

# AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab  
zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern

# 18

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN  
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 18

Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab  
zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern

von

Dipl.-Ing. Wolfgang Hoffmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
Januar 1971

FA.Nr. 43 (3/68)

## INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1.	EINLEITUNG	1
2.	PROBLEMSTELLUNG	2
3.	LABORPRÜFMETHODEN ZUR UNTERSUCHUNG DER LÖSCHWIRKSAMKEIT	2
3.1.	Die SM-Prüfmethode	3
3.2.	Prüfapparatur nach Friedrich	3
3.3.	Prüfapparatur von Solvay	4
3.4.	Die Prüfapparaturen von Lee und Robertson	5
3.5.	Prüfapparatur der Fire Research Station	6
3.6.	Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G.	7
3.7.	Vergleich der verschiedenen Laborprüf- methoden	9
4.	UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN EINFLUSS VON BRENNSTOFFSTROM, TREIBGASDRUCK UND AUS- STOSSVORGANG AUF DIE WIRKUNG VON TROCKEN- LÖSCHPULVERN BEI DER PRÜFAPPARATUR DER DYNAMIT NOBEL A.G.	10
4.1.	Versuchsdurchführung	10
4.2.	Versuchsergebnisse und Versuchsauswertung	12
4.2.1.	Einfluß des Brennstoffstroms auf die Löschwirksamkeit	12
4.2.2.	Einfluß des Treibgasdruckes auf die Löschwirksamkeit	13
4.2.3.	Einfluß des Ausstoßvorganges auf die Löschwirksamkeit	14

5.	DIE PRÜFAPPARATUR DER FORSCHUNGSSTELLE FÜR BRANDSCHUTZTECHNIK	19
5.1.	Theoretische Grundlagen des Meßverfahrens	19
5.2.	Aufbau der Prüfapparatur	24
5.2.1.	Pulverzugabevorrichtung und Prüf Flamme	24
5.2.2.	Anlage zur Messung des Gas- und Luft- stromes	25
5.2.3.	Schlierenoptische Anordnung zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit	26
5.3.	Versuchsdurchführung	27
5.4.	Versuchsergebnisse und Versuchsaus- wertung	28
6.	ZUSAMMENFASSUNG	35
7.	LITERATURVERZEICHNIS	38
8.	TABELLE UND BILDER	41

# ENTWICKLUNG EINES MESSVERFAHRENS IM LABORMASSTAB ZUR BESTIMMUNG DER LÖSCHWIRKSAMKEIT VON TROCKENLÖSCHPULVERN

## 1. EINLEITUNG

Unter den verschiedenen Löschmitteln nimmt das Trockenlöschpulver wegen seiner beinahe universellen Verwendbarkeit eine Sonderstellung ein. Da diese Pulver aufgrund ihres Löschmechanismus Flammen schlagartig auslöschen, wurden sie zunächst bei Bränden von Flüssigkeiten und ausströmenden Gasen eingesetzt. In den letzten Jahren gelang die Entwicklung von Löschpulvern, die sich auch zur Bekämpfung von Feststoffbränden eignen. Diese sogenannten Glutbrandpulver vermögen nicht nur die Flammen rasch zu löschen, sondern unterbinden auch die Luftzufuhr zu dem glühenden Brandstoff, indem sie über diesem eine Schmelze bilden. Neuerdings gibt es auch Spezialpulver, die gegen Brände der Brandklasse D, z.B. Magnesiumbrände, eingesetzt werden.

Die Anwendung von Trockenlöschpulver beschränkt sich nicht nur auf Handfeuerlöscher, In den letzten Jahren wurden Pulverlöschanlagen für den mobilen und stationären Einsatz mit sehr großen Kapazitäten entwickelt.

## 2. PROBLEMSTELLUNG

Um die Verbesserung der herkömmlichen und die Einführung neuer Trockenlöschpulver besser beurteilen zu können, hat man versucht, Prüfmethode zur Beurteilung der Löschwirksamkeit der Pulver zu entwickeln.

Die Prüfung wird entweder durch Laborteste oder durch Versuche im Freien an praxisnahen Brandobjekten vorgenommen.

Bei Versuchen im Freien, auch Feldteste genannt, hat sich gezeigt, daß verschiedene Einflußgrößen wie Windgeschwindigkeit, Brandgröße und Branddauer des Testfeuers nicht vollständig erfaßt werden können. Auch die Beeinflussung des Ausstoßvorganges durch die Ausbringapparatur läßt sich nur in gewissen Grenzen konstant halten. Außerdem fallen bei Großversuchen hohe Kosten an. Weiterhin ist es schwierig, reproduzierbare Werte zu erhalten, da der Geschicklichkeit der Bedienungsperson am Löschgerät große Bedeutung zukommt. Bei Laborversuchen hingegen lassen sich konstante Bedingungen einhalten. Neben der Löschwirksamkeit ist auch der Löschmechanismus der Pulver für deren Weiterentwicklung von großem Interesse. Um Aussagen über diesen Mechanismus machen zu können, müssen die verschiedenen Einflußgrößen, wie z.B. chemische Zusammensetzung, Teilchengröße und -form und Pulverrate, in weiten Grenzen variiert werden. Dies läßt sich nur mit einer Laborapparatur befriedigend lösen.

Da die bisher bekannt gewordenen Laborprüfmethoden hinsichtlich der Genauigkeit und der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse weitgehend den Anforderungen noch nicht genügen, unternahm die Forschungsstelle für Brandschutztechnik in der vorliegenden Arbeit den Versuch, eine neue Prüfapparatur im Labormaßstab zu entwickeln.

### 3. LABORPRÜFMETHODEN ZUR UNTERSUCHUNG DER LÖSCHWIRKSAMKEIT

Die Löschwirksamkeit der Trockenlöschpulver hängt u.a. von der chemischen Zusammensetzung, der Korngröße und der Kornform ab. Zur Ermittlung dieser Kenngrößen, die ein Löschpulver charakterisieren, wurden eine Reihe von Prüfmethoden erarbeitet. Im nachfolgenden sollen einige der bekanntesten Labortestmethoden kurz erläutert werden.

### 3.1. Die SM-Prüfmethode

Die Testapparatur nach Pieters [1] ist in Bild 1 dargestellt. In der Schale 1 werden 10 ml Benzin entzündet. Kurz nach der Zündung des Brennstoffs wird Löschpulver aus der Waschflasche 2, die mit 70 g Pulver gefüllt ist, mit Hilfe eines konstanten Luftstromes von 40 l/min auf die Schale schräg von oben geblasen. Die Luftmenge wird mit dem Durchflußmesser 3 gemessen. Sobald der Testbrand gelöscht ist, wird der Luftstrom durch den Dreiwegehahn 4 unterbrochen. Aus der Gewichtsabnahme der Waschflasche wird die zum Löschen benötigte Pulvermenge bestimmt. Die Versuchsanordnung wird danach wieder in den ursprünglichen Zustand versetzt, die Schale mit Benzin neu gefüllt, an die gleiche Stelle gesetzt und das Benzin entzündet. Die Löschversuche werden solange wiederholt, bis die 70 g Löschpulver in der Waschflasche verbraucht sind.

Die Löschwirksamkeit eines Pulvers ergibt sich damit aus der Anzahl von Löschungen, die mit 70 g Löschpulver möglich sind. Nähere Daten über die Abbrandgeschwindigkeit und Flammengröße des Testbrandes werden in [1] nicht angegeben.

### 3.2. Prüfapparatur nach Friedrich

Bild 2 zeigt die Versuchsanordnung von Friedrich [2]. An einem Stativ ist unter einem Abzug eine von einem Elektromotor 1 angetriebene Drehscheibe 2 mit Abstreifblech 3 befestigt. Unter der Drehscheibe befindet sich ein Drahtsieb 4 (4,3 mm lichte Maschenweite, 1,6 mm Drahtstärke) und darunter der Gasbrenner 5, der mit Wasserstoff, Leuchtgas oder Kohlenmonoxid betrieben wird. Eine abgewogene Löschpulvermenge mit einem mittleren Korndurchmesser von  $44\ \mu\text{m}$  wird mittels der Drehscheibe und dem Abstreifblech auf das Drahtsieb geworfen. Von hier aus fällt das Pulver in Form einer Wolke in die Flamme des Brenners. Um ein Verstopfen der Brenneröffnung zu vermeiden, ist der Brenner waagrecht angebracht. Die Gas-

mengen betragen bei Wasserstoff 1,09 l/min, bei Leuchtgas 1,00 l/min und bei Kohlenmonoxid 0,96 l/min.

Es werden die Minimalmengen ermittelt, die die Testflammen gerade löschen. Sie sind ein Maß für die Löschwirksamkeit der Pulver.

### 3.3. Die Prüfapparatur von Solvay

Das Schema der von Dessart und Malarme [3] entwickelten Apparatur ist in Bild 3 dargestellt.

In dem Pyrexglasrohr 1 wird mit Hilfe des Ventilators 2 ein Luftstrom mit einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit von 2,13 m/s erzeugt. Der Luftdurchsatz wird durch den Hahn 3, den Regler 4 und das U-Rohrmanometer 5 eingestellt und konstant gehalten. Als Brennstoff wird Butan verwendet. Der Brenngasstrom wird mit dem Rotameter 6 und dem Hahn 7 auf 54 l/h einreguliert und kontrolliert. Das Gas wird am Brenner 8 durch die Elektroden 9 gezündet. Das Pulver wird in die Krümmung des Injektors 10 eingefüllt. Der Pulverausstoß erfolgt durch Entspannung von 1,2 l Stickstoff über das Magnetventil 11. Das Treibgas wird in der mit einem Manometer versehenen Stahlbehälter 12 unter einem Druck von 1 kg/cm<sup>2</sup> aufbewahrt.

Jeder Versuch wird siebenmal mit der gleichen Pulvermenge durchgeführt. Es wird die kleinste Pulvermenge bestimmt, mit der 6 Löschungen bei 7 Versuchen durchgeführt werden können. Das Löschvermögen des Pulvers wird als PEC (Pouvoir Extingueur Conventionnel) bezeichnet. Die Größe PEC für die Löschwirksamkeit eines Pulvers wird berechnet aus der Anzahl der mit 10 g Pulver theore-



tisch möglichen Löschungen bei einer bestimmten Flamme.

### 3.4. Die Prüfapparaturen von Lee und Robertson

Bild 4 zeigt ein Schema der Prüfapparatur von Lee und Robertson [4]. Die Pulveraufgabevorrichtung 1 besteht aus einem Zylinder mit einem Gitter aus rostfreiem Stahl. Die Pulvermenge wird durch Veränderung der Amplitude des Vibrators 2 variiert. Der Kupfertiegel 3 mit einem Innendurchmesser von ca. 46 mm dient als Brenner. Er wird mit 1 ml n-Heptan gefüllt, das auf 3 ml Wasser schwimmt. Der Tiegel befindet sich auf dem Schlitten 5, der, angetrieben durch den Motor 6, mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4,8 cm/s unter dem Pulverstrom hinwegbewegt wird. Der gleiche, aber leere Tiegel 4, 50 mm vor dem Brennertiegel angebracht, dient zur Bestimmung der Pulvermenge. Der Pulverstrom wird gleichzeitig mit Hilfe der Lichtquelle 7 und der Photozelle 8 überwacht. Der Brennstoff wird durch die Elektroden 9 gezündet. Nach 35 sec Brenndauer wird der Schlitten unter dem Pulverstrom hindurchgefahren.

Es wird die zur Löschung des Brandes geringste Pulvermenge bestimmt. Mit jeder Pulvereinwaage werden mindestens 20 Versuche durchgeführt. Die Versuchsergebnisse werden statistisch ausgewertet, um Meßwertstreuungen, die durch die Apparatur verursacht werden, auszugleichen.

Für größere Modellbrände wurde die in Bild 5 dargestellte Vorrichtung entwickelt. Als Brenner dient der Tiegel 1 mit einem Durchmesser von 125 mm. Er wird mit 30 ml n-Heptan, das auch hier auf einem Wasserpolster schwimmt,

gefüllt. Das Pulver wird mit Preßluft durch die Düse 2 in die Flammen geblasen. Es wird über den Rüttler 3, der vor dem Motor 4 angetrieben wird, in den Luftstrom befördert. Die Pulvermenge kann durch Veränderung der Motordrehzahl variiert werden. Die Pulverrate wird mit dem Ablenkrohr 5 ermittelt, indem man für 2 oder 3 sec das Pulver durch das Rohr über einen Filter absaugt. Aus dem Gewicht des Pulvers auf dem Filter und der Absaugezeit wird die Pulverrate berechnet. Der Magnet 6 schwenkt das Ablenkrohr in den Pulverstrom. Mit der Lichtquelle 7 in Verbindung mit der Photozelle 8 wird die Pulverrate während des Löschversuches überwacht.

Es wird die zur Löschung benötigte geringste Pulvermenge bestimmt. Die Löschzeit ergibt sich aus der Zeit, die von dem Eintritt des Pulvers in die Flammen bis zur Reduzierung der Strahlungsintensität des Testbrandes auf 20% ihres Anfangswertes verstreicht. Die Abnahme der Strahlungsintensität des Testbrandes wird von dem Infrarot-Detector 9 aufgezeichnet.

### 3.5. Prüfapparatur der Fire Research Station

Die von der Fire Research Station [5, 6] entwickelte Testapparatur ist in Bild 6 dargestellt. Das Pulver gelangt aus dem trichterförmigen Vorratsbehälter 1 in die Förderschnecke 2. Diese befördert das Pulver in das senkrecht nach unten angeordnete Brennerrohr 4. Hier mischt sich das Trockenlöschpulver mit dem Propangas. Die Gasmenge wird am Rotamesser 6 eingestellt und kontrolliert. Die Verbrennungsluft wird über den Rotamesser 7 durch das Rohr 5, das konzentrisch um das Brennerrohr angebracht ist, zugeführt. Die Pulverrate wird durch Drehzahlverstel-

lung des Antriebsmotors 3 variiert.

Die Löschwirksamkeit der Trockenlöschpulver wird nach zwei Methoden ermittelt. Bei der ersten Methode wird die Pulvermenge so lange erhöht, bis die Diffusionsflamme erlischt. Die dazu benötigte geringste Pulvermenge kennzeichnet die Wirksamkeit des betreffenden Pulvers. Bei der zweiten Methode wird die Strahlungsintensität der Flamme in Abhängigkeit von der Pulverzugaberate gemessen. In einem Diagramm wird das Verhältnis der Strahlungsintensität der Flamme mit Pulver zu der Strahlungsintensität der Flamme ohne Pulver über der Pulvermenge aufgetragen. Die ermittelte Kurve, die bei dekadischer Auftragung eine Gerade ergibt, wird auf den Wert Null extrapoliert, so daß damit die für die Löschung geringste Pulvermenge bestimmt werden kann.

### 3.6. Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G.

Die Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G. wurde bereits in einem früheren Forschungsbericht der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ausführlich beschrieben [7]. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde die Apparatur geringfügig geändert. Ihr Aufbau wird deshalb nochmals kurz anhand von Bild 7 erläutert. Das Gas, Propan, strömt durch das Nadelventil 1 über den Rotamesser 2 in den Brenner 4. Der Brenner wird mit Hilfe des Kühlmantels 3 auf einer konstanten Temperatur von 40°C gehalten. Das Treibgas, Preßluft, gelangt durch das Magnetventil 5 in den Treibgasbehälter 6. Der Druck im Behälter wird auf 1 atü eingeregelt und durch das Manometer 7 überwacht. Die Löschpistole 10 ist aus Pyrexglas gefertigt. In der Krümmung ist ein Kapillar-

rohr 9 von 3 mm l.W. eingeschmolzen. Der Ausstoß des Löschpulvers aus der Löschpistole wird durch Öffnen des Magnetventiles 8 eingeleitet. Brenner und Löschpistole liegen in einem gleichmäßigen Luftstrom, der durch den Ventilator 11 erzeugt wird.

Die oben beschriebene Prüfapparatur unterscheidet sich also von der bei den früheren Versuchen eingesetzten Prüfapparatur durch folgende Änderungen:

Das in der Original-Apparatur enthaltene U-Rohr-Manometer zur Bestimmung des Gasdurchflusses wurde durch den Rotamesser 2 ersetzt, um die Gasmenge bestimmen zu können. Der Kugelbahn mit Sperrklinke und Zugfeder wurde gegen das Magnetventil 8 ausgetauscht, das ein schlagartiges Auslösen des Pulverausstoßvorganges ermöglicht. Zwischen Preßluftflasche und Treibgasbehälter wurde das Magnetventil 5 eingebaut, um zu verhindern, daß aus der Preßluftflasche Treibgas nach dem Öffnen des Ventiles 8 nachströmt. Die beiden Magnetventile sind über ein Schaltrelais, ein Quecksilbermanometer und einen Fußschalter derart miteinander verbunden, daß beim Auslösen des Ausstoßvorganges durch Betätigung des Fußschalters das Magnetventil 5 geschlossen bleibt, so daß nur die Luftmenge in dem Treibgasbehälter von 1 l für den Ausstoßvorgang freigesetzt wird. Nach dem Ausstoßen des Pulvers schließt sich das Magnetventil 8, während sich das Ventil 5 öffnet und, nachdem der Druck im Treibgasbehälter auf 1 atü angestiegen ist, sich wieder schließt. Durch diese Schaltung ist gewährleistet, daß bei jedem Versuch nur die im Treibgasbehälter befindliche Luftmenge für den Ausstoßvorgang benutzt wird.

### 3.7. Vergleich der verschiedenen Laborprüfmethoden

Vergleicht man die beschriebenen Prüfapparaturen miteinander, so ergibt sich für alle außer der in Abschnitt 3.5 erläuterten ein gemeinsames Merkmal: Es wird versucht, den Anwendungsfall in der Praxis in kleinerem Maßstab nachzubilden, d.h. das Löschpulver wird durch eine Vorrichtung von außen in die Flamme gebracht. Dies hat den Nachteil, daß die zur Löschung benötigte Pulvermenge nicht bestimmt werden kann, da nur ein Teil der aufgeführten Löschpulvermenge in die Flamme gelangt, während sich der Rest regellos in der Umgebung verteilt, ohne am Löschvorgang teilzunehmen. Welcher Anteil des Löschpulvers die Löschung bewirkt, läßt sich also nicht exakt messen. Eine weitere Fehlerquelle stellen die verwendeten Ausbringvorrichtungen dar. Sie sind wenig geeignet, die sich in der Praxis ergebenden Verhältnisse im kleinen Maßstab zu reproduzieren. Die Ausstoßbedingungen können nicht konstant gehalten werden, so daß die Meßergebnisse streuen. Es müssen daher viele Versuche durchgeführt werden, um die Ergebnisse statistisch auswerten und so die zufälligen Fehler ausgleichen zu können.

4.    UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN EINFLUSS VON BRENNSTOFFSTROM,  
TREIBGASDRUCK UND AUSSTOSSVORGANG AUF DIE WIRKUNG VON  
TROCKENLÖSCHPULVERN BEI DER PRÜFAPPARATUR DER DYNAMIT  
NOBEL A.G.

Bei den früheren Versuchen der Forschungsstelle für Brand-  
schutztechnik mit der Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G.  
wurde festgestellt, daß die ermittelten Versuchswerte für  
die Löschwirksamkeit der Löschpulver zum Teil erheblich  
streuen. Neben der Art der Pulvereinfüllung in die Lösch-  
pistole schien auch der Ausstoßvorgang die Meßergebnisse  
zu beeinflussen. Daher wurde der Einfluß von Brennstoff-  
strom, Treibgasdruck und Ausstoßvorgang näher untersucht.  
Die im Abschnitt 3.6 aufgeführten Änderungen an der Prüf-  
apparatur wurden vorgenommen, um den Brennstoffstrom in  
größeren Grenzen verändern und die Treibgasmenge während  
des Ausstoßes konstant halten zu können.

4.1. Versuchsdurchführung

Die zu prüfende Löschpulvermenge wurde auf einer Fein-  
waage abgewogen und ohne Schütteln oder Klopfen in die  
Löschpistole eingegeben. Entsprechend der gewählten  
Versuchsbedingungen wurde der Brennstoffstrom am Rota-  
messer eingestellt und der Treibgasbehälter mit Preßluft  
bis zum vorgesehenen Druck gefüllt. Der Brenner wurde  
mit Wasser gekühlt, um eine konstante Brennerrandtempe-  
ratur von ca. 40°C einzuhalten. Die Temperatur wurde  
mit einem Thermofühler überwacht. Die Flamme wurde ge-  
zündet und nach 30 sec Brenndauer der Ausstoßvorgang  
durch Öffnen des Magnetventils ausgelöst. Für einen Meß-

punkt wurden 20 gleiche Einwaagen hergestellt und die mit ihnen bewirkte Anzahl der Löschungen festgehalten. Die auf 20 Versuche bezogene Zahl der Löschungen wurde in Prozent als Löscherfolg ausgedrückt.

