

7. Neuere Erkenntnisse über Strahlbildung und Strahlzerfall

Von Dr.-Ing. O s c h a t z

Aus dem Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden

Die Brennstoffdüse nimmt eine hervorragende Stellung innerhalb des Gemischbildungs- und Verbrennungsvorganges der kompressorlosen Dieselmachine ein. Von dem Zusammenwirken der drei Vorgänge: Brennstoffeinspritzung, Gemischbildung und Durchbrennen, die sich im Motor teilweise überlagern, hängt unter Berücksichtigung noch verschiedener Nebeneinflüsse im wesentlichen die Wirtschaftlichkeit des Arbeitsverfahrens der Dieselmachine ab. Es erschien daher angezeigt, zunächst unabhängig vom Motor, Strahl und Düse in einer mit kalter, ruhender Luft gefüllten Bombe zu untersuchen.

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 (Oberflächenspannung, Dichte, Viskosität);
3. den Einfluß der physikalischen Eigenschaften der Luft (Luftdichte, Luftzähigkeit);
4. den Einfluß der Strahlgeschwindigkeit (Abspritzdruck) auf die Strömungsform des Strahles, den Strahlzerfall und die Brennstoffverteilung innerhalb des Strahles. Es sollten ferner Aufschlüsse über die Tropfenbildung und Tropfengröße in Abhängigkeit von den unter 1. bis 4. genannten Einflüssen gewonnen werden.

Die folgenden Ausführungen bringen nur das wesentlichste der Versuche und ihrer Ergebnisse in Form eines gedrängten Überblickes ¹⁾

Die Untersuchungen wurden hauptsächlich mittels funkenfotografischer Aufnahmen durchgeführt. Es wurde ein fotografisches Lupenvergrößerungsverfahren für Strahlaufnahmen entwickelt, das den Erfolg der Untersuchungen überhaupt erst sicherstellte. Bild 1 zeigt die Versuchsanlage.

Neben den Strahlaufnahmen wurden Brennstoffmengenmessungen im Strahlkern vorgenommen, um vergleichsmäßige Aufschlüsse über die Brennstoffverteilung im Strahlquerschnitt zu erhalten. In gleichbleibender Entfernung von der Düse gemachte Plastilinabdrücke vom Strahl ergänzten die Versuche.

1) Ausführlicher Bericht siehe Heft 57 der Deutschen Kraftfahrtforschung.

Für die Untersuchungen wurde eine Versuchsmethode angewendet, die es gestattet, die oben angeführten, auf den Strahl einwirkenden Einflüsse, teils getrennt und teils relativ zueinander zu erfassen, um auf diese Art die Ergebnisse einer vergleichenden Beurteilung unterziehen zu können. Die Untersuchung des Einflusses der Anfangsstörung der Düse in ihrem Zusammenwirken mit den molekularen Flüssigkeitskräften verlangte die Ausschaltung der von außen auf den Strahl einwirkenden Luftkräfte. Daher wurden unter Verwendung von Düsen verschiedener Anfangsstörungen die sich dadurch einstellenden Strömungsformen des Strahles zunächst bei Verwendung ein und derselben Spritzflüssigkeit (in diesem Falle Gasöl) im Vakuum (bei rd. 30 - 40 mm Hg) untersucht. Vergleichsweise wurden dieselben Untersuchungen dann mit Flüssigkeiten verschiedener physikalischer Eigenschaften wiederholt, wodurch sich der Einfluß der unterschiedlichen Flüssigkeitseigenschaften auf die Strömungsform des Strahles bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen erkennen ließ. Die Bilder 2 a und 2 b zeigen die für die Untersuchungen verwendeten Düsen. Auf Bild 2 a und 2 b ist die Düsenadel stets in angehobenem Zustand gezeichnet. Die gestrichelten Linien stellen Stromfäden der ausfließenden Spritzflüssigkeit dar.

Ausgehend von der Strömungsform des Strahles wurde sodann durch Variation des Gegendruckes und der Strahlgeschwindigkeit in der Bombe der Einfluß der Luftdichte auf den Strahlaufbau und den Strahlzerfall untersucht. Bild 3 zeigt die Luftdichte in Abhängigkeit vom Druck bei konstanter Lufttemperatur von 20°C an. Demnach entspricht die im Dieselmotor bei Kompressionsende erreichte Luftdichte etwa einem Druck von 15 ata in der Bombe.

Zum Kenntlichmachen des Einflusses der Gaszähigkeit wurden dieselben Versuche bei den gleichen Gasdichten mit einem Gas von gegenüber Luft kleinerer Gaszähigkeit wiederholt. Die Bombe wurde mit Äthan gefüllt, das bei 20°C etwa die halbe Zähigkeit gegenüber Luft besitzt.

Die Versuche wurden alle bei gleichbleibender Spritzmenge von 30 mg/Hub sowie gleichem Einspritzsystem (Pumpe, Leitung) und gleicher Pumpendrehzahl von $n = 1000$ U/min durchgeführt, so daß das Einspritzgesetz weitgehend konstant gehalten und somit ein zusätzlicher fälschender Einfluß von dieser Seite her vermieden wurde.

Im folgenden seien kurz die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit wiedergegeben:

1. Untersuchung der Strömungsform des Strahles im Vakuum

Die Basis, auf der alle weiteren Untersuchungen aufbauen, ist die Strömungsform des Strahles. Die aus der Hydrodynamik der Rohrströmung bekannten Ausdrücke laminar und turbulent kann man auf den frei in Luft sich bewegenden Strahl nicht übertragen, da hier das Reynolds'sche Ähnlichkeitsgesetz nicht anwendbar ist. Denn die Strömungsform des sich frei in Luft bewegenden Strahles ist in Düsennähe stets eine Funktion der Anfangsstörung. Es zeigt sich, daß man abhängig von der Anfangsstörung beim frei sich bewegenden Strahl unterscheiden muß zwischen geballter (Bild 4)

und aufgelockerter Strömung (Bild 5). Auf den gezeigten Strahlphotos befindet sich links auf dem Bilde die Düse. Der Strahl bewegt sich also stets von links nach rechts.

Als eine besondere Form des Strahlzerfalles kann man die Auflösungserscheinung eines Flüssigkeitshäutchens bezeichnen. Der Zerfall setzt hier im Vakuum bereits unter dem Einfluß der Oberflächenspannung der Spritzflüssigkeit ein (Bild 6).

Aus den Bildern 4 bis 6 ist schon deutlich ersichtlich, daß die Anfangsstörung auch maßgebend für die Flüssigkeitsverteilung im Strahl ist. Eine weitere Strahlauflösung findet im Vakuum infolge Fehlens der äußeren, strahlauflösend wirkenden Luftkräfte nicht statt. Es tritt lediglich eine geringe Tropfenbildung auf, die jedoch nur auf den Einfluß der Oberflächenspannung zurückzuführen ist. Man kann daraus schließen, daß nur die äußeren Luftkräfte für die wirkliche Strahlauflösung und damit für intensive Tropfenbildung verantwortlich sind. Es wird damit sachlich richtiggestellt, daß die Düse selbst nicht zerstäubt. Die Düse schafft lediglich durch Erzeugen der Strömungsform des Strahles die wichtigste Voraussetzung für das mehr oder weniger rasche Aufteilen und Zerstäuben der Spritzflüssigkeit, dessen Durchführung jedoch ausschließlich den von außen auf den Strahl einwirkenden Luftkräften (dynamischen Luftkräften) vorbehalten bleibt. Dies wird durch die später folgenden Ausführung noch weiter belegt werden.

Die Zähigkeit der Flüssigkeit wirkt sich hemmend und verzögernd auf Strahlbildung und Strahlzerfall aus (Vergleich zwischen Bild 7 und Bild 8), während die Oberflächenspannung der Spritzflüssigkeit die Strahlauflösung und die Tropfenbildung in Zusammenarbeit mit den Luftkräften fördert.

