

Versuche an einem Zweitaktmotor
mit Pleuellstößenspülung und Generatortgasbetrieb.

D i s s e r t a t i o n

von Dipl.-Ing. Reinhard Stier, Mannheim, Karl Traubstr. 17

Berichterstatter: Professor Dr. Ing. i. E. Siebert,
Mitberichterstatter: Professor Dr. Ing. V. Rembold
Technische Hochschule Stuttgart

Tag der Einlieferung: 10. März 1948.

Inhalt:

- I. Einleitung.
- II. Die Haupteinflussgrößen des Motors.
- III. Die Ermittlung der Verlustfaktoren und der Spülungsbeiwerte aus den Gasanalysen.
 - A. Theoretisches:
 - a) Bestimmung der Werte für Verlustteilung,
 - b) Betrachtung der Ladungsvorgänge u. der Spülung,
 - c) Nachprüfung der Analysen.
 - B. Versuchsausführung der Gasanalysen.
 - C. Versuchsergebnisse der Gasanalysen.
- IV. Der Gaswechsellvorgang.
 - A. Betrachtung der Vorgänge bei Strömungen in Rohrleitungen.
 1. Strömung aus einem Behälter in eine Rohrleitung.
 - a) Unterkritische Strömung.
 - b) Überkritische Strömung.
 2. Beschleunigung einer Gassäule in einem Rohr.
Schwingungsberechnungen.
 - a) Berücksichtigung der Elastizität der Gassäule.
 - b) Starre Gassäule.
 - c) Strömungsverluste.
 - d) Einfluss der Strömungsverluste auf die Schwingungen der elastischen Gassäule.
 3. Druckänderung bei Ein- und Ausströmen aus einem geschlossenen Raum.
 - B. Der Saugvorgang beim 2-Takter mit Pleuellstößenspumpen.
 - a) Berechnung des Saugvorganges.
 - b) Abschätzung der günstigsten Saugrohrlänge.
 - c) Nachladen durch Pleuellstößengesteuerten Schlitz.
 - C. Vorauspuff.
 - D. Spülung.
 - E. Durchrechnung eines Beispiels und Vergleich mit Versuchsergebnissen.
- V. Ergebnisse der Leistungsversuche.
- VI. Anwendung der Rechenmethode auf eine Neukonstruktion.
- VII. Zusammenfassung.
- VIII. Register.
- IX. Anhang.

[Diss. v. 24. März 1950]

I. Einleitung.

Im Jahre 1947 beauftragte die Firma Heinrich Lanz AG., Mannheim das Institut für Kolbenmaschinen der Technischen Hochschule Dresden mit der Durchführung von Entwicklungsversuchen an ihrem auf Generatorgas umgestellten 25 PS Ackerschlepper. Herr Professor List übergab als Direktor des Institutes dem Verfasser die Durchführung der Untersuchungen. Mit dieser Arbeit soll eine Lücke in der Aufstellung von Berechnungsmethoden für den Gaswechsel von Verbrennungskraftmaschinen geschlossen werden und vor allem auf die Verhältnisse des schnelllaufenden Zweitaktmotors mit Generatorgasansaugung eingegangen werden.

Motorbeschreibung.