Bei konstantem Treibgasdruck von 1 atü wurden folgende Brennstoffströme eingestellt: 8,0 Nl/h, 15,5 Nl/h, 20,0 Nl/h, 23,0 Nl/h, 30,0 Nl/h und 38,0 Nl/h.

Bei konstantem Gasdurchsatz von 23,0 Nl/h wurden die Versuche bei folgenden Treibgasdrücken durchgeführt: 0,8 atü, 1,0 atü, 1,2 atü und 1,5 atü.

Der Ausstoßvorgang, die Geschwindigkeit und die Ausbreitung der Pulverwolke wurden mit einer 16 mm Filmkamera bei 64 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Die Kamera wurde in 8 m Entfernung von der Prüfapparatur aufgestellt. Wie aus Bild 8 zu ersehen ist, wurde an der Rückwand der Prüfapparatur auf schwarzem Papier eine Skala in 10 cm-Teilung angebracht und zur Bestimmung des Ausbreitungswinkels und der Kontur der Pulverwolke Strahlen in 5° Teilung vorgesehen. Die Versuche wurden bei den zwei Treibgasdrücken von 1,0 und 1,5 atü für die verschiedenen Pulvermengen von 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 und 1,6 g durchgeführt, wobei bei einer konstanten Pulvermenge mehrere Ausstoßvorgänge gefilmt wurden.

## 4.2. Versuchsergebnisse und Versuchsauswertung

### 4.2.1. Einfluß des Brennstoffstroms auf die Löschwirksamkeit

In Bild 9 ist der Löscherfolg eines handelsüblichen Löschpulvers ( $\text{KHCO}_3$  als Hauptbestandteil) in Abhängigkeit von der Pulvermenge für verschiedene Brennstoffströme aufgezeichnet. Alle Versuche wurden bei einem konstanten Treibgasdruck von 1 atü durchgeführt. Bild 9 zeigt, daß der Einfluß des Brennstoffstroms bis 30 NI/h gering ist und sich alle Meßergebnisse um eine Gerade gruppieren.

Die Werte für den Brennstoffstrom von 38 NI/h weichen von dieser Geraden ab. Da die zur Löschung benötigten Pulvermengen vom Flammenvolumen abhängig sind, hätte man vermutet, daß mit höherem Brennstoffdurchsatz größere Pulvermengen zum Löschen der Testflammen benötigt würden. Diese Vermutung wurde aber nur bei dem Brennstoffstrom von 38NI/h bestätigt. Der abweichende Verlauf für die kleineren Brennstoffströme liegt in der Arbeitsweise der Testapparatur begründet. Die eingewogene Pulvermenge wird mit einem konstanten Luftvolumen bei einem bestimmten Druck senkrecht in Richtung der Testflamme geschossen und umhüllt die Flamme. Nur ein Teil der Gesamtmenge wird zum Löschen der Flamme benötigt. Über die Größe der tatsächlich den Löschvorgang bewirkenden Pulvermenge können mit dieser Apparatur keine Aussagen gemacht werden. Die obigen Versuchsergebnisse zeigen, daß die je Versuch ausgestoßene Pulvermenge so groß ist, daß auch größere Testflammen gelöscht werden können. Erst bei einem Brennstoffstrom von mehr als 30 NI/h wird die Flamme so groß, daß die gesamt eingewogene Pulvermenge ein Löschen der



Flamme bewirkt, d.h. erst bei großen Brennstoffströmen ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Gasmenge und eingefüllter Löschpulvermenge zu finden.

#### 4.2.2. Einfluß des Treibgasdruckes auf die Löschwirksamkeit

Die Abhängigkeit der Löschwirksamkeit vom Treibgasdruck bei der Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G. ist in Bild 10 und 11 dargestellt. In Bild 10 ist der Löscherfolg eines handelsüblichen Löschpulvers auf  $\text{KHCO}_3$ -Basis in Abhängigkeit von der Pulvereinwaage mit dem Treibgasdruck als Parameter aufgezeichnet. Die Darstellung zeigt eine eindeutige Abhängigkeit zwischen Treibgasdruck und Löscherfolg. Mit steigendem Treibgasdruck verschieben sich die Geraden zu kleineren Pulvermengen, d.h., der Löscherfolg ist proportional dem Treibgasdruck. Der Treibgasdruck ist bestimmend für die Geschwindigkeit, mit der das Pulver aus der Löschpistole ausgestoßen wird. Je größer der Druck um so größer ist die Ausstoßgeschwindigkeit, da die Pulverteilchen stärker beschleunigt werden. Bei gleicher Pulvermenge und gleicher Korngrößenverteilung vergrößert sich bei Erhöhung des Treibgasdruckes die Reichweite der Pulverwolke, so daß eine größere Anzahl von Pulverteilchen mit höherer Geschwindigkeit die Flamme erreicht und daher aufgrund der höheren kinetischen Energie rascher in die Flamme eindringen kann.

Für die Prüfung der Löschwirksamkeit der Löschpulver muß daher der Treibgasdruck bei dieser Apparatur möglichst konstant gehalten werden, damit die ermittelten Werte für verschiedene Pulver miteinander verglichen werden können.

In Bild 11 wurde die Pulvermenge über dem Treibgasdruck mit dem Löscherfolg als Parameter aufgetragen. Die Kurven sind von hyperbolischem Typ mit den Koordinatenachsen als Asymptoten. Aus den gemessenen Werten läßt sich empirisch folgende Gleichung für den Zusammenhang zwischen der Löschpulvermenge W und dem Treibgasdruck p ableiten:

$$W = K \cdot p^{-m} \quad (1)$$

Darin sind K und m Konstanten, die von der Löschpulverart und der Apparatur abhängig sind.

Daraus folgt, daß bei abnehmenden Treibgasdrücken die Kurve stärker ansteigt, d.h. die benötigten Pulvermengen rascher zunehmen, während bei größer werdenden Treibgasdrücken die zur Löschung benötigte Menge langsamer abnimmt.

#### 4.2.3. Einfluß des Ausstoßvorganges auf die Löschwirksamkeit

Wie schon bei der Untersuchung des Einflusses des Treibgasdruckes auf die Löschwirksamkeit festgestellt wurde, kommt dem Ausstoßvorgang der Pulverwolke bei der Ermittlung der Löschwirksamkeit eine große Bedeutung zu. Bestimmende Größen sind Ausstoß- bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung. Wiederholt wurde bei den Versuchen festgestellt, daß stark streuende Werte auftreten. Als Ursache kommen zwei Möglichkeiten in Betracht:

1. Schräge, von der Achse Brenner-Löschpistole abweichende Ausbreitungsrichtung

und

2. Unterschiedliche Ausstoß- und Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Pulverwolke.

Die Bildfolge 12 zeigt den Ausstoßvorgang und die Ausbreitung der Pulverwolke. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit wurde die von der Pulverwolke zurückgelegte Entfernung in Abhängigkeit von der Zeit in einem Diagramm aufgetragen (Bild 13) und aus der Steigung der Kurve die Geschwindigkeit berechnet. Da bei den Aufnahmen ein Maßstab mitfotografiert wurde, konnte die zurückgelegte Strecke direkt abgelesen werden. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Bildern betrug 0,016 s. Für die Lössung sind die Ausstoßgeschwindigkeit  $v_0$  und die Geschwindigkeit der Pulverwolke am Brennerend  $v_B$  von Bedeutung. Daher wurden nur diese Geschwindigkeiten aus den Diagrammen mit Hilfe der Beziehungen  $v_0 = l_0/t_0$  und  $v_B = l_B/t_B$  ermittelt. Neben den Absolutwerten der Geschwindigkeit interessiert noch die Streuung der Werte bei gleichen Versuchsbedingungen. Daher wurde eine statistische Auswertung der Meßergebnisse nach [8] vorgenommen. Folgender Rechengang wurde zur Erstellung der Tabelle 1 angewendet:

1. Ermittlung des arithmetischen Mittelwertes:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

2. Berechnung der mittleren quadratischen Abweichung bzw. der Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

3. Bestimmung der relativen Standardabweichung bzw. des Variationskoeffizienten

$$s_r = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Der Variationskoeffizient  $s_r$  gibt die Streuung der Meßwerte vom arithmetischen Mittelwert an und gestattet so eine Aussage über die Genauigkeit des Prüfverfahrens.

Die Auswertung (Tab.1) ergab für den Variationskoeffizienten Werte zwischen 4 % und 90 %. Hiermit kommt zum Ausdruck, daß die Ausstoßvorgänge stark unterschiedlich verlaufen. Die größte Streuung wurde bei der Geschwindigkeit am Brennerrand  $v_B$  festgestellt. Die durchschnittliche Streuung liegt hier bei ca. 45 % gegenüber rd. 20 % bei der Ausstoßgeschwindigkeit  $v_0$ . Die Ursache ist in der Form und der Dichte der Pulverwolke zu suchen. Der Ausbreitungswinkel der Wolke betrug bei fast allen Versuchen ca.  $30^\circ$ . Die Dichte der Wolke bzw. die Verteilung der Pulverteilchen in der Wolke scheint nach Auswertung des Filmmaterials recht unterschiedlich zu sein. Die Pulverwolke war in den wenigsten Fällen ein homogenes Gebilde. Im allgemeinen wiesen die Wolken unterschiedliche Dichten auf, so daß sich ständig ändernde Bedingungen in bezug auf den Strömungswiderstand und den Impulsstrom ergaben; denn je dichter die Wolke ist, um so geringer ist der Widerstand und um so größer ist die Geschwindigkeit der Pulverwolke am Brennerrand. Da die kinetische Energie der Teilchen maßgebend ist für ihre Fähigkeit, in die Flamme einzudringen, ergeben sich bei stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Pulverwolke abweichende Löschbedingungen, die sich in streuenden Meßergebnissen äußern. Die unterschiedliche Verteilung der Pulverteilchen in der Wolke läßt sich auf die Art der Ausstoßvorrichtung, d.h. auf die Löschpistole und das Einfüllen des Pulvers in die Löschpistole zurückführen. Beim Einfüllen der Pulvermenge kann durch Klopfen oder Rütteln an der

Pistole eine höhere Stopfdichte verursacht werden. In diesem Fall vermischt sich beim Ausstoßvorgang das Pulver schlechter mit dem Treibgas, so daß es zu örtlichen Verdünnungen in der Wolke kommen kann. Außerdem ist der Zeitraum, der dem Pulver zur Verfügung steht, sich mit der Luft zu vermischen, zu kurz, da die Länge des Mischrohres der Löschpistole, das Glasrohr nach der Kapillare, zu kurz ist. Wie aus den Filmaufnahmen (Bildfolge 14) zu entnehmen ist, muß die Mischung der Teilchen mit Luft und der Beschleunigungsvorgang innerhalb von 0,016 sec erfolgen.

Wie schon im vorhergehenden Abschnitt ausgeführt, wächst die Ausstoß- und Ausbreitungsgeschwindigkeit mit steigendem Treibgasdruck. Auch größere Pulvermengen erreichen aufgrund der höheren spezifischen Dichte der Pulverwolke und des geringen Strömungswiderstandes eine größere Geschwindigkeit. Trotz der erheblichen Streuung ist diese Tendenz anhand der in Tabelle 1 aufgeführten Ergebnisse erkennbar.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß für einen Meßpunkt mindestens 10 Einzelmessungen bei gleichen Versuchsbedingungen notwendig sind, um die Streuung der Ergebnisse, die durch die Apparatur und die Bedienung verursacht werden, auszugleichen. Dies erfordert einen großen Arbeitsaufwand. Die zur Löschung tatsächlich benötigte Löschpulvermenge kann nicht bestimmt werden. Auch eine quantitative Abschätzung, welcher Anteil des Pulvers in die Testflamme gelangt, ist nicht möglich. Aus den Meßergebnissen können daher auch keine Rückschlüsse auf den Mechanismus des Löschvorganges gemacht werden.

Die Forschungsstelle unternahm daher den Versuch, eine neue Prüfapparatur zu entwickeln, bei der die Prüfung der Löschwirksamkeit weniger von der Unzulänglichkeit der Testapparatur beeinflusst wird, die Prüfbedingungen exakt eingehalten werden können und vor allem die zur Löschung einer Prüfflamme tatsächlich benötigte Pulvermenge pro Zeiteinheit ermittelt werden kann.

## 5. DIE PRÜFAPPARATUR DER FORSCHUNGSSTELLE FÜR BRANDSCHUTZTECHNIK

Folgende Bedingungen wurden an die neue Apparatur gestellt:

1. Reproduzierbare Prüf Flamme
2. Konstante Versuchsbedingungen
3. Kontinuierliche Löschpulverzugabe
4. Messung der pro Zeiteinheit zugegebene Pulvermenge.

Um diese Bedingungen zu erfüllen, wurde auf ein bekanntes Meßverfahren zurückgegriffen und dieses so weiter entwickelt, daß es Aussagen über den Löschvorgang ermöglicht.

### 5.1. Theoretische Grundlagen des Meßverfahrens

Das der Prüfapparatur zugrundeliegende Meßverfahren geht von der Tatsache aus, daß die Flammengeschwindigkeit für den Verbrennungsablauf in einer Flamme die bestimmende Größe ist. Wird einer Flamme Löschpulver beigegeben, so verlangsamt sich die Flammengeschwindigkeit gemäß der Wirksamkeit und der Menge des zugefügten Pulvers. Es besteht somit ein direkter Zusammenhang zwischen der Flammengeschwindigkeit und dem Löschmechanismus der Pulver. Eine Messung der Flammengeschwindigkeit ermöglicht daher nicht nur die Bestimmung der Löschwirksamkeit der Pulver, sondern gibt auch Rückschlüsse auf den Löschmechanismus. Als Flammengeschwindigkeit wird diejenige Geschwindigkeit definiert, mit der sich eine Flammenfront relativ zu einem brennbaren Gas-Luft-

Gemisch bewegt. So befindet sie sich z.B. im Fall einer stationären Verbrennungsfront mit der Geschwindigkeit des ausströmenden Gas-Luft-Gemisches im Gleichgewicht. Für diesen stationären Fall bei konstantem Massenfluß ist die Flammengeschwindigkeit definiert als das in der Zeiteinheit durch die Flammenfront durchgesetzte Volumen des Gas-Luft-Gemisches. Da nur eine laminare Strömung eine stetige Flammenfront liefert, wurde eine laminare Vormischflamme als Prüfflamme verwendet.

Die Messung der Flammengeschwindigkeit nach der Brennermethode beruht auf der Vermessung der Brennfläche und des Gasdurchsatzes. Unter der Brennfläche wird die Fläche des Primärverbrennungskegels verstanden. Die Größe des Kegels hängt von den Mischungs- und Strömungsverhältnissen der Vormischflamme ab. Bei der hydrodynamischen Betrachtung des Verbrennungsvorganges kann die Flammengeschwindigkeit nach Gouy [9] über eine Kontinuitätsbeziehung abgeleitet werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß das aus dem Brenner austretende Gas-Luft-Gemisch durch die Brennfläche des Primärverbrennungskegels durchgesetzt wird und in der Reaktionszone mit der Flammengeschwindigkeit verbrennt (Bild 15):

$$\rho_0 \cdot \bar{u} \cdot F_D = \rho_F \cdot \Lambda \cdot F_F \quad (5)$$

Es bedeuten:

$\rho_0, \rho_F$	Dichte des Gas-Luft-Gemisches bzw. der Verbrennungsgase
$\bar{u}$	mittlere Geschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches
$\Lambda$	Flammengeschwindigkeit
$F_D$	Austrittsquerschnitt am Brenner
$F_F$	Brennfläche des Primärverbrennungskegels



Wendet man diese Beziehung auf die Vorwärmzone an, so können  $\rho_0$  und  $\rho_F$  gleichgesetzt werden und es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der Flammgeschwindigkeit und der Ausströmgeschwindigkeit:

$$\Lambda = \bar{u} \cdot \frac{F_D}{F_F} \quad (6)$$

Die Flammenfront wird hierbei als Unstetigkeitsfläche der Dicke Null angesehen, welche die mit dem Gas-Luft-Gemisch und die mit den Verbrennungsprodukten angefüllten Räume voneinander trennt. Die der Kontinuitätsbeziehung zugrundeliegende Brennfläche stellt eine idealisierte Form dar, die in der Praxis nicht zu verwirklichen ist. Es ergeben sich folgende Abweichungen:

1. Die Brennzone hat eine endliche Dicke.
2. Da Gasgeschwindigkeit und Flammgeschwindigkeit nicht konstant über die Bezugsfläche sind, ist die Flammenfläche am Flammenfuß gekrümmt und die Kegelspitze abgerundet.
3. Bei Rohrbrennern sind die Kegelflanken aufgrund der parabolischen Geschwindigkeitsverteilung geschweift.

Diese Eigenschaften der realen Flamme gehen als grundsätzliche Mängel der Brennermethode in die Berechnung der Flammgeschwindigkeit aus Brennfläche und Strömungsgeschwindigkeit ein. Alle Fehler, die der Flächenmessung anhaften, lassen sich durch folgende Überlegungen vermeiden. Wie Bild 15 zeigt, kann der Geschwindigkeitsvektor des Gas-Luft-Gemisches in der Brennzone in zwei Komponenten

zerlegt werden, in die eine Komponente, die parallel zur Flammenfront verläuft und in die andere, die senkrecht dazu steht. Laut Definition hält die senkrechte Komponente der Strömungsgeschwindigkeit der Flammengeschwindigkeit das Gleichgewicht. Die Flammengeschwindigkeit kann daher aus dem Neigungswinkel der Flammenfläche und der Strömungsgeschwindigkeit an dieser Stelle berechnet werden. Die Beziehung für die Flammengeschwindigkeit lautet also:

$$\Lambda = u_0 \cdot \sin \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (7)$$

Die Genauigkeit dieser Meßmethode hängt neben der Geschwindigkeitsmessung von den Möglichkeiten einer eindeutigen und exakten Bestimmung des Flankenneigungswinkels ab. Dazu wird ein größeres Geradenstück in der Flammenkontur benötigt. Dies läßt sich durch eine entsprechende Düsenform und eine genügend hohe Gasgeschwindigkeit erreichen. Als geeignet erwies sich eine Düsenform, deren Hauptteil aus einer "Wirbelfadendüse" [10] mit kugeligem Anschluß an die Einlaufrohrstrecke besteht (Bild 16).

Die Festlegung des Geradenstückes in der Leuchtzone der Flamme bereitet große Schwierigkeiten, da die Grenzen des Leuchtkegels sehr unscharf sind und das Intensitätsmaximum sehr schwer ohne optische Hilfsmittel zu erkennen ist. Diese Schwierigkeit kann umgangen werden, wenn zur Darstellung der Flammenfront die Brennfläche als Schlierenzone abgebildet wird. Die den Schliereneffekt hervorrufende Inhomogenität besteht dabei in der Änderung des Brechungsindex, den ein Gasvolumen auf seinem Weg durch die Brennzone

vom Frischgas in den Abgaszustand erfährt. Die Ausmessung des Winkels am Schlierenbild in Verbindung mit einem Düsenbrenner wird als Düsenbrenner-Schlierenbild-Kegelwinkel-Verfahren bezeichnet. Es wurde im wesentlichen von R.Lindow ausgearbeitet [11]. Aus der Vielzahl an bekannten schlierenoptischen Systemen [12] wurde bei dieser Meßmethode die Anordnung nach Töpler angewendet. Dieses Schlierenverfahren ermöglicht durch exakte optische Zuordnung von Gegenstands- und Bildpunkten, die Flammenfront und der Brennermund über einen wählbaren Bereich vergrößert oder verkleinert sichtbar zu machen. Die Anordnung des Töpler'schen Verfahrens ist in Bild 17 dargestellt. Mit Hilfe des Kondensors 2 wird das Strahlenbündel der Lichtquelle 1 fokussiert und durch die Schlierenblende 3 im Brennpunkt einseitig scharf abgeblendet. Der verbleibende Rest wird zwischen den zwei Achromaten 4, den sogenannten Schlierenköpfen, parallel gerichtet. In diesen parallelen Strahlengang ist die zu untersuchende Schlierenzone 5, in diesem Falle die Flamme, so angeordnet, daß die Punkte ihrer Gegenstandsebene, d.h. bei kreisförmigem Brennerquerschnitt die Querschnittsebene in der Flammenachse, durch die Linse 6 scharf auf der als Bildebene dienenden Filmoberfläche in der Kamera 7 abgebildet werden. Im Brennpunkt des das parallele Licht wieder fokussierenden zweiten Achromaten wird nun eine zweite Abblendkante der ersten soweit entgegengeschoben, bis das restliche Licht auch ausgeblendet ist. Dadurch können Lichtstrahlen die zweite Schlierenblendenkante nur passieren, wenn sie beim Durchlaufen der Schlierenzone infolge der mit der Verbrennung verbundenen Änderung des Brechungsindex der Gase aus ihrer achsenparallelen Richtung abgelenkt werden. Der Auf-

treffort der Lichtstrahlen auf der Filmoberfläche entspricht genau der Stelle ihrer Ablenkung, so daß die Strahlen das Schlierenbild der Verbrennungszone erzeugen. Die zur Flammengeschwindigkeitsberechnung erforderliche Winkelmessung läßt sich an diesem Schlierenbild mit guter Genauigkeit vornehmen, da sowohl die Oberkante des Brennermundes wie auch die Hell-Dunkel-Grenze der Flammenfront scharf abgebildet werden (Bild 18). Bild 19 zeigt im Vergleich dazu das Bild des Leuchtkegels mit der "verwaschenen" Hell-Dunkel-Zone.

