

AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

Untersuchung des Einflusses der Oberfläche und der
chemischen Zusammensetzung auf die Wirksamkeit von
Trockenlöschpulvern mit Hilfe eines Meßverfahrens im
Labormaßstab

26

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 26

Untersuchung des Einflusses der Oberfläche und der
chemischen Zusammensetzung auf die Wirksamkeit von
Trockenlöschpulvern mit Hilfe eines Meßverfahrens im
Labormaßstab

von

Dipl.-Ing. Wolfgang Hoffmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Januar 1973

FA.Nr. 59 (2/72)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 26

Untersuchung des Einflusses der Oberfläche und der chemischen Zusammensetzung auf die Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern mit Hilfe eines Meßverfahrens im Labormaßstab

Dipl.-Ing. W. Hoffmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Mit einer an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik entwickelten Prüfapparatur im Labormaßstab wurde der Einfluß der Teilchenoberfläche auf die Löschwirksamkeit von Kalium- und Natriumhydrogencarbonat untersucht. Außerdem wurde die Wirksamkeit von Kalium- und Natriumhydrogencarbonat, Kaliumsulfat, Monoammonphosphat und Ammonsulfat bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen bestimmt.

Die Versuche mit unterschiedlichen Kornfraktionen von Kalium- und Natriumhydrogencarbonat ergaben, daß die Löschwirksamkeit proportional der Löschpulveroberfläche ist. Trägt man die Meßergebnisse über dem Produkt aus massenbezogener spezifischer Oberfläche und spezifischer Pulverbeladung auf, so kann der Einfluß der Pulverteilchenoberfläche eliminiert werden. Unterschiede in der Wirksamkeit verschiedener Pulver beruhen dann nur auf der chemischen Zusammensetzung.

Bei den Untersuchungen mit den reinen Substanzen wurde festgestellt, daß Kaliumhydrogencarbonat und Monoammonphosphat die größte Wirksamkeit besitzen, die geringste weist das Ammonsulfat auf. Der Vergleich der Meßwerte der reinen Substanzen mit denen handelsüblicher BCE- und ABC-Pulver bestätigen die Ergebnisse.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. AUFGABENSTELLUNG	1
3. MESSMETHODE	2
4. VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHS- DURCHFÜHRUNG	4
4.1. Flammengeschwindigkeitsmessung	4
4.2. Pulvermengenmessung	6
4.3. Versuchsbedingungen	9
4.4. Versuchsdurchführung	11
5. VERSUCHSERGEBNISSE	11
5.1. Einfluß der Teilchenoberfläche auf die Löschwirksamkeit	12
5.2. Löschwirksamkeit der reinen Substanzen	14
6. ZUSAMMENFASSUNG	19
7. LITERATURVERZEICHNIS	21
8. TABELLEN UND BILDER	22

1. EINLEITUNG

Neuere Untersuchungen an ruhenden und strömenden Gas-Luft-Gemischen haben gezeigt, daß weder ein Verdünnungseffekt noch ein Kühleffekt die primäre Löschwirkung von Trockenlöschpulvern sein kann. Es wird vermutet, daß die Löschwirkung der Pulver auf einem sog. antikatalytischen Effekt beruht. Die Pulverteilchen greifen direkt in den Verbrennungsablauf ein. Um eine Verbrennung aufrecht/erhalten zu können, müssen mehr für den Verbrennungsablauf notwendige Radikale gebildet werden als durch Rekombinationsreaktionen verloren gehen. Die Wirkungsweise von Trockenlöschpulvern läßt sich daher nur so erklären, daß diese Substanzen die Zahl der Rekombinationsreaktionen pro Zeiteinheit in der Flamme so stark erhöhen, daß eine Flammenausbreitung nicht mehr stattfinden kann.

Die wichtigsten Größen, die die Wirksamkeit eines Trockenlöschpulvers bestimmen, sind die Teilchengröße bzw. Oberfläche, eine physikalische Eigenschaft, und die chemische Zusammensetzung.

2. AUFGABENSTELLUNG

Um Pulver verschiedener chemischer Zusammensetzung miteinander vergleichen zu können, muß bekannt sein, welchen Einfluß die spezifische Oberfläche bzw. Teilchengröße auf die Wirksamkeit hat. Mit Hilfe einer an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik entwickelten Prüfapparatur im Labormaßstab [1,2] wird die Abhängigkeit der Lösch-

wirksamkeit von der Teilchengröße bzw. spezifischen Oberfläche von Pulvern untersucht.

Danach wird die Löschwirkung verschiedener reiner Substanzen, die als Hauptbestandteil in Trockenlöschpulver Verwendung finden, bestimmt.

3. MESSMETHODE

Die Meßmethode wurden in früheren Arbeiten bereits ausführlich beschrieben [1,2]. Sie wird daher hier nur kurz skizziert.

Die Flammengeschwindigkeit ist für den Verbrennungsablauf in einer Flamme die bestimmende Größe. Wird einer Flamme Löschpulver zugegeben, so verringert sich die Flammengeschwindigkeit gemäß der Wirksamkeit und Menge des zugeführten Pulvers. Es besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen der Flammengeschwindigkeit und der Löschwirkung der Pulver. Das Problem, die Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern zu bestimmen, beschränkt sich daher auf die Messung der Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der zugegebenen Pulvermenge. Prinzipiell kann die Flammengeschwindigkeit sowohl an ruhenden als auch an strömenden Brennstoff-Luft-Gemischen bestimmt werden. Die Meßmethoden mit ruhendem Gemisch haben den Nachteil, daß größere Störeinflüsse durch die Wände des Gefäßes und durch sich veränderte Anfangsbedingungen auftreten. Auch bei den Brennermethoden treten Störungen der Flammenfront auf. So be-

obachtet man am Brennerrand eine verstärkte Wärmeableitung und Radikalrekombination, wodurch die Flammengeschwindigkeit verlangsamt wird. An der Spitze des Kegels steigt die Flammengeschwindigkeit stark an, da die näher zusammenrückenden Flammenfronten eine verstärkte Wärmeleitung und Radikaldiffusion in das kalte Gas-Luft-Gemisch bewirken. Durch Auswahl geeigneter Brenner und Strömungsbedingungen kann ein Abschnitt in der Kegelflanke geschaffen werden, der von den Störungen am Flammenfuß und an der Spitze unbeeinflusst ist. Die Flammengeschwindigkeit kann dann gemäß der Definitionsgleichung

$$\Lambda = u \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

aus der Auströmungsgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung des unverbrannten Gas-Luft-Gemisches u und dem Anstellwinkel der Flammenfront gegen die Anströmgeschwindigkeit α berechnet werden. Bei dem bisher genauesten Brennerverfahren nach Lindow [3] wird α aus dem Schlierenbild des Primärverbrennungskegels ausgemessen und u mit Hilfe des Teilchen-spurverfahrens bestimmt.

Dieses Meßverfahren, das auch als Düsenbrenner-Schlierenbild-Kegelwinkel-Verfahren bezeichnet wird, wurde zur Flammengeschwindigkeitsmessung verwendet. Die Flammengeschwindigkeit wird nach Gleichung (1) berechnet. Die hierzu benötigte Anströmgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung u wird aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Düsenbrenneraustrittsquerschnitt \bar{u} bzw. dem Gas-Luft-

Volumenstrom \dot{V} mit folgender Beziehung bestimmt:

$$u = c_1 \bar{u} + c_2 \quad (2)$$

Da die gleichen Düsen verwendet wurden, können die von Lindow [4] ermittelten Werte für die Konstanten c_1 und c_2 eingesetzt werden. Dabei beträgt $c_1 = 1,175$. c_2 ist konzentrationsabhängig, wie aus den Werten der Tabelle 1 zu entnehmen ist.

Aus der Vielzahl an bekannten schlierenoptischen Systemen wählte Lindow die Anordnung nach Töpler [5]. 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 winkeltreu und scharf abgebildet werden.

4. VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1. Flammengeschwindigkeitsmessung

Der Aufbau der zur Flammengeschwindigkeitsmessung verwendeten 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 und der Brenngaskonzentrationen.
3. Schlierenoptische Anordnung zur Erzeugung des Schlierenbildes der Verbrennungszone, an dem die zur Berechnung der Flammengeschwindigkeit notwendige Winkelmessung vorgenommen wird.

Bild 1 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 Boden-

platte 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 Brennerrand 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. Der Aufbau der optischen Anlage ist in [1,2] ausführlich beschrieben.

4.2. Pulvermengenmessung

Die Löschpulvermenge kann auf zwei verschiedene Arten bestimmt werden. Im ersten Fall wird ein Filter auf die Brennerdüse aufgesetzt und das Pulver aus dem Brenngas-Luft-Strom aufgefangen. Die Pulvermenge wird gravimetrisch mit einer Analysenwaage auf 0,1 mg genau gemessen. Aus der aufgefangenen Pulvermenge und der Meßzeit errechnet sich

dann die Pulverrate in g/min. Im zweiten Fall wird die Pulvermenge fotoelektrisch ermittelt. Hier kann die Schwächung eines Lichtstrahles als Maß für die Löschpulvermenge herangezogen werden. In Bild 2 ist die Meßanordnung schematisch skizziert. Als Lichtquelle dient eine Niedervoltlampe a. Der Lichtstrahl wird von der Linse b fokussiert und parallel gerichtet. Die Blende c, die eine rechteckige Öffnung mit den Abmessungen 10 mm x 4 mm besitzt, erzeugt einen schmalen rechteckigen Lichtstrahl, der 2 mm oberhalb der Brenneröffnung den pulverbeladenen Gas-Luft-Strom durchdringt. Danach wird das Licht von einer zweiten Linse d fokussiert und auf eine Fotozelle e projiziert. Hinter der Niedervoltlampe a ist eine zweite Fotozelle f angebracht, die zwei verschiedene Aufgaben erfüllt. Die Fotozelle e reagiert schon auf geringe Lichtintensitätsschwankungen der Lampe, die die Messung verfälschen können. Daher ist hinter der Lampe die zweite Fotozelle angebracht worden, die parallel zur Fotozelle e geschaltet ist. Mit Hilfe geeigneter Widerstände können dann die Lichtintensitätsschwankungen, die sich bei den Fotozellen als Strom- bzw. Spannungsschwankungen ergeben, unterdrückt werden. Die zweite Aufgabe der Fotozelle f besteht in der Verstärkung der Intensitätsabschwächung, die durch den pulverbeladenen Gas-Luft-Strom verursacht wird. Die Verringerung der Intensität des Lichtstrahles durch die Pulverteilchen ist gering. Dementsprechend ändert sich die Spannung bzw. der Strom an der Fotozelle e

nur wenig. Diese geringen Änderungen können ohne eine Verstärkung der an der Fotozelle e abgegebenen Spannung nicht exakt gemessen werden. Durch die Differenzschaltung der Fotozelle e und f wird der Effekt der Intensitätsabschwächung durch die Pulverteilchen wesentlich erhöht, so daß die Spannung, die sich aus der Differenz der Spannungen der parallel geschalteten Fotozellen e und f ergibt, ohne Verstärkung mit einem geeigneten Meßgerät bestimmt werden kann. Die Schaltung ist ebenfalls in Bild 2 eingezeichnet. Mit den verstellbaren Widerständen R_1 und R_2 werden die Spannungen der beiden Fotozellen, die durch den unbeeinflussten Lichtstrahl verursacht werden, abgeglichen. Pulverteilchen, die den Lichtstrahl durchqueren, schwächen dessen Intensität. Die Intensitätsänderung wird dann als Spannungsänderung von dem Meßgerät M angezeigt. Die Empfindlichkeit der Anzeige kann mit dem ebenfalls verstellbaren Widerstand R_3 eingestellt werden.