2. Untersuchung des Einflusses der Luftdichte und Luftzähigkeit auf den Strahl

Der weitaus stärkste Einfluß auf die Strahlbildung und die Strahlauflösung ist der Luftdichte bzw. dem Gegendruck der Luft zuzuschreiben. Zur Ermittlung des Einflusses der Luftdichte auf den Strahl wurden Mengenmessungen im Strahlkern vorgenommen. Das Bild 9 zeigt den Aufbau eines aus einer Lochdüse gespritzten Strahles. Danach kann der Strahl zerlegt werden in einen kompakteren Strahlkern, um den herum sich ein aus abgespalteten Brennstoffteilchen bestehender Strahlmantel befindet. Auffangmengenmessungen im Strahl haben Aussicht auf Genauigkeit nur im Strahlkern, wie sich aus oberflächlicher Überlegung bereits ergibt. Der prozentuale Anteil der aufgefangenen Kernmenge an insgesamt pro Hub eingespritzten Brennstoff vermittelt ein anschauliches Bild über die Strahlauflösung und damit über den Einfluß der äußeren Luftkräfte auf den Strahl. Die Auffangversuche wurden mit einer dem Strahlkerndurchmesser angepaßten Rohrsonde in gleichbleibender Entfernung von der Düse ausgeführt. Die Anordnung war so getroffen, daß der Strahl durch die Sonde in keiner Weise gestört oder beeinflusst wurde. Bild 10 zeigt Ergebnisse der Auffangversuche.

Bei geballter wie auch bei aufgelockerter Strömung tritt mit vom Vakuum an zunehmender Luftdichte ein Zusammendrücken des

Strahles auf, das für Gasöl bei etwa 5 ata Luftdruck das Maximum erreicht (Bild 10). Die im Strahlkern befindliche Flüssigkeitsmenge nimmt zu, eine Strahlaulösung findet - abgesehen von Tropfenbildung am Strahlrand - nicht statt. Bis zu diesem Punkt überwiegt der Einfluß des *s t a t i s c h e n*- Luftdruckes. Die *d y n a m i s c h e n* Luftkräfte, die durch die Relativgeschwindigkeit Strahl-Luft erzeugt werden, sind noch nicht groß genug, um die inneren molekularen Flüssigkeitskräfte zu überwinden und damit eine Strahlaulösung herbeizuführen. Erst mit von 5 ata an weiter steigender Luftdichte werden immer größere strahlaulösend wirkende dynamische Luftkräfte durch die Relativgeschwindigkeit Strahl-Luft erzeugt, die eine zunehmende Strahlaulösung herbeiführen.

Diese Erscheinung der Strahlkernzunahme und -abnahme läßt sich durch Plastilinabdrücke vom Strahl anschaulich bestätigen.

Die tiefere Ursache für diese Abhängigkeit der Strahlaulösung von der Luftdichte ist in dem Größenverhältnis der inneren Flüssigkeitskräfte zu den von außen auf den Strahl einwirkenden Luftkräften zu suchen, das sich mit steigender Luftdichte verändert.

Die bei gleicher Einspritzmenge pro Hub durchgeführten Mengemessungen ergeben ferner, daß die Anfangsstörung der Düse entscheidenden Anteil an der Brennstoffverteilung im Strahl besitzt (Bild 10). Beispielsweise betrug die bei ungünstigster Luftdichte (5 ata) und sonst gleichen Bedingungen im Strahlkern aufgefangene Brennstoffmenge bei geballter Strömung etwa 68 %, bei aufgelockerter Strömung etwa 23 % der insgesamt pro Hub eingespritzten Menge. Der jeweilige Rest von 32 % bzw. 77 % befindet sich in Form von bereits abgespalteten Flüssigkeitsteilchen im Strahlmantel und kann allgemein als Maßstab für die Beurteilung der Brennstoffverteilung im Strahlquerschnitt angesehen werden. Das hiermit aufgezeigte unterschiedliche Verhalten der beiden Strömungsarten ist im Hinblick auf die Verbrennung im Motor von großer Bedeutung.

Auch bezüglich der Tropfenbildung unter Lufteinfluß zeigen beide Strömungsformen ein unterschiedliches Verhalten, wie aus den zwei folgenden Bildern 11 und 12 hervorgeht. Die aufgelockerte Strömungsform des Strahles zeigt ein sofortiges intensives Einsetzen der Tropfenbildung.

Interessant ist auch das volumenmäßige Verhalten der beiden Strömungsformen des Strahles unter dem Luftdichteinfluß (Bild 13). Die aufgelockerte Strömung zeigt eine ausgeprägtere Abhängigkeit des Strahlvolumens von der Luftdichte als die geballte. Sie ist jedoch volumenmäßig der geballten Strömung überlegen.

Unter Zugrundelegung des zur Verbrennung erforderlichen theoretischen Luftbedarfes, also für $\lambda = 1$, enthält der *a u f g e l o c k e r t e* Gasölstrahl bei 15 ata in der Bombe (also bei dieselmotorischer Luftdichte) 70 %, der Strahl mit *g e b ä l l t e r* Strömung nur 38 % der nötigen Luftmenge.

Die bei gleichbleibender Luftdichte, jedoch verschiedener Strahlgeschwindigkeit durchgeführten Auffangmessungen zeigen, daß es für die geballte Strömung eine für die Strahlaulösung günstigste Strahlgeschwindigkeit gibt (Bild 14).

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 aufgelockelter Strömung ist diese ausgeprägte Abhängigkeit der Strahlaflösung von der Strahlgeschwindigkeit nicht vorhanden, da diese Strömungsform weit günstigere Voraussetzungen für die Strahlaflösung mit sich bringt, als es bei der geballten Strömung der Fall ist.

Bild 15 zeigt die Abhängigkeit der Luftzähigkeit von der Temperatur. Die im Motor bei rd. 650°C Kompressionsendtemperatur vorhandene Zähigkeit der Luft (Punkt B) ist rd. 4,5 mal so groß als die von Äthan bei 20°C (Punkt C). Die Äthanzähigkeit ist etwa halb so groß als die der Luft bei 20°C (Punkt A). Bild 16 gibt die Ergebnisse der Auffangmessungen bei geballter Strömung in Äthan und Luft wieder. Diese Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß die im Dieselmotor während des Einspritzvorganges herrschende Luftzähigkeit die Strahlaflösung stark behindert. (Die Streuung der Meßpunkte der Äthankurve von etwa 6 ata an hat besondere Gründe, auf die hier nicht näher eingegangen sei.)

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 Nadelsitz- und Ausflußverhältnissen der Düse ausschlaggebende Bedeutung bezüglich der Brennstoffverteilung im Strahl und vor allem auch im Hinblick auf die weitere, durch die Luftkräfte erfolgende Strahlaflösung zukommt.

Unter Zugrundelegung der hier aufgezeigten grundsätzlichen Ergebnisse der Strahluntersuchung sind Versuche am Motor selbst geplant, die zunächst das Ziel haben, die in der Bombe erhaltenen Erkenntnisse auf ihre Gültigkeit im Motor zu prüfen. Das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Strahlen wird sich dabei sehr klar bei hohen Drehzahlen zeigen. Als wichtigster Vergleichsmaßstab für das Verhalten der einzelnen Düsen und Strahlen im Motor ist die Dauer der Verbrennung unter sonst gleichen Bedingungen anzusehen. Die ermittelte Verbrennungszeit zusammen mit Druckindizierung werden die gewünschten Aufschlüsse ergeben.