## 5.2. Aufbau der Prüfapparatur

Die Prüfapparatur setzt sich aus drei Teilen zusammen:

1. Vorrichtung zur kontinuierlichen Zugabe des Löschpulvers mit der Prüfflamme
2. Anlage zur Messung der Gas- und Luftmenge
3. Schlierenoptische Anordnung zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit.

Die einzelnen Versuchsaufbauten werden im folgenden näher beschrieben.

### 5.2.1. Pulverzugabevorrichtung und Prüfflamme

In Bild 20 ist die Pulverzugabevorrichtung und die Brennerdüse mit Einlaufrohr dargestellt. Die Vorrichtung zur kontinuierlichen Zugabe des Löschpulvers besteht im wesentlichen aus der Schüttelrinne 1 mit Vorratsbehälter 2. Die Rinne wird durch einen Magneten 3 in Schwingungen ver-

setzt. Die Verstellung der Pulverzugabemenge wird einerseits durch Veränderung der Schwingungsamplitude verwirklicht, die über die am Magneten anliegende Wechselspannung gesteuert werden kann; andererseits läßt sich die aus dem Vorratsbehälter strömende Pulvermenge durch Vergrößern bzw. Verkleinern der Ausströmöffnung in weiten Grenzen variieren. Das Löschpulver gelangt über die Schüttelrinne direkt in den unteren Teil des Einlaufrohres 4, das von dem Gas-Luft-Gemisch durchströmt wird. Der vorgemischte Brennstoff-Luft-Strom wird über die Bodenplatte 5 und durch den Strömungsverteiler 6 zugeführt. Die Sintermetalleinlage 7 verteilt das Gemisch über den Querschnitt des Rohres und erfüllt gleichzeitig die Funktion einer Rückschlagsicherung. Das Brennstoff-Luft-Gemisch wird an der wassergekühlten Brennerdüse 8 entzündet. Die Abmessungen der Düse können dem Bild 16 entnommen werden.

Die Schüttelrinne mit Vorratsbehälter und Antriebsmagnet ist durch den schwingungssteifen Kasten 9 gasdicht und schwingungsfrei mit dem Einlaufrohr verbunden. Die Vorrichtung ist auf einem Koordinatengerät befestigt, so daß die Flamme im Strahlengang der schlierenoptischen Anordnung genau ausgerichtet werden kann (Bild 21).

#### 5.2.2. Anlage zur Messung des Gas- und Luftstromes

Das Brenngas und die Verbrennungsluft werden Stahlflaschen entnommen und über Druckminderventile und Feindruckregler einer aus Schwebekörper-Durchflußmessern aufgebauten Anlage zur Mengenmessung zugeleitet, die in Bild 22 schematisch dargestellt ist. Die Volumenströme von Brenngas und Luft werden in dem entsprechenden Meßrohr 1 bestimmt. Vor und hinter den Durchflußmessern sind Regelventile angebracht, mit denen innerhalb der Meßstrecke der der Eichung zugrundeliegende

Normalzustand von 810 mm Hg und 25<sup>0</sup>C aufrecht erhalten werden kann. Der Eichdruck wird sowohl für das Brenngas als auch für die Verbrennungsluft mit Hilfe der Regelventile eingestellt und über die mit der Meßstrecke verbundenen, wassergefüllten U-Rohr-Manometer 3 als die Druckhöhe gemessen, die der durch regelmäßige Ablesung eines Präzisionsbarometers zu ermittelnde Druckdifferenz gegenüber dem wechselnden atmosphärischen Luftdruck entspricht. Da die Gase wegen ihrer geringen Wärmekapazität auf dem Weg durch das Leitungssystem schnell die Raumtemperatur annehmen, wird diese möglichst auf Eichtemperatur gehalten. Die Temperatur der Gase wird mit den Quecksilberthermometern 4 überwacht. Bild 23 zeigt die gesamte Anlage zur Messung des Brenngases und der Verbrennungsluft. Die Konzentration des Brenngases im Gemisch mit der Luft wird aus dem Volumenstromverhältnis der getrennt gemessenen Gasströme bei konstantem Gesamtvolumenstrom bestimmt. Gleichzeitig wird eine physikalische Gasanalyse vorgenommen, um eine wirksame Kontrolle über Meßfehler und Leckverluste zu haben. Hierzu wird unmittelbar vor der Zündung der Flamme ein Teilstrom des Brenngas-Luft-Gemisches im Brenner abgesaugt und in einem Ultra-Rot-Absorptions-Spektrometer analysiert.

### 5.2.3. Schlierenoptische Anordnung zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit

Der schematische Aufbau und die Wirkungsweise der schlierenoptischen Anordnung wurde bereits bei den theoretischen Grundlagen beschrieben (Bild 17). Als Lichtquelle

dient eine 200 W starke Quecksilberdampf-Höchstdrucklampe. Die Schlierenköpfe bilden zwei Fraunhofer-Achromate mit 100 mm Durchmesser und 1 m Brennweite. Der Strahlengang der Lichtquelle wird von einem Kondensator mit 50 mm Brennweite fokussiert und die Schlierenzone des Verbrennungskegels mit Hilfe eines Abbildungsachromaten auf die Filmebene der ohne Objektiv eingesetzten Kamera abgebildet. Wie Bild 24 zeigt, sind die optischen Aufbauten, die Lichtquelle mit Gehäuse und die Kamera auf Dreikantschienen angeordnet, die mittels eines Kathetometers ausgerichtet werden.

### 5.3. Versuchsdurchführung

Das zu prüfende Löschpulver wurde in den Vorratsbehälter der Schüttelrinne eingefüllt und der Kasten mit der Aufgabevorrichtung gasdicht verschlossen. Mittels der Durchflußmesser wurden der Brenngas- und der Luftstrom auf die gewünschten Konzentrationen eingeregelt. Als Brennstoff wurde technisch reines Methan verwendet und die Verbrennungsluft Preßluftflaschen entommen. Der vorgemischte Methan-Luft-Strom wurde sodann an der Brenndüse entzündet. Der Brennerrand wurde mit Wasser gekühlt, um eine konstante Temperatur von 40°C einzuhalten. Ein Eisen-Konstantan-Thermoelement diente zur Überwachung der Kühlwassertemperatur. Das Schlierenbild des Verbrennungskegels ohne Löschpulverzugabe wurde fotografiert. Dann wurde über die Schüttelrinne dem Brenngas-Luft-Gemisch kontinuierlich eine konstante Löschpulvermenge zugegeben. Nach einer Anlaufzeit von drei Minuten stellte sich ein stationärer Zustand ein, so daß das unter der Einwirkung des Löschpulvers entstandene Schlierenbild registriert werden konnte. Danach wurde

die Flamme gelöscht und ein Filter auf die Brennerdüse gesetzt, um die Löschpulvermenge, die die Düse durchströmt, aufzufangen. Als günstigste Meßzeit hat sich 1 min ergeben. Das Filter wurde vor und nach dem Aufsetzen auf den Brenner auf einer Analysenwaage auf 0,1 mg genau ausgewogen. Die Masse des aufgefangenen Pulvers dividiert durch die Meßzeit ergibt die eingesetzte Löschpulverrate. Anschließend wurde mittels eines Stelltransformators die Amplitude der Schüttelrinne auf einen neuen Wert eingestellt und nach der notwendigen Anlaufzeit bis zum Gleichgewichtszustand das neue Schlierenbild fotografiert sowie die Pulverrate mit Hilfe des Filters bestimmt. Da die Quecksilberdampf-Höchstdrucklampe eine große Helligkeit besitzt, konnte wegen der besseren Kontrastwiedergabe für die Registrierung der Schlierenbilder ein Agfa-Agepe-FF-Film, der eine Empfindlichkeit von 15 DIN hat, eingesetzt werden. Die Belichtungszeit betrug 1/250 sec.

#### 5.4. Versuchsergebnisse und Versuchsauswertung

Die Anwendbarkeit der Apparatur wurde anhand von Versuchen mit zwei handelsüblichen Löschpulvern überprüft. Es handelte sich dabei um BCE-Pulver, die im weiteren mit den Buchstaben A und B bezeichnet werden. Das Pulver A bestand im wesentlichen aus Natriumhydrogencarbonat, das Pulver B aus Kaliumhydrogencarbonat. Alle Versuche wurden mit Methan als Brenngas und konstantem Mengenstrom durchgeführt. Druck und Temperatur in der Anlage wurden nicht geändert. Die Brenngaskonzentration betrug 9,5 % Methan. Dies entspricht der stöchiometrischen



Brenngaskonzentration bei der Verbrennung mit Luft. Da jedoch die maximale Flammgeschwindigkeit eines Methan-Luft-Gemisches bei 10,0 % Methan gemessen wurde, wurde auch mit dieser Brenngaskonzentration Versuche durchgeführt.

Um den Einfluß der Teilchengröße auf die Löschwirksamkeit der Pulver zu eliminieren, wurden die Löschpulver gesichtet. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurde die Fraktion 32-40 µm eingesetzt.

Da bei den Versuchen der Mengestrom sowie Druck und Temperatur im Brenner konstant gehalten wurden, ergibt sich für das Verhältnis der Flammgeschwindigkeit mit Löschpulver  $\Lambda_P$  und der ohne Pulver  $\Lambda_0$  gemäß Gleichung (6) bzw. Gleichung (7):

$$\frac{\Lambda_P}{\Lambda_0} = \frac{F_{F,0}}{F_{F,P}} \quad (8)$$

bzw.

$$\frac{\Lambda_P}{\Lambda_0} = \frac{\sin(\frac{\alpha}{2})_P}{\sin(\frac{\alpha}{2})_0} \quad (9)$$

Hierin ist:

- $F_{F,0}$  Brennofläche ohne Löschpulverzugabe
- $F_{F,P}$  Brennofläche mit Löschpulverzugabe
- $(\frac{\alpha}{2})_0$  Flankenneigungswinkel ohne Löschpulverzugabe
- $(\frac{\alpha}{2})_P$  Flankenneigungswinkel mit Löschpulverzugabe

Da durch die Zugabe von Löschpulver  $\Lambda_P$  kleiner wird, muß bei konstanten Anfangsbedingungen  $F_{F, P}$  größer werden, wie die Schlierenbilder der Verbrennungskegel mit Pulver (Bild 25) und ohne Pulver (Bild 26) zeigen.

Zieht man Gleichung (9) zur Auswertung heran, so wird bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches  $u_0$  der Flankenwinkel bei Zugabe von Pulver kleiner, wie auch aus Bild 26 zu erkennen ist.

Bei der Auswertung der Versuche wurde die mit Hilfe des Kegelwinkels errechnete Flammengeschwindigkeit mit Löschpulver auf die Flammgeschwindigkeit ohne Pulver bezogen. Trägt man das Verhältnis dieser Flammgeschwindigkeiten über der zugegebenen Pulvermenge auf, ergibt sich die Kurve 1 in Bild 27, der zufolge das Verhältnis von  $\Lambda_P / \Lambda_0$  proportional der Quadratwurzel aus der Pulvermenge ist. Es ist daher vorteilhafter, die Pulvermenge über dem Quadrat des Flammgeschwindigkeitsverhältnisses aufzutragen, da diese Darstellung eine Gerade ergibt, wie Kurve 2 in Bild 27 erkennen läßt. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Löscheffektivität eines bestimmten Pulvers. Je größer die Effektivität eines Löschpulvers, um so größer ist die Steigung der Geraden.

In Bild 28 sind die Versuchsergebnisse für das Pulver A bei zwei verschiedenen Brenngaskonzentrationen dargestellt. Die Pulvermenge wurde über  $(\Lambda_P / \Lambda_0)^2$  aufgetragen. Danach wird für die Löschung eines Brenngas-Luft-Gemisches mit 10 % Methan eine größere Menge Löschpulver benötigt als für ein Gemisch mit 9,5 %  $\text{CH}_4$ . Dies ist

verständlich, da das erste Gemisch eine höhere Flammengeschwindigkeit aufweist und demzufolge eine intensivere Verbrennung stattfindet, die bei gleicher Effektivität des Pulvers nur mit einer größeren Menge unterbunden werden kann.

Da in der Praxis die minimale zur Löschung benötigte Pulvermenge interessiert, muß diese möglichst genau bestimmt werden. Dies läßt sich aber durch Messungen nur ungenau realisieren. Wird nämlich die Flammgeschwindigkeit durch Pulverzugabe immer weiter erniedrigt, so wird die Flamme immer länger bzw. der Flammenwinkel immer kleiner, bis die Flanken fast parallel zueinander verlaufen. In diesem Zustand sitzt die Flamme nicht mehr stabil auf dem Brennerrand auf, sondern hebt bei kleinsten Störungen ab, obwohl das Gemisch noch brennt. Versuchstechnisch bedeutet dies, daß dieser Zustand in den meisten Fällen nicht zu verwirklichen ist und daher im Schlierenbild nicht festgehalten werden kann. Daher können nur  $\Lambda_P / \Lambda_0$  -Werte bis hinunter zu 0,3 - 0,4 gemessen werden. Die minimalen zur Löschung benötigten Pulvermengen müssen daher durch Extrapolation der Geraden bis zum Schnittpunkt mit der Abszissenachse ( $\Lambda_P / \Lambda_0 = 0$ ) ermittelt werden (gestrichelter Verlauf der Geraden).

Nach dieser Methode können aus Bild 28 folgende Werte ermittelt werden:

minimale Pulvermenge bei 10,0 % CH <sub>4</sub>	0,600 g
minimale Pulvermenge bei 9,5 % CH <sub>4</sub>	0,345 g.

Außerdem wurde bei den Versuchen mit dem Löschpulver A im Gegensatz zu denen mit dem Löschpulver B festgestellt, daß die Abmessungen der Schüttelrinne zu klein gewählt worden waren, um größere Pulvermengen in den Gasstrom zu fördern, so daß die Messungen nur bis  $\Lambda_P/\Lambda_0 = 0,75$  durchgeführt werden konnten.

In Bild 29 sind die Werte für das Pulver B bei den Gaskonzentrationen 9,5 und 10,0 Vol-% aufgetragen. Danach ergeben sich die minimalen für die Löschung benötigten Löschpulvermengen zu:

minimale Pulvermenge bei	10,0 % CH <sub>4</sub>	0,116 g.
minimale Pulvermenge bei	9,5 % CH <sub>4</sub>	0,059 g.

In Bild 30 sind die Löschpulver A und B für eine Gaskonzentration von 10 % CH<sub>4</sub> und in Bild 31 für eine Gaskonzentration von 9,5 % CH<sub>4</sub> gemeinsam aufgetragen, um die Wirksamkeit beider Pulver miteinander vergleichen zu können. Wie bereits hinlänglich bekannt, hat das Pulver B, das als Hauptbestandteil Kaliumhydrogencarbonat enthält, eine höhere Löschfähigkeit als das auf Natriumhydrogencarbonat-Basis aufgebaute Pulver A. Bei beiden Gaskonzentrationen ergibt sich eine mehr als fünffach bessere Löschwirksamkeit des Pulvers B. Dieser Wert ist im Vergleich zu anderen Meßergebnissen sehr hoch. Friedrich [2] ermittelte an einer Leuchtgasflamme, daß reines Kaliumhydrogencarbonat ca. dreimal besser löscht als Natriumhydrogencarbonat. Versuche von Lee und Robertson [4] mit der in Bild 4 dargestellten Apparatur ergaben einen Faktor von rd. 2,5 für eine mittlere Teilchengröße von 20 µm.

Von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurden beide Pulver, ohne Sichtung, in der Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G. untersucht (Bild 32). Hierbei lag der Faktor in der Größenordnung von 1,6. Die in [13] beschriebenen Versuche mit der Solvay-Testapparatur ergaben für ein Pulver auf Kaliumhydrogenkarbonat-Basis auch eine mehr als fünffach bessere Löschwirksamkeit gegenüber dem Pulver mit Natriumhydrogenkarbonat als Hauptbestandteil. Dagegen lieferten die in [3] angeführten Versuche mit derselben Apparatur für beide Pulverarten wiederum nur Werte zwischen 1,6 und 6. Die große Streuung dieser Werte beruht sicherlich nicht allein auf den neben der Hauptkomponente zugesetzten weiteren Stoffen. So sind z.B. die Pulver A und B gleichzeitig mit der Apparatur der Dynamit Nobel A.G. und der neuentwickelten Testapparatur geprüft worden. Hierbei ergaben sich Unterschiede von mehr als 300 %. Da es sich um die gleichen Pulver handelte, muß der Unterschied in der Arbeitsweise der jeweiligen Apparatur selbst zu suchen sein. Bei den letztgenannten Versuchen muß noch hinzugefügt werden, daß die Pulver in der Dynamit Nobel-Apparatur ohne Sichtung eingefüllt wurden, d.h., daß keine besondere Fraktion bevorzugt wurde, während im anderen Fall nur die Fraktion zwischen 32 und 40  $\mu$ m herangezogen wurde. In vielen aus der Literatur bekannten Versuchen wurde nachgewiesen, daß die Löschfähigkeit mit abnehmender Korngröße zunimmt. Dies bedeutet, daß im Grunde nur Versuche mit gleichem, eng begrenztem Kornspektrum zum Vergleich herangezogen werden können. Weiterhin wurde bei den im ersten Teil dieses Berichtes beschriebenen Versuchen mit der Prüfapparatur der Dynamit

Nobel A.G. festgestellt, daß nur ein Teil der eingegebenen Pulvermenge in die Flamme gelangt und so die Löschung bewirkt. Bei konstantem Flammenvolumen wird daher der zur Löschung wirksame Anteil an dem zu prüfenden Löschpulver mit steigender Einfüllmenge kleiner, so daß der Unterschied in der Löschwirksamkeit zweier Pulver mit zunehmenden Mengen geringer werden muß. Diese Beobachtung wird in der Arbeit [13] bestätigt, in der Versuche mit der Solvay-Apparatur Versuchen mit dem Brandkasten und Feldtesten gegenüber gestellt werden. Danach wurde mit der Solvay-Prüfapparatur eine rd. 5,5 fach bessere Löschfähigkeit des Kaliumhydrogenkarbonats gegenüber Natriumhydrogenkarbonat festgestellt, während der Faktor beim Brandkastentest nur noch 2,5 und beim Feldtest nur noch ca. 1,4 beträgt.

Im Gegensatz dazu trägt die Pulvermenge, die bei der Prüfung mit der neuentwickelten Apparatur der Forschungsstelle für Brandschutztechnik eingesetzt wird, vollständig zur Löschung bei, d.h., alle Pulverteilchen gelangen in die Flamme. Es ist daher anzunehmen, daß mit dieser Apparatur die Unterschiede in der Löschwirksamkeit verschiedener Pulver sehr deutlich meß- und darstellbar sind, da die Menge bestimmt werden kann, die allein die Löschung bewirkt. Die Versuche werden z.Z. mit anderen Löschpulvern weitergeführt, um anhand einer größeren Anzahl von Meßergebnissen eine stärker fundierte Bestätigung für diese Annahme zu erhalten.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren wurden zahlreiche neue Trockenlöschpulver für die verschiedensten Anwendungszwecke entwickelt. Auch die herkömmlichen Pulver konnten in bezug auf ihre Löschwirksamkeit verbessert werden. Es war daher notwendig, Prüfmethoden zur Beurteilung der Löschwirksamkeit der Pulver zu entwickeln. Charakteristisch für fast alle bekannten Prüfapparaturen ist es, das Pulver in Anlehnung an die Bedingungen eines Brandfalles in der Praxis von außen in eine Testflamme zu bringen. Die Meßergebnisse sind dabei jedoch mit zufälligen Fehlern behaftet und weisen bei gleichen Versuchsbedingungen erhebliche Streuungen auf. Um diese auszugleichen, müssen sehr viele Einzelversuche durchgeführt werden, damit eine statistische Auswertung vorgenommen werden kann. Ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Prüfapparaturen untereinander ist oft nicht möglich, da die Arbeitsweise der jeweiligen Apparatur die Versuchswerte stark beeinflusst. So wurden für den Unterschied der Löschwirksamkeit von Kaliumhydrogenkarbonat und Natriumhydrogenkarbonat Werte zwischen 1,6- und 6 fach bessere Wirksamkeit bei verschiedenen Prüfverfahren festgestellt. Diese Unterschiede beruhen nicht allein auf der Zusammensetzung der Löschpulver. Untersuchungen über den Einfluß des Ausstoßvorganges auf die Löschwirksamkeit an der Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G. haben gezeigt, daß die Ausbringvorrichtung die Ergebnisse entscheidend beeinflusst. Die Auswertung des Versuchsmaterials ergab bei gleicher Pulvereinwaage und konstantem Treibgasdruck eine erhebliche Streuung der Ausbreitungs-

geschwindigkeit der Pulverwolke. Dies ist auf eine ungleichmäßige Pulververteilung in der Wolke zurückzuführen, so daß sich keine reproduzierbaren Versuchsbedingungen ergeben. Dabei wurde auch festgestellt, daß nur ein Teil der zur Prüfung eingefüllten Pulvermenge in die Testflamme gelangt und die Löschung bewirkt. Eine Aussage über die Größe dieser Teilmenge kann nicht getroffen werden. Es ist jedoch anzunehmen, daß sich bei den schwankenden Versuchsbedingungen diese Menge auch bei jedem Versuch ändert. Dies äußert sich in streuenden Meßergebnissen. Der Unterschied in der Löschwirksamkeit verschiedener Löschpulver kann dadurch nicht deutlich festgestellt werden. Diese Fehlerquellen sind auf die Ausstoßvorrichtung und die Arbeitsweise der Apparatur zurückzuführen.