Der zu untersuchende Motor hat die Typenbezeichnung D 7006. Die Konstruktion des Motors ist aus den Bildern 1 bis 3 zu ersehen. Es handelt sich um einen rollengelagerten Zweitaktmotor mit Kurbelkastenspülpumpe, welche nach Bild 1 das Frischgas aus dem Generator (1) in die Reinigungsanlage (2,4,6,) saugt. Dort wird das Gas vom Kondenswasser und anderen Verunreinigungen befreit. Dann gelangt das Gas über den Kühler (8) in den Mischer (9) und wird dort mit der durch den Luftfilter (10) angesaugten Luft gemischt, nachdem durch die Luftregulierklappe (15) das Gas-Luft-Verhältnis richtig einreguliert wurde. Das Gemisch wird durch die Leistungsregelklappe (16) der erforderlichen Leistung entsprechend gedrosselt und durch die Gemischansaugeklappen (11), die aus dünnen Stahlblechen bestehen und automatisch vom Druck im Kurbelkasten gesteuert werden, (Bild 2) in die Gasschleuse (13) gesaugt. Hierzu betrachte man Bild 6. Die Gemischklappen sind mit "K1" gekennzeichnet. Da die Gasschleuse das angesaugte Gemischvolumen zur Gänze aufnehmen kann, gelangt von diesem nur ein kleiner Prozentsatz in den Kurbelraum. Hierdurch wird verhindert, dass die durch das Gas mitgeschleppten Verunreinigungen in den Kurbelraum eindringen und dort mit der Zeit übermäßigen Verschleiss und Betriebsstörungen verursachen. Von der Gasschleuse aus wird das Gas über den Einlassstutzen (14) in den Zylinder gedrückt.

Motordaten.

Hub	s = 210 mm	Fleuelstangenlänge l_p = 400 mm	
Bohrung	D = 210 mm	Kurbeltrieb-	
Hubvolumen	$V_H = 7,3 \text{ l}$	schränkung	e = 15 mm
Verdichtungsraum	$V_C = 860 \text{ cm}^3$		

Schlitzabmessungen.

Einlassschlitzhöhe 39 mm über UT, Auslassschlitzhöhe 51,5 mm über UT
Schlitzbreite für Einlass und Auslass 140 mm.

Steuerdaten.

Auslass auf	116 °	KW	nach OT
Einlass auf	124 "	"	"
Einlass zu	240 "	"	"
Auslass zu	249 "	"	"

Der maximal freigegebene Querschnitt der Ansaugeklappen ist $22,5 \text{ cm}^2$.

Der Motor ist mit Frischölschmierung und Batteriezündung versehen.

Versuchsziel.

1.) Um die Leistung des Schleppers bei Übergang auf Gengasbetrieb auf gleicher Höhe wie beim Gasölbetrieb zu halten, war die Firma Lenz gezwungen, das Hubvolumen von 4,7 auf 7,3 l zu erhöhen. Der spezifische Mitteldruck sollte durch die Entwicklungsversuche so weit gesteigert werden, dass das alte Hubvolumen beibehalten werden kann. Das bedeutet, dass die Leistungswerte bei Gengasbetrieb diejenigen bei Gasölbetrieb erreichen sollen.

2.) Die Leistungsfähigkeit des Schleppers nahm bei Verschlackung oder Verstopfung der Generator- bzw. Reinigungsanlage übermäßig stark ab. Hierdurch wurde eine grosse Sorgfalt bei der Wartung der ganzen Anlage erforderlich. Diese anormale Unterdruckempfindlichkeit sollte auf das normale Maß reduziert werden.

3.) Der Verbrauch des Motors war mit 3500 Kcal/ish gegenüber dem Verbrauch von 4-Taktmotoren mit 2500 Kcal/PSH sehr hoch und sollte möglichst auf die Werte des 4-Taktmotors gebracht werden.

Versuchseinrichtungen.

Die nachstehend beschriebenen Versuche wurden im Institut für Kolbenmaschinen der Technischen Hochschule Dresden durchgeführt. Der Versuchsstand war mit einer elektrischen Pendelbremse, einer Jurid-Trockengelenkwelle Grösse 7 und Gasuhren für Luft- und Gasmengenummessung ausgerüstet. Die Gaserzeugeranlage bestand aus einem Imbert-Wolzgaserzeuger, einem Koksreiniger, einer Saugpumpe und einer Gasglocke von 50 m³ Inhalt. Die Gasglocke soll einen konstanten Gasdruck bewirken und gewährleisten, dass das Gas eine gleichmässige Zusammensetzung während des Versuches hat. Dies ist eine Voraussetzung für auswertbare und vergleichbare Versuche.

