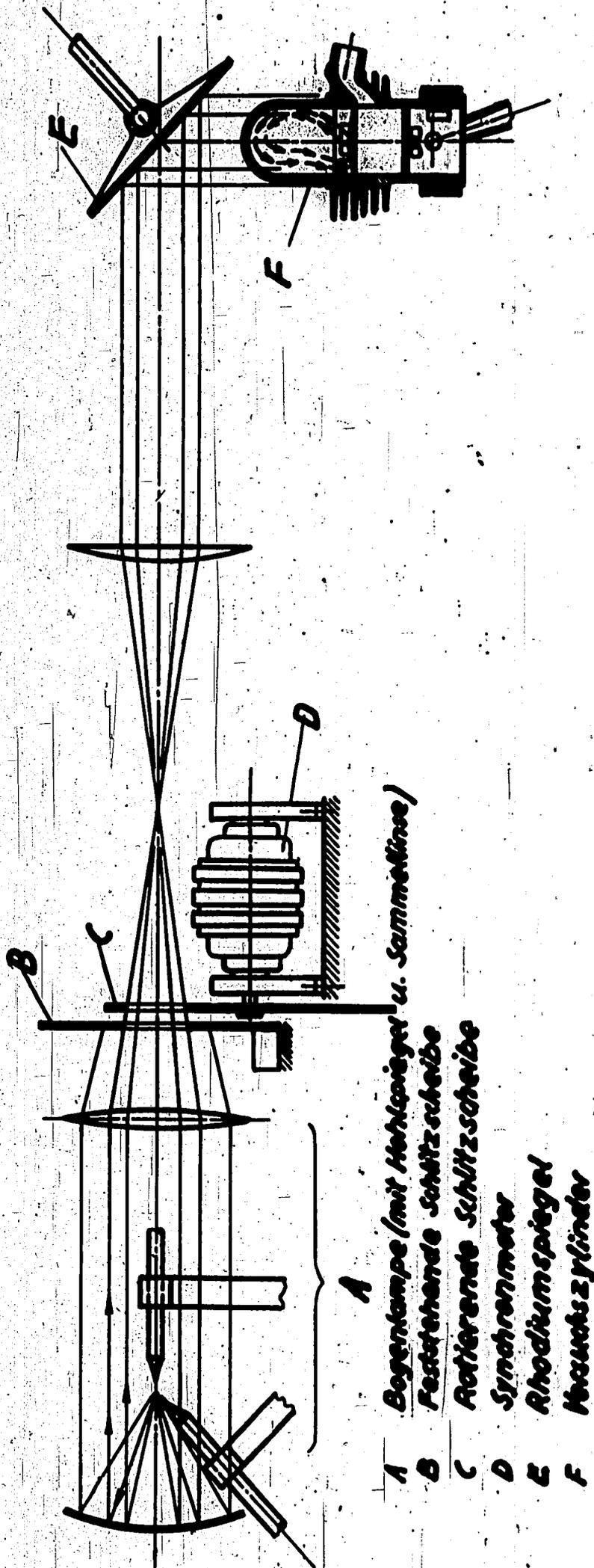
umso früheren Kolbenstellung, je höher der Spüldruck im Verhältnis zum Quadrat der Kolbengeschwindigkeit ist. Das voll entwickelte Spülbild aber sieht - bis auf die unvermeidlichen, durch die verschiedene Kolbenstellung bedingten Unterschiede - praktisch ungefähr gleich aus.

Wenn man aber das Verhältnis des Spüldruckes zum Quadrat der Drehzahl und damit das Verhältnis $\frac{c_s}{c_k}$ sehr extrem variiert, so kann es zu einem völligen Umschlagen des Strömungsbildes kommen. So haben wir z.B. Versuche mit Spüldrücken vorgenommen, die von höheren Werten herunter bis zu ganz niedrigen variiert wurden. Dabei zeigte sich, dass die bei den höheren Drücken erhaltenen Spülbilder beim Absenken des Spüldruckes, d.h. bei sinkender Spülluftgeschwindigkeit, also bei sinkender Reynolds'scher Zahl labil wurden und in ganz andere Formen umschlugen.

Ein solches Umschlagen wurde auch bei Versuchen an anderen Stellen beobachtet. Es kann auf den Einfluss der Reynolds'schen Zahl zurückgeführt werden, d.h. also, dass hier eine Art kritischer Reynolds'scher Zahl vorliegt.