Da es bei der Auslegung einer Löschapparatur nicht möglich ist, alle die verschiedenen Bedingungen des Brandfalles in der Praxis in kleinem Maßstab nachzubilden, sollte bei der Prüfung der Löschwirksamkeit von Löschpulver im Labormaßstab das Augenmerk vor allem auf konstante und reproduzierbare Versuchsbedingungen gerichtet werden. Außerdem sollte eine derartige Laborapparatur so ausgelegt sein, daß nur die Pulvermenge bestimmt wird, die tatsächlich die Löschung bewirkt. Um diese Bedingungen zu erfüllen, wurde von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik eine Prüfmethode entwickelt, mit der die zur Löschung benötigte Pulvermenge ermittelt werden kann. Als Meßgröße für die Löschwirksamkeit wurde die laminare Flammengeschwindigkeit herangezogen. Bei dieser Apparatur wird die zu prüfende Pulvermenge kontinuierlich einem vorgemischten



Gas-Luft-Strom über eine Schüttelrinne zugegeben. Die Pulverteilchen gelangen in die Prüfflamme, eine laminare Vormischflamme, und vermindern aufgrund ihrer Löschwirksamkeit die Flammengeschwindigkeit, die nach dem Düsenbrenner-Flankenwinkel-Schlierenbild-Verfahren bestimmt wird. Die Auswertung der Ergebnisse ergibt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Quadrat der Flammengeschwindigkeit und der zugegebenen Löschpulvermenge. Wie zu erwarten war, wird für das Brennstoff-Luft-Gemisch mit der maximalen Flammengeschwindigkeit die größte Pulvermenge benötigt. Versuche mit einem handelsüblichen Löschpulver auf  $\text{NaHCO}_3$ -Basis und einem Pulver auf  $\text{KHCO}_3$ -Basis ergaben bei dem letzteren Pulver eine mehr als fünffach bessere Löschwirksamkeit.

Da bei dem neuen Prüfverfahren die Pulvermenge bestimmt wird, die die Löschung bewirkt, läßt sich der Unterschied in der Löschwirksamkeit verschieden zusammengesetzter Pulver deutlich feststellen.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Pieters, H.A.J.:  
Natriumbicarbonaat-bluspoeder.  
Chemisch Weekblad 54 (1958), S. 429-437.
- [2] Friedrich, M.:  
Wirkungsweise von Trockenlöschmitteln.  
Karlsruhe, Technische Hochschule, Dr.rer.nat.  
Dissertation 1959.
- [3] Dessart, H. und Malarme, L.:  
Les modèles réduit comme moyens  
d'appréciation de l'efficacité extinctrice  
des poudres BCE.  
In: 2. Internationales Brandschutz-Seminar,  
Band II: Modellbrandtechnik, Löschmittel  
und Löschverfahren. Referate und Diskussions-  
beiträge.  
Hersg. von der Vereinigung zur Förderung des  
Deutschen Brandschutzes e.V. - VFDB 1964.  
S. 137-145 und 323-329.
- [4] Lee, T.G. und Robertson, A.F.:  
Effectiveness of some powdered materials in  
extinguishing hydrocarbon fires.  
In: International Symposium on the use of  
models.  
Ed. by National Academy of Sciences-National  
Research Council. Washington 1961. Publication  
786, S. 93-112.

- [5] Fire Research 1966,  
Her Majesty's Stationery Office, London 1967.
- [6] Thorne, S.F.:  
New methods for testing the effectiveness of  
dry powder.  
Fire 61 (1969), Nr. 760, S. 240-241
- [7] Hinrichs, B.R.; Magnus, G. und Werthenbach, H.-G.:  
Erarbeitung geeigneter Testmethoden, um die  
Wirksamkeit von Löschpulvern durch Labora-  
toriumsteste feststellen zu können.  
Forschungsbericht Nr. 4 der Arbeitsgemeinschaft  
Feuerschutz (AGF). 1967.
- [8] DIN 1319 "Grundbegriffe der Messtechnik"  
Blatt 3, Dezember 1968.
- [9] Gouy, G.:  
Recherches photométriques sur les flammes colorées.  
Annales de chimie et de physique 5<sup>e</sup> série 18  
(1879), S. 5-101.
- [10] Michalke, A.:  
Theoretische und experimentelle Untersuchung  
einer rotationssymmetrischen laminaren Düsen-  
grenzschicht.  
Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt,  
Bericht Nr. 177 (1961).
- [11] Lindow, R.:  
Zur Bestimmung der laminaren Flammgeschwin-  
digkeit.  
Karlsruhe, Technische Hochschule, Dr.-Ing.  
Dissertation 1966.

[12] Schardin, H.:

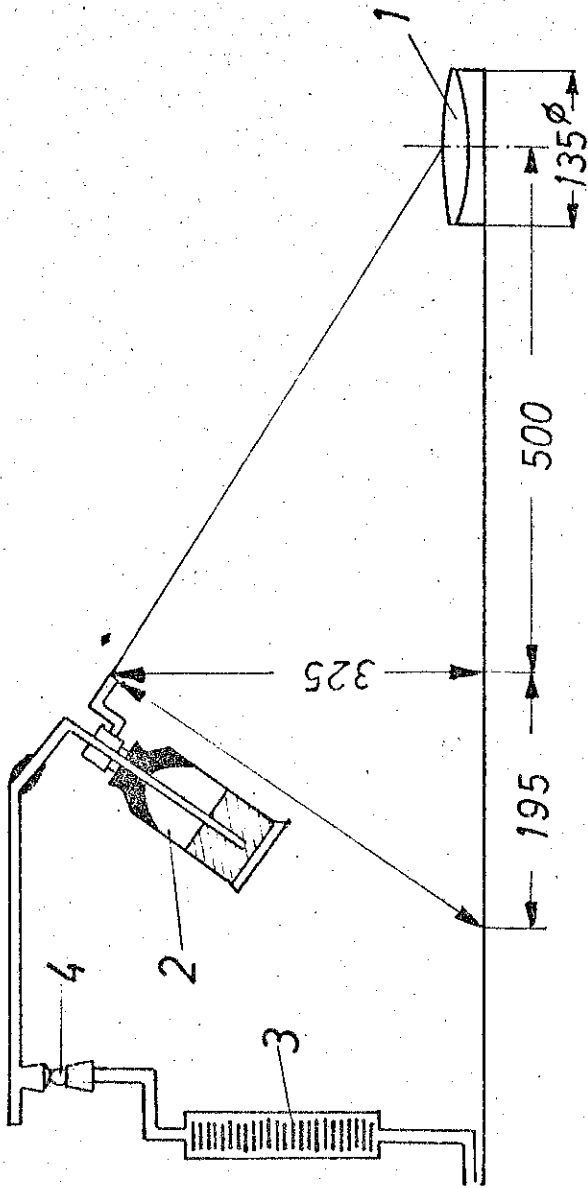
Die Schlierenverfahren und ihre Anwendung.  
Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften  
20 (1942), S. 303 - 439.

[13] Mark, W.:

Problematik der Trockenpulver-Prüfmethoden.  
In: 2. Internationales Brandschutz-Seminar,  
Band II: Modellbrandtechnik, Löschmittel und  
Löschverfahren. Referate und Diskussionsbeiträge.  
Herg. von der Vereinigung zur Förderung des  
Deutschen Brandschutzes e.V. (VFDB) 1964,  
S. 123-133 und 319-322.

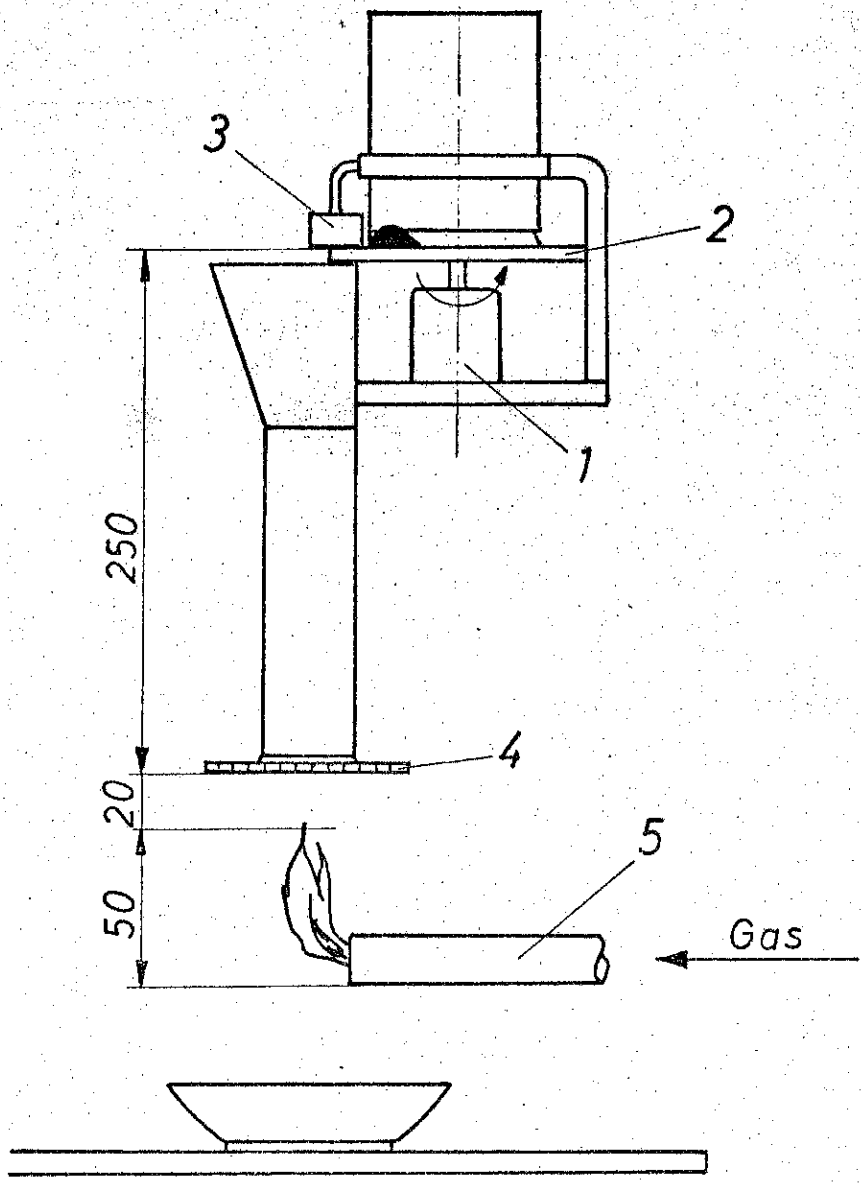
Treibgasdruck	Pulvermenge	Geschwindigkeit	Arithm. Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
atm	g		$\bar{x}$ m/s	m m/s	$\frac{s_r}{\%}$
1	0,8	$v_o$	11,6	$\pm 3,4$	$\pm 29$
		$v_B$	1,1	$\pm 0,7$	$\pm 64$
1	1,0	$v_o$	13,9	$\pm 2,8$	$\pm 20$
		$v_B$	1,2	$\pm 1,1$	$\pm 90$
1	1,2	$v_o$	13,4	$\pm 3,3$	$\pm 15$
		$v_B$	2,5	$\pm 1,4$	$\pm 56$
1	1,4	$v_o$	15,1	$\pm 2,4$	$\pm 16$
		$v_B$	3,1	$\pm 0,9$	$\pm 28$
1	1,6	$v_o$	16,7	$\pm 4,0$	$\pm 24$
		$v_B$	3,1	$\pm 1,8$	$\pm 59$
1,5	0,6	$v_o$	16,1	$\pm 3,4$	$\pm 21$
		$v_B$	0,6	$\pm 0,2$	$\pm 25$
1,5	0,8	$v_o$	19,1	$\pm 1,5$	$\pm 8$
		$v_B$	1,1	$\pm 0,6$	$\pm 51$
1,5	1,0	$v_o$	20,2	$\pm 1,3$	$\pm 7$
		$v_B$	1,9	$\pm 0,1$	$\pm 4$
1,5	1,2	$v_o$	16,0	$\pm 4,0$	$\pm 25$
		$v_B$	1,2	$\pm 0,5$	$\pm 44$
1,5	1,4	$v_o$	20,7	$\pm 4,3$	$\pm 21$
		$v_B$	5,0	$\pm 1,2$	$\pm 24$

Tab.1 Arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient der Geschwindigkeiten der Pulverwolke  $v_o$  und  $v_B$



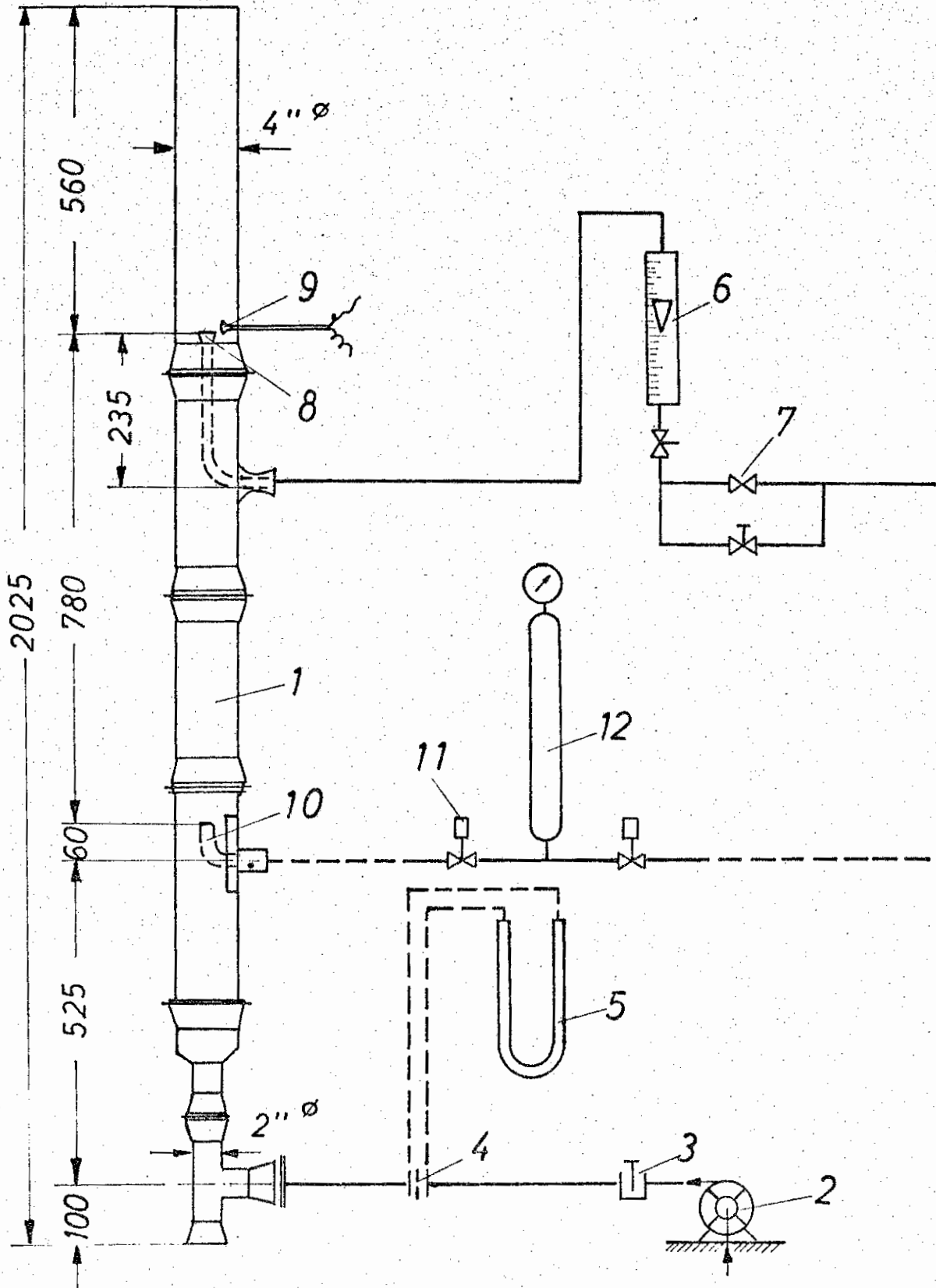
1 Schale mit Brennstoff; 2 Waschflasche; 3 Rotamesser; 4 Dreiwegehahn;

Bild 1. SM-Prüfapparat



1 Elektromotor; 2 Drehscheibe;  
3 Abstreifblech; 4 Drahtsieb; 5 Gasbrenner

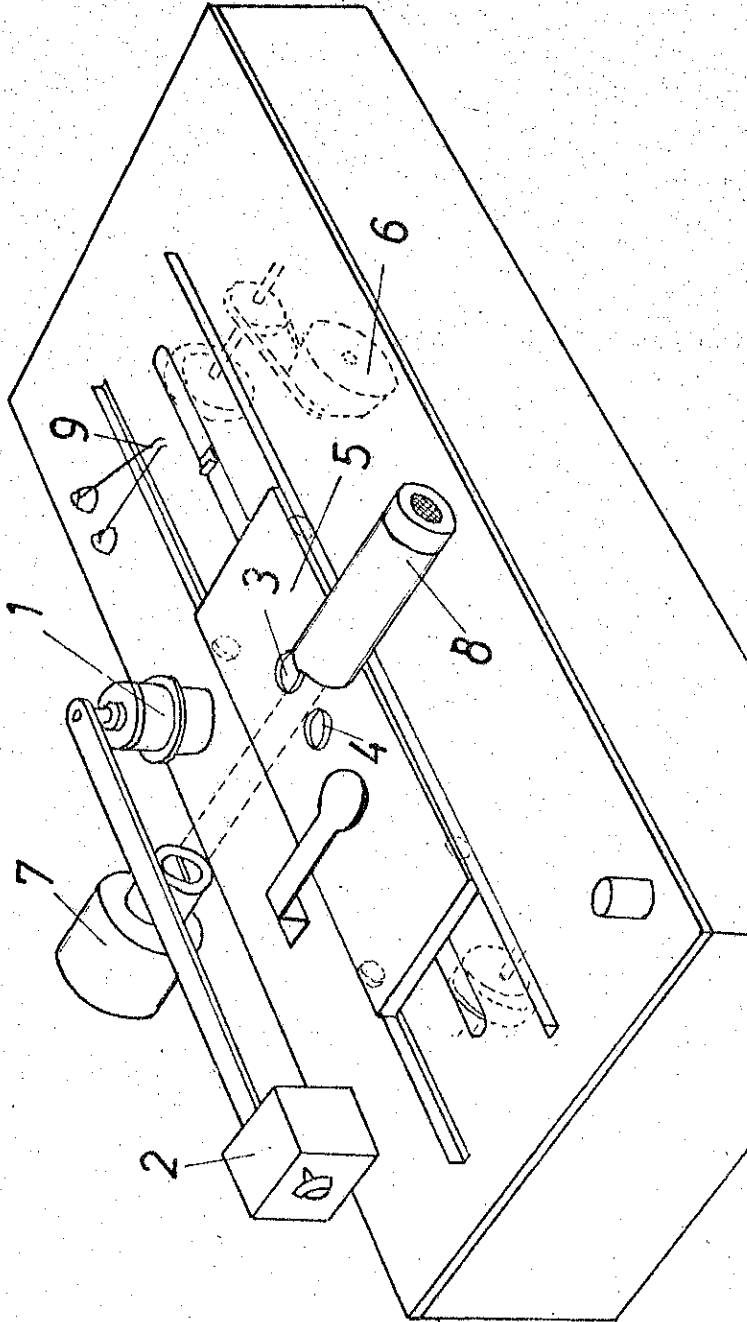
Bild 2. Prüfapparatur nach Friedrich



1 Pyrexglasrohr; 2 Ventilator; 3 Ventil; 4 Regler; 5 U-Rohrmanometer; 6 Rotamesser; 7 Ventil; 8 Brenner; 9 Zündelektroden; 10 Injektor; 11 Magnetventil; 12 Prebluftflasche;