Das Endziel dieser motorischen Untersuchungen ist es, die im Motor zu leistende Gemischbildungsarbeit mehr und mehr der Düse selbst zuzuschieben und so nur mit einem unbedingt notwendigen Minimum an Luftbewegung im Verbrennungsraum auszukommen. Dadurch würde die bisher in verschiedenen Motortypen vom Motor selbst noch zu leistende Gemischbildungsarbeit, die beträchtliche Werte annehmen kann, wegfallen bzw. der Nutzleistung zugute kommen. Es ist ferner in diesem Zusammenhang erstrebenswert, die Verbrennungszeit bei hohen Drehzahlen so weit als möglich zu verkürzen, um dadurch die Wirtschaftlichkeit des motorischen Arbeitsverfahrens zu erhöhen. Denn nur die in der Nähe des oberen Totpunktes umgesetzte Brennstoffenergie hat maßgeblichen Anteil am thermodynamischen Wirkungsgrad der Maschine.

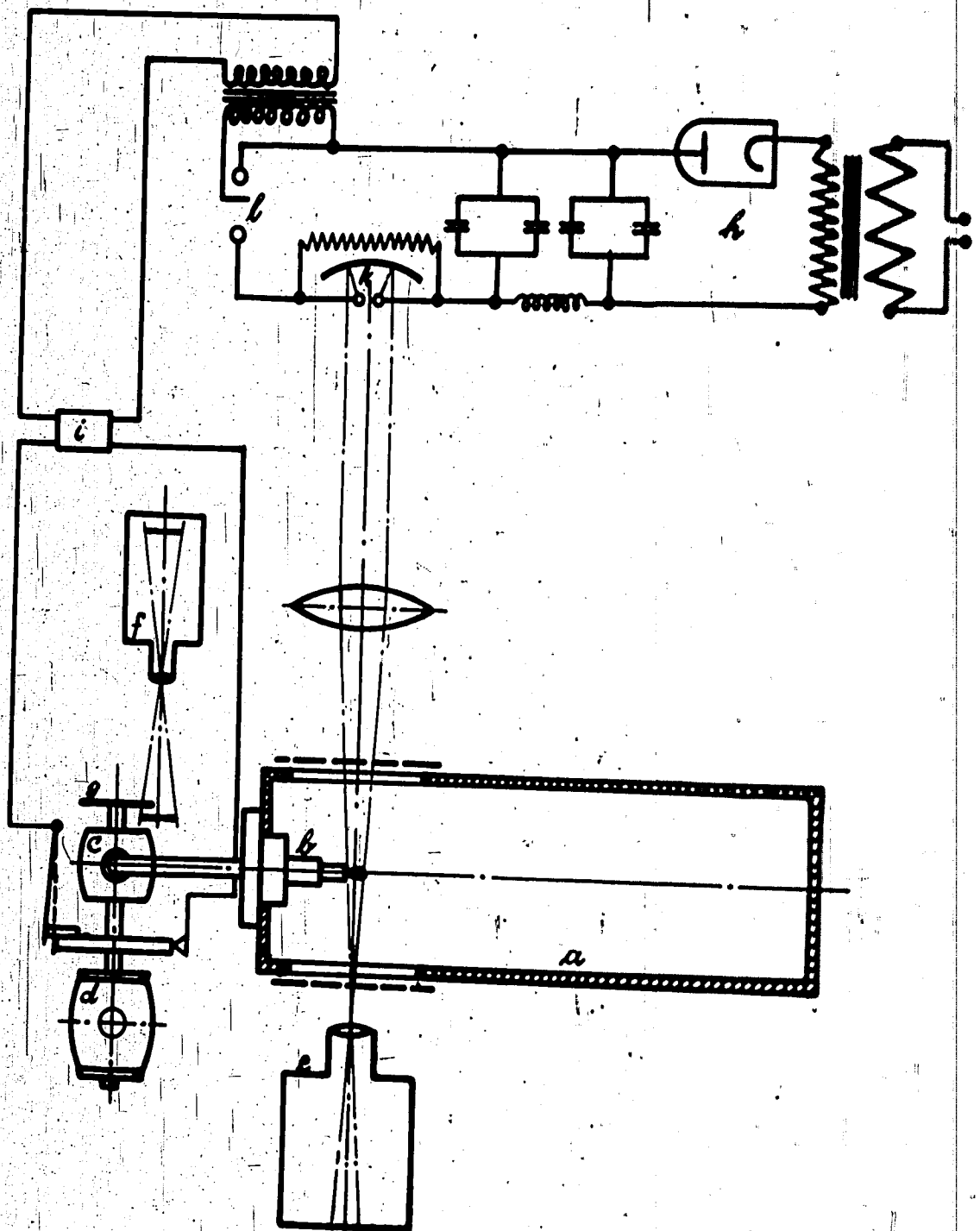
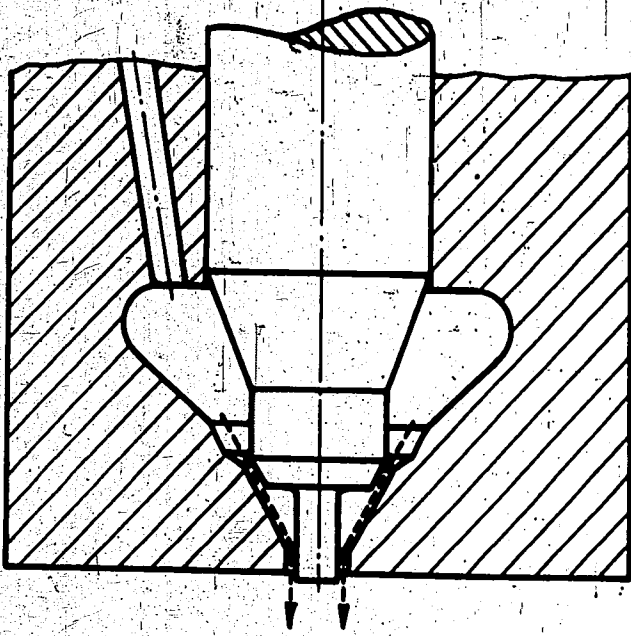


Bild 1. Versuchseinrichtung für Strahluntersuchungen.

- a) Einspritzpumpe
- b) Düsenhalter mit Düse
- c) Einspritzpumpe
- d) Elektromotor
- e) Photographische Kamera zur Aufnahme der Strahlen
- f) Photographische Kamera zur Aufnahme der mitrotierenden Kurbelwinkelmarke g
- g) Marke zwecks Ermittlung der mit e photographierten Strahlstadien
- h) Elektrische Anlage zur Erzeugung der Belichtungsfunken
- i) Steuergerät für den Belichtungsfunken
- k) Belichtungsfunkenstrecke
- l) Steuerfunkenstrecke