Der Einfluss der Reynolds'schen Zahl und der Einfluss verschiedenen Verhältnisses von Spüldruck zum Quadrat der Kolbengeschwindigkeit sollten daher zusammen genauer untersucht werden, um die Grenzen der Übertragbarkeit von Modellversuchen auf Originalausführungen für die Fälle festzulegen, bei denen man aus irgendwelchen Gründen die Reynolds'sche Zahl beim Modellversuch nicht gleich der machen kann, die im Betrieb der Originalmaschine vorliegt.

Solche Versuche lassen sich, wie aus unseren Ausführungen hervorgeht, mit den beschriebenen Einrichtungen ausführen.



- A** Bogenlampe (mit Hohlspiegel u. Sammellinse)
B Feststehende Schlitzscheibe
C Rotierende Schlitzscheibe
D Synchrosmotor
E Rhodiumspiegel
F Meßzylinder

6124

Bild 1. Schema der Lichtführung.

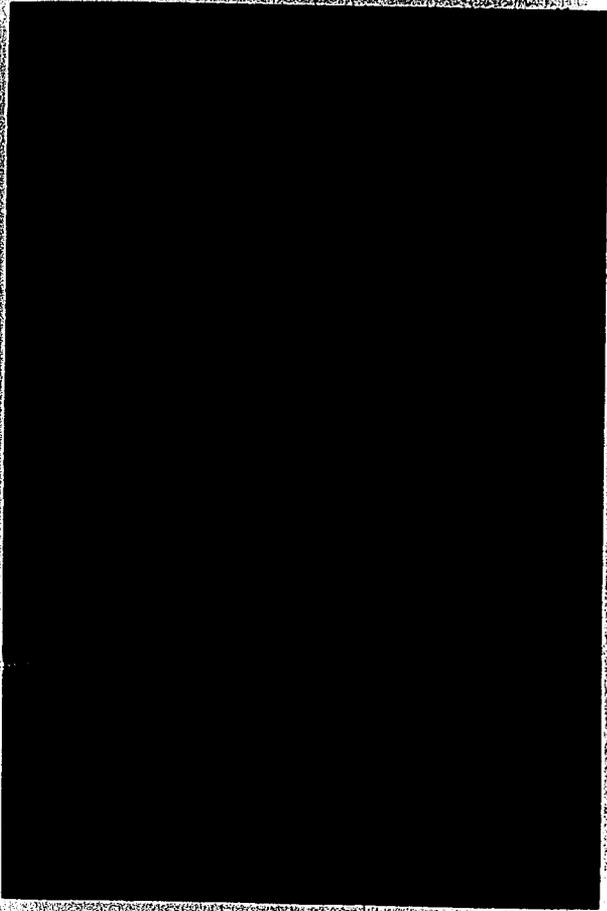
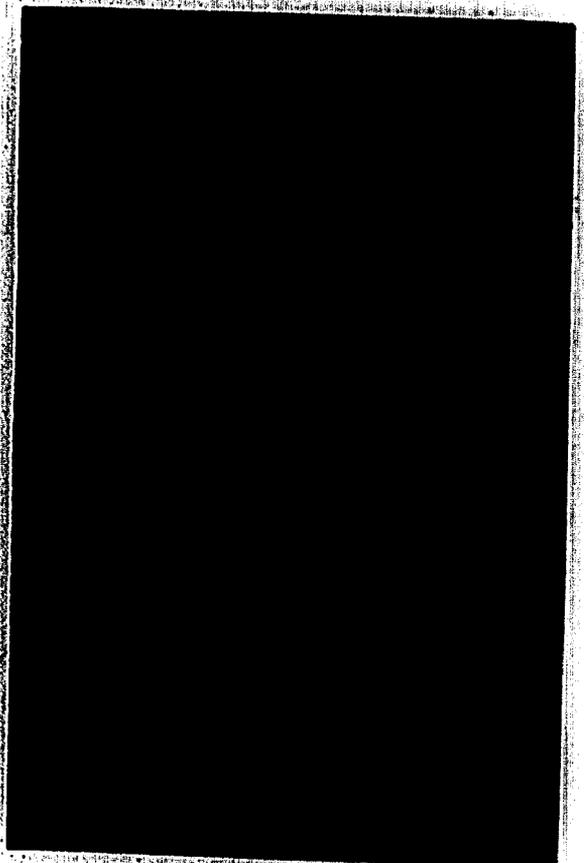


Bild 2. Spülbild bei unmittelbar
vor der Mündung eines
Spülkanales liegender
Lichtschicht.