Da nicht gewährleistet ist, daß die von den Fotozellen e und f abgegebenen Spannung in allen Bereichen linear von der einfallenden Lichtintensität ist, muß die Meßanordnung geeicht werden. Mit Hilfe der Eichkurve kann die Pulvermenge aus der am Meßgerät angezeigten Spannung bestimmt werden. Als Meßgerät wurde ein Linienschreiber verwendet. Die nach einem der beiden beschriebenen Verfahren gemessene Pulverrate in g/min wird auf den Brenngas-Luft-Volumenstrom bezogen. Sie wird im weiteren als spezifische Pulverbeladung h bezeichnet.

4.3. Versuchsbedingungen

Als Brenngas wurde technisch reines Methan verwendet. Die Verbrennungsluft wurde ebenfalls Stahlflaschen entnommen. Der Wasserdampfgehalt der Luft wurde vom Hersteller mit < 200 ppm angegeben. Sie kann als praktisch trocken bezeichnet werden. Die gaschromatographische Analyse des Methans ist in Tabelle 2 wiedergegeben.

Um den Einfluß der spezifischen Oberfläche auf die Wirksamkeit der reinen chemischen Substanzen ermitteln zu können, wurden von Kalium- und Natriumhydrogencarbonat verschiedene Kornfraktionen hergestellt. Die gröberen Fraktionen wurden mit den Maschensieben 32 μm und 40 μm ausgesiebt, bei den feineren wurde ein Bahco-Spiralwindsichter und ein Schwerkraft-Sichter "Analysette 8" verwendet. Die spezifische Oberfläche der Kornfraktionen wurde mit einem Durchlässigkeitsprüfer nach Blaine bestimmt. Die wichtigsten Kenn-
daten der Kalium- und Natriumhydrogencarbonatproben sowie die der anderen untersuchten chemischen Verbindungen Kaliumsulfat, Monoammonphosphat und Ammoniumsulfat sind in der Tabelle 3 zusammengefaßt. Der mittlere Teilchendurchmesser d wurde aus der spezifischen massenbezogenen Oberfläche O_M nach folgender Beziehung berechnet:

$$d = \frac{6}{\rho \cdot O_M} \quad (3)$$

Die untersuchten chemischen Substanzen sind hygroskopisch. Um ein Verklumpen und Agglomerieren der Pulverteilchen

zu verhindern, wurden die Proben zuerst 48 h in einem Exsikkator bei 20 Torr gelagert. Als Trocknungsmittel wurde Phosphorpentoxid verwendet. Danach wurde die entsprechende Kornfraktion hergestellt und die Probe mit 1 % eines hydrophoben Zusatzstoffes intensiv vermischt. Die Proben wurden vor jedem Versuch mindestens 12 h in dem Exsikkator mit dem Trocknungsmittel aufbewahrt. Die auf diese Weise behandelten Substanzen zeigten eine für die Versuche gute Fließ- und Rieselfähigkeit.

Bei der Anwendung des "Düsenbrenner-Schlierenbild-Kegelmittel"-Verfahrens zur Flammengeschwindigkeitsmessung sind drei Grenzbedingungen zu beachten. Nach den Meßergebnissen von Lindow [3, 4] gibt es für jedes Brenngas nur einen Bereich geeigneter Düsendurchmesser, mit denen innerhalb bestimmter Geschwindigkeits- und Konzentrationsgrenzen ungestörte Flammen erzeugt und vermessen werden können. Da bei den Versuchen eine 10 mm Düse verwendet wurde, ergeben sich bei den Versuchen entsprechend der Brenngaskonzentrationen nur bestimmte Strömungsgeschwindigkeiten, bei denen die Flammenform unabhängig von den Versuchsparametern ist. In Tabelle 4 sind die bei den Versuchen gewählten Strömungsgeschwindigkeiten und die sich daraus ergebenden Brenngas-Luft-Volumenströme für die einzelnen Brenngaskonzentrationen zusammengestellt.

4.4. Versuchsdurchführung

Die zu untersuchende pulverförmige Substanz 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. Ein Teilstrom des Brenngas-Luft-Stromes wurde abgesaugt und durch einen Ultrarotabsorptionsspektrometer geleitet, um die eingestellte Konzentration zu überprüfen. Danach wurde der vorgemischte Methan-Luft-Strom an der Brennerdüse entzündet und das Schlierenbild des Primärverbrennungskegels ohne Löschpulver fotografiert. Über die Schüttelrinne wurde nun dem Brenngas-Luft-Gemisch kontinuierlich eine konstante Pulvermenge zugegeben. Wenn sich nach einer Anlaufzeit von ca. 2 min ein stationärer Zustand eingestellt hatte, wurde das entsprechende Schlierenbild aufgenommen. Anschließend wurde die Flamme gelöscht und die Pulvermenge gravimetrisch mit einem Filter oder mit der in Bild 2 skizzierten Meßanordnung bestimmt. Danach wurde mit Hilfe eines Stelltransformators die Amplitude der Schüttelrinne geändert und so eine neue Pulverrate eingeregelt.

5. VERSUCHSERGEBNISSE

In früheren Arbeiten [1,2] wurde gezeigt, daß das Quadrat der Flammengeschwindigkeit eine lineare Funktion der Lösch-

pulvermenge ist. Die Löschwirkung der Pulver hängt außerdem vom Mischungsverhältnis von Brenngas und Luft ab. Die in Bild 3 dargestellten Meßergebnisse für Kaliumhydrogencarbonat beweisen dies. Es handelt sich hier um reines Kaliumhydrogencarbonat, dem 1 % eines hydrophoben Zusatzstoffes beigemischt worden ist. Die Flammengeschwindigkeit der Flamme mit Pulver Λ_P wurde mit der Flammengeschwindigkeit der Flamme ohne Löschpulver Λ_0 normiert. Die Meßergebnisse ergaben, daß das Gemisch mit der Flammengeschwindigkeit Λ_{max} , d.h. das Gemisch mit 10 Vol-% Methan, in geringerem Maße durch das Kaliumhydrogencarbonat beeinflußt wird als die Gemische mit niedrigerer Flammengeschwindigkeit.

5.1. Einfluß der Teilchenoberfläche auf die Löschwirksamkeit

Neben dem Mischungsverhältnis von Brenngas und Luft sind die Teilchengröße bzw. Oberfläche und die chemische Zusammensetzung die Größen, die die Wirksamkeit eines Löschpulvers bestimmen. Mit reinen Kaliumhydrogencarbonat- und Natriumhydrogencarbonatpulvern, denen 1 % eines Hydrophobierungsmittels zugesetzt wurde, wurde der Einfluß der Teilchenoberfläche auf die Löschwirksamkeit dieser Substanzen untersucht. Bild 4 zeigt für verschiedene Kornfraktionen, die mit der massenbezogenen Oberfläche gekennzeichnet sind, die Abhängigkeit der Löschwirkung von

der Teilchengröße bzw. Oberfläche. Bei den Versuchen wurde ein konstantes Brennstoff-Luft-Verhältnis eingehalten. Es wurde das Gemisch mit der maximalen Flammengeschwindigkeit, also mit 10 Vol-% Methan, gewählt. Auch hier wurde das Quadrat der normierten Flammengeschwindigkeit über der spezifischen Pulverbeladung aufgetragen. Parameter ist die massenbezogene spezifische Oberfläche O_M . Die Ergebnisse zeigen, daß die Wirksamkeit des Löschpulvers mit kleiner werdendem Teilchendurchmesser bzw. mit wachsendem O_M zunimmt. Den Versuchsergebnissen ist weiterhin zu entnehmen, daß das Produkt aus der massenbezogenen spezifischen Oberfläche O_M und der spezifischen Pulverbeladung h für ein Pulver gleicher chemischer Zusammensetzung und bei gleichem Verhältnis der Flammengeschwindigkeitsquadrate für alle spezifischen Oberflächen konstant ist. Dies bestätigen die in Bild 5 dargestellten Meßergebnisse, die jetzt über dem Produkt $O_M \cdot h$ aufgetragen wurden. Alle Meßwerte gruppieren sich um eine Gerade. Danach hängt die Wirksamkeit eines Pulvers bestimmter chemischer Zusammensetzung eindeutig von der Löschpulveroberfläche ab. Wie auch aus Bild 6 zu erkennen ist, führten die Versuche mit Natriumhydrogencarbonat zum gleichen Ergebnis.

Das Produkt $O_M \cdot h$ wird im folgenden als spezifisch wirksame Löschpulveroberfläche O_P bezeichnet. Alle weiteren Meßergebnisse werden in Abhängigkeit von dieser Größe betrachtet, da nur so ein eindeutiger Vergleich der Pulver bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung gewährleistet ist.

5.2. Löschwirksamkeit der reinen Substanzen

Weiterhin wurde die Löschwirksamkeit verschiedener in Löschpulvern als Hauptbestandteile verwendeter chemischer Substanzen untersucht. Es sind dies: Kalium- und Natriumhydrogencarbonat sowie Kaliumsulfat, die vor allem bei BCE-Pulvern Verwendung finden. Außerdem Monoammonphosphat und Ammonsulfat, die als Hauptbestandteile bei ABC-Pulvern auftreten. Die Versuche wurden bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen durchgeführt. In Bild 7 sind die Ergebnisse für Kaliumhydrogencarbonat dargestellt. Das normierte Flammengeschwindigkeitsquadrat $\Lambda_P^2 / \Lambda_O^2$ wurde über der spezifisch wirksamen Löschpulveroberfläche O_P aufgetragen, wodurch der Einfluß der Teilchenoberfläche auf die Löschwirksamkeit eliminiert werden kann. Damit können die verschiedenen Substanzen bezüglich ihrer Wirksamkeit, die allein durch die chemische Zusammensetzung bewirkt wird, miteinander verglichen werden.

In den Bildern 8 bis 11 sind die Versuchsergebnisse für Natriumhydrogencarbonat, Kaliumsulfat, Monoammonphosphat und Ammonsulfat aufgezeichnet. Auch bei diesen Substanzen ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem normierten Flammengeschwindigkeitsquadrat $\Lambda_P^2 / \Lambda_O^2$ und der zugegebenen Löschpulvermenge, die hier durch die spezifisch wirksame Pulveroberfläche O_P ausgedrückt wird. Die Abhängigkeit der Löschwirkung von der Brenngaskonzentration ist auch hier die gleiche wie beim Kaliumhydrogencarbonat. Zum Löschen des

Gemisches mit der maximalen Flammengeschwindigkeit werden größere Pulvermengen benötigt, als für die Gemische mit niedrigeren Flammengeschwindigkeiten. Bild 12 bringt eine Gegenüberstellung der Löschwirksamkeit der untersuchten Substanzen. Die Ergebnisse gelten für eine Brenngaskonzentration von 10 Vol-% Methan, also für das Gemisch mit der maximalen Flammengeschwindigkeit. Die größte Löschwirksamkeit weisen Kaliumhydrogencarbonat und Monoammonphosphat auf, während das Ammonsulfat die geringste Wirksamkeit besitzt. Dazwischen liegen Kaliumsulfat und Natriumhydrogencarbonat. Da der Einfluß der Teilchenoberfläche durch die Auftragung der Ergebnisse über O_P eliminiert wurde, sind die Steigungen der Geraden in Bild 12 ein Maß für die Löschwirkung der Substanzen bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung.

