

Deutsche Kraftfahrtforschung
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

Heft 57

*Herrn Dipl.-Ing. Fr. Lewitz
vom Verfasser ergebenst über-
reicht.*

U-11

**Versuche zur Frage der
Kraftstoffaufbereitung durch die Einspritzdüse**

Dr.-Ing. Werner Oschatz
Maschinenlaboratorium
der Technischen Hochschule Dresden
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlig VDI)

10220

1941

VDI-Verlag GmbH • Berlin NW 7

Deutsche Kraftfahrtforschung
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

Heft 57

**Versuche zur Frage der
Kraftstoffaufbereitung durch die Einspritzdüse**

Dr.-Ing. Werner Oschatz
Maschinenlaboratorium
der Technischen Hochschule Dresden
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlig VDI)

1941

10221

VDI-Verlag GmbH • Berlin NW 7

D 88

Diese Arbeit wurde unter dem Titel „Düsen- und Strahluntersuchungen“ von
der Technischen Hochschule Dresden als Dissertation angenommen

Alle Rechte vorbehalten / Copyright 1941 by VDI-Verlag GmbH, Berlin NW 7
Printed in Germany / Druck: Triasdruck GmbH, Berlin SW 68

DW 877

10222

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Zweck und Ziel der Versuche	2
3	Anordnung und Durchführung der Versuche	3
31	Die gesamte Versuchsanordnung	3
32	Das für die Strahluntersuchungen angewandte Versuchsverfahren	3
321	Einfluß der Anfangstörung der Düse	4
322	Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Spritzflüssigkeit	4
323	Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Luft	6
324	Einfluß der Strahlgeschwindigkeit	8
4	Versuchsergebnisse	8
41	Einfluß der Anfangstörung der Düse	8
42	Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Spritzflüssigkeit	13
43	Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Luft und der Strahlgeschwindigkeit	14
5	Die Tropfengrößen	23
6	Die inneren und äußeren Strahlkräfte	25
7	Zusammenfassung und Erörterung der Verwertungsmöglichkeit der Ergebnisse	27
8	Schrifttumsverzeichnis	28

Die vorliegende Arbeit wurde im Auftrage und mit Mitteln
des Reichsverkehrsministeriums durchgeführt

Formelgrößen

p_s	[kg/cm ²] bzw. [ata]	mittlerer Nutzdruck im Motor.
p_g	[kg/cm ²] bzw. [ata]	Gegendruck der Luft in der Versuchsbombe
P_F	[kg]	
P_W	..	
P_Y	..	
P_{Rep}	..	innere Strahlkräfte (Erläuterung Abschnitt 6 Seite 25)
P_{Th}	..	
P_s	..	
P_{AS}	..	
P_{Ist}	..	statische Luftkraft
P_{Idyn}	..	dynamische Luftkraft
v_m	[m/s]	mittlere Strahlgeschwindigkeit
ρ	[kg s ³ /m ⁴]	Dichte
η	[g/cm s]	Zähigkeit (im CGS-System ausgedrückt)
γ	[dyn/cm oder g/cm]	Kapillaritätskonstante
λ	[—]	Luftüberschußzahl

Abkürzungen

$\circ PW$	Grad Pumpenwellenwinkel
S..B.	Einspritzbeginn

1 Einleitung

Das Arbeitsverfahren der Dieselmachine erfuh mit dem wirtschaftlich bedingten Übergang vom Kraftstoff-Luft-Einblaseverfahren zur kompressorlosen Maschine eine einschneidende Wandlung. Die Frage der Gemischbildung rückte damit mehr als früher in den Vordergrund. Sie wird in neuerer Zeit infolge der einsetzenden Entwicklung der kompressorlosen Dieselmachine zum Schnelllauf und infolge des Strebens nach Erhöhen der spezifischen Leistung weiterhin unterstrichen und zu einem ausschlaggebenden Faktor erhoben.

Während des Arbeitspielcs der kompressorlosen Dieselmachine überlagern sich gegenseitig die Kraftstoffeinspritzung, die Gemischbildung und die Verbrennung. Das Beeinflussen dieser sich teilweise überdeckenden Vorgänge bei der Kürze der dafür zur Verfügung stehenden Zeit — bei einer Drehzahl von 3000 U/min verstreichen von Beginn des Einspritzens bis zum Ende der Verbrennung etwa $4 \cdot 10^{-3}$ bis $6 \cdot 10^{-3}$ s — erscheint außerordentlich schwierig. Die Einflußnahme ist jedoch erwünscht, da vom Ablauf des Gesamtvorganges, zeitlich und gütemäßig betrachtet, in erster Linie die Wirtschaftlichkeit des Dieselprozesses abhängt.

In Erkenntnis dieser Tatsache entwickelten sich im Laufe der Jahre die verschiedensten Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren. Allen gemeinsam ist das Bestreben, eine rasche Strahlauflösung und Gemischbildung (in erster Linie Makromischung) herbeizuführen, die im Brennraum vorhandene Luft möglichst vollkommen zur Verbrennung heranzuziehen und ferner die Verbrennung selbst im motorisch günstigen Sinne zu beeinflussen. Es bedarf an sich keiner besonderen Erwähnung, daß im Zusammenhang dieser Fragen noch weit mehr Größen eine Rolle spielen, als hier angedeutet sind. Eine eingehende Erörterung des gesamten Gemischbildungs- und Verbrennungsablaufes und ihrer Einflußgrößen liegt jedoch nicht im Rahmen und in der Absicht dieser Arbeit.

Schon bei oberflächlicher Durchsicht der heutigen verschiedenen Dieselmotorentypen kann man eine Unterscheidung derselben nach dem Grad des Einflusses der Einspritzdüse auf den Gemischbildungsvorgang vornehmen. Von diesem Gesichtspunkt aus läßt sich unterscheiden zwischen

1. Gemischbildungsverfahren, die der Düse die Arbeit des Zerstäubens und Verteilens des eingespritzten Kraftstoffes weitgehend abzunehmen versuchen (Vorkammer, Luftspeicher, Lanova, Wirbelkammer; allgemeines Merkmal: Brennraumzerklüftung) und
2. Gemischbildungsverfahren, die vornehmlich auf der guten Zerstäubungs- und Aufbereitungsfähigkeit der Düse aufbauen (sog. reine Strahleinspritzung).

Die ersteren Verfahren arbeiten mit hohen Luftgeschwindigkeiten im Haupt- oder Nebennbrennraum. Der Kraftstoffstrahl wird in Luftwirbel gespritzt (Wirbelkammer), von Luft angeblasen (Luftspeicher) oder über Teilverbrennung in einer Vorkammer durch Abblasen derselben auf den Hauptbrennraum verteilt. Ihnen allen gemeinsam ist das Überschieben des gesamten Hubvolumens oder eines Teils desselben durch den Kolben in vom Zylinder abgetrennte Räume. Dieses mit hohen Luftgeschwindigkeiten verbundene Überschieben und bei Entspannung wieder Ausblasen dieser Nebennräume kostet jedoch Arbeit und verursacht höhere Wärmeverluste, die beide als zusätzliche Verluste zu betrachten sind, um die der sonst erreichbare mittlere effektive Druck p_e verkleinert wird.

Daß diese sog. Gemischbildungsverluste nicht vernachlässigt werden dürfen, ergeben rechnerische Untersuchungen von *Cordier* [12]¹⁾ wie auch neuere Versuche von *Ullmann* [17], dem es gelang, die hydraulischen Überschiebverluste einschließlich der durch die hohen Gasgeschwindigkeiten erwachsenden zusätzlichen Wärmeverluste für Gastemperaturen bis rd. 500° C mittels Durchdrehversuches bei verschiedenen Brennraumzerklüftungen zu ermitteln. Für die Daimler-Benz-Vorkammer, die ein Volumen V_v von etwa 30% des Verdichtungsraumes der Maschine und eine Vorkammerkonstante (Konstante nach *Cordier*) von $K = 2,07 \cdot 10^{-3}$ besitzt, beträgt der durch Überschieben und Ausströmen der Luft (Verdichtung und Entspannung) bei $n = 2800$ U/min entstehende zusätzliche Verlust einschließlich der thermodynamischen Verluste nach *Ullmann* $p_e = 0,35$ kg/cm². Bei der Deutz-Vorkammer, deren Inhalt etwa 50% des Verdichtungsraumes ausmacht, erhöht sich p_e auf 0,584 kg/cm². Für die Wirbelkammer (*Oberhänsli* und *Ricardo*) mit $K = 10 \cdot 10^{-3}$ bis $15 \cdot 10^{-3}$

¹⁾ Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluß der Arbeit.

ist $p_s = 0,15 \text{ kg/cm}^2$. Diese Werte sind als untere Grenze zu betrachten, da sie im Schleppversuch ermittelt wurden. Bei motorischem Betrieb werden sie sich infolge der bedeutend höheren Temperaturen noch um weitere zusätzliche thermodynamische Verluste vergrößern.

Für einen Dieselmotor entsprechen bei Zugrundelegen von $n = 2500 \text{ U/min}$, $p_s = 6 \text{ kg/cm}^2$ und einem spezifischen Kraftstoffverbrauch von $b_s = 210 \text{ g PS}_\text{ch}$ diese Gemischbildungsverluste den folgenden Kraftstoffmengen:

für die Vorkammer mit $V = 30\%$:	11,6 g PS_ch ($= 5,52\%$ von b_s).
für die Vorkammer mit $V = 50\%$:	18,7 g PS_ch ($= 8,9\%$ von b_s).
für die Wirbelkammer:	5,1 g PS_ch ($= 2,43\%$ von b_s).

Würden diese Verluste vermieden, so wäre dadurch ein Leistungsgewinn der Maschine im Verhältnis $(p_s : p_s) / p_s$, also von 6% bzw. 10% bzw. $2,6\%$ zu erzielen.

Mit diesen Gemischbildungsverlusten, die mit steigender Drehzahl etwa quadratisch anwachsen, wird eine weitgehende Unabhängigkeit von der Zerstäubungs- und Aufbereitungsfähigkeit der Düse erkauft.

Bei der unmittelbaren Strahleinspritzung, die bei der zweiten Gruppe der Gemischbildungsverfahren vorliegt, fallen diese Verluste fort. Die Maschine kann in dem Aufbau des Verbrennungsraumes einfacher gehalten werden. Dieser paßt sich der Strahlform angenähert an und weist überdies noch unbedingt kleinere, Wärmeverluste an das Kühlwasser verursachende Oberflächen auf, als dies eine Brennraumzerklüftung mit sich bringt. Die unmittelbare Strahleinspritzung stellt jedoch andererseits bedeutend erhöhte Anforderungen an die gemischbildende Fähigkeit der Düse.

Das Streben, die Leistung der Dieselmachine zu verbessern, findet ganz allgemein ihren Ausdruck im Erhöhen der Drehzahl und des mittleren effektiven Druckes p_e sowie in dem Trachten nach Herabsetzen des Luftüberschusses λ . Man ist ferner bemüht, die Verlustleistung auf ein Mindestmaß herabzudrücken. Die Vorteile, welche die mit reiner Strahleinspritzung arbeitende Maschine in diesem Zusammenhange wie auch in baulicher Hinsicht bietet, berechtigt sie, in die engere Wahl für die Weiterentwicklung zur schnelllaufenden Hochleistungsmachine gezogen zu werden. Daß dieser Weg noch nicht auf breiterer Basis beschritten wurde, liegt neben anderen Gründen mit daran, daß über die Zerstäubungs- und Aufbereitungsfrage des Kraftstoffes und im besonderen über den Einfluß der Düse auf dieselbe noch weitgehende Unklarheit herrscht und daß die meisten heute verwendeten Düsen wirtschaftlich noch nicht den bei reiner Strahleinspritzung auftretenden Anforderungen genügen.

Die im folgenden geschilderten Versuche und ihre Ergebnisse beabsichtigen, zu dem in seiner Bedeutung hier aufgezeigten Probleme der Kraftstoffaufbereitung durch die Düse einen Beitrag zu liefern.

2 Zweck und Ziel der Versuche

Um eine grundsätzliche Klärung der sich im Dieselmotor überlagernden Erscheinungen der Kraftstoffeinspritzung, der Gemischbildung und Verbrennung zu ermöglichen, wurde für das Erforschen des Gesamtvorganges eine Unterteilung vorgenommen in Untersuchungen am Kraftstoffstrahl

- a) in kalter ruhender Luft, b) in heißer ruhender Luft, c) in heißer bewegter Luft.

Die folgenden Ausführungen bringen die Versuche und ihre Ergebnisse am Kraftstoffstrahl in kalter ruhender Luft. (Die Versuche in heißer Luft sind z. T. noch nicht abgeschlossen, werden später veröffentlicht.)

In der Versuchsdurchführung war man bestrebt, außer dem Einfluß von Luftbewegung und Temperatur alle sonst im Verbrennungsraum auftretenden Einflüsse auf den Flüssigkeitsstrahl mit zu erfassen. Die Versuche sollten aufzeigen

1. den Einfluß der Anfangsstörung der Düse,
2. den Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Spritzflüssigkeit:

- a) Oberflächenspannung (Dichte),
- b) Zähigkeit;

3. den Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Luft:

- a) Luftdichte,
- b) Luftzähigkeit;

4. den Einfluß der Strahlggeschwindigkeit (Abspritzdruck)

auf die Strömungsform des Strahles, den Strahlerfall und die Kraftstoffverteilung innerhalb des Strahles.

5. Es sollten ferner Aufschlüsse über die Tropfenbildung und Tropfengröße in Abhängigkeit von den unter 1. bis 4. genannten Einflüssen gewonnen werden.

3 Anordnung und Durchführung der Versuche

31 Die gesamte Versuchsanordnung

Die Versuche wurden an einer im Maschinenlaboratorium der T. H. Dresden vorhandenen Anlage (Bild 1) ausgeführt, die grundsätzlich beibehalten, jedoch wesentlich verbessert und erweitert wurde. Die Anlage dient der Photographie der Strahlen mittels hochgespannter elektrischer Funken. Sie ist bekannt durch frühere Versuche von *Höfhelder* [4, 5] und *Meurer* [11]. Deshalb soll hier von einer eingehenden Beschreibung dieser Anlage abgesehen werden.

In photographischer Hinsicht war es für die Durchführung des Versuchsplanes erforderlich, sehr scharfe, vergrößerungsfähige Bilder anzufertigen, um Einblicke in die Strömungsform des Strahles, die Tropfenbildung und Tropfengröße zu erhalten. Von dem Gelingen dieser Aufgabe, der sich anfangs bedeutende Schwierigkeiten entgegenstellten, hing die Durchführung der Versuche überhaupt ab. Von einer ausführlichen Schilderung der Entwicklung dieses Lupenvergrößerungsverfahrens für Flüssigkeitsstrahlen ist aus Platzgründen hier abgesehen²⁾. Der Enderfolg der Maßnahmen war, daß einwandfreie photographische Lupenvergrößerungen der Strahlen gelangen, die bis zu 45- bis 50-fach linear weiter vergrößert werden konnten. Die Tropfchen waren dabei bis zu einem kleinsten wahren Durchmesser von 2μ meß- und auszählbar.

Weiterhin war es notwendig, die aufzunehmenden Strahlstadien in irgendeiner Weise kenntlich und damit reproduzierbar zu machen, um dadurch eine äußerliche, voneinander unabhängige Vergleichsbasis für die verschiedenen zu untersuchenden Düsen- und Spritzflüssigkeiten zu schaffen. Zu diesem Zweck wurde auf der Pumpenwelle eine mitrotierende Kurbelwinkelmarke angebracht, die vom Belichtungsfunken gleichzeitig mit dem zu photographierenden Strahl beleuchtet wurde. Durch eine zweite Kamera wurde diese Marke dann in Zuordnung zum aufzunehmenden Strahlstadium mit photographiert (Bild 1). Der Nullpunkt der Skala war mit dem theoretischen Förderbeginn der Pumpe identisch (Einstellung mittels Kapillare). So bestand auch die Möglichkeit, die sich für die verschiedenen Düsen und Abspritzdrücke einstellende Spritzverzögerung photographisch zu ermitteln. Darauf soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden.

Für das Abtasten der verschiedenen Strahlstadien von Einspritzbeginn bis Einspritzende durch den Belichtungsfunken und im Zusammenhang mit dem Wunsch nach Reproduzierbarkeit dieser Strahlstadien mußte nun angestrebt werden, eine von Pumpendrehzahl und Funkspannung vollkommen unabhängige und beliebig einstellbare Funkenauslösung zu erreichen. Die Auslösung der Belichtungsfunken in Abhängigkeit vom Pumpenwellenwinkel [-PW] war bereits durch frühere Arbeiten an der Anlage grundsätzlich gelöst [2]. In diesem Zusammenhang sei deshalb auf diese Arbeiten verwiesen und hier nur erwähnt, daß die Auslösung entscheidend verbessert wurde durch Verwendung eines Fotrons. Die Genauigkeit der Funkenauslösung war damit absolut und drehzahlunabhängig und wies nur Schwankungen auf von $\pm 0,1$ PW (gegenüber bis zu $\pm 2,5$ PW mit dem alten Verfahren), die jedoch lediglich noch auf die von Hand vorgenommene Einstellung der Auslösung zurückzuführen sind.

32 Das für die Strahluntersuchungen angewandte Versuchsverfahren

Man war bestrebt, die im Versuchsplan aufgeführten Einflüsse durch die Versuchsführung einzeln herauszuschälen. Es war daher zunächst erforderlich, den Einfluß des Einspritzgesetzes weitgehend auszuschalten, d. h. die entsprechenden Versuchsbedingungen möglichst konstant zu halten. Aus diesem Grunde wurden sämtliche Versuche mit einer Spritzmenge von 30 mg Hub bei einer Pumpendrehzahl von $n = 1000$ U/min durchgeführt. In einem Motor von 650 cm³ Hubvolumen entspricht einer Gasölmenge von 30 mg Hub bei $n = 2000$ U/min etwa ein effektiver Druck $p_e = 5,7$ kg/cm². Das Einspritzsystem bestand für alle Versuche aus einer Bosch-Einzylinderpumpe PE1B mit 6 mm Plungerdurchmesser und einer Einspritzleitung von 2 mm Dmr. und 870 mm Länge. Das Einspritzgesetz war somit — für einen bestimmten Abspritzdruck betrachtet — nur den geringen Schwankungen

²⁾ Es sei auf die ausführliche Niederschrift dieser Arbeit verwiesen, die sich in der Handbücherei des Maschinenlaboratoriums der Technischen Hochschule Dresden befindet.

