

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen
Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe

Teil 3: Über die Löschwirksamkeit von
Kohlendioxid beim Entstehungsbrand
in einem Versuchsraum natürlicher
Größe.

37

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

Forschungsbericht Nr. 37

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen
Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe.
Teil 3: Über die Löschwirksamkeit von
Kohlendioxid beim Entstehungsbrand
in einem Versuchsraum natürlicher
Größe.

von

Dipl.-Ing.Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Mai 1979

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
1.	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2.	BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE UND DER MESSEINRICHTUNGEN	1
2.1.	Versuchsraum	2
2.2.	Abbrandmessung	3
2.3.	Temperaturmessung	4
2.4.	Druckmessung	5
2.5.	Optische Rauchdichte	6
2.6.	Gaskonzentrationsmessung	6
2.7.	Brandmelder	8
2.8.	Löschanlage	9
2.9.	Löschmittel	10
2.9.1.	Kohlendioxid	10
2.9.2.	Halon	11
3.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	12
4.	VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	13
4.1.	Temperaturmessung	13
4.2.	Druckmessung	17
4.3.	Optische Rauchdichte	21
4.4.	Gaskonzentrationsmessung	22
4.5.	Brandmelder	28
5.	ZUSAMMENFASSUNG	29
6.	LITERATURVERZEICHNIS	31
7.	TABELLEN UND BILDER	33

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Im Falle eines Schadenfeuers werden durch Löschmaßnahmen mit nicht gasförmigen Löschmitteln immer wieder zusätzlich zum Brandschaden Löschsäden verursacht, die einen erheblichen Anteil am Gesamtschaden ausmachen.

Die bei der Brandbekämpfung verwendeten Löschmittel lassen sich einteilen in nicht gasförmige Löschmittel wie Wasser, Schaum und Trockenlöschpulver und gasförmige Löschmittel wie Kohlendioxid und Halogenkohlenwasserstoffe (Halone), die in [1] anhand einer Literaturliteraturauswertung ausführlich behandelt werden.

Im Rahmen eines längerfristigen Forschungsauftrages werden Untersuchungen durchgeführt, die Aufschlüsse über die Löschwirkung beim Einsatz der gasförmigen Löschmittel Kohlendioxid und Halon geben sollen. Zur Beurteilung der Löschwirkung der gasförmigen Löschmittel ist es vor allem notwendig, vergleichbare Versuchsbedingungen für die einzelnen Versuche zu schaffen und alle für den Brand- und Löschvorgang wichtigen Größen zu messen. Die Untersuchungen werden in einem Versuchsraum natürlicher Größe durchgeführt, um möglichst praxisnahe Verhältnisse zu erfassen. Die vorliegende Arbeit beschreibt den Aufbau der gesamten Versuchsanlage sowie die ersten Brand- und Löschversuche. Als Brandgut wurden dabei Holzkrippen und als Löschmittel Kohlendioxid verwendet.

2. BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE UND DER MESSEINRICHTUNGEN

Eine schematische Übersicht des Aufbaus der gesamten Versuchsanordnung ist in Bild 1 dargestellt.

2.1. Versuchsraum

Der für die Untersuchungen erstellte Versuchsraum hat eine Grundfläche von 4,1 m x 5,1 m und eine Höhe von 2,90 m. Die Deckenkonstruktion, die aus Stahlprofilträgern mit Riffelblechauflage besteht, ist so ausgelegt, daß sie bis auf eine Gesamthöhe von 3,90 m angehoben werden kann. Ein Zwischenboden aus Riffelblech wurde als Waageplattform konstruiert, so daß die lichte Höhe des eigentlichen Versuchsraumes 2,40 m bzw. 3,40 m beträgt. Das Raumvolumen kann somit von ca. 50 m³ auf ca. 71 m³ vergrößert werden.

