

# AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab  
zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern  
(Fortsetzung des Forschungsberichtes Nr. 18)

# 20

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN  
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ  
AGF

Forschungsbericht Nr. 20

Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab  
zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern  
(Fortsetzung des Forschungsberichtes Nr. 18)

von

Dipl.-Ing. Wolfgang Hoffmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
Dezember 1971

FA.Nr. 54 (3/70)

Forschungsbericht Nr. 20

Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab  
zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern  
(Fortsetzung des Forschungsberichtes Nr. 18)

Dipl.-Ing. W. Hoffmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde eine Laborprüfapparatur entwickelt, mit der die zur Löschung einer definierten Prüfflamme benötigte Pulvermenge pro Zeiteinheit ermittelt werden kann. Bei diesem Verfahren wird die Abnahme der laminaren Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Pulverkonzentration gemessen. Die zu prüfende Pulvermenge wird kontinuierlich mit Hilfe einer Schüttelrinne einem Methan-Luft-Strom zugeführt, der eine laminare Vormischflamme erzeugt. Mit der Laborprüfapparatur wurden 8 handelsübliche Trockenlöschpulver untersucht. Es wurde sowohl der Einfluß der spezifischen Oberfläche als auch der chemischen Zusammensetzung bestimmt.

Außerdem wird ein Meßverfahren beschrieben, bei dem als Maß für die Wirksamkeit von Trockenlöschpulver die Änderung der Radikalkonzentration in der Flamme herangezogen wurde. Mit Hilfe eines empfindlichen Fotovervielfachers und eines Interferenzfilters wurde die Konzentrationsänderung des OH-Radikals bei 6 ABC- und BCE-Pulvern gemessen. Die Versuchsauswertung ergab eine lineare Abhängigkeit der OH-Konzentration von der zugegebenen Löschpulvermenge. Beide Meßmethoden sind als Prüfverfahren geeignet. Das Verfahren, das sich auf die Messung der Flammengeschwindigkeit stützt, wird bei Prüfungen der Löschwirksamkeit dem anderen vorgezogen, weil es einfacher zu handhaben ist und einen geringeren Zeitbedarf für die Messungen benötigt. Beide Meßverfahren sind aber notwendig, um Aussagen über den Löschmechanismus der Trockenlöschpulver machen zu können.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. AUFGABENSTELLUNG	1
3. MESSVERFAHREN	3
3.1. Bestimmung der Löschwirksamkeit mit Hilfe der Flammengeschwindigkeit einer Prüf- flamme	3
3.2. Bestimmung der Löschwirksamkeit mit Hilfe der Strahlungsintensität einer Prüf- flamme	6
4. MESSEINRICHTUNGEN UND VERSUCHSDURCH- FÜHRUNG	12
4.1. Aufbau der Prüfapparatur der Forschungs- stelle für Brandschutztechnik	12
4.2. Versuchsaufbau zur Bestimmung der OH-Strahlungsintensität	14
4.3. Versuchsdurchführung	17
5. VERSUCHSERGEBNIS UND VERSUCHSAUSWERTUNG	18
5.1. Die Abhängigkeit der Flammengeschwindig- keit von der Pulverbeladung	19
5.2. Die Abhängigkeit der OH-Strahlungs- intensität von der Pulverbeladung	23
5.3. Anwendbarkeit der beiden Meßmethoden als Prüfverfahren zur Bestimmung der Löschwirk- samkeit von Trockenlöschpulvern	27
6. ZUSAMMENFASSUNG	29
7. LITERATURVERZEICHNIS	32
8. TABELLEN UND BILDER	33

## 1. EINLEITUNG

In den letzten Jahren wurden verschiedene Prüfmethode n zur Beurteilung der Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern entwickelt. Die Prüfung kann entweder durch Laborteste oder durch Versuche im Freien an praxisnahen Brandobjekten, auch Feldteste genannt, vorgenommen werden. Bei den Feldtesten erwies sich als nachteilig, daß verschiedene Einflußgrößen wie Windgeschwindigkeit, Brandgröße und Branddauer des Testfeuers nicht vollständig erfaßt werden können. Bei Großversuchen ist es außerdem schwierig, reproduzierbare Werte zu erhalten, da neben den obigen Faktoren auch die Ausbringapparatur den Ausstoßvorgang beeinflußt und der Geschicklichkeit der Bedienungsperson große Bedeutung zukommt. Bei Laborversuchen hingegen können die Versuchsbedingungen konstant gehalten werden. Die Ergebnisse sind weitgehend reproduzierbar. Der Einfluß verschiedener Größen wie z.B. die chemische Zusammensetzung, die Teilchengröße und -form sowie die spezifische Oberfläche kann bei Versuchen im Labormaßstab genauer untersucht werden. Die Versuchskosten sind weit niedriger als bei Großversuchen.

## 2. AUFGABENSTELLUNG

Vergleicht man die bekanntesten Laborprüfmethode n miteinander, so stellt man mit einer Ausnahme bei allen ein gemeinsames Kennzeichen fest: Der Anwendungsfall in der Praxis wird in verkleinertem Maßstab nachgebildet, d.h., das Löschpulver wird durch eine Vorrichtung von außen in die Flamme gebracht. Eine Ausnahme bildet die Prüfapparatur der Fire Research Station in Großbritannien. Bei dieser Apparatur wird das zu prüfende Pulver dem Gasstrom einer Testflamme zugegeben. Ein Vergleich der Meßergebnisse der Laborprüfapparaturen untereinander ist schwierig, da die Arbeitsweise der jeweiligen Apparatur einen Einfluß auf die Versuchswerte ausübt. Unter-

suchungen an der Prüfapparatur der Dynamit Nobel A.G. haben gezeigt, daß gerade die Ausbringvorrichtung die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Pulverwolke stark beeinflusst [1]. Es müssen sehr viele Versuche für einen Meßpunkt durchgeführt werden, damit die Ergebnisse, die mit zufälligen Fehlern behaftet sind und in vielen Fällen erheblich streuen, statistisch ausgewertet werden können. Wird außerdem das Pulver von außen in die Flamme gebracht, so gelangt nur ein Teil der ausgestoßenen Menge in die Flamme und trägt zur Löschung bei. Die übrigen Pulverteilchen sind am Löschvorgang nicht beteiligt. Die Pulvermenge, die die Löschung verursacht, kann an diesen Prüfapparaturen nicht gemessen werden. Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik entwickelte daher eine neue Apparatur im Labormaßstab, bei der die Prüfung der Löschwirksamkeit weniger von der Unzulänglichkeit der Testapparatur beeinflusst wird [1].

Wird einer Flamme Löschpulver beigegeben, so wird die Flamme daran gehindert, sich auszubreiten. Zur Kennzeichnung dieses Vorganges können zwei Größen herangezogen werden. Es sind dies die Flammengeschwindigkeit und die Konzentrationsänderung von Radikalen, die den Verbrennungsablauf entscheidend bestimmen. Bei der Prüfapparatur der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde die laminare Flammengeschwindigkeit als Meßgröße herangezogen. In dieser Arbeit wird außerdem über Versuche berichtet, bei denen neben der laminaren Flammengeschwindigkeit auch die Änderung der Strahlungsintensität des OH-Radikals bestimmt wurde, die als ein Maß für die Konzentrationsänderung eines Radikals dient. Die Versuche wurden mit handelsüblichen Trockenlöschpulvern verschiedener Zusammensetzung durchgeführt. Anhand der Versuchsergebnisse wird untersucht, inwieweit sich die beiden Meßmethoden als Prüfverfahren zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern eignen.

### 3. MESSVERFAHREN

#### 3.1. Bestimmung der Löschwirksamkeit mit Hilfe der Flammgeschwindigkeit einer Prüf Flamme

Bei diesem Meßverfahren wird von der Tatsache ausgegangen, daß die Flammgeschwindigkeit für den Verbrennungsablauf in einer Flamme die bestimmende Größe ist. Wird einer Flamme Löschpulver beigegeben, so verlangsamt sich die Flammgeschwindigkeit gemäß der Wirksamkeit und der Menge des zugeführten Pulvers. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Flammgeschwindigkeit und dem Löschmechanismus der Pulver. Das Problem, die Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern zu bestimmen, beschränkt sich also darauf, die Flammgeschwindigkeit eines Brennstoffes zu ermitteln, dem das zu prüfende Pulver beigegeben wird. Die theoretischen Grundlagen wurden in [1] ausführlich behandelt und werden daher hier nur kurz skizziert. Als Flammgeschwindigkeit wird diejenige Geschwindigkeit definiert, mit der sich eine Flammenfront - der Ort an dem der Brennstoff mit dem Sauerstoff der Luft reagiert - relativ zu einem brennbaren Gas-Luft-Gemisch bewegt. Betrachtet man z.B. eine Bunsenflamme, so ergibt sich hier eine stationäre Verbrennungsfrent in Form eines Kegels (Bild 1). Da nur eine laminare Strömung eine stetige Flammenfront liefert, wurde eine laminare Vormischflamme als Prüf flamme verwendet. Für diesen stationären Fall ist bei konstantem Massenfluß die Flammgeschwindigkeit definiert als das in der Zeiteinheit durch die Flammenfront durchgesetzte Volumen des Gas-Luft-Gemisches. Geht man davon aus, daß dieses Gemisch in der Reaktionszone mit der Flammgeschwindigkeit  $\Lambda$  verbrennt, so ergibt sich nach Bild 1 folgende Beziehung:

$$\rho_0 \cdot \bar{u} \cdot F_D = \rho_F \cdot \Lambda \cdot F_F \quad (1)$$

Es bedeutet:

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

Wendet man diese Beziehung auf die Zone vor der Flammenfront, der sog. Vorwärmezone, an, so können  $\rho_0$  und  $\rho_F$  gleichgesetzt werden und es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der Flammengeschwindigkeit und der Ausströmgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches:

$$\Lambda = \bar{u} \cdot \frac{F_D}{F_F} \quad (2)$$

Die Flammenfront wird dabei als Unstetigkeitsfläche mit der Dicke Null angesehen, welche die mit dem Gas-Luft-Gemisch und die mit den Verbrennungsprodukten angefüllten Räume voneinander trennt.

Die Bestimmung der Flammengeschwindigkeit beruht also auf der Vermessung der Brennfläche und des Gas-Luft-Volumenstromes. Aus dem Volumenstrom wird bei gegebenem Austrittsquerschnitt des Brenners die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches berechnet. Unter der Brennfläche wird die Fläche des Primärverbrennungskegels, wie er im Bild 1 skizziert ist, verstanden.

Die diesen Überlegungen zugrunde liegende, idealisierte Flammenform weicht von der realen Flamme in zwei Punkten ab:

1. Da die Gasgeschwindigkeit und die Flammengeschwindigkeit über die Bezugsfläche nicht konstant sind, ist die Flammenfläche am Flammenfuß gekrümmt und die Kegelspitze abgerundet.
2. Die Brenzone hat eine endliche Dicke.



Alle Fehler, die bei der Auswertung der Brennfläche auftreten, lassen sich vermeiden, wenn folgende geometrische Beziehungen berücksichtigt werden. Wie Bild 1 zeigt, kann der Geschwindigkeitsvektor des Gas-Luft-Gemisches in der Brennzone  $u_0$  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 nach folgender Beziehung berechnet werden:

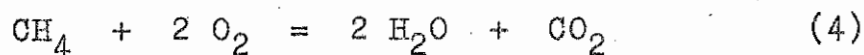
$$\Lambda = u_0 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

Die Genauigkeit dieser Meßmethode hängt neben der Geschwindigkeitsmessung von 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" mit kugeligem Anschluß an die Einlaufrohrstrecke besteht. Die Form der Düse mit den wichtigsten Abmessungen, wie sie für die Testapparatur verwendet wurde, kann [1] entnommen werden. Wie in [1] weiter dargelegt wurde, kann das Geradenstück in der Leuchtzone der Flamme nur mit großen Schwierigkeiten festgelegt werden. Die Grenzen des Leuchtkegels sind sehr unscharf, und das Intensitätsmaximum ist ohne optische Hilfsmittel nur sehr schwer zu erkennen. 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 infolge der Dichteänderung auf seinem Weg durch die Brennzone vom Frischgas- in den Abgas-

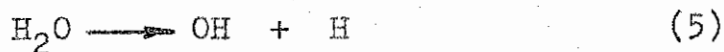
zustand erfährt. Die Ausmessung des Winkels am Schlierenbild in Verbindung mit einem Düsenbrenner wird als Düsenbrenner-Schlierenbild-Kegelwinkel-Verfahren bezeichnet. Es wurde im wesentlichen von Lindow ausgearbeitet [2]. Aus der Vielzahl an bekannten schlierenoptischen Systemen wurde bei dieser Meßmethode die Anordnung nach Töppler [3] angewendet. Dieses Schlierenverfahren ermöglicht durch exakte optische Zuordnung von Gegenstands- und Bildpunkten, die Flammenfront und den Brennermund über einen wählbaren Bereich vergrößert oder verkleinert sichtbar zu machen. 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 2).

### 3.2. Bestimmung der Löschwirksamkeit mit Hilfe der Strahlungsintensität einer Prüf Flamme

Die Verbrennung ist ein Oxydationsvorgang, der sich aus einzelnen Reaktionsschritten zusammensetzt. So erfolgt z.B. die Methanverbrennung nicht nach der Bruttoreaktionsgleichung



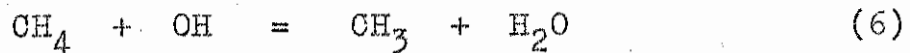
sondern über mehrere Zwischenstufen. Der erste Reaktionsschritt wird als Startreaktion bezeichnet, bei der sich aktive Teilchen z.B. nach folgender Reaktionsgleichung bilden:



Aktive Teilchen sind freie Atome und Radikale, die sehr energiereich sind. Radikale sind Atomgruppen, die mehrere freie Valenzen besitzen und sich durch eine große Reaktionsfähigkeit auszeichnen. Wichtige Radikale bei der Verbrennung sind z.B. OH, C<sub>2</sub>, CH und CH<sub>3</sub>.

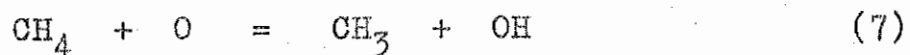
Der Startreaktion folgen Reaktionen, die den Verbrennungsvorgang aufrecht erhalten. Man unterscheidet dabei Kettenreaktionen und Kettenverzweigungsreaktionen.

Bei der Kettenreaktion



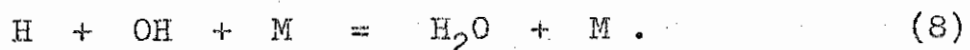
befinden sich gleich viele aktive Teilchen in den Ausgangs- und Endprodukten. Daher bleibt die Reaktionsgeschwindigkeit konstant.

Bei der Kettenverzweigungsreaktion



werden mehr aktive Teilchen gebildet als verbraucht werden. Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt ständig zu.

Verläuft eine Reaktion nur über Kettenverzweigungsreaktionsschritte, so führt dies zu einer Explosion, da der Überschuss an aktiven Teilchen die Reaktionsgeschwindigkeit in kürzester Zeit sehr stark erhöht. Dieser Vorgang wird bei der Verbrennung durch Kettenabbruchreaktionen gebremst. Ein Beispiel hierfür ist



Hier werden aktive Teilchen in energiearme Endprodukte umgesetzt. M stellt hierin eine Masse dar, wie z.B. die Brennerwand, große Moleküle oder Staubteilchen, die den Energieüber-

schoß der Reaktion aufnehmen können.

Die freien Atome und Radikale spielen also eine wesentliche Rolle bei der Verbrennung. Sie werden daher auch den Löschvorgang entscheidend bestimmen, so daß die Änderung der Radikalkonzentration ein Maß für die Löschwirksamkeit eines Pulvers ist. Freie Atome und Radikale haben aber eine sehr kurze Lebensdauer, so daß sie mit den herkömmlichen Gasanalysengeräten wie z.B. dem Orsatapparat oder einem Ultrarotabsorptionsspektrometer nicht gemessen werden können. Daher wurden andere Meßtechniken entwickelt, wie z.B. die Massenspektrometrie, die Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie, Kalorimetrische Meßmethoden, die Absorptions- und die Emissionsspektroskopie. Ist die Elementarreaktion des Radikals bekannt, so kann auch die Konzentration der stabilen Produkte gemessen und daraus die Radikalkonzentration berechnet werden. Diese Meßtechniken sind meist für bestimmte Anwendungsfälle entwickelt worden und die wenigsten lassen sich allgemein für den Nachweis beliebiger Radikalreaktionen verwenden. Bei einigen Methoden wie z.B. der Massenspektrometrie werden Gasproben aus der Flamme abgesaugt. Dieses Verfahren läßt sich jedoch nur bei größeren Flammen anwenden. Kleinere Flammen werden durch den Absaugvorgang gestört. Diese Methode versagt auch, wenn sich Pulverteilchen in der Flamme befinden, da diese die sehr kleinen Absaugesonden verstopfen bzw. blockieren würden. In diesem Fall können nur sog. berührungslose Meßmethoden angewendet werden, bei denen keine Sonde in die Flamme gebracht wird. Geeignete Methoden sind dafür die Absorptions- und die Emissionsspektroskopie. Diese Methoden basieren auf der Tatsache, daß in Flammen einzelne Bandenspektren zu beobachten sind, die den verschiedenen Radikalen zugeordnet werden können. Im Gegensatz zu Festkörpern, die Energie in einem kontinuierlichen Spektrum ausstrahlen (Bild 3), absorbieren und emittieren Radikale nur in ganz bestimmten Wellenlängenbereichen. In Bild 4 sind die Bandenspektren der

wichtigsten bei der Verbrennung auftretenden Radikale OH, C<sub>2</sub> und CH aufgezeichnet. Die Intensität des entsprechenden Bandenspektrums ist ein Maß für die Konzentration des betreffenden Radikals.

Obwohl die von den Radikalen emittierte Strahlung weit schwächer ist als die Strahlung eines glühenden Festkörpers, gibt es Detektoren, die die Emission der Radikalstrahlung registrieren. Da die Detektoren einen größeren Wellenlängenbereich erfassen, müssen die einzelnen Banden ausgefiltert werden. Dies geschieht mit monochromatischen Interferenzfiltern, die nur für einen schmalen Wellenlängenbereich durchlässig sind. Bild 5 zeigt die Durchlaßkurve eines solchen Filters. Die Breite des Durchlaßbereiches kann aus fertigungstechnischen Gründen nicht beliebig klein gehalten werden. Sie wird charakterisiert durch die Halbwertsbreite der Filterkurve. So beträgt die Halbwertsbreite des in Bild 5 dargestellten Filters ca. 20 nm. Die Durchlässigkeit der Filter beträgt je nach Wellenlänge und Halbwertsbreite 10 bis 60 % der maximal einfallenden Strahlung.

Wie bereits erwähnt, ist die Strahlungsintensität der Radikale gering, sie wird außerdem nochmals durch das Interferenzfilter stark geschwächt. Um solche geringen Intensitäten messen zu können, werden hochempfindliche Lichtdetektoren benötigt. Diese Detektoren sind als Fotovervielfacher oder als Sekundärelektronenvervielfacher bekannt. Es handelt sich hierbei um eine Elektronenröhre, die so aufgebaut ist, daß sie das einfallende schwache Licht so verstärkt, daß analog zum einfallenden Licht eine meßbare Spannung abgenommen werden kann.

Der Fotovervielfacher besteht aus einer Fotokatode, einem Beschleunigungssystem- bzw. Fokussiersystem, einem Vervielfachersystem, in dem die Fotoelektronen durch Sekundärelektronenemission vervielfacht werden, und einer Anode.

Die Fotokatode ist meist auf der Innenseite des Fensters, durch das die Strahlung auf die Katode gelenkt wird, aufgedampft. In Bild 6 ist eine solche Elektronenröhre schematisch skizziert. Sie arbeitet wie folgt: Wenn ein Lichtstrahl durch das Fenster auf die Fotokatode a auftrifft, werden aus der Katode Fotoelektronen ausgelöst. Es entsteht ein sogenannter Katodenfotostrom. Diese emittierten Elektronen werden durch das Fokussiersystem b gebündelt auf die 1. Dynode des Vervielfachersystems c gelenkt. Das Vervielfachersystem c besteht aus einer Anzahl von Vervielfacherstufen. Bei einer Vervielfacherstufe befindet sich am Anfang eine elektronenemittierende Elektrode und am Ende eine positive Sekundäremissionselektrode (Dynode), der sich eine Absaugelektrode anschließt. In diesem Vervielfachersystem wird der Katodenfotostrom vervielfacht, d. h. die auftreffenden Fotoelektronen lösen aus der Dynode weitere Fotoelektronen aus und erhöhen dadurch den Fotokatodenstrom. Die letzte Absaugelektrode ist die Anode d, an der das Ausgangssignal, z. B. ein Strom oder eine Spannung, abgenommen werden kann. Das Ausgangssignal ist proportional der Intensität des auf die Katode auftreffenden Lichtstrahles.