Zapfendüse



Nadeldüse

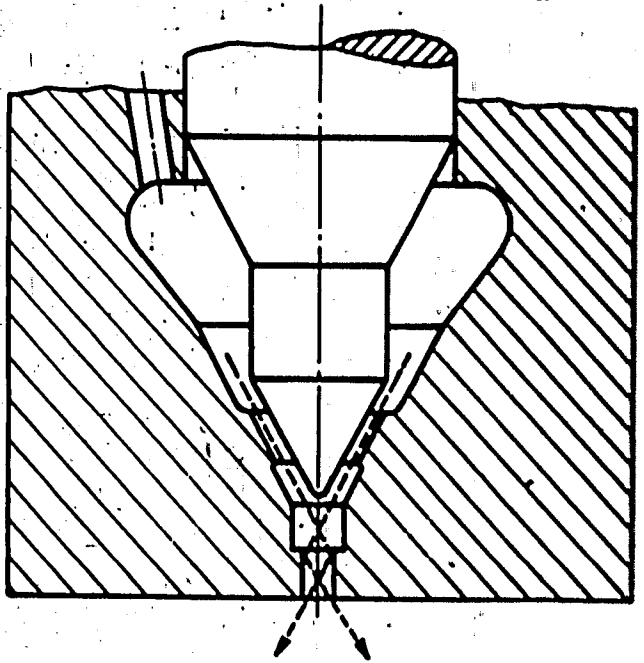
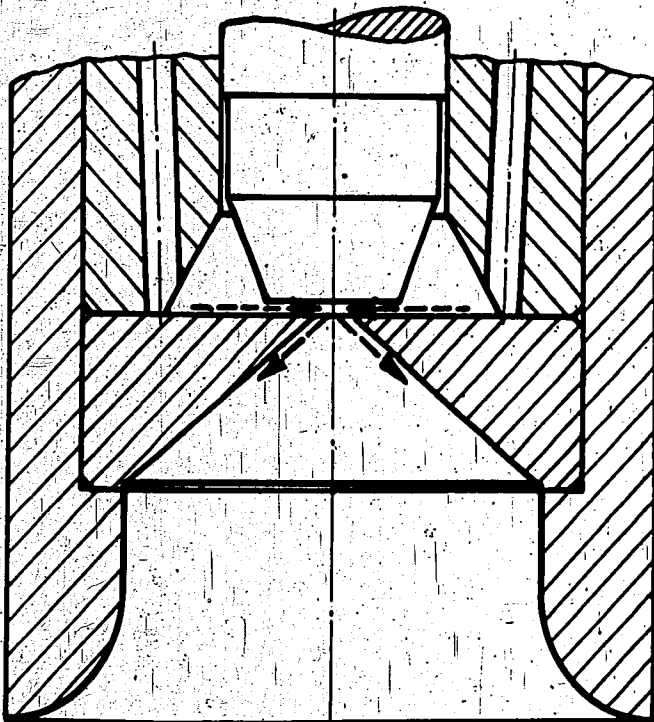


Bild 2a. Einspritzdüsen.

Flachsitzdüse



Zapfendüse mit Kegel

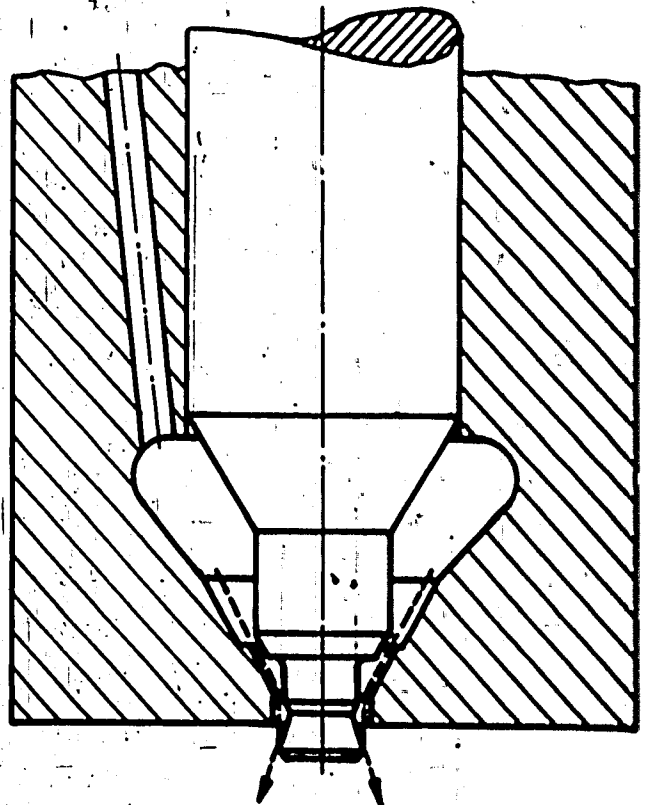


Bild 2b. Einspritzdüsen.

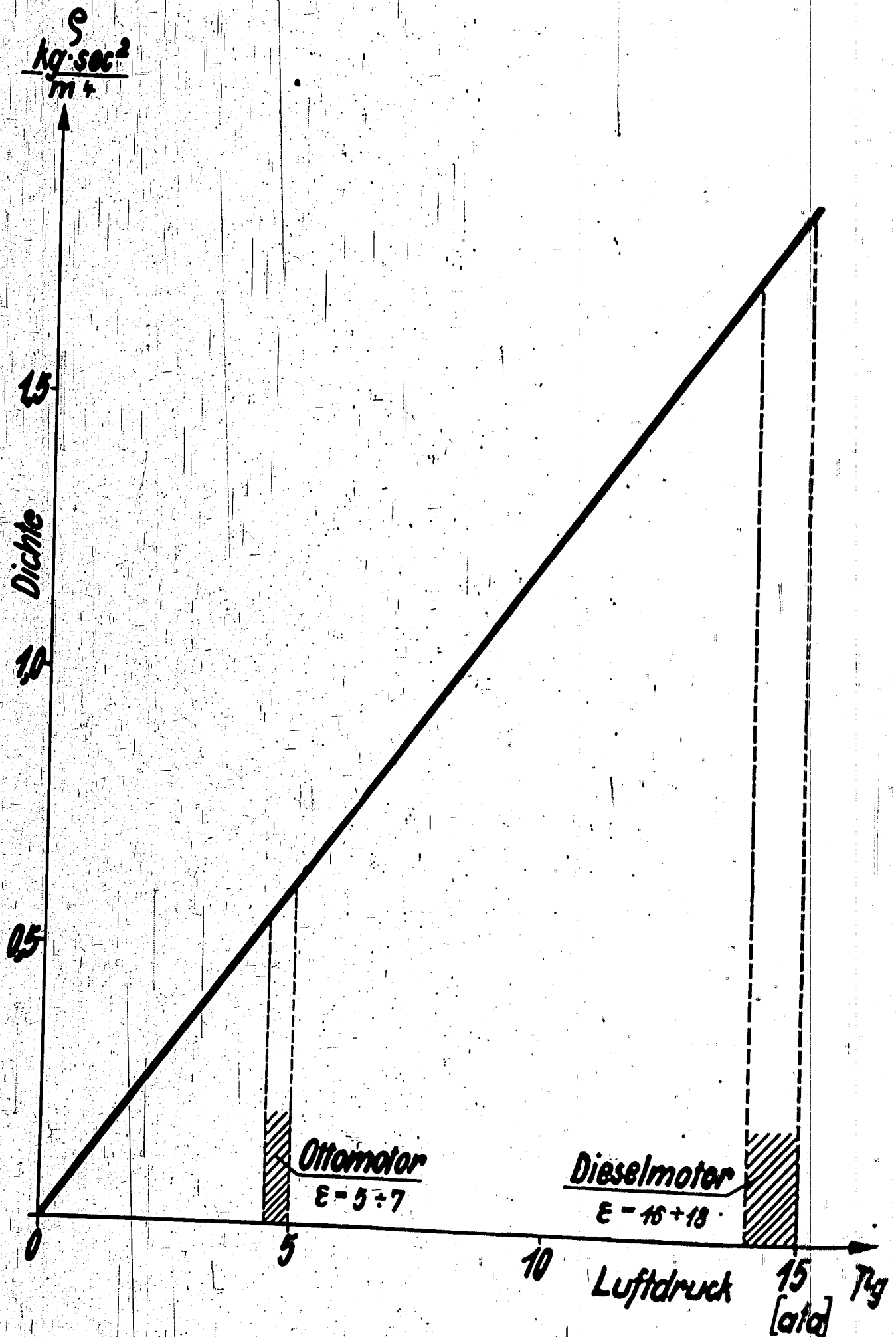


Bild 3. Abhängigkeit der Luftdichte vom Druck. ($t_1 = 20^\circ \text{C}$)

Bild 4. Geballte
Strömung, Zapfen-
düse Bild 2a, Gas-
öl, Vakuum. Bild-
maßstab 8 : 1.



Bild 5. Aufgelockerte
Strömung, Flach-
sitzdüse Bild 2b,
Gasöl, Vakuum. Bild-
maßstab 8 : 1.