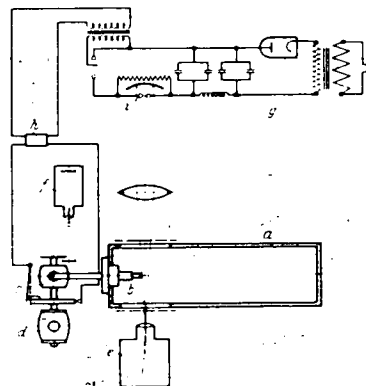


Bild 1. Versuchsanordnung für Strahluntersuchungen.

- a Einspritzpumpe;
- b Düsenhalter mit Düse;
- c Einspritzleitung;
- d Elektronenröhre;
- e photographische Kamera zur Aufnahme der Kraftstoffstrahlen;
- f photographische Kamera zur Aufnahme der mitrotierenden Kurbelwinkelmarke zwecks Ermittlung der mit α photographierten Strahlstadien;
- g elektrische Anlage zum Erzeugen der Belichtungsfunken;
- h Steuergerät für den Belichtungsfunken;
- i Belichtungsfunkentrecke.

unterworfen, die sich als Randbedingungen für den Schwingungsvorgang in der Kraftstoffleitung durch Verwendung verschiedener Düsenkonstruktionen einstellen.

Zur versuchsmaßige Erfassung der im Versuchsplan genannten Einflüsse ist folgendes auszuführen:

321 Einfluß der Anfangsstörung der Düse

Im Gegensatz zur Rohrströmung ist die Strömungsform eines sich frei in Luft fortbewegenden Flüssigkeitsstrahles im wesentlichen bestimmt durch die Anfangsstörung, die von der Gestaltung und den fertigungsmaßeigenen Eigenheiten der Düse abhängt. Unter Anfangsstörung hat man die Einwirkung zu verstehen, welche die Düse auf den austretenden Strahl ausübt. Diese Einwirkung rührt her von den verschiedenartigen Zustromverhältnissen (Nadelsitz usw.) der Spritzflüssigkeit zur Düsenaustrittsbohrung und bis zu einem gewissen Grade von der Anordnung und Beschaffenheit der Austrittsöffnung selbst (scharfer blendenartiger Austritt oder glatte Bohrung mit $1-d$).

Von den heute hauptsächlich verwendeten industriellen Düsen wurden einige ausgewählt, mit denen verschiedene Anfangsstörungen verwirklicht werden konnten. Die Untersuchungen wurden

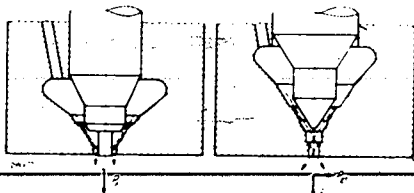


Bild 2.

Bild 3

Bild 2. Zapfendüse; Austrittsbohrung 1,0 mm leichter Dmr.

Die Nadel ist bei dieser schematischen Darstellung und auch bei den folgenden Düsen der Bilder 3, 4 und 5 in angehobenem Zustand gezeichnet.

Bild 3. Nadeldüse; Austrittsbohrung 1,0 mm leichter Dmr.

Bild 4. Flachsitzdüse; Austrittsbohrung 0,8 mm leichter Dmr.

Bild 5. Zapfendüse mit Kegel; Austrittsbohrung 2,0 mm leichter Dmr.

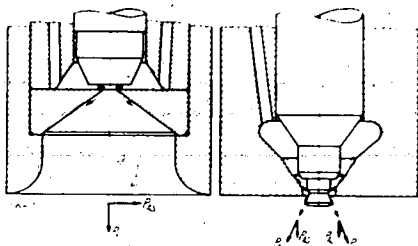
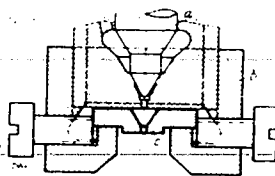


Bild 4.

Bild 5.

Bild 6. Behelfsmäßig hergestellte Spaltdüse.

a Nadeldüse Bild 3; b Befestigung für den Spaltvorsatz; c Spaltvorsatz.



ausschließlich mit geschlossenen Düsen durchgeführt, da dieselben unbestreitbare Vorzüge gegenüber offenen Düsen für die Verwendung im Motor besitzen.

Die Bilder 2 bis 6 zeigen die untersuchten Düsen. Die Düsenadel ist stets in angehobenem Zustand gezeichnet. Die gestrichelten Linien stellen den Verlauf von Stromfäden dar. Die Wirkungsweise der Düsen und ihr Einfluß auf die Strömungsform wird an Hand der gemachten Aufnahmen im Abschnitt 4 eingehend erläutert werden.

Die Strahlaufnahmen, die der Untersuchung der Strömungsform des Strahles abhängig von der Anfangsstörung dienen sollten, wie auch die späteren Untersuchungen über die Tropfenbildung und den Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Spritzflüssigkeit und der Luft, wurden in unmittelbarer Nähe der Düse vorgenommen, um einen möglichen Einfluß der Erdanziehung auszuschalten. Die Strahlggeschwindigkeiten lagen — entsprechend den im Dieselmotor üblichen Abspritzdrücken — zwischen 40 und 170 m/s, so daß in Düsennähe mit Sicherheit die Erdanziehung keinen Einfluß auf den Strahl ausübte.

322 Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Spritzflüssigkeit

Die verwendeten Spritzflüssigkeiten sind in Zahlentafel 1 enthalten.

Die in dieser Zahlentafel fettgedruckten Zahlen stellen die physikalischen Kenngrößen der Spritzflüssigkeiten dar, auf deren versuchsmaßige Erfassung es bei den Strahluntersuchungen ankam.

Im Vergleich zu Gasöl besitzt Wasser mehr als die doppelte Oberflächenspannung bei bedeutend geringerer Zähigkeit. Die physikalischen Kenngrößen des Wassers stehen zahlenmäßig also in unmittelbarem Gegensatz zu Gasöl. Das verwendete Schmieröl tritt durch seine Gasöl und Wasser übertreffende Zähigkeit hervor.

Zahlentafel 1. Physikalische
Daten der Spritzflüssigkeiten

Spritzflüssigkeit	Wichte bei 20 °C g/cm ³	Oberflächenspannung bei 20 °C g/cm	Kinematische Zähigkeit bei 20 °C cm ² /s
Gasöl (Derop)	0,855	0,031	0,062
Wasser	1	0,0739	0,01
Schmieröl	0,875	0,035	22,8

Bei der Fortbewegung eines Flüssigkeitsstrahles in Luft wirkt neben dem statischen Luftdruck auch noch der Einfluß der durch das Mitreißen von Luft entstehenden dynamischen Luftkräfte. Nähere Ausführungen hierüber sind in den späteren Abschnitten 43 und 6 enthalten. Für die grundsätzliche Beurteilung sowohl des Einflusses der verschiedenen physikalischen Kenngrößen der Spritzflüssigkeiten als auch der verschiedenen Anfangsstörungen zunächst auf die Strömungsform und den Strahl Aufbau würde das Vorhandensein der äußeren Luftkräfte fälschend wirken und somit den Erfolg dieser Untersuchungen überhaupt in Frage stellen. Die äußeren Luftkräfte müssen also zunächst ausgeschaltet werden; was durch Untersuchen des Strahles im Vakuum möglich ist. Durch Anfertigen photographischer Lupenvergrößerungen der Strahlen im Vakuum ist man in der Lage, relativ zueinander festzustellen:

- den Einfluß verschiedener Anfangsstörungen in ihrem Zusammenwirken mit den molekularen Flüssigkeitskräften und -eigenschaften bei Verwendung ein und derselben Spritzflüssigkeit auf die Strömungsform.
- bei gleichbleibender Anfangsstörung unter Verwendung verschiedener Spritzflüssigkeiten den Einfluß der unterschiedlichen physikalischen Kenngrößen der Spritzflüssigkeiten auf die Strömungsform.

Durch diese Art der Versuchsführung ist es möglich, getrennt von den übrigen jeden Einfluß einzeln zu erfassen. Sie gestattet damit eine klare Beurteilung der Auswirkungen der einzelnen Größen auf die später noch zu behandelnden Versuchsfragen.

Als bis zu einem gewissen Grade fälschend wirkend könnte man die im Vakuum auftretende Verdampfung und das Entweichen der in der Spritzflüssigkeit gelösten Luft anführen. Der Sättigungsdruck des verwendeten Derop-Gasöls bei 20 °C beträgt etwa 10 mm QS²⁾, der von Wasser 17,5 mm QS. Diese Zahlen zeigen, daß die im Vakuum³⁾ auftretende Verdampfung bei den hier verwendeten Flüssigkeiten sehr gering ist. Aus Augenbeobachtung und Photographie konnte auch kein Anhaltspunkt gefunden werden, daß beide Erscheinungen einen zusätzlichen fälschenden Einfluß auf die Ergebnisse ausübten.

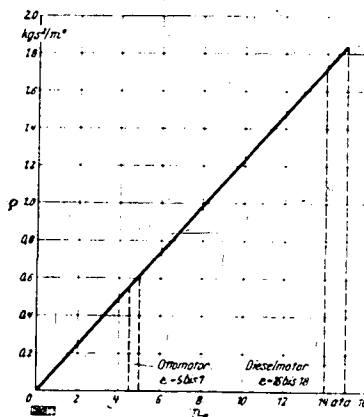
323 Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Luft

Aus früheren Untersuchungen am Flüssigkeitsstrahl [4, 5, 8, 9, 10] ist der große Einfluß der Luftdichte auf Eindringtiefe, Strahlauflösung, Tropfenbildung usw. bekannt. Die im Motor bei üblichen Verdichtungsverhältnissen am Ende des Verdichtungsstrokes (also während der Einspritzung) auftretende Luftdichte liegt beim Ottomotor bei etwa 0,55 kg s²/m⁴, beim Dieselmotor bei etwa 1,75 kg s²/m⁴. Auf die Verhältnisse in der Bombe bei kalter Luft von 20 °C übertragen, finden sich diese Luftdichten wieder bei etwa 4,5 bis 5 ata bzw. bei 14 bis 15 ata Luftdruck (Bild 7). Das Ziel der in diesem Zusammenhang unternommenen Versuche sollte es sein, abhängig von Strömungsform und Geschwindigkeit des Strahles Einblicke in die sich unter verschiedenen Luftdichten einstellende Flüssigkeitsverteilung im Strahl zu gewinnen, ferner Aufschlüsse über die einsetzende Tropfenbildung und Tropfengröße zu erhalten.

Der Ermittlung der mengenmäßigen Kraftstoffverteilung im Strahl mußte das erhöhte Interesse der Versuche gelten, denn ihre Kenntnis bietet — vom verbrennungs-technischen Standpunkt aus betrachtet — eine brauchbare überschlägige Beurteilungsmöglichkeit für das Arbeiten der Düse im Motor.

Ein Versuch wurde zunächst mit Plastilinabdrücken unternommen, die in 50 mm Entfernung von der Düsen-

Bild 7. Abhängigkeit der Luftdichte ρ vom Luftdruck p_g bei $t_g = 20^\circ\text{C}$ Lufttemperatur in der Bombe; mit Angabe der Bereiche, die für Otto- und Dieselmotor am Ende des Verdichtungsstrokes gelten.



²⁾ Im Maschinenlaboratorium der T. H. Dresden gemessen.

³⁾ In der Bombe wurde ein Vakuum von 30 bis 40 mm QS erreicht.

vorderkante vom Strahl gemacht wurden. Da Plastilin ein vollkommen homogener, leicht nachgiebiger Stoff ist, muß sich ein getreues Bild der Flüssigkeitsverteilung über den Strahlquerschnitt ergeben. Dort, wo sich die größte Flüssigkeitsmenge im Strahl befindet (d. i. im Strahlkern), ist der Stoßimpuls und damit der Eindruck im Plastilin am tiefsten. Eine mengenmäßige Auswertung der Abdrücke in dieser Richtung, die nach dem Stoßprinzip möglich wäre, wurde jedoch nicht vorgenommen, da die Abdrücke dafür doch zu ungenau sein durften, weil die aufgespritzte Flüssigkeit gleich wieder verdrängt wird, abfließt und somit bis zu einem gewissen Grade erodierend wirkt. Da die Abdrücke jedoch sehr anschaulich den Einfluß der Luftdichte auf den Strahl Aufbau wiedergeben (wie später gezeigt werden wird), war man bestrebt, durch Einhalten einer immer gleichbleibenden Anzahl von Aufspritzungen die Abdrücke unter sich gut vergleichbar zu machen. Durch eine besondere Vorrichtung wurde für das Einhalten dieser Bedingung gesorgt.

Auf diese Weise angefertigte Plastilinabdrücke geben für in großen Mengen vorzunehmende industrielle Untersuchungen von Kraftstoffstrahlen rasch und anschaulich vergleichmäßige Aufschlüsse über das Arbeiten der einzelnen Düsen.

Für die genaue mengenmäßige Untersuchung der Flüssigkeitsverteilung im Strahl wurde ein Auffangverfahren angewandt, für das folgende Gesichtspunkte maßgebend waren:

- Das Auffanggefäß darf keinerlei Störung rücklaufend auf Strahlbildung und Strahlauflösung ausüben.
- Das Einschleusen der Flüssigkeit in das Auffanggefäß muß glatt und ohne Konvergenz- oder Wirbelbildung an der Auffangmündung (etwa durch Vorhandensein einer Druckdifferenz zwischen Bombe und Auffanggerät oder infolge zu geringer Geschwindigkeit der Auffangflüssigkeit) erfolgen, da sonst das Ergebnis gefälscht wird.

Die beispielsweise von Lee (8) zur Ermittlung der Flüssigkeitsverteilung angewandten Verfahren (Absaugerohr- und Schalen auffangverfahren) erfüllen obige Forderungen nur in sehr beschränktem

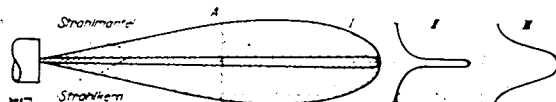


Bild 8. Strahl aufbau (Lochdüse) nach Lee (8).
I. Strahllängsschnitt; II. Kraftstoffverteilung über den Querschnitt A, B; III. Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt A, B.

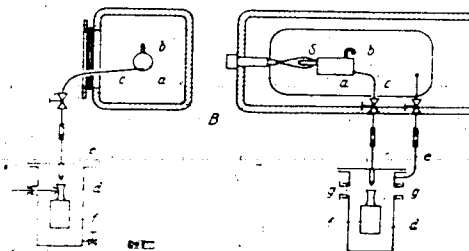


Bild 9 (rechts). Meßrichtung für Kraftstoffmengenmessungen im Strahlkern.

B. Einspritzbombe mit Düsenhalter und Düse
S. Sondenrohr; 2 mm Licht. Dmr., ≈ 50 mm lang, vorn allmählich scharf zugespitzt

- locker mit Metallwolle gefülltes Dämpfungsgefäß
- Öffnung für den Druckausgleich zwischen a und B
- Abfluß für die aufgefangene Kraftstoffmenge

- außerhalb der Bombe B aufgestelltes Gefäß
- Leitung für den Druckausgleich zwischen B und a
- schwenkbar angelenktes Auffanggefäß für die sondierte Kraftstoffmenge
- Fenster

Maße. Die von ihm aufgestellte, in Bild 8 schematisch wiedergegebene Darstellung des Strahl aufbaues (Kern und Mantel) und der Geschwindigkeitsverteilung im Strahlquerschnitt, die durch die Plastilinabdrücke bestätigt wurde, weist jedoch darauf hin, daß ein einwandfrei arbeitendes Auffangverfahren nach Punkt a) und b) nur im Strahlkern überhaupt Aussichten auf Erfolg und genügende Genauigkeit (Forderung b) haben kann, da dort größte Masse und somit größte Durchschlagskraft vorhanden sind.

Aus diesem Grunde wurde für die Untersuchungen ein Auffangverfahren angewendet, das nur den Strahlkern erfaßt. Als Kriterium für die Kraftstoffverteilung im Strahl und damit für das Arbeiten der Düse und des Luftinflusses betrachtet man dann den prozentualen Anteil, den der Strahlkern an der insgesamt je Hub eingespritzten Flüssigkeitsmenge besitzt. Vom Standpunkt der Gemischbildung und der motorischen Verbrennung aus ist dieses Verfahren wohl mit am besten gerechtfertigt.

Bild 9 zeigt schematisch die Durchführung dieser im Strahlkern vorgenommenen Auffangversuche.