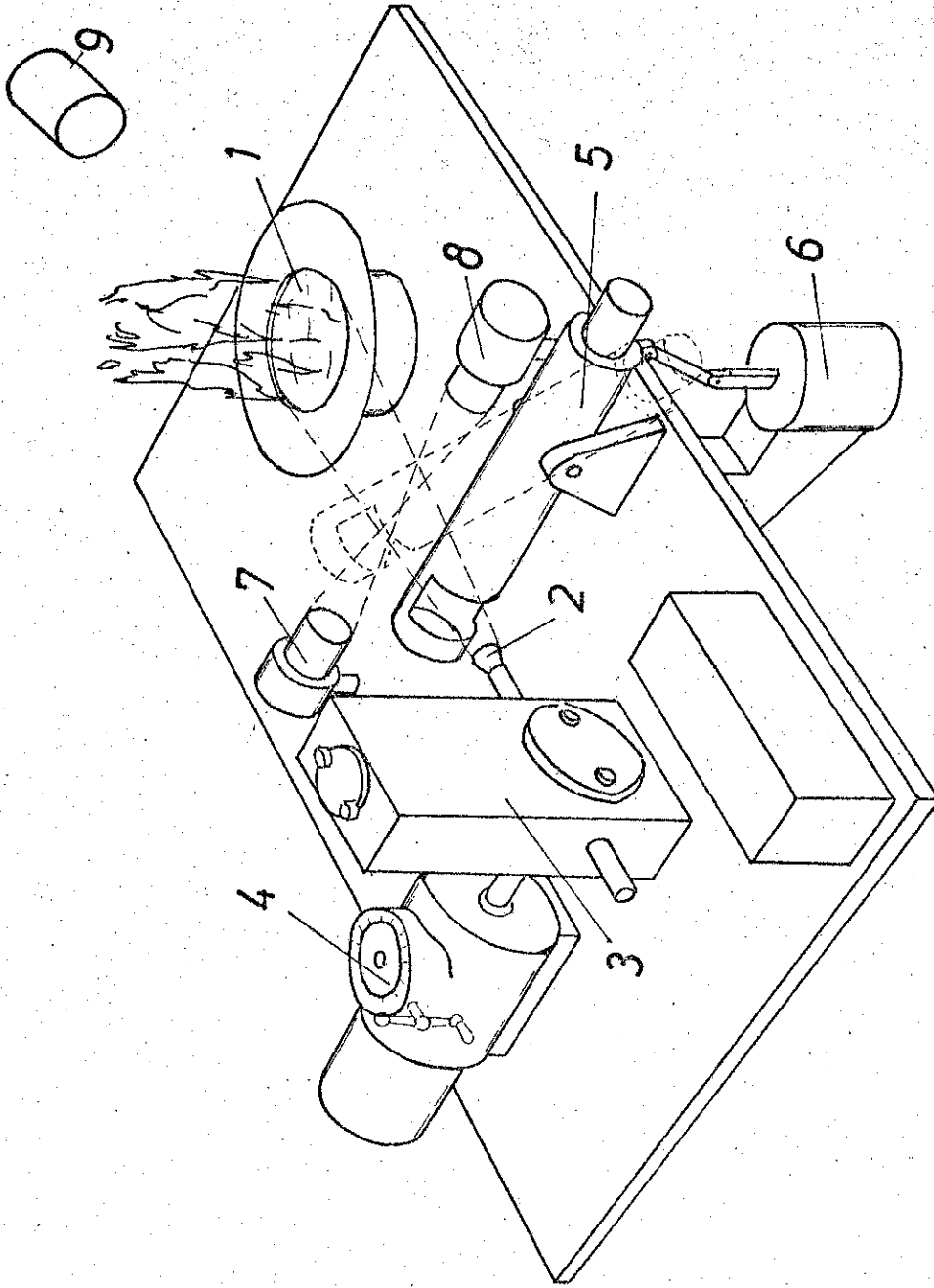
Bild 3. Solvay-Prüfapparatur





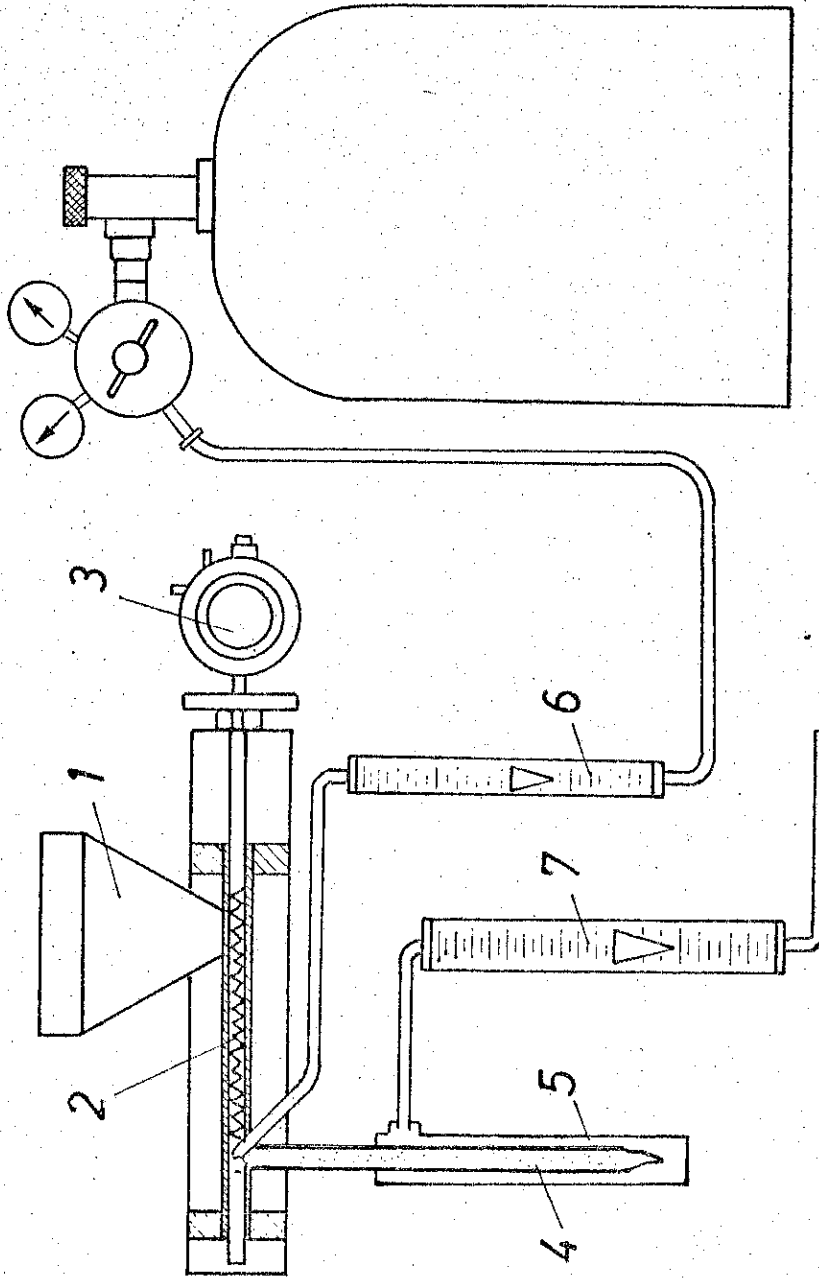
1 Pulveraufgabeevorrichtung; 2 Vibrator; 3 Brennerschale; 4 Aufgangschale;  
5 Schlitten; 6 Motor; 7 Lichtquelle; 8 Photozelle; 9 Zündelektroden;

Bild 4. Prüfapparatur nach Lee und Robertson



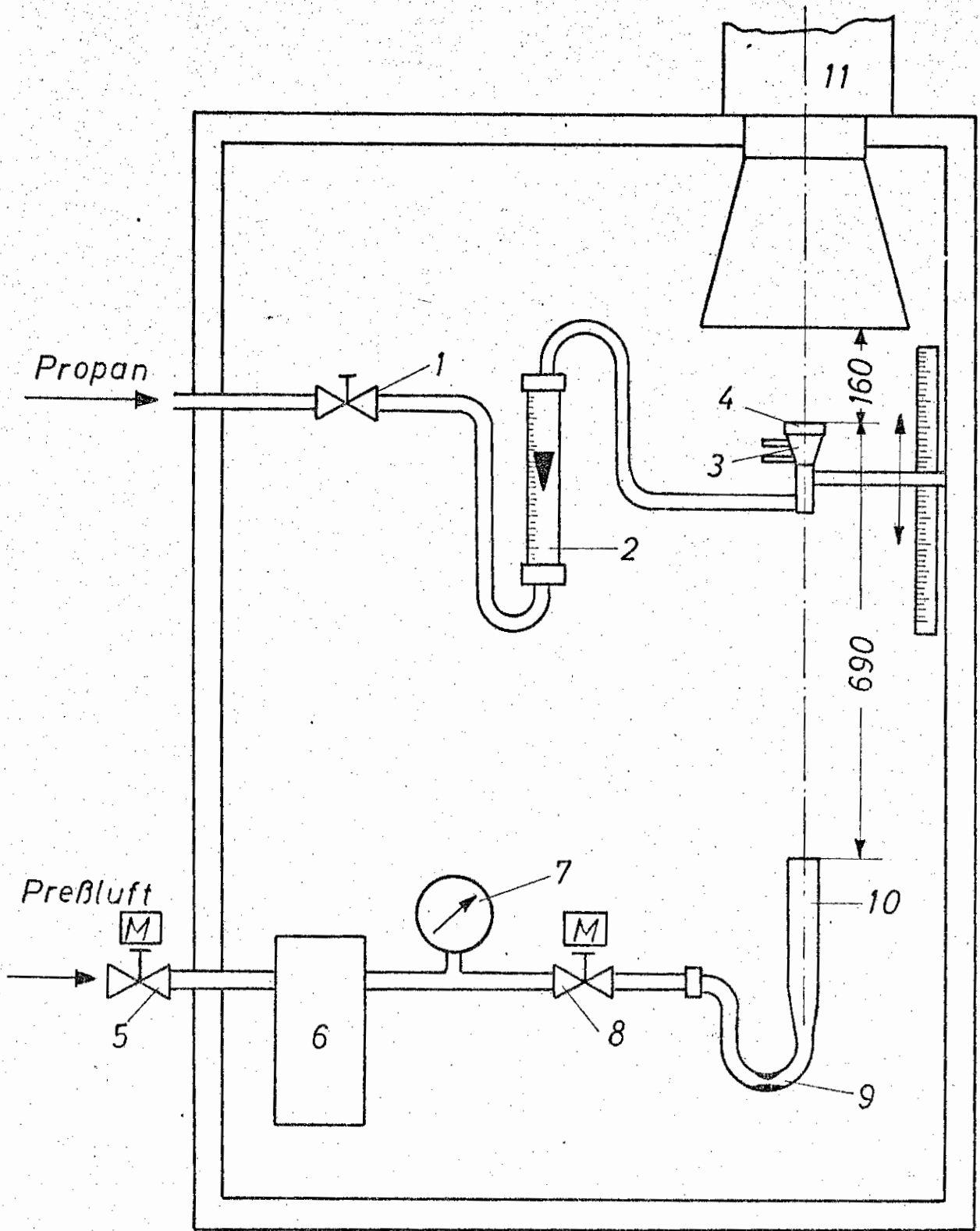
1 Testbrand; 2 Düse; 3 Vibrator; 4 Motor; 5 Auffangrohr; 6 Magnet; 7 Lichtquelle;  
8 Fotozelle; 9 Infrarot-Detektor;

Bild 5. Prüfapparat nach Lee und Robertson



1 Vorratsbehälter; 2 Förderschnecke; 3 Motor; 4 Brennerrohr; 5 Rohr für Verbrennungsluft; 6 Rotamesser; 7 Rotamesser

Bild 6. Testapparatur der Fire Research Station



1 Regelventil, 2 Strömungsmesser, 3 Kühlmantel  
des Brenners, 4 Brenner, 5 Magnetventil,  
6 Treibgasbehälter, 7 Manometer, 8 Magnetventil,  
9 Kapillare, 10 Löschpistole, 11 Ventilator.

Bild 7. Geänderte Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G.

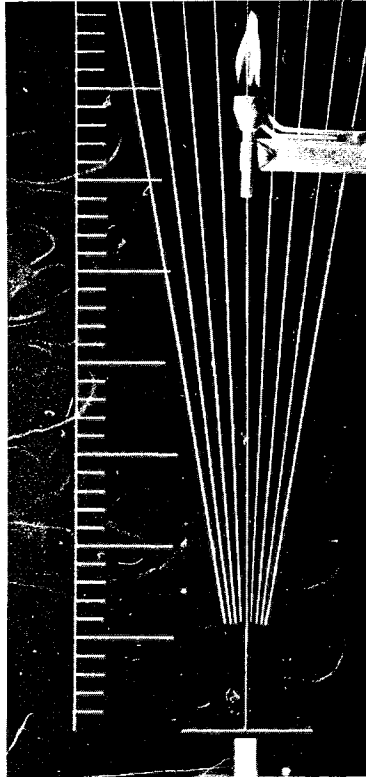


Bild 8. Prüf Flamme mit Maßstab für die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung

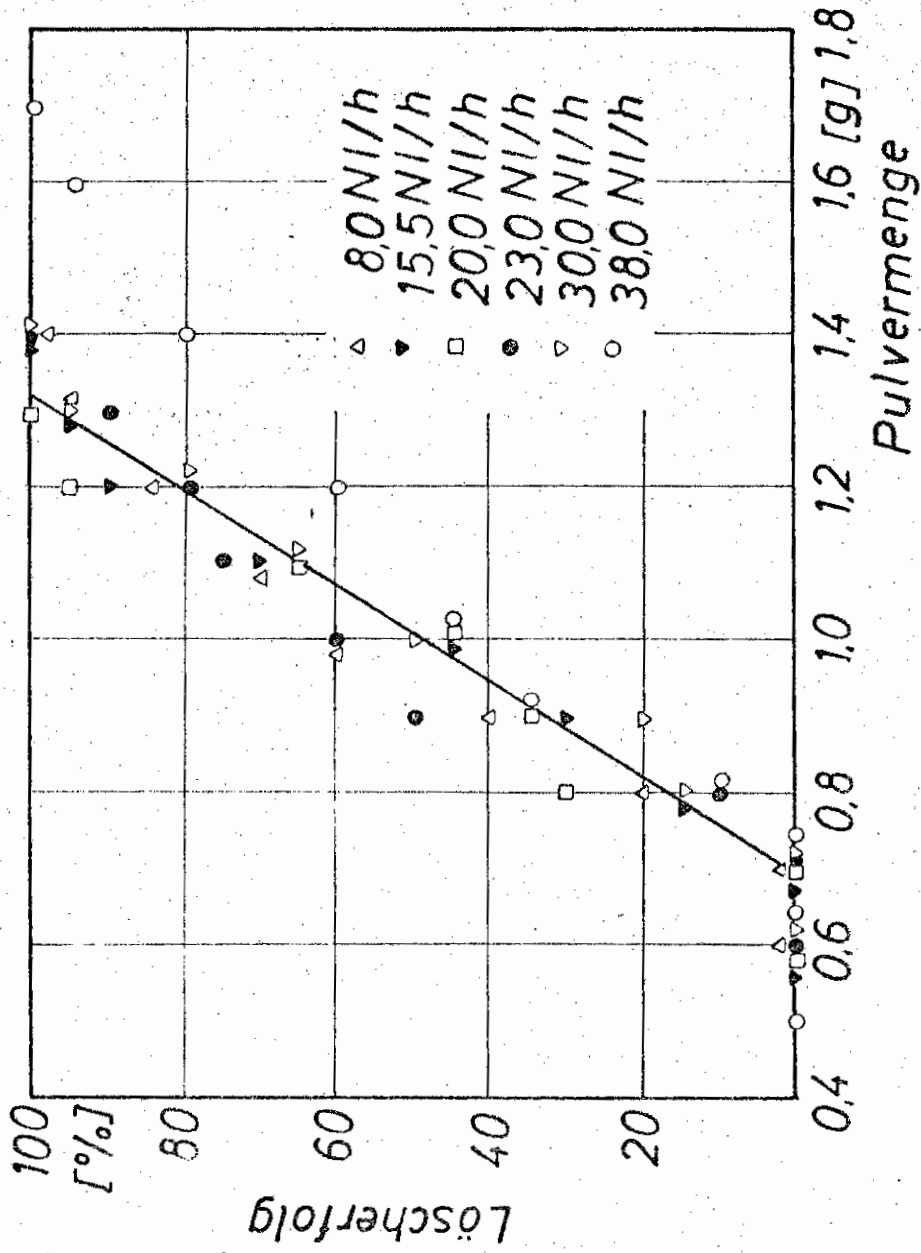


Bild 9. Löscherksamkeit in Abhängigkeit vom Brennstoffdurchsatz

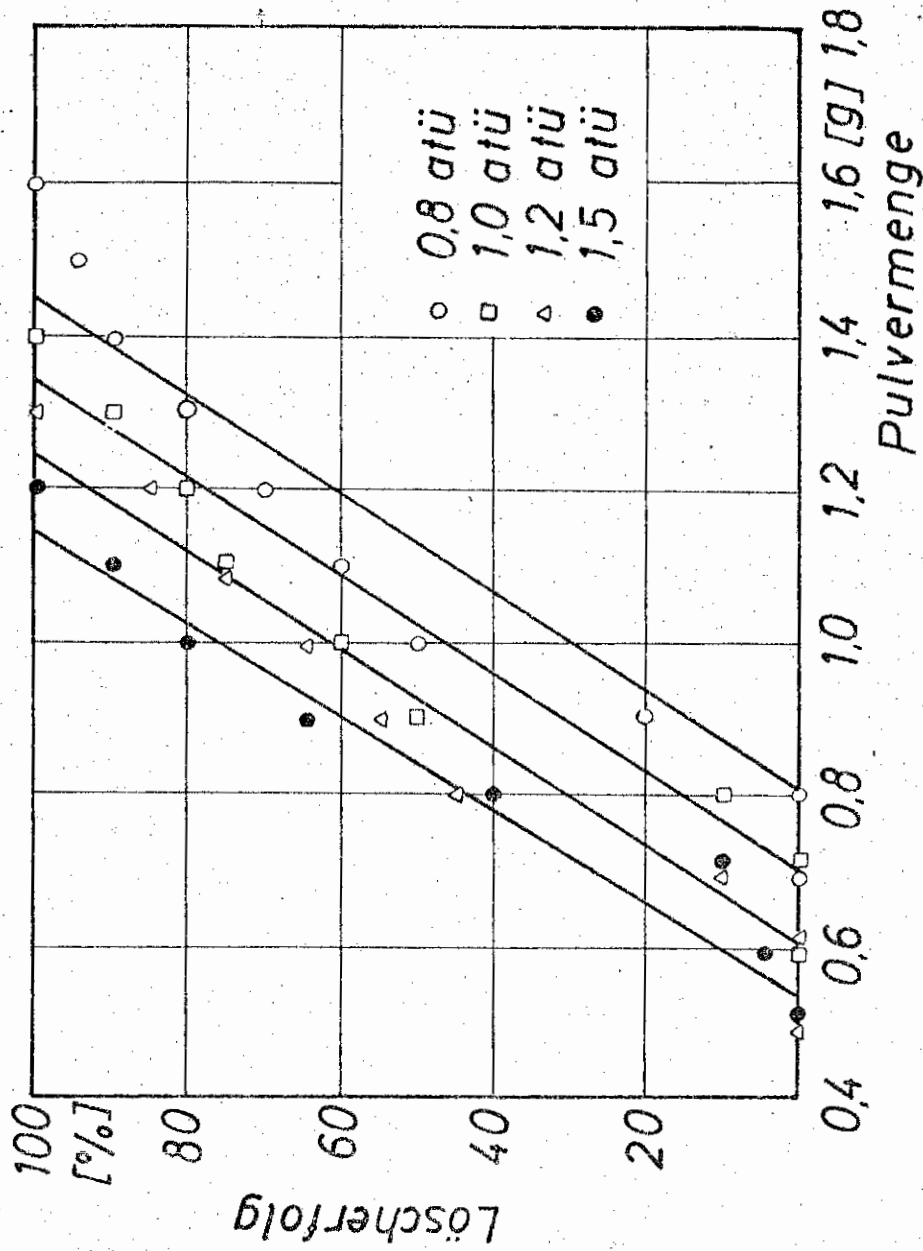


Bild 10. Löschwirksamkeit in Abhängigkeit vom Treibgasdruck

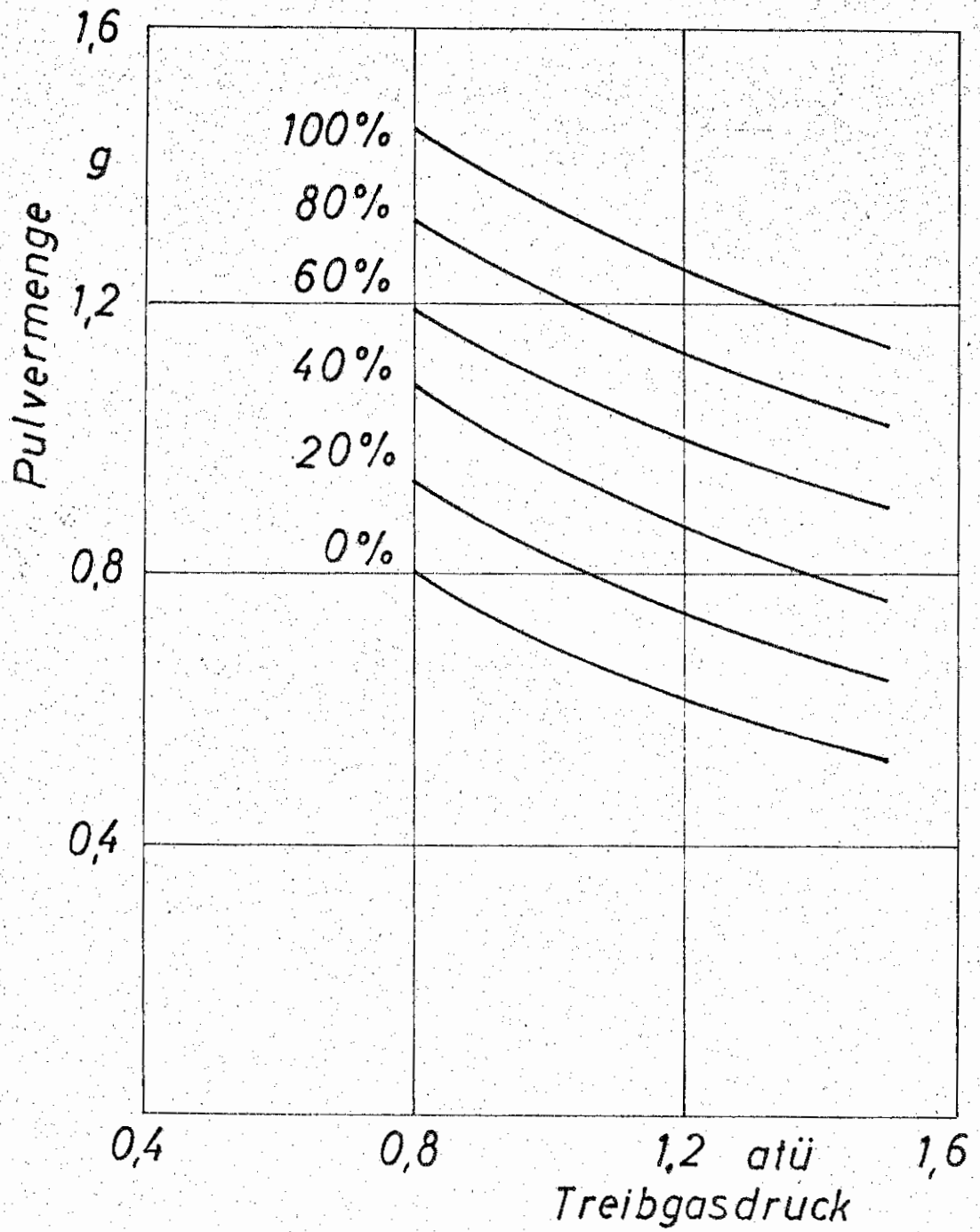
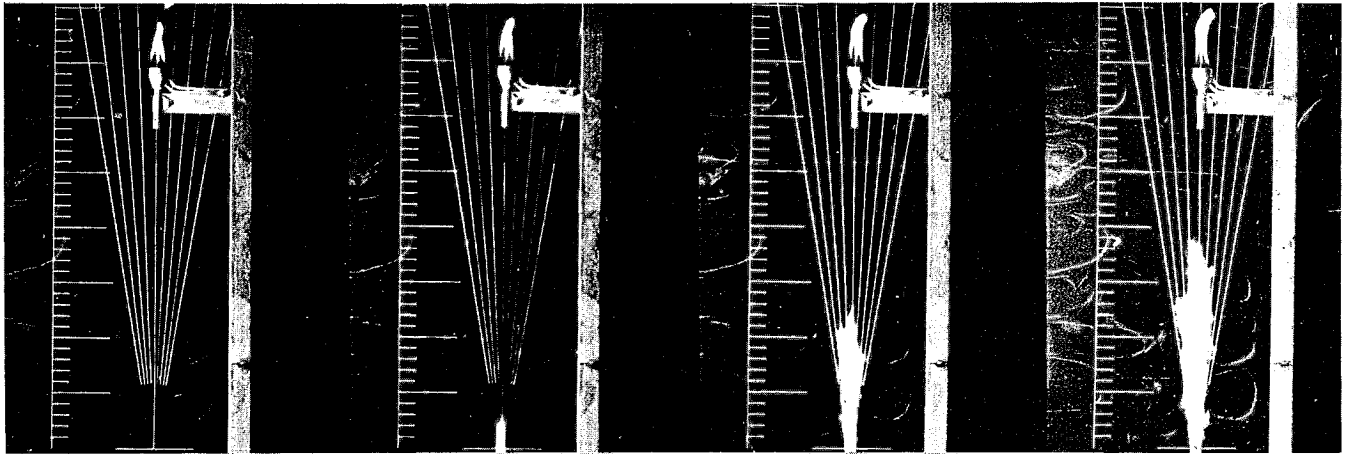


Bild 11. Pulvermenge in Abhängigkeit vom Treibgasdruck mit dem Löscherfolg als Parameter



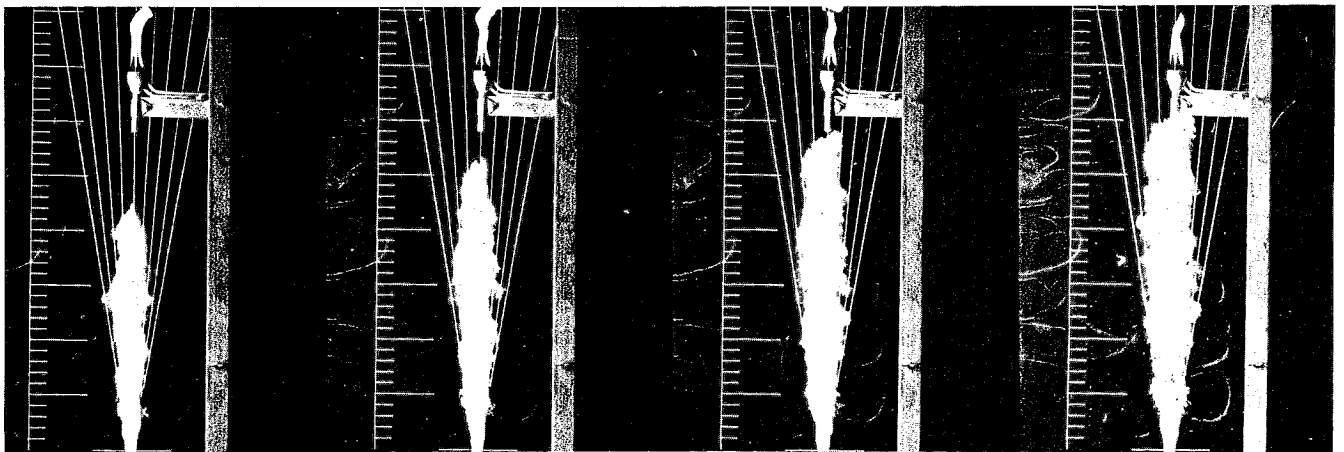


0 s

0,016 s

0,032 s

0,048 s



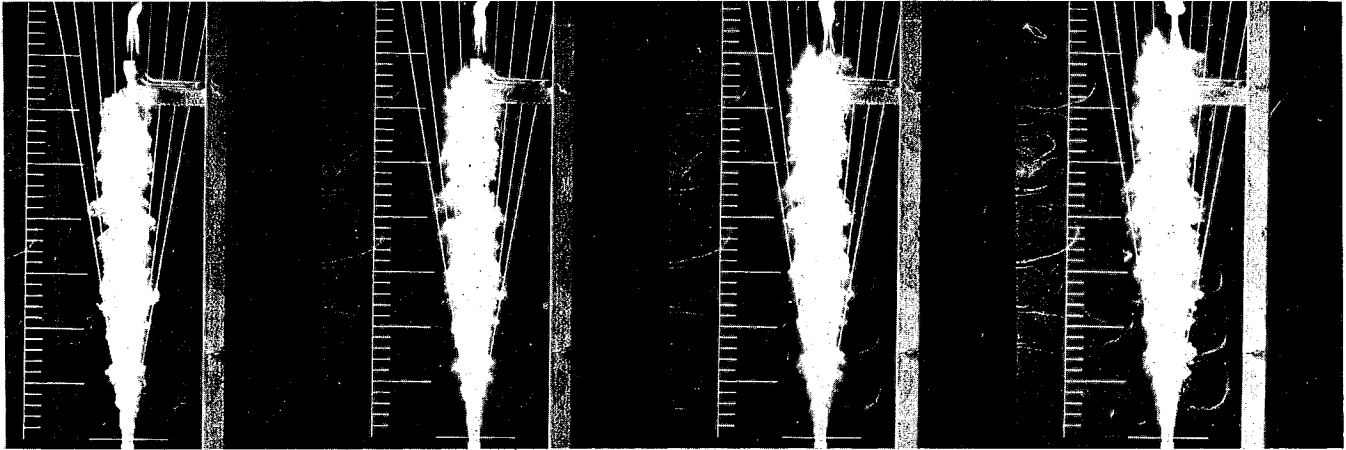
0,064 s

0,080 s

0,096 s

0,112 s

Bild 12. Ausstoßvorgang und Ausbreitung der Pulverwolke

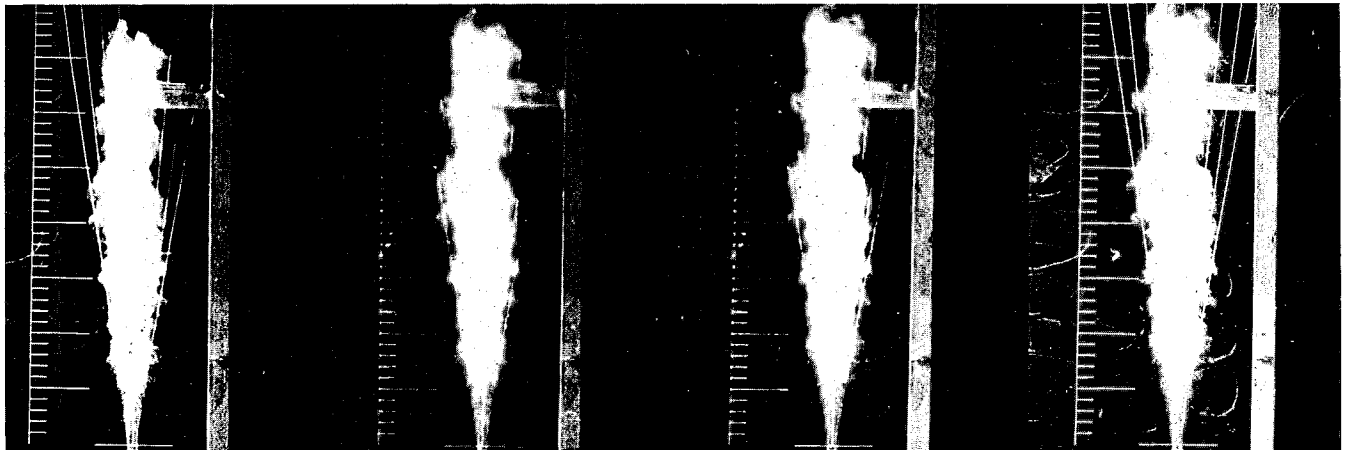


0,128 s

0,144 s

0,160 s

0,176 s



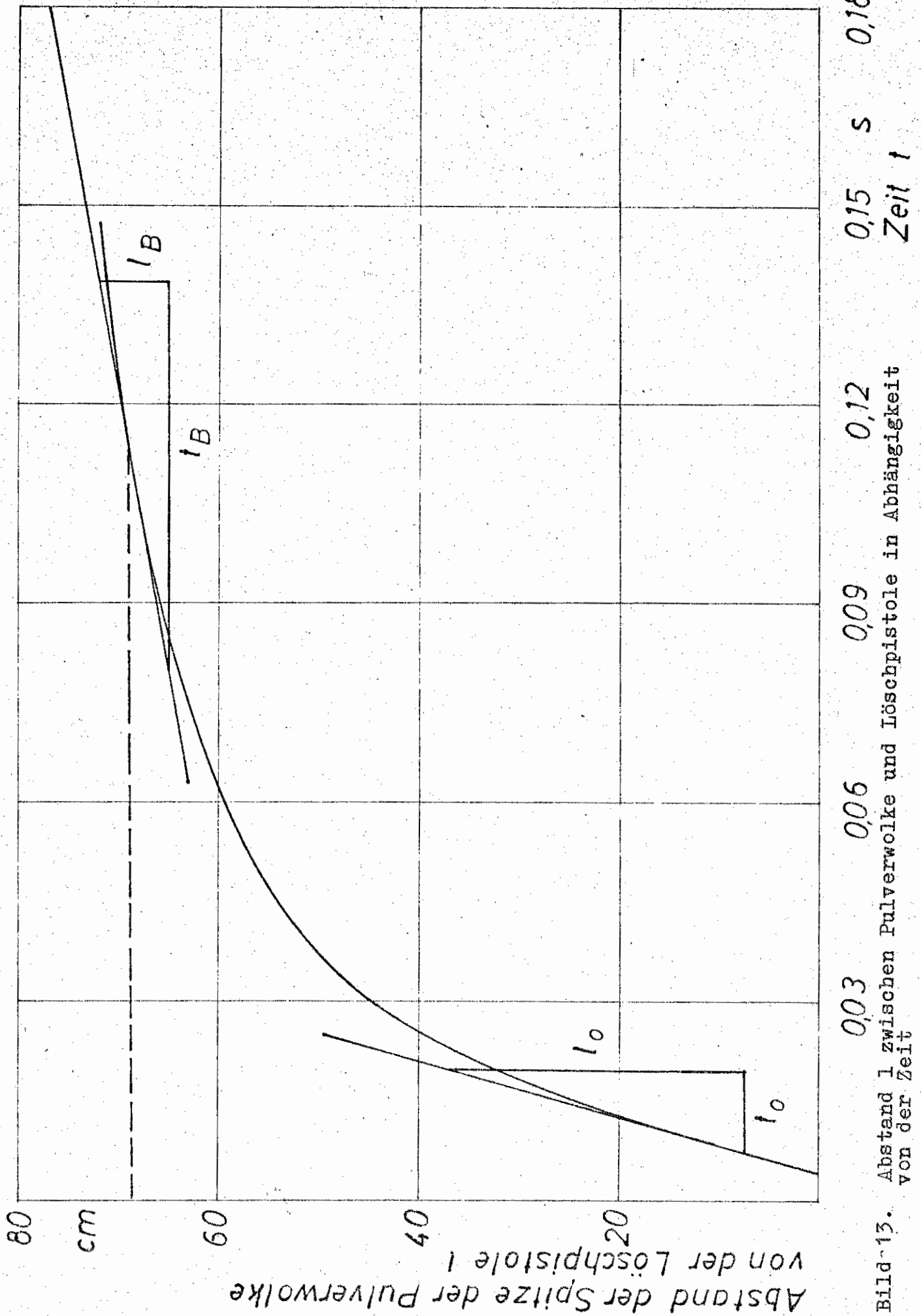
0,192 s

0,208 s

0,224 s

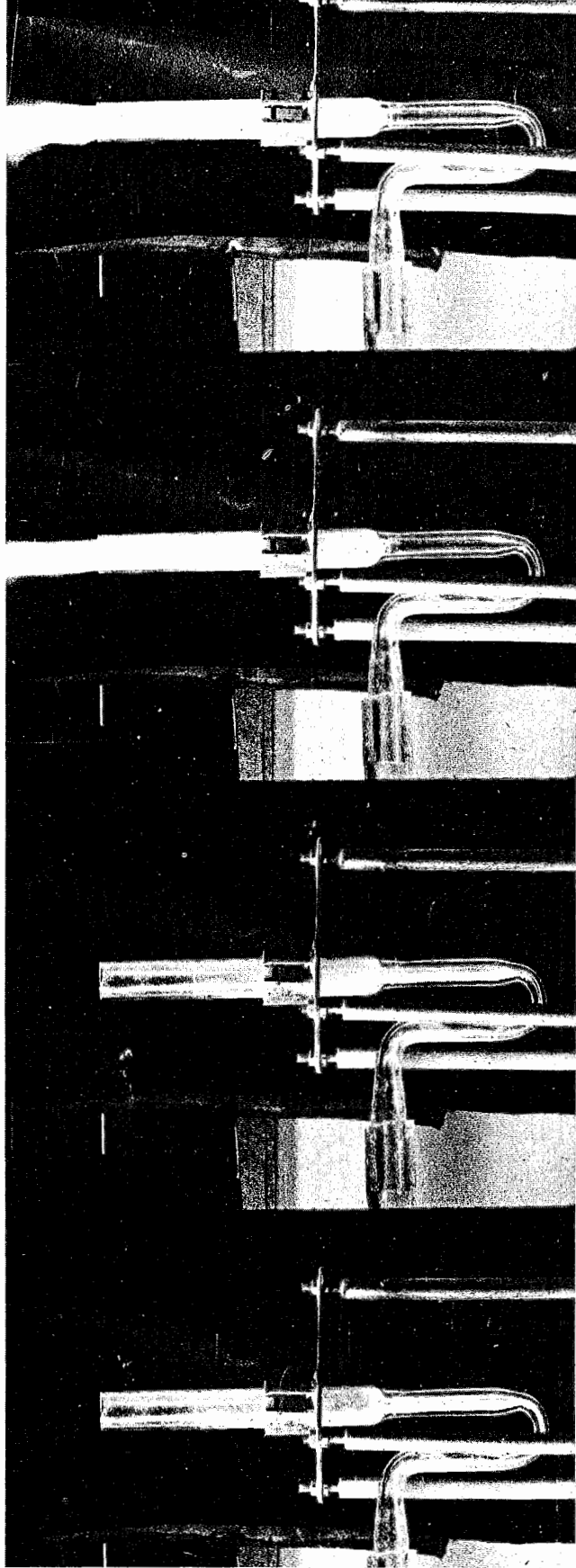
0,240 s

Bild 12. Ausstoßvorgang und Ausbreitung der Pulverwolke



Abstand der Spitze der Pulverwolke von der Löschpistole  $l$

Bild-13. Abstand  $l$  zwischen Pulverwolke und Löschpistole in Abhängigkeit von der Zeit