Bild 6. Häutchen-
bildung und -zer-
fall, Gasöl, Va-
kuum. Bildmaßstab
8 : 1.

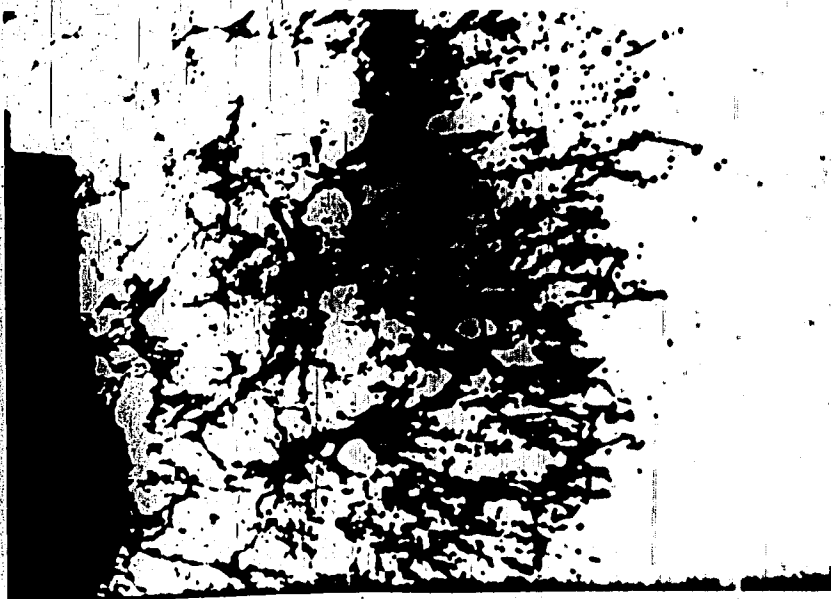




Bild 7. Zapfendüse mit Kegel Abb. 2b, sehr zähes Schmieröl, Vakuum, Spritzbeginn. Bildmaßstab 2 : 1.

Die Spritzflüssigkeit verläßt infolge ihrer großen Zähigkeit die Düse in Form eines zusammenhängenden kreiskegelförmigen Häutchens.



Bild 8. Düse wie Abb. 7, Vakuum, Spritzbeginn, jedoch Gasöl als Spritzflüssigkeit. Bildmaßstab 8 : 1.

Das verwendete Gasöl besitzt eine vielfach kleinere Zähigkeit gegenüber dem Schmieröl Abb. 7. Daher kann sich - deutlich wahrnehmbar auf dem Bild - die Oberflächenspannung der Flüssigkeit voll auswirken. Unter ihrem Einfluß zerfällt die aus der Düse austretende Spritzflüssigkeit in einzelne Kerne, welche ihrerseits zur Zertropfung führen. Die große Zähigkeit des in Abb. 7 verwendeten Schmieröls verhinderte dort das Auftreten dieser Erscheinung.

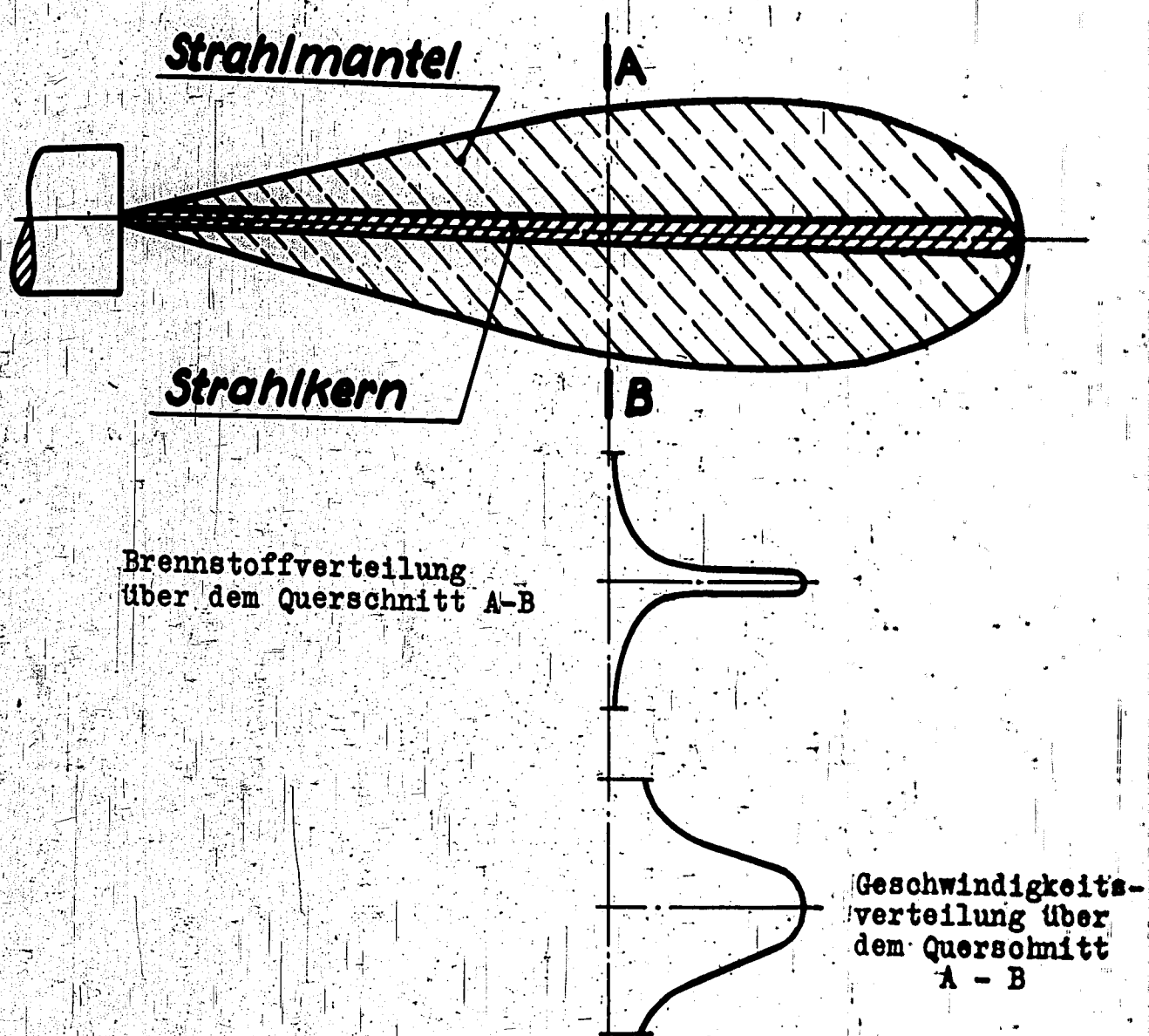
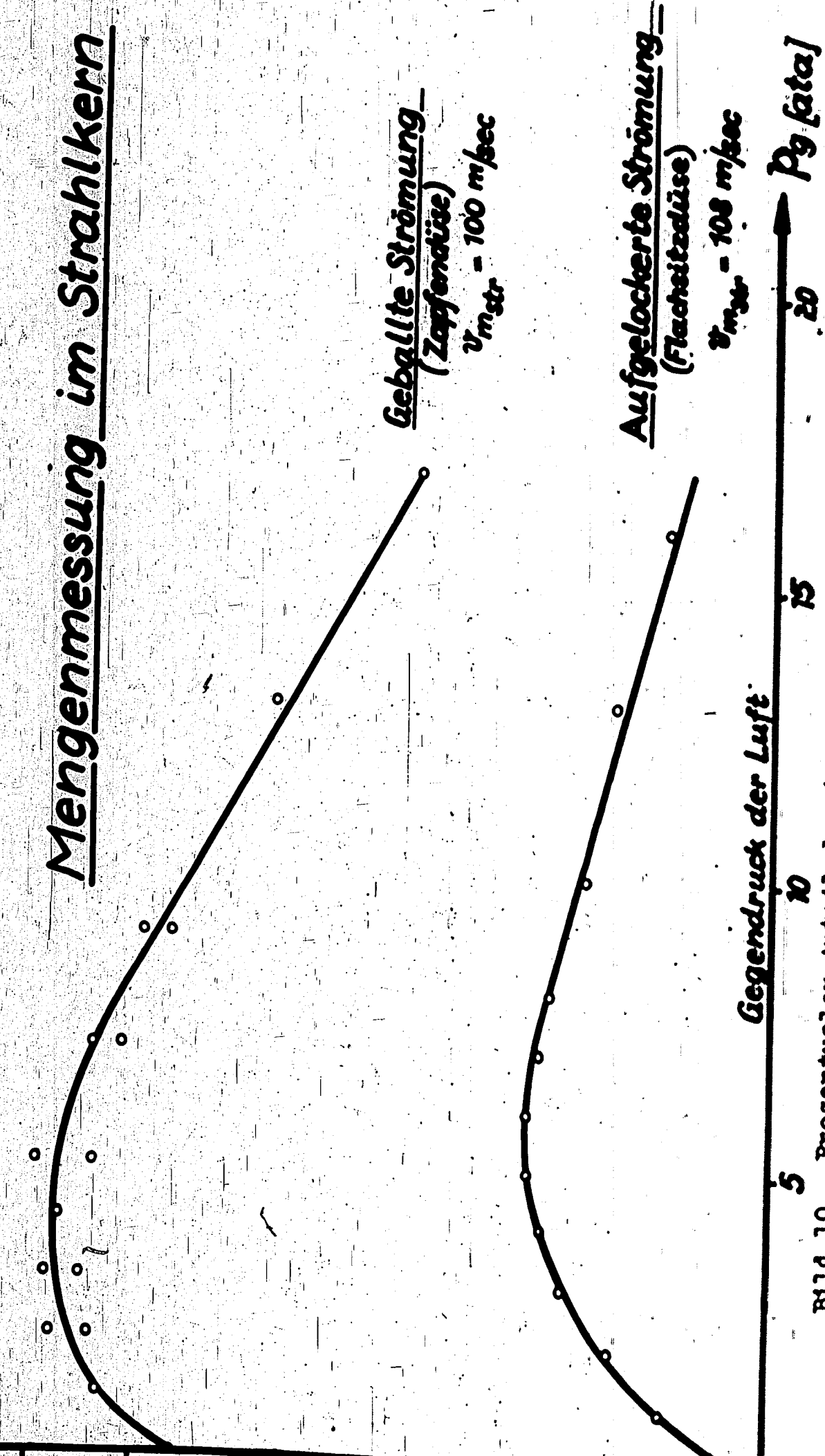