In den Strahl ragt mittig ein feststehendes, vorn mit allmählichem Übergang scharf zugespitztes Sondenrohr S von 50 mm Länge hinein. Aus den Plastilinabdrücken ergab sich, daß der Kerndurchmesser der Strahlen höchstens etwa 2 bis 3 mm für die hier gewählte Einspritzmenge von 30 mg Hub beträgt. Der leichte Sondendurchmesser wurde dementsprechend zu 2 mm ausgeführt. Die mit ziemlicher Geschwindigkeit die Sonde durchlaufende aufgefangene Flüssigkeitsmenge gelangt zunächst in ein locker mit Metallwolle gefülltes Dämpfungsgefäß a, das des besseren Luftdruckausgleiches wegen noch eine zweite Öffnung b nach außen besitzt. Von a aus fließt die aufgefangene

Flüssigkeit unter stetem Gefälle durch die Leitung c in ein zweites, außerhalb der eigentlichen Einspritzbombe B aufgestelltes Gefäß d , das jedoch über die Leitung e luftseitig mit der Einspritzbombe B nochmals verbunden ist, so daß B und d immer unter ein und demselben Luftdruck stehen. In diesem Gefäß d wurde die herabfließende Flüssigkeit durch ein von außen ein- und ausschwenkbares Auffanggefäß f gesammelt. In f wurden jeweils die sondierten Mengen von 2000 bis 4000 Einspritzungen aufgefangen, worauf f ausgebaut und gewogen wurde. Die Anordnung des zweiten Gefäßes d war erforderlich, um das zeitraubende, umständliche Öffnen der eigentlichen Einspritzbombe B zum Ausbau des Auffanggefäßes nach der Messung zu vermeiden.

Die Entfernung Düse—Sondenöffnung betrug für sämtliche Messungen 50 mm. Die Einstellung der Sondenöffnung auf die Kernmitte des Strahles wurde folgendermaßen vorgenommen: In 50 mm Entfernung von der Düse wurde zunächst ein Plastilindruck vom Strahl genommen, in dem der Strahlkern sich deutlich abzeichnete. Das Plastilin befand sich dabei in einem Holzgestell, das in seiner Stellung zur Düse durch seitliche Anschläge genau festgelegt war und somit selbst nach nochmaligem Aus- und Einbau stets wieder die zuerst innegehabte Lage einnehmen mußte. Auf das Plastilin wurde nun ein Fadenkreuz gelegt, auf Mitte Kernabdruck ausgerichtet und am Holzgestell befestigt. Nachdem dann das Plastilin aus dem Gestell entfernt war, konnte die Sonde selbst genau auf die durch das Fadenkreuz ersetzte Kernmitte eingestellt und ausgerichtet werden.

Der eingangs für das Arbeiten des Auffangverfahrens aufgestellten Forderung a) ist man insofern gerecht geworden, als das Sondenrohr entsprechend lang (50 mm) ausgeführt und genau mittig in die Strahlachse gelegt wurde (Anvisieren der Linie Fadenkreuz—Düsenbohrung). Durch diese Maßnahmen und durch die scharf zugeschliffene Eintrittsöffnung der Sonde konnte keinerlei Stau oder sonstige rückwirkende Beeinflussung der Strahlbildung und -auflösung eintreten. Die zusätzliche Öffnung b des Dämpfungsgefäßes a gleicht etwa in a durch das stoßweise Einschleusen der Flüssigkeit auftretende Luftschwingungen aus und verhindert das Zustandekommen von Luftdruckunterschieden zwischen B und a . Dem gleichen Zweck und damit der Erfüllung der Forderung b) dient die Verbindung e zwischen B und d .

Durch Augenbeobachtung des Einschleusvorganges konnte bei stroboskopischer Beleuchtung mit dem Belichtungsfunken der Anlage festgestellt werden, daß das Auffangen des Strahlkernes einwandfrei unter Erfüllung der dafür aufgestellten Bedingungen verläuft²⁾.

Nachdem mit Hilfe dieser Verfahren der Einfluß der Luftdichte auf die Strahlauflösung näher untersucht werden kann, besteht Interesse daran, den Einfluß auch der Luftzähigkeit auf die Strahlauflösung getrennt vom Dichteinfluß zu erfassen. Obwohl hierüber noch keine Untersuchungen bekannt sind, wird ihre Bedeutung doch erhellt, wenn man sich vergegenwärtigt, daß die Luftzähigkeit im Motor bei Verdichtungsgrade (650 °C) etwa $4040 \cdot 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (CGS-Einheiten) beträgt (Bild 91, Punkt B), während sie bei 20 °C in der Bombe nur etwa $1850 \cdot 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ besitzt (Bild 91, Punkt A). Eine zusätzliche Abhängigkeit der Luftzähigkeit vom Druck tritt praktisch bei dem im Motor in Frage kommenden Druckbereich (höchstens 120 at) nicht auf.

Die Erfassung des Zähigkeitsinflusses auf den Strahl in der Bombe, also bei gleichbleibender Temperatur von 20 °C, gelingt dadurch, daß man die Bombe anstatt mit Luft mit einem Gas anderer Zähigkeit füllt. In Annäherung an die im Motor auftretende große Luftzähigkeit war Neon mit einer Zähigkeit von etwa $3100 \cdot 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ das geeignete Gas gewesen. Wegen des hohen Preises des Neons mußte davon abgesehen werden. Als nächstes Gas, das einen bedeutenden Zähigkeitsunterschied gegenüber Luft aufweist, zeigt sich Äthan mit etwa $920 \cdot 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bei 20 °C (Punkte C, Bild 91), also mit etwa der halben Luftzähigkeit bei gleicher Temperatur.

Es wurden nun Vergleichsversuche mit Hilfe des Auffangverfahrens bei Einspritzung in die Luft- und Äthanatmosphäre unternommen. Dabei wurde sofort nach Abschluß der in Luft vorgenommenen Auffanguntersuchungen die Bombe nach Entfernen der Luft mittels Vakuumpumpe mit Äthan gefüllt und — ohne daß an der Einstellung und Anordnung der Versuchsanlage das geringste geändert wurde — mit den Auffangversuchen in Äthan begonnen. Die Ergebnisse müssen im Verhältnis zueinander den Einfluß der unterschiedlichen Zähigkeit der beiden Gase auf die Strahlauflösung bei sonst gleichen Gasdichten aufzeigen.

Für die Bedingung gleicher Gasdichten von Luft und Äthan ($\rho_A = \rho_L$) ergeben sich die jeweils in der Bombe einzustellenden Drücke bei konstanter Gastemperatur von 20 °C aus:

$$P_A = \frac{R_A}{R_L} \cdot P_L = 0,963 P_L,$$

wobei R_A bzw. R_L die Gaskonstanten von Äthan und Luft bedeuten.

²⁾ Das Einschleusen kann zum Beweis dafür leider nicht photographiert werden, da — wie aus den Strahlaufnahmen hervorgeht — auf dem Bild das Strahlinnere stets schwarz erscheint, weil die Flüssigkeit (besonders Gasöl) zu wenig Licht durchläßt. Auf dem Bilde ist also vom Einschleusvorgang nichts zu erkennen. Für das Auge genügt jedoch das durch den Strahl scheinende Licht vollkommen, um genaue Einzelheiten feststellen zu können.

324 Einfluß der Strahlgeschwindigkeit

Die Versuche von *Haenlein* [2] haben neben anderem vor allem eindeutig den Einfluß zunehmender Strahlgeschwindigkeit auf die Strahlauflösung aufgezeigt. Er verwendete dabei allerdings nur zylindrische Lochdüsen.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit sollte der Einfluß der Strömungsform bei verschiedener Anfangsstörung und Abänderung der Strahlgeschwindigkeit auf die Strahlauflösung mittels des Auffangverfahrens festgestellt werden. Dabei wurde die Strahlgeschwindigkeit nur soweit verändert, wie sie den heute im Diesel- und Ottomotor hauptsächlich verwendeten Abspritzdrücken von etwa 70 bis 300 at entspricht. Die mittleren Strahlgeschwindigkeiten lagen dabei zwischen etwa 40 und 170 m/s. Eine weitere Steigerung des Abspritzdruckes und damit der Strahlgeschwindigkeit wurde vor allem aus dem Grunde unterlassen, weil bereits bei 300 at Abspritzdruck die Nadel-sitze der Düsen nach 2- bis 3stündigem kalten Betrieb deutliche Verschleißspuren aufwiesen, was bei einigen Düsen allmählich zum Klemmen der Nadel führte.

Die mittlere Strahlgeschwindigkeit wurde festgestellt, indem bei stroboskopischer Funkenbeleuchtung die Strahlängen von Einspritzbeginn an von Grad zu Grad ausgemessen wurden. Schleichendes Einspritzende oder Nachspritzen blieb unberücksichtigt. Aus den so gefundenen Strahlängen und den bei der konstant eingehaltenen Versuchsdrehzahl von $n = 1000$ U/min bekannten Zeiten je PW konnte die mittlere Strahlgeschwindigkeit errechnet werden. Aus verständlichen technischen Gründen ließen sich die Strahlgeschwindigkeiten der untereinander verglichenen Düsen nicht genau jeweils auf dieselbe Größe bringen. Der auftretende Unterschied hält sich jedoch in Grenzen, die auf das Ergebnis des Vergleiches keinen Einfluß haben.

4. Versuchsergebnisse

Es sei zunächst bemerkt, daß die Ergebnisse nicht genau so getrennt voneinander wiedergegeben werden können, wie es den im Versuchsprogramm nacheinander aufgeführten und unterteilten Einflußgrößen entsprechend geschehen müßte. Es sind daher Ergebnisse, die eigentlich unter ein anderes Kapitel gehörten, jedoch im Zusammenhang erwähnenswert und zum tieferen Verständnis notwendig erscheinen, oft vorweggenommen bzw. später wiederholt.

Bezüglich der angeführten Strahlaufnahmen sei gesagt, daß auf allen Bildern sich links die Düse befindet; der Strahl bewegt sich auf dem Bilde also stets von links nach rechts. Der Maßstab der Kopien ist jeweils angegeben.

41 Einfluß der Anfangsstörung der Düse

Die Stromfäden in Bild 2 zeigen, daß bei der Zapfendüse die Spritzflüssigkeit nach Durchströmen des Nadel-sitzes auf den zylindrischen Zapfen trifft und, an ihm entlang gleitend, durch die Düsenbohrung ins Freie gelangt. Diese Führung der Spritzflüssigkeit durch den Zapfen bringt es mit sich, daß die Flüssigkeit als geschlossener Zylinder die Düse verläßt. Die Bilder 10 bis 12 zeigen den Strahl in verschiedenen Stadien von Einspritzbeginn an gerechnet. Aus Bild 10 geht hervor, daß der Strahl beim Ablösen von dem Nadelzapfen sich unter dem Einfluß der Oberflächenspannung zu einzelnen, unter sich jedoch zusammenhängenden Kernen ballt und in der Mitte Hohlräume aufweist. Dies wird vielleicht noch deutlicher in Bild 13 und 14, die das Einspritzende bei einer dem Bild 2 ähnlichen Zapfendüse zeigen, bei der der Zapfen jedoch etwas länger aus dem Düsenkörper herausragt.

Auf den Bildern 11 und 12, die gegenüber Bild 10 spätere Strahlstadien wiedergeben, zeigt der Strahl deutlich seine zusammengeballte, äußerlich zylindrische Strömungsform. Die unmittelbar an der Düse (ganz links auf Bild 11 und 12) seitlich abflatternden Flüssigkeitsstrahlen weisen darauf hin, daß sich an der Düsenbohrung selbst vorstehende Zacken bzw. ein Grat befindet, der dieses aus dem Rahmen fallende Abspalten kleiner Randteile und auch die etwas zerrissene Oberfläche des Strahles selbst verschuldet^{*)}. Spätere Bilder von einer Düse mit einwandfreier Bohrung zeigen eine vollkommen glatte Strahloberfläche (Bilder 26 und 27) bei geballter Strömung.

Die Strahlaufnahmen, Bilder 10 bis 12, beweisen die Richtigkeit der eingangs angenommenen und durch die eingezeichneten Stromfäden in Bild 2 veranschaulichten Wirkungsweise der Zapfendüse. Es besteht sich, daß der Strahl bei Verlassen der Düse lediglich einen Impuls (entsprechend P , in Bild 2) in Richtung der Strahlachse erhält. Kleine Quergeschwindigkeiten dürften allerdings trotzdem im Strahl vorhanden sein. An dem Zustandekommen einer reinen Schichtenströmung nach Art der aus der Hydrodynamik der Rohrströmung bekannten laminaren Strömung darf jedoch überhaupt gezweifelt werden. Die weit auseinanderliegenden Dichten der beiden Medien Flüssigkeit und Luft, die sich etwa wie 1000:1 verhalten, und das Vorhandensein der in der Grenzschicht der Flüssigkeit auftretenden Oberflächenspannung bringen es mit sich, daß sich die geringste Störung der Strahl-

^{*)} Die verwendete Zapfendüse (Bild 2) wurde absichtlich in dem angelieferten Zustand belassen, um so die fabrikatorische Beschaffenheit und ihren Einfluß auf den Strahl mit verdeutlichen zu können.

oberfläche auf das Strahlinnere fortpflanzt und reine Schichtenströmung verhindern wird. Die bei der Zapfendüse (Bild 2) beobachtete Strömungsform sei daher als „geballte Strömung“ bezeichnet.

Die in Bild 3 dargestellte Nadeldüse zeigt eine von der Zapfendüse sich etwas unterscheidende Anfangsstörung. Die Spritzflüssigkeit strömt durch den Nadelsitz an der Nadelspitze entlang mit großer Geschwindigkeit einem Punkt zu, an dem die von allen Seiten kommenden Stromfäden aufeinander prallen. Durch diesen „Flüssigkeitsstoß“ und durch die weiter nachdrängende Flüssigkeit (Druckgefälle) wird von dieser Düse dem ausfließenden Strahl ein Impuls aufgedrückt, entsprechend einer Kraft, deren eine Komponente P_F in Richtung der Strahlachse und andere Komponenten P_{AS} senkrecht dazu liegen (Bild 3). Die Folge davon ist eine gegenüber der geballten Strömung mehr aufgelockerte Strömung, wie die Bilder 15 bis 18 zeigen.

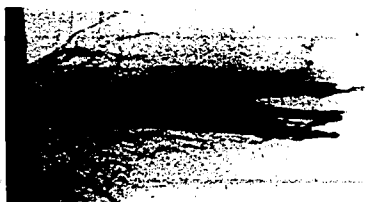


Bild 10.

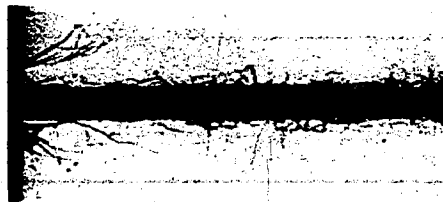


Bild 11.

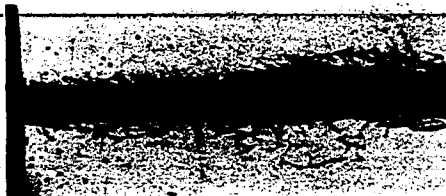


Bild 12.

Bild 10 bis 12. Kraftstoffstrahl mit geballter Strömung, erzeugt mit Zapfendüse (Bild 2), in verschiedenen Stadien nach Einspritzbeginn.

Gasöl; Vakuum; $v_m = 80$ m/s; Einspritzdauer: 9 PW bei $n = 1000$ U/min; Vergr. 5 fach.

Bild 10: 0,9 PW nach S.B.; Bild 11: 2,8 PW nach S.B.; Bild 12: 8 PW nach S.B.

Bild 13 und 14 (unten). Kraftstoffstrahl am Einspritzende bei geballter Strömung, erzeugt mit einer Zapfendüse (ähnlich Bild 2).

Gasöl; $p_g = 1$ ata; $v_m = 80$ m/s; Strahlstadium: kurz vor Spritzende. Vergr. 7,8 fach.

Bild 13 zeigt das Ablösen des Kraftstoffes von der Düsen-
nadel und den einsetzenden Einfluß der Oberfl.-Spannung
des Kraftstoffes. Bild 14 verdeutlicht die Hohlraumbildung
innerhalb des Strahles.

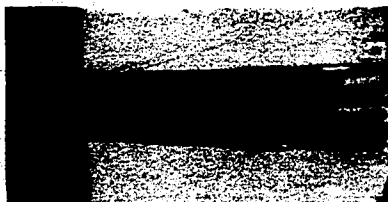


Bild 13.

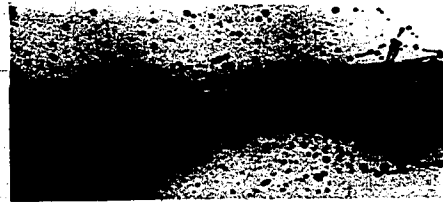


Bild 14.

Bei dieser Düse wirkt die gegenüber dem Bohrungsdurchmesser große Bohrungslänge in Verbindung mit der Zähigkeit der Spritzflüssigkeit jedoch stark dämpfend auf die Anfangsstörung. Die senkrecht zur Strahlachse gerichteten Komponenten P_{AS} werden dadurch stark verkleinert und verschwinden schließlich ganz gegen Einspritzende zu, wo das Druckgefälle zwischen der Flüssigkeit im Nadelsitz und dem ausfließenden Strahl nur noch sehr klein ist. Die anfänglich aufgelockerte Strömung geht hier infolgedessen am Einspritzende in die geballte Strömung über.

Im Gegensatz zur Nadeldüse (Bild 3) besitzt die in Bild 4 dargestellte Flachsitzdüse eine Anfangsstörung, die das Zustandekommen einer reinen aufgelockerten Strömungsform des ausfließenden Strahles von Einspritzbeginn bis Einspritzende ermöglicht. Die Spritzflüssigkeit strömt in einer Ebene radial von allen Seiten zwischen Düsenblatt und Nadelsitz auf die blendenartig angeordnete Düsenbohrung zu. In der Düsenbohrung selbst kommt es zum Flüssigkeitsstoß. Er muß bei dieser Düse stärker sein, als bei der Nadeldüse (Bild 3), da die Flüssigkeit nicht wie dort unter einem Winkel von etwa 60° sondern in einer Ebene auf die Bohrung und damit auf den Stoßpunkt zufließt. Die bei



Bild 15.



Bild 16.

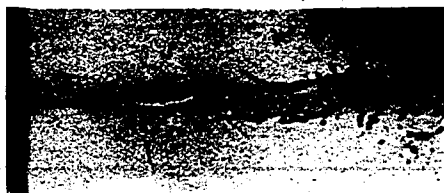


Bild 17.