0 s

0,016 s

0,032 s

0,048 s

Bild 14. Ausstoßvorgang an der Löschpistole

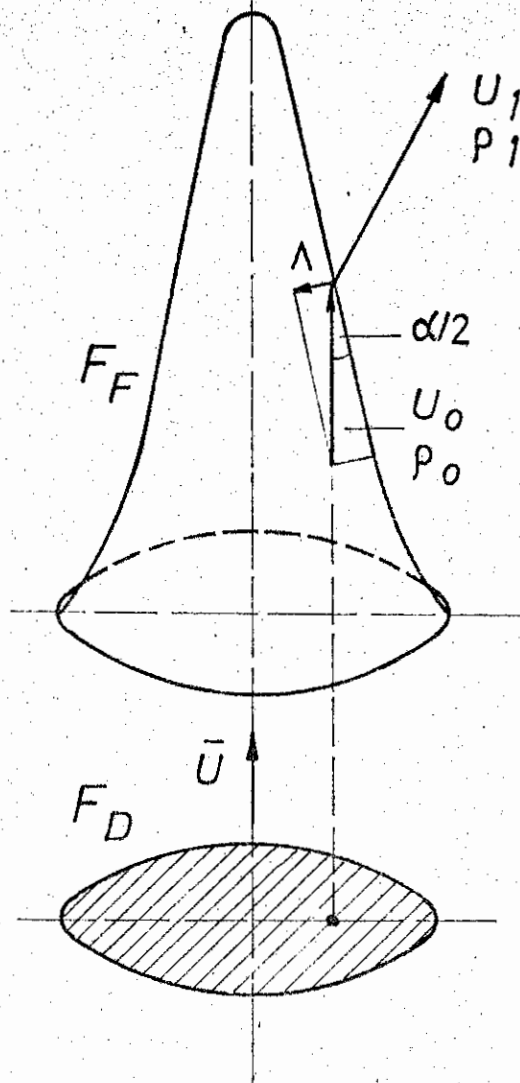


Bild 15. Schematische Darstellung des Primärverbrennungskegels

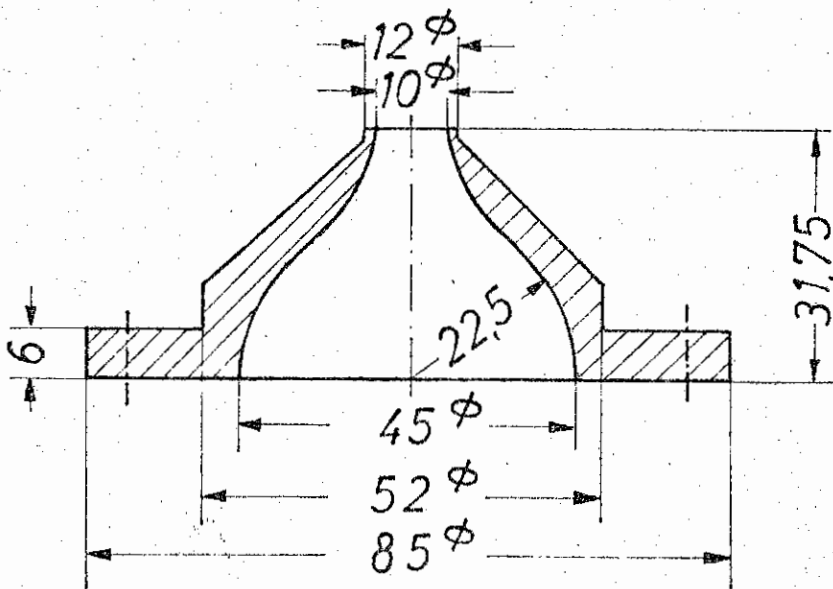


Bild 16. Brennerdüse

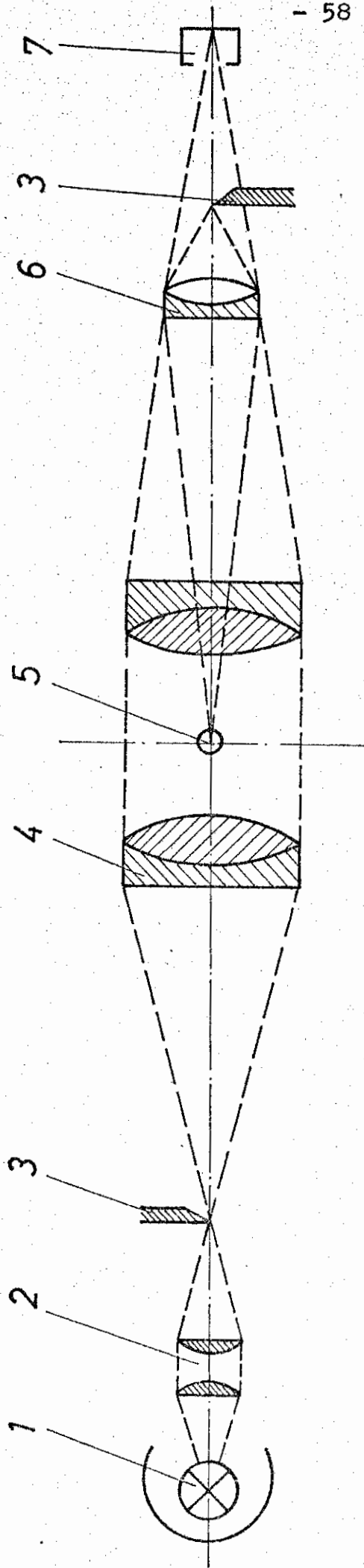


Bild 17. Skizze der optischen Anlage zur Erzeugung der Schlierenbilder  
nach Töpler

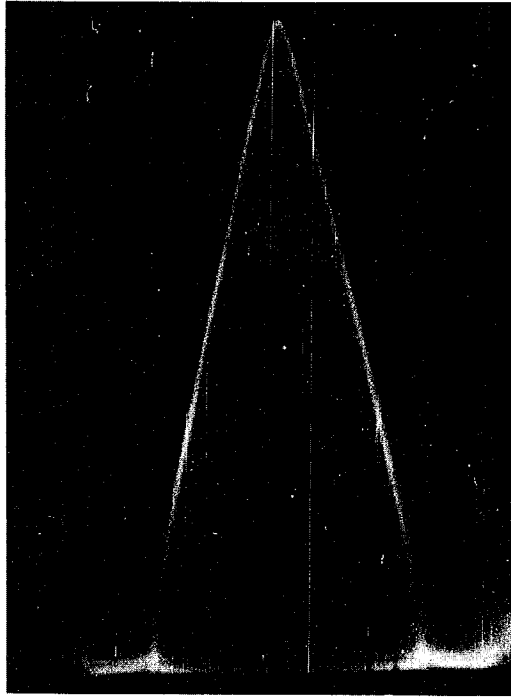


Bild 18. Schlierenbild des Flammenkegels

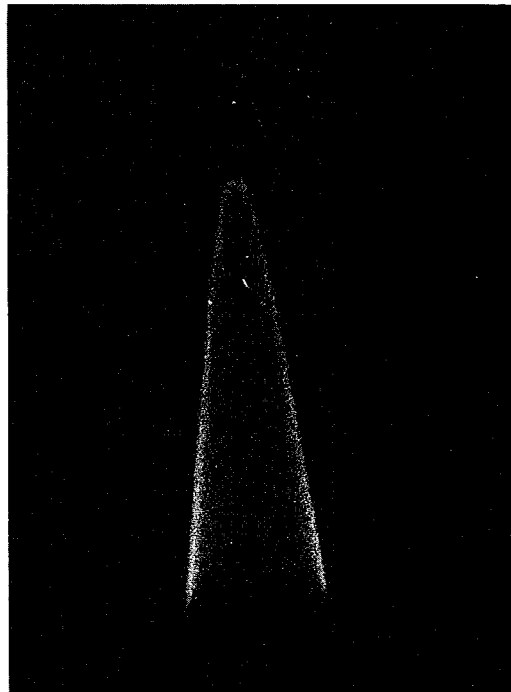


Bild 19. Lichtbild des Flammenkegels

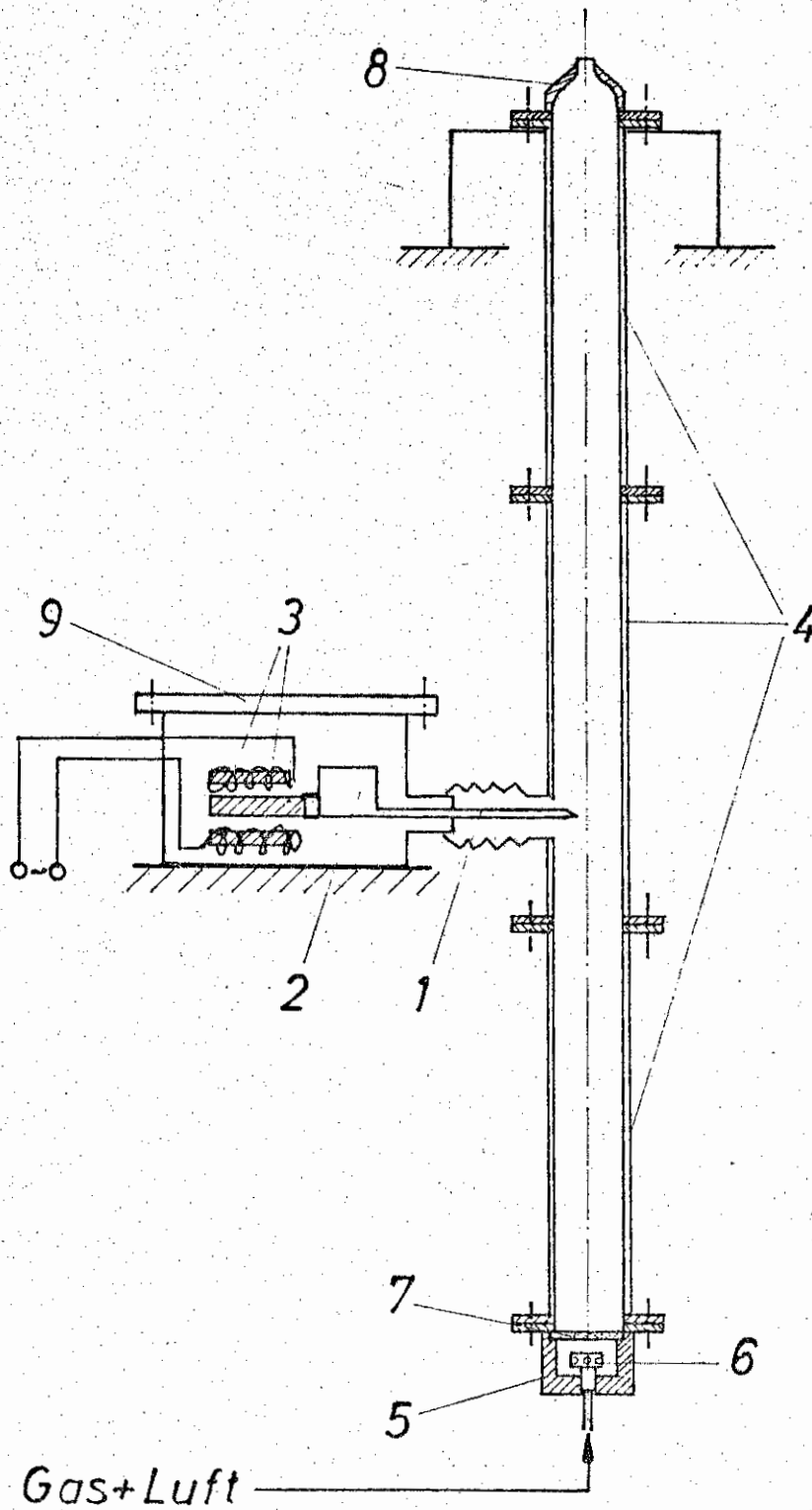


Bild 20. Schema der Pulverzugabevorrichtung mit Brennerdüse und Einlaufrohr



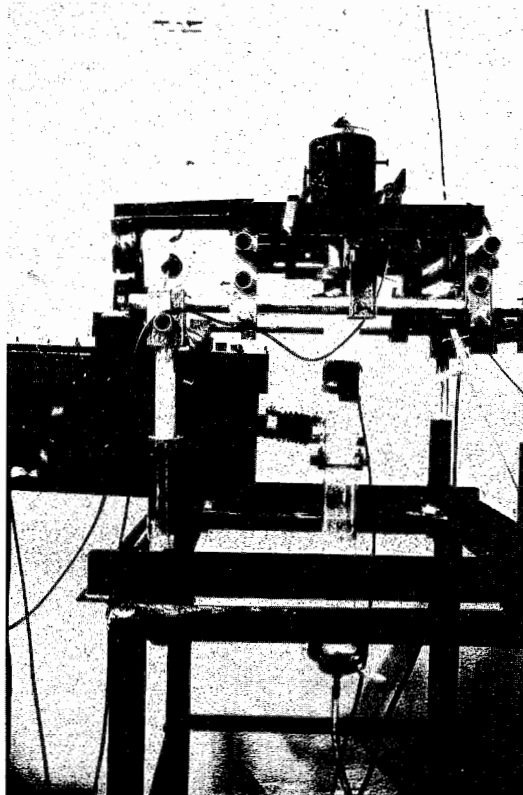


Bild 21. Pulverzugabevorrichtung und Prüfbrenner

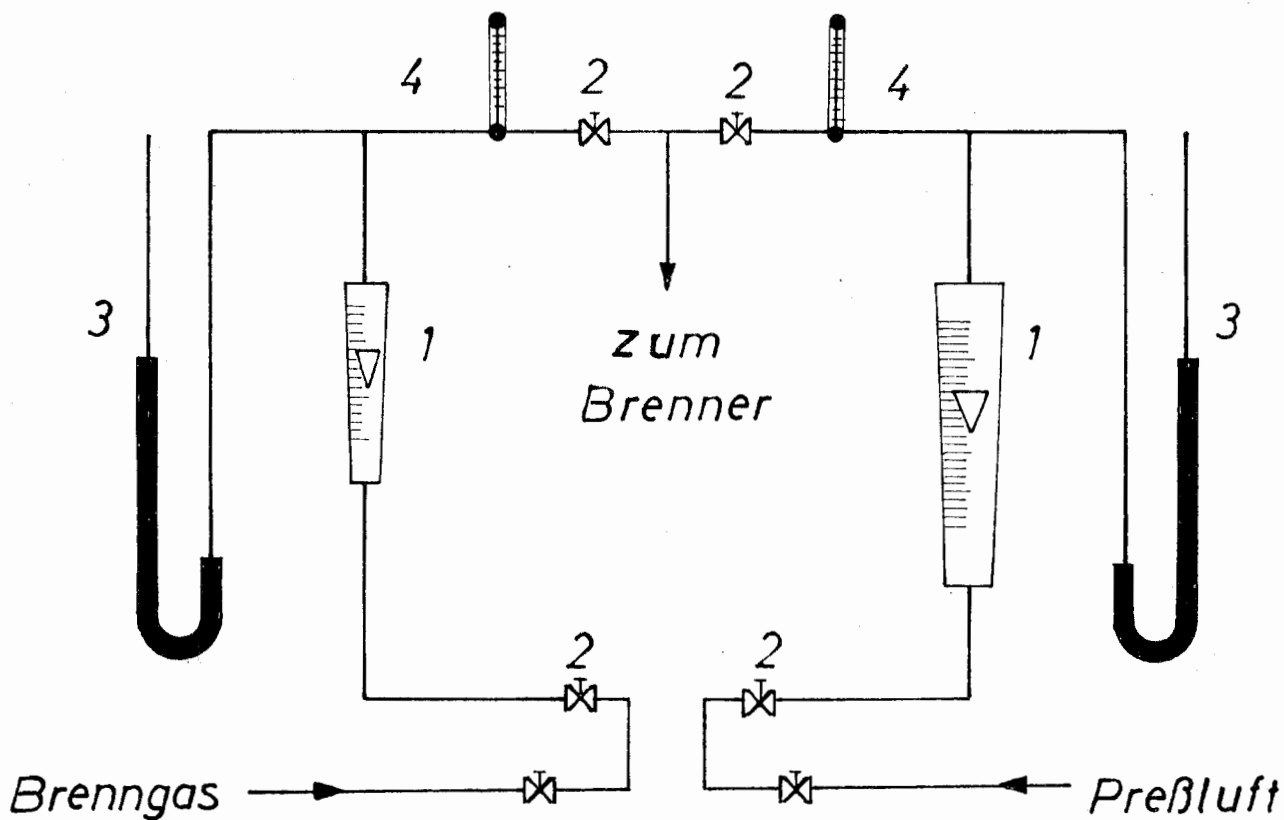


Bild 22. Schema der Anlage zur Messung der Gas- und Luftmenge

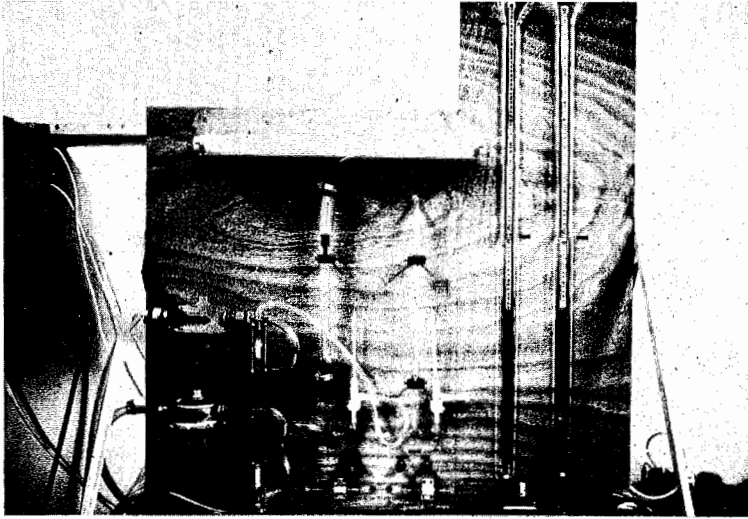


Bild 23. Anlage zur Messung des Brenngas- und Luftstroms

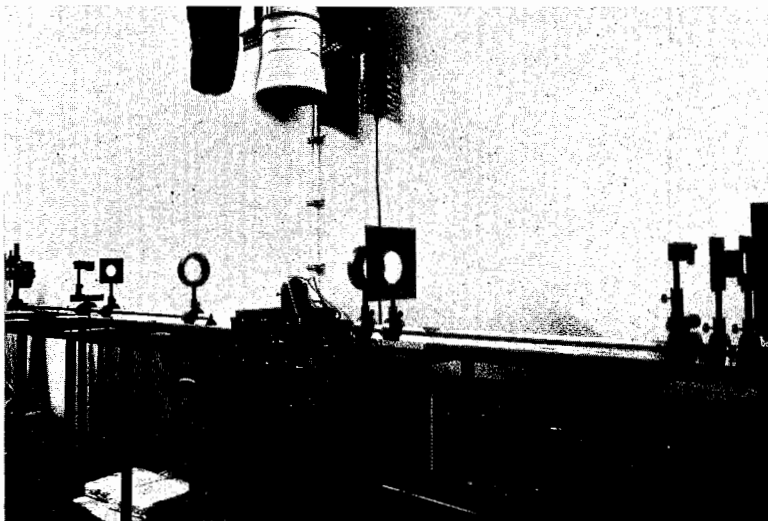


Bild 24. Schlierenoptische Anordnung zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit mit dem Prüfbrenner

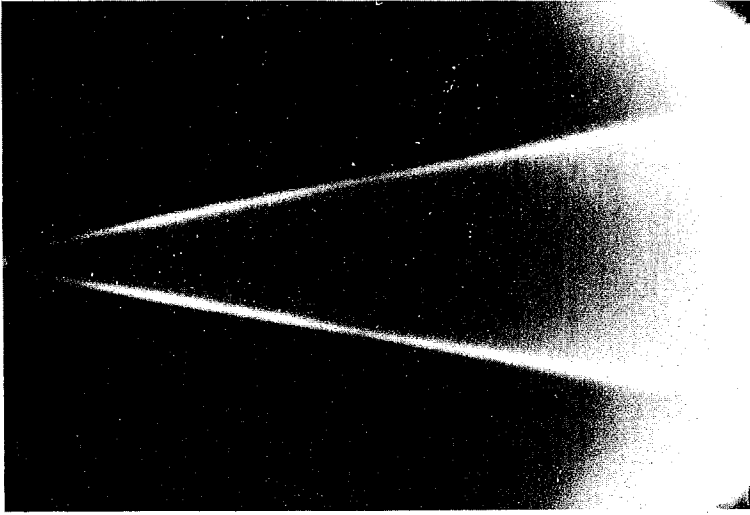


Bild 26. Schlierenbild des Flammenkegels  
mit Löschpulverzugabe



Bild 25. Schlierenbild des Flammenkegels  
ohne Löschpulverzugabe

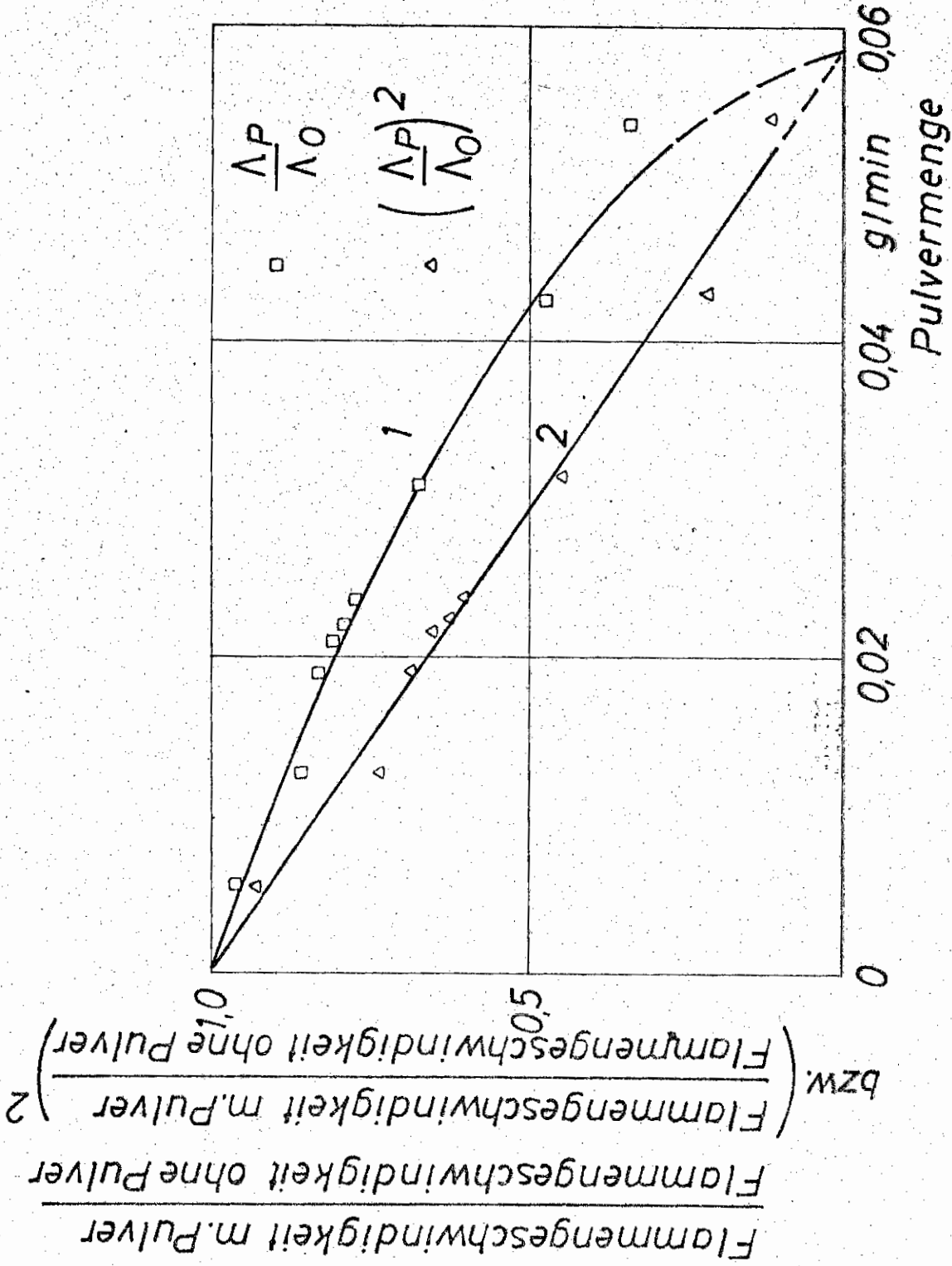


Bild 27. Pulverrate in Abhängigkeit von der normierten Flammengeschwindigkeit bzw. dem Quadrat der normierten Flammengeschwindigkeit