Bild 9. Strahl Aufbau (Lochdüse).

Mengenmessung im Strahlkern

1109
 Luft-Brennstoffmenge in % der pro Hub eingespritzten



Geballte Strömung
 (Zapfendüse)
 $v_{mstr} = 100 \text{ m/sec}$

Aufgelockerte Strömung
 (Flachsitzdüse)
 $v_{mstr} = 108 \text{ m/sec}$

Gegendruck der Luft P_g [atm]

Bild 10. Prozentualer Anteil der im Strahlkern befindlichen Brennstoffmenge an der insgesamt pro Hub eingespritzten in Abhängigkeit vom Gegendruck P_g der Luft (Anfangversuch).
 Kurve a: aufgelockerte Strömung, Flachsitzdüse $v_m = 108 \text{ m/s}$.
 Kurve b: geballte Strömung, Zapfendüse $v_m = 100 \text{ m/s}$.



Bild 11. Gebälte Strömung, Zapfendüse
Abb. 2a, Gasöl, Gegendruck der
Luft 16 ata. Bildmaßstab 8 : 1.



Bild 12. Aufgelockerte Strömung, Flach-
sitzdüse Abb. 2b, Gasöl, Gegen-
druck der Luft 16 ata. Bild-
maßstab 8 : 1.

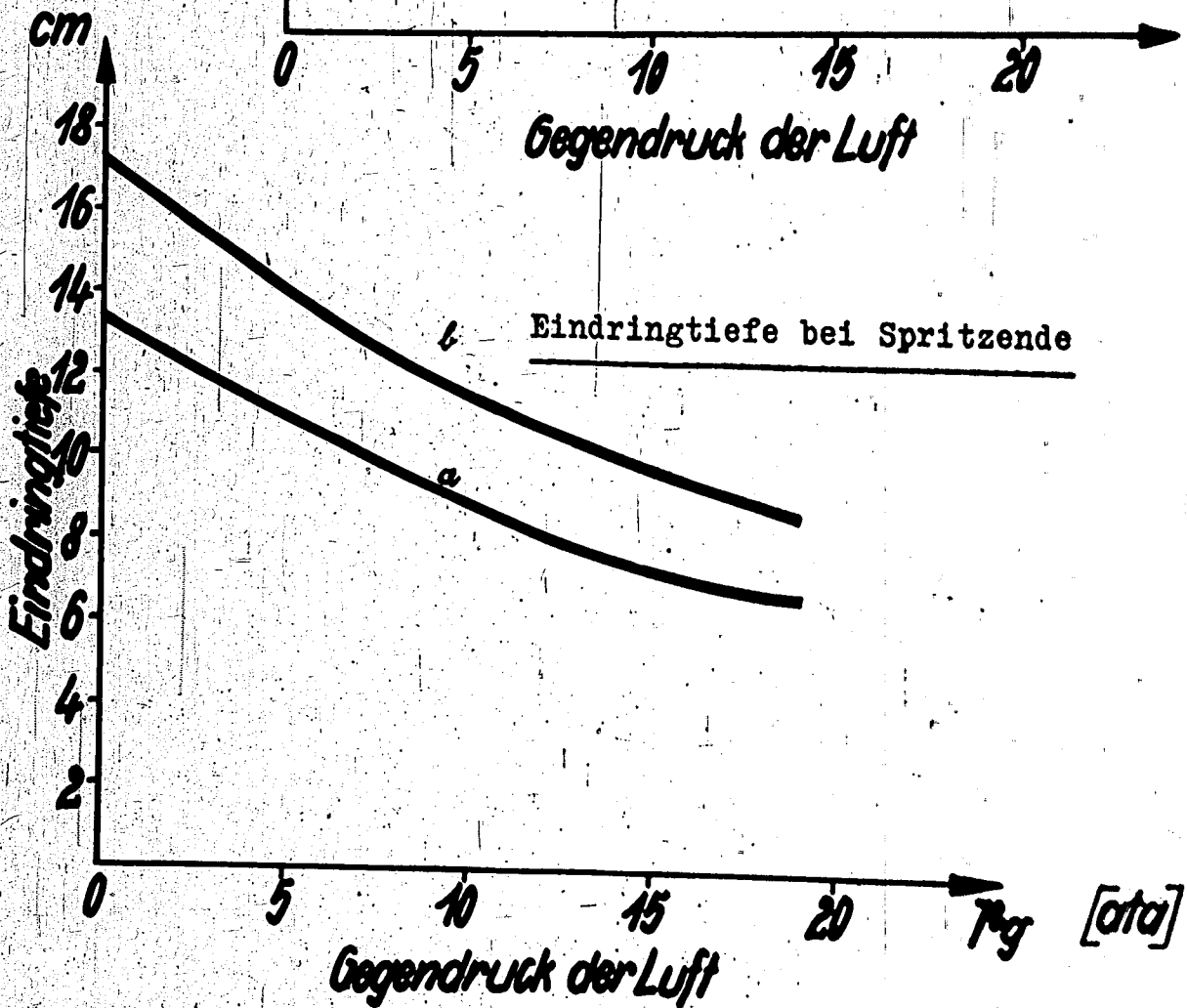
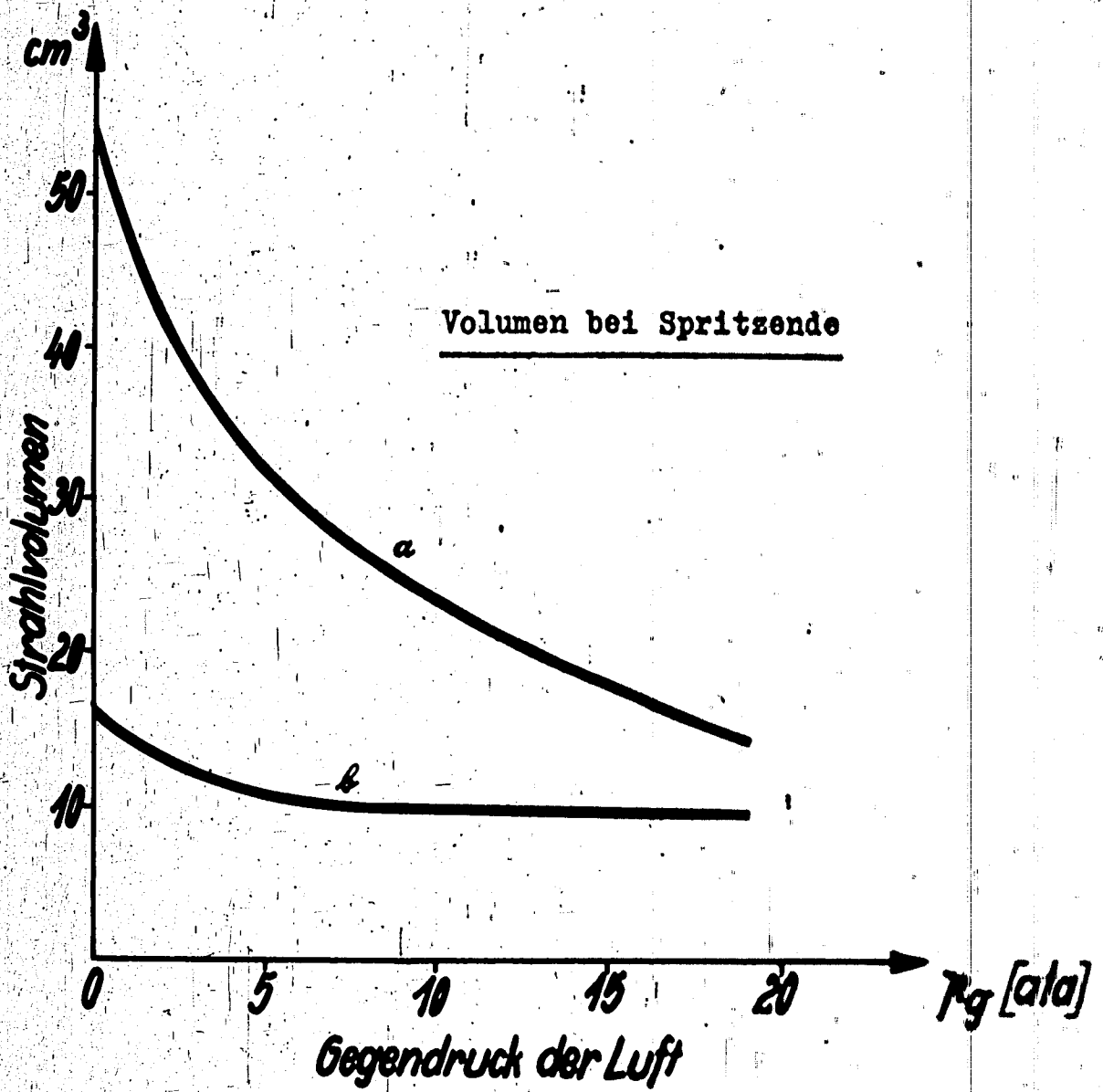


Bild 13. Strahlvolumen und Eindringtiefe bei Spritzende in Abhängigkeit vom Gegendruck p_g der Luft in der Bombe.
 Kurve a: aufgelockerte Strömung, Flachsitzdüse Abb. 2b, mittlere Strahlgeschwindigkeit $v_m = 125$ m/s.
 Kurve b: geballte Strömung, Zapfendüse Abb. 2a, $v_m = 119$ m/s.

Mengenmessung im Strahlkern

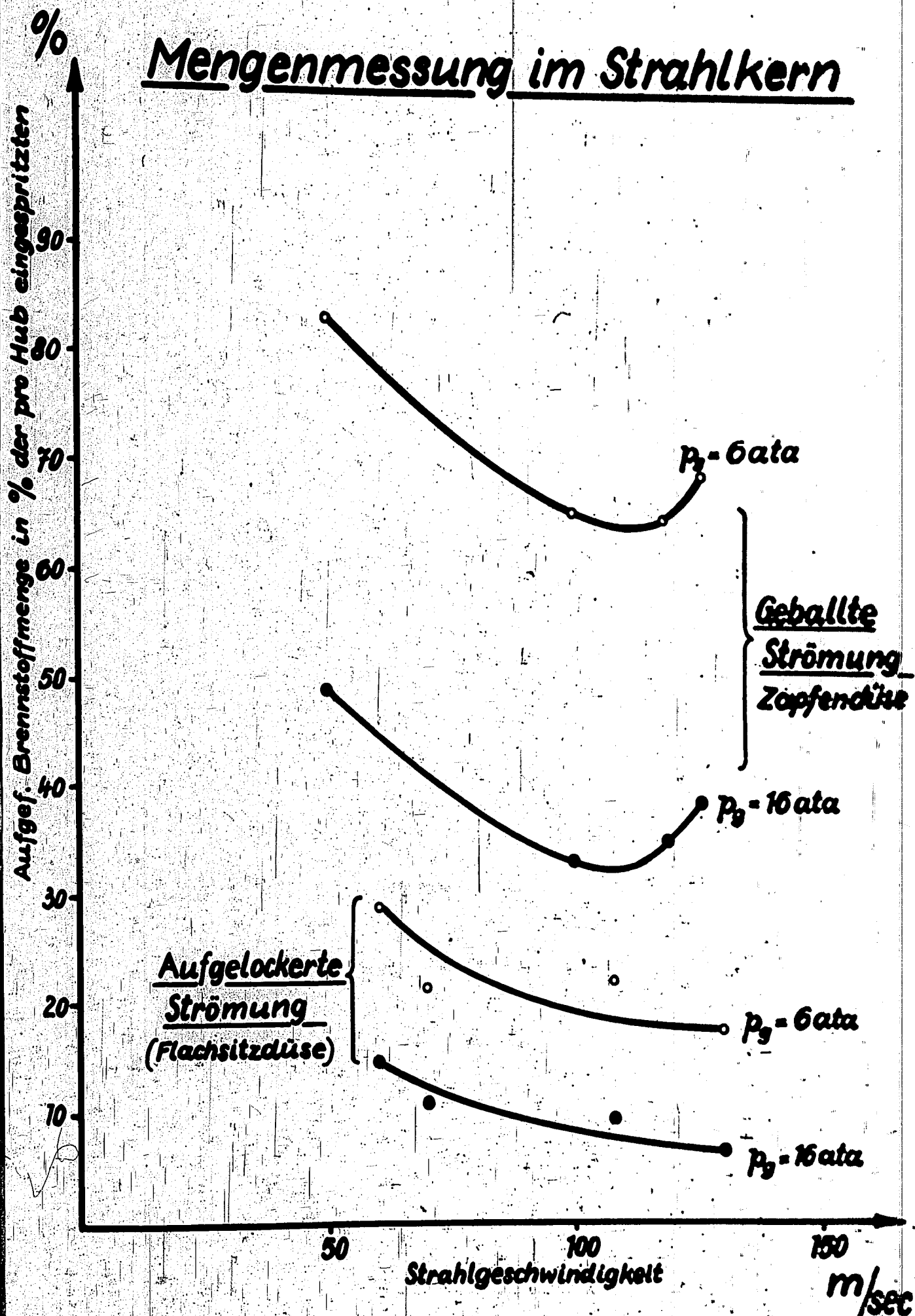


Bild 14. Prozentualer Anteil der im Strahlkern befindlichen Brennstoffmenge an der insgesamt pro Hub eingespritzten in Abhängigkeit von der Strahlgeschwindigkeit, gemessen für 2 Gegendrücke p_g der Luft sowie bei geballter und aufgelockelter Strömung (Auffangversuch).