Die wichtigsten Kenngrößen eines Fotovervielfachers sind: Spektrale Empfindlichkeit, Katodenempfindlichkeit, Quantenausbeute der Fotokatode, Anodenempfindlichkeit, Stromverstärkung und Anodendunkelstrom.

Die spektrale Empfindlichkeit gibt an, für welchen Wellenlängenbereich die Katode empfindlich ist. Dies hängt einmal vom Material der Katode ab, für die Caesium-Antimon-Schichten, Trialkali-Schichten, Bialkalischichten und Schichten aus Caesium auf oxydiertem Silber verwendet werden, und zum anderen vom Material des Fensters. Hartglasfenster sind für kurzwelliges Licht undurchlässig. Quarzglasfenster dagegen lassen die ultraviolette Strahlung durch.

Die Katodenempfindlichkeit ist ein Maß dafür, welche Lichtintensitäten noch angezeigt werden. Sie wird angegeben in  $\mu\text{A}/\text{lm}$  oder  $\text{mA}/\text{W}$ .

Die Quantenausbeute der Fotokatode ist das Verhältnis der emittierten Fotoelektronen zu den einfallenden Photonen. Sie ist vom Katodenmaterial und der Wellenlänge abhängig. In Bild 7 ist die Quantenausbeute von Katoden verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt.

Die Anodenempfindlichkeit zeigt an, wie groß das Ausgangssignal bei einer gegebenen Beleuchtungsstärke ist. Sie ist abhängig von der Gesamtspannung des Fotovervielfachers und der Spannungsverteilung an den Vervielfacherstufen.

Die Stromverstärkung ist ein Maß für die Verstärkung des Katodenfotostroms im Vervielfachersystem. Sie ist der Quotient aus dem Anodenfotostrom und Katodenfotostrom bei einer bestimmten Gesamtspannung und Spannungsverteilung an den Vervielfacherstufen. Die Werte der Stromverstärkung sind meist größer als  $10^6$ . Da der Anodenstrom normalerweise unter  $1 \text{ mA}$  liegt, beträgt der Katodenfotostrom nur einige Zehntel  $\text{nA}$ . Dies kennzeichnet die hohe Lichtempfindlichkeit eines Fotovervielfachers.

Der Anodendunkelstrom ist der ohne Bestrahlung der Katode über den Anodenanschluß fließende Strom. Dieser wird im wesentlichen durch die Umgebungstemperatur verursacht. Die Katoden- und Dynodenmaterialien sind hinsichtlich der Abgabe von Elektronen so aktiv, daß schon bei Raumtemperaturen aus der Katode Elektronen austreten, die den wesentlichen Teil des Dunkelstromes ausmachen. Lichtsignale, die sehr schwach sind, können nicht gemessen werden, wenn der von ihnen verursachte Anodenstrom kleiner ist als der Dunkelstrom, d.h. der Dunkelstrom ist ein Maß für die Empfindlichkeit eines

Fotovervielfachers. Der Dunkelstrom kann durch Kühlen des Fotovervielfachers auf Temperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  erheblich gesenkt werden, wodurch die Lichtempfindlichkeit wesentlich erhöht wird. Weitere wesentliche Voraussetzungen für einen störungsfreien Betrieb sind ein lichtundurchlässiges Gehäuse und Abschirmungen gegen äußere magnetische und elektrostatische Felder. Zum Betrieb eines Fotovervielfachers ist eine Speisespannung notwendig, die so auf die einzelnen Vervielfacherstufen verteilt wird, daß eine maximale Verstärkung erreicht wird. Da die Stromverstärkung direkt proportional den Änderungen der Gesamtspeisespannung ist, muß die Gesamtspeisespannung gut stabilisiert sein. Wird ein 10stufiger Fotovervielfacher benutzt, so entspricht die prozentuale Änderung der Stromverstärkung etwa dem 10fachen der der Gesamtspeisespannung. Um also die Stromverstärkung auf 1 % genau einzuhalten, muß die Gesamtspeisespannung auf 1 ‰ stabilisiert sein. Diese hochstabilisierte Speisespannung liegt an einem Spannungsteiler, von dem die Spannungen für die einzelnen Vervielfacherstufen abgegriffen werden.

#### 4. MESSEINRICHTUNGEN UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

##### 4.1. Aufbau der Prüfapparatur der Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Der Aufbau der Prüfapparatur mit einer genauen Beschreibung der Einzelteile ist in [1] ausführlich dargestellt. Daher wird nachfolgend die Apparatur nur kurz erläutert.

Die Prüfapparatur setzt sich im wesentlichen aus drei Teilen zusammen:

1. Vorrichtung zur kontinuierlichen Zugabe des Löschpulvers mit der Prüf Flamme.
2. Anlage zur Messung der Gas- und Luftmenge.



### 3. Schlierenoptische Anordnung zur Erzeugung des Schlierenbildes der Verbrennungszone.

Bild 8 zeigt den Prüfbrenner mit der Dosiereinrichtung und der Anlage zur Messung des Luft- und Brenngasstromes. Die kontinuierliche Zugabe der Löschpulver erfolgt durch eine Schüttelrinne mit Vorratsbehälter a. Die Rinne wird durch einen Magneten b in Schwingungen versetzt. Die Pulverrate kann einerseits durch die Schwingungsamplitude der Rinne geregelt werden, indem die am Magneten anliegende Wechselspannung verändert wird. Andererseits ist die Pulverrate auch eine Funktion des Behälteraustrittsquerschnitts. Die Pulverteilchen gelangen über die Schüttelrinne in den unteren Teil des Einlaufrohres l, das von dem Brenngas-Luft-Gemisch durchströmt wird. Der schwingungssteife Kasten c verbindet die Rinne mit dem Vorratsbehälter und Antriebsmagneten gasdicht und schwingungsfrei mit dem Einlaufrohr. Brenngas und Verbrennungsluft werden Stahlflaschen entnommen und über Druckminderventile und Feindruckregler e den Schwebekörper-Durchflußmessern d zugeführt. Hinter den Durchflußmessern werden die Ströme intensiv vermischt und über die Bodenplatte h und durch die Bohrungen des Strömungsverteilers i in das Einlaufrohr l geleitet. Die Sintermetall-Einlage j verteilt das Gemisch über den Querschnitt des Rohres und wirkt gleichzeitig als Rückschlagssicherung. Der mit den Pulverteilchen beladene Brenngas-Luft-Strom wird an der Brennerdüse k entzündet. Der Brennerand wird mit Wasser gekühlt und dadurch auf einer konstanten Temperatur von 40°C gehalten. So kann eine vorzeitige Zersetzung der Löschpulver und das Kondensieren des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes verhindert werden. Die Kühlwassertemperatur wird mit einem Eisen-Konstantan-Thermoelement überwacht. Die Ringelektroden m erzeugen ein elektrisches Feld, um die Pulverteilchen gleichmäßig über den Rohrquerschnitt zu verteilen. Die Brennerdüse ist im Strahlengang der schlierenoptischen Anlage so angeordnet, daß das Schlierenbild des Verbrennungskegels auf einer Filmoberfläche scharf abgebildet wird.

Zur Erzeugung des Schlierenbildes der Verbrennungszone wurde die schlierenoptische Anordnung nach Töpler [3] angewendet, die in Bild 9 skizziert ist. Der Kondensator b fokussiert das Strahlenbündel der Lichtquelle a, das durch die Schlierenblende c im Brennpunkt einseitig scharf abgeblendet wird. Der verbleibende Rest wird zwischen den zwei Achromaten d, den sogenannten Schlierenköpfen, parallel gerichtet. In diesen parallelen Strahlengang ist die zu untersuchende Schlierenzone e, im vorliegenden Falle die Flamme, so angeordnet, daß die Punkte ihrer Gegenstandsebene, d.h. bei kreisförmigem Brennerquerschnitt die Querschnittsebene in der Flammenachse, durch die Linse f scharf auf der als Bildebene dienenden Filmoberfläche in der Kamera g abgebildet werden. Das parallele Licht wird von dem zweiten Achromaten fokussiert. In dem entsprechenden Brennpunkt wird nun eine zweite Schlierenblende c der ersten soweit entgegengeschoben, bis das restliche Licht ausgeblendet ist. Dadurch können Lichtstrahlen die zweite Abblendkante 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 Auftreffort der Lichtstrahlen auf der Filmoberfläche entspricht genau der Stelle ihrer Ablenkung, so daß die Strahlen das Schlierenbild der Verbrennungszone erzeugen. Als Lichtquelle dient eine Quecksilberdampfhochdrucklampe (Osram, Type HBO 200 W).

#### 4.2. Versuchsaufbau zur Bestimmung der OH-Strahlungsintensität

Bei den hier beschriebenen Versuchen wurde die Änderung der Emission der OH-Strahlung in Abhängigkeit von der Löschpulverkonzentration an einer vorgemischten Methan-Luft-Flamme bestimmt. Da sich die Flammenhöhe unter dem Einfluß des Pulvers stark ändert, kann zur Emissionsmessung nicht die gesamte Flamme auf dem Fenster des Fotovervielfachers abgebildet werden, wenn größere Meßfehler vermieden werden sollen.

Dies liegt in der Arbeitsweise des Fotovervielfachers begründet. Wird ein fester Abstand zwischen der Flamme und dem Fotovervielfacher eingehalten, muß der Abbildungsmaßstab so gewählt werden, daß auch die längste Flamme noch auf dem Fenster bzw. der Fotokatode der Röhre vollständig abgebildet wird. Die Flamme wird aber bei größeren Pulvermengen etwa doppelt so lang, als die Flamme ohne Pulver. Dies bedeutet, daß die Flamme ohne Pulver nur einen kleineren Teil der Fotokatode beleuchtet, und diese dadurch örtlich stärker bestrahlt wird. Dies kann zu Meßfehlern führen, da der Fotovervielfacher eine andere Bestrahlungsstärke als die tatsächliche vortäuscht. Der Fehler kann vermieden werden, wenn nur ein kleinerer Teil der Flamme abgebildet und die Emission längs der Flamme beobachtet wird. Bei diesem Verfahren ist man von der Flammenlänge unabhängig und kann mit einem festen Abstand zwischen der Flamme und dem Fotovervielfacher arbeiten.

Es wurde daher ein System aus Blenden mit verschiedenen Öffnungen und einer Quarzlinse so aufgebaut, daß ein möglichst kleiner Ausschnitt aus der Flammenfront vergrößert auf dem Fenster des Fotovervielfachers abgebildet wurde. Die optische Anordnung mit den wichtigsten Abmessungen ist in Bild 10 skizziert. Im Sondenkopf a sind die Blenden b und c mit der Quarzlinse d angeordnet. Die Durchmesser der Öffnungen der Blende b mit 0,8 mm und der Blende c mit 2,0 mm sind mit der Brennweite der Quarzlinse d von 100 mm so gewählt worden, daß eine Kreisfläche mit ca. 2 mm Durchmesser aus der Flamme erfaßt wird. Der Ausschnitt konnte nicht weiter verkleinert werden, da sonst die Strahlungsintensität zu gering geworden wäre. Die geringen Öffnungen der beiden Blenden ergeben eine große Tiefenschärfe der optischen Anordnung. Der 2 mm große Ausschnitt aus der Flamme wird mit Hilfe der Quarzlinse d zehnfach vergrößert auf dem Fenster des Fotovervielfachers f abgebildet.

Zwischen der Quarzlinse und dem Fotovervielfacher ist das Interferenzfilter e angeordnet. Der Sondenkopf, das Interferenzfilter und der Fotovervielfacher mit dem Meßkopf h sind in zwei starr miteinander verbundenen Aluminiumrohren g untergebracht. Die gesamte optische Anordnung ist auf einem Kathetometer befestigt, das eine exakte vertikale Verschiebung der Meßeinrichtung ermöglichte.

Wie aus Bild 4 zu ersehen ist, besitzt das OH-Bandenspektrum bei 306,4 nm ein ausgeprägtes Intensitätsmaximum. Es wurde daher ein Interferenzfilter eingesetzt, das bei dieser Wellenlänge die größte Durchlässigkeit bei einer möglichst geringen Halbwertsbreite besitzt. Die Durchlaßkurve des verwendeten Interferenzfilters ist in Bild 11 dargestellt. D diesem Bild sind folgende Kennwerte zu entnehmen:

Halbwertsbreite: 18 nm,

Maximale Durchlässigkeit: 24 %.

Aus diesen Daten läßt sich ersehen, daß mit Hilfe dieses Interferenzfilters in der Hauptsache nur das Intensitätsmaximum des OH-Bandenspektrums erfaßt wird.

Bei den Versuchen wurde ein 11-stufiger Fotovervielfacher (EMI, Typ QB 9558) eingesetzt. Er besitzt eine Trialkalifotokatode (NaKSbCs), die auf ein Quarzfenster (Spektrosil) aufgedampft ist. Da die OH-Strahlung im UV-Bereich liegt, läßt normales Glas diese Strahlung nicht durch. Daher muß Quarzglas verwendet werden, das für die Strahlung aus dem UV-Bereich durchlässig ist. Die spektrale Empfindlichkeit des Fotovervielfachers und die Quantenausbeute sind in Bild 12 aufgezeichnet.

Die übrigen Kenndaten sind:

Katodenempfindlichkeit:	196 $\mu$ A/lm
Anodenempfindlichkeit:	200 A/lm
Anodendunkelstrom:	3 nA bei 940 V
Stromverstärkung:	$10^8$ bei 940 V

Der Fotovervielfacher steckt in einem Meßkopf, der den Spannungsteiler enthält, von dem die Einzelspannungen für die Vervielfacherstufen abgegriffen werden.

Die erforderliche Gesamtspeisespannung wird einem hochstabilisierten Netzgerät (Knott Elektronik, Typ NSHV-3,5) entnommen. Die Stabilität wird vom Hersteller mit

$\pm 50$  mV bei  $\pm 10$  % Netzspannungsschwankung angegeben. Dies bedeutet, daß bei einer Ausgangsspannung von 1000 V die Schwankungen  $\pm 0,05$  ‰ betragen. Somit ist die Änderung der Stromverstärkung an dem 11-stufigen Vervielfachersystem  $\pm 0,6$  ‰.

Der Anodenstrom wurde mit einem digitalen Vielfachmeßinstrument (Keithley, Modell 160) gemessen. Dieses Gerät besitzt zusätzlich einen analogen Spannungsausgang. Damit kann der gemessene Strom analog als Spannung auf einem Kompensationslinienschreiber aufgezeichnet werden.

#### 4.3. Versuchsdurchführung

Das zu prüfende Löschpulver wurde in den Vorratsbehälter der Schüttelrinne eingefüllt und der Kasten mit dem Antriebsmagneten und der Pulverdosiereinrichtung gasdicht verschlossen. Der Brenngas- und der Luftstrom wurden mit Hilfe der Durchflußmesser auf die gewünschte Konzentration eingestellt. Es wurde technisch reines Methan als Brennstoff verwendet. Die Verbrennungsluft wurde Preßluftflaschen ent-

nommen. Der vorgemischte Methan-Luft-Strom wurde an der Brennerdüse entzündet. Die Strahlungsmesssonde wurde auf den Brennerrand eingerichtet. Der Abstand des Sondenkopfes von der Brennermitte betrug 25 mm. Die Meßsonde wurde vom Brennerrand ausgehend vertikal mit Hilfe des Kathetometers verfahren und die Radikalstrahlungsintensität der Prüf Flamme ohne Pulver längs der Flamme gemessen. Danach wurde das Schlierenbild des Primärverbrennungskegels dieser Flamme fotografiert. Über die Schüttelrinne wurde nun dem Brenngas-Luft-Gemisch kontinuierlich eine konstante Löschpulvermenge zugegeben. Wenn sich nach einer kurzen Anlaufzeit ein stationärer Zustand eingestellt hatte, wurde die Strahlungsintensität längs der Flamme wiederum aufgezeichnet und danach das entsprechende Schlierenbild aufgenommen. Anschließend wurde die Flamme gelöscht und ein Filter auf die Brennerdüse aufgesetzt, um die Pulvermenge, die durch die Düse strömt, aufzufangen und genau bestimmen zu können. Vorversuche ergaben, daß die Meßzeit mindestens 30 s betragen sollte. Das Filter wurde vor und nach dem Aufsetzen auf die Brennerdüse auf einer Analysenwaage auf 0,1 mg ausgewogen. Die Masse des aufgefangenen Löschpulvers dividiert durch die Meßzeit ergibt die Löschpulverrate. Anschließend wurde mit Hilfe eines Stelltransformators die Amplitude der Schüttelrinne verstellt und so eine neue Pulverrate eingestellt, die dazugehörige Strahlungsintensität aufgezeichnet, das Schlierenbild registriert und die Pulvermenge mit dem Filter genau bestimmt. Für die Bestimmung der Löschwirksamkeit eines Löschpulvers wurden jeweils 7 bis 10 Einzelmessungen durchgeführt.

## 5. VERSUCHSAUSWERTUNG UND VERSUCHSERGEBNISSE

Für die 11 verschiedene Proben aus handelsüblichen Löschpulvern wurde die Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der zugegebenen Pulvermenge bestimmt. Die OH-Strahlungs-

intensitätsmessungen wurden für 6 verschiedene Trockenlöschpulver durchgeführt. Die wichtigsten Kenndaten der untersuchten Pulver sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die einzelnen Trockenlöschpulver wurden mit Buchstaben bezeichnet, wobei die Reihenfolge willkürlich festgelegt wurde. Die spezifische Oberfläche der Pulver wurde mit dem Luftdurchlässigkeitsprüfer nach Blaine [4] ermittelt.

### 5.1. Die Abhängigkeit der Flammengeschwindigkeit von der Pulverbeladung

Die gemessenen Flammengeschwindigkeiten wurden auf die Flammengeschwindigkeit der Flamme, die kein Löschpulver enthielt, bezogen. Da bei den Versuchen der Massenstrom sowie Druck und Temperatur im Brenner konstant gehalten wurden, ergeben sich für das Verhältnis der Flammengeschwindigkeit mit Löschpulver  $\Lambda_P$  und der ohne Pulver  $\Lambda_0$  gemäß Gleichung (2) bzw. Gleichung (3) folgende Beziehungen:

$$\frac{\Lambda_P}{\Lambda_0} = \frac{F_{F,0}}{F_{F,P}} \quad (9)$$

bzw.

$$\frac{\Lambda_P}{\Lambda_0} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)_P}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)_0} \quad (10)$$

Da durch die Zugabe von Löschpulver die Flammengeschwindigkeit  $\Lambda_P$  kleiner wird, muß bei konstanten Anfangsbedingungen die Brennfläche  $F_{F,P}$  größer werden, wie die Schlierenbilder der Verbrennungskegel mit und ohne Pulver zeigen (Bild 13).

Zieht man Gleichung (10) zur Auswertung heran, so wird bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches  $u_0$  der Flankenwinkel  $\alpha/2$  bei Zugabe von Pulver kleiner, wie ebenfalls aus Bild 13 zu erkennen ist.

Das Verhältnis der Flammengeschwindigkeit mit Löschpulver zu der Flammengeschwindigkeit ohne Pulver wurde in Abhängigkeit von der spezifischen Pulverbelastung  $h$  bestimmt. Die spezifische Pulverbelastung  $h$  ist die Pulvermenge pro Zeiteinheit bezogen auf den Brenngas-Luft-Volumenstrom. Trägt man  $\Lambda_P / \Lambda_0$  über  $h$  auf, so erhält man die in Bild 14 (Kurve 1) dargestellte Abhängigkeit des Flammengeschwindigkeitsverhältnisses von der spezifischen Pulverbelastung. Wie weiterhin aus Bild 14 (Kurve 2) zu ersehen ist, ist das Quadrat des Flammengeschwindigkeitsverhältnisses eine lineare Funktion der spezifischen Pulverbelastung. Es ist daher vorteilhafter,  $\Lambda_P^2 / \Lambda_0^2$  über der Pulverbelastung aufzutragen. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Löscheffektivität eines bestimmten Pulvers, d.h. je größer die Effektivität eines Löschpulvers ist, um so größer ist die Steigung der Geraden. Aus der Steigung der Geraden bzw. mit Hilfe des Schnittpunktes der Geraden mit der Abszissenachse kann die theoretisch minimale zur Löschung der Prüf Flamme benötigte Pulvermenge berechnet bzw. zeichnerisch ermittelt werden. In der Praxis interessiert häufig nur die minimale zur Löschung eines Prüfbrandes oder einer Prüf Flamme benötigte Pulvermenge. Diese Menge kann aber experimentell nur ungenau bestimmt werden. Wenn man die Flammengeschwindigkeit durch Pulverzugabe immer weiter verringert, wird ein Punkt erreicht, an dem die Flamme nicht mehr stabil auf dem Brenner rand aufsitzt. Bei geringsten Störungen hebt die Flamme ab und erlischt. Diese Erscheinung tritt bei niedrigen Flammengeschwindigkeiten auf. Sie ist für eine bestimmte Pulvermenge nicht reproduzierbar, d.h. die Flamme hebt einmal bei größeren Pulvermengen ab, bei einem anderen Versuch bei kleineren. Versuchstechnisch kann daher die Pulvermenge, bei der die Flammengeschwindigkeit gleich Null wird, nicht bestimmt werden. Um die Löschwirksamkeit der Pulver beurteilen zu können, muß man daher entweder die Steigung der Geraden als Maß für die Löscheffektivität heranziehen od. auf die theoretisch minimale zur Löschung benötigte Pulvermenge zurückgreifen.