Die Wände bestehen aus Hohlblocksteinen mit einer Dicke von 24 cm. Das Mauerwerk ist außen verputzt. Im Innern des Versuchsraumes sind die Wände, der Zwischenboden und die Decke mit 15 mm starken feuerfesten Asbestzementplatten verkleidet, die diese vor zu großer Hitzeeinwirkung schützen. Unterhalb des Zwischenbodens befindet sich eine aus Beton gebildete Auffangwanne, deren Gefälle zur Mitte hin ca. 3‰ beträgt. Die tiefste Stelle dieser Wanne hat einen Ablauf, der außerhalb des Raumes endet. Die Auffangwanne wurde eingebaut, um bei evtl. Löschversuchen mit flüssigen Löschmitteln, die nicht verdampften Löschmittelanteile auffangen und einer Mengenummessung zuführen zu können.

Um ein Eindringen von Gasen unter den Zwischenboden zu verhindern, ist die Waageplattform zu den Wänden hin mit feuerfestem Asbestschaum abgedichtet. Durch diese Maßnahme kann allerdings eine vollständige Abdichtung nicht erreicht werden. Andererseits bleibt aber durch die Verwendung des flexiblen Asbestschaums die Funktion der Waageplattform erhalten.

Bild 2 zeigt den Grundriß des Versuchsraumes mit den

Hauptabmessungen, die Anordnung der Druckkraftaufnehmer K1 bis K4 unter der Waageplattform (Zwischenboden) sowie die Auffangwanne mit dem Ablauf nach außen.

Bild 3 zeigt die Vorderansicht des Versuchsraumes mit einer Öffnung der Größe 2 m x 2,4 m. Die Öffnung beginnt in einer Höhe von 0,8 m über dem Zwischenboden. Der Teil dieser Öffnung, der sich oberhalb der Decke bei tieferhängender Decke befindet, wird verkleidet und abgedichtet. In der unteren linken Ecke der Öffnung sind Sichtscheiben eingesetzt, um die Versuche im Raum von außen beobachten zu können. Im oberen Teil der Öffnung ist eine Klappe angeordnet, die sich beim Einströmen des Löschmittels, also bei Überdruck im Versuchsraum, öffnet und sich nach dem Druckausgleich zwischen dem Rauminnern und der Umgebung durch ihr Eigengewicht wieder selbständig schließt. Die Klappe befindet sich direkt unterhalb der abgehängten Decke, da nicht das schwerere Löschmittel, sondern die Rauchgase bzw. die Luft bei Überdruck entweichen sollen. Der restliche Teil der Öffnung ist mit Blechen abgedeckt.

Durch eine feuerhemmende einflügelige Stahltür mit den Abmessungen 0,85 m x 2 m, die innen zusätzlich mit Asbestzementplatten geschützt ist, kann der Versuchsraum betreten werden. An den Seiten des Raumes sind Öffnungen von 0,5 m x 0,4 m vorgesehen, die es ermöglichen, unter die Waageplattform einzusteigen. Diese Öffnungen sind mit abnehmbaren Deckeln verschlossen und abgedichtet.

2.2. Abbrandmessung

Die zeitliche Massenänderung infolge Abbrand des Brandgutes wird während des Versuchsablaufes mithilfe der nachfolgend beschriebenen Waagekonstruktion bestimmt.

Die Waagekonstruktion ruht auf 4 Kraftmeßdosen (siehe Bild 2), von denen je 2 Stück über Doppel-T-Träger direkt miteinander verbunden sind. Die Querverbindung zwischen diesen beiden Trägern ist durch 2 angeschweißte Doppel-T-Träger hergestellt. Die auf ihnen liegende Plattform aus Riffelblech wird außerdem noch von einer Unterkonstruktion gestützt, sodaß ein Kippen nicht möglich ist. Bild 4 zeigt die Waageplattform mit den genauen Abmessungen. Die 4 Kraftaufnehmer K1 bis K4 sind so angeordnet und die Verwindungssteifigkeit ist so bemessen, daß sich fertigungsbedingte Höhenunterschiede elastisch ausgleichen können. Auch horizontale Verschiebungen infolge thermischer Ausdehnung beeinträchtigen die Messung nicht.