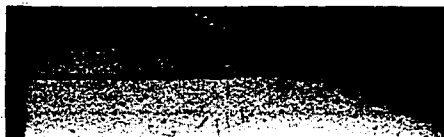


Bild 18.

Bild 15 bis 18. Kraftstoffstrahl mit aufgelockelter Strömung, die in geballte übergeht, erzeugt mit Nadeldüse (Bild 3), in verschiedenen Stadien nach Einspritzbeginn.

Gasöl; Vakuum; $c_{50} = 77 \text{ m/s}$; Einspritzdauer: 10,5 PW bei $n = 1000 \text{ U/min}$; Vergr. 2,5 fach.

Bild 15: 2 PW nach S.-B.; **Bild 16:** 1,5 PW nach S.-B.; **Bild 17:** 7 PW nach S.-B.; **Bild 18:** 9 PW nach S.-B.

der Nadeldüse vorhandene Dämpfung durch die Düsenbohrung fällt bei der hier verwendeten Flachsitzdüse ebenfalls fort. Daraus kann man schließen, daß die durch den Flüssigkeitsstoß erzeugte, senkrecht zur Strahlachse auftretende Kraftkomponente P_{AS} (Bild 4) bedeutend größer sein muß als bei der Nadeldüse (Bild 3), und daß sie sich ungehindert durch etwaige Dämpfung auf den Strahl auswirken kann⁷⁾.

Die von der Flachsitzdüse gemachten Strahlaufnahmen, Bilder 19 bis 21, bestätigen diese Ausführungen und zeigen eine vollkommen aufgelockerte Strömungsform des Strahles. Bemerkenswert an dieser Strahlform und auf den Aufnahmen deutlich erkennbar ist die gegenüber der geballten Strömung bessere Kraftstoffverteilung des Strahles über ein größeres Volumen und der zerklüftete

⁷⁾ Eine gewisse Dämpfung der P_{AS} -Komponente und ihrer Auswirkung auf die Strahlbildung durch die Zähigkeit der Spritzflüssigkeit ist natürlich stets vorhanden.



Bild 19.



Bild 20.

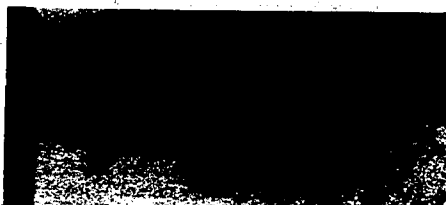


Bild 21.

Bild 19 bis 21. Kraftstoffstrahl mit aufgelockelter Strömung, erzeugt mit Flachsitzdüse (Bild 4), in verschiedenen Stadien nach Einspritzbeginn.

Gasöl; Vakuum; $c_{50} = 77 \text{ m/s}$; Einspritzdauer: 13 PW bei $n = 1000 \text{ U/min}$; Vergr. 3 fach.

Bild 19: 4 PW nach S.-B.;

Bild 20: 9 PW nach S.-B.;

Bild 21: 11 PW nach S.-B.

Strahlrand, der für die Erzeugung und den Angriff der später zu beschreibenden Luftkräfte günstigere Bedingungen mit sich bringt, als dies bei der geballten Strömung der Fall ist.

Man kann also nach den bisherigen Feststellungen zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Strömungsformen des Strahles unterscheiden, die ihr Entstehen der in der Düse auftretenden Anfangsstörung verdanken: zwischen geballter und aufgelockerter Strömung. Die beiden charakteristischen zum Erzeugen dieser Strömungsformen hier verwendeten Düsen sind die Zapfendüse Bild 2 und die Flachspritzdüse Bild 4.

Die in Bild 5 dargestellte Zapfendüse mit am Zapfenende angedrehtem Kreiskegel stellt eine Abart der Zapfendüse des Bildes 2 dar. Die eingezeichneten Stromfäden zeigen, daß die Spritzflüssigkeit zunächst am zylindrischen Zapfenteil entlang gleitet, dann auf den kegelförmigen Zapfenteil stößt, von dem sie weitergeführt wird und in der Form einer keiskegelförmigen Mantelfläche die Düse

Bild 22. Bei der Zapfendüse mit Kegel (Bild 5) verläßt die Spritzflüssigkeit die Düse als kegelförmiges Häutchen.

Zähes Schmieröl; Vakuum:
 $r_m \approx 40 \text{ mm}$; nat. Größe;
Strahlstadium: $\approx 5 \text{ } \mu\text{W}$
nach S.-B.



verläßt. Dies ist sehr klar auf Bild 22 unter Verwendung des sehr zähen Schmieröls veranschaulicht. Die Spritzflüssigkeit verläßt also in Form eines keiskegelförmigen Häutchens die Düse. Die große Zähigkeit des Schmieröls verhindert eine weitere Auflösung desselben. Unter Verwendung des weniger zähen Gasöls tritt dieselbe Art der Strahlbildung auf. Es wird auch hier zunächst unter dem Einfluß der Zähigkeit des Gasöls ein Häutchen gebildet, das jedoch unmittelbar nach Verlassen des Zapfens infolge der Oberflächenspannung des Gasöls in einzelne kleine Strahlkerne zerfällt, die dann für sich weiter fliegen. Dabei wird jedoch die Kegelmantelform des Strahles auch weiterhin gewahrt. Eine Photographie dieser Strahlform mit Gasöl, die ohne weiteres Einblick in dieselbe gewährt, ist aus den in der Fußnote 5 auf Seite 7 geschilderten Gründen nicht möglich gewesen, da das Gasöl im Gegen-

Bild 23. Oberflächenspannung verursacht Zerfallen des mit der Zapfendüse (Bild 5) erzeugten kegelförmigen Flüssigkeitshäutchens (vgl. Bild 22).

Gasöl; $p_g = 1 \text{ atm}$; $r_m \approx 50 \text{ mm}$;
Strahlstadium: $8,8 \text{ } \mu\text{W}$ nach
S.-B.; Einspritzdauer: $13 \text{ } \mu\text{W}$
bei 1000 U/min ; Vergr. 5fach.



satz zu dem verwendeten Schmieröl nicht genügend Helligkeit zum Belichten des Filmes durchläßt. Der Nachweis der kegelmantelförmigen Strahlform bei der Zapfendüse (Bild 5) mit Gasöl gelang jedoch mit Hilfe der auf Seite 22 näher beschriebenen, in den Strahl gesetzten Blende (Bild 83), die einen Mittelschnitt des Strahles freigibt unter Zurückhaltung der vor und hinter diesem Mittelstück des Strahles befindlichen Strahlteile. Das so gewonnene Bild 84 zeigt deutlich den kegelmantelförmigen Aufbau des Strahles auch bei Gasöl.

Zum Beweis für das oben erwähnte Zerfallen des sich vom Zapfenkegel ablösenden Häutchens in einzelne Kerne bei Verwendung von Gasöl kann noch die zufällig gelungene Aufnahme, Bild 23, angeführt werden, die diesen Einfluß der Oberflächenspannung veranschaulicht.

Noch deutlicher wurde die Häutchenbildung und der Häutchenzerfall mit der in Bild 6 dargestellten behelfsmäßig aufgebauten Spaltdüse festgestellt. Die Bilder 24 und 25 zeigen die Draufsicht auf die Breitseite des den Spalt verlassenden Häutchens. In Bild 24 ist die Kernbildung an dem vorderen Teil des Häutchens zu sehen. Bild 25, das ein späteres Einspritzstadium wiedergibt, läßt



Bild 24.

Bild 24 und 25. Zerfall des mit Spaltdüse (Bild 6) erzeugten Flüssigkeitshäutchens.

Bild 25.

Gasöl; Vakuum; Spalthöhe $\approx 0,1$ mm; Vergr. 5 fach.
Bild 24: früheres; Bild 25: späteres Strahlstadium.

erkennen, daß das Häutchen dann auch quer zur Einspritzrichtung in einzelne kleine Kerne zerfällt. Auf die Bedeutung dieser Häutchenbildung wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen werden.

Nun wurden die Strahlen aus der Zapfendüse (Bild 2) und der Flachsitzdüse (Bild 4) bei verschiedenen Strahlgeschwindigkeiten untersucht. Es ist wichtig — besonders für die späteren Mengmessungen — feststellen zu können, daß mit steigender Strahlgeschwindigkeit die Strömungsform bei diesen beiden Düsen grundsätzlich dieselbe bleibt. Ein Übergang beispielsweise von geballter zu aufgelockelter Strömung mit steigender Strahlgeschwindigkeit — wie man etwa in Analogie zur Rohrströmung aus dem Übergang von laminarer in turbulente Strömung annehmen könnte — tritt bei dem hier erfaßten Geschwindigkeitsbereich nicht ein. Es ist auch nicht anzunehmen, daß bei der Art der Führung der Flüssigkeit, beispielsweise bei der Zapfendüse, Bild 2, in der Düse sich starke, senkrecht zur Strahlachse gerichtete Geschwindigkeitskomponenten ausbilden können, die dann zu einer mehr aufgelockerten Strömungsform führen würden.

In diesem Zusammenhang sei noch auf die in den Bildern 26 bis 29 wiedergegebenen Versuche mit einer Flachsitzdüse von 0,3 mm Dmr. und einer solchen mit 1 mm Bohrungsdmr. bei stets gleich bleibendem Nadelsitzdurchmesser von 3 mm Dmr. hingewiesen. Die Flachsitzdüse mit 0,3 mm Dmr. zeigt überraschenderweise eine reine geballte Strömung. Dies kommt anscheinend dadurch zustande,

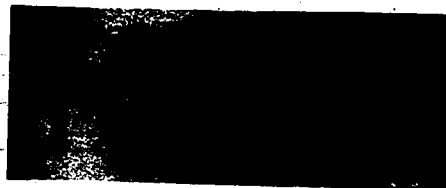
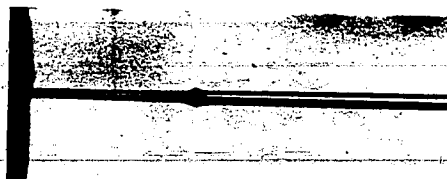


Bild 26.

Bild 26 und 27 (obere Bildreihe). Kraftstoffstrahl mit geballter Strömung, erzeugt mit einer Flachsitzdüse mit 0,3 mm Dmr., bei verschiedenen Strahlgeschwindigkeiten v_m .
Gasöl; Vakuum; Strahlstadium: 5° PW nach S.-B.; Einspritzdauer: $\approx 13^\circ$ PW bei $n = 1000$ U/min; Vergr. 5 fach.
Bild 26: $v_m = 72$ m/s; Bild 27: $v_m = 160$ m/s.

Bild 27.

Bild 28 und 29 (untere Bildreihe). Kraftstoffstrahl mit aufgelockelter Strömung, erzeugt mit einer Flachsitzdüse mit 1,0 mm Dmr., in verschiedenen Stadien nach Einspritzbeginn.
Gasöl; Vakuum; $v_m \approx 60$ m/s; Einspritzdauer: $\approx 12^\circ$ PW bei $n = 1000$ U/min; Vergr. 5 fach.
Bild 28: 1,0° PW; Bild 29: 10° PW nach S.-B.

Bild 28.

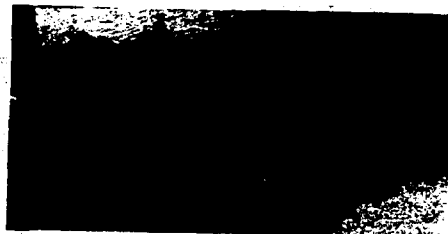


Bild 29.

daß die Geschwindigkeit der Flüssigkeit auf dem hier gegenüber der Düse mit 0,8 mm Dmr. längeren Weg im Nadelsitz (Flachsitz) durch die Flüssigkeits Zähigkeit und -reibung stark herabgemindert wird, was gleichzeitig die vollkommene Abdampfung des Flüssigkeitsstoßes in der Düsenbohrung zur Folge hat¹⁾.

Die Flachsitzdüse mit 1 mm Düsenbohrung zeigt wieder reine aufgelockerte Strömung (Bilder 28 und 29). Bild 29 läßt jedoch vermuten, daß der Strahlkern hier stärker ist als bei der Düse mit 0,8 mm Bohrungsdmr.

Diese beiden Aufnahmezeilen wurden lediglich mit angeführt, um zu zeigen, daß beim Entwurf der Düse weit mehr Umstände zu berücksichtigen sind, um den erhofften Erfolg zu erzielen, als von vornherein zu übersehen sind. Die günstigste Lösung kann dabei oft nur durch den Versuch ermittelt werden, wie diese Beispiele zeigen.

42 Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Spritzflüssigkeit

Die Zähigkeit der Flüssigkeit wirkt grundsätzlich hemmend und verzögernd auf die Flüssigkeitsbewegung als Ganzes und auf die Bewegung von Flüssigkeitsteilen relativ zu den anderen innerhalb der Flüssigkeit selbst. Sie dämpft die Anfangsstörung, besonders den Flüssigkeitsstoß und damit das Entstehen der $P_{1,2}$ -Komponenten. Aus den Einspritzversuchen von *Huenlein* [3] mit zähen Flüssigkeiten geht fernerhin hervor, daß die Strahlauflosung in starkem Maße durch die Zähigkeit der Flüssigkeit behindert wird. Diese Feststellung wird weiterhin unterstrichen durch den Vergleich der Häutchenbildung und des Häutchenzerfalls in Bild 22 (sehr zähes Schmieröl) und in den Bildern 23 und 24 (Gasöl). Hierbei zeigt sich, daß die Zähigkeit selbst das Auswirken der Oberflächenspannung zu hemmen und damit die wichtigste Voraussetzung der Tropfenbildung zu unterbinden in der Lage ist. Die Aufnahmen von *Huenlein* mit zähen Flüssigkeiten zeigen demnach auch keine Tropfenbildung (wie hier an den später gezeigten Aufnahmen mit Gasöl oder Wasser zu sehen sein wird), sondern lediglich ein Auflösen des Strahles in einzelne Flüssigkeitsstrahlen.

Die Oberflächenspannung ist im Gegensatz zum Begriff der Dichte und Zähigkeit keine spezifische Flüssigkeitseigenschaft. Sie verdankt ihr Zustandekommen den Kohäsionskräften, die zwischen den Flüssigkeitsmolekülen bestehen. Sie ist damit also abhängig von der Flüssigkeitsdichte.

Bei merklich werdender Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche setzt die Wirkung der Oberflächenspannung ein. Sie äußert sich in der Form des sogenannten Krümmungsdruckes, der bestrebt ist, einem vorgegebenen Flüssigkeitsvolumen die kleinste Oberfläche, also Kugelgestalt, zu geben. Für den Krümmungsdruck p gilt allgemein die Beziehung

$$p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad [\text{kg cm}^2],$$

wobei γ die Kapillaritätskonstante, R_1 und R_2 die Krümmungsradien der Flüssigkeitsoberfläche in zwei zueinander senkrecht stehenden Schnittebenen bedeuten. Man erkennt aus dieser Gleichung, daß der Krümmungsdruck mit kleiner werdendem Krümmungsradius zunimmt. Dies hat für die Strömungsform des Strahles, den Strahlzerfall und die Tropfenbildung eine außerordentliche Bedeutung.

Zunächst muß man feststellen, daß der von der Oberflächenspannung herrührende Krümmungsdruck das Zustandekommen und Aufrechterhalten der geballten Strömung überhaupt erst ermöglicht. Zum Erreichen der aufgelockerten Strömung ist andererseits demnach dem Strahl ein entsprechender Impuls zu geben, der den Krümmungsdruck der geballten Strömung zu überwinden imstande ist und der das bemerkenswerte scheibenförmige Aufteilen senkrecht zur Strahlachse hervorbringt, das man bei der aufgelockerten Strömung im Vakuum beobachtet²⁾.

Man kann für ein und dieselbe Spritzflüssigkeit aus der Gleichung für den Krümmungsdruck weiter schließen, daß bei gleicher äußerer Störung der Strahloberfläche ein zylindrischer Strahlkern nach Art des Bildes 26 von sehr kleinem Durchmesser allein unter dem Einfluß des Krümmungsdruckes schneller und in feinere Tropfen zerfallen muß als ein Strahlkern größeren Durchmessers, da bei letzterem der Krümmungsdruck bedeutend kleiner ist.

Diese Erkenntnis ist im besonderen mit Hilfe der Spaltdüse veranschaulicht und praktisch nutzbar zu machen. Je nach Höhe des Spaltes wird ein stärkeres oder dünneres Häutchen gebildet. Das dünnere Häutchen wird gegenüber dem stärkeren sich unter dem Einfluß der Oberflächenspannung in Kerne bedeutend kleineren Durchmessers zerteilen, die dann ihrerseits nach obigen Ausführungen günstiger für den Weitzerfall sind. In den Bildern 24 und 25 von der Spaltdüse sowie in den Bildern 17 und 18 ist im Strahl selbst und an der Strahlspitze bereits ein heftiges Zertropfen der feinen Kerne infolge des großen Krümmungsdruckes derselben zu sehen, wohingegen dies bei den anderen im Vakuum

¹⁾ Weitere Deutung hierzu siehe Fußnote 9.

²⁾ Man kann nach dieser Feststellung bezüglich der im vorigen Abschnitt behandelten Flachsitzdüse mit 0,3 mm Dmr. die dort beobachtete geballte Strömung auch noch so erklären, daß hier der Flüssigkeitsstoß bereits nicht mehr ausreicht, um den bei der kleinen Bohrung (und somit einem Kern kleinen Durchmessers) entstehenden größeren Krümmungsdruck zu überwinden.

mit demselben Gasöl als Spritzflüssigkeit gemachten Aufnahmen (z. B. Bilder 10 bis 12, 15, 16, 19 bis 21) nicht zu beobachten ist.