Die Geradensteigungen in den Bildern 3 bis 12 wurden aus den Meßergebnissen mit Hilfe eines Ausgleichspolynoms nach der Gauß'schen "Methode der kleinsten Fehlerquadrate" berechnet [6]. Bei dieser Methode wird gefordert, daß die Summe der Quadrate der Ordinatendifferenzen zwischen Kurve und Beobachtungspunkt minimal ist. Daraus leitet sich folgende Vektorgleichung zur Bestimmung des Ausgleichspolynoms ab:

$$F' \cdot F \cdot a = F' \cdot y \quad (4)$$

Bei dem hier vorliegenden Sonderfall des Fehlerausgleiches durch eine gerade Linie der Form

$$F(x) = a_1 + a_2 \cdot x \quad (5)$$

erhält man folgendes Gleichungssystem zur Bestimmung der beiden Unbekannten a_1 und a_2 :

$$a_1 \cdot n + a_2 \cdot \sum x_i = \sum y_i \quad (6)$$

$$a_1 \cdot \sum x_i + a_2 \cdot \sum x_i^2 = \sum (x_i \cdot y_i) \quad (7)$$

In dem vorliegenden Fall wird für x_i h bzw. O_P gesetzt, y_i entspricht $(\Lambda_P^2 / \Lambda_0^2)$ und n ist die Anzahl der Messpunkte i . Da Λ_P^2 mit Λ_0^2 normiert wurde, ist $a_1 = 1$. Der Koeffizient a_2 , die Steigung der Geraden, kann nach Gleichung (6) oder (7) ermittelt werden.

Wie in [1, 2] erläutert wurde, kann der Punkt $\Lambda_P^2 / \Lambda_0^2 = 0$ experimentell nicht bestimmt werden. Die Pulvermenge für den Punkt $\Lambda_P^2 / \Lambda_0^2 = 0$ kann einerseits aus der Extrapolation der Geraden bis zum Schnittpunkt mit der Abszissenachse ermittelt werden. Sie wird als theoretisch minimale zur Löschung einer Flamme bestimmter Zusammensetzung benötigte Pulvermenge bezeichnet. Der Schnittpunkt kann andererseits aber auch aus der Steigung der Geraden

$$\frac{\Lambda_P^2}{\Lambda_0^2} = 1 - a_2 \cdot O_P \quad (8)$$

die aus den Meßergebnissen mit Hilfe der Gauß'schen "Methode der kleinsten Fehlerquadrate" ermittelt wird, berechnet werden. Für $\Lambda_P^2 / \Lambda_0^2 = 0$ gilt dann:

$$O_{P,1} = \frac{1}{a_2} \quad (9)$$

Mit Hilfe der Beziehung (9) wurden die theoretisch minimalen zur Löschung einer Flamme mit 10 Vol-% Methan benötigten Pulvermengen für die untersuchten Substanzen berechnet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefaßt worden. In der letzten Spalte dieser Tabelle wird die Löschwirksamkeit der Verbindungen bezogen auf die des Kaliumhydrogencarbonats miteinander verglichen, indem die $O_{P,1}$ -Werte dieser Substanzen auf den $O_{P,1}$ -Wert des Kaliumhydrogencarbonats bezogen wurde. Danach kann eine Flamme mit 10 Vol-% Methan im Vergleich zum Kaliumhydrogencarbonat mit der fast gleichen Menge an Ammonphosphat gelöscht werden, während bei Kaliumsulfat ca. 12 % mehr benötigt wird. Bei Natriumhydrogencarbonat erlöscht die gleiche Flamme erst bei der doppelten Menge. Beim Ammonsulfat muß sogar die 9fache Löschmittelmenge eingebracht werden.

Im folgenden werden die Meßergebnisse mit den reinen Substanzen den Ergebnissen mit handelsüblichen Löschpulvern gegenübergestellt. Es handelt sich hier um vier BCE-Pulver und drei ABC-Pulver, deren Hauptbestandteile und massenbezogenen spezifischen Oberflächen in Tabelle 6 aufgeführt sind. In Bild 13 wird die Löschwirksamkeit des reinen Kaliumsulfats mit der Wirksamkeit zweier BCE-Pulver, die als Hauptbestandteile Kaliumsulfat enthalten, verglichen. Der Einfluß der Teilchenoberfläche wurde eliminiert, indem alle $\Lambda_P^2 / \Lambda_O^2$ -Werte über der spezifisch wirksamen Löschpulveroberfläche O_P aufgetragen wurden. Der Unterschied in der Löschwirkung beruht daher nur auf der chemischen

Zusammensetzung der Pulver. Das Löschpulver A kommt dem reinen Kaliumsulfat am nächsten. Es ist daher anzunehmen, daß dieses Pulver einen sehr großen Anteil an Kaliumsulfat enthält. Das Löschpulver B besitzt eine geringere Wirksamkeit. Da die Pulver nicht chemisch analysiert wurden, kann nach den vorliegenden Ergebnissen nur vermutet werden, daß dieses Pulver einen geringeren Anteil an Kaliumsulfat enthält. In Bild 14 werden zwei handelsübliche BCE-Pulver auf Natriumhydrogencarbonatbasis dem reinen Natriumhydrogencarbonat gegenübergestellt. Die Werte des Löschpulvers C liegen auf der Geraden, die für das reine Natriumhydrogencarbonat ermittelt wurde. Das Pulver D zeigt schon stärkere Abweichungen in seiner Löschwirksamkeit, die vermutlich auf eine andere chemische Zusammensetzung zurückzuführen sind. In Bild 15 werden drei ABC-Pulver mit den bei diesen Pulvern als Hauptbestandteile verwendeten Substanzen Monoammonphosphat und Ammonsulfat verglichen. Die beiden Geraden für Monoammonphosphat und Ammonsulfat bilden die obere und untere Grenze für die Pulver, die aus einem Gemisch dieser beiden Substanzen bestehen, wie dies die Meßergebnisse für die Pulver E, F und G bestätigen, die entsprechend ihrer Zusammensetzung in diesem Bereich zu finden sind. Den größten Anteil an Monoammonphosphat würde demnach das Pulver F enthalten.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Teilchengröße bzw. Oberfläche und chemische Zusammensetzung bestimmen die Wirksamkeit von Trockenlöschpulvern. Mit einer an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik entwickelten Prüfapparatur im Labormaßstab wurde der Einfluß der Teilchenoberfläche auf die Löschwirksamkeit von Kalium- und Natriumhydrogencarbonat untersucht. Außerdem wurde die Wirksamkeit von Kalium- und Natriumhydrogencarbonat, Kaliumsulfat, Monoammonphosphat und Ammonsulfat bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen bestimmt.

Die Versuche mit unterschiedlichen Kornfraktionen von Kalium- und Natriumhydrogencarbonat ergaben, daß die Löschwirksamkeit proportional der Löschpulveroberfläche ist. Trägt man die Meßergebnisse über dem Produkt aus massenbezogener spezifischer Oberfläche und spezifischer Pulverbeladung auf, so kann der Einfluß der Pulverteilchenoberfläche auf die Löschwirksamkeit eliminiert werden, so daß Unterschiede in der Wirksamkeit verschiedener Pulver nur noch auf die chemische Zusammensetzung zurückzuführen sind.

Bei den Untersuchungen mit den reinen Substanzen wurde festgestellt, daß ihre Löschwirksamkeit in gleicher Weise von der Brenngaskonzentration abhängt, wie die des Kaliumhydrogencarbonats. Zum Löschen des Gemisches mit der maximalen Flammengeschwindigkeit werden größere Pulvermengen benötigt als für Gemische mit niedrigeren Flammen-

geschwindigkeiten. Die Gegenüberstellung der Löschwirksamkeit der reinen Substanzen ergab, daß Kaliumhydrogencarbonat und Monoammonphosphat die größte Wirksamkeit besitzen, während die geringste Wirksamkeit bei Ammonsulfat festgestellt wurde. Der Vergleich der Meßwerte der reinen Substanzen mit denen handelsüblicher BCE- und ABC-Pulver bestätigen die Ergebnisse.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Hoffmann, W.: Entwicklung eines Meßverfahrens im Labormaßstab zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern. Forschungsbericht Nr. 18 und 20 der Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF). 1971.
- [2] Hoffmann, W.: Ein Meßverfahren im Labormaßstab zur Bestimmung der Löschwirksamkeit von Trockenlöschpulvern. VFDB-Zeitschrift 21 (1972), S. 11-17.
- [3] Lindow, R.: Eine verbesserte Brennermethode zur Bestimmung der laminaren Flammengeschwindigkeiten von Brenngas/Luft-Gemischen. Brennstoff-Wärme-Kraft 20 (1968), S.8-14.
- [4] Lindow, R.: Zur Bestimmung der laminaren Flammgeschwindigkeit. Karlsruhe, Technische Hochschule, Dr.-Ing. Dissertation 1966.
- [5] Schardin, H.: Die Schlierenverfahren und ihre Anwendung. Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften 20 (1942), S. 303-439.
- [6] Ludwig, R.: Methoden der Fehler- und Ausgleichsrechnung. Braunschweig: Vieweg und Sohn (1969).

Tabelle 1: Konstante c_2 in Abhängigkeit von der Brenngaskonzentration c

c	Vol-%	9,0	9,5	10,0	11,0	12,0
c_2	cm/s	21,9	23,2	24,0	22,9	16,4

Tabelle 2: Gaschromatographische Analyse des Methans in Vol-%

CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	N_2
99,65	0,25	0,01	0,02	0,01	0,05

Tabelle 3: Kenndaten der untersuchten Substanzen

Untersuchte Substanzen	Spezifische Oberfläche σ_M cm^2/g	Mittlerer Teilchen- durchmesser d μm	Dichte g/cm^3
KHCO_3	1590	17,4	2,17
KHCO_3	1960	14,1	2,17
KHCO_3	2830	9,8	2,17
KHCO_3	3050	9,1	2,17
KHCO_3	3540	7,8	2,17
KHCO_3	3980	6,9	2,17
KHCO_3	4420	6,3	2,17
NaHCO_3	650	42,0	2,2
NaHCO_3	1950	14,0	2,2
NaHCO_3	2030	13,4	2,2
NaHCO_3	2500	10,9	2,2
NaHCO_3	3900	7,0	2,2
K_2SO_4	2100	10,4	2,75
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	2030	16,4	1,8
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1810	18,7	1,77

Tabelle 4: Versuchsparameter mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Brenngas-Luft-Volumenstrom

Brenngas- konzentration c Vol-%	Strömungs- geschwindigkeit u cm/s	Brenngas-Luft- Volumenstrom \dot{V} l_n/h
9,0	110/120	311,01/339,29
9,5	130	367,56
10,0	130/140	367,56/394,84
11,0	130/140	367,56/394,84
12,0	130/150	367,56/424,11

Tabelle 5: Theoretisch minimale Löschpulvermenge der untersuchten Substanzen und ihre Wirksamkeit bezüglich des Kaliumhydrogencarbonats

Untersuchte Substanz	$Q_{P,1}$ cm^2/l_n	$\frac{Q_{P,1}}{Q_{P,1}^{KHCO_3}}$
$KHCO_3$	38,5	1,0
K_2SO_4	43,2	1,12
$NH_4H_2PO_4$	39,2	1,04
$NaHCO_3$	80,6	2,1
$(NH_4)_2SO_4$	347,2	9,0

Tabelle 6: Kenndaten der untersuchten handels-
üblichen Trockenlöschpulver

Untersuchte Trocken- löschpulver	Pulver- art	Hauptbe- standteile	spezifische Oberfläche in cm^2/g
Pulver A	BCE	K_2SO_4	5200
Pulver B	BCE	K_2SO_4	2750
Pulver C	BCE	NaHCO_3	3050
Pulver D	BCE	NaHCO_3	3210
Pulver E	ABC	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 +$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	4300
Pulver F	ABC	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 +$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	4500
Pulver G	ABC	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 +$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	4180