Wie einleitend ausgeführt wurde, vermindern Löschpulver die Flammengeschwindigkeit eines brennbaren Gemisches. Die Flammengeschwindigkeit eines Brennstoff-Luft-Gemisches ist aber abhängig von der Brennstoffkonzentration. So liegt die maximale Flammengeschwindigkeit eines Methan-Luft-Gemisches bei 10 Vol-% Methan. Es ist daher zu erwarten, daß bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen auch unterschiedliche Löschpulvermengen benötigt werden. In Bild 15 ist die Löschwirksamkeit des Pulvers L in Abhängigkeit von der Brenngaskonzentration dargestellt. Danach wird für das Brennstoff-Luft-Gemisch mit der maximalen Flammengeschwindigkeit die größte Löschpulvermenge benötigt. Die theoretisch ermittelten minimalen Löschpulvermengen für das Löschpulver L und die dazugehörigen Flammengeschwindigkeiten der entsprechenden Brennstoff-Luft-Gemische ohne Pulver sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Alle weiteren Versuche wurden mit der Brenngaskonzentration 10 Vol-% Methan, die der maximalen Flammengeschwindigkeit entspricht, durchgeführt.

Die Löschwirksamkeit eines Pulvers ist neben der chemischen Zusammensetzung auch von der Teilchengröße bzw. der spezifischen Oberfläche abhängig. Der Einfluß der spezifischen Oberfläche auf die Wirksamkeit eines Pulvers gleicher chemischer Zusammensetzung zeigt Bild 16. Die Versuche wurden mit einem handelsüblichen BCE-Pulver, dessen Hauptbestandteil Kaliumbikarbonat war, durchgeführt. Von diesem Löschpulver wurden zwei Siebfraktionen hergestellt, die folgende spezifische Oberflächen aufwiesen: Pulver K  $1370 \text{ cm}^2/\text{g}$ , Pulver L  $2830 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

In Bild 17 sind drei handelsübliche BCE-Pulver bezüglich ihrer Löschwirksamkeit gegenübergestellt. Die Pulver unterscheiden sich sowohl in ihrer chemischen Zusammensetzung - Pulver F hat als Hauptbestandteil Kaliumbikarbonat, Pulver D und E Natriumbikarbonat - als auch durch unterschiedliche spezifische Oberflächen (Tab. 1). Wie Bild 17 zeigt, weist

das Pulver F (Kaliumbikarbonat) eine dreifach bessere Löschwirksamkeit auf als das Pulver D (Natriumbikarbonat). Gegenüber dem Pulver E ist das Pulver F nur etwa 30 % wirksamer. Für diese unterschiedlichen Ergebnisse bezüglich der Löschwirksamkeit eines Kaliumbikarbonatpulvers gegenüber einem Natriumbikarbonatpulver sind die verschiedenen spezifischen Oberflächen verantwortlich. Wie aus Tabelle 1 zu ersehen ist, ist die spezifische Oberfläche des Pulvers E größer als die des Pulvers F, während die Oberfläche des Pulvers D kleiner ist.

Der Unterschied in der Löschwirksamkeit zweier Trockenlöschpulver, der von der chemischen Zusammensetzung herrührt, kann nur dann eindeutig angegeben werden, wenn die zu untersuchenden Pulver gleiche Oberflächen aufweisen. Daher wurden von zwei BCE-Pulvern, das eine auf Kaliumbikarbonatbasis, das andere auf Natriumbikarbonatbasis, zwei Siebfraktionen mit gleicher spezifischer Oberfläche hergestellt und diese bezüglich ihrer Löschwirksamkeit untersucht. Das Ergebnis ist in Bild 18 dargestellt. Danach ist das Pulver auf Kaliumbikarbonatbasis etwa 2,5fach wirksamer als das Pulver I, das als Hauptbestandteil Natriumbikarbonat enthält.

Die Versuchsergebnisse für die drei ABC-Pulver A, B und C sind in Bild 19 aufgezeichnet. Die spezifischen Oberflächen sind auch hier verschieden. Vermutlich ergeben sich die Unterschiede in der Löschwirksamkeit der drei Pulver in bezug auf das Pulver B in erster Linie aus der chemischen Zusammensetzung bzw. aus dem Mischungsverhältnis der Hauptkomponenten Ammonphosphat und Ammonsulfat.

In den Bildern 20 und 21 sind jeweils zwei Pulver des gleichen Herstellers, die aber zu verschiedenen Zeitpunkten geliefert wurden, gegenüber gestellt. Wie aus Tabelle 1 zu ersehen ist, wurde vor allem die Korngröße bzw. die spezifische Oberfläche geändert. Es fällt auf, daß das Pulver H

aus dem Jahre 1971 eine erheblich größere spezifische Oberfläche aufweist als das Pulver B von 1968. Es ist zu vermuten, daß sich auch die chemische Zusammensetzung geändert hat. Bei dem Pulver C von 1969 und dem Pulver G (1971) entspricht der Unterschied in der Löschwirksamkeit in etwa dem Unterschied in der spezifischen Oberfläche.

In Bild 22 sind die Versuchsergebnisse mit den handelsüblichen ABC- und BCE-Pulver aufgezeichnet. Hierbei zeigt sich, daß die wirksamsten Trockenlöschpulver die Pulver G, F und C sind. Einen Überblick über die Reihenfolge der Pulver bezüglich ihrer Löschwirksamkeit gibt Tabelle 3. In dieser Tabelle sind die Trockenlöschpulver nach den theoretisch ermittelten minimalen zur Löschung benötigten Pulvermengen eingestuft worden. Nach abnehmender Löscheffektivität geordnet ergibt sich diese Reihenfolge:

$$G > F > C > E > A > H > B > D.$$

#### 5.2. Die Abhängigkeit der OH-Strahlungsintensität von der Pulverbeladung

Die Messung der OH-Strahlungsintensität wurde mit den Pulvern A, B, C, D, E und F durchgeführt. Wie in Abschnitt 4.2 ausgeführt wurde, wurde die Intensität der OH-Emission längs der Flamme gemessen. Für die Flamme ohne Pulver erhält man Kurvenverläufe, wie sie Bild 23 für eine Flamme mit einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan zeigt. Auf der Abszissenachse ist der Abstand vom Brennerrand  $x$  in mm aufgetragen, auf der Ordinatenachse der an der Anode gemessene Fotostrom  $I$  in nA. Die Kurve hat ein ausgeprägtes Maximum und fällt danach sehr rasch auf einen kleinen, fast konstanten Wert ab. Dieser Verlauf ergibt sich aus der Gestalt der Flamme. Bei der hier verwendeten Prüfflamme handelt es sich um eine Vormischflamme, bei der man zwei Verbrennungszonen unterscheidet, den sogenannten Innenkegel oder Primärverbrennungskegel und den Außen-

kegel (Bild 24). Das ausströmende Gas-Luft-Gemisch verbrennt in der Flammenfront des Innenkegels mit dem zur Verfügung stehenden Sauerstoff. Aus der Brennfläche treten neben den Rauchgaskomponenten  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  die Dissoziationsprodukte  $\text{CO}$  und  $\text{H}_2$  und geringe Mengen reaktionsfähiger Bestandteile wie  $\text{H}$  und  $\text{OH}$  aus. Diese verbrennen im Außenkegel in Form einer Diffusionsflamme, die den notwendigen Sauerstoff der Umgebungsluft entnimmt. Die maximale  $\text{OH}$ -Konzentration tritt in der Flammenfront des Innenkegels auf. Sie allein ist entscheidend für den Reaktionsablauf in der Flamme. Diese Tatsache bestätigt auch die Messung. Das in Bild 23 verzeichnete  $I_{\max}$  tritt im oberen Teil des Innenkegels auf, der steile Abfall erfolgt beim Durchfahren der Spitze des Primärverbrennungskegels. Die anschließend gemessene Strahlungsintensität ist also dem Außenkegel zuzuordnen. Das  $I_{\max}$  setzt sich also aus der  $\text{OH}$ -Strahlungsintensität des Innenkegels und der des Außenkegels zusammen, wenn man die Selbstabsorption, die im Vergleich dazu klein ist, außer acht läßt. Für die Bestimmung der Löschwirksamkeit mit Hilfe der  $\text{OH}$ -Strahlungsintensität interessiert nur die  $\text{OH}$ -Strahlungsintensität des Innenkegels  $I$ , die sich aus der Differenz von  $I_{\max} - I_{\min}$  ergibt. Diese Intensität wird im folgenden bei der Flamme ohne Pulver mit  $I_0$  und bei der Flamme mit Pulver mit  $I$  bezeichnet. Die Strahlungsintensität im Außenkegel nimmt mit wachsendem Abstand vom Brennerand leicht ab (Bild 23). Im Rahmen der Meßgenauigkeit ist es vertretbar, in diesem Bereich den Mittelwert als  $I_{\min}$  zu definieren.

Wenn man der Flamme Pulver zugibt, tritt eine Leuchterscheinung auf. Die Pulverteilchen erwärmen sich, wenn sie durch die Flammenfront des Innenkegels und durch den Außenkegel wandern. Da es sich hier um Festkörper handelt, senden sie ein kontinuierliches Spektrum aus (Bild 3). Diese Erscheinung ist besonders am Ende der Flammenfront zu beobachten. Bei Trockenlöschpulvern, die Natriumbikarbonat oder Kaliumbikarbonat enthalten, ist das Leuchten der Pulverteilchen stärker als bei Pulvern auf Phosphatbasis. Es tritt also

neben der OH-Strahlung noch ein Anteil auf, der von der Festkörperstrahlung herrührt. In Bild 25 sind die Kurvenverläufe einiger Flammen mit Pulverbeladung der entsprechenden Flamme ohne Pulver gegenübergestellt. Die Brenngaskonzentration betrug wiederum 10 Vol-% Methan. Diese Kurven zeigen eindeutig, daß sich die gemessene Gesamtstrahlungsintensität bei der Wellenlänge 306,4 nm additiv aus der OH-Strahlung des Innenkegels und des Außenkegels und dem entsprechenden Anteil der Festkörperstrahlung in diesem Wellenlängenbereich zusammensetzt, da die Strahlungsintensität im Außenkegel  $I_{\min}$  proportional mit der Pulverbeladung ansteigt. Die gesuchte Strahlungsintensität des OH-Radikals ergibt sich auch hier aus der Differenz des Intensitätsmaximums und des -minimums der entsprechenden Kurve.

In Bild 26 sind die Versuchsergebnisse für die Pulver A, B und C in Abhängigkeit von der spezifischen Pulverbeladung  $h$  dargestellt. Alle Versuche wurden bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan durchgeführt. Die OH-Strahlungsintensität der Flamme mit Pulver I wurde auf die Intensität der Flamme ohne Pulver  $I_0$  bezogen. Aus dem Bild ist zu ersehen, daß die Strahlungsintensität der OH-Strahlung mit zunehmender Pulverbeladung abnimmt. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen  $I/I_0$  und  $h$ . Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen der Flammengeschwindigkeit in Bild 19, so kann man die gleiche Reihenfolge in der Wirksamkeit der Pulver feststellen. Dies bedeutet, daß die Abnahme der OH-Strahlungsintensität ein Maß für die Löschwirksamkeit eines Pulvers ist. Betrachtet man den Unterschied in der Wirksamkeit, wie er mit Hilfe der Flammengeschwindigkeit ermittelt wurde, nach Bild 19, so ergibt sich folgende Abstufung in der Löschwirksamkeit 2,4: 1,7: 1 bezüglich des Pulvers B. Die Werte bei der Messung der Strahlungsintensität sind 2,7: 2,4: 1. Dies deutet darauf hin, daß die Ergebnisse aus Bild 19 nicht ohne weiteres mit Bild 26 zu vergleichen sind. Wenn Werte für die Löschwirksamkeit angegeben werden, muß auch mitgeteilt werden, welche

Größe zur Beurteilung verwendet wurde: ob die Flammgeschwindigkeit oder die Strahlungsintensität.

Bild 27 zeigt die Versuchsergebnisse mit den Pulvern D, E und F. Auch hier wurde die gleiche Reihenfolge in der Wirksamkeit festgestellt wie bei den Messungen der Flammgeschwindigkeit. Ein Vergleich mit Bild 17 bestätigt dies. Die Abstufung der Versuchswerte der Flammgeschwindigkeit ergab für die Löscheffektivität bezüglich des Pulvers D 3,1: 2,4: 1 und nach der Strahlungsintensität 2,5: 2,3: 1. Wie schon bei den ABC-Pulvern beobachtet wurde, weichen die Werte in der Weise von einander ab, daß der Unterschied in der Wirksamkeit bei den Pulvern E und F wie bei den Pulvern A und C geringer ist als bei den Messungen der Flammgeschwindigkeit. Eine eindeutige Erklärung hierfür kann z.Z. noch nicht gegeben werden. Dazu sind weitere Versuche notwendig. Eine Aufhellung werden Untersuchungen mit den reinen Löschsubstanzen bringen können.

In Bild 28 sind alle Versuchsergebnisse aus den Strahlungsintensitätsmessungen mit den BCE- und ABC-Pulvern gegenübergestellt. Danach sind die wirksamsten Trockenlöschpulver die Pulver F und E. Ein Vergleich mit Bild 22 zeigt, daß hier das Pulver E und das Pulver D besser abschneiden, als das Pulver C bzw. B. Die Pulver E und D sind BCE-Pulver auf Natriumbikarbonatbasis, während die ABC-Pulver C und B als Hauptbestandteile Ammonphosphat und -sulfat enthalten. Da die Reihenfolge innerhalb der Pulverarten im Vergleich mit den Versuchsergebnissen, die mit der Messung der Flammgeschwindigkeit gewonnen werden, erhalten blieb (Bilder 27 und 17 bzw. 26 und 19), ist vermutlich die chemische Zusammensetzung der Pulver der Grund für die Abweichungen. Die spezifischen Oberflächen der Pulver E und C sind in etwa gleich groß, was bei den Pulvern D und B nicht der Fall ist. Dies deutet darauf hin, daß die Oberfläche nicht die entscheidende Ursache für

die Abweichung ist.

Einen Überblick über die Reihenfolge und Abstufung in der Löschwirksamkeit der untersuchten Trockenlöschpulver, die durch Messung der OH-Strahlungsintensität ermittelt wurden, gibt Tabelle 4. Hier sind die Pulver nach den theoretisch ermittelten minimalen Pulvermengen für den Wert  $I/I_0 = 0$  eingestuft worden. Nach abnehmender Wirksamkeit geordnet, ergibt sich die Reihenfolge:

$$F > E > C > A > D > B.$$

### 5.3. Anwendbarkeit der beiden Meßmethoden als Prüfverfahren zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern

Bei der Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern wurden nach einer kritischen Betrachtung der wichtigsten vorhandenen Prüfapparaturen [1] folgende Bedingungen an die neue Apparatur gestellt:

1. Reproduzierbare Prüf Flamme.
2. Konstante Versuchsbedingungen.
3. Kontinuierliche Löschpulverzugabe.
4. Messung der tatsächlich die Löschung bewirkenden Pulvermenge pro Zeiteinheit.

Das Studium des Verbrennungsablaufes in Flammen zeigt, daß zwei Erscheinungen als Meßgrößen für die Beurteilung der Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern herangezogen werden können. Es sind dies die Flammengeschwindigkeit und die Strahlungsintensität von Radikalen, die den Verbrennungsablauf entscheidend beeinflussen. Auf dieser Grundlage wurden zwei Meßverfahren entwickelt. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß von beiden Verfahren die obigen Forderungen erfüllt werden. Von daher gesehen sind beide Meßmethoden zur Prüfung der

Löschwirksamkeit geeignet.

Die Abhängigkeit der Löschwirksamkeit von der chemischen Zusammensetzung und der spezifischen Oberfläche der Pulver kann mit beiden Meßmethoden eindeutig nachgewiesen werden. Ein Vergleich der Ergebnisse, die mit Hilfe der Flammengeschwindigkeitsmessung erhalten wurden, mit denen aus den OH-Strahlungsintensitätsmessungen ist nicht ohne weiteres möglich. Die Reihenfolge in der Wirksamkeit bleibt zwar bei beiden Meßverfahren erhalten, wenn man Trockenlöschpulver gleicher Art wie z.B. BCE-Pulver miteinander vergleicht. Die graduelle Abstufung in der Löschwirksamkeit ist jedoch verschieden. Die in Bild 22 und in Tabelle 3 dargestellte Reihenfolge bezüglich der Löschwirksamkeit weicht von der in Bild 28 und in Tabelle 4 aufgeführten ab. Dies deutet darauf hin, daß bei der Angabe der Wirksamkeit eines Pulvers auch angegeben werden muß, welche Meßgröße zum Vergleich herangezogen wurde. Die Abweichungen, die bei den hier beschriebenen Versuchen festgestellt wurden, können allerdings erst erklärt werden, wenn bekannt ist, welche Rolle die OH-Radikale beim Löschvorgang spielen. Es ist aber beim derzeitigen Stand der Untersuchungen nicht zweifelsfrei auszuschließen, daß bei der Auswertung der Kurvenverläufe, wie sie z.B. in Bild 25 dargestellt sind, systematische Fehler bei der Ermittlung von  $I_{\min}$  auftreten, die die Steigung der Geraden verändern.

Ein weiteres Kriterium für eine Prüfmethode ist die Handhabung der Meßapparatur und der Zeitbedarf für die Durchführung der Messungen. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die beiden Meßverfahren, so ist das erste Verfahren, "Bestimmung der Löschwirksamkeit mit Hilfe der Flammengeschwindigkeit", vorzuziehen. Da die Intensität der Radikalstrahlung schwach ist, werden bei dem zweiten Meßverfahren empfindliche Meßinstrumente benötigt. Außerdem muß die Flamme punktförmig längs der Flammenachse durchgemessen werden, um



größere Fehler und Störungen auszuschalten. Daraus resultiert ein größerer Zeitbedarf und eine kompliziertere Handhabung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse das Meßverfahren, das als Meßgröße für die Löschwirksamkeit eines Pulvers die Flammengeschwindigkeit benutzt, geeigneter als Prüfverfahren ist. Will man darüberhinaus aber Aussagen über den Löschmechanismus der Trockenlöschpulver machen, genügt es nicht, die Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Pulverbeladung zu messen. Da die Pulverteilchen direkt in den Verbrennungsablauf eingreifen, muß bekannt sein, wie die aktiven Teilchen, die Radikale und freien Atome, von den Pulverteilchen beeinflusst werden. Erkenntnisse darüber sind nur möglich, wenn die Abhängigkeit der die Reaktion bestimmenden aktiven Teilchen von der Löschpulverbeladung gemessen wird. Eine Möglichkeit hierfür ist, die Strahlungsintensität des OH Radikals zu bestimmen, das eine entscheidende Rolle im Verbrennungsablauf spielt.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde eine Laborprüfapparatur entwickelt, mit der die zur Löschung einer definierten Prüf Flamme benötigte Pulvermenge pro Zeiteinheit ermittelt werden kann. Bei diesem Verfahren wurde die laminare Flammengeschwindigkeit als äquivalente Größe für die Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern herangezogen. Die Prüf Flamme ist eine laminare vorgemischte Methan-Luft-Flamme. Die zu prüfende Pulvermenge wird kontinuierlich dem Brenngas-Luft-Strom mit Hilfe einer Schüttelrinne zugeführt. Gemessen werden der Flankenneigungswinkel des Primärverbrennungskegels der Prüf Flamme, der Brenngas-Luft-Strom und die Pulvermenge. Aus den ersten beiden Meßgrößen, wird die Flammengeschwindigkeit berechnet. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Quadrat der Flammengeschwindigkeit

und der zugegebenen Löschpulvermenge. Aus der Steigung der Geraden kann die theoretisch minimale zur Löschung der Prüfflamme benötigte Pulvermenge ermittelt werden. Versuche ergaben, daß für Brennstoff-Luft-Gemische mit größerer Flammengeschwindigkeit mehr Pulver benötigt wird als für Gemische mit kleinerer Flammengeschwindigkeit. Mit dieser Laborprüfapparatur wurden 11 Proben aus handelsüblichen Löschpulvern untersucht. Es wurde sowohl der Einfluß der spezifischen Oberfläche als auch der der chemischen Zusammensetzung bestimmt. Die Versuche zeigten, daß ein Trockenlöschpulver auf Kaliumbikarbonatbasis etwa 2,5fach wirksamer ist als ein Pulver mit gleicher spezifischer Oberfläche, das als Hauptbestandteil Natriumbikarbonat enthält. Untersuchungen an handelsüblichen Löschpulvern zeigten, daß dieser durch die chemische Zusammensetzung verursachte Unterschied ausgeglichen werden kann, wenn die spezifische Oberfläche des weniger wirksamen Pulvers entsprechend vergrößert wird. Die Diskussion der Meßergebnisse ergab, daß mit dieser Prüfapparatur Unterschiede in der Löschwirksamkeit von ABC- und BCE-Pulvern verschiedener chemischer Zusammensetzung und unterschiedlicher spezifischer Oberfläche sehr genau festgestellt werden können.