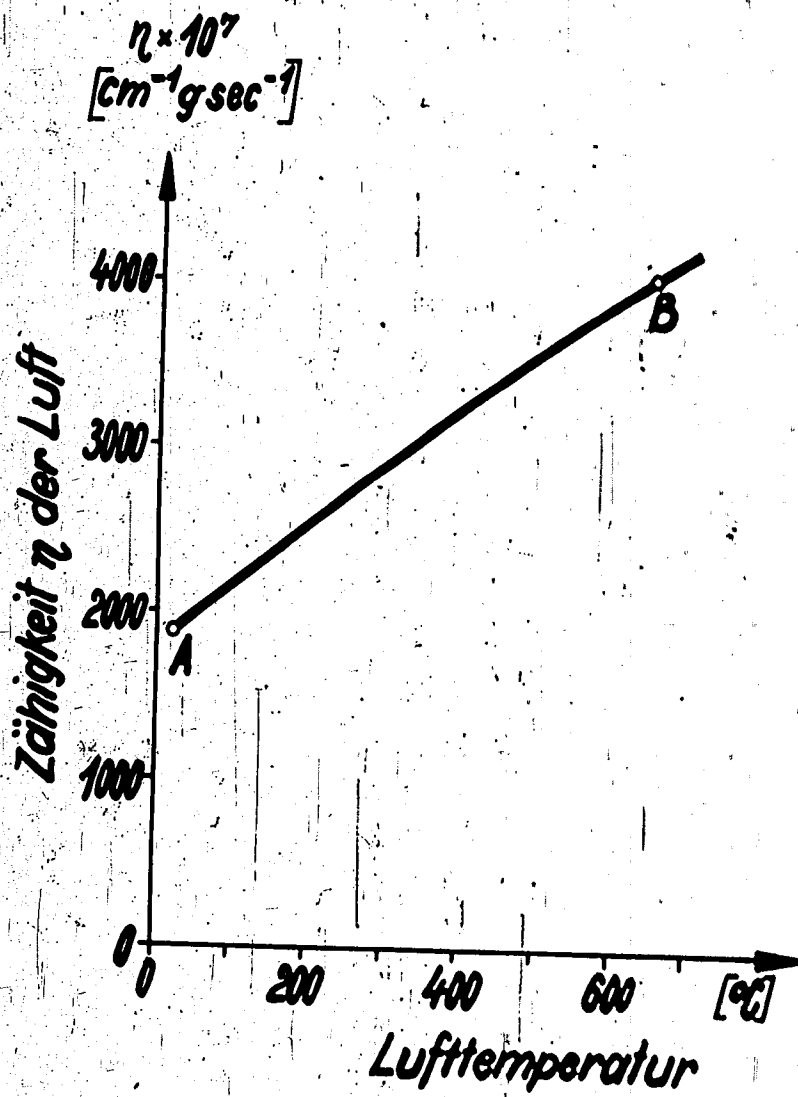


Bild 15. Abhängigkeit der Luftzähigkeit von der Lufttemperatur.

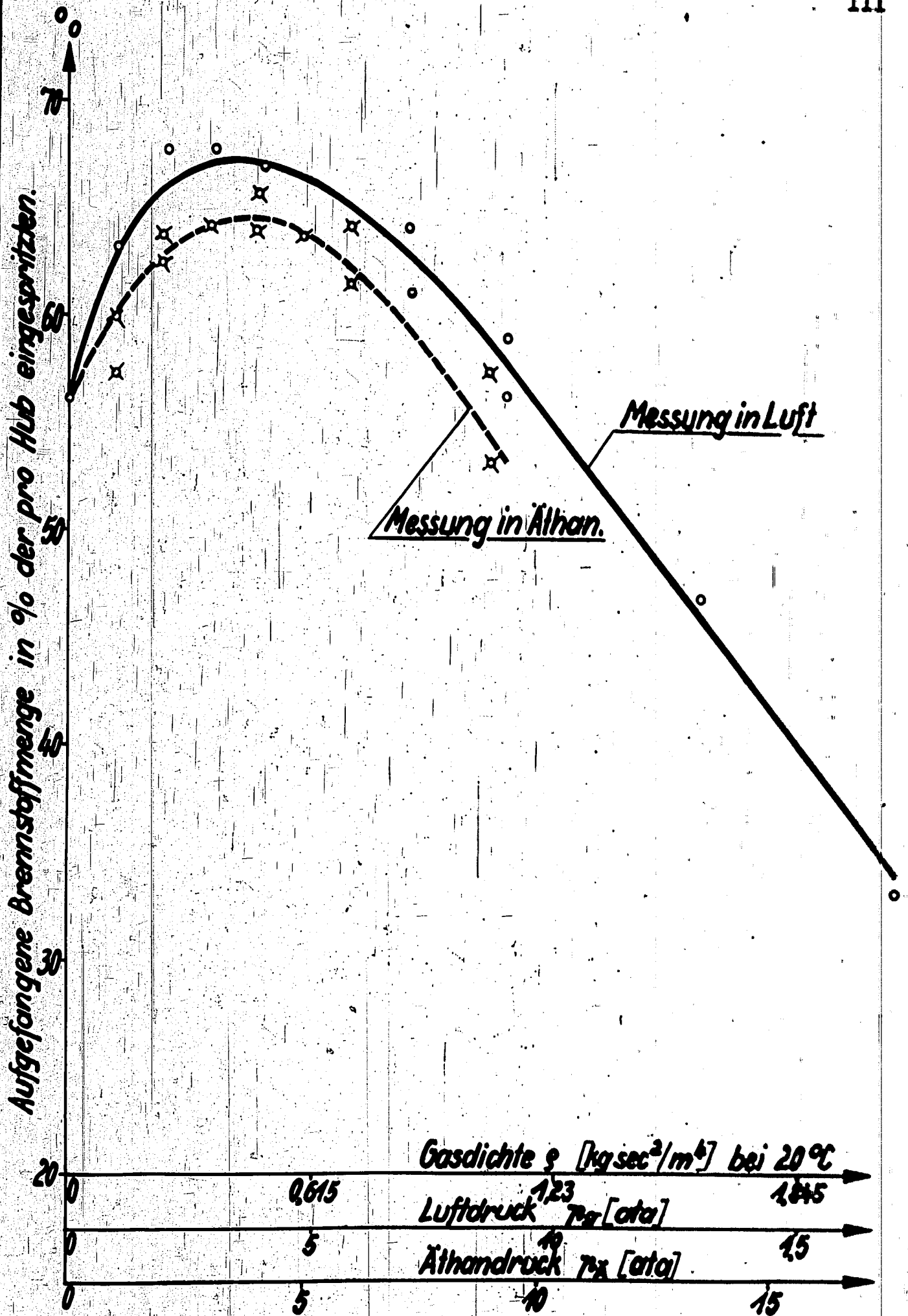


Bild 16. Einfluß unterschiedlicher Gaszähigkeit auf die im Strahlkern befindliche Brennstoffmenge. Auffangmessung in Luft (Kurve a) und Äthan (Kurve b) bei geballter Strömung; $v_m = 100 \text{ m/s}$.