Der Heizwert des Gases wurde laufend im Junkerskalorimeter ermittelt und die Gaszusammensetzung durch Analysen festgestellt, die von der chemischen Abteilung des Institutes unter der Leitung von Herrn Dr. Schaller ausgewertet wurden.

Zur Entnahme der Gasproben wurden vom Verfasser konstruierte Entnahmeventile eingesetzt.

Der Druckverlauf im Niederdruckgebiet wurde durch ein mechanisch betätigtes Punktindizierventil eigener Konstruktion gewonnen. Der Druckverlauf während der Verbrennung wurde durch Quarzindikator und 6-Schleifenoszillograph sichtbar gemacht.

Durchführung der Arbeit.

Nach der Einleitung werden in Kap. II die Haupteinflussgrössen des Motors anhand der Verlustteilung dargelegt. Die auf die grösste Übersichtlichkeit abgestimmte Darstellungsweise gestattet eine einfache Abschätzung der einzelnen Verlustfaktoren. Der Nutzwirkungsgrad ist als Produkt der einzelnen Teilwirkungsgrade dargestellt, um deren Einzeleinflüsse leichter zu durchschauen. Auf die Ermittlung der einzelnen Wirkungsgrade ist in dieser Arbeit nur soweit eingegangen, als deren Beeinflussbarkeit von Interesse war. Der Hauptzweck dieses Kapitels ist die Diskussion des Einflusses verschiedener konstruktiver und thermodynamischer Probleme auf die Teilwirkungsgrade und damit auf Leistung und Verbrauch.

In Kap. III wird bei der Entwicklung der Formeln für die Auswertung der Gasanalysen auf den in dem Heft "Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine" von List gegebenen Grundlagen aufgebaut. Das ganze Formelsystem zur Auswertung der Abgas-, Frischgas-, Kompressions- und Expansionsanalysen beim 2-Taktmotor wurde neu entwickelt und durch praktische Versuchsauswertung erprobt. Die Bezeichnungsweise wurde, wie in der ganzen Arbeit, möglichst an die bei List übliche Schreibweise angeglichen. Von der Bezeichnung "Quantitativer und qualitativer Spülwirkungsgrad" wurde zu Gunsten der Bezeichnungen "Spülmittelausnutzungsgrad" und "Spülwirkungsgrad" abgegangen, um jede Möglichkeit der Begriffsverwirrung zu vermeiden.

In Kap. IV wird ausführlich auf die Grundlagen der Berechnung des Gaswechsels eingegangen. Diese Ausführungen sind durch die Arbeiten von List (Lit.15) und Fischinger (Lit.1) angeregt. Anhand der dort dargelegten Theorie wurden die Formeln für den vorliegenden Fall neu entwickelt.

Zunächst wurden die Formeln für die infrage kommenden physikalischen Vorgänge beim Gaswechsel allgemein abgeleitet und aufgestellt. Dann wurden diese Formeln für das Beispiel des Ianz-motors zusammengestellt und für die Rechnung vereinfacht. Anhand eines beispieles wird die Durchführung der schrittweisen Rechenmethode gezeigt.

Ganz besondere Aufmerksamkeit wurde bei vorliegender Untersuchung den Schwingungen in den Rohrleitungen gewidmet und versucht, neben der allgemein gültigen exakten Lösung des Problems mit Hilfe von Differentialgleichungen eine anschauliche Darstellung der einzelnen physikalischen Vorgänge zu vermitteln.

Die allgemein gültigen Lösungen der schrittweisen Berechnung sind so vereinfacht, dass ohne allzugrossen Rechenaufwand für einfach gelagerte Verhältnisse die Ergebnisse geschätzt werden können. Die konstruktiv beeinflussbaren Einflussgrössen wurden bezüglich ihrer Wirkung auf den Gaswechsel eingehend untersucht.