Bild 3. Indirekte Beleuchtung
seitlicher Kanalmün-
dungen bei Lage der
Lichtschicht in der Mit-
telebene des Zylinders.



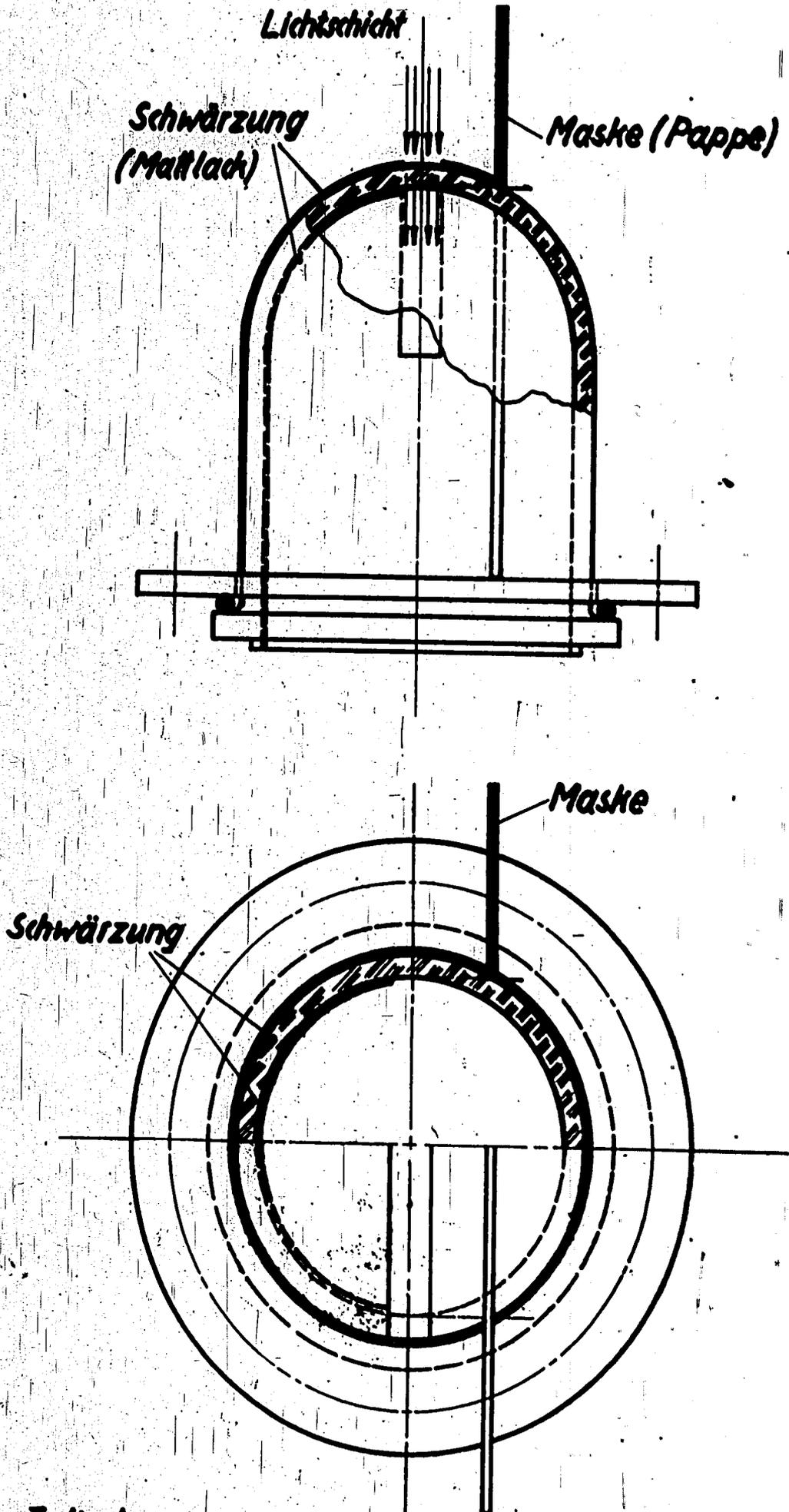


Bild 4. Zylindermaske u. Lackanstrich des Glaszylinders