Eine weitere Bestätigung für die Richtigkeit dieser Feststellungen bietet die im praktischen Motorbetrieb bestens bewährte *Saurer*-Spaltdüse, die mit sehr dünnem Spalt arbeitet und mit der bei reiner Strahleinspritzung der günstige Kraftstoffverbrauch von 159 g PS_h im Motor erzielt wurde¹⁰⁾.

Um den Einfluß der physikalischen Kenngrößen der Spritzflüssigkeit auf die Stromungsform noch etwas näher beleuchten zu können, wurde im Vergleich zu den bisher mit Gasöl gemachten Versuchen mit Wasser eingespritzt, dessen physikalische Kenngrößen zahlenmäßig im unmittelbaren Gegensatz zu denen des Gasöls stehen (vgl. Zahlentafel 1). Die Zähigkeit des Wassers ist um ein Vielfaches kleiner, die Oberflächenspannung mehr als doppelt so groß wie die des Gasöls.

Die mit der Zapfendüse (Bild 2) und Wasser erzeugte geballte Strömung zeigen die Bilder 30 und 31; die mit der Flachspaltdüse von 0,8 mm-Durchm. (Bild 4) und Wasser hervorgerufene aufgelockerte Strömung geben die Bilder 32 und 33 wieder (vgl. hierzu die Bilder 10 bis 12 und 19 bis 21 der Gasölaufnahmen).

Die geballte Strömung mit Wasser weist gegenüber der von Gasöl keinen Unterschied auf. Die Bilder 32 und 33 zeigen jedoch im Vergleich mit den Bildern 19 bis 21, daß das Auflockern der Strömung mit Wasser infolge der gegenüber Gasöl geringeren Zähigkeit bei sonst gleicher Anfangsstörung in verstärktem Maße erfolgt, daß andererseits infolge der größeren Oberflächenspannung von Wasser sich sofort innerhalb des Strahlgefüges (Bild 32) und auch in den Randzonen (Bild 33) bei der aufgelockerten Strömung senkrecht zur Strahlachse gerichtete Kerne sehr kleinen Durchmessers bilden, die infolge ihres starken Krümmungsdruckes bereits im Vakuum zertropfen.

43 Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Luft und der Strahlggeschwindigkeit

Aus den bisher im Vakuum gemachten Aufnahmen geht hervor, daß außer durch den Krümmungsdruck kein nennenswertes Zertropfen des Strahles auftritt. Die Bilder 34 bis 42 der geballten Strömung und die Bilder 43 bis 53 der aufgelockerten Strömung bei verschiedenen Luftdichten jedoch dabei

¹⁰⁾ Man muß sich bei dieser Feststellung darüber klar sein, daß dieses günstige Ergebnis natürlich nicht allein der Düse zu verdanken ist, denn es kommt ja im Motor stets in bezug auf die Verbrennung auf das Zusammenarbeiten Düse—Brennraum—Luftbewegung an. Man darf in diesem Falle jedoch sagen, daß die *Saurer*-Spaltdüse an dem günstigen Ergebnis ausschlaggebenden Anteil besitzt.

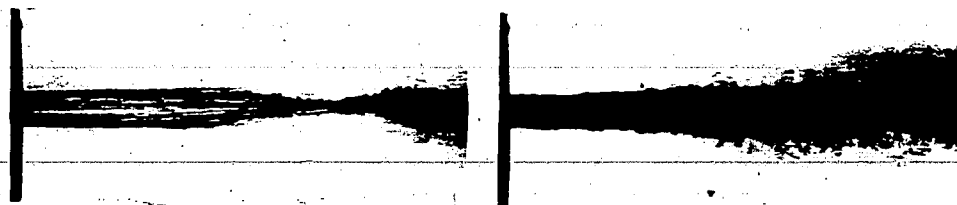


Bild 30. Bild 30 und 31 (obere Bildreihe). Vergleichversuche mit Wasser: Geballte Strömung, erzeugt mit Zapfendüse (Bild 2).

Wasser: Vakuum; $v_m \approx 100$ m/s; Vergr. 5fach.
Bild 30: Einspritzbeginn; Bild 31: Mittleres Strahlstadium.

Bild 32 und 33 (untere Bildreihe). Vergleichversuche mit Wasser: Aufgelockerte Strömung, erzeugt mit Flachspaltdüse (Bild 4).

Wasser: Vakuum; $v_m \approx 60$ m/s; Vergr. 5fach.
Bild 32: Kurz nach S.-B.; Bild 33: Kurz vor Spritzende.
(Auf die Wiedergabe der einzelnen Strahlstadien wird verzichtet, da die Düse mit Wasser sehr unregelmäßig spritzte.)



gleichbleibender Strahlgeschwindigkeit zeigen, daß mit steigender Luftdichte die Tropfenbildung mehr und mehr einsetzt; und zwar tritt das Zertropfen bei aufgelockerter Strömung bereits bei niedrigeren Luftdichten und heftiger ein, als dies bei der geballten Strömung der Fall ist.

Man kann daraus feststellen, daß die eigentliche Strahlauflösung und das heftig einsetzende Zertropfen lediglich dem Einfluß der Luftkräfte zuzuschreiben ist. Es ist also sachlich nicht richtig zu sagen: „Die Düse zerstäubt“. Die Düse schafft lediglich durch Erzeugen der Strömungsform des Strahles (Anfangsstörung) die Voraussetzung für mehr oder weniger



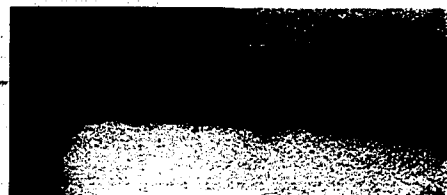
34



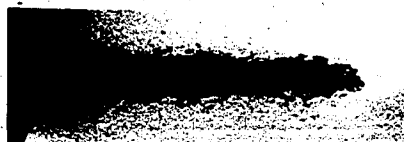
40



35



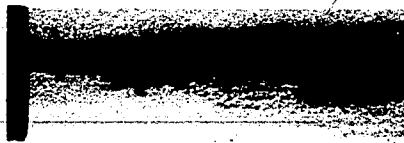
41



36



42



37



38

Bild 40 bis 42. Einsetzen der Tropfenbildung bei der geballten Strömung (Zapfendüse, Bild 2) beim Erhöhen des Gegenluftdruckes p_g und gleichbleibender Strahlgeschwindigkeit $c_{str} = 126 \text{ m/s}$.

Gasöl; Strahlstadium: 5,4 PW nach S.-B.; Vergr. 5fach.

Bild 40: $p_g = 1,0 \text{ ata}$; Bild 41: $p_g = 4,5 \text{ ata}$;
Bild 42: $p_g = 16 \text{ ata}$.



39

Linke Bildreihe:

Bild 34 bis 39. Einsetzen der Tropfenbildung bei der geballten Strömung (Zapfendüse, Bild 2) beim Erhöhen des Gegenluftdruckes p_g und gleichbleibender Strahlgeschwindigkeit $c_{str} = 50 \text{ m/s}$.

Gasöl; Vergr. 5fach.

Bild 34: 1,8° PW nach S.-B. λ p_g 1,0 ata

Bild 35: 12,6° PW nach S.-B. λ p_g 1,5 ata

Bild 36: 1,5° PW nach S.-B. λ p_g 4,5 ata

Bild 37: 14,6° PW nach S.-B. λ p_g 16 ata

Bild 38: 1,5° PW nach S.-B. λ p_g 16 ata

Bild 39: 12,6° PW nach S.-B. λ p_g 16 ata



Bild 43.



Bild 47.



Bild 44.

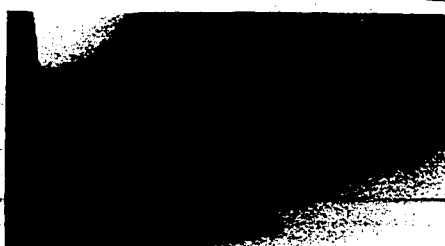


Bild 48.



Bild 45.



Bild 49.

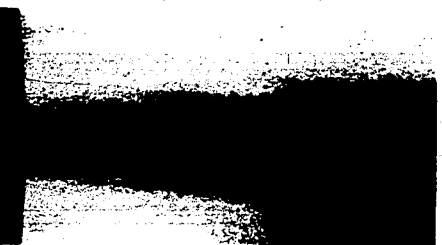


Bild 46.



Bild 50.

Bild 43 bis 50. Einsetzen der Tropfenbildung bei der aufgelockerten Strömung (Flachstrahl Düse, Bild 4), beim Erhöhen des Gegenluftdruckes p_g und gleichbleibender Strahlggeschwindigkeit $v_m = 60 \text{ m/s}$.

Gasöl; Vergr. 5 fach.

Bild 43: $1,0^\circ \text{ PW}$ nach S.-B. } $p_g = 1,0 \text{ ata}$
 Bild 44: 12° PW nach S.-B. }

Bild 45: $1,0^\circ \text{ PW}$ nach S.-B. } $p_g = 4,5 \text{ ata}$
 Bild 46: $4,7^\circ \text{ PW}$ nach S.-B. }

Bild 47: 12° PW nach S.-B. }

Bild 48: $2,0^\circ \text{ PW}$ nach S.-B. } $p_g = 16 \text{ ata}$
 Bild 49: $4,7^\circ \text{ PW}$ nach S.-B. }

Bild 50: 12° PW nach S.-B. }



Bild 51.



Bild 52.

Bild 51 bis 53. Einsetzen der Tropfenbildung bei der aufgelockerten Strömung (Flachstrahl-düse, Bild 4), beim Erhöhen des Gegenluftdruckes p_g und gleichbleibender Strahlgeschwindigkeit $v_m = 130 \text{ m/s}$.

Gasöl; Strahlstadium: 6 PW nach S.-B.;
Vergr. 5fach.

Bild 51: $p_g = 1,0 \text{ ata}$; Bild 52: $p_g = 1,5 \text{ ata}$;
Bild 53: $p_g = 1,6 \text{ ata}$.



Bild 53.

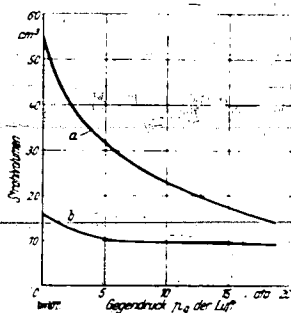
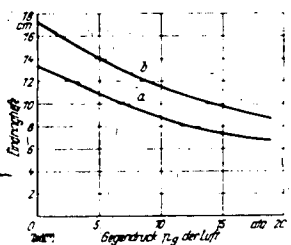


Bild 54 (oben) und 55 (unten). Strahlvolumen und Eindringtiefe bei Einspritzende in Abhängigkeit vom Luftgegendruck p_g .

Kurve a: aufgelockerte Strömung; Flachstrahl-düse (Bild 4); $v_m = 125 \text{ m/s}$;
Kurve b: geballte Strömung; Zapfen-düse (Bild 2); $v_m = 119 \text{ m/s}$.



rasches Zerstäuben. Die Düse kann zwar von vornherein die Spritzflüssigkeit über ein mehr oder weniger großes Volumen aufteilen — die eigentliche Strahlauflösung bleibt jedoch ausschließlich den durch die Relativgeschwindigkeit Flüssigkeit-Luft entstehenden Luftkräften vorbehalten. Diese Anschauung wird durch die später behandelten Mengennmessungen noch weiter belegt werden.

Aus früheren Untersuchungen über den Einfluß der Luftdichte auf den Strahl ist bekannt, daß mit steigender Luftdichte die Eindringtiefe und das Gesamtvolumen des Strahles abnimmt. Die Bilder 54 und 55 zeigen für die geballte und die aufgelockerte Strömungsform den Verlauf dieser Werte über der Luftdichte (Gegendruck der Luft) aufgetragen. Sie sind für das Einspritzende ermittelt, also für das Strahlstadium, in dem der letzte Rest der für die Untersuchungen zugrunde gelegten Einspritzmenge von 30 mg/Hub gerade die Düse verlassen hat. Für die Ermittlung der Strahlvolumina ist angenommen worden, daß der Strahl sich geometrisch aus einem Kreiskegel mit an der Grundfläche des Kreiskegels angesehter Halbkugel zusammensetzt. Bei bekannter Gesamtlänge l und Kegelwinkel α errechnet sich dann das Strahlvolumen aus (Bild 56):

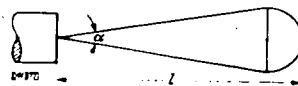
$$V_{Str} = \frac{\pi \cdot l^3 \cdot \tan^3 \alpha / 2}{3 \cdot (1 + \tan \alpha / 2)^2} \cdot (1 + 2 \tan \alpha / 2).$$

Winkel α und Länge l wurden aus den Aufnahmen ausgemessen. Bei dieser Art der Volumenerrechnung fällt das Volumen des Strahles bei geballter Strömung etwas zu groß, bei aufgelockelter Strömung etwas zu klein aus.

An diesen Schaubildern ist der große Einfluß der Luftdichte einerseits und das unterschiedliche Verhalten der beiden Strömungs-

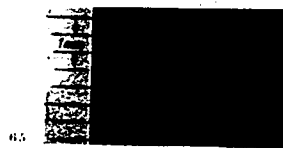
Bild 56. Ermittlung des Strahlvolumens aus einem Kreiskegel mit an der Grundfläche angesehter Halbkugel.

l Gesamtlänge, α Kegelwinkel.

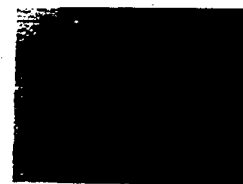




57



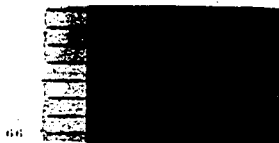
65



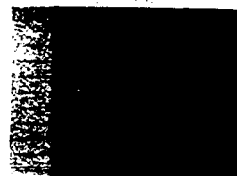
70



58



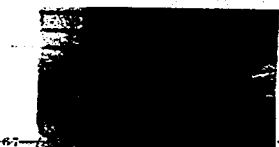
66



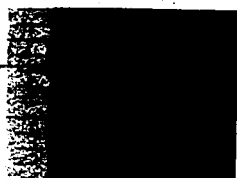
71



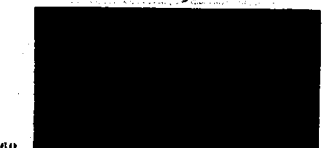
59



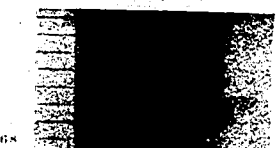
67



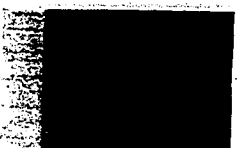
72



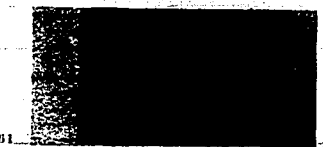
60



68



73



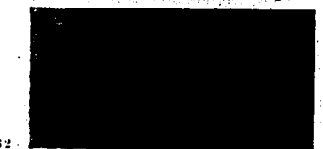
61



69



74



62

Bild 65 bis 69. Plastilinaabdrucke vom Strahl bei aufgelockelter Strömung, die in geballte übergeht, in 50 mm Entfernung von der Düse, für verschiedene Luftgedrucke p_g .

Gasöl; Nadelndüse (Bild 3); $v_m = 75 \text{ m/s}$.

Bild 65 | 66 | 67 | 68 | 69

p_g 0 | 1 | 2 | 3 | 15 ata



63

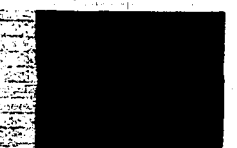
linke Bildreihe

Bild 57 bis 64. Plastilinaabdrucke vom Strahl bei aufgelockelter Strömung in 50 mm Entfernung von der Düse, für verschiedene Luftgedrucke p_g .

Gasöl; Flachstzndüse (Bild 4); $v_m = 75 \text{ m/s}$.

Bild 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64

p_g 0 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 ata



75



64

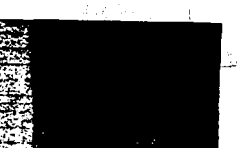
rechte Bildreihe

Bild 70 bis 76. Plastilinaabdrucke (im Schnitt) vom Strahl bei geballter Strömung in 50 mm Entfernung von der Düse, für verschiedene Luftgedrucke p_g .

Gasöl; Zapfndüse (Bild 2); $v_m = 80 \text{ m/s}$.

Bild 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76

p_g 1 | 2 | 4 | 5 | 7 | 10 | 15 ata



76

formen bei weiterer Strahlauflosung unter Gegendruck andererseits zu erkennen. Das Volumen des Strahles bei aufgelockelter Strömung ist bedeutend größer und weist eine ausgeprägtere Abhängigkeit vom Gegendruck auf, als dies beim Strahl mit geballter Strömung der Fall ist.

Aus Bild 54 ergibt sich noch folgende wichtige Feststellung: Unter Zugrundelegung des zur Verbrennung erforderlichen theoretischen Luftbedarfes, also für $\lambda = 1$, enthält der aufgelockerte Gasolstrahl bei 15 ata Gegendruck der Luft in der Bombe 70%, der Strahl mit geballter Strömung nur 38%, der nötigen Luftmenge. Wie eingangs festgelegt, ist die bei 15 ata in der Bombe herrschende Luftdichte die gleiche, wie sie im Zeitpunkt der Kraftstoffeinspritzung im Dieselmotor anzutreffen ist.

