

## 5. Gemischbildung und Verbrennung in der Bombe

### Wege zur Beherrschung und Steuerung des Verbrennungsablaufes bei Einspritzmotoren

Von Dr.-Ing. B l u m e

Aus dem Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden

Der vom Maschinenlaboratorium der TH Dresden seit Jahren beschrittene Weg in der Erforschung der Gemischbildungs- und Verbrennungsvorgänge der Einspritzmotoren hat die Beherrschung und Steuerung des Verbrennungsablaufes im Motor zum Ziel.

Der Verbrennungsvorgang im Motor setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelvorgängen zusammen, deren Gesetzmäßigkeiten für die Beherrschung des Gesamtvorganges bekannt sein müssen. Die Einzelgesetzmäßigkeiten lassen sich am motorischen Vorgang trotz der hochentwickelten Meßtechnik mit genügender Klarheit nicht erkennen. Deshalb werden im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden die Einzelvorgänge unter vereinfachten, dadurch übersichtlicheren Bedingungen zunächst außerhalb des Motors untersucht. Es sei aber gleich darauf hingewiesen, daß die Kenntnis der einzelnen Vorgänge, aus denen sich der motorische Vorgang zusammensetzt, allein noch nicht ausreicht, um den Gesamtvorgang zu beherrschen. Dazu gehört die Erforschung der gegenseitigen Überlagerungen der Einzelercheinungen, wie z. B.: Brennstoffstrahl und Wandeinfluß, oder: Brennstoffstrahl und Luftbewegung. Nur durch diese schrittweise systematische Erforschung können allgemeingültige und für den Motorenbauer wertvolle Erkenntnisse gefunden werden.

Es soll deshalb gezeigt werden,

1. welche Erkenntnisse in der Erforschung der Einzelgesetzmäßigkeiten bisher gewonnen wurden, und
2. in welcher Richtung die Forschung auf Grund der bereits vorliegenden Erkenntnisse unter gleichzeitiger Berücksichtigung der vordringlichen Aufgaben weiterzuführen ist.

Die Ausführungen stützen sich im wesentlichen auf die Versuche an der durch mehrere Veröffentlichungen bekannten Verdichtungsbombe (Bild 1), bei der die Dieseleinspritzung in heiße Luft von motorischer Dichte durch Zeitlupenphotographie und Druckmessung erforscht wird. Die Ausführungen stützen sich deshalb im wesentlichen auf Ergebnisse des reinen Versuchsbetriebes.

Bei der Dieseleinspritzung in ruhende Luft (bei ungestörten Strahlen und beim Aufspritzen auf Wände verschiedener Form und Temperatur) konnten die folgenden Einzelprobleme der Klärung weitgehend zugeführt werden: Strahlbildung, Zündung, Gemischbildung, Verbrennungsgeschwindigkeit und Durchbrennzeit.

Die Zündung bei der Dieseleinspritzung von Gasöl, die insbesondere im Hinblick auf den Schnellläufer interessiert, bereitet keine besonderen Schwierigkeiten. In der Bombe treten bei  $500^{\circ}\text{C}$  und 35 atü bereits Zündverzögerungen von  $2 \times 10^{-3}$  sec auf. Im Motor werden noch kürzere Verzögerungen gemessen, da dort höhere Lufttemperaturen, heiße Wände und der Einfluß der Luftbewegung Zündverzögerungen bis zu  $0,6 \times 10^{-3}$  sec erzwingen. Diese Zündzeiten können bei handelsüblichen Düsen ohne weiteres immer erreicht werden, da am Strahl stets eine Zone vorhanden ist, in der ein ausreichender Anteil des eingespritzten Kraftstoffes die Zündreife erreicht. Diese Zündzone ist abhängig vom Gemischbildungsablauf im Strahl. So zeigt z. B. Bild 2 schematisch die Lage der Zündzone am Strahl der Einlochdüse. Die Strahlentwicklung erfolgt im wesentlichen durch den Strahlkern zur Spitze, wo der Kraftstoff auf die Umgebungsluft stößt und dabei nach außen gedrängt wird. Der obere Teil der Abbildung zeigt den dadurch entstehenden Temperaturverlauf: kalter Strahlkern - Temperaturzunahme über den Mantel - im Gebiet der höchsten Temperatur die Zündzone. Das nächste Bild (3) zeigt die Zeitlupenaufnahme eines solchen Zündvorganges bei kurzem Zündverzug ( $2,6 \cdot 10^{-3}$  sec,  $500^{\circ}\text{C}$ , 32 atü, 85 mg). Die Aufnahme zeigt, daß bei so kurzem Zündverzug nur ein sehr kleiner Anteil des eingespritzten Kraftstoffes im Moment der Zündung verdampft ist.

Das Bild 4 zeigt ebenfalls einen Zündvorgang, diesmal aber am Strahl einer Flachsitzdüse. Hier liegt die Zündzone dichter an der Düse, da infolge der größeren Gemischbildungskraft dieser Düse das zündfähige Gemisch rascher erzeugt wird. Die Folge dieser Erscheinung ist eine Verkleinerung des Zündverzuges gegenüber dem Strahl der normalen Lochdüse.

Von größter Bedeutung ist der Einfluß des Zündverzuges auf den Ablauf der Verbrennung, der durch die Größe der Verbrennungsgeschwindigkeit (kcal/s) gekennzeichnet ist. Das nächste Bild (5) zeigt über der Zeit, beginnend mit der Einspritzung, 5 Verbrennungsabläufe von gleichen Einspritzvorgängen, abhängig vom Zündverzug. Die Verbrennungsgeschwindigkeit in kcal/s wurde aus dem wirklichen Druckverlauf in der Bombe (Vorgang bei konstantem Volumen) errechnet. Es zeigt sich, daß die Größe des Zündverzuges den Verbrennungsablauf entscheidend beeinflusst. Die Kurven sind gekennzeichnet durch ein Verbrennungs-Maximum, die Zündspitze, die vor Ablauf der ersten tausendstel Sekunde nach der Zündung überschritten wird. Der steile Einsatz der Verbrennungsgeschwindigkeit bei jedem der gezeigten Diagramme, der durch den Gemischbildungsvorgang bedingt wird, ist deutlich zu erkennen. Diese Erscheinung ist auch an den von L i s t gezeigten Diagrammen von Verbrennungsgeschwindigkeiten, die im Motor gewonnen wurden, zu erkennen. Diese Übereinstimmung der Verbrennungsabläufe im Motor und in der Bombe, und zwar bei den verschiedenartigsten Gemischbildungsvorgängen (Vorkammer, Wirbelkammer, Luftspeicher, Strahleinspritzung), läßt erkennen, daß wir von einer gewollten Steuerung des Verbrennungsablaufes im Dieselmotor noch weit entfernt sind.

Mit abnehmendem Zündverzug sinkt die Zündspitze ab, so daß damit auch die Verbrennungsgeschwindigkeit über der Gesamtzeit eine gleichmäßigere Verteilung erfährt. Die Größe der Zündspitze ist entscheidend für die Ganghärte des Motors.

Die Diagramme zeigen, daß eine Beeinflussung der Verbrennungsgeschwindigkeit durch die Größe des Zündverzuges möglich ist. Wegen der starken Abhängigkeit des Zündverzuges von der Temperatur der Luft heißt das, daß mit Zunahme der Lufttemperatur die Verbrennung weicher verläuft.