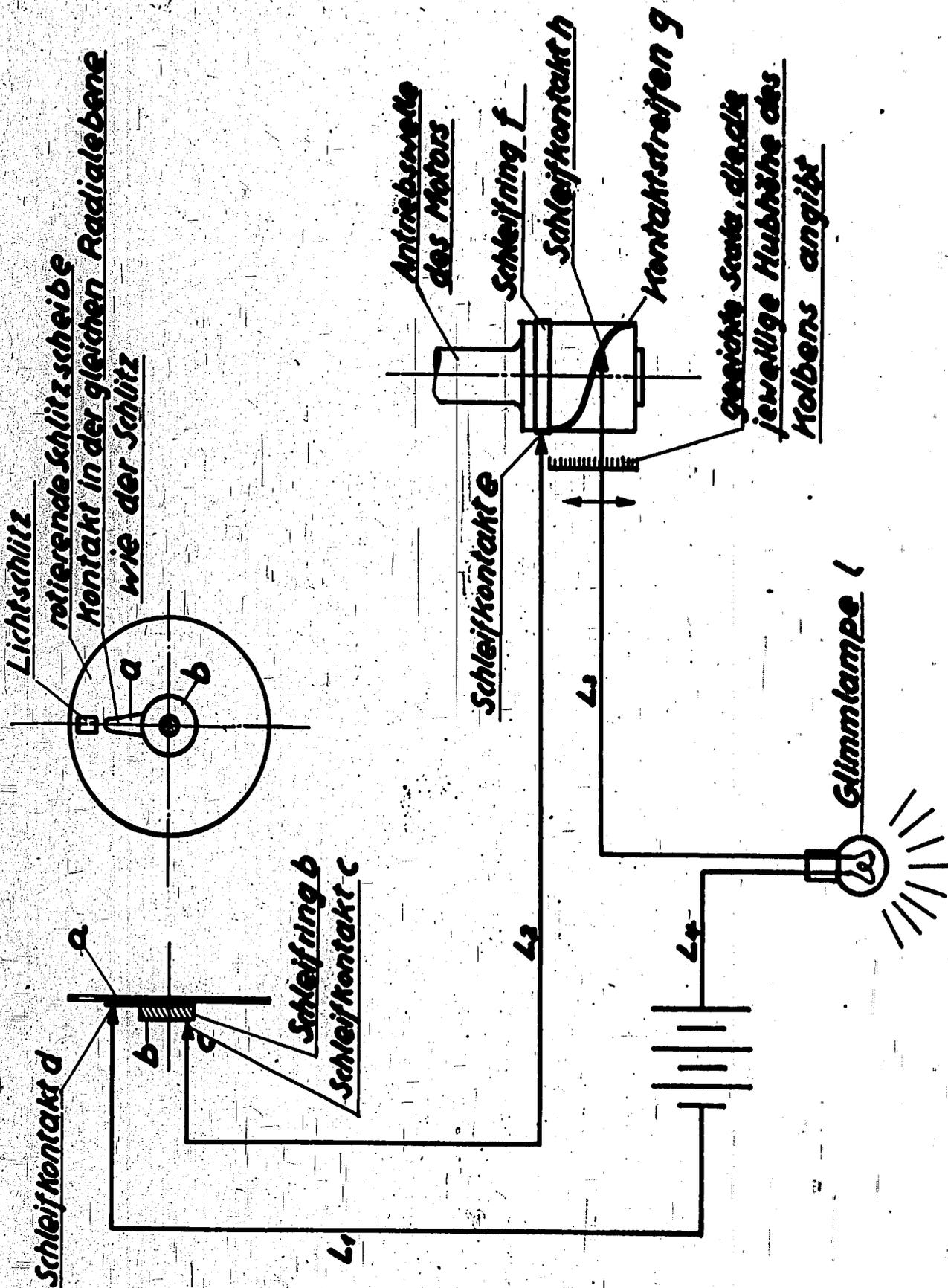


Bild 5. Anzeigervorrichtung für die jeweilige Kolbenstellung

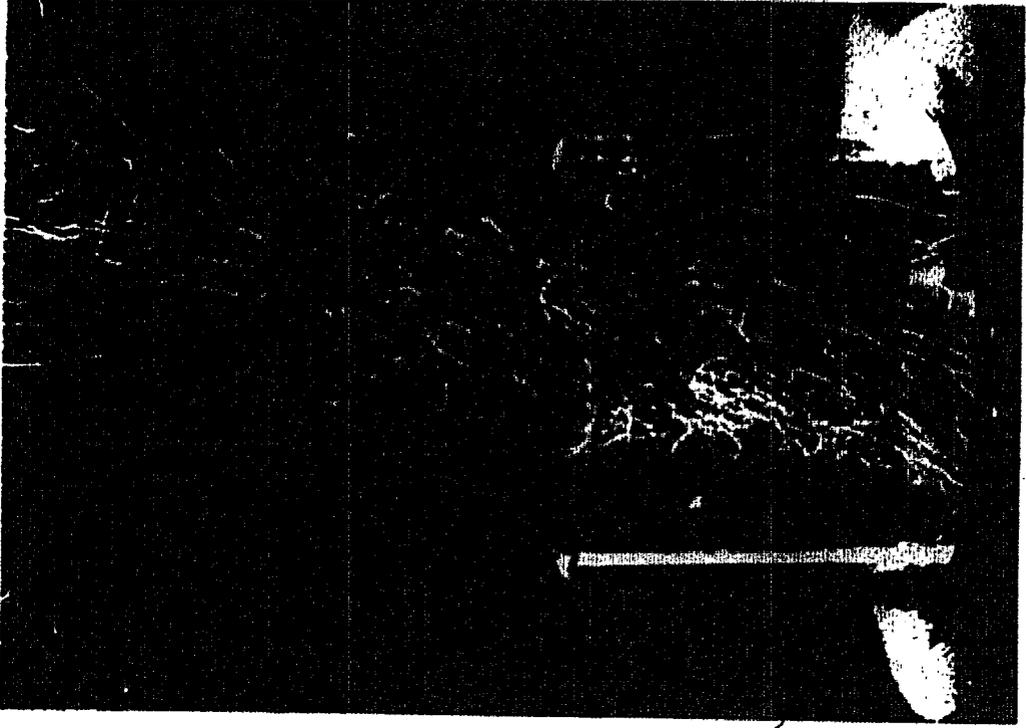


Bild 7. Freistrahlbild mit offener Glashaube.



Bild 6. Freistrahlbild ohne Glashaube.