Ein weiteres Maß für die Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern ist die Änderung der Radikalkonzentration in einer Flamme. Es wurde daher ein weiteres Meßverfahren entwickelt, das die Bestimmung der Konzentrationsänderung für den Verbrennungsablauf wichtiger Radikale ermöglicht. Als äquivalente Meßgröße wurde die Änderung der OH-Strahlungsintensität der Prüfflamme unter der Einwirkung von Löschpulver herangezogen. Die Intensitätsänderung wurde mit Hilfe eines Fotovervielfachers und eines Interferenzfilters aufgezeichnet. Die Auswertung der Messungen ergab eine lineare Abhängigkeit der OH-Konzentration von der zugegebenen Löschpulvermenge. Es wurde die gleiche Reihenfolge in der Löschwirksamkeit wie bei dem Meßverfahren mit Hilfe der Flammengeschwindigkeit festgestellt, wenn Pulver gleicher Art wie z.B. BCE-Pulver miteinander verglichen werden. Die mit beiden Meßverfahren

ermittelten minimalen Löschpulvermengen weichen von einander ab. ABC- und BCE-Pulver lassen sich nicht ohne weiteres in der Wirksamkeit mit einander vergleichen, wenn als Maß die Änderung der Radikalkonzentration herangezogen wird. Eine eindeutige Erklärung für die Abweichungen kann z.Z. noch nicht gegeben werden.

Beide Meßverfahren eignen sich zur Prüfung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern. Die Auswertung der vorliegenden Versuchsergebnisse hat aber gezeigt, daß das Verfahren, das als Maß für die Löschwirksamkeit eines Pulvers die Flammengeschwindigkeit benutzt, als Prüfverfahren geeigneter ist. Es zeichnet sich dadurch aus, daß es einfacher zu handhaben und ein geringerer Zeitbedarf für die Messungen notwendig ist.

Will man darüber hinaus Aussagen über den Löschmechanismus der Trockenlöschpulver machen, müssen beide Meßverfahren angewendet werden. Für die Deutung des Verbrennungsverlaufes in einer Flamme unter dem Einfluß von Trockenlöschpulver muß außer der Abnahme der Flammengeschwindigkeit auch die Änderung der Konzentration der Radikale, die entscheidend in den Reaktionsablauf eingreifen, in Abhängigkeit von der Pulverbeladung bekannt sein.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Hoffmann, W.: Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern.  
Forschungsbericht Nr. 18 der Arbeitsgemeinschaftfeuerschutz (AGF). 1971.
- [2] Lindow, R.: Zur Bestimmung der laminaren Flammgeschwindigkeit.  
Karlsruhe, Technische Hochschule, Dr.-Ing.  
Dissertation 1966.
- [3] Schardin, H.: Die Schlierenverfahren und ihre Anwendung.  
Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften  
20 (1942), S.303-439.
- [4] Kaye, B.H.: Permeability techniques for characterizing fine powders. Powder Technol. 1 (1967), S.11-22.

Tab. 1 Die wichtigsten Kenndaten der untersuchten Trockenlöschpulver.

Untersuchte Trockenlöschpulver	Pulverart	Hauptbestandteil	spezifische Oberfläche in cm <sup>2</sup> /g
Pulver A	ABC	Ammonphosphat + Ammonsulfat	3280
Pulver B	ABC	Ammonphosphat + Ammonsulfat	3340
Pulver C	ABC	Ammonphosphat + Ammonsulfat	3690
Pulver D	BCE	Natriumbikarbonat	2490
Pulver E	BCE	Natriumbikarbonat	3870
Pulver F	BCE	Kaliumbikarbonat	2980
Pulver G	ABC	Ammonphosphat + Ammonsulfat	4340
Pulver H	ABC	Ammonphosphat + Ammonsulfat	5880
Pulver I	BCE	Natriumbikarbonat	1390
Pulver K	BCE	Kaliumbikarbonat	1370
Pulver L	BCE	Kaliumbikarbonat	2830

Tab. 2 Abhängigkeit der theoretisch ermittelten minimalen Löschpulvermenge von der Flammengeschwindigkeit verschiedener Methan-Luft-Gemische für das Trockenlöschpulver L

Brennstoff-Konzentration c Vol-%	Flammen-geschwindigkeit $\Lambda$ cm/s	theoretisch ermittelte minimale Löschpulver- menge $h_{\min}$ g/l <sub>n</sub>
9,0	38,5	0,0087
9,5	41,5	0,0106
10,0	43,0	0,0144
11,0	41,0	0,0099

Tab. 3 Die theoretisch ermittelten minimalen zur Löschung benötigten Pulvermengen der untersuchten handelsüblichen ABC- und BCE-Pulver bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

Untersuchte Trockenlösch- pulver	Pulver- art	theoretisch ermittelte minimale Löschpulvermenge in g/l <sub>n</sub>
Pulver G	ABC	0,01097
Pulver F	BCE	0,01364
Pulver C	ABC	0,01471
Pulver E	BCE	0,01799
Pulver A	ABC	0,02050
Pulver H	ABC	0,03072
Pulver B	ABC	0,03494
Pulver D	BCE	0,04288

Tab. 4 Theoretisch ermittelte minimale Pulvermengen der untersuchten handelsüblichen ABC- und BCE-Pulver für den Wert  $I/I_0 = 0$  bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

Untersuchte Trockenlöschpulver	Pulverart	theoretisch ermittelte minimale Pulvermengen für $I/I_0 = 0$ in $g/l_n$
Pulver F	BCE	0,00626
Pulver E	BCE	0,00679
Pulver C	ABC	0,01315
Pulver A	ABC	0,01480
Pulver D	BCE	0,01576
Pulver B	ABC	0,03579



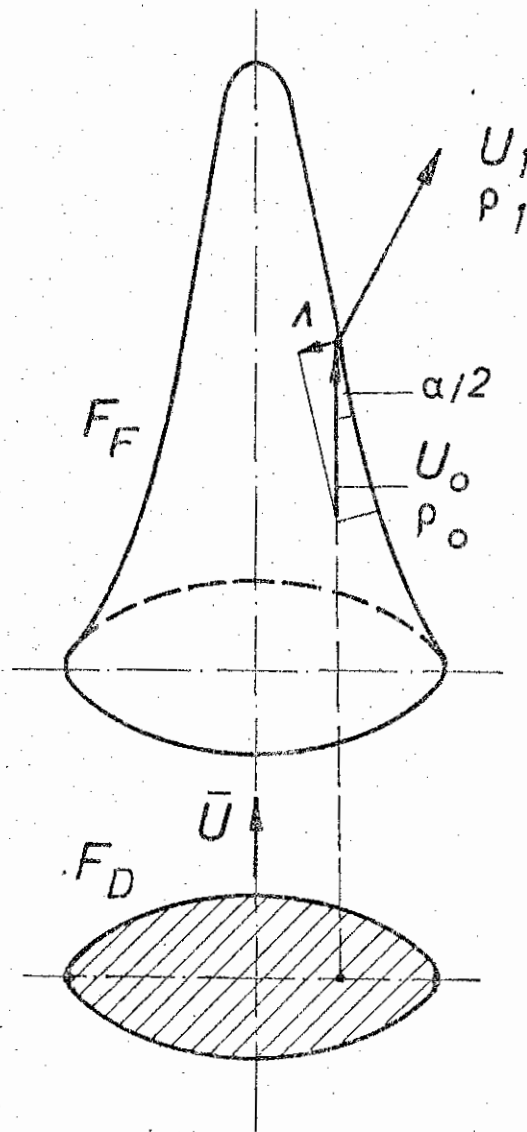


Bild 1. Schematische Darstellung des Primärverbrennungskegels einer Bunsenflamme

$\lambda$  Flammengeschwindigkeit,  $\alpha/2$  Flankenneigungswinkel,  $\bar{u}$  mittlere Geschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches,  $u_0$  Anströmgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches,  $u_1$  Geschwindigkeit der verbrannten Gase.  $\rho_0$  Dichte des Gas-Luft-Gemisches,  $\rho_1$  Dichte der verbrannten Gase,  $F_D$  Querschnittsfläche des Brenners,  $F_F$  Brennfläche der Flamme

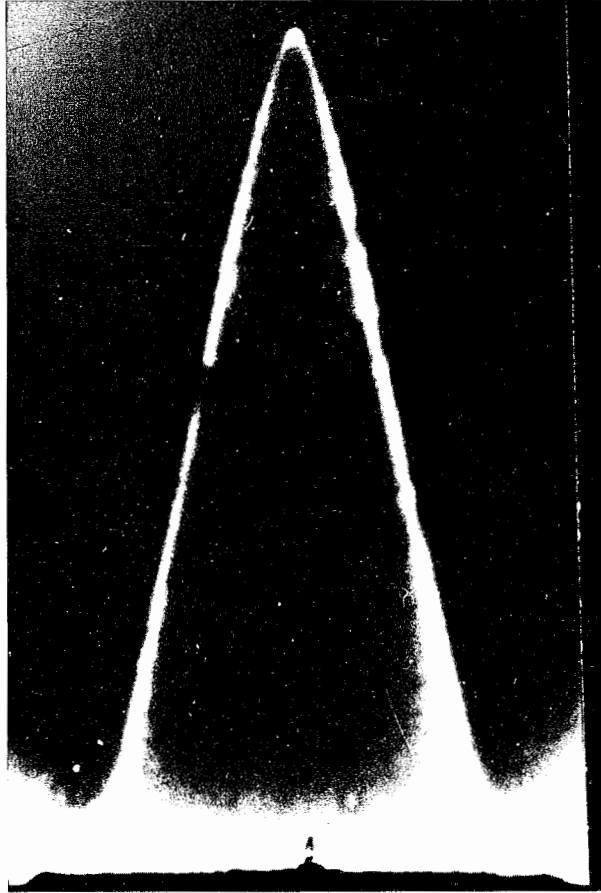


Bild 2. Schlierenbild des Primärverbrennungskegels

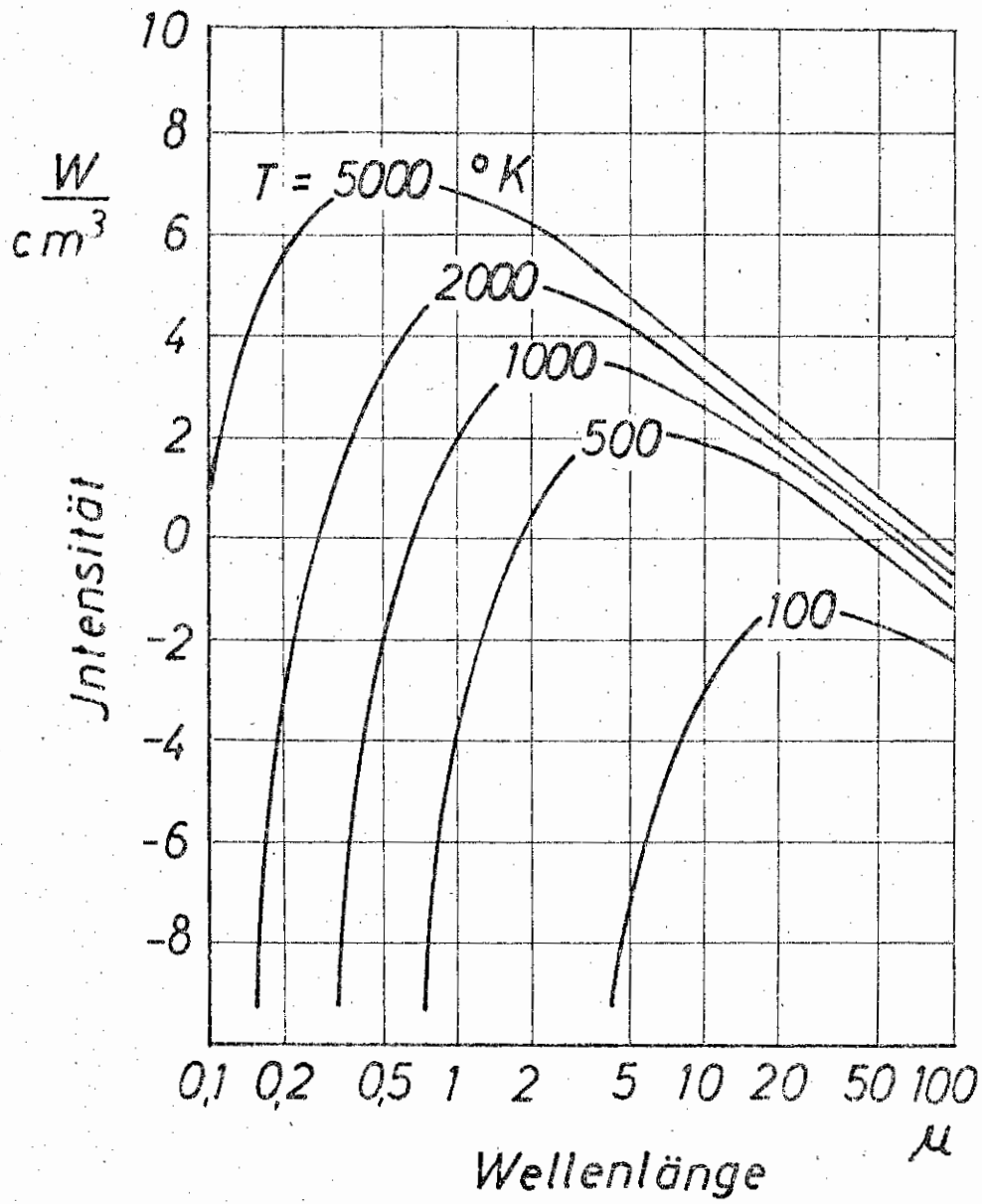


Bild 3. Kontinuierliches Spektrum eines strahlenden Festkörpers

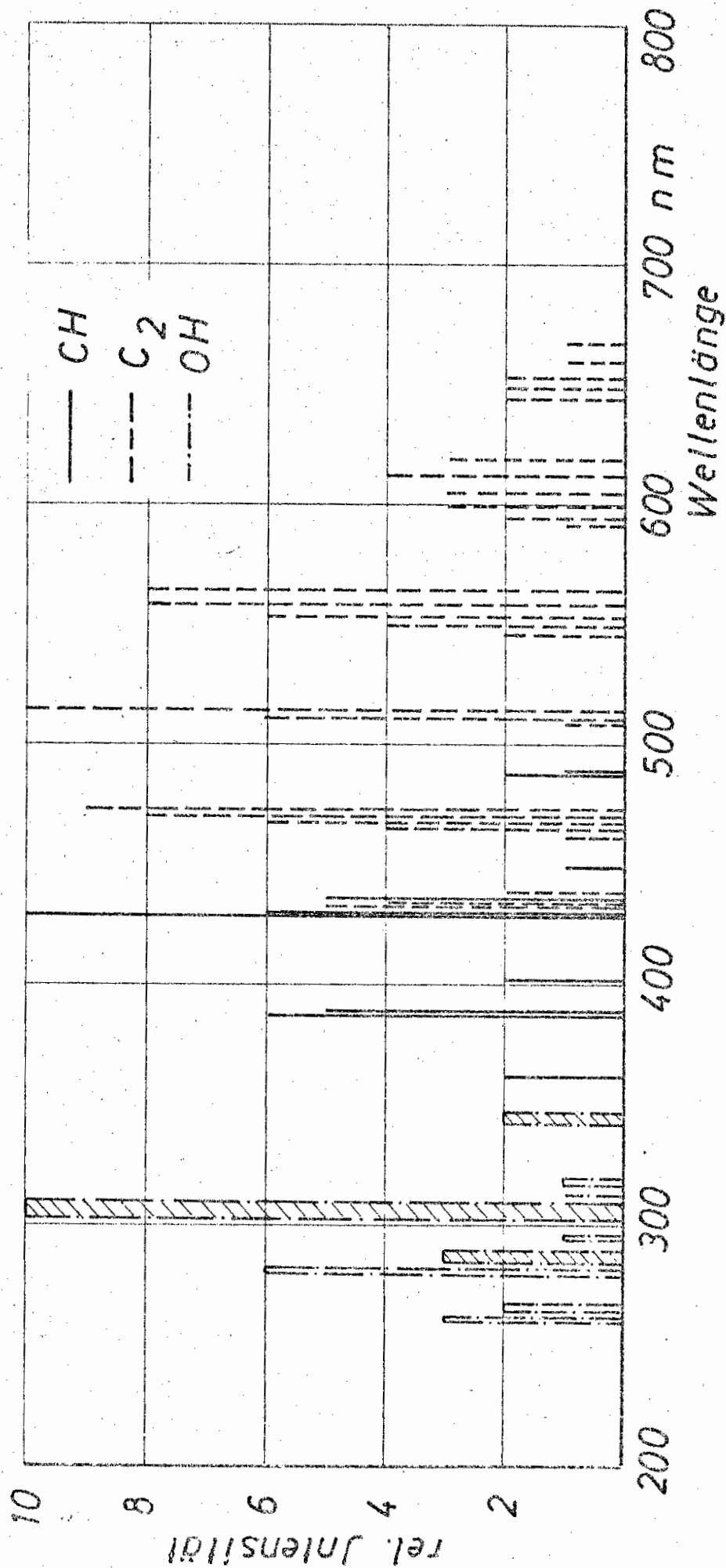


Bild 4. Bandenspektren der Radikale OH, CH und C<sub>2</sub>

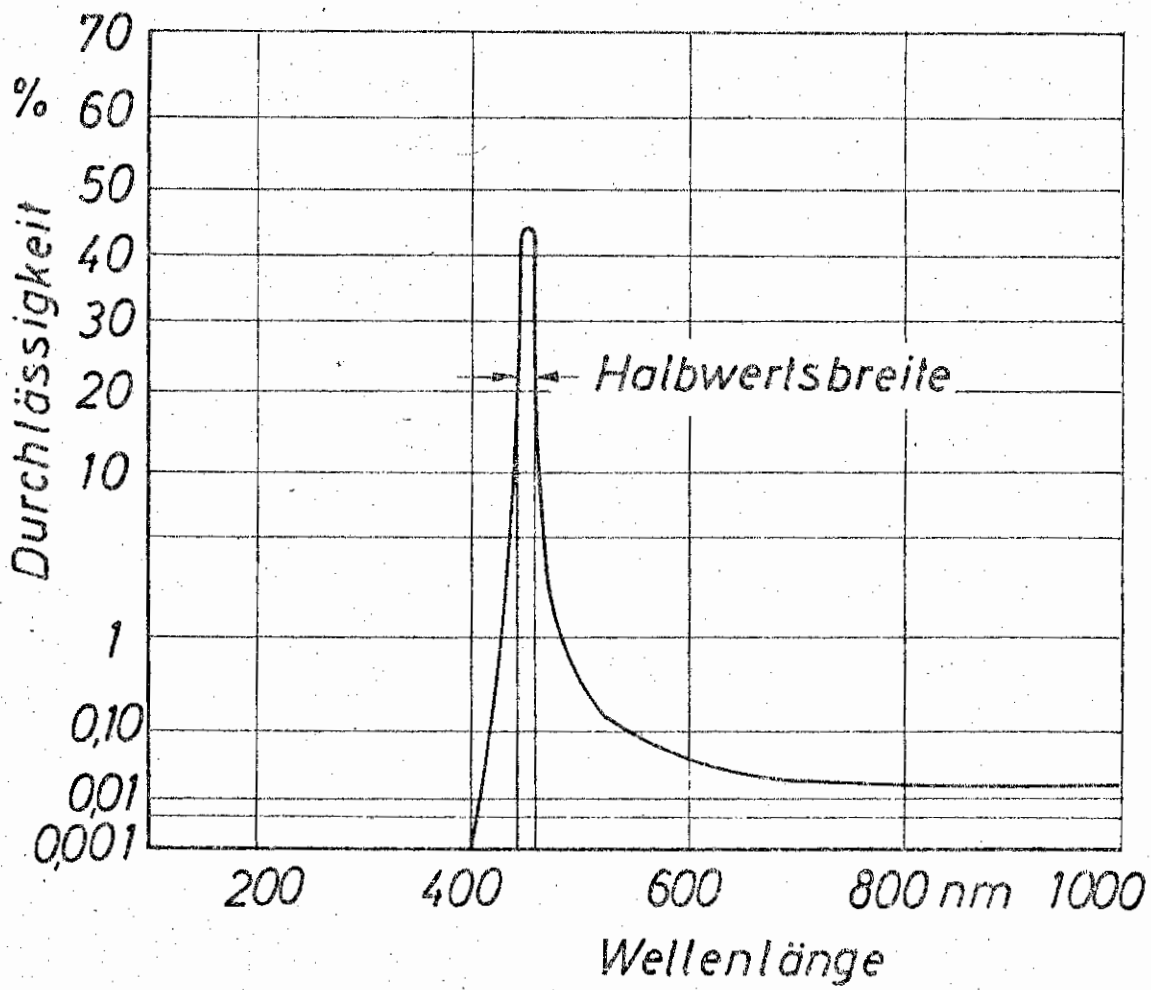


Bild 5. Durchlaßkurve eines Interferenzfilters

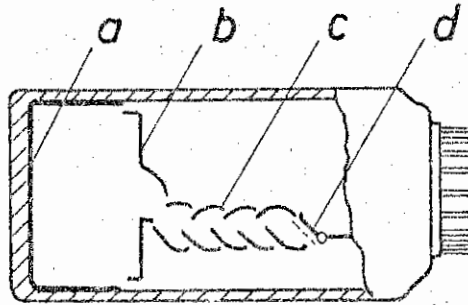


Bild 6. Schematische Skizze eines Fotovervielfachers  
a Fotokathode, b Fokussiersystem, c Vervielfacher-  
system, d Anode