Die Durchbrennzeit (Bild 6), das ist die Zeit vom Beginn der Zündung bis zum Ende der Verbrennung, zeigt beim Einspritzen in ruhende Luft eine Abhängigkeit von der Lufttemperatur, die zunächst allgemein als paradox empfunden wird. Es zeigt sich nämlich, daß mit steigender Lufttemperatur die Durchbrennzeit zunimmt. Während also der Zündverzug mit steigender Temperatur abnimmt, nimmt die Durchbrennzeit zu. Dieser Verlauf ist gebunden an den Vorgang in ruhender Luft und an den Gemischbildungsablauf im Strahl der heute handelsüblichen Düsen. Ich erwähnte schon früher, daß die Strahlbildung im wesentlichen durch den Strahlkern zur Spitze erfolgt. Erst vom Erreichen der Strahlspitze an kommt der durch den Kern nach vorn gelangende Brennstoff zur weitergehenden Auflösung und damit zur Mischung mit Luft. Je kürzer deshalb der Zündverzug ist, umso kleiner ist der Anteil des Kraftstoffes, der im Moment der Zündung ausreichende Bedingungen zur Umsetzung vorfindet. Nun kommt durch die Zündung der Strahlmantel zur Entflammung, so daß der nach der Zündung abgespritzte Kraftstoff unter Sauerstoffmangel durch diese brennende Zone hindurch zur Spitze wandern muß.

Mit abnehmendem Zündverzug steigt demnach der Anteil des Kraftstoffes, der den Sauerstoff erst nach Durchlaufen der brennenden Zone erreicht. Der Kraftstoff wird dabei sehr schnell hochgeheizt. Die dadurch verursachte raschere Verdampfung der Tröpfchen setzt die Durchschlagskraft herab. Damit sinkt natürlich auch die Geschwindigkeit, mit der der Kraftstoff zur Mischung mit Luft und damit zur Umsetzung kommt. -Außerdem treten beim Durchlaufen der brennenden Zone reaktionskinetische Vorgänge auf, die das Verbrennungsende ebenfalls hinauszögern und damit Anteil haben an der Zunahme der Durchbrennzeit mit steigender Temperatur. Das Verbrennungsende liegt demnach an der Spitze, wie das schematisch im Bild 7 gezeigt ist. Grundsätzlich zeigt sich in diesen Vorgängen der unbefriedigende Gemischbildungsvorgang, den die heute handelsüblichen Düsen erzeugen.

Über den Einfluß, den Luftbewegungen verschiedenster Größe und Richtung auf diesen Ablauf ausüben, ist bisher nichts bekannt.

Betrachten wir weiter das Aufspritzen des Kraftstoffes auf Wände verschiedener Form und Temperatur. Diese Fragen begegnen zunehmendem Interesse, da durch die Unterteilung der Brennräume, durch die kleinen Brennräume bei Schnellläufern und durch die Benzineinspritzung (bei Luftdichten in der Gegend der Atmosphäre) eine Wandberührung des Kraftstoffstrahles auf alle Fälle stattfindet. Hier wurden alle die Fragen geklärt, die für den ungestörten Strahl schon dargelegt wurden, wozu als neues Problem das Ausfallen des Brennstoffes an der Wand kommt.

Grundsätzlich ist über die Erscheinungen beim Aufspritzen folgendes zu sagen:

Die Tatsache, daß die im Strahlkegel eingeschlossene Luft und der bereits gebildete Brennstoffdampf sich ebenfalls mit hoher

Geschwindigkeit vorwärtsbewegen, ermöglicht eine überraschend weitgehende Umlenkung des Strahles an der Auftreffstelle. Durch diese Umlenkung bleibt der Strahlaufbau grundsätzlich erhalten - also ein dichter Strahlkern, um den mit nach außen abnehmender Dichte, Tröpfchengröße und Geschwindigkeit der Strahlmantel liegt. Der Strahl entwickelt sich auch nach der Umlenkung an der Wand entlang weiter, ohne diese zu berühren und ohne von der Wand freikommen zu können. Das folgende Bild 8 zeigt die Zeitlupenaufnahme eines Aufspritzvorganges.

Im flüssigen Zustande kann der Brennstoff die Wand nur unter besonderen Bedingungen treffen, wobei bei der Dieseleinspritzung der flüssig auftreffende Kraftstoff nur aus dem Strahlkern - auch bei sehr kurzer Entfernung zwischen Düse und Auftreffpunkt - her-rührt. Senkrecht Aufspritzen führt unweigerlich zum Ausfallen einer bedeutenden Menge. Natürlich spielt für das Auftreffen der Gemischbildungszustand eine große Rolle, also die Entfernung zwischen Düse und Auftreffpunkt sowie die Gemischbildungskraft der Düse.

Ein Zurückspritzen von Brennstoff im Sinne einer Reflektion findet bei der Dieseleinspritzung nicht statt. Das rührt daher, daß hier der Strahl stets weitgehend mit Luft und Dampf durchmischt ist - er gleicht gewissermaßen einem Naßdampfstrahl. Dagegen findet bei der Benzineinspritzung, wo infolge der geringen Luftdichte der Strahl den Charakter des reinen Flüssigkeitsstrahles hat, beim Auftreffen ein heftiges Aufprallen und ein weitgehendes Zurückspritzen statt.

Bei hohen Wandtemperaturen stellt sich an den Tröpfchen das Leidenfrost'sche Phänomen ein, wodurch die Wandberührung bei der Dieseleinspritzung mit Sicherheit vermieden werden kann. Für diesen Fall haben sich als unterste Grenze der Wandtemperatur  $550^{\circ}\text{C}$  ergeben.

Der Zündverzug kann durch das Aufspritzen auf heiße Wände bei sonst gleichem Luftzustand ganz erheblich verkleinert werden. Das folgende Bild 9 zeigt die Abnahme des Zündverzuges bei konstantem Luftzustand in Abhängigkeit von der Wandtemperatur. Wir sehen, daß bei  $700^{\circ}\text{C}$ , also Rotglut, der Zündverzug bei gleichem Luftzustand gegenüber dem ungestörten Strahl nur noch halb so groß ist. Infolge der weiter oben gezeigten Abhängigkeit des Verbrennungsablaufes vom Zündverzug ergibt sich damit durch die Anwendung heißer Wandteile am Strahl eine Möglichkeit, den Verbrennungsablauf zu beeinflussen. In Bild 10 ist gezeigt, wie durch die Temperatur der Wand beim Aufspritzen der Verbrennungsablauf beeinflusst werden kann (siehe die beiden äußeren Kurven) - und wie weiterhin durch das Anspritzen glühender Wandteile die Zündspitze gegenüber dem freien Strahl herabgedrückt werden kann.

Die Durchbrennzeit beim Aufspritzen in ruhender Luft ist noch um etwa 30 % größer als beim freien Strahl, da hier dem Strahl die Ausdehnung nach der Wandseite verwehrt ist. Auch zeigt sich hier wieder der Zusammenhang, daß mit kleiner werdendem Zündverzug die Durchbrennzeit ansteigt. Infolge des Zusammenhanges zwischen Zündverzug und Wandtemperatur erfolgt mit steigender Wandtemperatur eine weitere Zunahme der Durchbrennzeit. Wir sehen aus diesen Ergebnisse, daß gerade bei der Wandberührung, also besonders bei kleinen Schnellläufern und bei unterteilten Brennräumen eine schnell-

e und gesteuerte Umsetzung des Kraftstoffes bei den heute handelsüblichen Düsen nur eine Frage der Luftführung ist.