- A Stößelstange
 B Kipphebel
 C Prebluftzuführung
 D Plexiglashaube

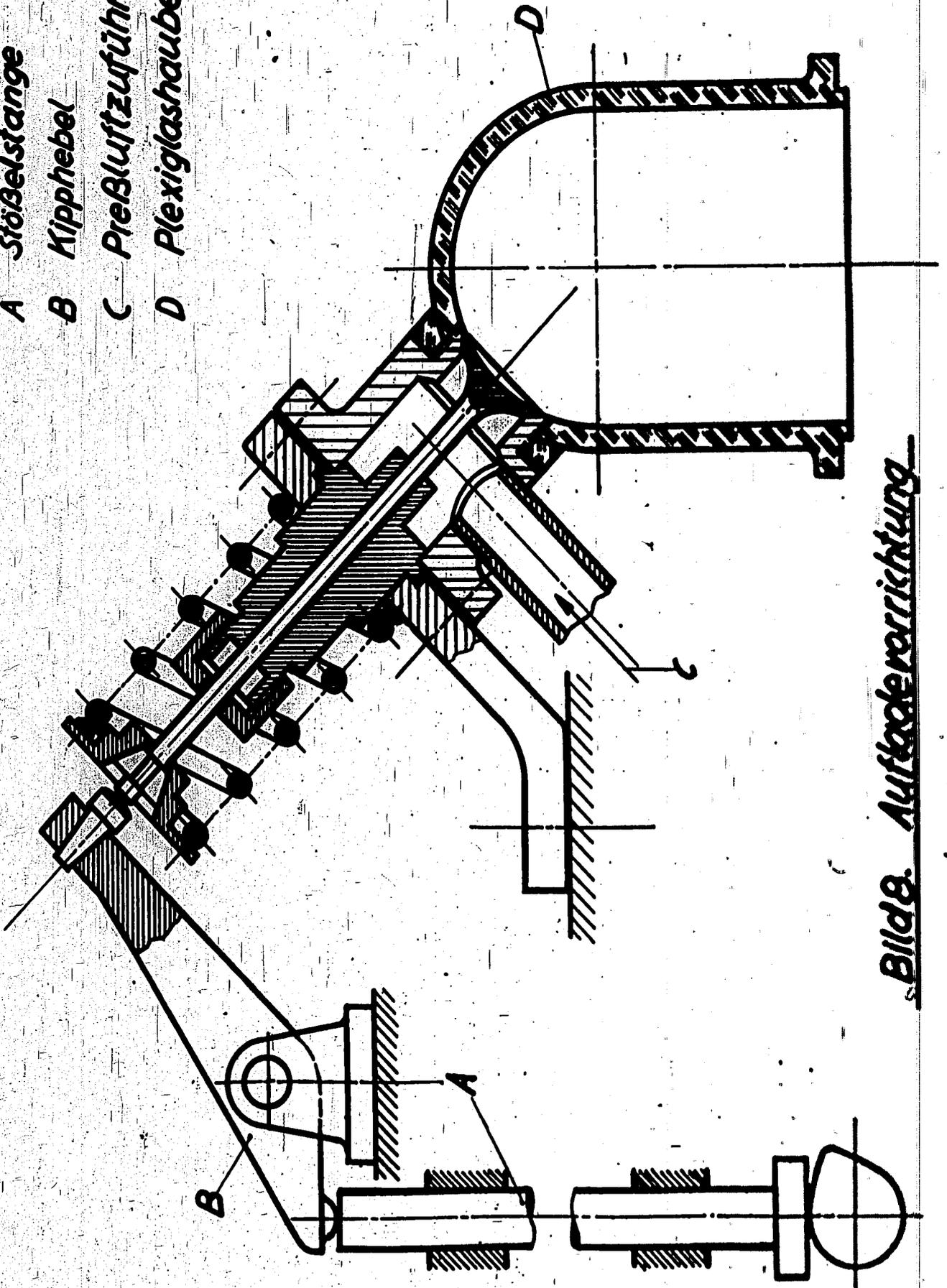


Bild 8. Aufbaueinrichtung

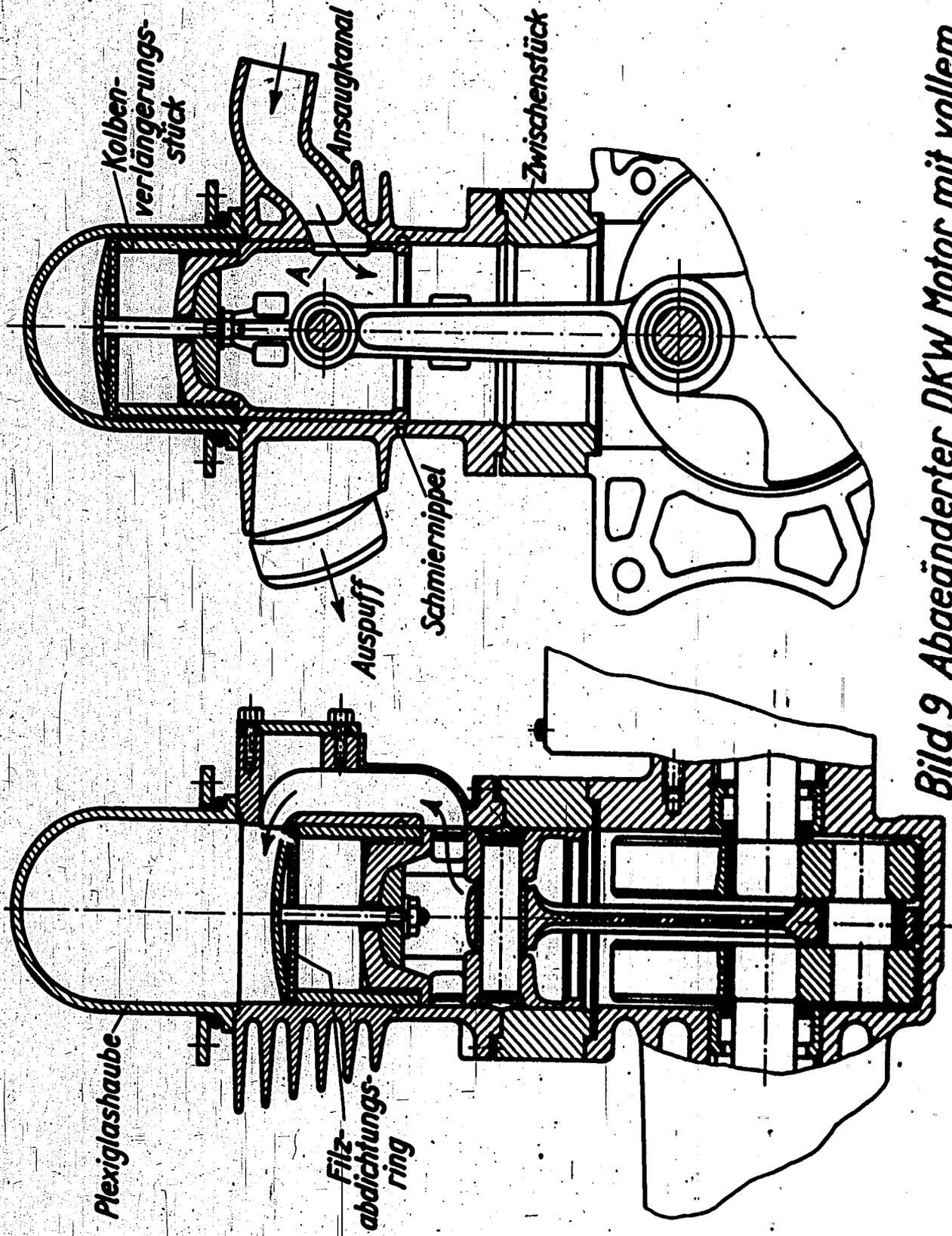