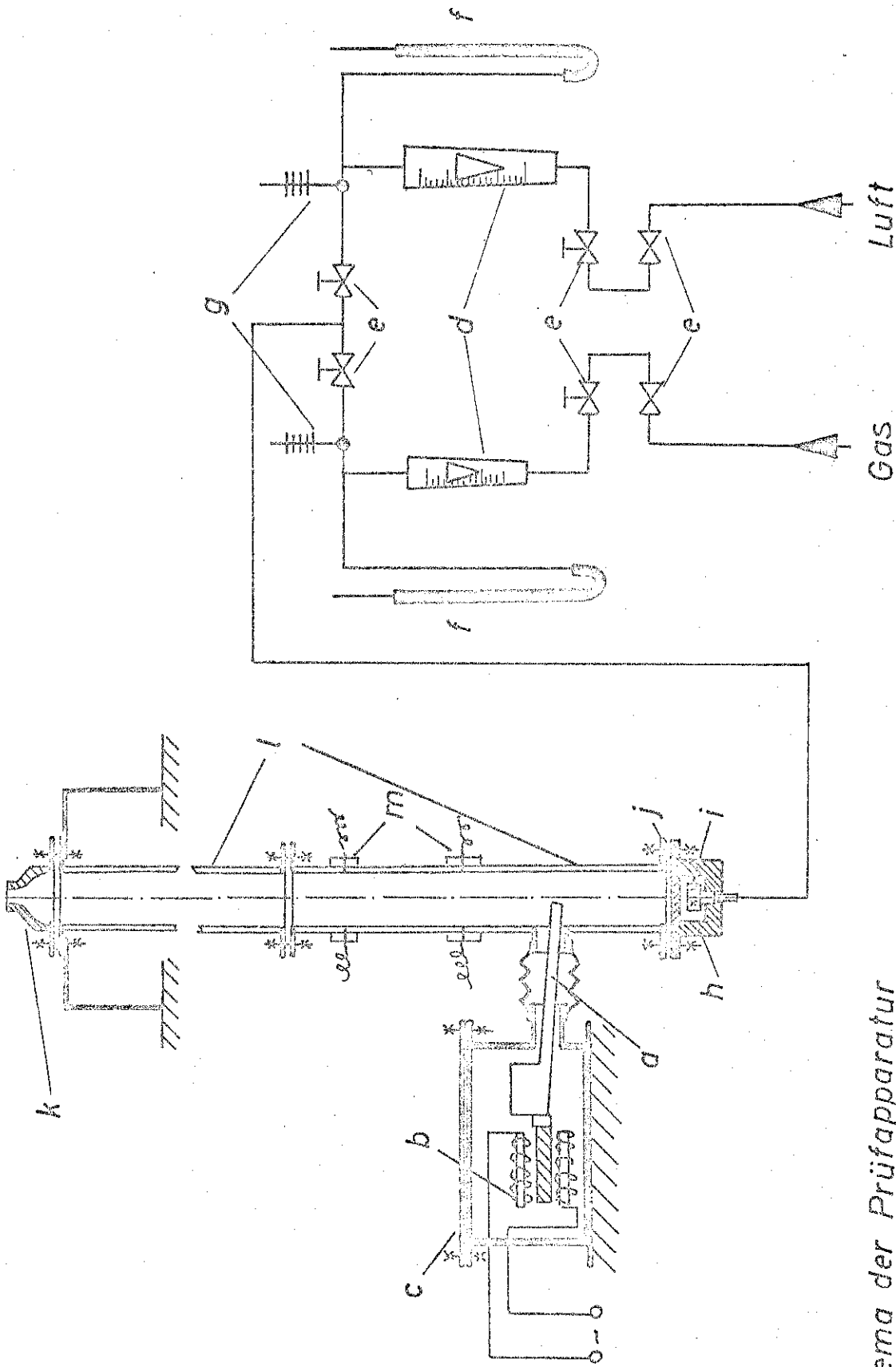


Bild 1. Schema der Prüfapparatur
a Schüttelrinne mit Vorratsbehälter, b Antriebsmagnet, c schwingungssteifer Kasten,
d Durchflußmesser, e Regelventile, f U-Rohr - Manometer, g Quecksilber - Thermometer,
h Bodenplatte, i Strömungsverteiler, j Sintermetallplatte, k Brennerdüse
l Einlaufrohr, m Ringelektroden.

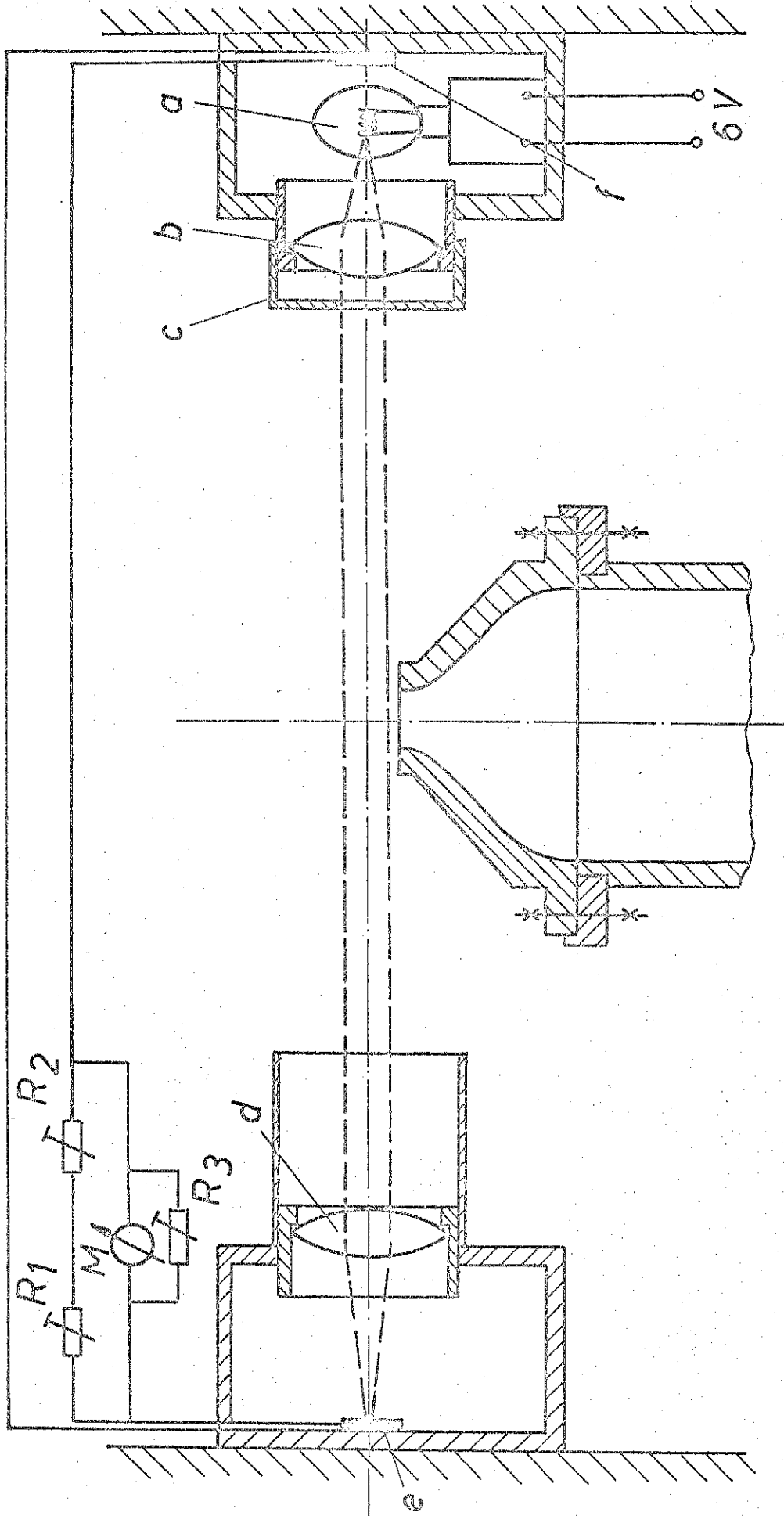


Bild 2. Skizze der Messanordnung zur fotoelektrischen Bestimmung der Pulvermenge. a Lichtquelle, b Linse, c Blende, d Linse, e Fotozelle, f Fotozelle, M Meßgerät, R_1, R_2, R_3 verstellbare Widerstände

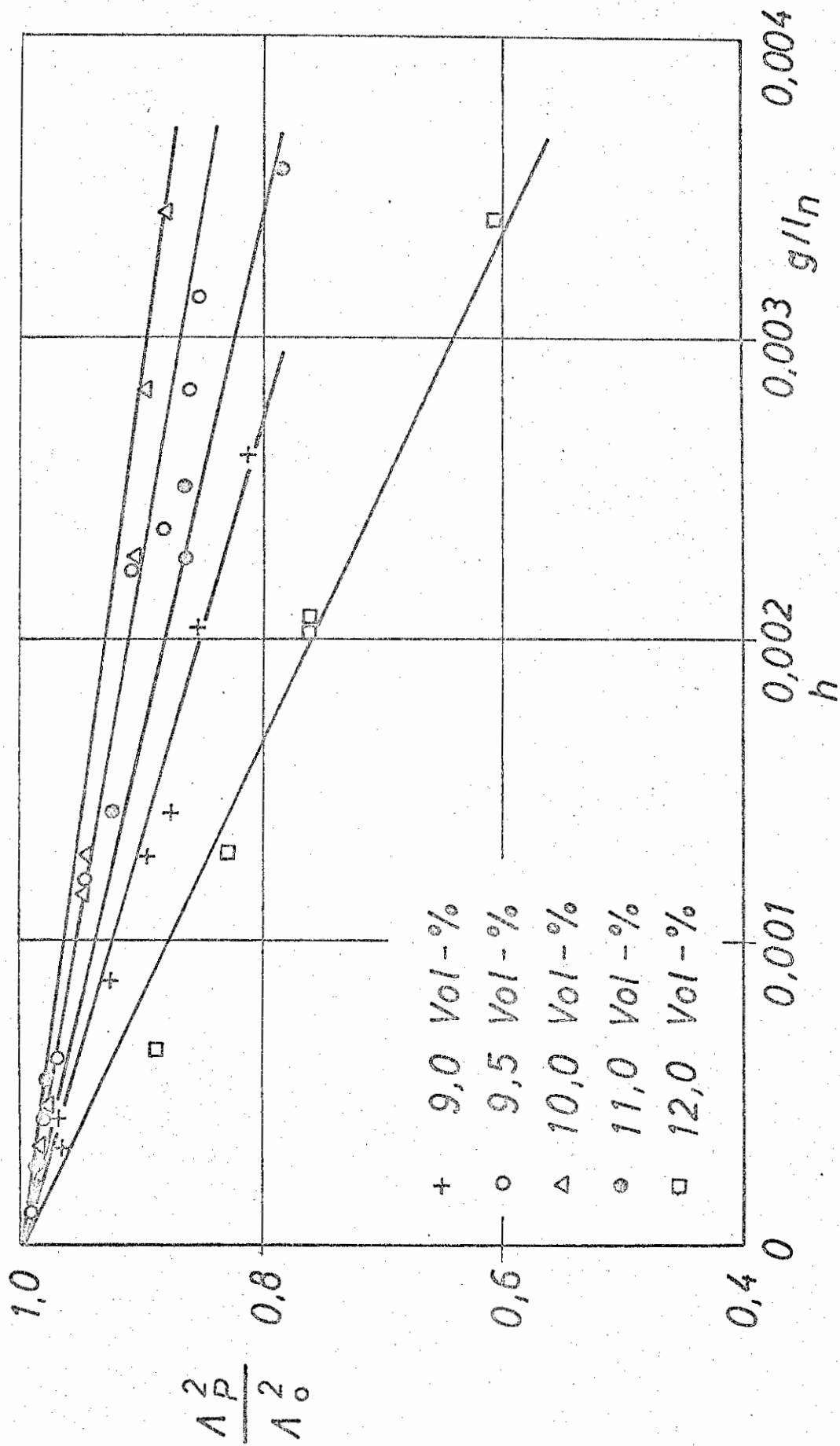


Bild 3. Löschwirksamkeit des Kaliumhydrogencarbonats bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen

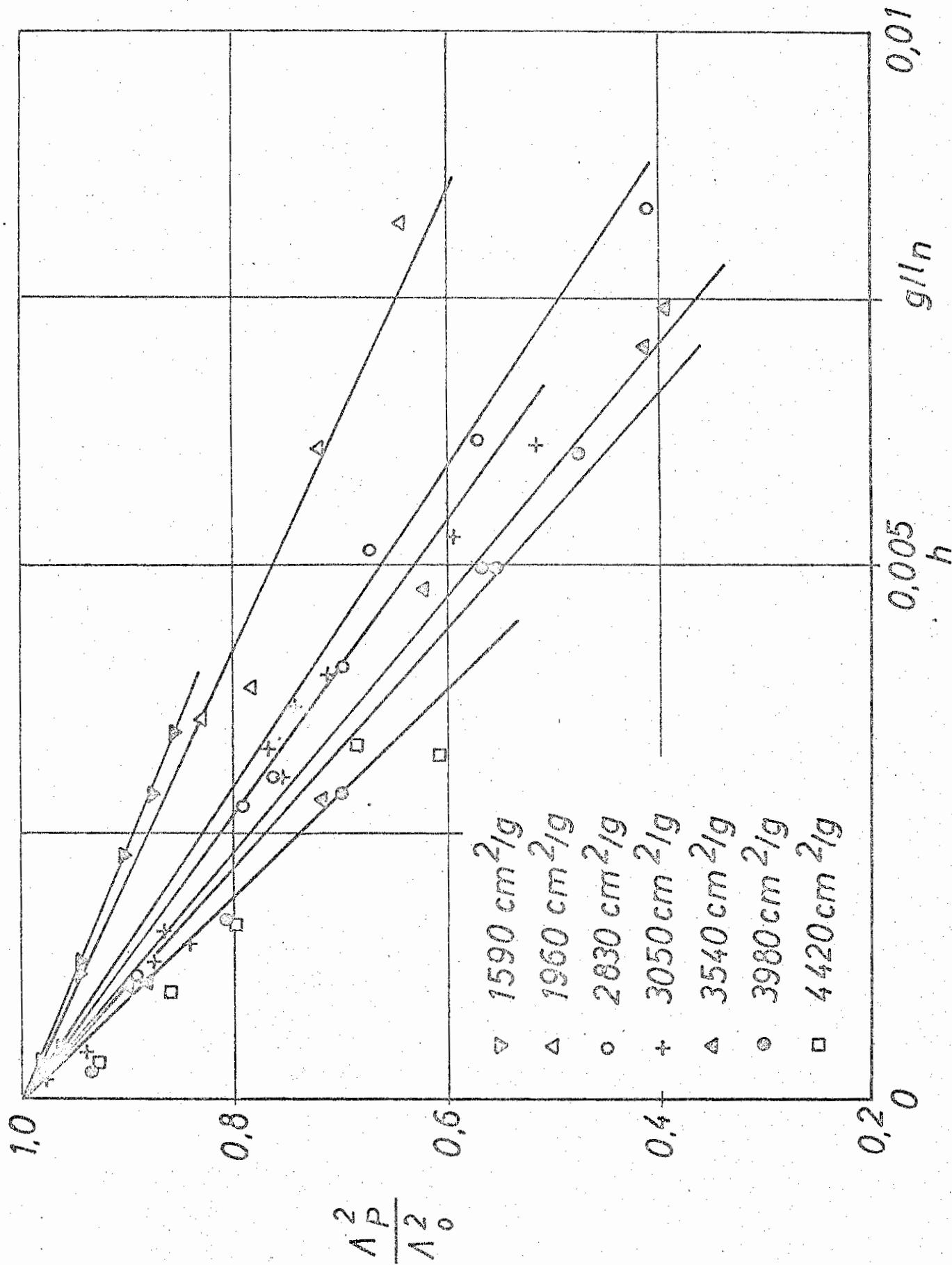


Bild 4. Löschwirksamkeit des Kaliumhydrogencarbonats bei verschiedenen Kornfraktionen. Brenngaskonzentration: 10 Vol-% CH₄

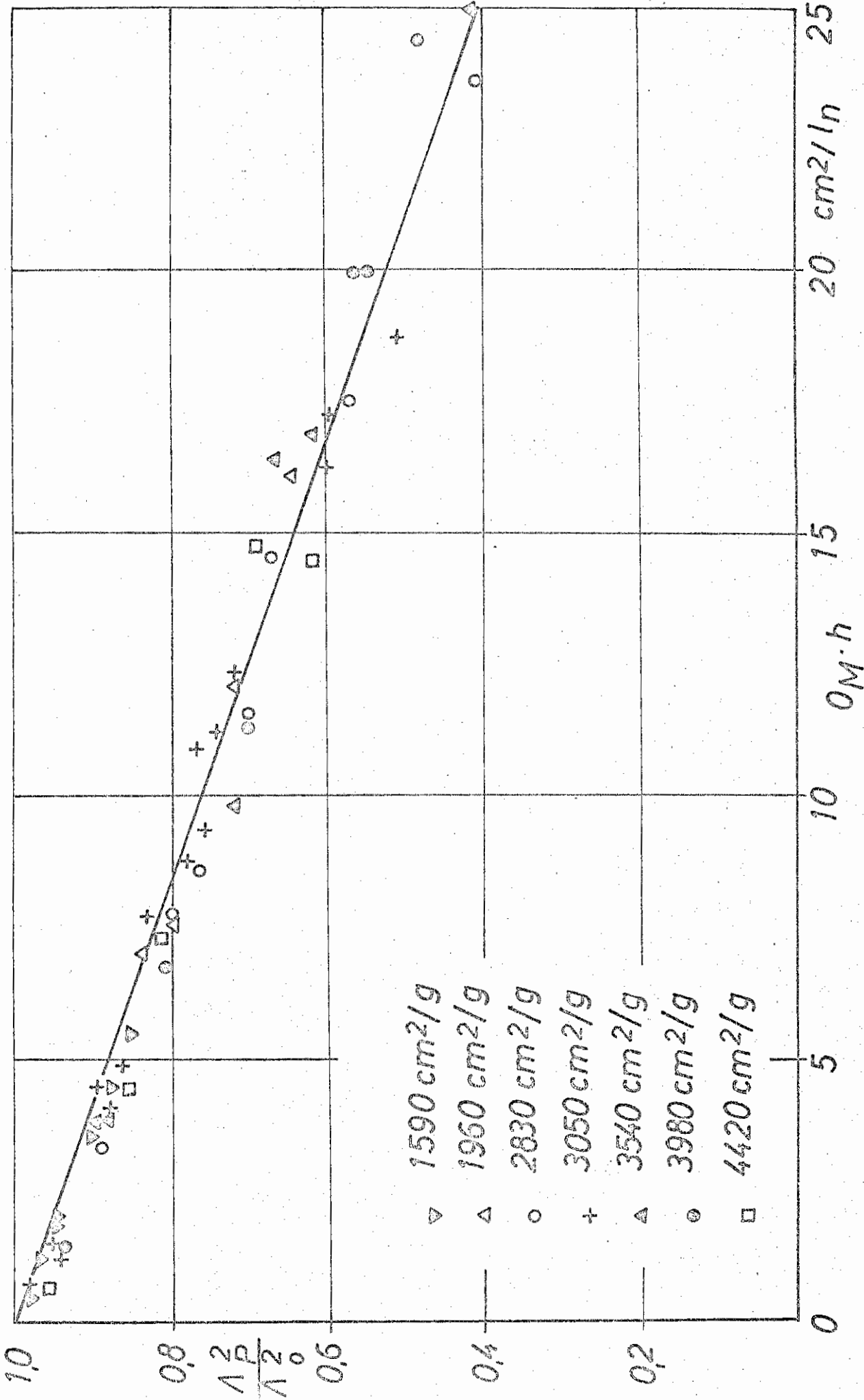


Bild 5. Löschwirksamkeit von Kaliumhydrogencarbonat bei verschiedenen Kornfraktionen. Brenngaskonzentration: 10 Vol-% CH₄

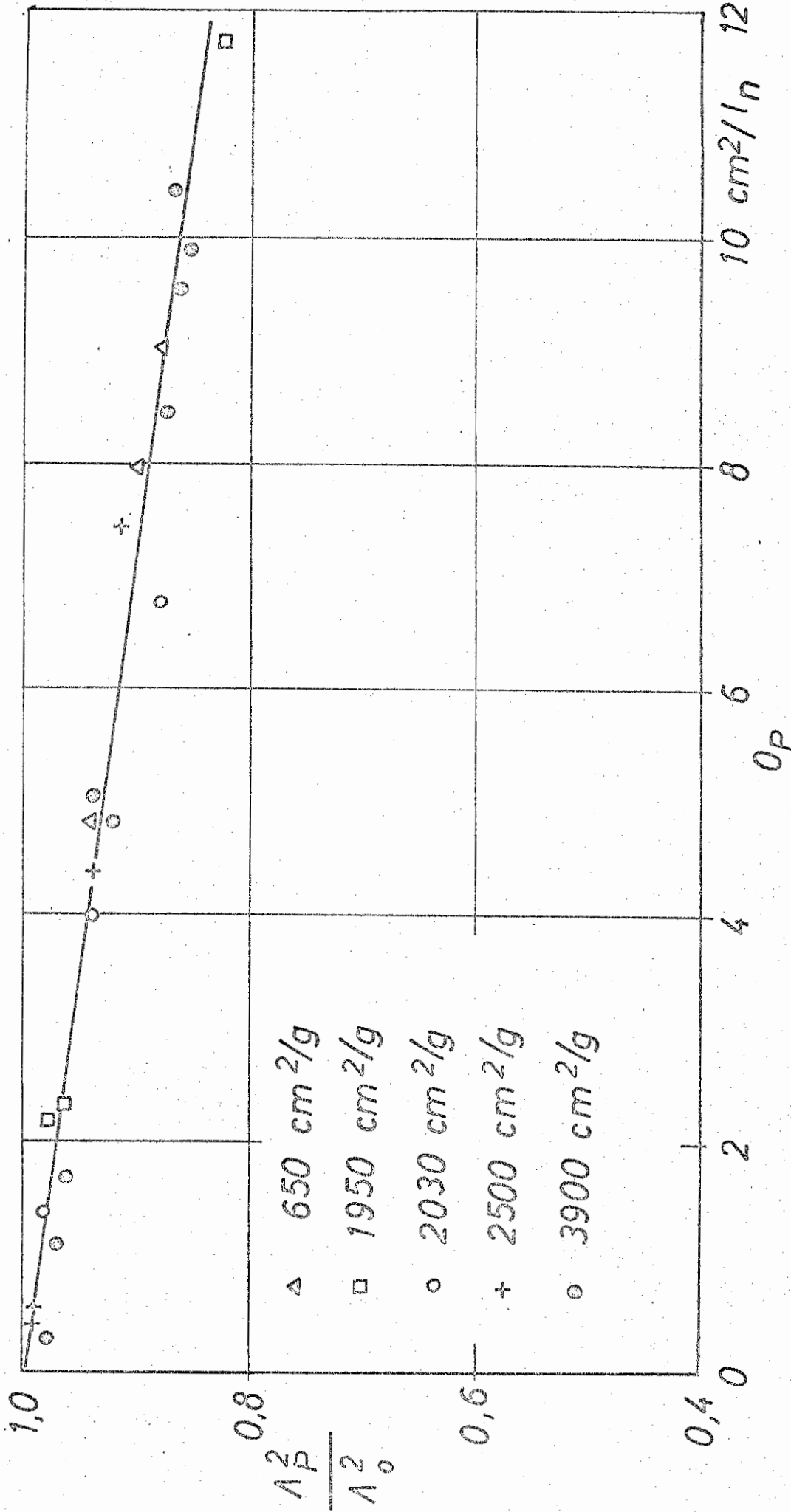


Bild 6. Löschwirksamkeit von Natriumhydrogencarbonat in Abhängigkeit von der spezifisch wirksamen Pulveroberfläche. Brenngaskonzentration: 10 Vol-% CH_4