Demnach bedeutet beim Schnellläufer die Beherrschung der Durchbrennzeit neben der Senkung der Wärmebelastung eine Begrenzung des Brennstoffverbrauches, denn die höheren Verluste (Gaswechselvorgang, Reibung) wirken sich schon im Brennstoffverbrauch aus. Es hat sich gezeigt, daß das Auslaufen der Verbrennung nur allmählich erfolgt, daß also die umgesetzten Wärmemengen am Verbrennungsende klein sind. Gerade deshalb müssen zum Erfassen dieser kleinen Mengen alle Möglichkeiten der Gemischbildung und der Wandwirkungen ausgenutzt werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen über die Vorgänge bei der Dieselerverbrennung - in ruhender Luft und beim Aufspritzen - zeigt sich im Hinblick auf die Steuerung der motorischen Verbrennung insbesondere für Vorgänge bei hohen Drehzahlen die dringende Notwendigkeit der systematischen Erforschung des Einflusses der Luftbewegung auf Gemischbildung, Zündung und Verbrennung. Denn: Jede zusätzliche Luftbewegung im Brennraum erfordert Energie, die entweder durch höheren Kraftstoffverbrauch oder zu Lasten der Leistungsausbeute aufgebracht werden muß. Es ist deshalb dringend notwendig, für jeden Fall diejenige Form der Gemischbildung und Leitung der Verbrennung im Luftstrom zu kennen, die mit einem Minimum an Luftbewegung auskommt. Dafür fehlen uns bis heute noch die erforderlichen Grundkenntnisse.

Die Untersuchungen von Kraftstoffstrahlen bei Luftbewegung, die im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden durchgeführt werden, betreffen:

1. beim Dieselmotor:

Die Strahlbildung und Gemischbildung im Luftstrom (im freien Strahl und an Wänden verschiedener Form und Temperatur); den Ort der Zündung, über den bis heute noch nichts ausgesagt werden kann; die Einflußnahme auf den Verbrennungsablauf, also die Steuerung der Verbrennungsgeschwindigkeit und schließlich die Möglichkeiten der Einflußnahme auf die Durchbrennzeit, die bei hohen Drehzahlen zu Sorgen Anlaß gibt.

2. beim Einspritzzündermotor:

besonders die Fragen der Strahlaulösung, da wegen der geringen Luftdichte die Zerstäubung im Vergleich zum Dieselmotor schlecht ist. Als Beispiel seien die beiden Bilder 11 und 12 gezeigt, bei denen auf eine gewölbte Platte einmal unter dieselmotorischen Bedingungen und dann unter denen des Einspritzzündermotors aufgespritzt wurde. Beim Einspritzzündermotor stehen deshalb die Gemischbildung im Luftstrom und die Fragen des Gemischstromes (im Hinblick auf die erwünschte Gemischschichtung) im Vordergrund.

Für diese Untersuchungen ist die am Anfang erwähnte Verdichtungs-bombe bereits eingesetzt. Hier werden die Vorgänge unter motorischen Bedingungen, d. h. einschließlich der Zündung und Verbrennung untersucht. Da aber durch die Zündung und Verbrennung die Vorgänge der Strahl- und Gemischbildung überdeckt werden,

sollen diese Untersuchungen auch in kalter Luft von motorischer Dichte durchgeführt werden. Zu diesem Zwecke wird im Maschinenlaboratorium der TH Dresden ein Hochdruck-Windkanal hergestellt, der bei genau einstellbaren Strömungsverhältnissen (einschließlich pulsierender Strömung) die Untersuchung von Kraftstoffstrahlen gestattet.

Mit diesen beiden Anlagen wird in absehbarer Zeit der Einfluß der Luftbewegungen im Einspritzmotor geklärt werden können, mit dem Ziel der Steuerung des Verbrennungsablaufes und der Herabsetzung der durch zusätzliche Luftbewegungen entstehenden Verluste.

Die angestrebten Ergebnisse sind frei von den Überlagerungen des Motorbetriebes, wie Drehzahlabhängigkeit, lastabhängigen Brennräumtemperaturen und gegebenen Konstruktionsmerkmalen - und dadurch allgemein gültig. Sie können selbstverständlich nicht der Ergänzung durch den Motorversuch entbehren, wie andererseits die Resultate des Motorversuches ohne die Ergebnisse der Bombenversuche unvollständig bleiben müssen.



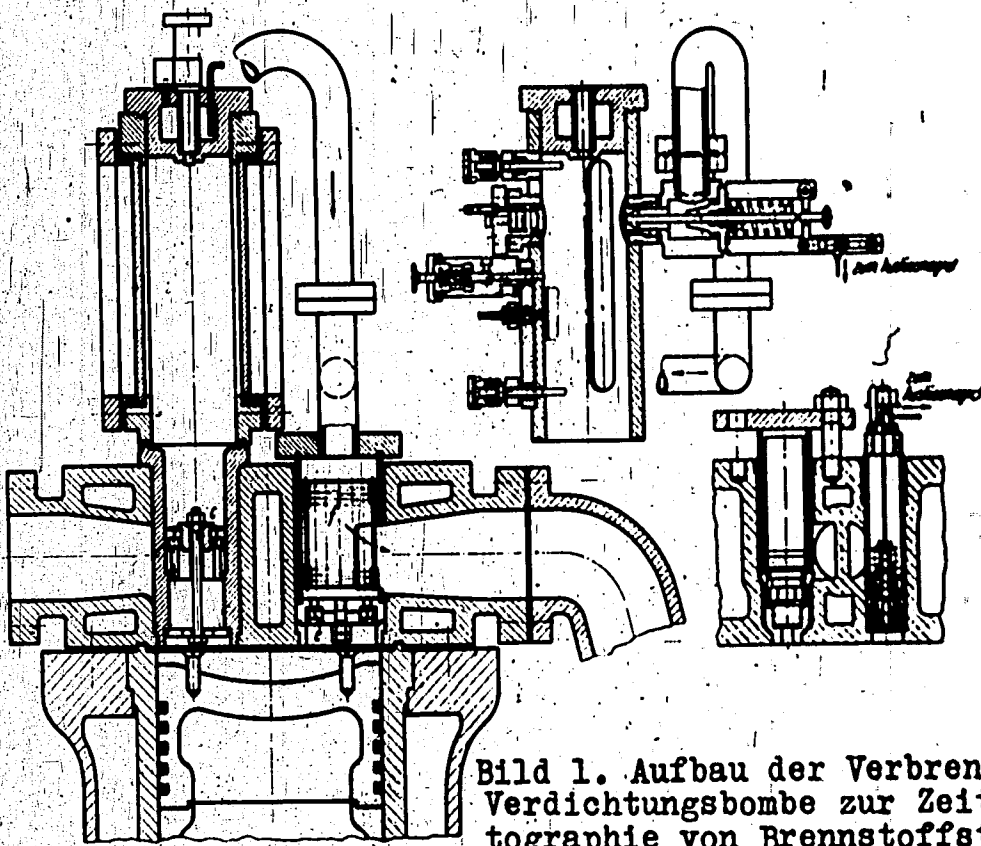


Bild 1. Aufbau der Verbrennungsbombe. Verdichtungsbombe zur Zeitlupenphotographie von Brennstoffstrahlen unter motorischen Bedingungen.