Durch die abgekürzten Methoden zur Saugrohrbestimmung und Vorauspuffabschätzung erhält man einen guten Überblick über die verschiedenen Einflüsse, die die Konstruktion auf den Gaswechsel ausübt. Während die Vorauspuffabschätzung neu ist, liegen über Saugrohre bereits verschiedene Veröffentlichungen von List vor.

Bei dem umfangreich vorliegenden Versuchsmaterial ist es möglich, Aussagen über den Wert der genauen Wahl der einzelnen Faktoren zu machen und festzustellen, ob bestimmte Faktoren überhaupt einen grösseren Einfluss auf den Ablauf des Gaswechsels haben.

Diese Arbeit bezieht sich auch hier in erster Linie auf den Generator-motor und geht auf dessen Besonderheiten ein. Sehr wichtig war die Verminderung, bzw. Beseitigung des Einflusses des vom Generator herrührenden Unterdruckes auf die Motorleistung. Dieses Problem wird in Kap. "Aufladeschieber" behandelt.

Der Erfolg der theoretischen Betrachtungen wird in Kap. "Ergebnisse der Leistungsversuche" gezeigt. Die sich in der Theorie ergebenden Einflüsse konnten im Versuch in vollem Umfang nachgewiesen werden.

Im Schluss wird kurz die Untersuchung eines anderen Motors gestreift und auch hier Theorie und Rechnung miteinander verglichen.

Die Versuchsarbeiten wurden mit Mitteln der Firma Lanz und mit Unterstützung der Technischen Hochschule Dresden durchgeführt. Herrn Professor Iist und Herrn Oberingenieur Ientz von der Firma Lanz gilt an dieser Stelle mein besonderer Dank für die wertvolle Unterstützung durch Rat und Erfahrung.

Um die Arbeit nicht mit Formeln zu überlasten, wird ein Teil der zur Nachprüfung der Formeln notwendigen Ableitungen im Anhang gebracht.

II. Haupteinflussgrößen des Motors.

Ein Verbrennungsmotor ist neben seinen konstruktiven Daten wie Lubraum und Drehzahl durch Leistung und Verbrauch gekennzeichnet. Diese Größen ergeben die Qualität des gewählten motorischen Verfahrens.

Der Verbrauch der Verbrennungskraftmaschine ist durch den spezifischen Wärmeverbrauch eindeutig angegeben. Wenn Q_{ges} die dem Motor zugeführte chemisch ausnutzbare Wärmemenge ist und N_e die Nutzleistung an der Bremse, so ist

$$(1) \quad b_e = \frac{Q}{N_e} \quad (\text{Kcal/PSh})$$

Aus dem spezifischen Wärmeverbrauch ergibt sich der effektive Nutzwirkungsgrad:

$$(2) \quad \eta_e = \frac{Q_{Nutz}}{Q_{ges}} = \frac{\text{Nutzleistungswärme}}{\text{Gesamtwärme}} = \frac{632}{b_e}$$

Der Nutzwirkungsgrad gibt an, wieviel Prozent der zugeführten chemisch ausnutzbaren Wärmemenge in nutzbare Arbeit umgewandelt wird.

Die Verlustteilung.

Den durch den Nutzwirkungsgrad dargestellten Verlust kann man in Einzelverluste aufteilen, die für sich bestimmbar sind und ein klares Bild der Verbesserungsmöglichkeiten geben.

Von der dem Motor zugeführten chemischen Energie Q_{ges} gehen alle nicht verbrennenden reaktionsfähigen Bestandteile des Brennstoffes für die Gewinnung von Nutzleistung verloren. Diese Verluste werden in dem Gesamtumsetzungsgrad η_{100} zusammengefasst. Wenn Q_{verbr} die zur Reaktion gelangende Energiemenge ist, so ist definiert:

$$(3) \quad \eta_{100} = Q_{verbr} / Q_{ges}$$

Der durch η_{100} definierte Verlust lässt sich noch in zwei ihrer physikalischen Ursprung nach verschiedene Verluste aufspalten. Der eine Verlust wird durch die Spülung verursacht und der andere durch die unvollkommene Verbrennung.