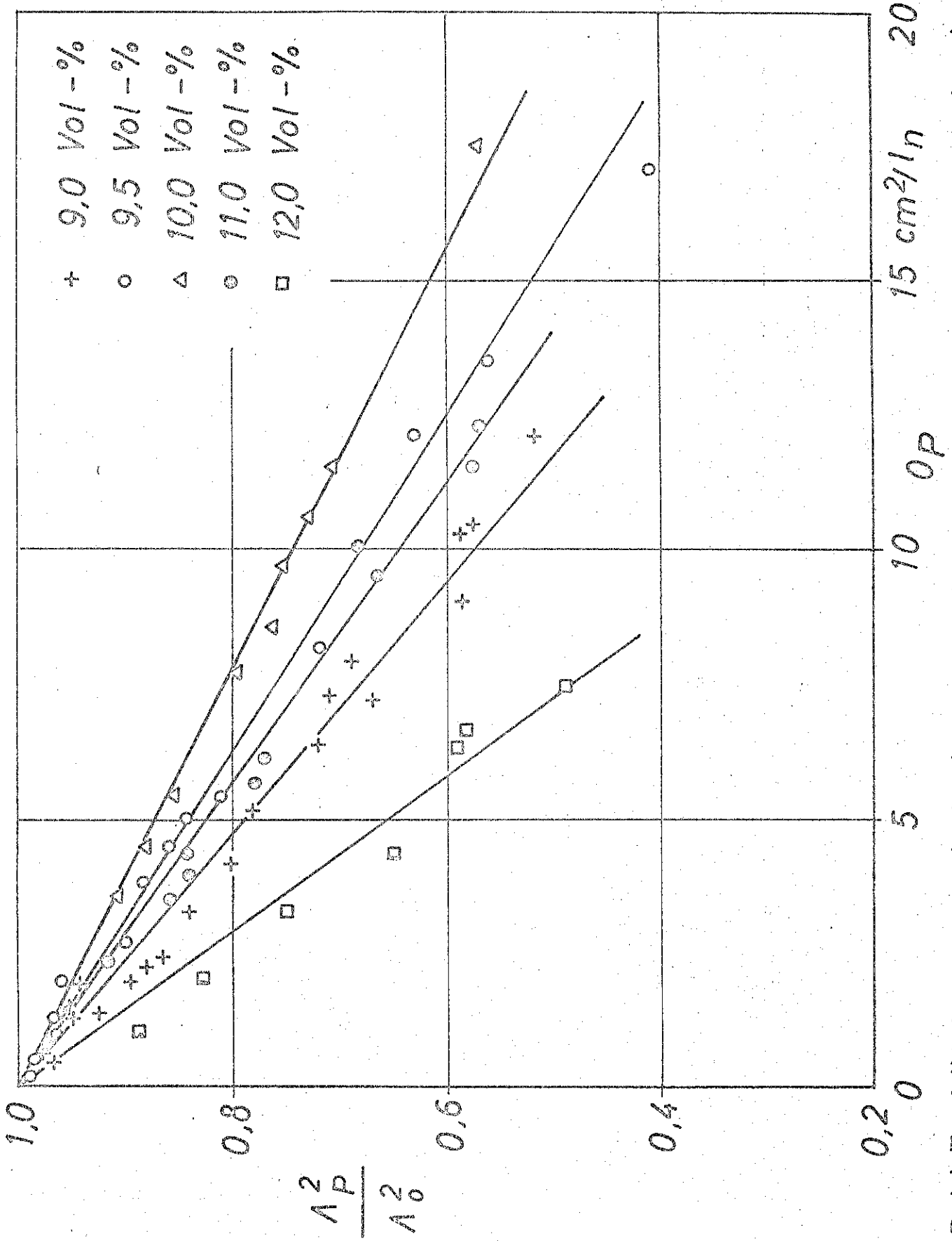


Bild 7. Löschwirksamkeit des Kaliumhydrogencarbonats bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen

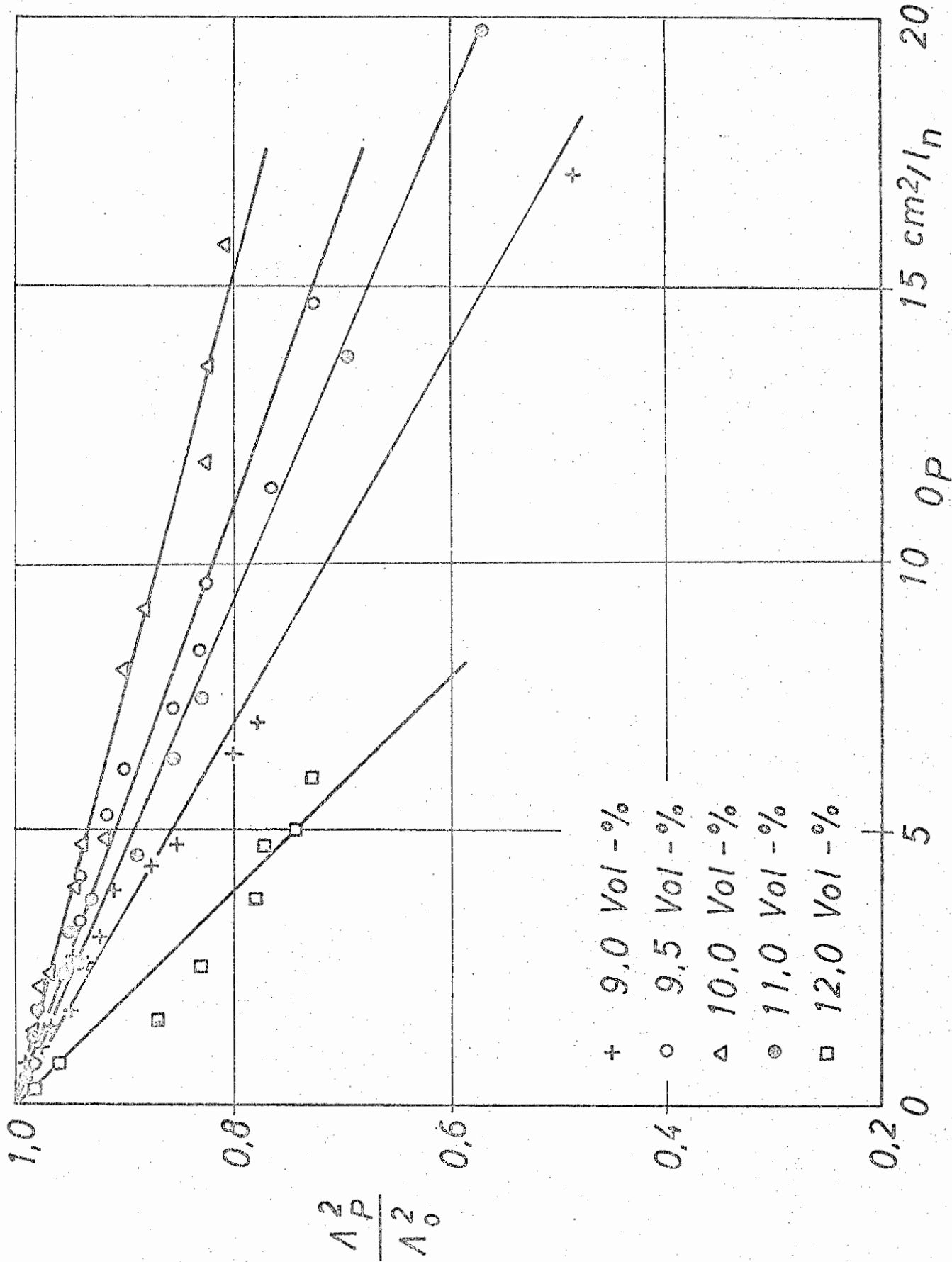


Bild 8. Löslichkeitsvermögen des Natriumhydrogencarbonats bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen

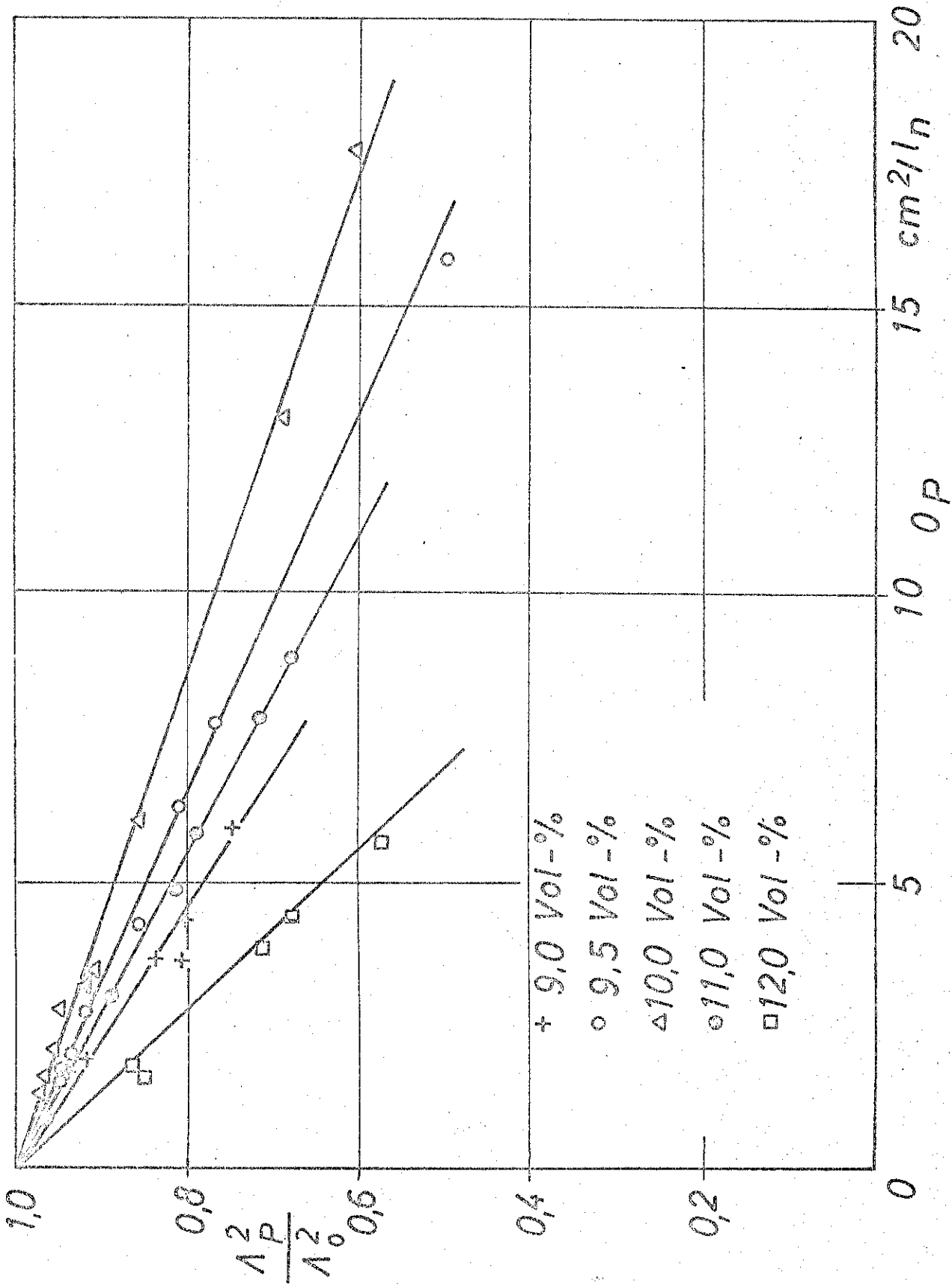


Bild 9. Löschwirksamkeit des Kaliumsulfats bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen

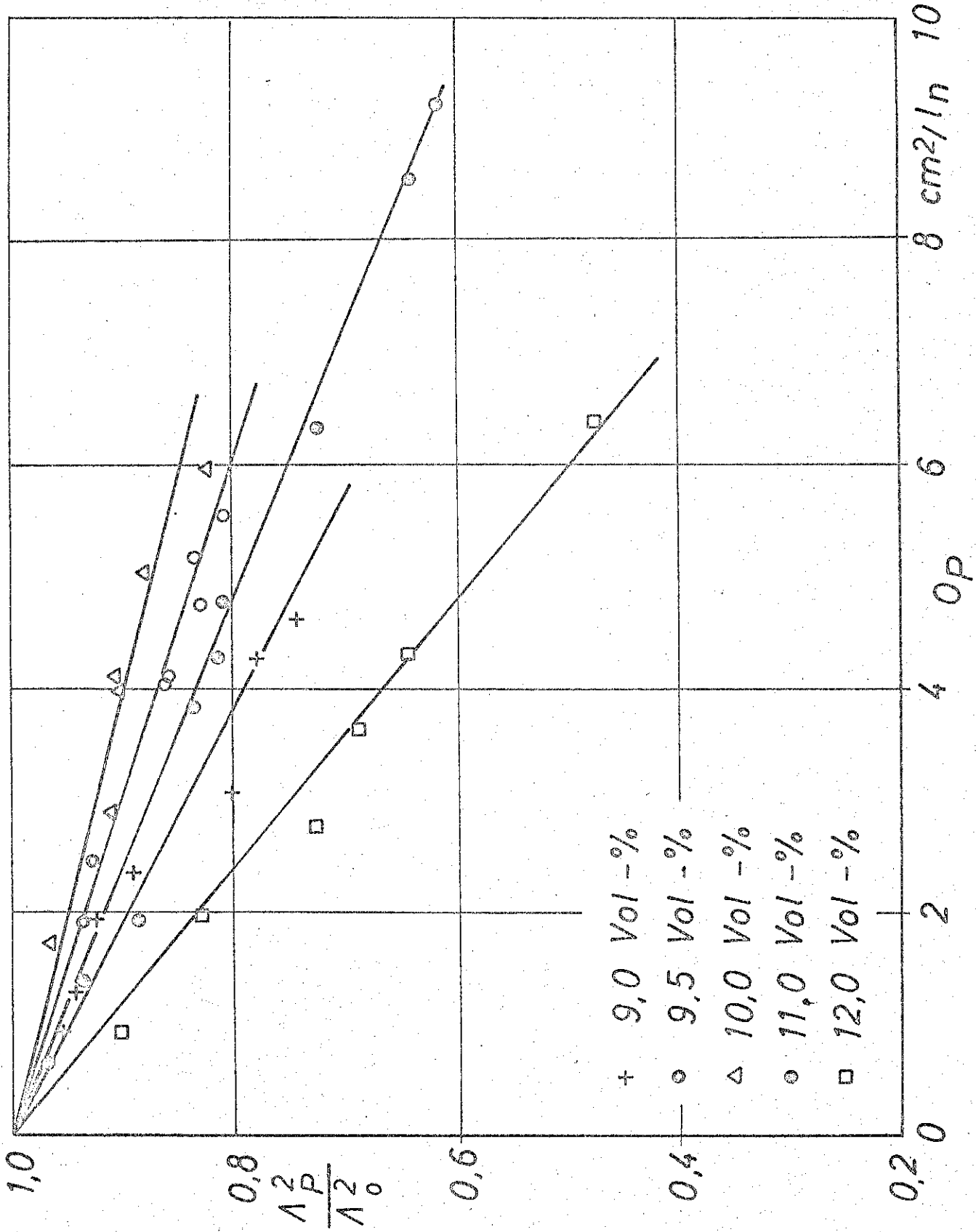


Bild 10. Löschwirksamkeit des Monoammonphosphats bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen

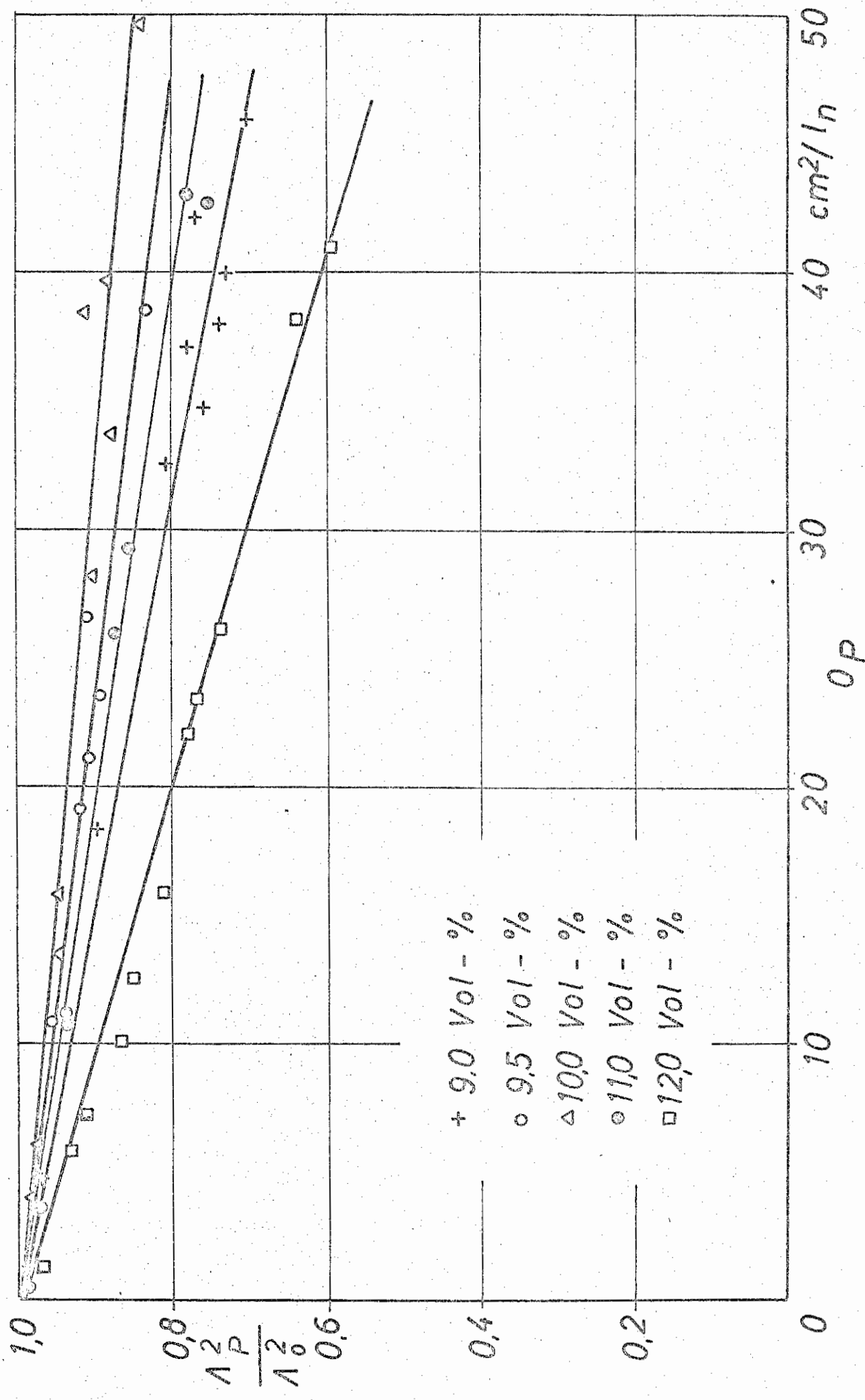


Bild 11. Löschwirksamkeit des Ammonsulfats bei verschiedenen Brenngaskonzentrationen

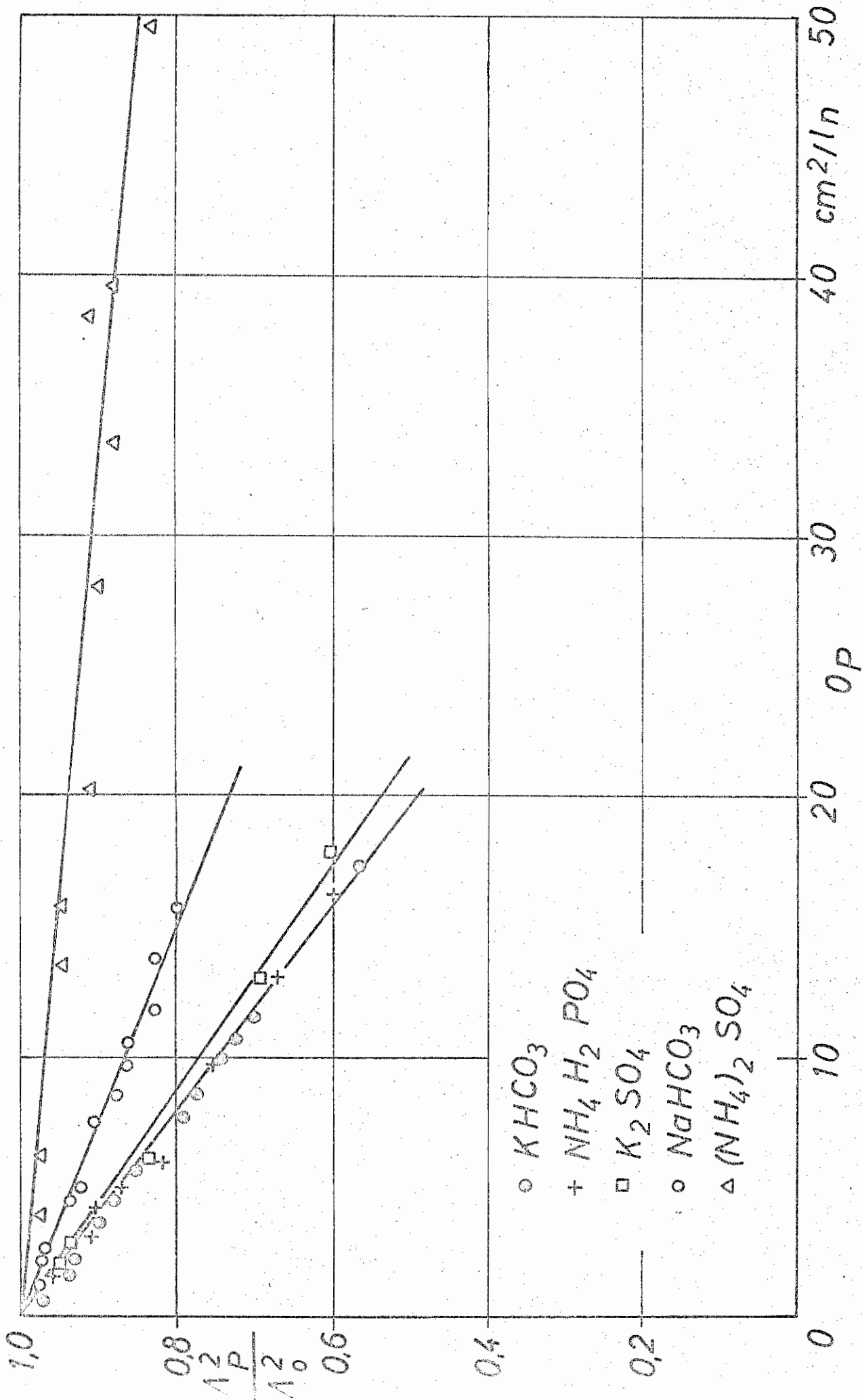


Bild 12. Löschwirksamkeit der untersuchten reinen Substanzen. Brenngaskonzentration: 10 Vol-% CH_4