Jeder Druckkraftaufnehmer stellt eine allseitig freibewegliche Pendelstütze dar. Die Kraft selbst wird über eine gehärtete Zentrierdruckplatte und über eine darunter befindliche Kugelfläche auf die Kraftmeßdosen übertragen. Das Meßsignal selbst wird durch eine Widerstandsänderung der in den Kraftmeßdosen befindlichen Dehnmeßstreifen hervorgerufen. Über einen Trägerfrequenz-Meßverstärker wird das Meßsignal in einem Rechner gespeichert und zusätzlich auf einem Linienschreiber kontinuierlich aufgezeichnet. Die Tragkraft der Waage beträgt ca. $8 \cdot 10^4$ N, die Ansprechempfindlichkeit ca. 1 N.

2.3. Temperaturmessung

Die Messung der örtlichen Temperaturen im Versuchsraum erfolgt über insgesamt 32 Mantel-Thermoelemente aus Chromel-Alumel mit einem Außendurchmesser von 1,6 mm.

In Bild 5 ist die Anordnung der Thermoelemente im Versuchsraum eingezeichnet. Die Thermoelemente T1 bis T24 befinden sich in ca. 10 cm Abstand von den Wänden, der

Decke und dem Boden, die Thermoelemente T25 bis T32 sind im Brandgut oder in dessen näherer Umgebung angeordnet. Die unterschiedlichen Höhen sind durch verschiedene Symbole angedeutet und ebenfalls aus Bild 5 zu ersehen.

2.4. Druckmessung

Bedingt durch unterschiedliche Gasdichten und/oder Temperaturen innerhalb und außerhalb des Brandraumes ergeben sich von der Höhe abhängige Druckdifferenzen zwischen innen und außen. Zusätzlich ändern sich die Druckverhältnisse im Brandraum beim Einsatz des gasförmigen Löschmittels.

Die Druckdifferenzmessungen werden mit einem Meßwertempfänger durchgeführt, dessen Meßprinzip auf der kapazitiven Änderung von zwei elektrischen Kondensatoren beruht. Der Meßbereich beträgt $\pm 50 \text{ N/m}^2$.

Um den Einfluß des Druckes auf die Abbrandmessung näher bestimmen zu können, ist in Höhe der Waageplattform eine Druckmeßstelle angeordnet. Parallel zur Abbrandmessung wird während des Brandes und des Löschvorganges der Druck im Versuchsraum gemessen und damit der während eines Brandversuches vorgetäuschte höhere Abbrand des Brandgutes korrigiert. Außerdem wird an weiteren 5 Meßstellen im Versuchsraum der Druck gemessen, sodaß Aussagen über die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse nach dem Einsatz des gasförmigen Löschmittels Kohlendioxid gemacht werden können. In Bild 6 ist die genaue Lage und Meßhöhe der Druckmeßstellen im Versuchsraum eingezeichnet.

Auf die in einem Brandraum gegenüber der freien Umgebung im Brandfall auftretenden Druckverhältnisse wird in [2,3] näher eingegangen.

2.5. Optische Rauchdichte

In Bild 6 ist ferner die Anordnung der Meßstrecke zur Bestimmung der Rauchdichte im Versuchsraum zu erkennen. Die Meßstrecke besteht aus einer Lichtquelle, die über ein Linsensystem das Licht einer Glühlampe (5 W) auf eine Selenzelle abstrahlt, die über einen Widerstand von ca. 10Ω kurzgeschlossen ist. Die an diesem Widerstand anliegende Spannung ändert sich linear in Abhängigkeit von der Beleuchtungsintensität der Selenzelle. Treten nun Rauchgaspartikel in den Lichtstrahlengang ein, so nimmt die Beleuchtungsintensität der Selenzelle von ihrem ursprünglichen Wert I_0 auf den Wert I ab, was als Maß für die optische Rauchdichte im Versuchsraum genommen wird. Eine Fremdlichteinstrahlung wird durch eine Abschirmung der Selenzelle vermieden, sodaß auf eine Fremdlichtkompensation verzichtet werden kann. Die Lichtquelle wurde über ein eine konstante Spannung abgebendes Labornetzgerät gespeist.