Bild 9 Abgeänderter DKW Motor mit vollem Kolbenhub und Kurbelkastenspülung

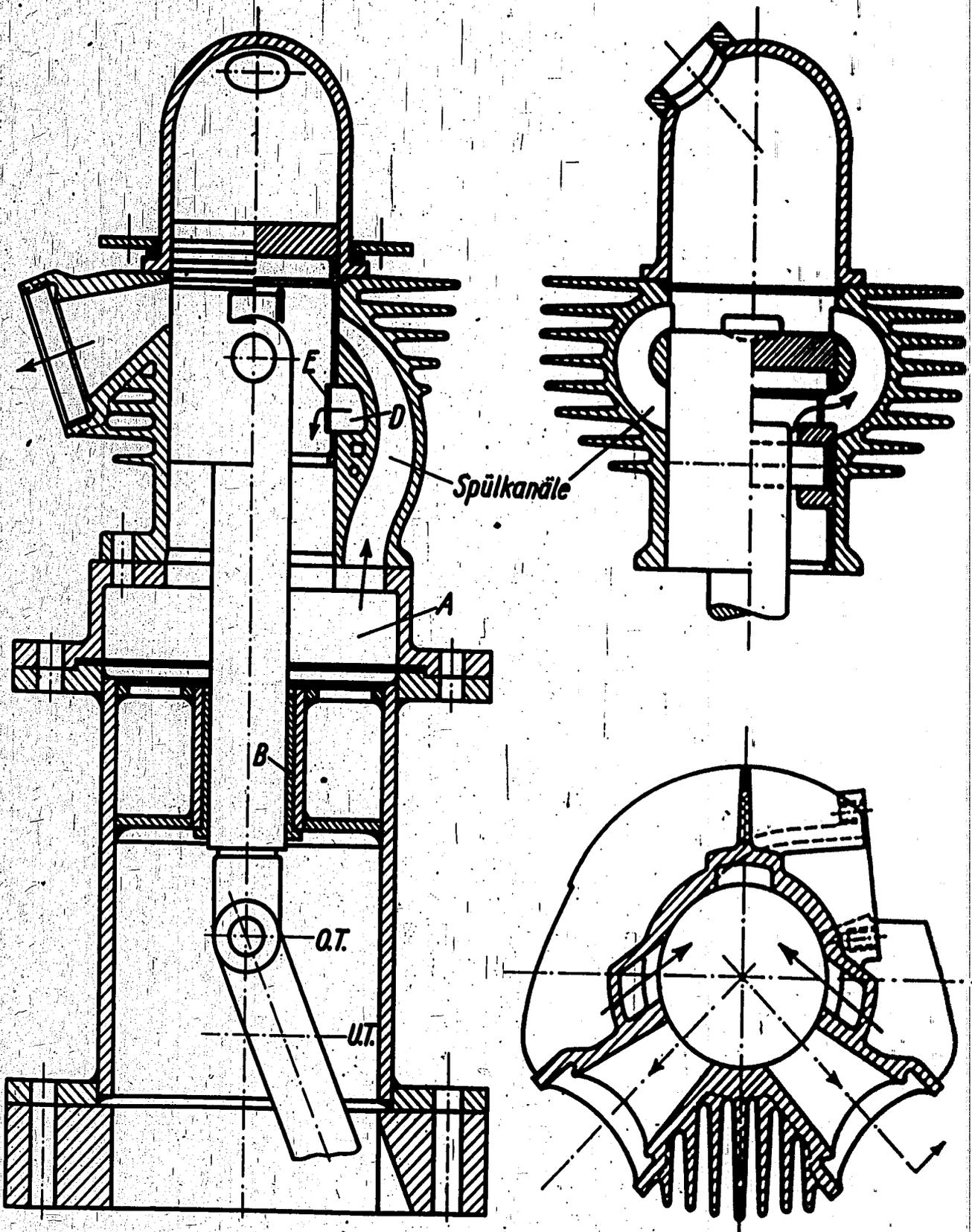


Bild 10 *Einrichtung mit reduziertem Kolbenhub und nachgeahmter Kurbelkastenspülung*