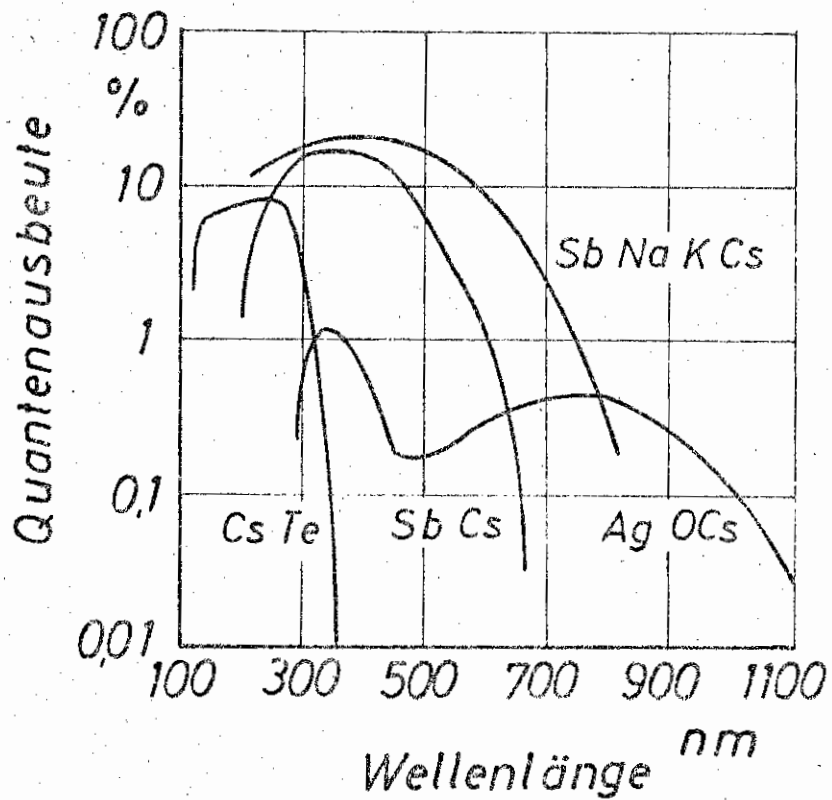


Bild 7. Quantenausbeute in Abhängigkeit von der Wellen-  
länge für verschiedene Katodenmaterialien

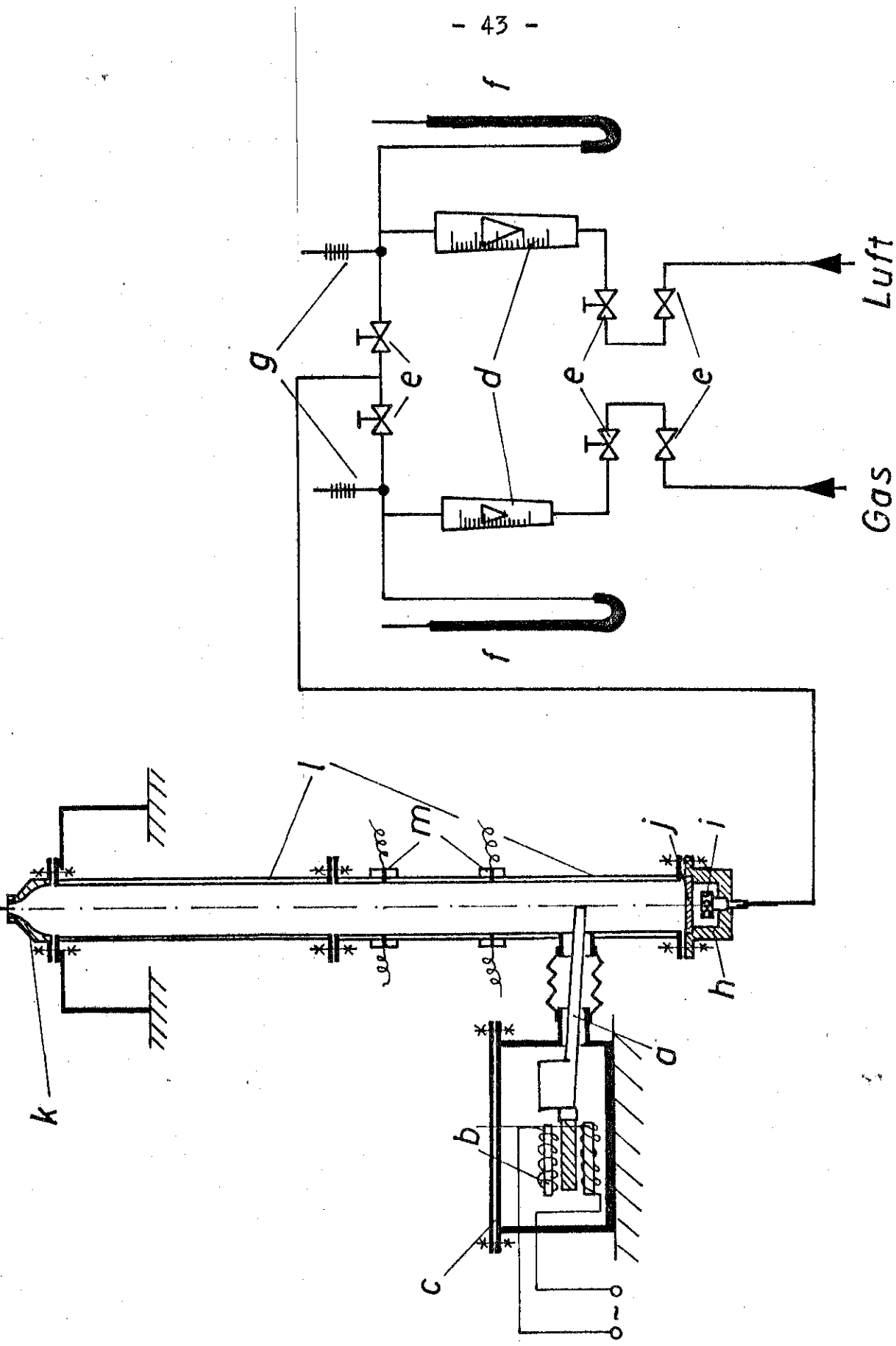


Bild 8. Schematische Skizze der Prüfapparatur

- a Schüttelrinne mit Vorratsbehälter, b Antriebsmagnet, c schwingungsteifer Kasten,
- d Durchflußmesser, e Regelventile, f U-Rohrmanometer, g Quecksilberthermometer, h Bodenplatte,
- i Strömungsverteiler, j Sintermetallplatte, l Einlaufrohr, k Brennerdüse, m Ringelektrode

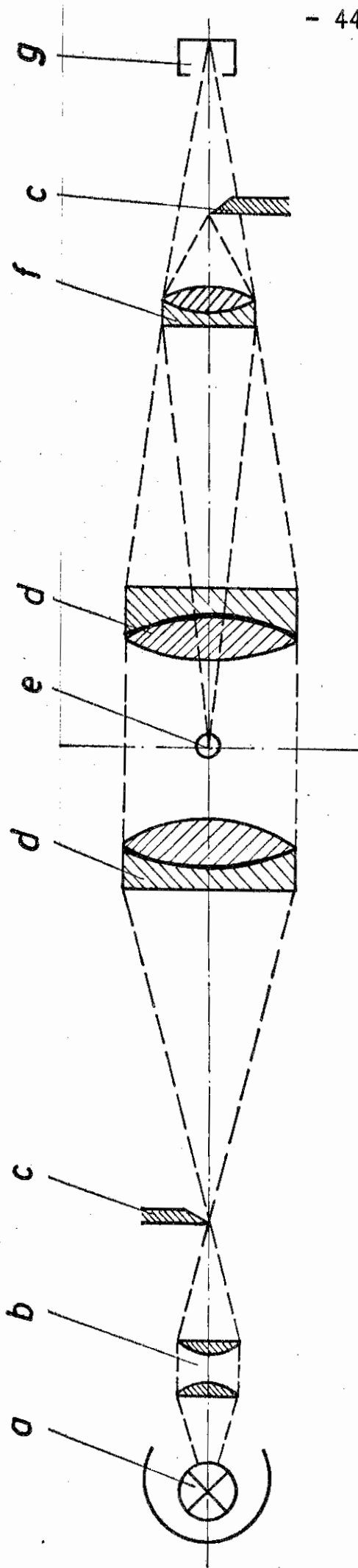


Bild 9. Skizze der optischen Anlage zur Erzeugung der Schlierenbilder nach Töpler  
a Lichtquelle, b Kondensator, c Schlierenblende, d Achromat, e Schlierenzone,  
f Abbildungslinse, g Fotoapparat



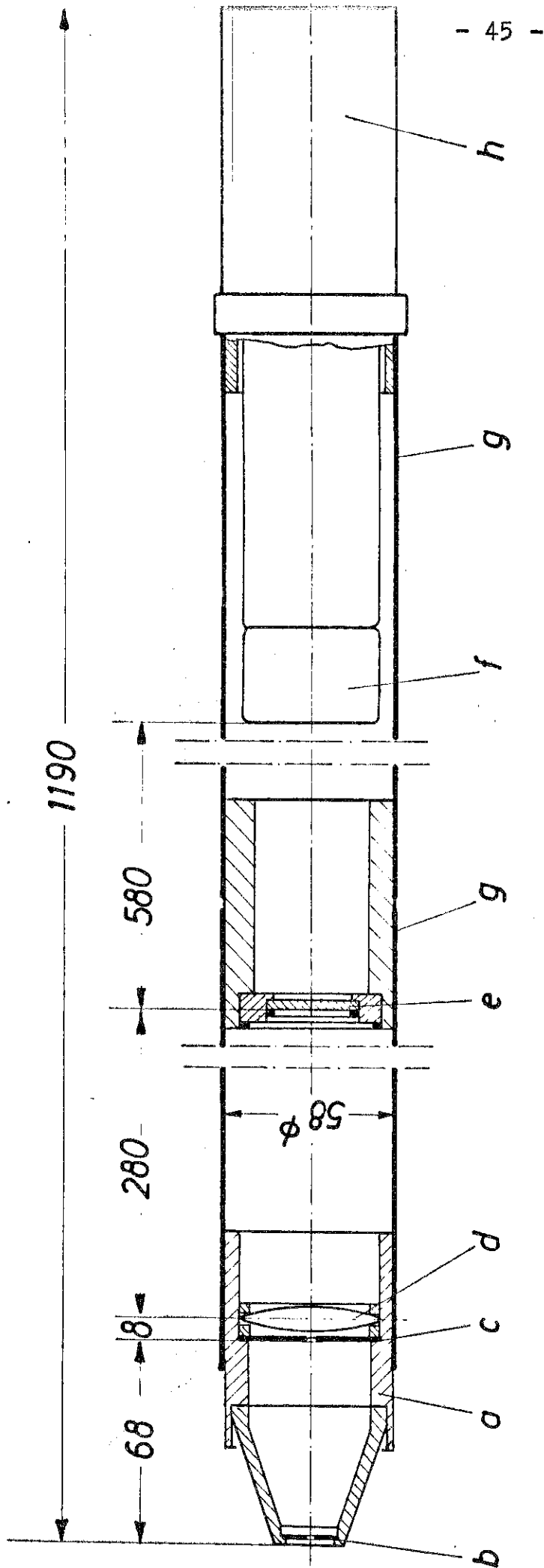


Bild 10. Skizze der optischen Anordnung zur Messung der OH-Emission  
 a Sondenkopf, b Blende (0,8 mm  $\phi$ ), c Blende (2 mm  $\phi$ ), d Quarzlinse,  
 e Interferenzfilter, f Fotovervielfacher, g Aluminiumrohr, h Meßkopf

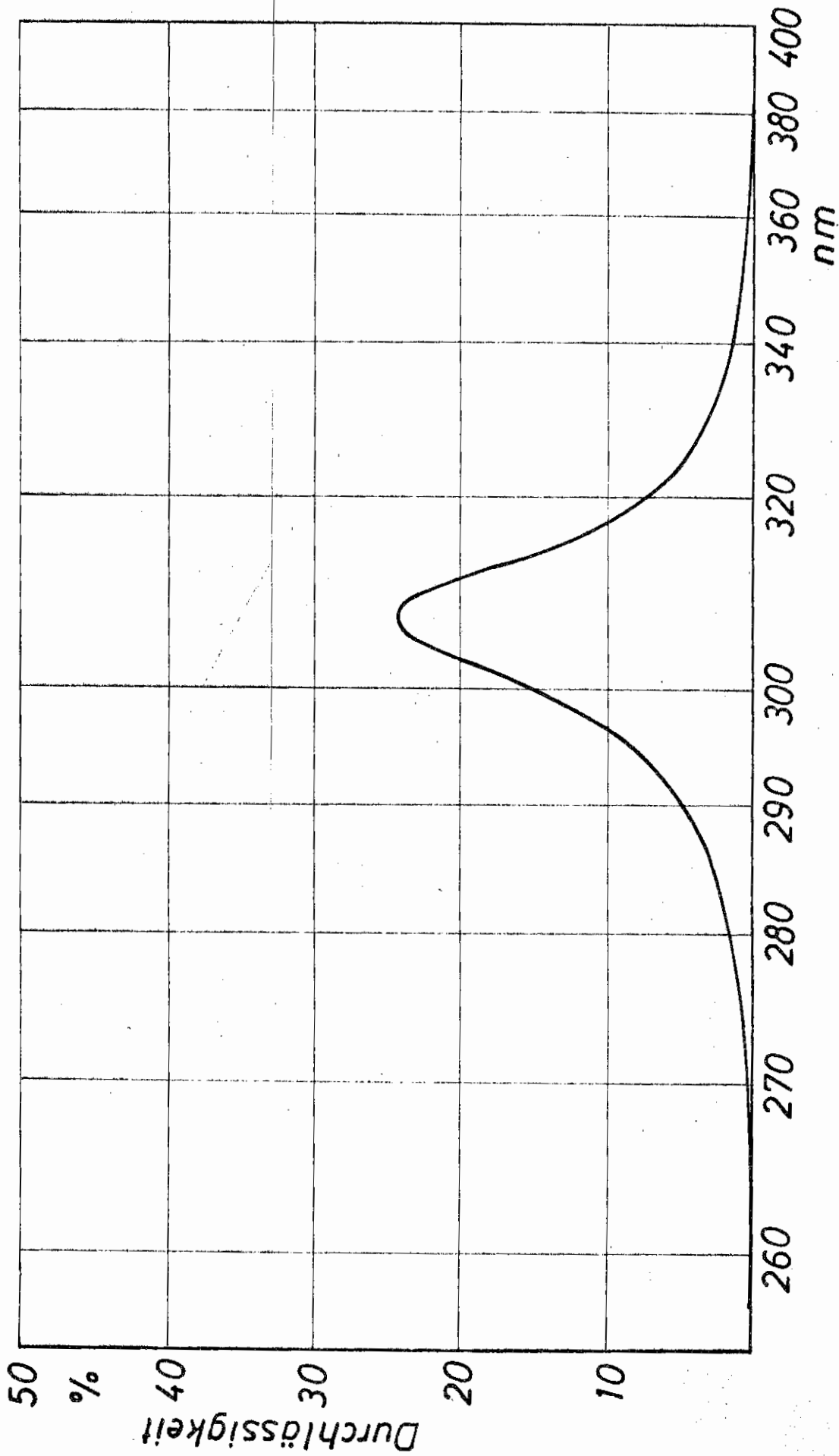


Bild 11. Durchlaßkurve des Interferenzfilters zur Messung der OH-Strahlungsdichte

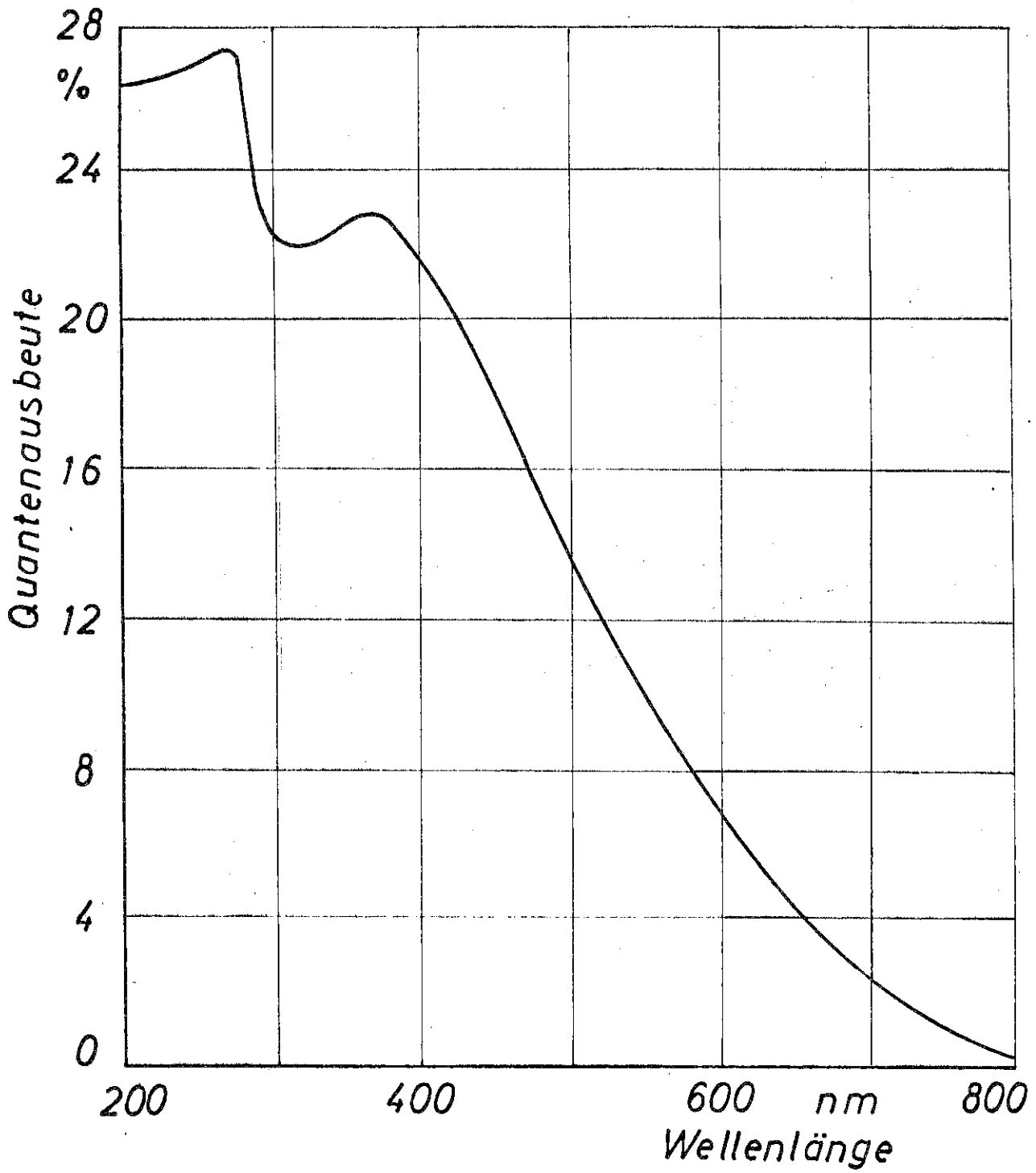


Bild 12. Spektrale Empfindlichkeit und Quantenausbeute des Fotovervielfachers QB 9558