2.6. Gaskonzentrationsmessung

Für die Gaskonzentrationsmessung wurde ein Probeentnahmesystem entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, die zu analysierenden Proben aus dem Versuchsraum zu entnehmen, ohne daß hierzu eine Person diesen betreten muß.

Auf Bild 6 ist die Anordnung der Absaugesonden im Versuchsraum eingezeichnet. Für die vorgesehenen Versuche befinden sich die Sonden an den im Bild 6 angegebenen

Stellen jeweils in einer Höhe von 0,35 m, 1,5 m und 2,3 m über dem Zwischenboden.

Bild 7 zeigt die wassergekühlte Absaugsonde mit den Hauptabmessungen. Die Kühlung der Sonden ist erforderlich, damit das heiße Gas bei Eintritt in die Sonde sofort soweit abgekühlt wird, daß Verbrennungs- und sonstige chemische Reaktionen im Sondenrohr verhindert werden. Die Temperatur des Kühlwassers beträgt ca. 70 °C, damit die Taupunkttemperatur des Gases in der Sonde nicht unterschritten wird, um eine Wasserdampfkondensation zu vermeiden. Das Kühlwasserrohr ist bis in die Spitze geführt, sodaß das abfließende Wasser das gesamte Absaugrohr umströmt, was einen guten Wärmeübergang zur Folge hat.

Das Innere der aus Chromnickelstahl gefertigten Sonde ist mit Teflonrohr ausgekleidet, um Reaktionen der abgesaugten Gase mit dem Metall zu verhindern. Die aus der Absaugsonde austretenden Gase gelangen anschließend in das Verteilersystem, das auf Bild 8 dargestellt ist.

Die Absaugsonde wird direkt mit dem Verteilersystem verbunden. Die Rohrenden der Absaugsonde werden in die dafür vorgesehenen Öffnungen des Systems gesteckt, mit Dichtungen abgedichtet, das Teflonrohr bis ins Innere durchgeführt und beide untereinander durch Flansche verbunden. Innerhalb des Verteilersystems sind 6 Abzweigmöglichkeiten vorhanden, über die aus dem kontinuierlich abgesaugten Gasvolumenstrom kontinuierlich oder diskontinuierlich Proben entnommen werden können.

Bild 9 zeigt die Halterung für die Gassammelrohre, die bei einer diskontinuierlichen Messung der Gaszusammensetzung im Versuchsraum benötigt werden.

Bis zu 6 Gassammelrohre können auf einer Halterung angeordnet werden. Die Halterung wurde so konstruiert, daß die Gassammelrohre direkt mit dem Verteilersystem verbunden werden können, sodaß die zu untersuchenden Gasproben direkt aus dem Versuchsraum in diese Gassammelrohre gelangen. Die Gassammelrohre werden vor jedem Versuch evakuiert und können während des Versuches zu verschiedenen Zeiten geöffnet werden. Bild 10 zeigt eine schematische Darstellung des gesamten Probeentnahmesystems.

Zusätzlich zu den diskontinuierlichen Konzentrationsmessungen werden kontinuierliche Konzentrationsmessungen durchgeführt. Die Konzentration der Gaskomponenten Kohlendioxid und Kohlenmonoxid werden mit Infrarotabsorptions-Analysengeräten (Uras 2) gemessen. Die Messung der Sauerstoffkonzentration erfolgt mit einem Analysengerät, dessen Arbeitsweise auf dem temperaturabhängigen Paramagnetismus des Sauerstoffs beruht (Magnos 2).

Da für die kontinuierlichen Messungen an den verschiedenen Meßorten im Versuchsraum nicht genügend Meßgeräte zur Verfügung stehen, wurde die Probenahme an verschiedenen Meßorten zu unterschiedlichen Zeiten diskontinuierlich vorgenommen und die Analysen mit einem Gaschromatographen durchgeführt.