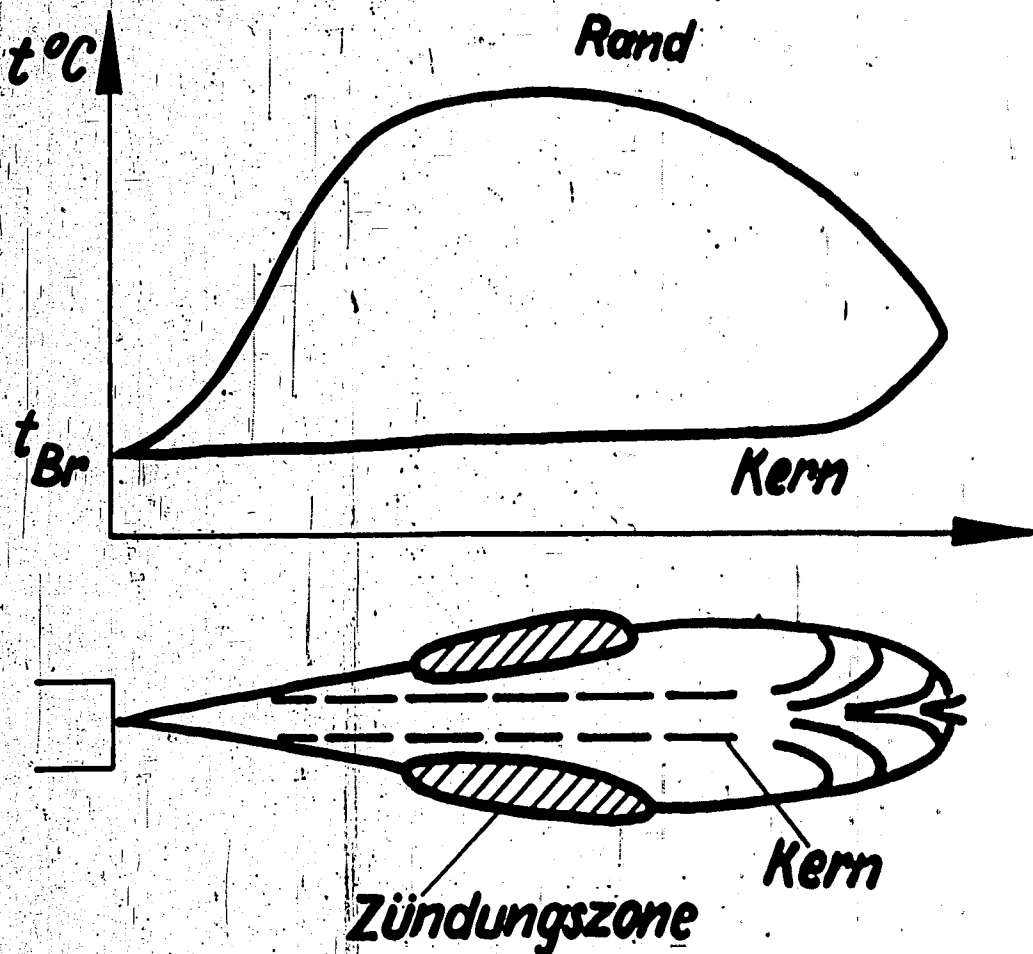


Bild 2. Temperaturverlauf am Strahl. Strahllaufbau und Zündzone am Strahl der Einlochdüse.



Bild 3. Zeitlupenaufnahme einer Einspritzung von 85 mg Gasöl bei 32 atü und 500° C, Zündung nach  $2,6 \cdot 10^{-5}$  s im dritten Teilbild.



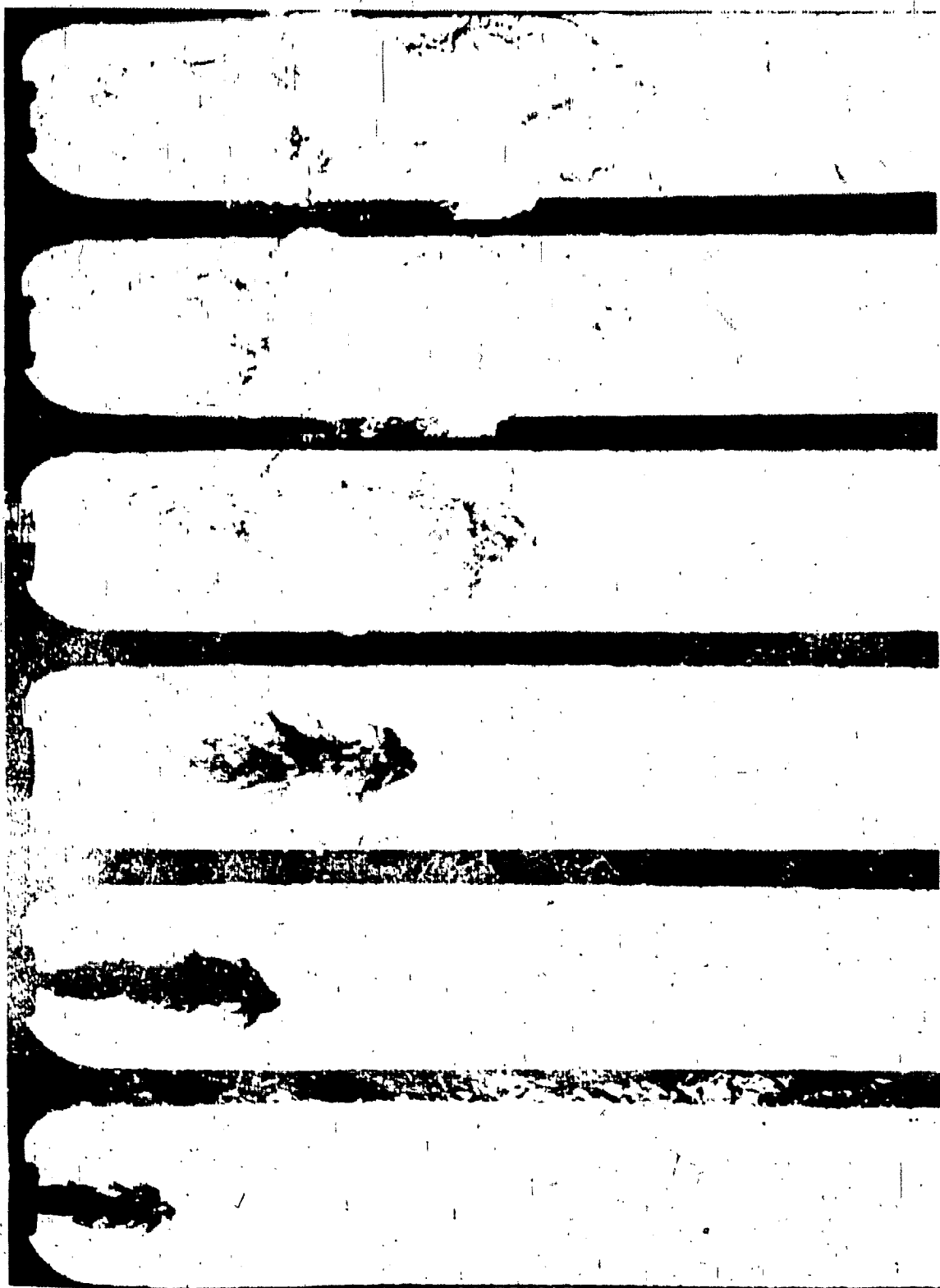


Bild 4: Einspritzung von 60 mg Gasöl durch eine Flachsitzdüse bei 32 atü und 447° C, Zündung nach  $3,7 \cdot 10^{-3}$  s im dritten Teilbild.