Einen näheren Aufschluß über die Vorgänge im Strahl bei zunehmendem Gegendruck der Luft geben die Plastilinabdrücke, die in 50 mm Entfernung von Düsenvorderkante vom Strahl genommen wurden. Die Bilder 57 bis 64 zeigen die Abdrücke vom Strahl mit aufgelockelter Strömungsform (Flachsitzdüse 0,8 mm Dmr.). Es ist auf den Bildern zu erkennen, daß das im Vakuum sehr lockere Strahlgefüge sich bei 2 ata Gegendruck bereits etwas zusammengeschlossen hat. Bei 3 ata Gegendruck ist ein deutlicher Ansatz zu einer Kernbildung im Strahl wahrzunehmen (siehe Bild 59). Dieser Kern verstärkt sich bei 4 und 5 ata Gegendruck noch mehr. Durch den weichen Übergang vom Kerneindruck im Plastilin nach außen ist die Struktur des Strahles nach Lee (Bild 8) bestätigt. Um den Strahlkern herum befindet sich ein aus abgespaltenen Strahlteilen bestehender Strahlmantel. Die Kernbildung kommt bei der aufgelockerten Strömung jedoch erst unter dem Einfluß der Luftdichte zustande. Die weiteren Abdrücke bei 6,8 und 10 ata Gegendruck zeigen dann einen mehr und mehr abnehmenden Strahlkernabdruck.

Aus diesen Abdrücken kann man folgendes schließen: Mit vom Vakuum an zunehmender Luftdichte wird die Auflockerung des Strahles zunächst mehr und mehr aufgehoben. Der Strahl wird zusammengedrückt, und es zeichnet sich ein deutlicher Strahlkern ab. Dieser Strahlkern ist am ausgeprägtesten und besitzt den größten Durchmesser bei etwa 4 bis 5 ata Gegendruck der Luft. Bis hierhin tritt also keine Strahlauflosung (abgesehen von der Tropfenbildung an den äußeren Randteilen des Strahles) sondern eher eine zunehmende Strahlverdichtung auf. Diese Erscheinung ist dem Einfluß des von außen auf den Strahl einwirkenden statischen Luftdruckes zuzuschreiben. Das Zusammendrücken des Strahles wäre nicht vorhanden, wenn durch die Relativgeschwindigkeit Strahl-Luft und durch das dabei auftretende Mitreißen der Luft durch den Strahl große dynamische Luftkräfte erzeugt würden, die den Strahl weiter zerteilen würden. Diese dynamischen Luftkräfte haben bei der Arbeit des Zerteilens die in der Flüssigkeit vorhandenen inneren molekularen Flüssigkeitskräfte zu überwinden (Oberflächenspannung, Kohäsionskraft). Da der Strahl nun aber bis zu einer dem Luftdruck von 4 bis 5 ata entsprechenden Luftdichte nicht weiter aufgelöst, sondern mehr und mehr verdichtet wird, so kann man daraus schließen, daß die bis zu diesem Stadium erzeugten dynamischen Luftkräfte noch nicht groß genug sind, um die inneren molekularen Flüssigkeitskräfte des Gasolstrahles überwinden zu können, und daß sich somit der Einfluß des statischen Luftdruckes durch Zusammendrücken des Strahles voll auswirken kann. Bei 4 bis 5 ata Gegendruck ist jedoch gewissermaßen ein Gleichgewichtszustand zwischen inneren molekularen Flüssigkeitskräften des Gasolstrahles und äußeren dynamischen Luftkräften erreicht, denn nach Überschreiten dieses Punktes setzt mit steigendem Gegendruck — deutlich wahrnehmbar durch den immer kleiner werdenden Strahlkern im Abdruck — der Kernabbau und damit zunehmende Strahlauflosung ein. Die äußeren auf den Strahl zerteilend und absplittend wirkenden dynamischen Luftkräfte werden mit steigender Luftdichte größer. Auf das Zustandekommen dieser dynamischen Luftkräfte wird im Abschnitt 6 näher eingegangen werden.

Die in den Bildern 65 bis 69 wiedergegebenen Strahlabdrücke bei Verwendung der Nadeldüse (Bild 3) bestätigen die oben geschilderten Beobachtungen. Bei dieser Düse trat jedoch bei 3 ata Gegendruck eine Kernspaltung auf, die das Bild verwischt, weshalb die Wiedergabe der Abdrücke bei den folgenden Druckstufen unterlassen wurde. Der Abdruck bei 15 ata Gegendruck (Bild 69) zeigt jedoch deutlich die gegenüber 2 ata eingetretene Kern- und Strahlauflosung.

Bei der geballten Strömung (Zapfendüse, Bild 2) tritt die Erscheinung des Zusammendrückens des Strahles bei vom Vakuum an zunehmender Luftdichte nicht in dem Maße auf wie bei der aufgelockerten Strömung, da die geballte Strömung im Vakuum an und für sich schon einen ziemlich festen Strahlkern darstellt, der von vornherein nur geringe Hohlräume besitzt. Mit Hilfe der später beschriebenen Mengenmessung gelingt jedoch auch hier der Nachweis, daß die im Strahlinneren befindlichen Hohlräume bei der geballten Strömung und damit der Strahl selbst zusammengedrückt wird. Die in den Bildern 70 bis 76 im Schnitt wiedergegebenen Abdrücke der geballten Strömung lassen jedoch mit Deutlichkeit erkennen, daß auch hier der Strahlabbau bei etwa 5 ata Gegendruck der Luft einsetzt und mit weiter steigender Luftdichte zunimmt, was daraus zu ersehen ist, daß sich der Eindringdruck verbreitert und die Eindringtiefe abnimmt.

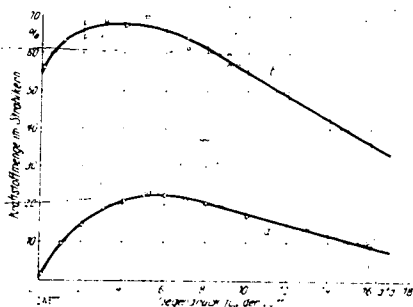


Bild 77. Prozentualer Anteil der im Strahlkern befindlichen Kraftstoffmenge an der insgesamt im Hub eingespritzten Menge in Abhängigkeit vom Luftgedruck p_a (Aufgangversuch).
 Kurve a: aufglockerte Strömung; Flachsitzdüse (Bild 1);
 $v_m = 108 \text{ m/s}$;
 Kurve b: geballte Strömung; Zapfendüse (Bild 2);
 $v_m = 100 \text{ m/s}$.

Überwiegen der äußeren, abspaltend wirkenden dynamischen Luftkräfte gegenüber den inneren molekularen Flüssigkeitskräften des Gasolstrahles ein und nimmt mit größer werdendem Gegendruck der Luft mehr und mehr zu.

Diese Messungen bestätigen also die bereits an Hand der Plastilinabdrücke gemachten Beobachtungen und geben ein klares Bild über den Einfluß der Luftdichte auf den Strahl. Sie beweisen gleichzeitig, daß man bei der Beurteilung des Luftdichteinflusses auf den Strahl unterscheiden muß zwischen dem Einfluß statischer und dynamischer Luftkräfte.

In dem Diagramm Bild 77 ist ferner der Einfluß der Anfangsstörung und damit der Strömungsform des Strahles auf die Kraftstoffverteilung im Strahl zu erkennen. Die aufglockerte Strömung weist demnach beim ungünstigsten Gegendruck der Luft (bei etwa 5 ata), also bei größter Strahldichte, eine bedeutend kleinere aufgefangene Kernmenge als die geballte Strömung auf. Im ganzen beträgt bei diesem für die Auflösung des Gasolstrahles ungünstigsten Gegendruck der Anteil der aufgefangenen Kernmenge an der insgesamt je Hub eingespritzten Flüssigkeitsmenge etwa 68% bei der geballten gegenüber 23% bei der aufglockerten Strömung. Der jeweilige Rest von etwa 32% bzw. 77% ist also in Form von abgespalteten Tropfen bei diesen beiden Strahlen in bereits besser verteilter Zustand im Strahlmantel zu suchen. Aus diesem Vergleich geht hervor, daß die Anfangsstörung der Flachsitzdüse durch Erzeugen der aufglockerten Strömung selbst bei ungünstigsten äußeren Bedingungen die bei weitem bessere Voraussetzung für die weitere Strahlauflösung und Kraftstoffverteilung im Strahl mit sich bringt, als dies bei der geballten Strömung der Fall ist.

Aus diesen Mengenmessungen ist jedoch noch ein weiterer wichtiger Schluß zu ziehen.

Das Bild 7 zeigte, daß die im Otto- bzw. Dieselmotor bei Verdichtungsende — also im Zeitpunkt der Kraftstoffeinspritzung — im Verbrennungsraum auftretende Luftdichte in der Versuchsbombe bei etwa 5 bzw. 15 ata Luftdruck ebenfalls vorhanden ist. Die Mengenmessungen im Strahlkern (Bild 77) wie auch die Plastilinabdrücke geben nun Aufschluß darüber, daß bei Strahleinspritzung im Ottomotor (Benzineinspritzung) sich die Strahlauflösung und damit die Gemischbildung unter den ungünstigsten luftseitigen Bedingungen vollzieht¹¹⁾, während die diesbezüglichen Verhältnisse im Dieselmotor weit besser liegen.

Die Mengenmessungen wurden nun für die beiden Strömungsformen bei verschiedenen Strahlgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Strahlauflösung bei geballter Strömung (b in Bild 78) nimmt zunächst mit steigender Strahlgeschwindigkeit zu (Kernmengen werden kleiner); bei noch größerer Strahlgeschwindigkeit verschlechtert sie sich dann jedoch wieder (Kernmengen nehmen wieder zu). Bei den entsprechenden Untersuchungen mit aufglockelter Strömung (a in Bild 78) war eine so ausgeprägte Abhängigkeit der Strahlauflösung von der Strahlgeschwindigkeit nicht zu beobachten. Die Kernmengen nehmen hier vielmehr mit steigender Strahlgeschwindigkeit sanft ab. In Bild 79 ist dieser Verlauf der Kernmengen der geballten und der aufglockerten Strömung bei zwei Gegendrücken

¹¹⁾ Die luftseitigen Bedingungen in bezug auf die Strahlauflösung im Ottomotor liegen ebenfalls günstiger, wenn nicht bei Verdichtungsende sondern in den Saughub eingespritzt wird, wie aus Bild 77 hervorgeht und wie die Ergebnisse der Praxis bestätigen. Außerdem wird für Benzin als Spritzflüssigkeit der für die Strahlauflösung ungünstigste Luftdichtebereich — der für Gasol bei etwa 5 ata liegt — infolge der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Benzins gegenüber Gasol eine kleine Verschiebung erfahren.

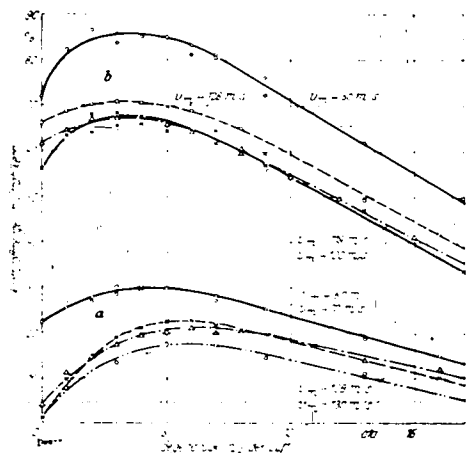


Bild 78. Prozentualer Anteil der im Strahlkern befindlichen Kraftstoffmenge an der insgesamt je Hub eingespritzten Menge in Abhängigkeit vom Luftgegendruck p_a (Auffangversuch), bei verschiedenen Strahlgeschwindigkeiten v_m .

Kurven a:
aufgelockerte Strömung
(Flächstrahl, Bild 4);
Kurven b:
geballte Strömung
(Zapfendüse, Bild 2).

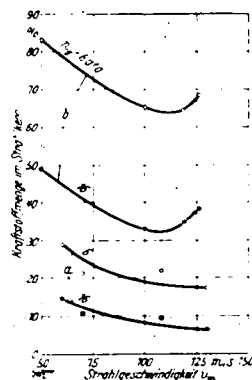


Bild 79 (rechts).

Prozentualer Anteil der im Strahlkern befindlichen Kraftstoffmenge an der insgesamt je Hub eingespritzten Menge in Abhängigkeit von der Strahlgeschwindigkeit v_m , gemessen bei aufgelockelter (a) und geballter Strömung (b) für je zwei Luftgegendrücke p_a .

über der Strahlgeschwindigkeit aufgetragen. Aus diesem Schaubild geht hervor, daß es für die Strahlauflösung bei geballter Strömung eine dafür günstigste Strahlgeschwindigkeit (bei etwa $v_m = 110 \text{ m/s}$) gibt. Zur Erklärung dieser Erscheinung kann man folgendes anführen:

Die Mengenangaben haben gezeigt, daß ganz allgemein die Strahlauflösung von dem Größenverhältnis der inneren Flüssigkeitskräfte zu den äußeren Luftkräften abhängt. Unter den inneren Flüssigkeitskräften ist neben der Zähigkeit vor allem die Oberflächenspannung bzw. der davon herrührende Krümmungsdruck zu nennen, der in besonderem Maße bei der geballten Strömung dem Angriff der dynamischen Luftkräfte und damit der Strahlauflösung entgegenwirkt. Die Oberflächenspannung ist jedoch nicht konstant. Ihre zahlenmäßige Größe ist vielmehr bei konstant bleibender Flüssigkeitstemperatur von der Zeit abhängig. Sie besitzt im ersten Augenblick der Bildung der Trennungsschicht zwischen Flüssigkeit und Gas (frische Oberfläche) einen bestimmten Wert (= dynamische Oberflächenspannung), der mit der Zeit abnimmt und der allmählich in eine feste Größe (= statische Oberflächenspannung) übergeht.

Nach Bakker [19] wurde für Wasser bei 16 °C gegen Luft gemessen:

Anfangswert der Oberflächenspannung $\gamma_1 = 81,8 \text{ dyn/cm}$		
nach 0,0007 s $\gamma_2 = 80,1 \text{ dyn/cm}$	2,1%	Unterschied gegenüber γ_1
nach 0,004 s $\gamma_3 = 77,2 \text{ dyn/cm}$	5,6%	
nach 0,008 s $\gamma_4 = 74,5 \text{ dyn/cm}$	8,8%	

Für Gasöl sind diese Werte nicht bekannt, der Verlauf derselben dürfte jedoch dem der obigen Werte für Wasser ähnlich sein.

Auf einen aus der Düse ausfließenden Wasserstrahl bezogen, bedeutet diese Erscheinung, daß bei 50 m/s Strahlgeschwindigkeit nach 0,0007 s in 35 mm Entfernung von der Düse die Oberflächenspannung den Wert $\gamma_2 = 80,1 \text{ dyn/cm}$ besitzt. Bei 100 m/s Strahlgeschwindigkeit ist γ_2 jedoch erst in einer Entfernung von 70 mm vorhanden. Der Strahlquerschnitt konstanter Oberflächenspannung rückt mit größer werdender Strahlgeschwindigkeit also immer weiter von der Düse weg. Dies bedeutet jedoch, daß damit gleichzeitig das Kräfteverhältnis der inneren zu den äußeren strahlaufauflösenden Kräften eine Verschiebung erleidet. Andererseits darf man annehmen, daß die äußeren dynamischen Luftkräfte etwa in Form einer e -Funktion mit steigender Strahlgeschwindigkeit zunehmen, daß sie also nach Erreichen eines Größtwertes mit weiter steigender Strahlgeschwindigkeit dann keine nennenswerten Zunahme mehr erfahren (bei gleicher Luftdichte betrachtet).

Dem Zusammenwirken dieser beiden Erscheinungen — einerseits dem Bestehen immer größer werdender Strahlängen von der Düse an gerechnet mit zahlenmäßig größerer Oberflächenspannung bei zunehmender Strahlgeschwindigkeit und andererseits der Art des Anwachsens der äußeren strahlerteilend wirkenden Kräfte in Form einer e -Funktion — ist es zuzuschreiben, daß die Strahlauflösung (in gleichbleibender Entfernung von der Düse betrachtet) in einem bestimmten Strahlgeschwindigkeitsbereich am günstigsten verläuft. Daß diese Tatsache nicht auch bei der aufgelockerten Strömung in dem Maße wie bei der geballten Strömung auftritt (wenigstens in dem hier untersuchten Geschwindigkeitsbereich), ist auf den Umstand zurückzuführen, daß die aufgelockerte Strömung durch ihre

stark zerklüftete Kernoberfläche für das Entstehen und den Angriff der äußeren zerteilend wirkenden Luftkräfte weit günstigere Bedingungen mit sich bringt, als dies bei der geballten Strömung der Fall ist.

Bezüglich der Ergebnisse der Untersuchungen der Strömungsform und der Flüssigkeitsverteilung im Strahl sei abschließend noch folgendes bemerkt:

Es liegt kein Grund vor für die Annahme, daß bei größerer oder kleinerer Einspritzmenge je Hub als der hier für die Versuche eingestellten das Strömungsbild oder die hier ermittelte prozentuale Kraftstoffverteilung eine wesentliche Verschiebung oder Wandlung nach einer anderen Seite hin erfahren werden. Bei gleicher Anfangsstörung und gleichbleibenden Flüssigkeitseigenschaften müssen die Verhältnisse dieselben bleiben. Eine zusätzliche Beeinflussung, beispielsweise durch verändertes Einspritzgesetz, kann jedoch eine bedeutende Veränderung der Ergebnisse veranlassen. Es erscheint angezeigt, den Einfluß des Einspritzgesetzes auf die Strahlbildung und den Strahlzerfall noch näher zu untersuchen.

Nun sei noch auf das Einwirken der Luftdichte auf die Strahlform der Zapfendüse (Bild 5) eingegangen.