Die Leistungsversuche ergeben gegenüber dem Fall c) bei gleichem stündlichen Brennstoffverbrauch eine Zunahme des maximalen Mitteldruckes an der Rauchgrenze von 2,55 at auf 2,70 at.

Abschliessend kann zu den Durchsatzversuchen gesagt werden, dass sich die geschilderte Methode gut bewährt. Insbesondere ist zu erwähnen, dass durch die Einführung des Verlustfaktors β , die Notwendigkeit der einwandfreien Strömungsführung bewiesen werden kann. Die Auswirkung eines Diffusorteiles, der die Strömung ohne grosse Verluste auf den Klappenquerschnitt lenkt, konnte durch Messung belegt werden.

Durch die bei der Rechnung nicht berücksichtigte Auspuffwirkung liegen die Messwerte allgemein etwas höher. Für die Anordnung f) wurden keine Durchsatzmessungen gemacht, jedoch ist der Erfolg aus der Mitteldrucksteigerung ersichtlich.

Für den Auspuff wurden eine Reihe von Rechnungen durchgeführt. Ein Auspufftopf ergibt in jedem Fall einen erheblichen Rückstau und beeinflusst damit die Spülung negativ. Da jedoch der Spülwirkungsgrad durch den Rückstau positiv beeinflusst wird, kann trotzdem bezüglich der Leistung ein positives Resultat erzielt werden. Hier muss jedoch der Versuch eingeschaltet werden, da die schrittweise Rechnung keine Rückschlüsse auf den Spülerfolg zulässt. Aus der Rechnung geht hervor, dass sich ein Auspuffrohr von 1,00 m Länge als günstig erweisen wird. (siehe Bild 2b), da hier bei Abschluss der Auspuffschlitzes ein Anstieg des Zylinderdruckes erreicht werden konnte, was bei längeren Rohren unmöglich war. Im Bereich praktisch durchführbarer Rohrlängen (bis 2,50 m) ist eine Druckwelle vor den Auslassschlitzen am Ende der Spülperiode nicht zu erreichen.

Der Motor zeigte mit den vorgeschlagenen Schlitzdaten sowie den Saugrohren nach f) $w_{ms} = 24,5$ m/s einen Mitteldruck von $p_e = 4,2$ kg/m² bei leicht rauchendem Auspuff.

VII. Zusammenfassung.

Es wurde vom Verfasser eine Methode zur Berechnung des Gaswechsels schnelllaufender Zweitaktmotoren nach Theorien von List und Rischinger entwickelt. Dieses Rechenverfahren gestattet, den ganzen Gaswechsel schrittweise nachzurechnen und an jeder beliebigen Stelle des Motors Gasgeschwindigkeiten, Drücke und durchströmende Mengen genau zu ermitteln. Vor allem gelingt es, den Einfluss der Gaskulenschwingungen in Rohrleitungen voll zu erfassen.

Eine Schätzung der Schlitzdaten ist mit Hilfe der Näherungsverfahren für Vor-auspuff und spezifische Zeitquerschnitte möglich. Die eingehende Berechnung mit Berücksichtigung der Schwingungen soll diese Schätzung nur korrigieren und die Rohrlängen abstimmen.

Die Rechnung wurde für den Lanz-Generator-Gasmotor D 7006 durchgeführt. Durch Punktzindizierung konnte die Übereinstimmung der Rechnung mit den tatsächlich auftretenden Drücken nachgewiesen werden.