Bild 11. Strömungsbild bei $\frac{2}{3}$ Eröffnung der Spülschlitze bei reduziertem Kolbenhub und Fremdspülung.

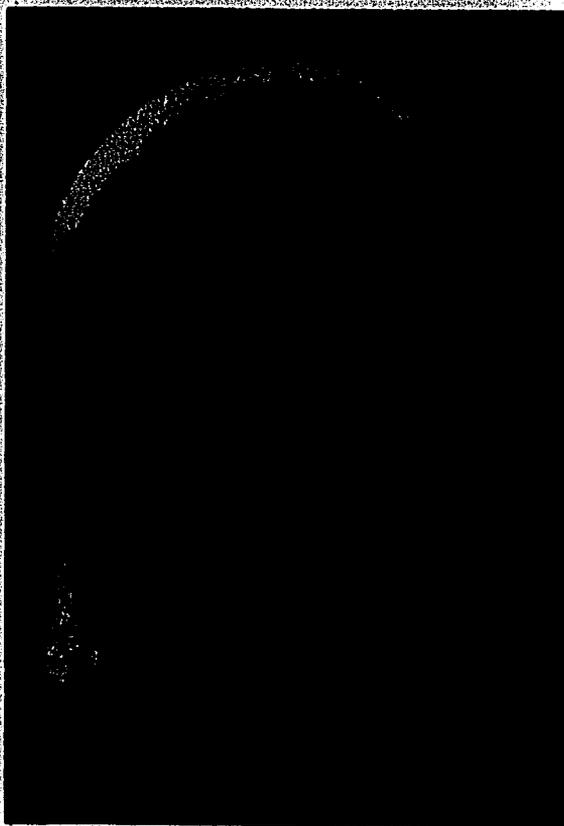


Bild 12. Strömungsbild bei $\frac{2}{3}$ Eröffnung der Spülschlitze