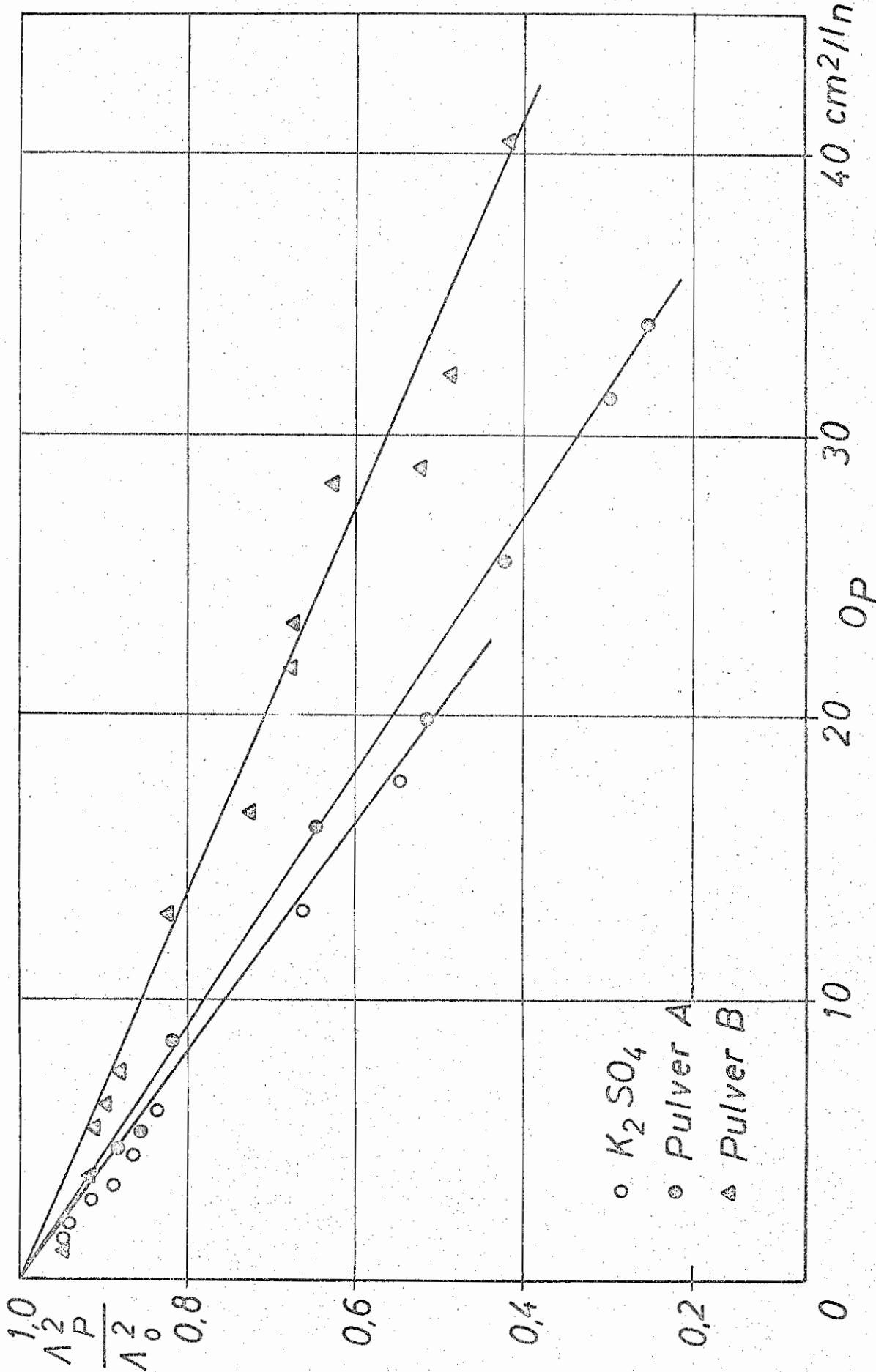


Bild 13. Löschwirksamkeit des Kaliumsulfats im Vergleich mit zwei handelsüblichen Trockenlöschpulvern auf K_2SO_4 -Basis. Brenngaskonzentration: 10 Vol-% CH_4

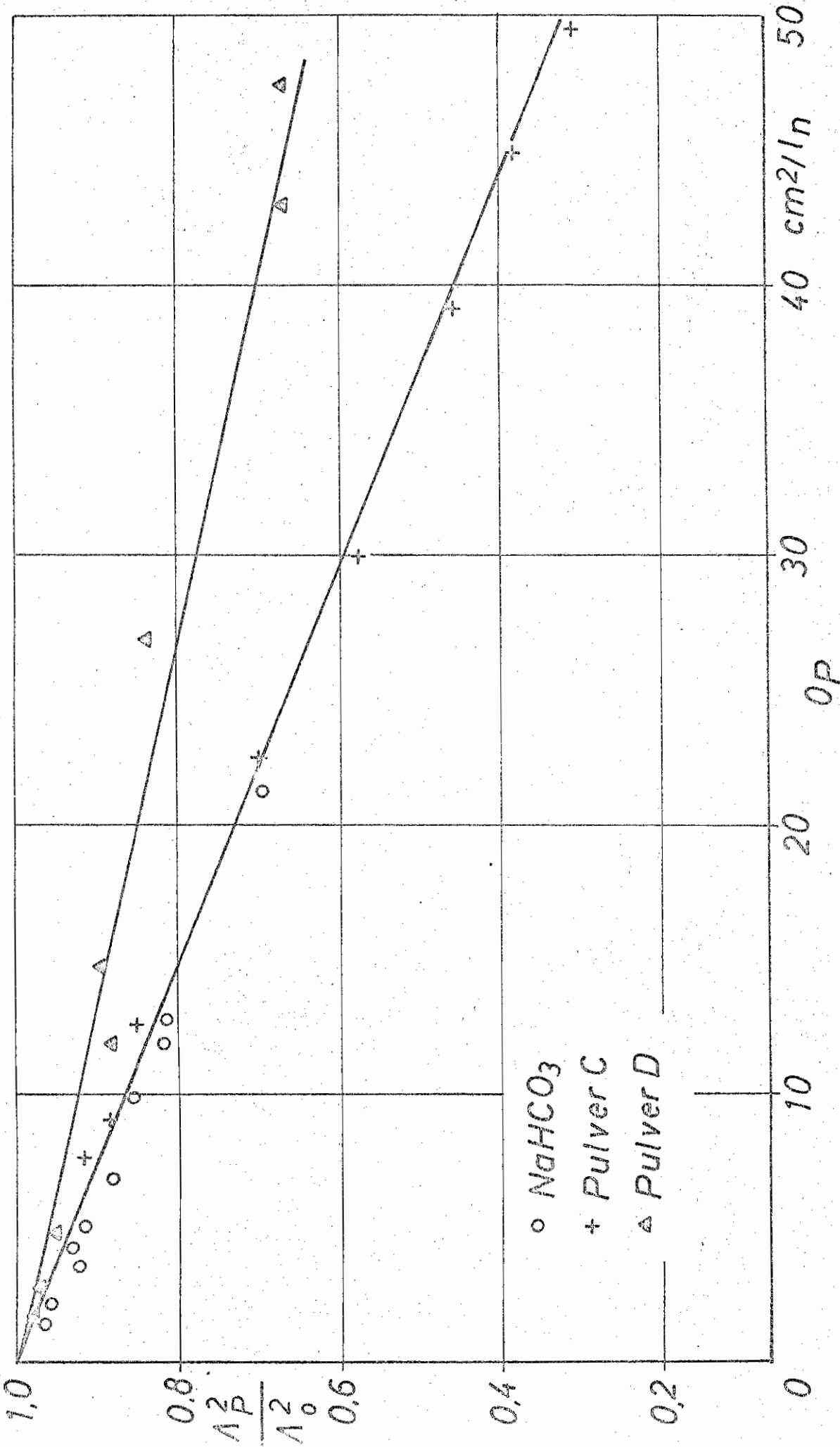


Bild 14. Löschwirksamkeit des Natriumhydrogencarbonats im Vergleich mit zwei handelsüblichen Trockenlöschpulvern auf NaHCO₃-Basis. Brenngaskonzentration: 10 Vol-% CH₄

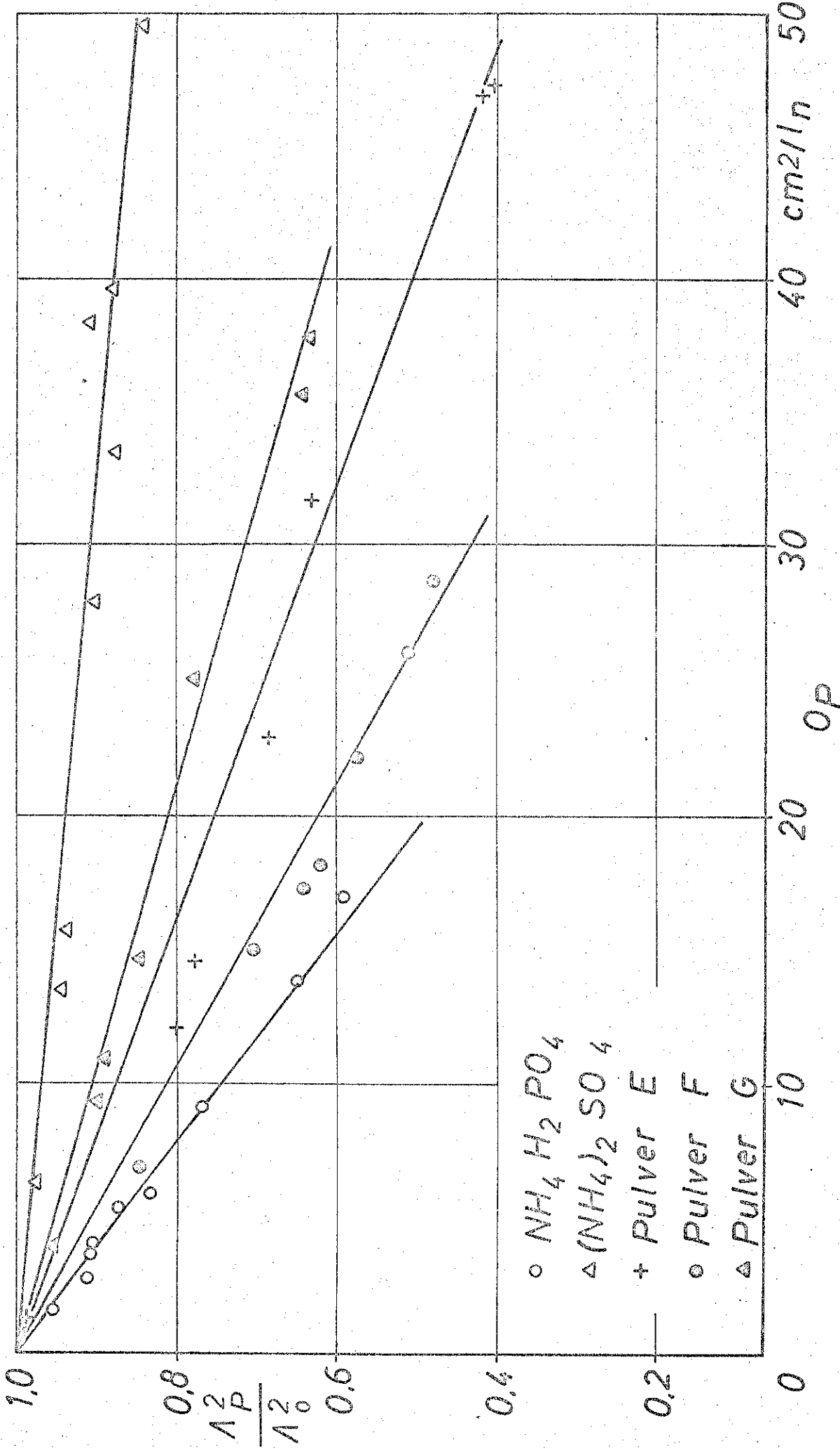


Bild 15. Löschwirksamkeit von Monoammonphosphat und Ammonsulfat im Vergleich mit drei handelsüblichen Trockenlöschpulvern auf $NH_4 H_2 PO_4$ - $(NH_4)_2 SO_4$ -Basis. Brenngaskonzentration: 10 Vol-% CH_4