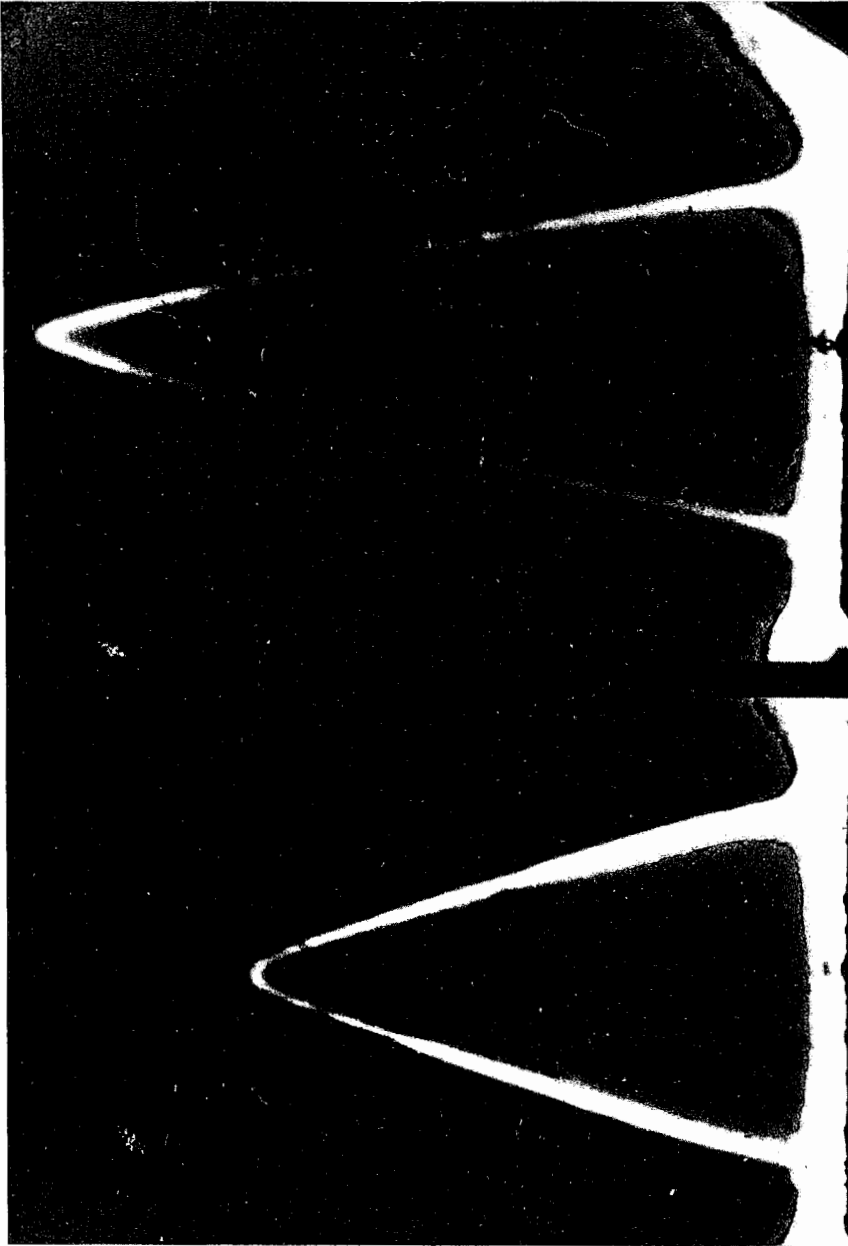


Bild 13. Schlierenbild einer Flamme ohne Löschpulver (links) und mit  
Löschpulver (rechts)

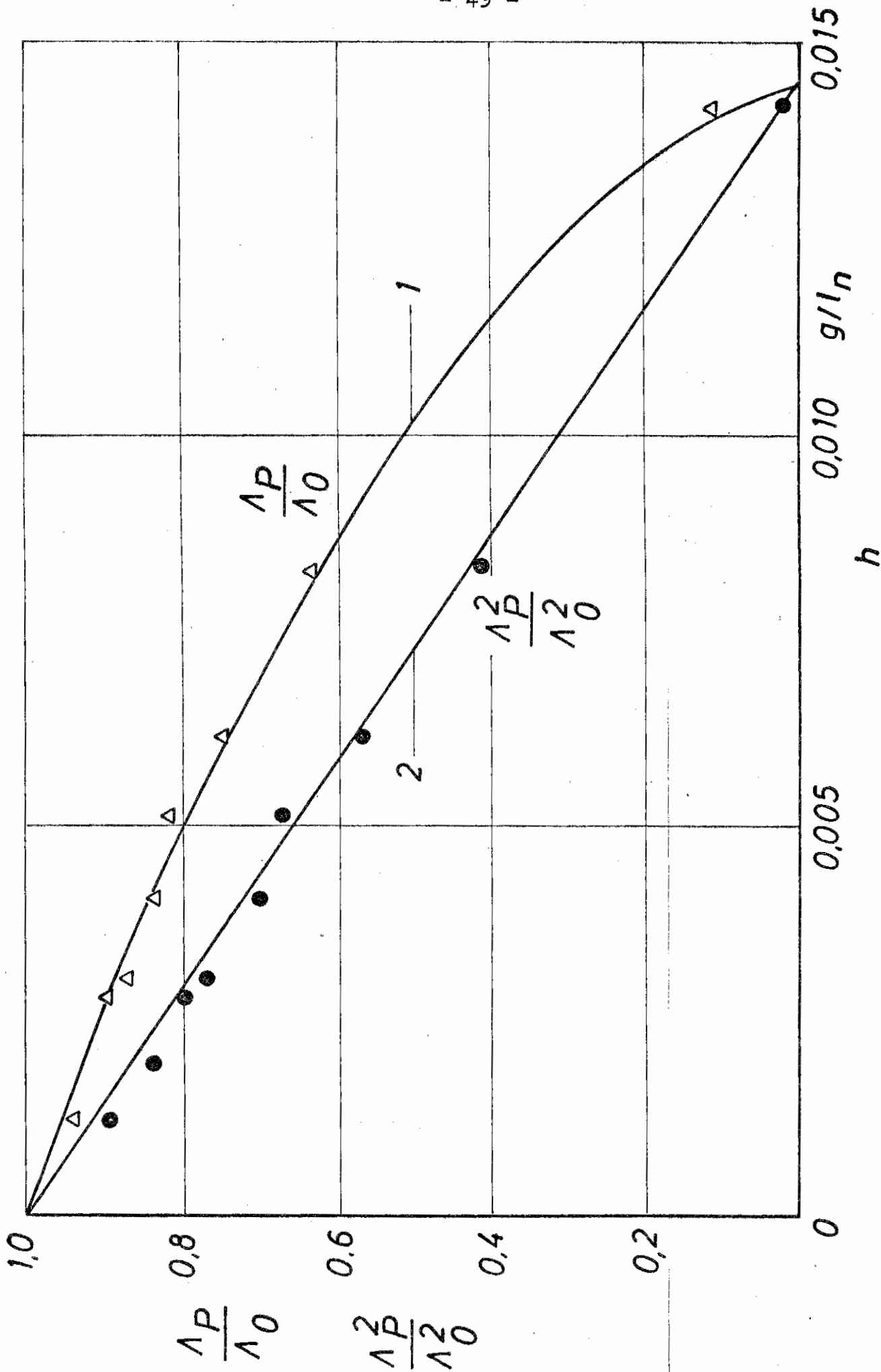


Bild 14. Spezifische Pulverbelastung in Abhängigkeit von der normierten Flammengeschwindigkeit bzw. dem Quadrat der normierten Flammengeschwindigkeit

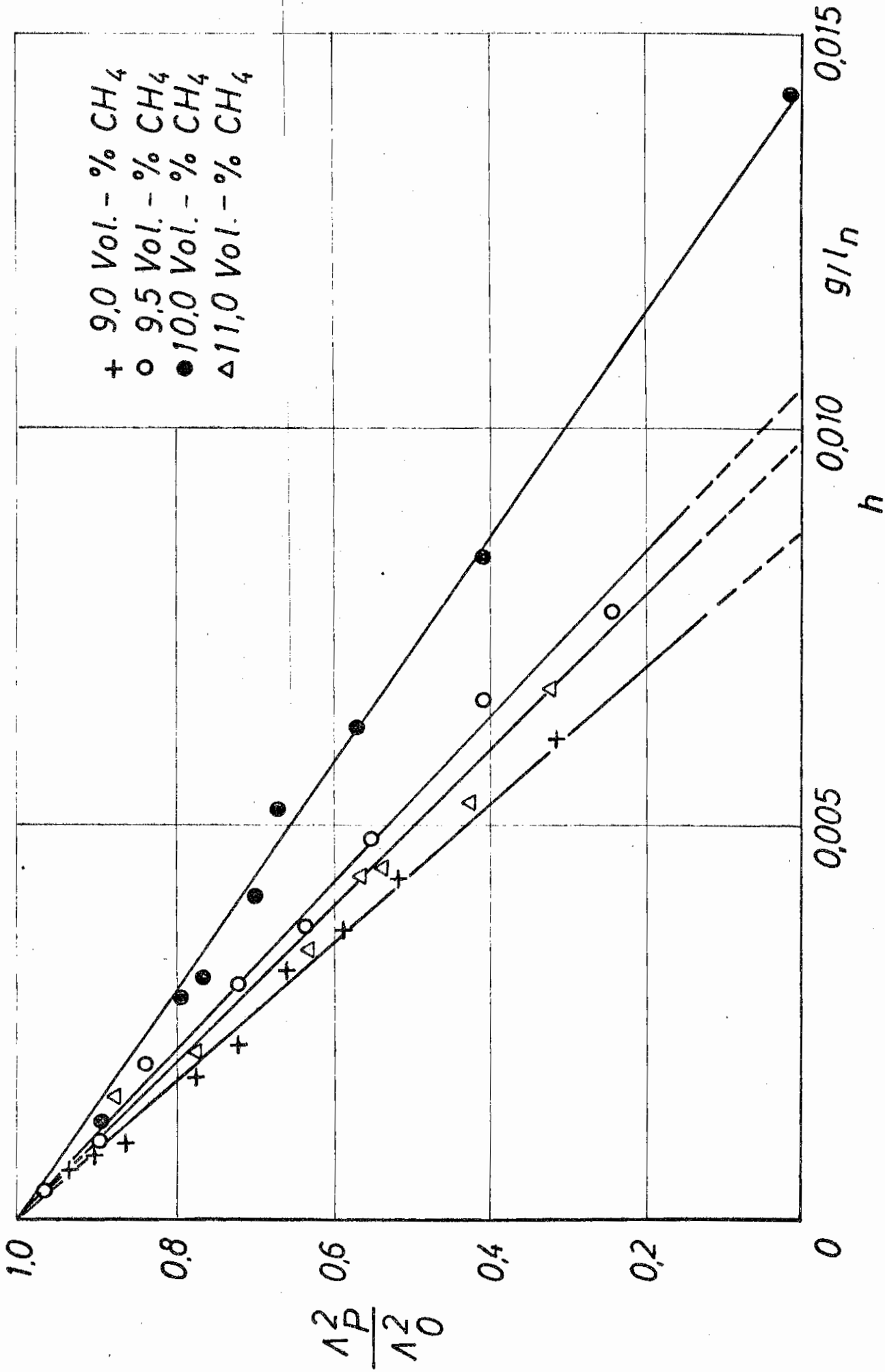


Bild 15. Löschwirksamkeit des Pulvers L bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen

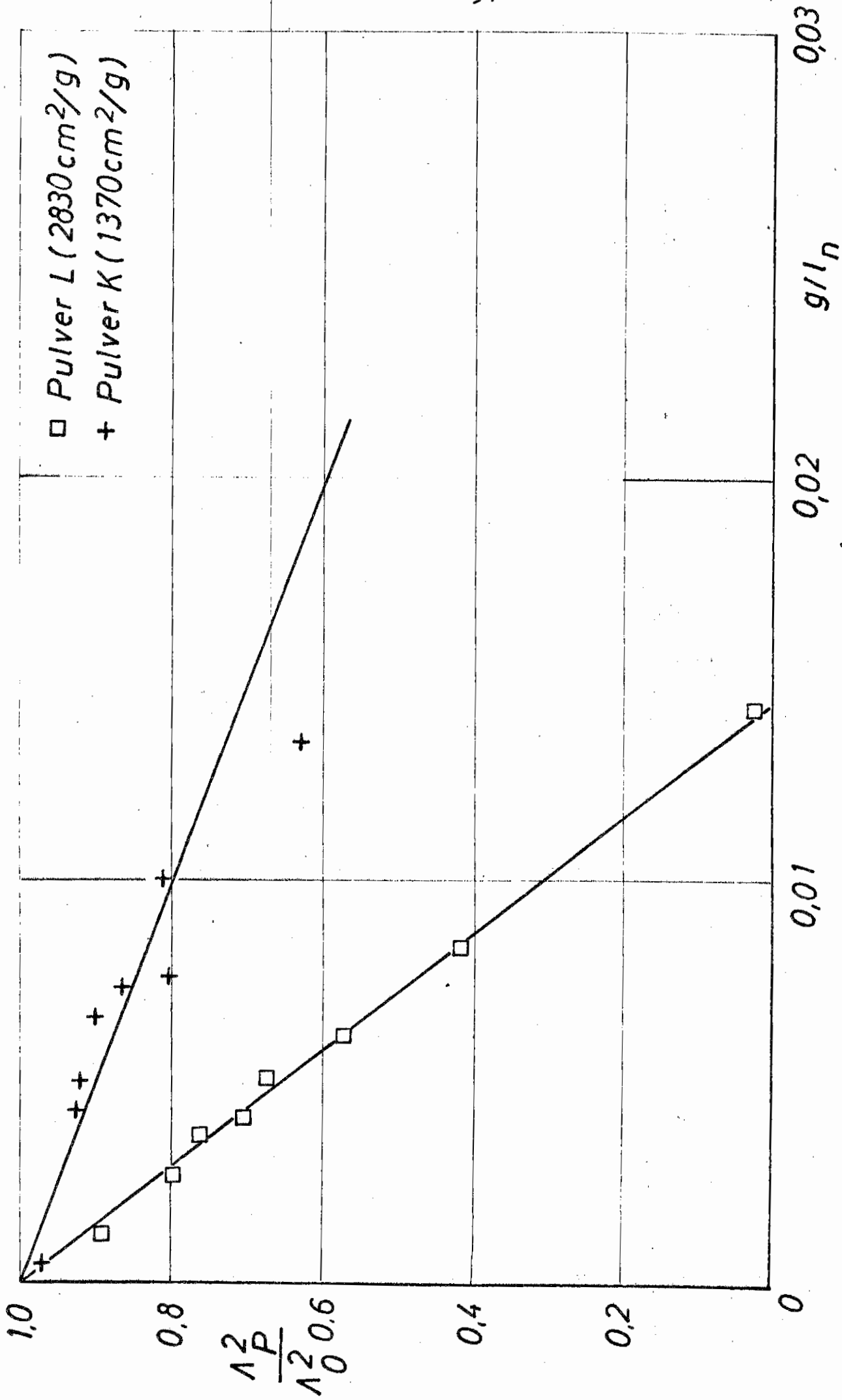


Bild 16. Löslichkeit der Pulver K und L bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

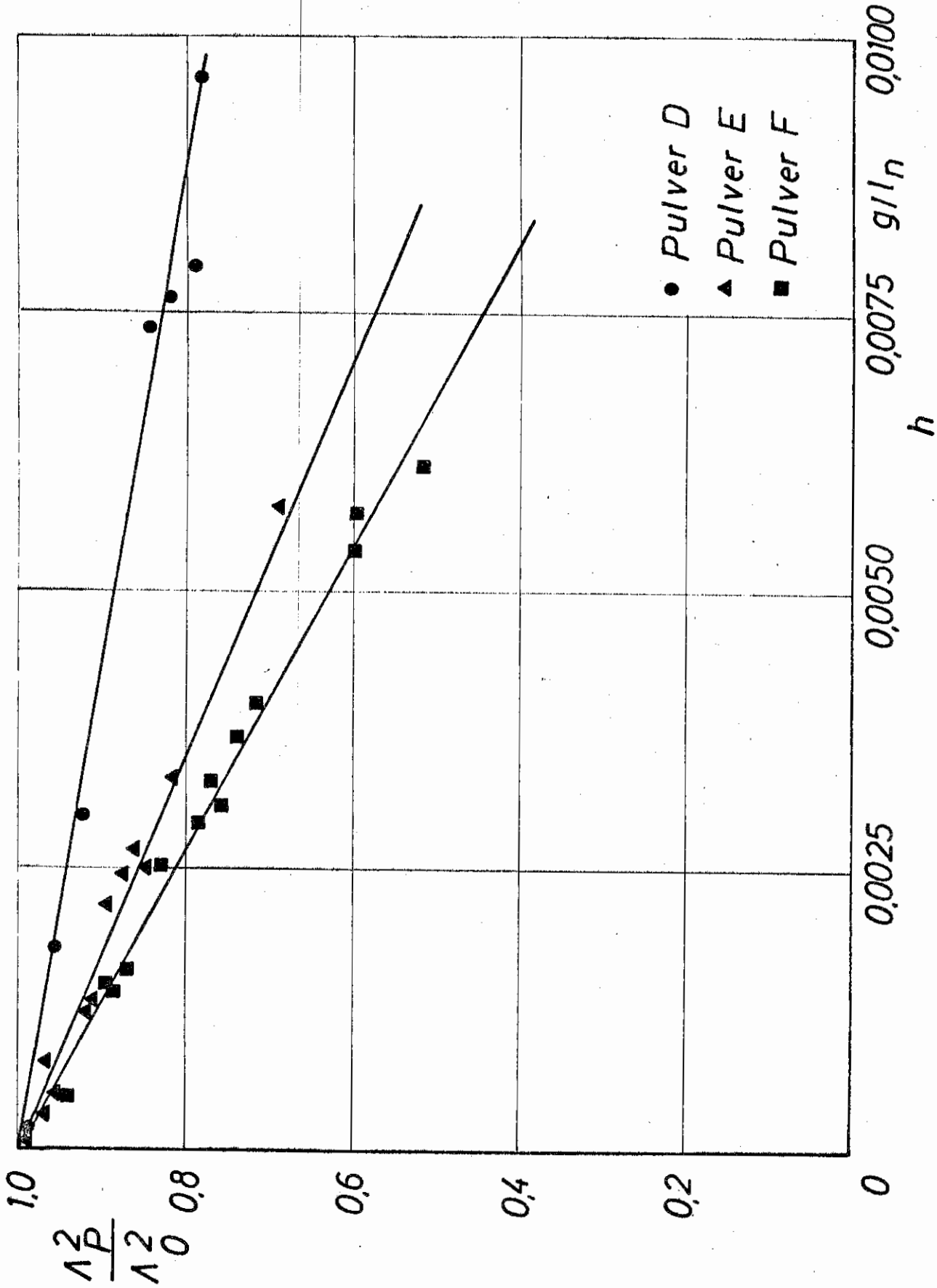


Bild 17. Löschwirksamkeit der BCE-Pulver D, E und F bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan