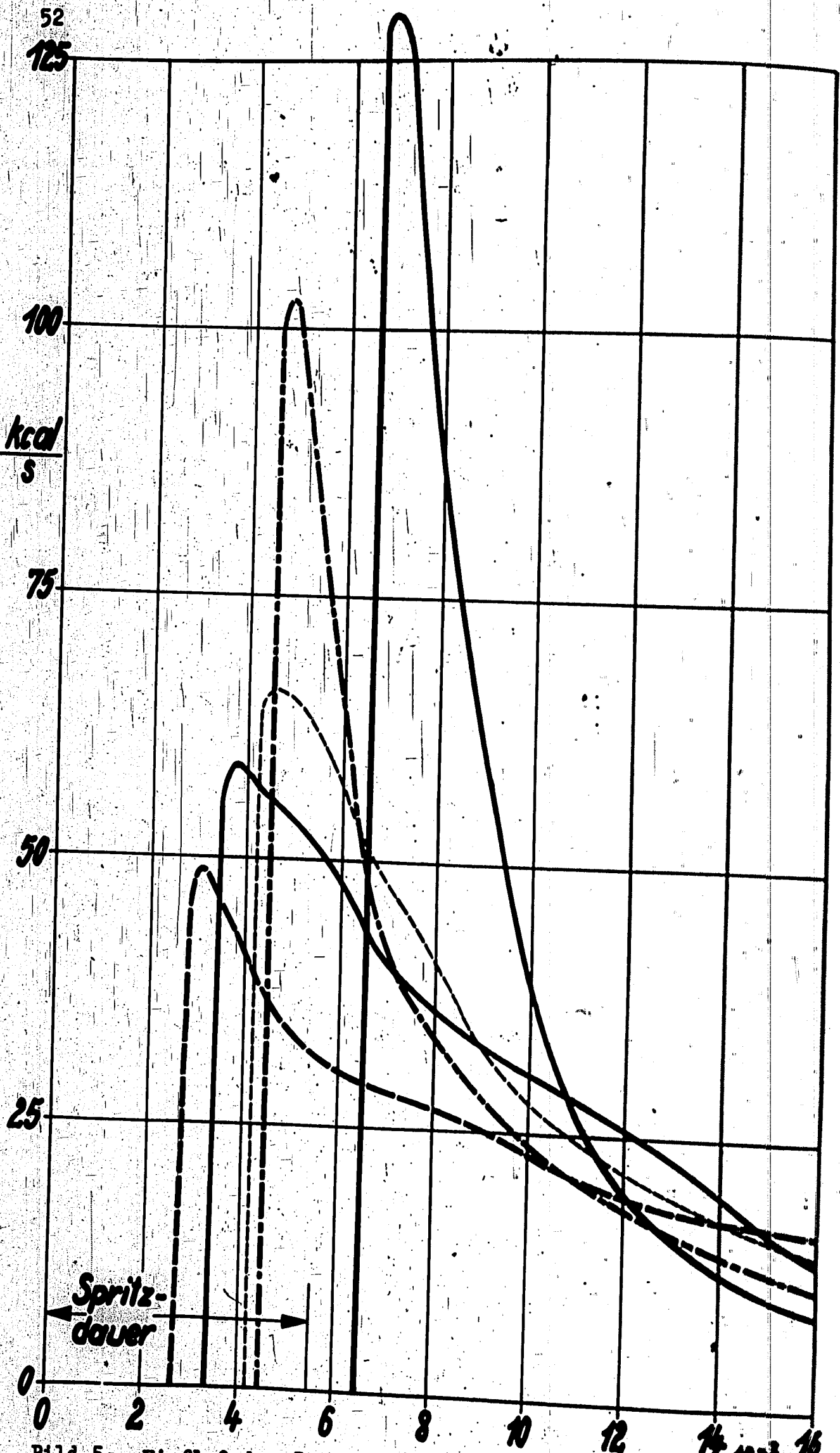


Bild 5: Einfluß des Zündverzuges auf die Verbrennungsgeschwindigkeit bei gleichem Einspritzvorgang.