beim wirklichen Motor mit Kurbelkasten-spülung.

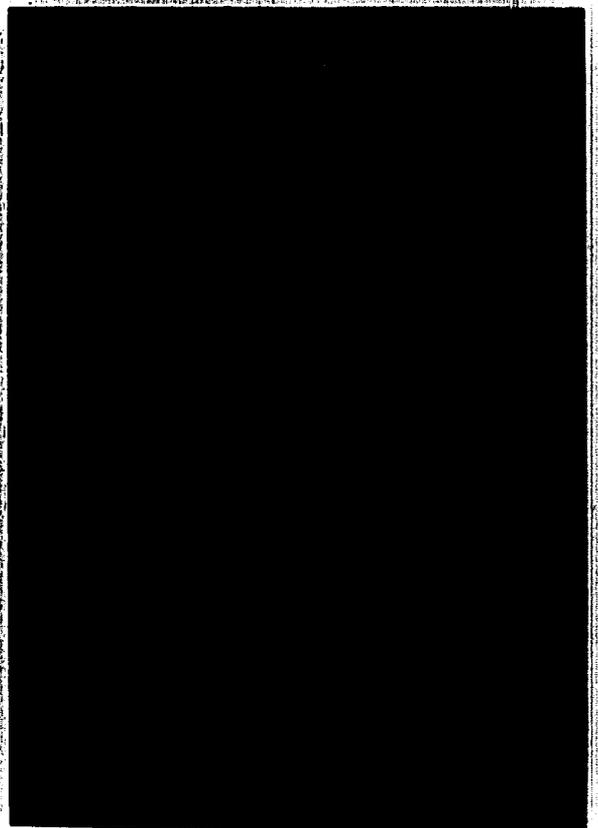


Bild 13. Rückströmung aus den Auslasskanälen am Eintritt ihrer Eröffnung bei fehlendem Expansionsenddruck.