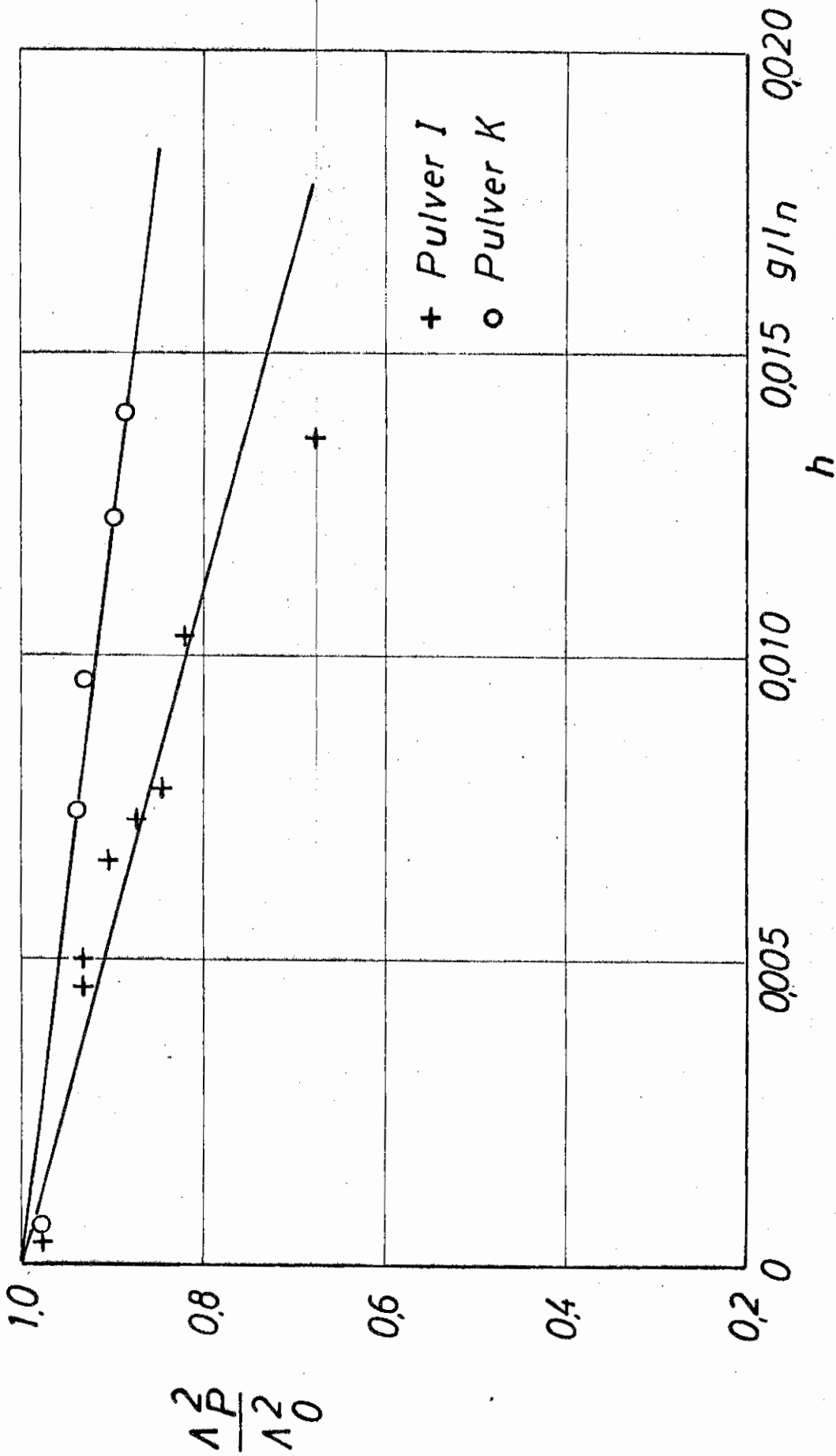


Bild 18. Löschwirksamkeit der Pulver I (Natriumbikarbonat) und K (Kaliumbikarbonat) bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

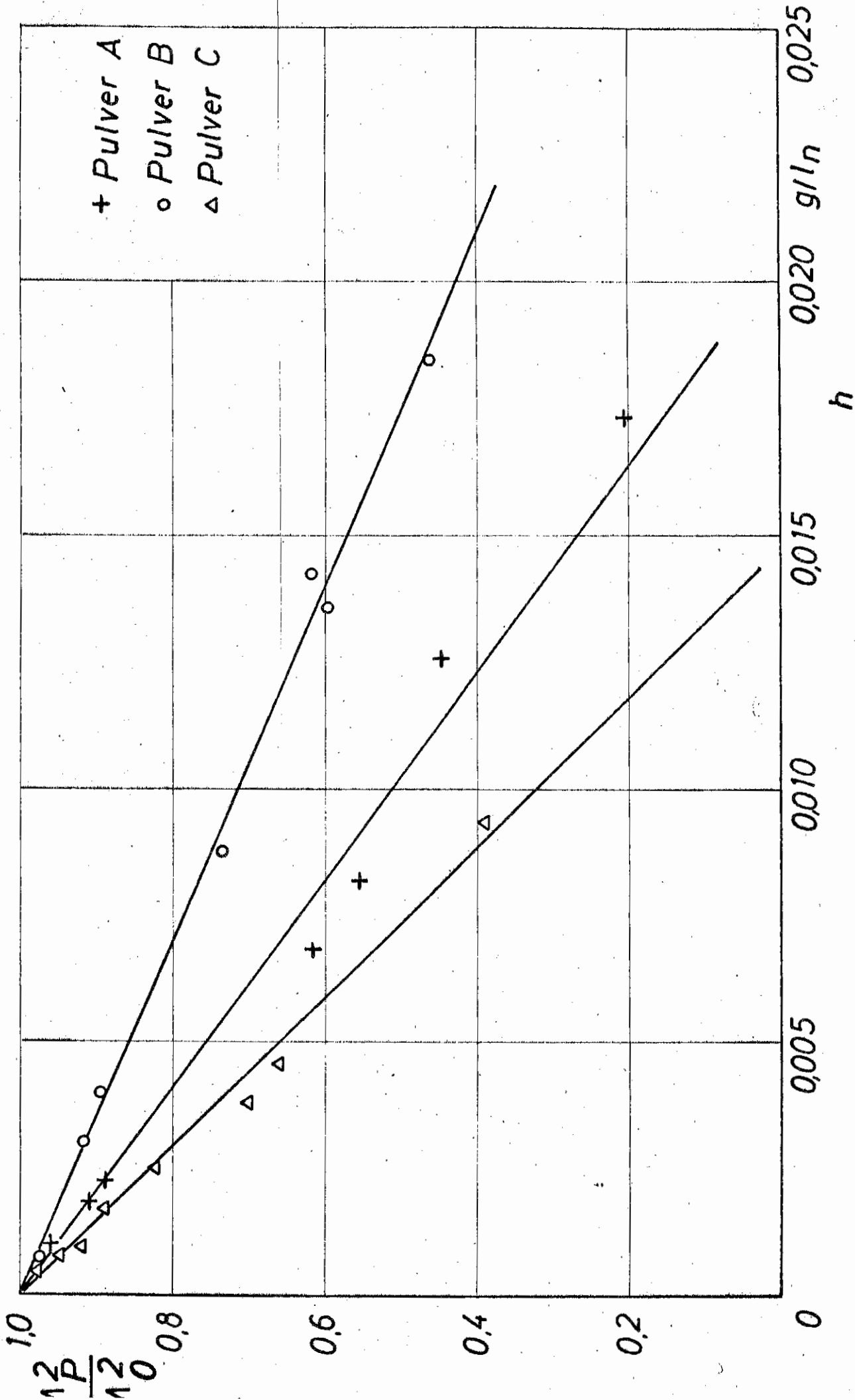


Bild 19. Löschwirksamkeit der Pulver A, B und C bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

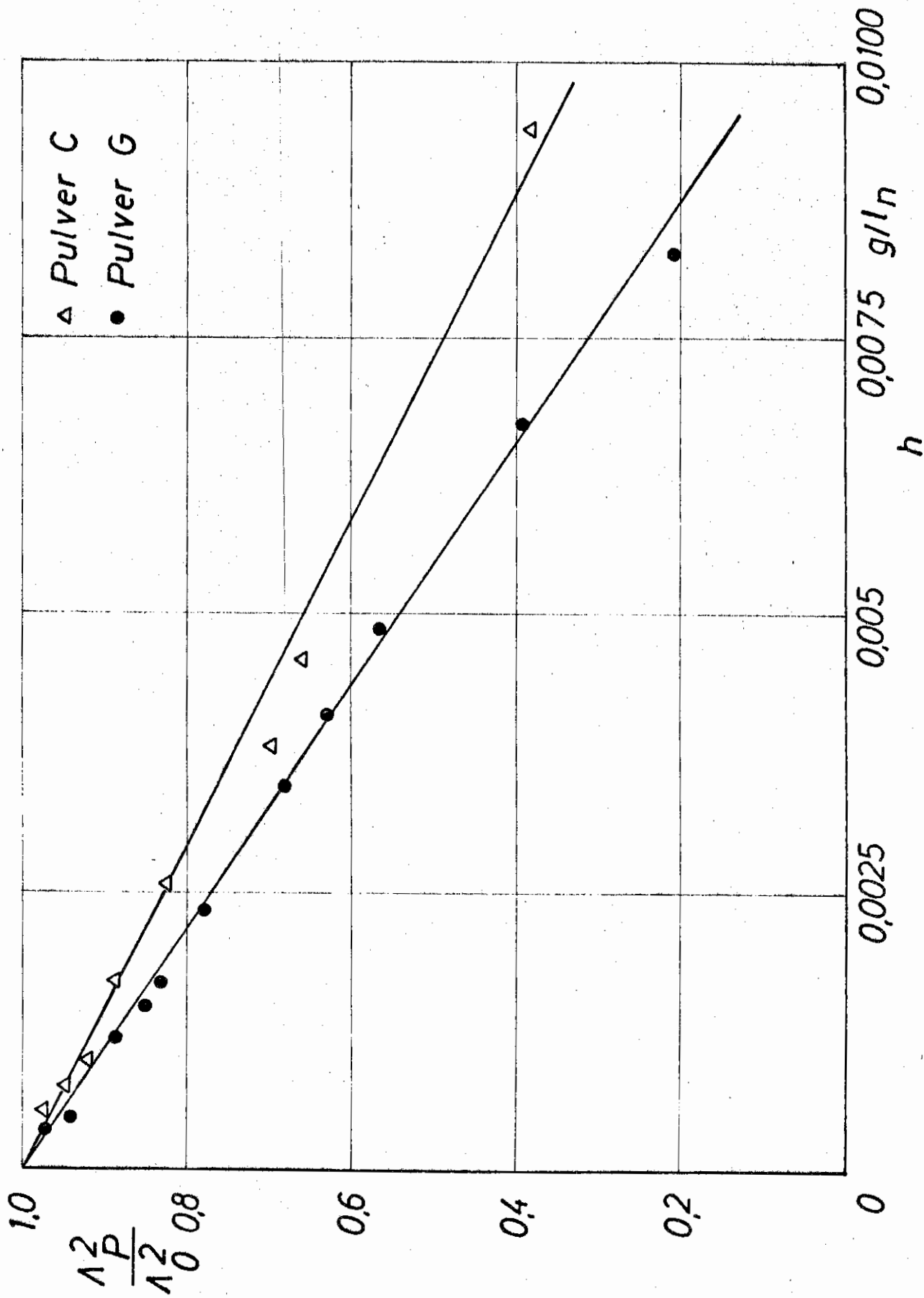


Bild 20. Löschwirksamkeit des Pulvers C aus dem Jahre 1969 und des Pulvers G von 1971 bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

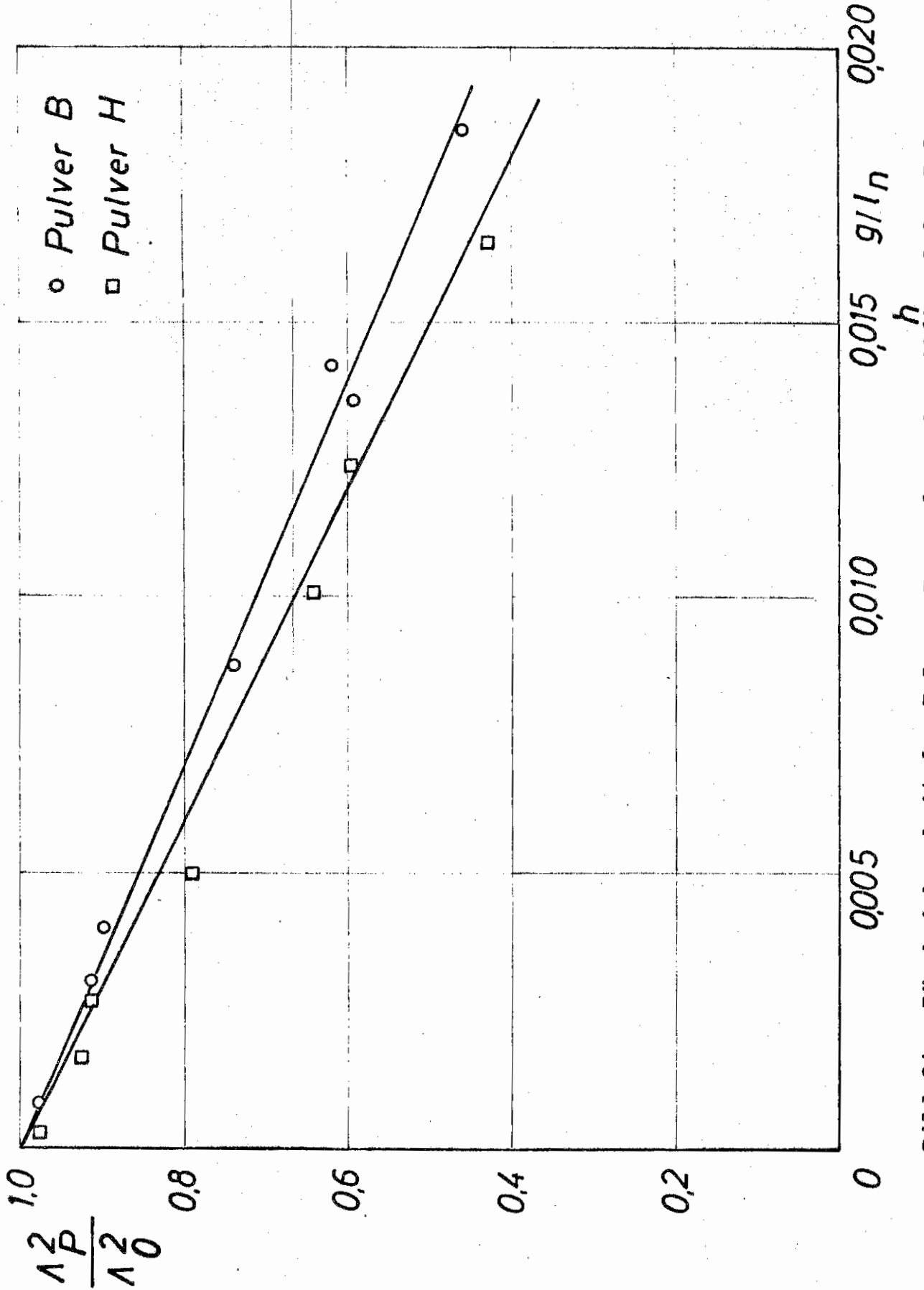


Bild 21. Löschwirksamkeit des Pulvers B aus dem Jahre 1968 und des Pulvers H von 1971 bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

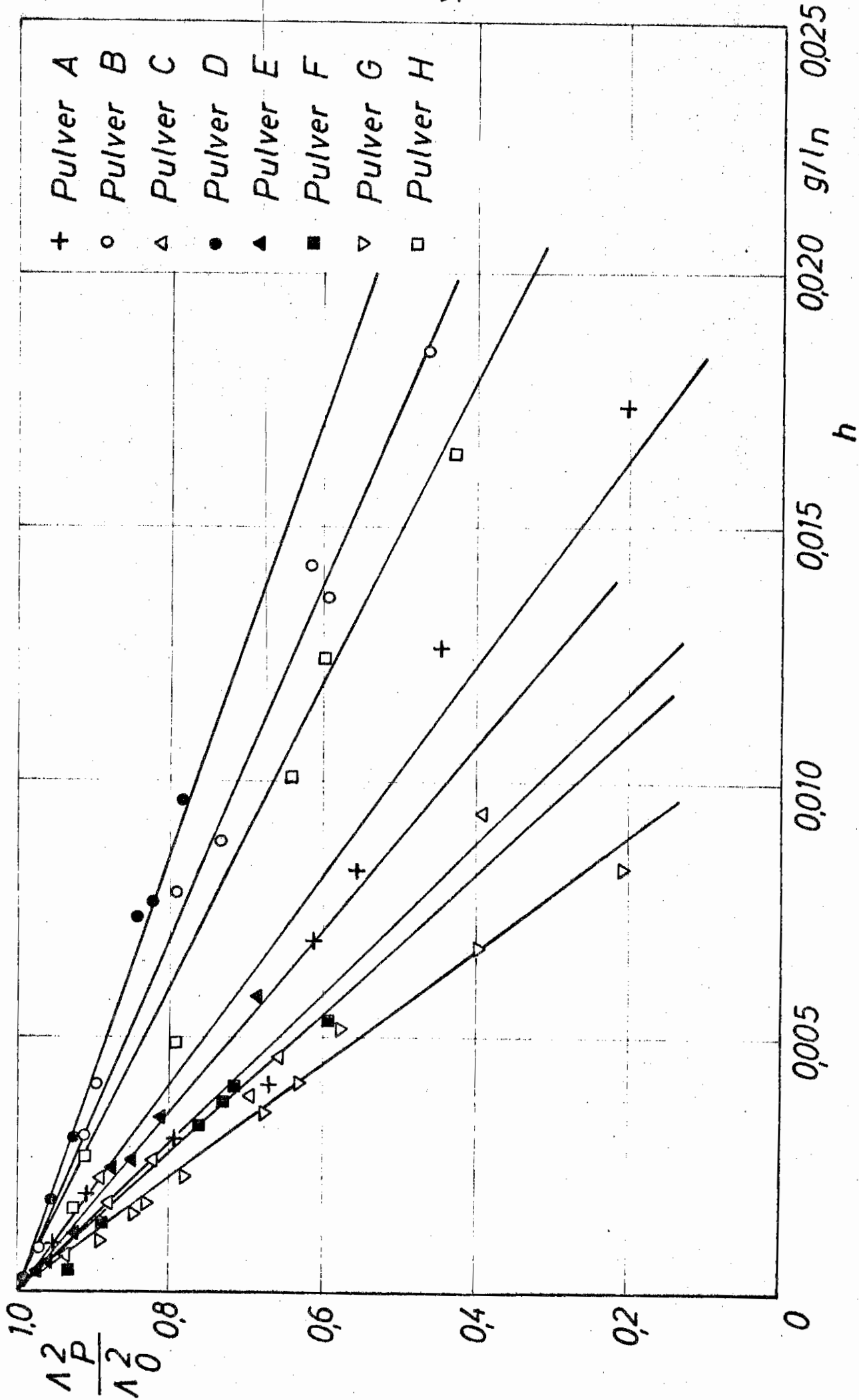


Bild 22. Löschwirksamkeit der untersuchten handelsüblichen ABC- und BCE-Pulver bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

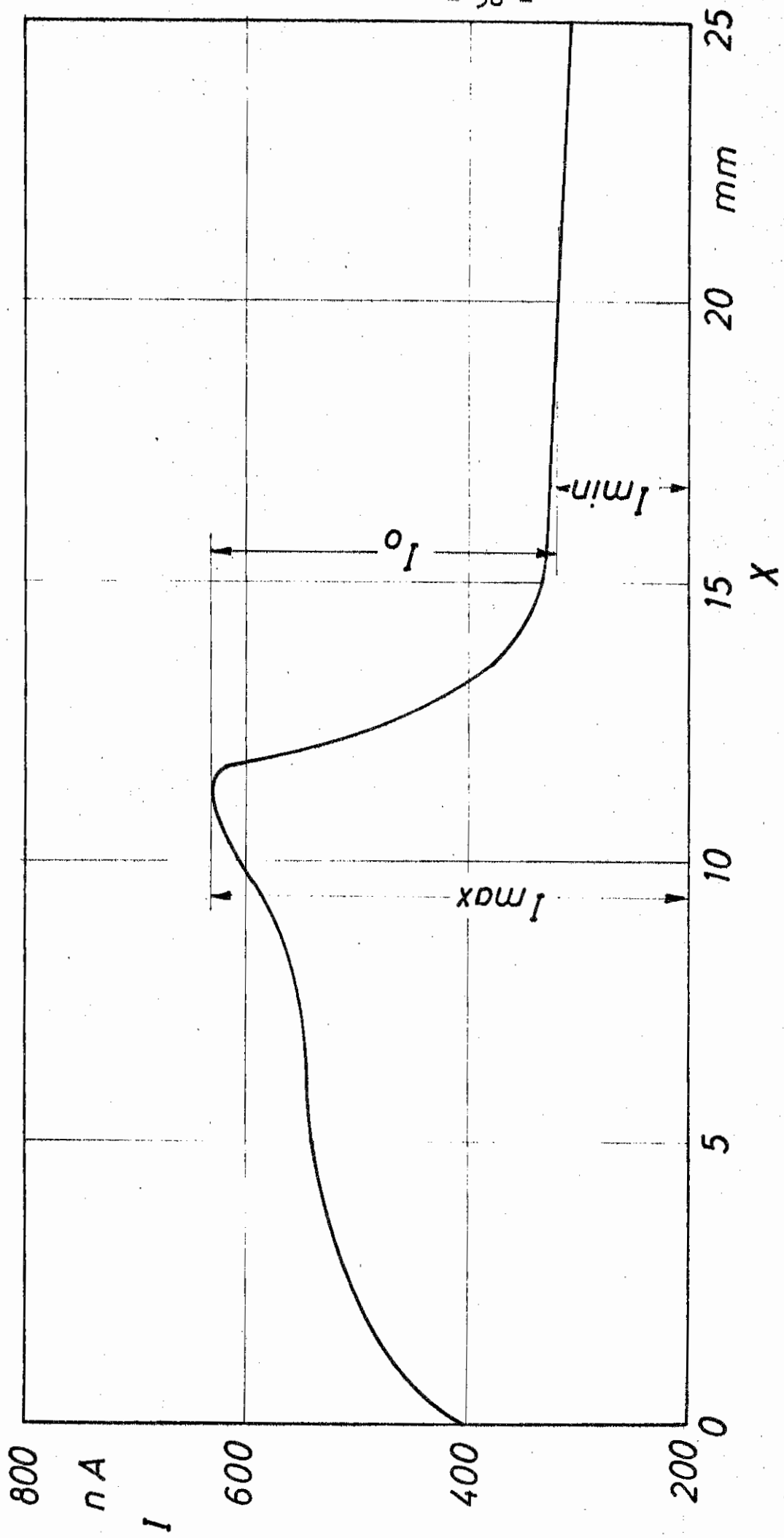


Bild 23. Verlauf der OH-Strahlungsintensität längs einer Methan-Luft-Flamme mit 10 Vol-% Methan