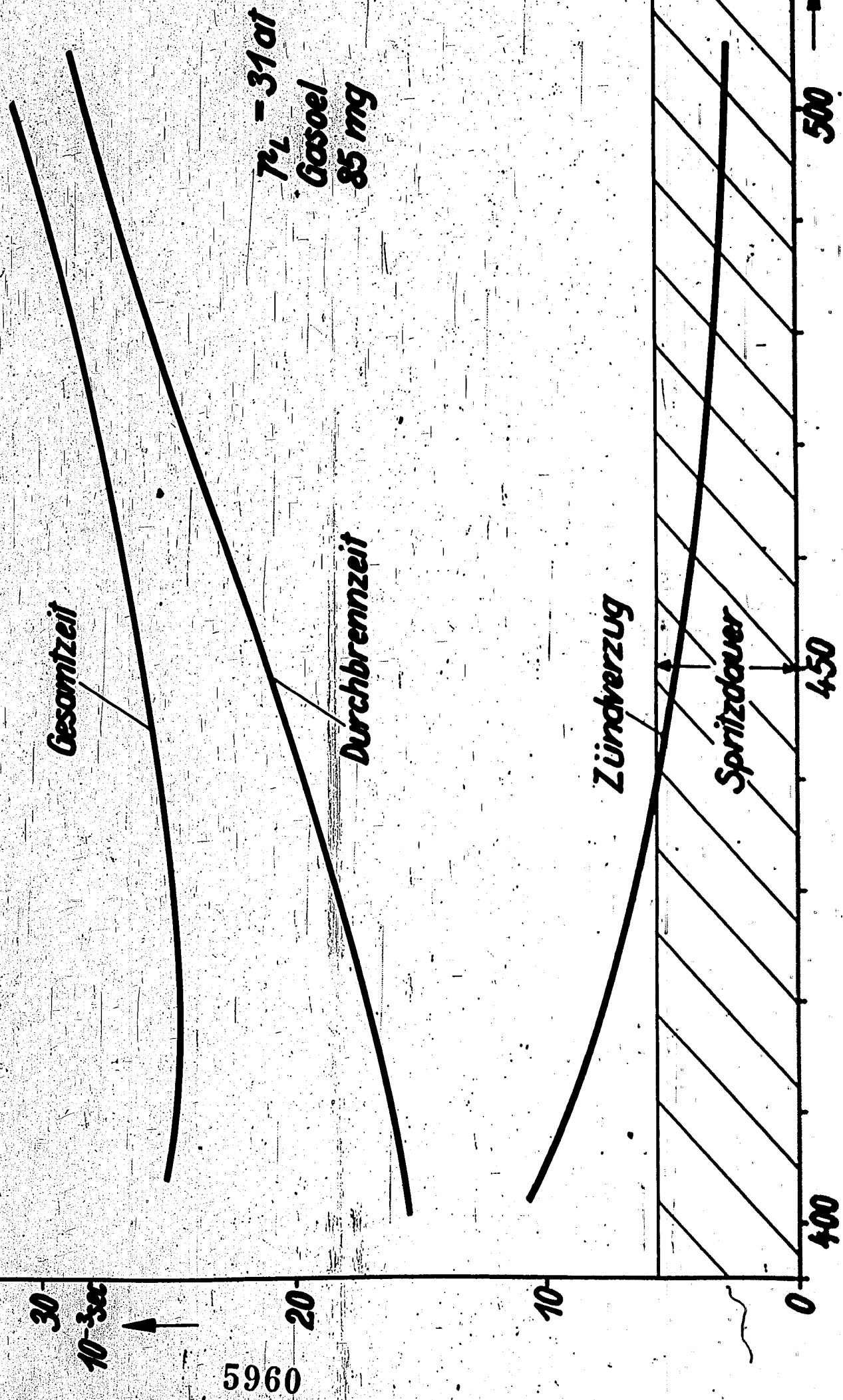


Bild 6. Zündverzug und Durchbrennzeit abhängig von der Lufttemperatur, Einlochdüse, Einspritzung in ruhende Luft.

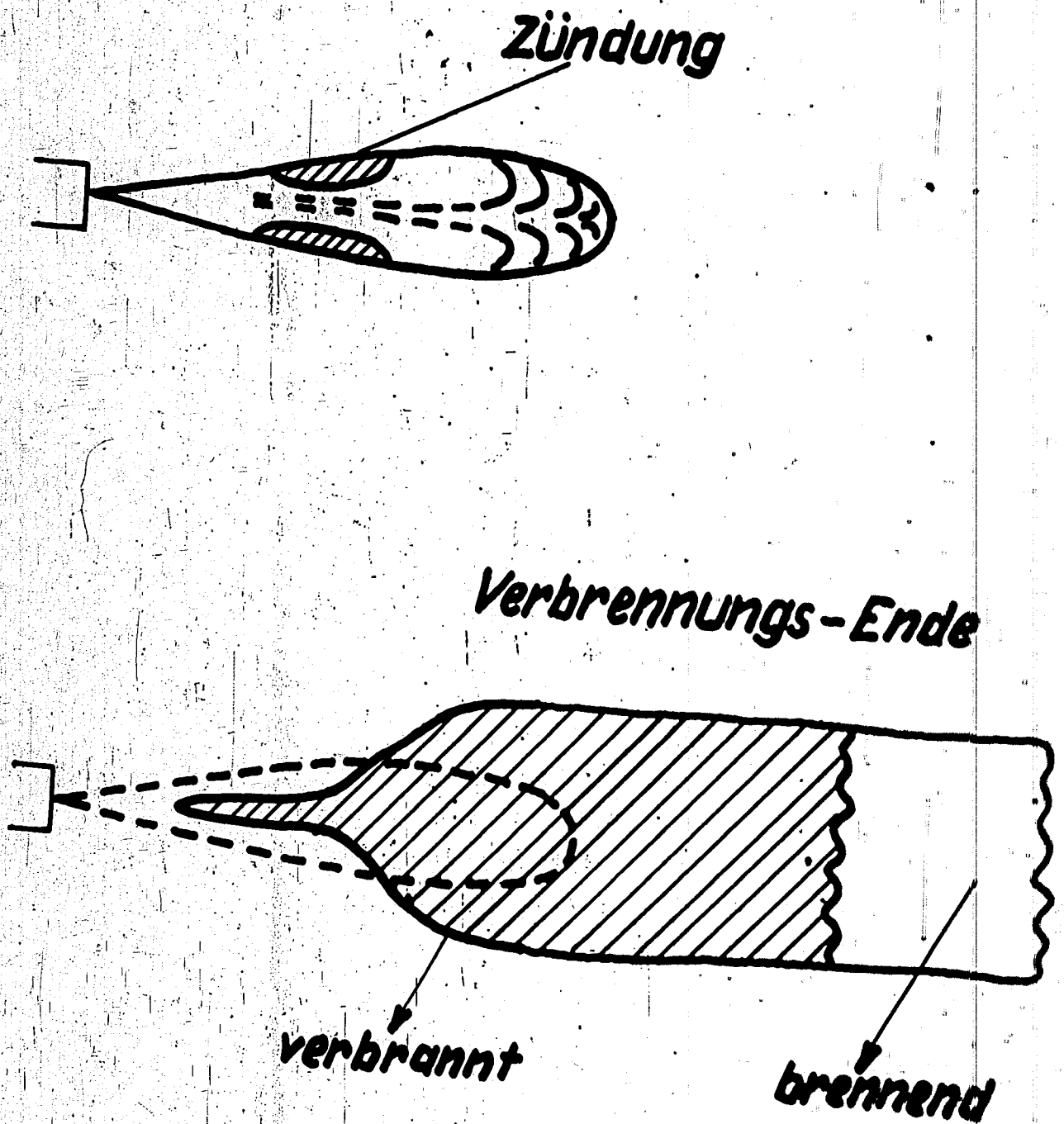


Bild 7. Lage des Verbrennungsendes am Strahl der Einlochdüse.