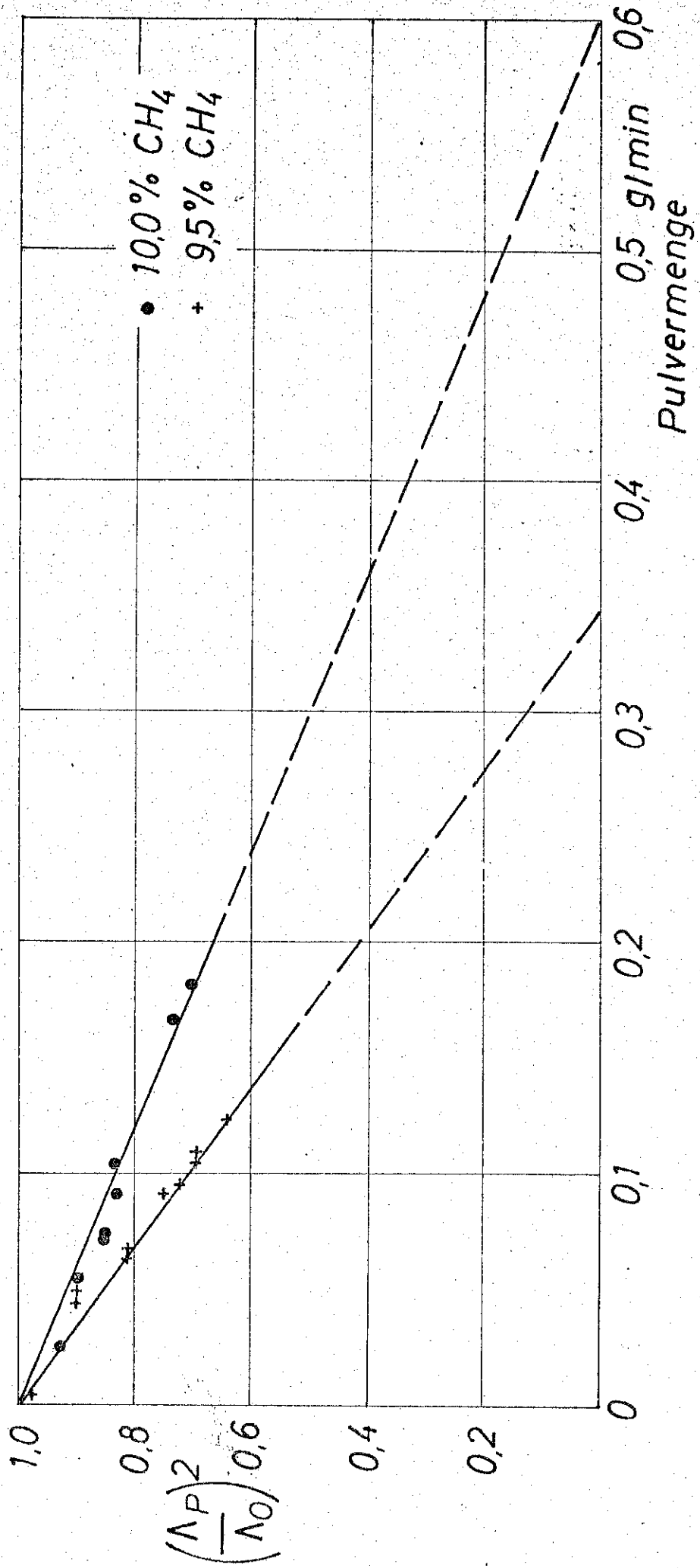


Bild 28. Pulverrate in Abhängigkeit von dem Quadrat der normierten Flammengeschwindigkeit für das Löschpulver A bei 9,5 % und 10,0 Vol-% CH<sub>4</sub>

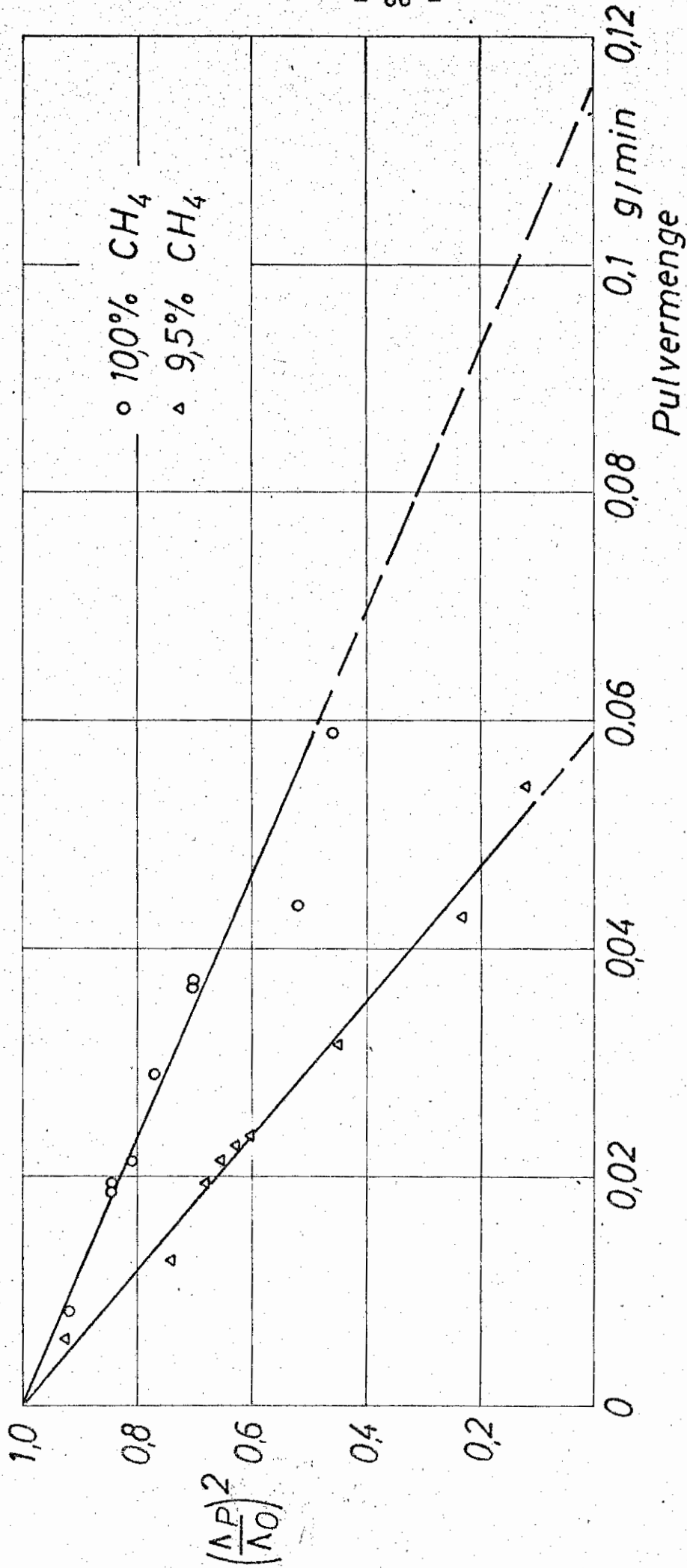


Bild 29. Pulverrate in Abhängigkeit von dem Quadrat der normierten Flammgeschwindigkeit für das Löschpulver B bei 9,5 und 10,0 Vol-% CH<sub>4</sub>

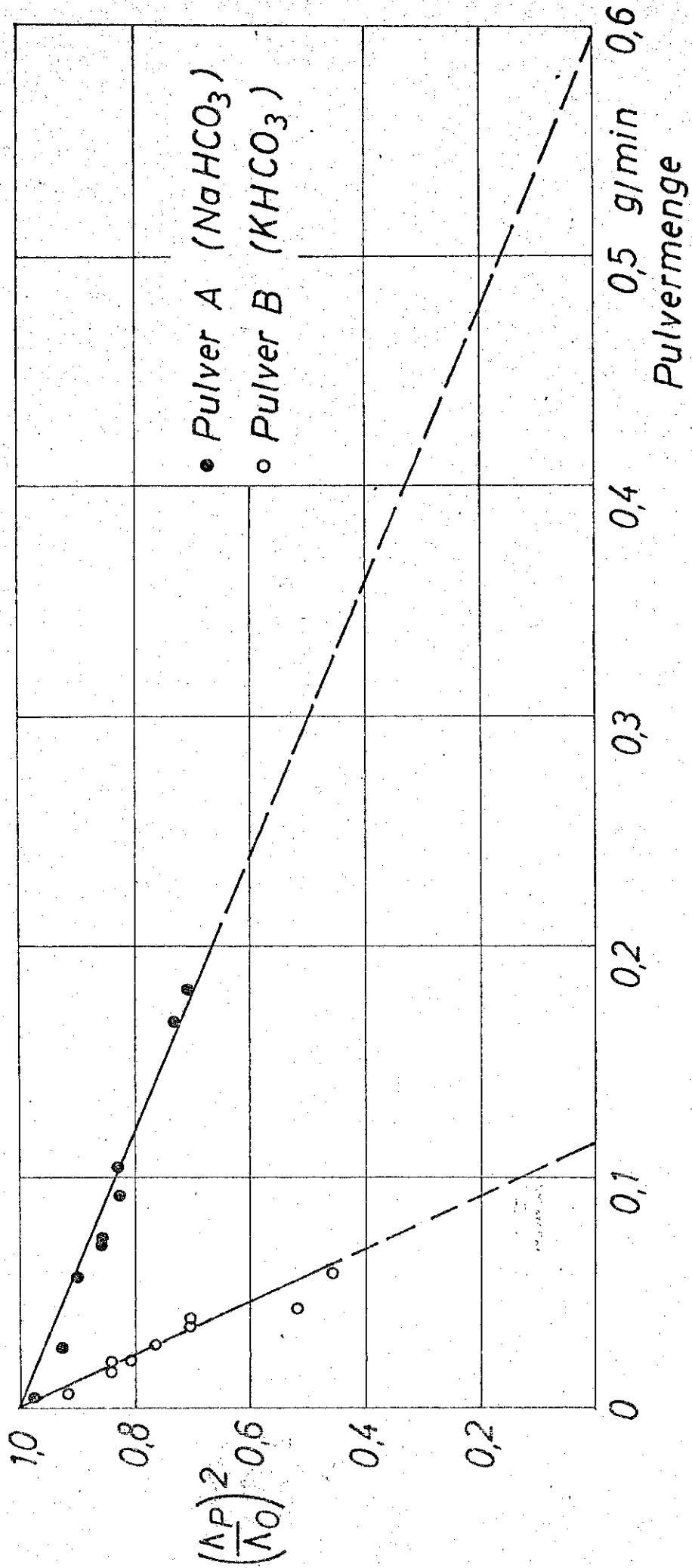


Bild 30. Vergleich zwischen der Löschwirksamkeit der Löschpulver A und B bei 10,0 Vol-%  $\text{CH}_4$

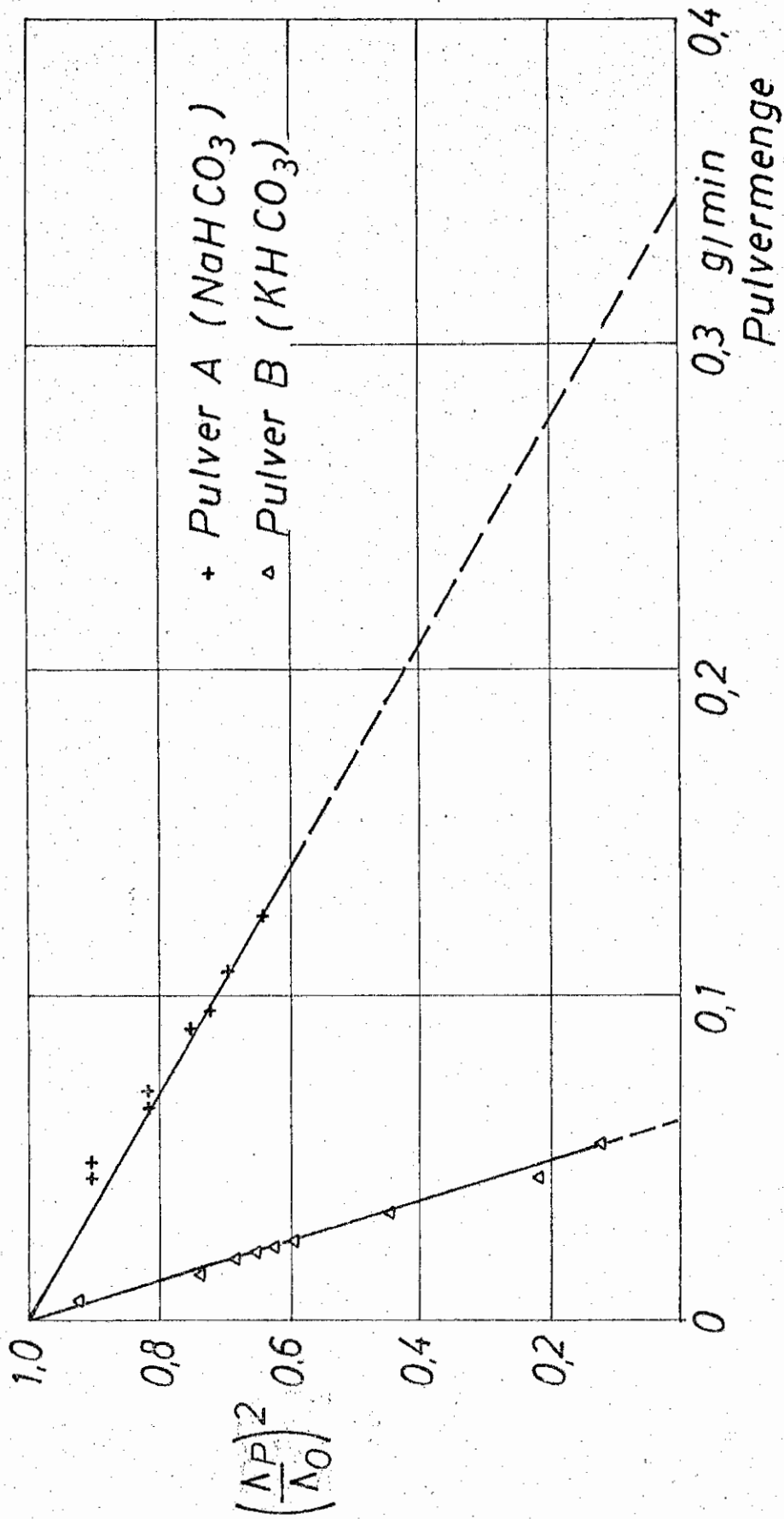


Bild 31. Vergleich der Löschwirksamkeit der Löschpulver A und B bei 9,5 Vol-% CH<sub>4</sub>



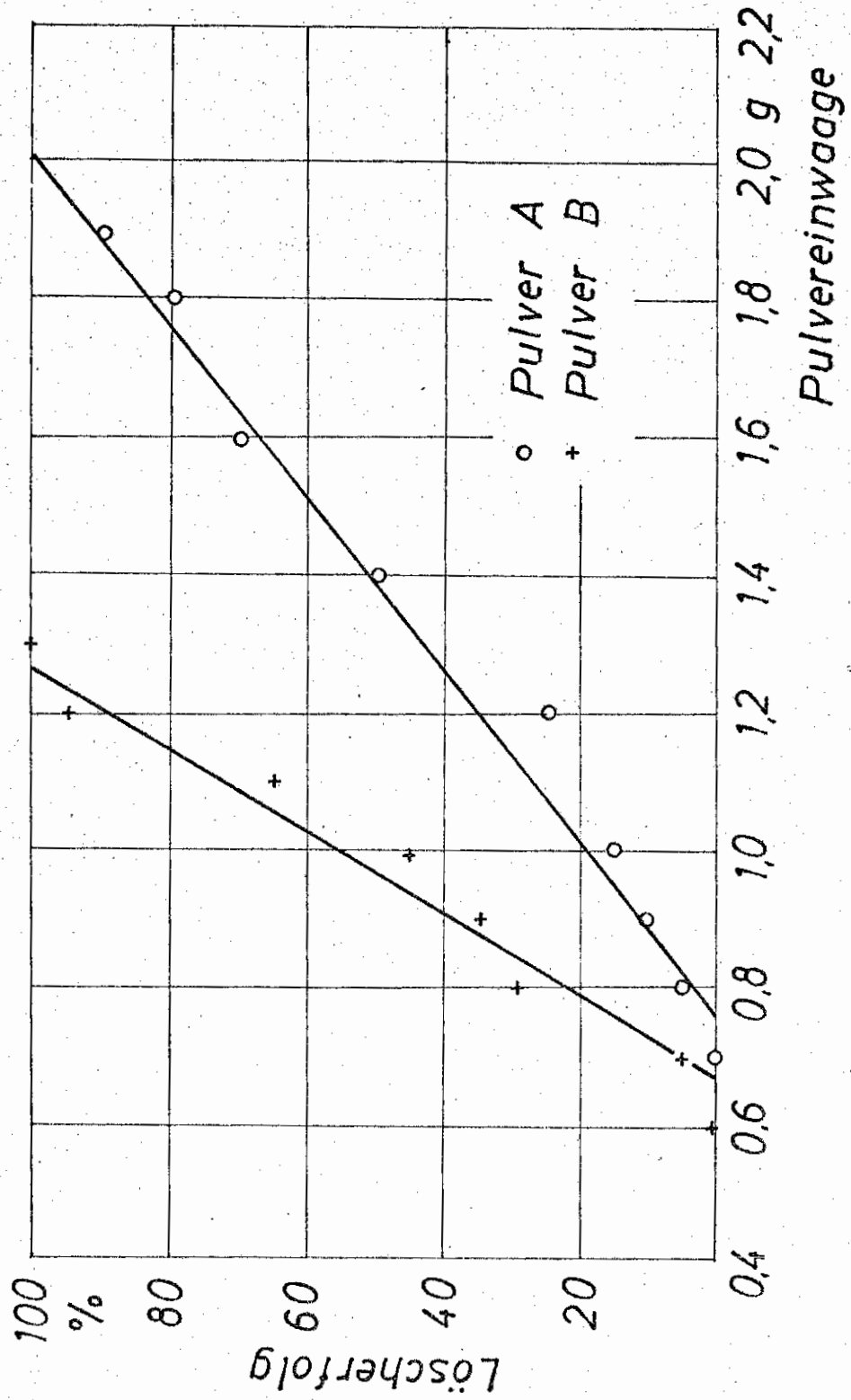


Bild 32. Löscherfähigkeit der Pulver A und B nach dem Prüfverfahren der Dynamit Nobel A.G.