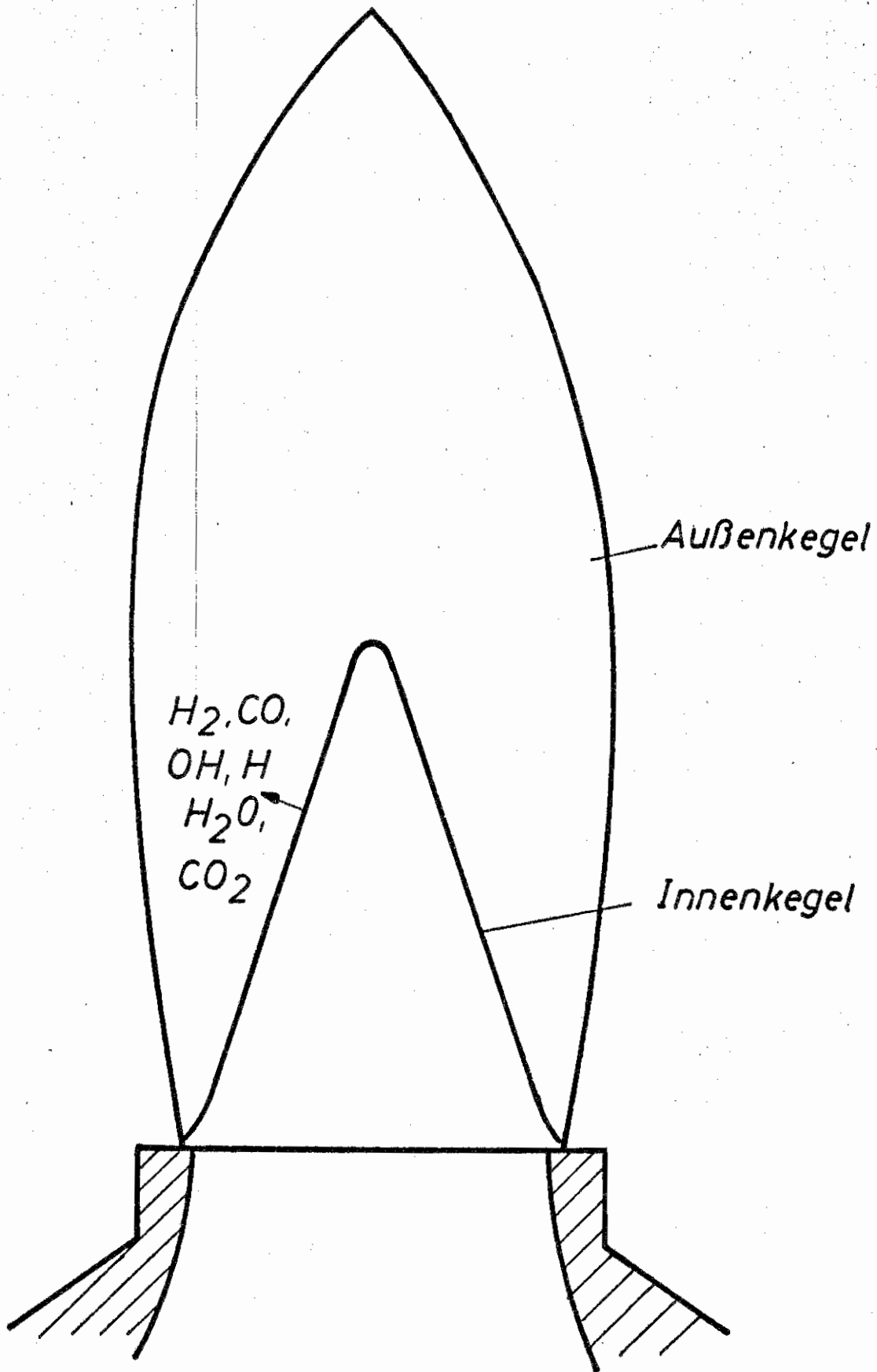


Bild 24. Schematische Skizze einer Vormischflamme mit Innen- und Außenkegel

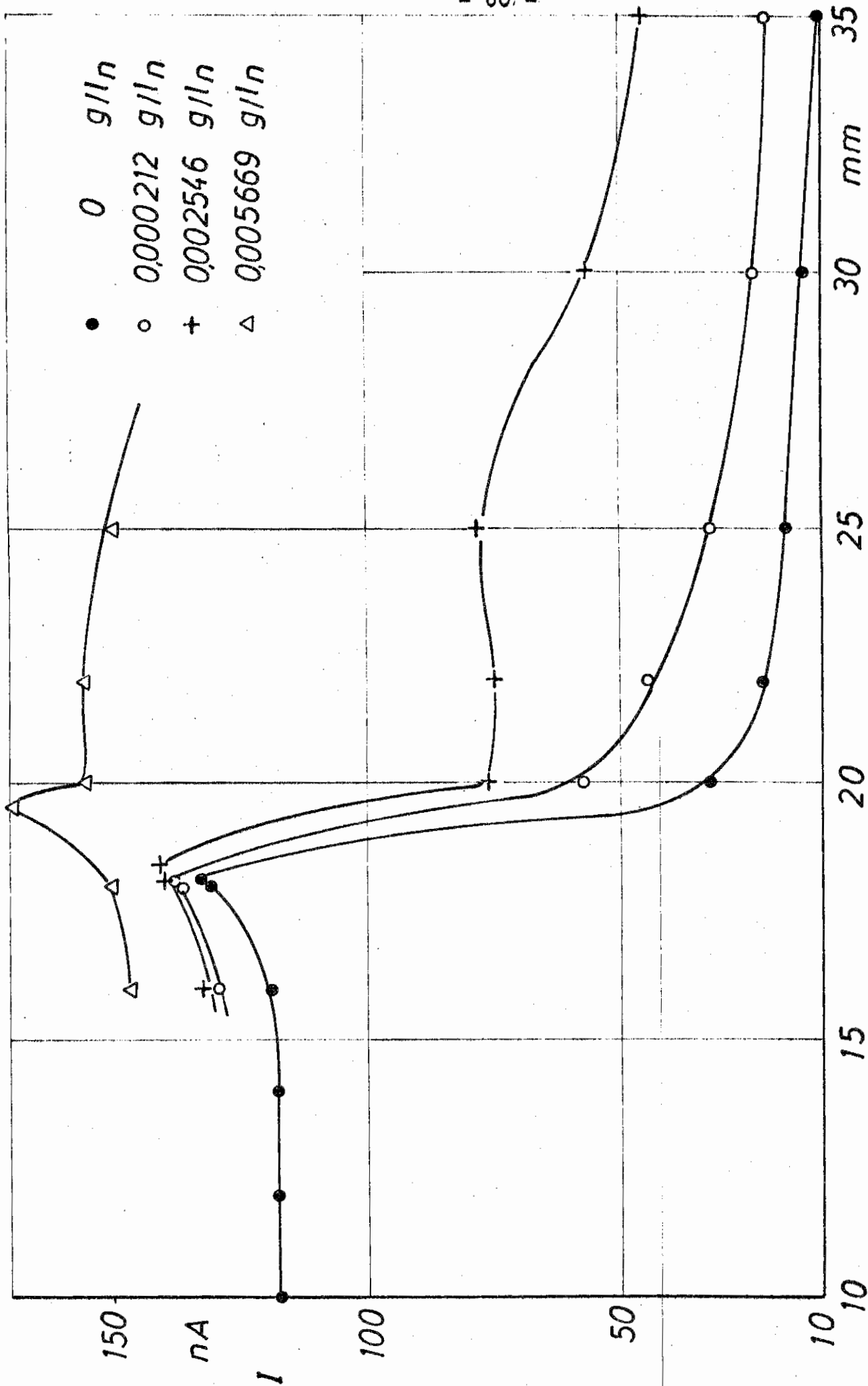


Bild 25. Verlauf der OH-Strahlungsintensität längs einer Methan-Luftflamme mit 10 Vol-% Methan bei verschiedenen spezifischen Pulverbelastungen



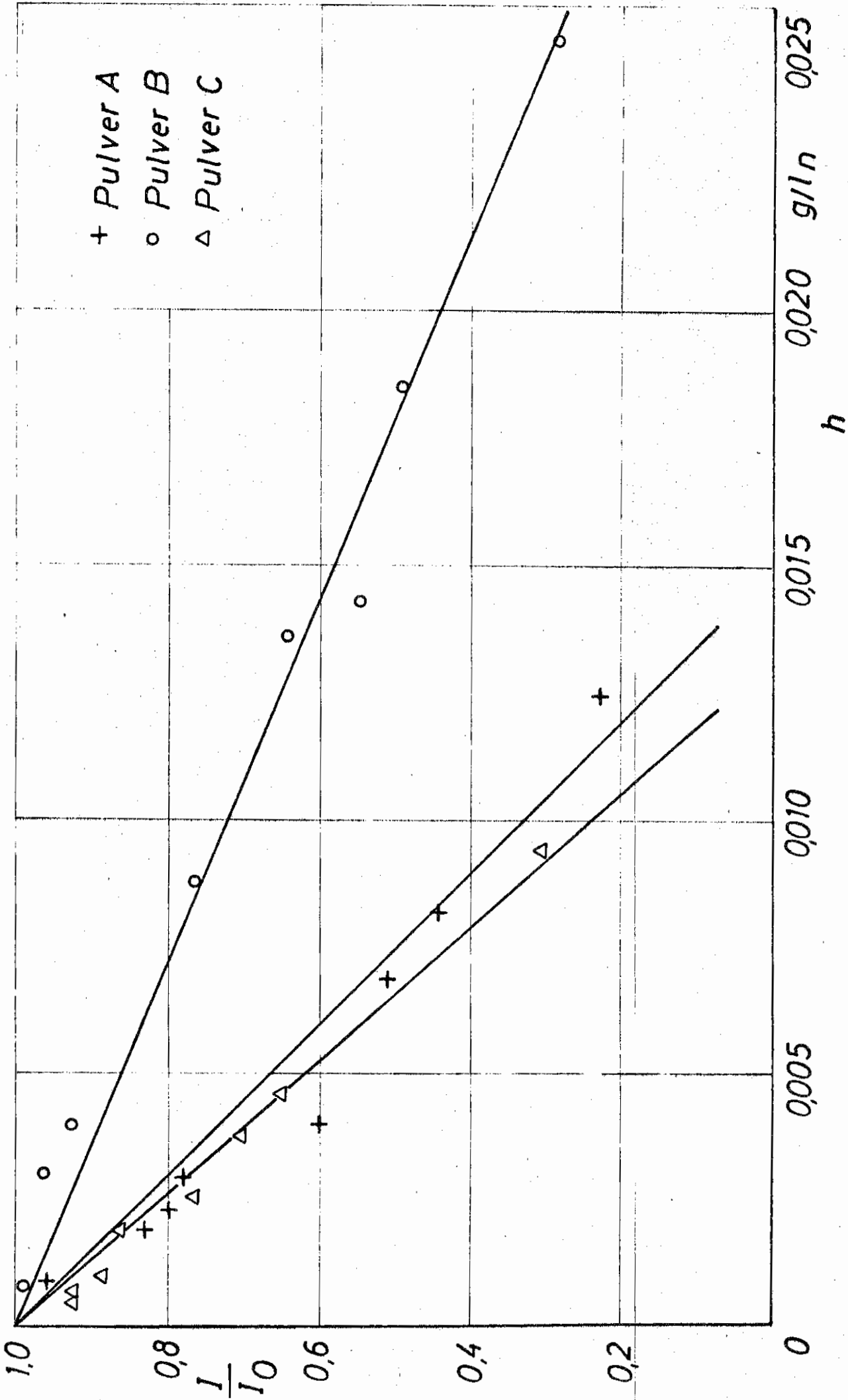


Bild 26. Änderung der OH-Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der spezifischen Pulverbeladung der Pulver A, B und C bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

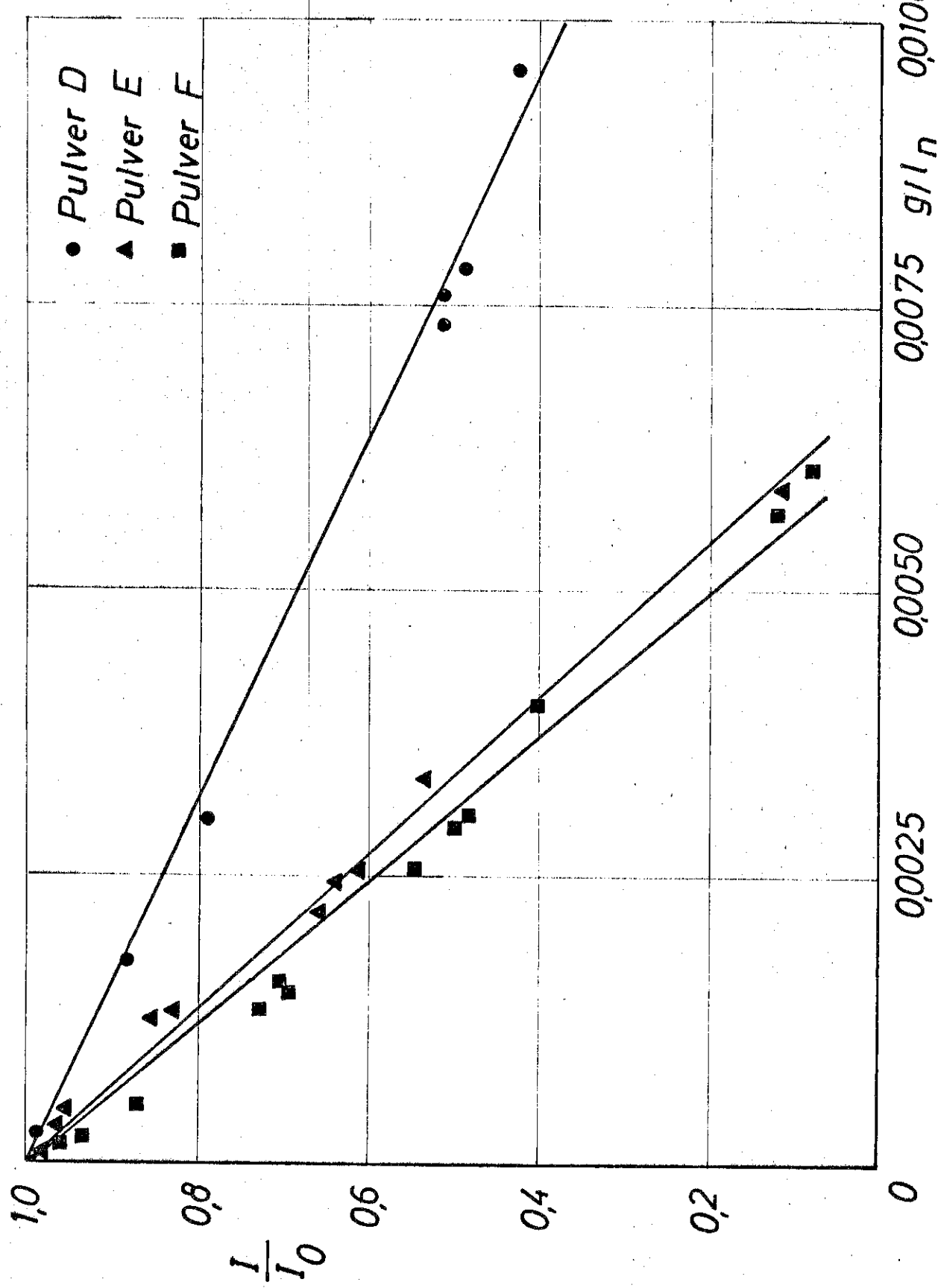


Bild 27. Änderung der OH-Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der spezifischen Pulverbeladung der Pulver D, E und F bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan

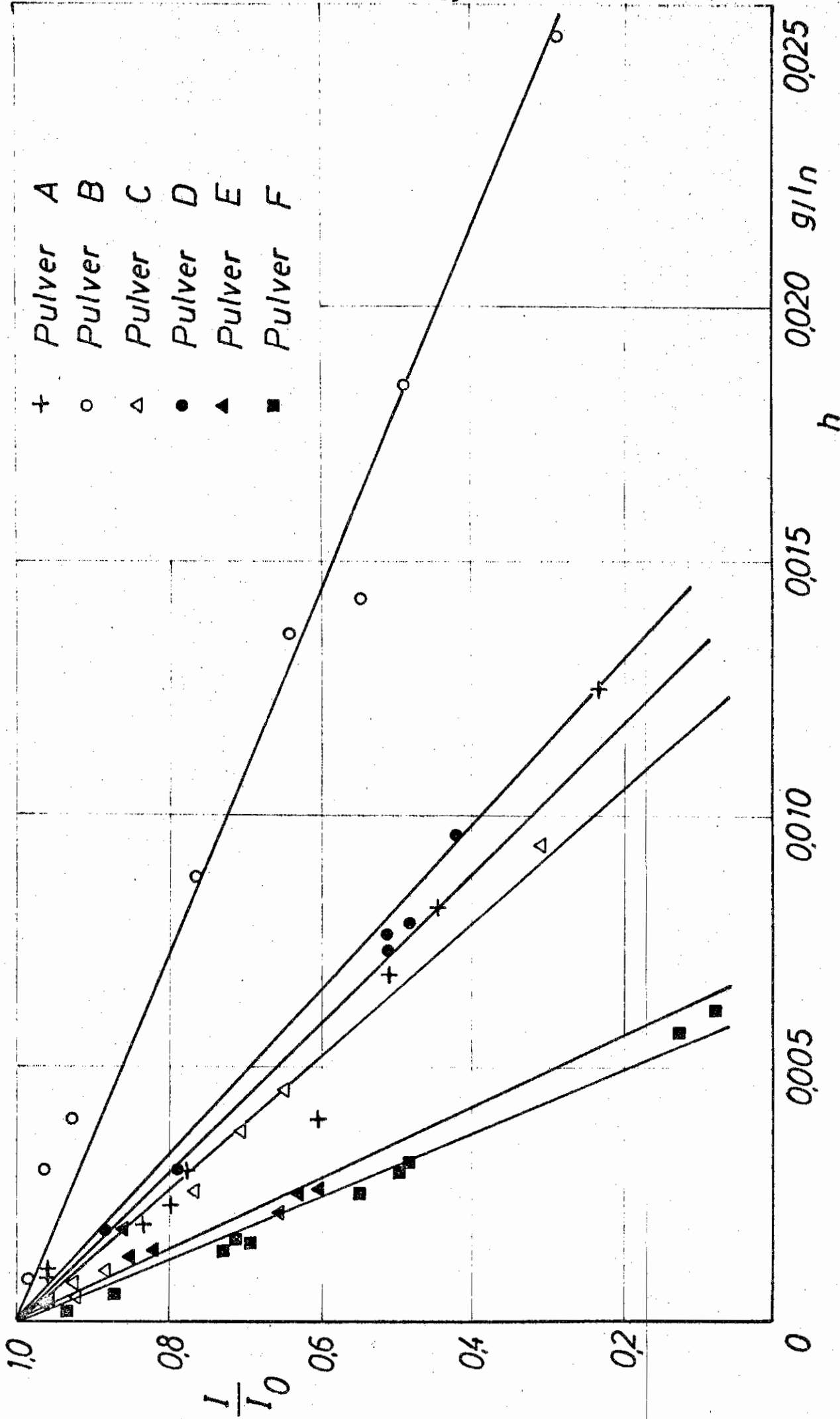


Bild 28. Änderung der OH-Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der spezifischen Pulverbelastung bei den untersuchten ABC- und BCE-Pulvern bei einer Brenngaskonzentration von 10 Vol-% CH<sub>4</sub>