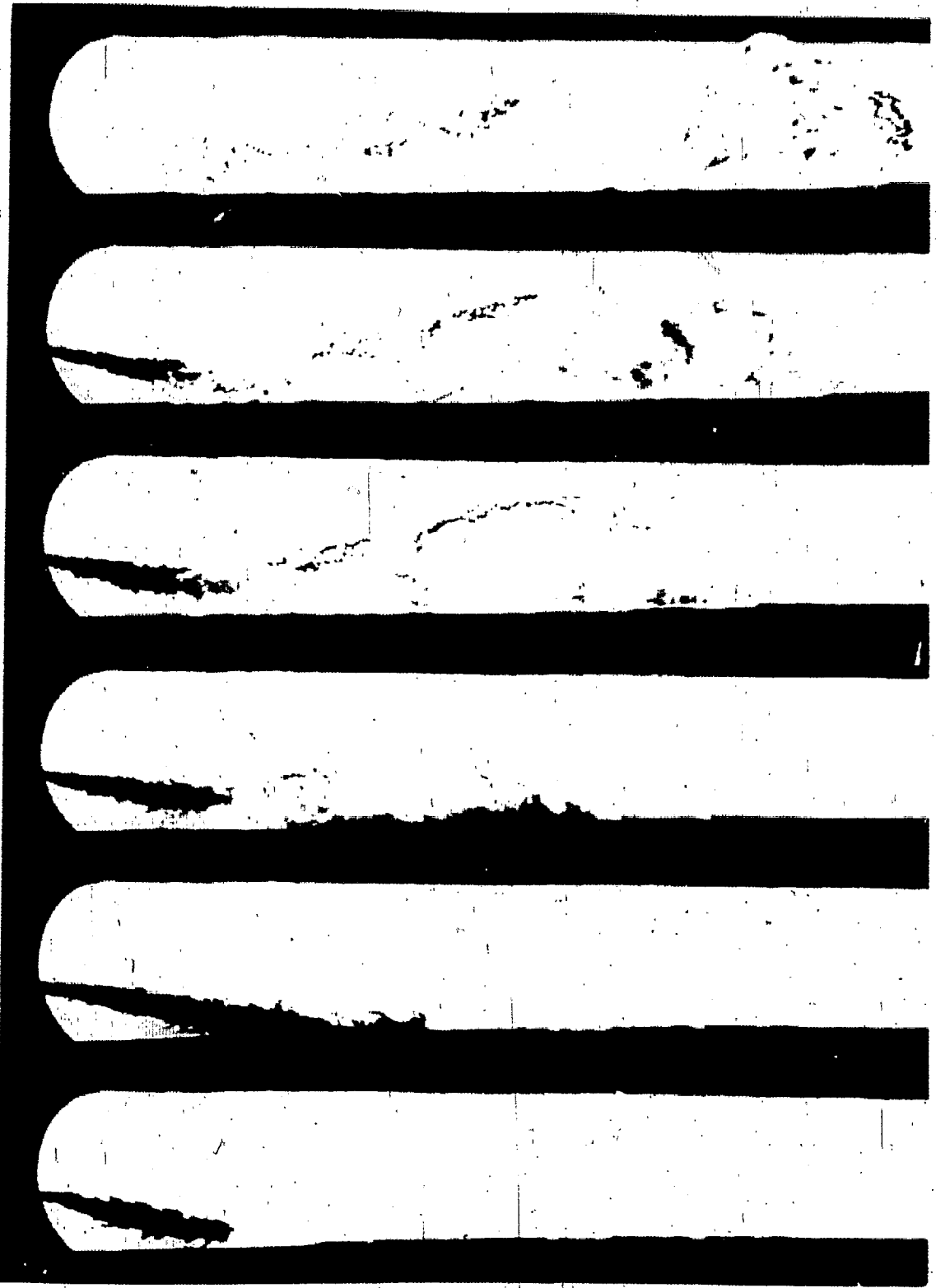


Bild 8. Aufspritzen auf eine Platte von  $700^{\circ}\text{C}$ , bei  $27,5\text{ atü}$  und  $475^{\circ}\text{C}$ , Strahllänge  $50\text{ mm}$ , Winkel  $15^{\circ}$ .

Einfluß der Wandtemperatur auf den Zündverzögerung

Wert für ungestörten Strahl  $t_L = 450 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $P_L = 32 \text{ atü}$

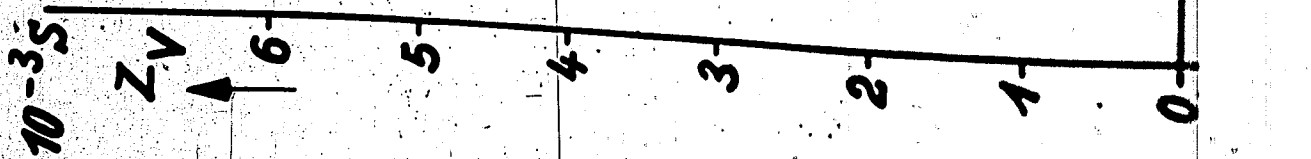


Bild 9. Einfluß der Wandtemperatur auf den Zündverzögerung.



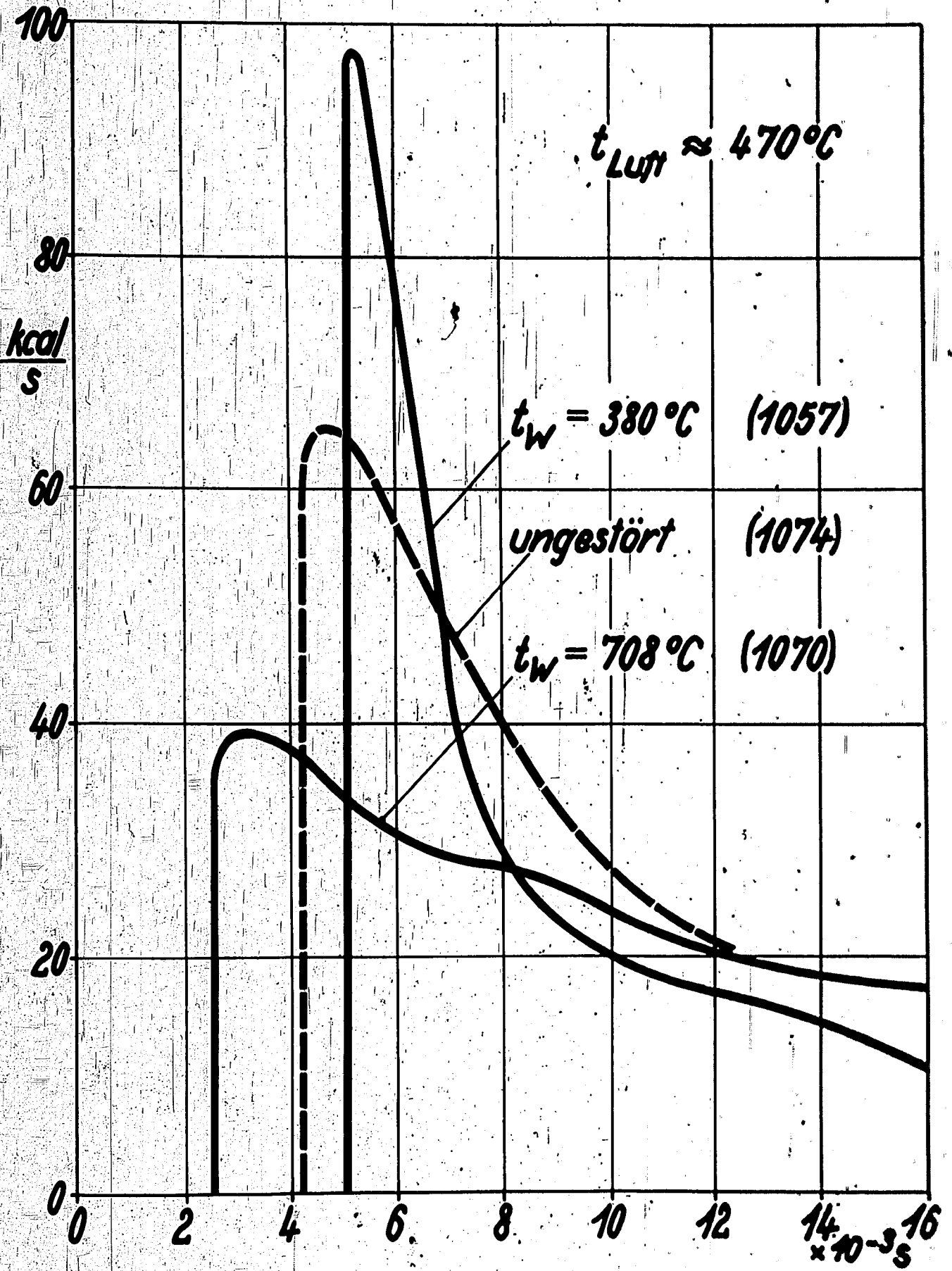


Bild 10. Einfluß der Wandtemperatur auf den Verbrennungsablauf.