Aus den Bildern 80 und 81 ist zu erkennen, daß der Spritzwinkel des kegelmantelförmigen Strahles (vgl. Abschnitt 41) mit zunehmender Luftdichte bedeutend kleiner wird, daß der Strahl sich zusammenschließt und daß anscheinend nach Überbrückung des anfänglichen Hohlraumes im Strahl bei größerer Luftdichte dann in gewisser Entfernung von der Düse eine festere Kernbildung auftritt. Diese Art des Zusammenfließens des Strahles ließ sich noch besser veranschaulichen mittels der in Bild 82 und 83 dargestellten Blende. Die Blende läßt nur den mittleren Teil des Strahles weiterfliegen, die anderen Strahlteile werden zurückgehalten. Der Schneidwinkel und die Spaltbreite der Blende wurden durch Augenbeobachtung bei stroboskopischer Funkenbeleuchtung so eingestellt, daß einerseits ein sofortiges Ablösen des weiterfliegenden Strahlteiles an den Schneiden erreicht und andererseits eine Störung der sonst ohne Blende auftretenden Umfangslinien des Strahles vermieden wurde. Die so gewonnenen Bilder 84 bis 89 zeigen deutlich, wie sich mit steigendem Gegendruck der anfänglich kegelmantelförmige Strahl zusammenschließt und daß sich dabei (deutlich zu sehen bei 17 ata Gegendruck) die Hauptkraftstoffmenge nach Art eines Strahlkernes zusammenschließt und in die Strahlachse verlagert. Die Betrachtung der Aufnahmen hat knapp hinter der Blende zu erfolgen, da weiter von ihr weg der Strahlmittelpunkt natürlich weiter dem Luftpfeil unterliegt und somit das eigentliche Ergebnis mehr verwischt wird.

In Bild 90 sind sodann die Ergebnisse der Untersuchung des Strahles in der Äthanatmosphäre wiedergegeben, die zur Ermittlung des Einflusses der Gaszähigkeit auf die Strahlauflösung unternommen wurde. Bild 90 zeigt, daß in Äthan, also in einem Gas mit etwa halber Zähigkeit unter sonst gleichen Bedingungen gegenüber Luft, die Strahlauflösung bei geballter Strömung etwas besser ist. Der Unterschied der Kernmengen beträgt maximal 2 bis 3%, der gesamten eingespritzten Kraftstoffmenge. Bei der aufgelockerten Strömung war gegenüber den in Luft gefundenen Werten keine Abweichung in Äthan festzustellen. Der Einfluß geringerer Gaszähigkeit auf die Strahlauflösung äußert sich anscheinend darin, daß das Abfliegen der abgespalteten Teilchen vom Strahlkern vor allem bei der geballten Strömung infolge des geringeren gaseitigen Widerstandes schneller vonstatten geht und daß das Gas mit geringerer Zähigkeit den Strahl etwas besser auflockert und in ihn eindringt. Diese letztere Annahme wurde dadurch bestätigt gefunden, daß bei Äthandichten über 8 ata eine Auffangmessung nicht mehr möglich war, da soviel Äthan in das Auffanggefäß mitgerissen wurde, daß dasselbe überschäumte und ein Abwiegen der Auffangmenge unmöglich machte.

Bild 80.

Bild 80 und 81. Einfluß des Luftgedrucks p_g auf den aus der Zapfendüse mit Kegel strömenden Kraftstoffstrahl.

Gasöl; Strahlstadium: 6° PW nach S.-B.; nat. Größe

Bild 80: $p_g = 1 \text{ ata}$ Bild 81: $p_g = 16 \text{ ata}$ 

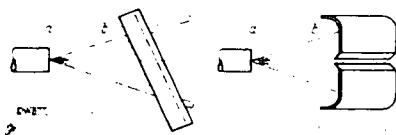


Bild 82 und 83 (links). Blende zur Ermittlung des Strahlaufbaues bei Zapfendüsen mit kegeligem Ansatz, von der Seite und oben gesehen.

a Düse; b Blende.

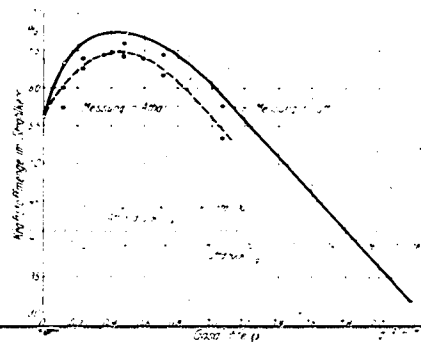


Bild 90 (links).

Zur Ermittlung des Einflusses der Zähigkeit des umgebenden Gases auf die Strahlauflösung wurden bei gehaltener Strömung Vergleichsmessungen in Luft und Äthan vorgenommen; Abhängigkeit der mittels des Aufgabelverfahrens festgestellten Kraftstoffmenge im Strahlkern (in „a“ der je Hub eingespritzten Menge) von der Gasdichte ρ (und vom Gegen-
druck p_g der Luft bzw. p_A des Äthans).

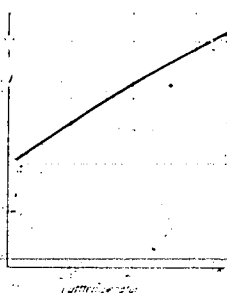


Bild 91 (links). Abhängigkeit der Luftzähigkeit von der Lufttemperatur.

Punkt A: bei 20 °C in der Versuchsbombe; Punkt B: bei Verdichtungs-
temperatur von 630 °C im Dieselmotor; Punkt C: Äthan-
zähigkeit bei 20 °C.

Bild 84 bis 89 (rechte Bildreihe). Mit der Blende (Bild 82 und 83) wird der Einfluß des Luftgegen-
druckes p_g auf die Strahlform der Zapfendüse (Bild 5) untersucht, Gasöl; Zapfendüse mit Kegel (Bild 5); nat. Größe.

Bild	84	85	86	87	88	89
p_g	1	1	7	10	13	17 ata

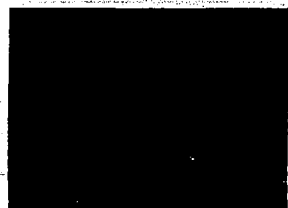
Man kann an diesem Ergebnis ersehen, daß die im Motor bei Verdichtungs-
temperatur bestehende Gaszähigkeit (Bild 91, Punkt B), die etwa 4,4mal so groß als die von Äthan ist (Bild 91, Punkt C), erschwerend und behindernd auf die Strahlauf-
lösung und damit auf die gesamte Gemischbildung wirken muß.

5 Die Tropfengrößen

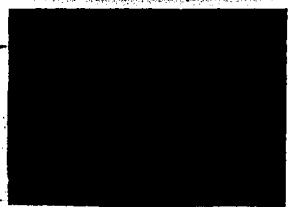
Die Messung der Tropfengröße wurde auf den photographischen Vergrößerungen am Strahlrand in dem Bereich zwischen 8 bis 12 mm Entfernung von der Düse vorgenommen. Es werden dadurch etwa die Verhältnisse erfüllt, wie sie in der Strahlzone herrschen, in der beim ungestörten Strahl in der Verbrennungsbombe das Einsetzen der Zündung beobachtet wurde (erstes Strahldrittel) [4, 5]. Die Untersuchungen wurden mit Gasöl bis Wasser als Spritzflüssigkeiten durchgeführt. Die Aufnahmen wurden 40fach linear vergrößert. Die Tropfen wurden jeweils in einem Kreis von 80 mm Dmr. (entsprechend 2 mm Dmr.



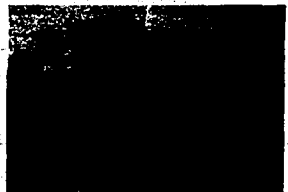
84



85



86



87



88



89

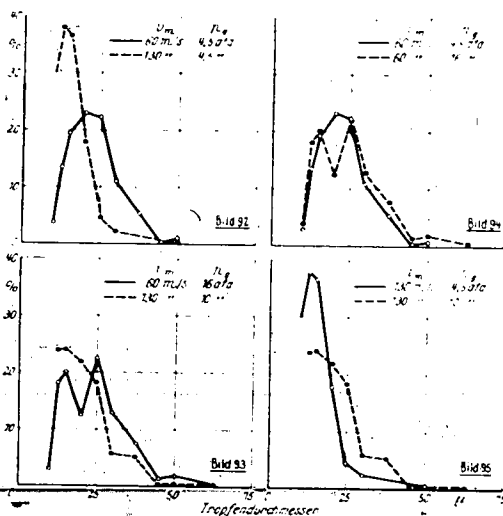


Bild 92 bis 95. Häufigkeit der Tropfengrößen bei Gasöl in Abhängigkeit von Strahlgeschwindigkeit v_m und Luftgegen-
druck p_g bei aufgelockelter Strömung
(Flachstrahldüse, Bild 4).

Bild 96 bis 99. Häufigkeit der Tropfengrößen bei Gasöl in Abhängigkeit von Strahlgeschwindigkeit v_m und Luftgegen-
druck p_g bei geballter Strömung (Zapfen-
düse, Bild 2).

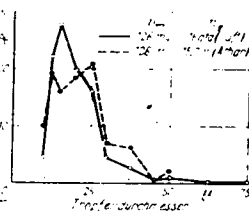
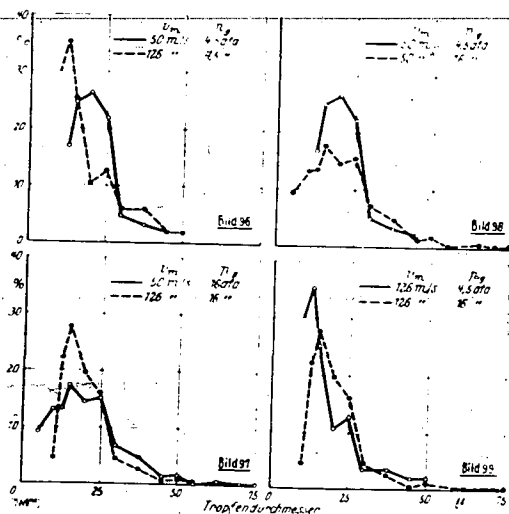


Bild 100. Tropfenhäufigkeitskurven für Gasöl bei geballter Strömung (Zapfendüse, Bild 2) in Medien verschiedener Gaszähigkeit.

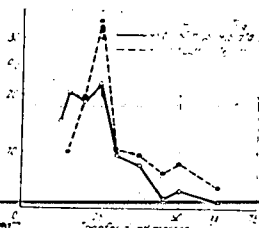


Bild 101. Tropfenhäufigkeitskurven bei verschiedenen Luftgedrücken p_g mit Wasser als Spritzflüssigkeit.

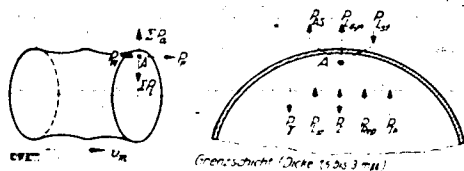


Bild 102. Die inneren und äußeren Strahlkräfte.
(Erläuterung der Buchstaben siehe Abach. 6, Seite 26.)

in Wirklichkeit) der Größe nach ausgezählt. Da die Schärfentiefe der Aufnahme etwa 1,7 mm betrug, so entspricht dem auf der Aufnahme je Kreis erfaßten Raum ein solcher von etwa 5,35 mm³ in Wirklichkeit. Die insgesamt je Kreis ausgezählte Tropfenzahl lag zwischen 70 und 200 Tropfen. Für die Auswertung wurden mehrere Kreise auf jeder Aufnahme herangezogen, deren Tropfenzahlen dem Durchmesser nach dann zusammengenommen und im Diagramm prozentual aufgetragen wurden nach Art der von Häuser und Strobel erstmalig aufgestellten Häufigkeitskurven.

Die Ergebnisse der Tropfengrößenuntersuchungen mittels photographischer Lupenvergrößerung bestätigen im wesentlichen die aus früheren Untersuchungen [10, 13, 14, 20] bereits bekannten Tatsachen. Die häufigsten Tropfengrößen bewegen sich durchweg zwischen 10 und 30 μ Dmr. Tropfengrößen unter 5 μ Dmr. konnten bei den hier verwendeten Flüssigkeiten und unter den sonstigen äußeren Bedingungen (Strahlgeschwindigkeit, Luftdruck) nur vereinzelt festgestellt werden.

Die Auswertung ergibt folgendes Bild für die geballte wie auch für die aufgelockerte Strömungsform des Strahles:

Bei der Luftdichte von 4,5 ata (Bilder 92 und 96) nimmt die Häufigkeit der kleineren Tropfen bei größerer Strahlgeschwindigkeit zu. Die Zerstäubung wird gleichmäßiger.

Bei größerer Luftdichte von 16 ata (Bilder 93 und 97), jedoch bei den gleichen Strahlgeschwindigkeiten wie in den Bildern 92 und 96 zeigen beide Kurven, im besonderen die der kleineren Strahlgeschwindigkeit, einen weiteren Bereich der größten Häufigkeiten. Auch hier nimmt jedoch die Häufigkeit der kleineren Tropfen bei größerer Strahlgeschwindigkeit zu.

Entgegen den Messungen von *Saß* [14] und *Mehlig* [10] geht aus den Bildern 94, 95, 98 und 99 hervor, daß bei gleicher Strahlgeschwindigkeit, jedoch verschiedenem Gegendruck der Luft, die Gleichmäßigkeit der Zerstäubung bei kleinerer Luftdichte besser ist als bei größer.

Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei großer Luftdichte die bedeutend stärkeren dynamischen Luftkräfte in der Lage sind, auch größere Flüssigkeitsteile vom Strahlkern abzuspalten, die dann jedoch infolge mehr oder weniger starker Abbremsung ihrer Geschwindigkeit nur zum Teil sofort weiter zerteilt werden. Dieses Ergebnis, das hier am unmittelbar sich in Luft bewegenden Strahl gewonnen wurde, konnte in dieser Form aus den vorerwähnten früheren Untersuchungen nicht hervorgehen, da die Voraussetzungen und die Durchführung dieser früheren Versuche andere waren. *Saß* spritzte in eine Auffangflüssigkeit, wobei die durch den Aufprall der Tropfen hervorgerufene Störung das Ergebnis bis zu einem gewissen Grade fälscht. *Mehlig* untersuchte die Tropfendurchmesser in großer Entfernung von der Düse, wobei den Tropfen ein großer Weg für die weitere Zerteilung zur Verfügung stand.

Bild 100 gibt einen Vergleich der Tropfengröße bei gleicher Strahlgeschwindigkeit des Gasöls in Äthan und Luft wieder. Infolge der geringeren Zähigkeit des Äthans gegenüber Luft wird dem Abfliegen auch größerer Tröpfchen vom Strahlkern ein geringerer Widerstand entgegengesetzt. Deshalb zeigt die Häufigkeitskurve bei Äthan eine größere Unregelmäßigkeit der Zerstäubung, und es sind etwas mehr größere Tropfen festzustellen. Der Unterschied ist jedoch gegenüber Luft nicht sehr groß, was auch der bei der Mengenummessung gemachten Beobachtung entspricht.

Bild 101, mit Wasser als Spritzflüssigkeit, zeigt gegenüber Gasöl eine bedeutend größere Unregelmäßigkeit der Zerstäubung. Die größeren Tropfen sind prozentual stärker vertreten. Dieses Verhalten von Wasser ist auf den Einfluß der mehr als doppelt so großen Oberflächenspannung des Wassers im Vergleich zu Gasöl zurückzuführen, die der Zerteilung in immer feinere Tropfen durch die Luftkräfte größeren Widerstand entgegengesetzt. Deutlich geht dies aus der bei Wasser und 16 ata Gegendruck ermittelten Häufigkeitskurve hervor. Die prozentual am stärksten vertretenen Tropfen besitzen einen Durchmesser von 25 μ , wohingegen bei Gasöl unter annähernd gleichen Bedingungen (Bild 98 und 94, ausgezogene Kurve) die häufigsten Tropfen mit etwa 15 bis 20 μ Dmr. vertreten sind.

Man kommt durch dieses Ergebnis zu dem Schluß, daß die Oberflächenspannung — wie weiter oben festgestellt — einerseits im Zusammenwirken mit den dynamischen Luftkräften das Abspalten von Flüssigkeitsteilen vom Strahlkern unterstützt, daß sie andererseits jedoch nach eingetretener Tropfenbildung dem Weiterzerteilen derselben entgegensteht.

Abschließend sei hervorgehoben, daß beim Vergleich dieser Ergebnisse mit denen der früheren Untersuchungen über die Tropfengrößen [10, 13, 14, 20] zu berücksichtigen ist, daß die vorliegenden Ergebnisse im Gegensatz zu den Versuchen anderer Autoren unmittelbar am sich in Luft bewegenden Strahl gewonnen worden sind, daß sie also die natürlichen Verhältnisse unverfälscht widerspiegeln. Bis auf den vorerwähnten Fall des Einflusses verschiedenen Gegendruckes auf die Tropfengröße stimmen trotzdem die Ergebnisse gut überein.

6 Die inneren und äußeren Strahlkräfte

Aus den vorausgegangenen Untersuchungen geht hervor, daß sowohl das Zustandekommen der zwei grundsätzlichen, hier beobachteten Strömungsformen, wie auch die Strahlauflösung in Luft in Zusammenhang mit Kräften zu bringen ist, die voneinander ganz verschiedenen Ursprung besitzen.