Durch die in Abschnitt III entwickelte vereinfachte Verlustteilung ist eine grobe Abschätzung der Fehlerquellen des Motors möglich. Die Ermittlung der Wirkungsgrade für die Verlustteilung und der Spülungs- und Ladungskennwerte ist mit Hilfe der Gasanalyse durchgeführt. Hier wurden vom Verfasser die formelmässigen Grundlagen der Rechnung erarbeitet und die Durchführbarkeit an einem Beispiel gezeigt.

Im vorliegenden Fall war infolge des niedrigen Luftaufwandes Leistung und Verbrauch schlecht. Die Verluste und Spülungskennwerte waren an sich normal. Der schlechte Umsetzungsgrad η_u ist aus dem grossen Restgasgehalt der Kompressionsgase zu erklären, da der Spülmittelaufwand sehr nieder war. Der Motor wurde durch Zusammenwirken von Rechnung und Versuch verbessert. Das Endergebnis der Untersuchung am D 7006-Motor waren eine Leistungserhöhung von 29 auf 42 PS und eine Verbrauchssenkung von 3300 kcal/PSH auf 2800 kcal/PSH.

Die Anwendung der Rechenmethode auf einen anderen Motor und die auch dort festgestellte Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen beweist die allgemeine Gültigkeit der entwickelten Rechenmethode.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit niedergelegten Methoden ist der Gaswechsel des Zweitaktmotors mit der gleichen Genauigkeit zu berechnen wie der des Viertakters. Alle Probierversuche können fortfallen. Durch die Rechnung gelangt man in die Nähe des Optimums. Einige Kontrollversuche genügen, um dem Entwicklungsingenieur Aufschluss über die Richtigkeit der in der Rechnung eingesetzten Strömungskennwerte und Temperaturen zu geben.

Demit entfällt für die Industrie das gefürchtete Risiko bei der Entwicklung eines Zweitaktmotors. Zusammen mit der Verbreiterung der Erkenntnisse über die Spülung gibt das schrittweise Rechenverfahren einen wesentlichen Beitrag zur Verstärkung der Anwendung dieser einfachen und billigen Motorenart.

l e b e n s l a u f .

Ich wurde am 16.1.1915 zu Rostock (Mecklenburg) als Sohn des Studienrates Friedrich Franz Stier geboren. Nach Besuch des Realgymnasiums machte ich 1933 mein Abitur. 1934-35 diente ich 1 Jahr bei der Wehrmacht. 1935-39 studierte ich an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg Flugmotoren- und Flugzeugbau (Professor Triebnigg, Professor F. Wagner, Professor Hoff Professor Föttinger). Meine praktische Ausbildung erhielt ich während einer 1,1/2 jährigen Flugzeugschlosserlehre bei der Firma Ernst Heinkel, Flugzeugwerke, Rostock. Während meines Studiums war ich von 1937-39 Assistent am Lehrstuhl für Luftfahrtwesen Professor H. Wagner.

1940-42	Firma Ernst Heinkel, Rostock " Hirth-Motoren, Stuttgart	Konstruktionsgruppenleiter, Reaktionsantrieb f. Schnellflugzeuge.
1942-45	Techn.Hochschule Dresden Institut für Kolbenmaschinen Professor Dr. Ing. H. List	Lehrstuhlassistant, Konstruktionsgruppenleiter u. Versuchsingenieur, Konstruktion v. Versuchseinrichtungen u. Versuche v. Zweitaktmotoren.
1945-46	Institut für Kolbenmaschinen, Vilsbiburg/Niederbayern	Persönlicher Mitarbeiter von Herrn Professor List.
1947-48	Firma Wilh. Gutbrod, Plochingen	Konstrukteur, Konstruktion u. Entwicklung von Zweitaktmotoren.
1948-49	Deutsche Beratende Kommission für d. Strassenverkehr, Baden-Baden	Referent für techn. Angelegenheiten.

Seit 1.1.1949 bin ich bei der Firma Heinrich Lanz AG, Mannheim als Konstrukteur tätig.