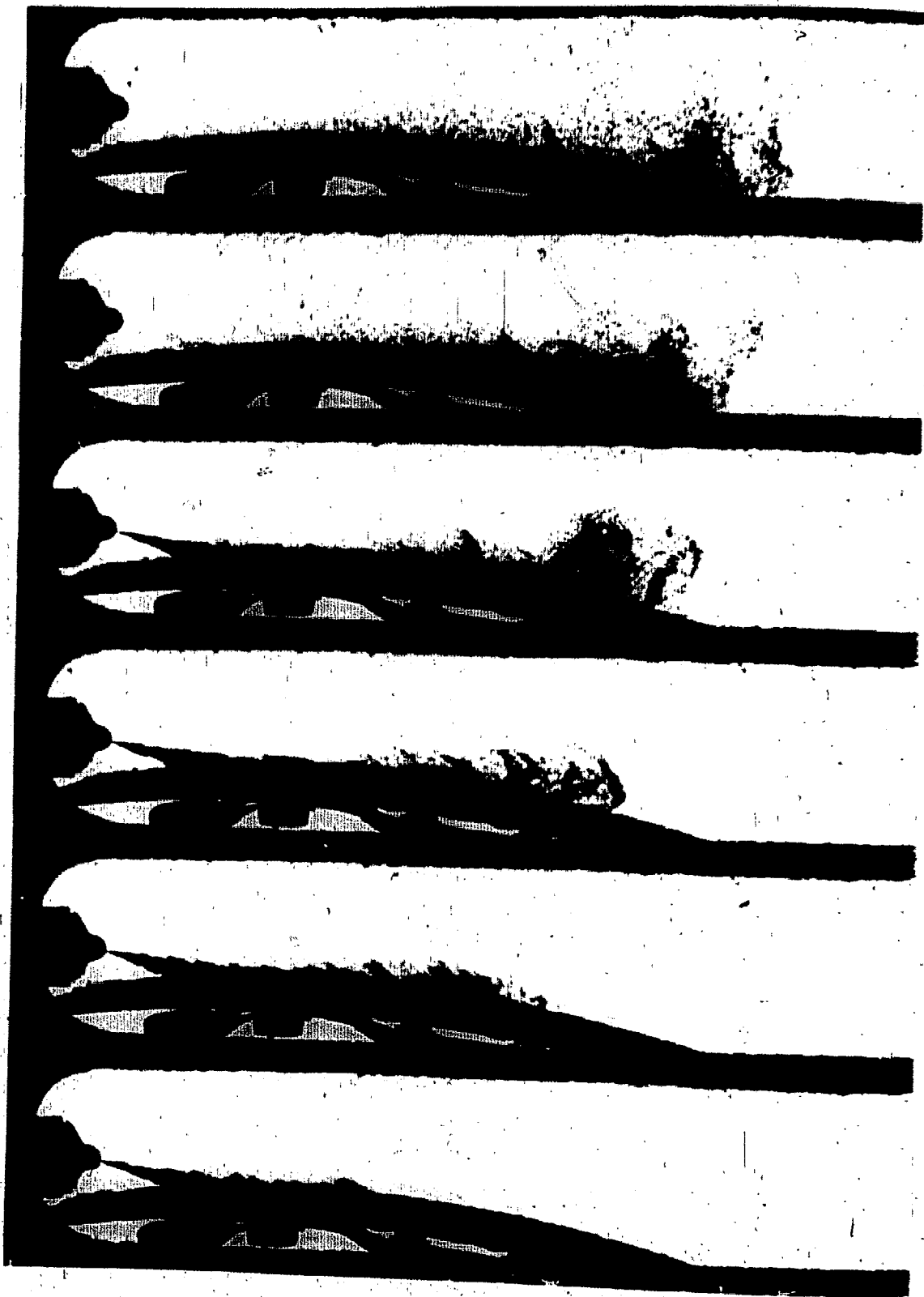


Bild 11. Aufspritzen auf eine gewölbte Platte bei dieselmotorischem Luftzustand.

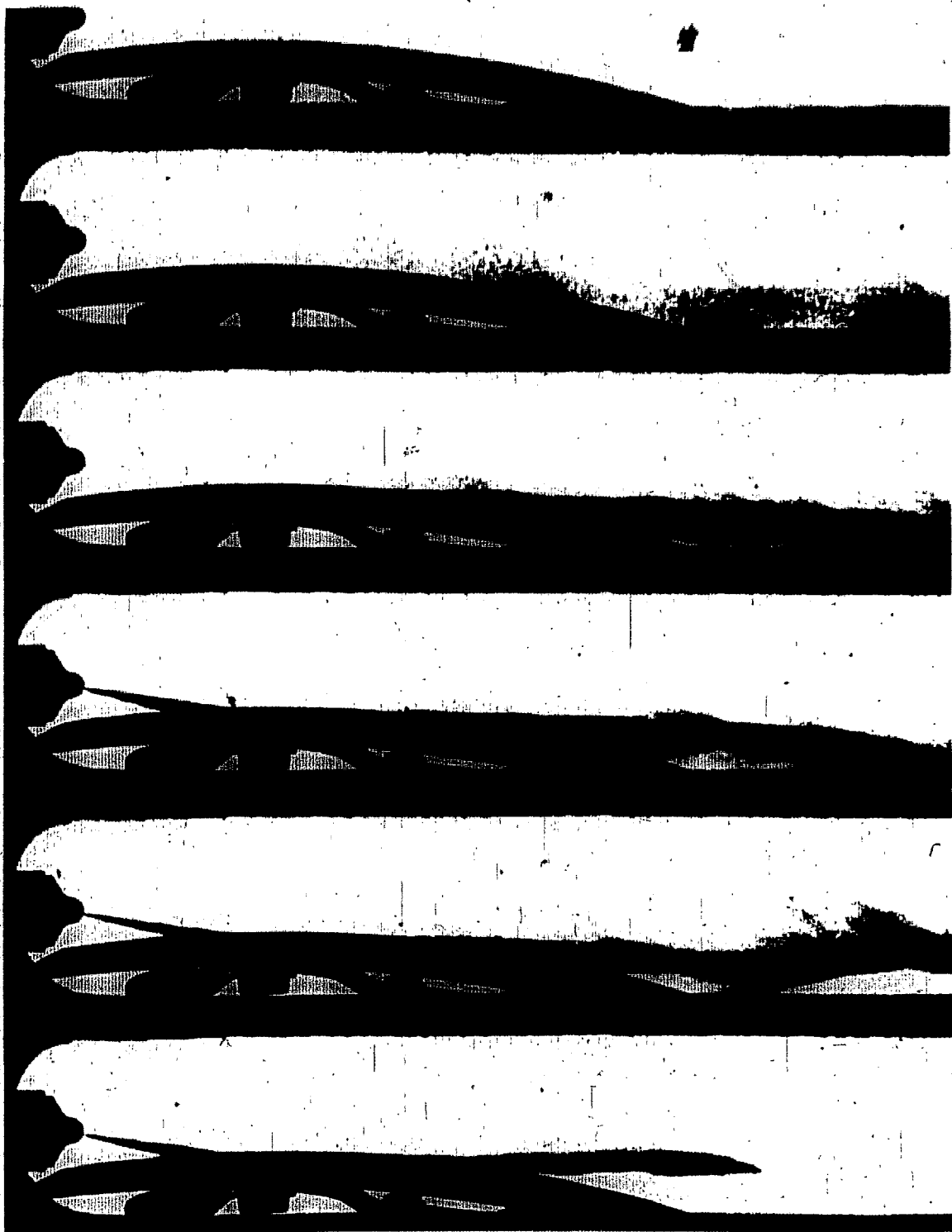


Bild 12. Aufspritzen auf eine gewölbte Platte bei Luftzustand des Einspritzzündermotors.