Bild 102 (links) zeigt einen Abschnitt eines zylindrischen geballten Strahls, der sich in der eingezeichneten waagerechten Richtung in Luft bewegt. Die Geschwindigkeit sei so groß, daß die Erd-

anziehung keinen Einfluß auf Strahlrichtung und Strahlbildung hat. An einem Flüssigkeitsteilchen A , das sich gerade unterhalb der Grenzschicht in der Schnittebene befinden möge, greifen folgende Kräfte, als Vektoren schematisch dargestellt, an:

- Eine vom Ausflußgefalle herrührende Kraft P_F , die das Teilchen A vorwärts treibt. P_F verringert sich um die vom Gegendruck der Luft herrührende Widerstandskraft P_W , die sich von der Strahlspitze her durch den Strahl auf A überträgt.
- Innere Flüssigkeitskräfte ΣP_i (bzw. deren in der Schnittebene liegende Komponenten). Diese Kräfte sind zu zerlegen (Bild 102 rechts) in die vom Krümmungsdruck herrührende Komponente P_y , in die neben der molekularen Anziehung bestehende Abstoßungskraft P_{Rep} (Repulsionskraft, die jedoch vernachlässigbar klein ist) und ferner in die von der Wärmebewegung der Moleküle herrührende Komponente P_{Th} (thermodyn. Kraft). P_{Rep} und P_{Th} wirken P_y entgegen. Bei Vorhandensein einer zusätzlichen Bewegung des Teilchens A relativ zu den benachbarten Teilchen wirkt ferner eine durch die Flüssigkeits Zähigkeit verursachte Reibungskraft dieser Bewegung entgegen, deren in die Schnittebene fallende Komponente mit P_r bezeichnet sei.
- Kräfte ΣP_a , die von außen her dem Strahl durch die Düse oder durch die Luft aufgedrückt werden. Sie lassen sich zerlegen in eine durch die Anfangsstörung (Flüssigkeitsstoß) in der Düse hervorgerufene senkrecht zur Strahlachse gerichtete Komponente P_{AS} , in die vom Gegendruck der Luft verursachte statische Luftkraft P_{Lst} und in eine dynamische Luftkraft, die durch die Relativgeschwindigkeit Strahl-Luft zustande kommt und deren senkrecht zur Strahlachse zeigende Komponente P_{Ldyn} ist.

Das Zustandekommen der Kraft P_{Ldyn} an der Strahloberfläche hat man sich ganz analog zu dem Vorgang des Entstehens der dynamischen Luftkräfte vorzustellen, die die Bildung des Wellenganges auf dem Meere verursachen — nur mit dem Unterschied, daß dort die Flüssigkeitsoberfläche anfänglich ruht und die Luft sich bewegt, während bei der Strahleinspritzung die Verhältnisse umgekehrt liegen, was jedoch am Grunde nichts ändert. Es kommt lediglich auf das Bestehen einer Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Luft an. Dadurch werden Luftdruckunterschiede vor und hinter den stets vorhandenen Unebenheiten der Flüssigkeitsoberfläche hervorgerufen, die zunächst diese Unebenheiten an der Strahloberfläche vergrößern und schließlich die Abtrennung von Strahlteilen bewirken. An dieser anfänglichen Vergrößerung der Unebenheiten und auch bei dem zuletzt erfolgenden Abtrennen von Teilchen ist der Einfluß der Oberflächenspannung maßgeblich mit beteiligt — obwohl festgehalten werden muß, daß die dynamischen Luftkräfte diese Vorgänge einleiten. Bei diesen Vorgängen wird neben dem radial im Strahl wirkenden Krümmungsdruck (Komponente P_y) auch die in axialer Richtung vorhandene Oberflächenspannung (die bei achsenparalleler Strahloberfläche noch nicht zur Wirkung kommt) durch die in axialer Richtung einsetzende Krümmung der Strahloberfläche zur Mitarbeit herangezogen.

Stellt man diese Kräfte zusammen, so ist:

$$\frac{P_F + P_r + P_{Lst} + P_{Ldyn} + \Sigma P_i}{\Sigma P_i} = \frac{P_{\text{Rep}} + P_{\text{Th}} + P_{AS} + P_{Ldyn}}{\Sigma P_i}$$

Diese Kraftdarstellung macht keinen Anspruch auf streng wissenschaftliche Erfassung des ganzen Problems, dessen allgemein gültige mathematische Lösung heute überhaupt noch unmöglich erscheint. Sie soll lediglich als Stütze für die Beurteilung der freien Strömung in Luft und der Vorgänge bei der Strahlauflosung dienen. Eine zahlenmäßige Auswertung der Gleichung in dieser Form ist ebenfalls nicht möglich, da — abgesehen von P_y und P_r — der Wert für P_{AS} nur unter Zugrundelegung von Vereinfachungen und die Größe von P_{Ldyn} im Zusammenhang mit der von ihr ausgelösten Einwirkung der Oberflächenspannung meßtechnisch und mathematisch nicht erfaßbar ist. Die im Zusammenhang mit dieser Arbeit gemachten Strahluntersuchungen lassen jedoch Schlüsse über die Veränderung des gegenseitigen Größenverhältnisses von ΣP_i und ΣP_a zu. Man kann aus der Gleichung folgendes herauslesen:

Bringt man die äußeren Luftkräfte P_{Lst} und P_{Ldyn} zum Verschwinden — einfach, indem man in Vakuum einspritzt — so muß sich deutlich der Einfluß der Anfangsstörung (P_{AS}) in seinem Zusammenwirken mit den Flüssigkeitskräften ΣP_i auf die Strömungsform erkennen lassen. Ist $P_{AS} = 0$, so ergibt sich eine geballte Strömung. Andererseits wird durch das Vorhandensein von P_{AS} dem Strahl eine bessere räumliche Aufteilung gegeben (aufgelockerte Strömung), die Strahloberfläche wird von vornherein größere Unebenheiten aufweisen als im Falle $P_{AS} = 0$, wodurch das Entstehen und der Angriff der dynamischen Luftkräfte begünstigt wird.

Der mit Hilfe der Mengenummessungen im Strahlkern gewonnene Einblick in die Strahlauflosung unter verschiedenen Luftdichten gibt Aufschluß über die Veränderung von ΣP_a bei gleichbleibendem ΣP_i und im besonderen über den Verlauf der Zunahme von P_{Ldyn} .

Mit vom Vakuum an zunehmender Luftdichte ist zunächst die strahlauflösend wirkende Kraft P_{Ldyn} klein gegenüber den inneren Kräften ΣP_i . Es wirkt sich daher in diesem Luftdichtebereich der statische Luftdruck besonders aus, der den Strahl zusammendrückt und die in ihm entstandenen Hohlräume schließt ($\Sigma P_i > \Sigma P_a$). Bei etwa 5 ata Gegendruck ist die gemessene Kernmenge beim Gasölstrahl am größten, d. h. der Gleichgewichtszustand zwischen inneren und äußeren Kräften ist erreicht ($\Sigma P_i = \Sigma P_a$). Mit weiter steigender Luftdichte nehmen die dynamischen Luftkräfte bei sonst gleichen Bedingungen weiter zu, die Kernmenge wird kleiner ($\Sigma P_i < \Sigma P_a$).

Die Mengenangaben bei verschiedener Strahlgeschwindigkeit lassen ferner den Schluß zu, daß mit steigender Strahlgeschwindigkeit bei konstant bleibender Luftdichte die dynamischen Luftkräfte etwa in Form einer ϵ -Funktion anwachsen.

7 Zusammenfassung und Erörterung der Verwertungsmöglichkeit der Ergebnisse

Für die Untersuchung von Flüssigkeitsstrahlen wird ein Versuchsverfahren angewendet, das gestattet, die einzelnen auf den Strahl einwirkenden Einflüsse teils getrennt und teils relativ zueinander zu erfassen und sie auf diese Art einer vergleichenden Beurteilung zu unterziehen.

Die Basis, auf der alle weiteren Untersuchungen aufbauen, ist die Strömungsform des Strahles. Es zeigt sich, daß die Strömungsform des in Luft sich bewegenden Strahles in Düsennähe eine Funktion der Anfangsstörung ist und daß man zwischen „geballter“ und „aufgelockerter“ Strömung unterscheiden kann. Die Anfangsstörung ist ferner maßgebend für die Flüssigkeitsverteilung im Strahl, die äußeren Luftkräfte dagegen für die eigentliche Strahlauflösung und Tropfenbildung. Es wird damit sachlich richtiggestellt, daß die Düse selbst nicht zerstaubt. Die Düse schafft lediglich durch Erzeugen der Strömungsform des Strahles die wichtigste Voraussetzung für das mehr oder weniger rasche Aufteilen und Zerstauben der Spritzflüssigkeit, dessen Durchführung jedoch ausschließlich den von außen auf den Strahl einwirkenden Luftkräften vorbehalten bleibt.

Die Zähigkeit der Flüssigkeit wirkt sich hemmend und verzögernd auf Strahlbildung und Strahlzerfall aus, während die Oberflächenspannung die Strahlauflösung und die Tropfenbildung in Zusammenarbeit mit den Luftkräften fördert. Als günstig für das Zertropfen erweist sich die Häutchenbildung und der Häutchenzerfall, wobei der die Tropfenbildung unterstützende Krümmungsdruck kleiner Strahlkerne in besonderem Maße in Erscheinung tritt.

Die weitaus stärkste Einflußnahme auf die Strahlbildung und die Strahlauflösung ist der Luftdichte bzw. dem Gegendruck der Luft zuzuschreiben. Bei geballter wie auch bei aufgelockerter Strömung tritt mit vom Vakuum an zunehmender Luftdichte ein Zusammendrücken des Strahles auf, das beim Gasölstrahl bei etwa 5 ata Luftdruck das Maximum erreicht. Die im Strahlkern befindliche Flüssigkeitsmenge nimmt zu, eine Strahlauflösung findet — abgesehen von geringer Tropfenbildung am Strahlrand — nicht statt. Erst mit von 5 ata an weiter steigender Luftdichte werden immer größere strahlauflösend wirkende Luftkräfte durch die Relativgeschwindigkeit Strahl—Luft erzeugt, die eine zunehmende Strahlauflösung des Gasölstrahls herbeiführen.

Die tiefere Ursache für diese Erscheinung ist in dem Größenverhältnis der inneren Flüssigkeitskräfte des Gasölstrahles zu den von außen auf den Strahl einwirkenden Kräften zu suchen, das sich mit steigender Luftdichte verändert. Diese Strahlkräfte werden einer genaueren Betrachtung unterzogen.

Der Einfluß der Luftdichte auf den Strahl wird durch Plastilinabdrücke veranschaulicht und durch im Strahlkern vorgenommene Auffangmessungen mengenmäßig belegt. Es zeigt sich, daß sich demnach die Strahleinspritzung im Ottomotor (Benzineinspritzung) unter den ungünstigsten luftseitigen Bedingungen vollzieht¹²⁾, wohingegen die im Dieselmotor während der Einspritzung herrschende Luftdichte weit bessere Voraussetzungen für die Strahlauflösung bietet.

Die bei gleicher Einspritzmenge je Hub durchgeführten Mengenangaben ergeben ferner, daß die Anfangsstörung der Düse entscheidenden Anteil an der Kraftstoffverteilung im Strahl hat. Beispielsweise betrug beim Gasölstrahl die bei ungünstigster Luftdichte (5 ata) und sonst gleichen Bedingungen im Strahlkern aufgefangene Kraftstoffmenge bei geballter Strömung etwa 68%, bei aufgelockerter Strömung etwa 23%. Der jeweilige Rest von 32% bzw. 77% befindet sich in Form von bereits abgespaltenen Flüssigkeitsteilchen im Strahlmantel und kann allgemein als Maßstab für die Beurteilung der Kraftstoffverteilung im Strahlquerschnitt angesehen werden.

Die bei gleichbleibender Luftdichte, jedoch verschiedener Strahlgeschwindigkeit durchgeführten Auffangmessungen zeigen, daß es für die geballte Strömung eine für die Strahlauflösung günstigste Strahlgeschwindigkeit gibt. Diese Tatsache wird mit dem Übergang von dynamischer zu statischer Oberflächenspannung und der dadurch mit steigender Strahlgeschwindigkeit eintretenden Verschiebung des Verhältnisses der inneren zu den äußeren Strahlkräften erklärt. Bei aufgelockerter Strömung ist diese ausgeprägte Abhängigkeit der Strahlauflösung von der Strahlgeschwindigkeit nicht vorhanden.

¹²⁾ Siehe hierzu Fußnote 11.

da diese Strömungsform weit günstigere Voraussetzungen für die Strahlaufösung mit sich bringt, als es bei der geballten Strömung der Fall ist.

Die im Vergleich zu Luft vorgenommenen Einspritzversuche in ein Gas mit geringerer Zähigkeit lassen den Schluß zu, daß die im Dieselmotor während des Einspritzvorganges herrschende Luftzähigkeit die Strahlaufösung stark behindert.

Die Untersuchungen über die Tropfengrößen am bewegten Strahl bestätigen im wesentlichen die aus früheren Messungen bekannten Ergebnisse.

Die Versuche und ihre Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Richtung auf, in der von seiten der Düse her das Problem des Erreichens guter Gemischbildung im Motor anzufassen ist. Es ist damit ferner erwiesen, daß dem konstruktiven Aufbau der Düse, in erster Linie den Nadelstanz- und Ausflußverhältnissen der Düse ausschlaggebende Bedeutung bezüglich der Kraftstoffverteilung im Strahl und der weiteren durch die Luftkräfte erfolgenden Strahlaufösung zukommt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die von der Anfangsstörung der Düse erzeugte Strömungsform des Strahles die Voraussetzung für mehr oder weniger gute Kraftstoffverteilung und Strahlaufösung mit sich bringt. In dieser Hinsicht ist die aufgelockerte Strömungsform der geballten überlegen. Die hier zum Erzeugen der aufgelockerten Strömung verwendete Flachstanzdüse ist zweifellos noch weiter verbesserungsfähig. Es wird möglich sein, unter grundsätzlicher Beibehaltung des konstruktiven Aufbaues der Düse dem Strahl einen größeren Winkel zu geben und dadurch die Aufteilung des Kraftstoffes von vornherein noch weiter zu verbessern.

Der anderen grundsätzlichen Art der Strahlaufösung mittels Spaltdüse (Hautchenbildung und -zerfall) ist erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Der Vorteil der hierbei auftretenden sehr raschen und feinen Zerstäubung macht es wert, diese Düsenart — die bis jetzt als erfolgreiche Bauart in der Saurer-Ringspaltdüse vorhanden ist — einer eingehenden Untersuchung und Weiterentwicklung zu unterziehen. Mit dieser Düse bieten sich zweifellos für kleine Zylinderdurchmesser (kleine Eindringtiefe des Strahles) gute Aussichten hinsichtlich Gemischbildung und Verbrennung.

Die Bombenuntersuchungen haben ferner ergeben, daß sowohl bei geballter als auch bei aufgelockelter Strömung mit sehr hohen Abspritzdrücken (über etwa 220 at) keine weitere wesentliche Verbesserung der Strahlaufösung erzielt werden kann. Für die Lebensdauer der Düse dürfte dies von Vorteil sein. Diese in der Bombe gemachte Beobachtung ist auf ihre Gültigkeit unter motorischen Bedingungen von Fall zu Fall noch zu überprüfen.

8 Schriftumsverzeichnis

- [1] E. Blum: Vorgänge in Einspritzsystemen schnelllaufender Dieselmotoren — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 7 (1936) S. 93/103.
- [2] K. Blume: Diplomarbeit 1936, Handbucherei des Maschinenlaboratoriums der T. H. Dresden.
- [3] A. Haenlein: Über den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 2 (1931) S. 139/49.
- [4] O. Holfelder: Zur Strahlzerstäubung bei Dieselmotoren. Der Strahlzerfall abhängig von Düsenform und -Gegendruck — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 3 (1932) S. 229/40.
- [5] O. Holfelder: Der Einspritzvorgang bei Dieselmotoren — Z. VDI Bd. 76 (1932) S. 1241/44; auch: VDI-Sonderheft Dieselmotoren VI, Berlin: VDI-Verlag 1936, S. 1/4.
- [6] O. Klüsener: Zum Einspritzvorgang in der kompressorlosen Dieselmachine — Z. VDI Bd. 77 (1933) S. 171/72; auch: VDI-Sonderheft Dieselmotoren VI, Berlin: VDI-Verlag 1936, S. 5/6.
- [7] Landolt-Börnstein: Physikalisch-chemische Tabellen, 5. Aufl. — Berlin: J. Springer 1923 bis 1936.
- [8] D. W. Lee: Measurements of Fuel Distribution within Sprays for Fuel-Injection Engines — Nat. Adv. Comm. Aeron. Techn. Rep. Nr. 565 (1936).
- [9] D. W. Lee: The Effect of Nozzle Design and Operating Conditions on the Atomization and Distribution of Fuel Sprays — Nat. Adv. Comm. Aeron. Techn. Rep. Nr. 425 (1932).
- [10] H. Mehlitz: Zur Physik der Brennstoffstrahlen in Dieselmotoren — Autom.-techn. Z. Bd. 37 (1934) S. 411/21.
- [11] S. Meurer: Neuere Mittel zur Untersuchung der Vorgänge im Motor — 74. VDI-Hauptversammlung in Darmstadt 1936, Fachvorträge — Berlin: VDI-Verlag 1936, S. 242/49.
- [12] A. Piechinger und O. Cordier: Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor (Die Verbrennungskraftmaschine, Heft 7) — Wien: J. Springer 1939.
- [13] W. Riehm: Untersuchungen über den Einspritzvorgang bei Dieselmotoren — Z. VDI Bd. 68 (1924) S. 641/45.
- [14] F. Sass: Kompressorlose Dieselmotoren (Druckeinspritzmaschinen). Ein Lehrbuch für Studierende — Berlin: J. Springer 1929.
- [15] J. Sauter: Die Größenbestimmung der im Gemischnebel von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen — VDI-Forsch.-Heft 279, Berlin: VDI-Verlag 1926.
- [16] H. Triebnigg: Der Einblas- und Einspritzvorgang bei Dieselmotoren — Wien: J. Springer 1925.
- [17] K. Ullmann: Versuche, die sich mit der Ermittlung der Überschiebverluste bei Brennraumzerklüftung befassen, gelangen demnächst in der Dtsch. Kraft.-Forsch. zur Veröffentlichung.
- [18] C. Weber: Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles — Z. angew. Math. Mech. Bd. 11 (1931) S. 136/54.
- [19] W. Wien und F. Harma: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. VI (G. Bakker: Kapillarität und Oberflächenspannung) — Leipzig: Akadem. Verlagsges. 1928.
- [20] A. Wölftgen: Über die Feinheit der Brennstoffzerstäubung in Ölmotoren — Diss. T. H. Darmstadt 1925.