2.7. Brandmelder

In den Brandversuchsraum wurde an der in Bild 6 bezeichneten Stelle über der Tür ein Ionisationsrauchmelder in den Versuchsraum eingebaut. Das Meßprinzip beruht auf der Änderung des Ionenstromes der ionisierten Luft in der Meßkammer. Die Ionisierung wird durch ein schwaches radioaktives Präparat hervorgerufen. In der Meßkammer entsteht durch Anlegen einer Gleichspannung ein Ladungstransport durch Ionen, der sich ändert, sobald

Schwebeteilchen in die Meßkammer gelangen. Die Ansprechempfindlichkeit des Ionisationsrauchmelders ist so eingestellt, daß nicht normale Luftverunreinigungen, sondern nur die von einem Brand herrührenden Schwebeteilchen einen Alarm auslösen.

2.8. Löschanlage

Bild 11 zeigt das Schema der Löschanlage. Das Löschmittel wird aus Druckflaschen a entnommen, die auf einer elektrischen Waage b stehen. Die Waage besitzt bei einer Tragkraft von $6 \cdot 10^3 \text{ N}$ eine Empfindlichkeit von 0,1 N. Als Rohrverbindungen werden flexible Druckschläuche c verwendet, um die Funktion der Waage nicht zu beeinträchtigen. Über diese Schläuche gelangt das Löschmittel in die Rohrleitung d. Um den Druck in der Rohrleitung bestimmen zu können, wurde das Manometer e installiert. Mit dem Ventil f kann die Rohrleitung zum Versuchsraum abgesperrt werden. Der pneumatische Antrieb g, der über ein Magnetventil h und ein Zeitrelais i gesteuert wird, muß bei höherem Rohrleitungsdruck mit Druckluft k von ca. 10 bar betrieben werden, um die Rohrleitung freigeben bzw. absperren zu können. Die Rohrleitung kann über ein Ventil l entlüftet werden. Anschließend gelangt das Löschmittel über zwei unter der Decke angebrachte Düsen m in den Versuchsraum. Die Düsen können für unterschiedliche Löschmittelmengen oder für den Einsatz verschiedener Löschmittel wie Kohlendioxid und Halon ausgewechselt werden. Die Düsen sind auf der Längsachse des Versuchsraumes im Abstand von 2,55 m installiert. Die genaue Lage der beiden Düsen ist in Bild 6 eingetragen.

2.9. Löschmittel

2.9.1. Kohlendioxid

Kohlendioxid ist ein farbloses, geruchloses, leicht säuerlich schmeckendes und elektrisch nicht leitendes, inertes Gas. Es wird als verflüssigtes Gas entweder in Druckflaschen bei einem Druck von ca. 55 bar bei normaler Temperatur oder bei größerer Lagerung bei einer Temperatur von -20°C und einem Druck von ca. 20 bar in Tiefkühlanlagen aufbewahrt.

Die Löschwirkung des Kohlendioxids beruht auf dem Stick-effekt. Da bei den meisten Brandstoffen die Verbrennungsreaktionen zum Erliegen kommen, wenn der Sauerstoffgehalt der Luft auf ca. 15 Vol.-% herabgesetzt wird, wird eine sichere Löschwirkung dann erreicht, wenn durch das Kohlendioxid der Sauerstoffgehalt auf den obengenannten Wert herabgesetzt wird. Da der Aufenthalt in Räumen mit derart niedrigem Sauerstoffgehalt lebensgefährlich ist, muß gewährleistet sein, daß vor Auslösen einer CO_2 -Löschanlage der Raum von Personen geräumt ist.

Um einen Entstehungsbrand wirksam löschen zu können, wird nach [4] für geschlossene Räume die Gesamtmenge an Kohlendioxid wie folgt angegeben:

1 -	100 m^3	für jeden m^3	Raum	1,0 kg CO_2
101 -	300 m^3	für jeden m^3	Raum	0,95 kg CO_2
301 -	500 m^3	für jeden m^3	Raum	0,9 kg CO_2
501 -	1000 m^3	für jeden m^3	Raum	0,85 kg CO_2
1001 -	1500 m^3	für jeden m^3	Raum	0,8 kg CO_2
1501 -	2000 m^3	für jeden m^3	Raum	0,75 kg CO_2
	über 2000 m^3	für jeden m^3	Raum	0,7 kg CO_2

Nach [5] wird Kohlendioxid als Löschmittel verwendet bei Bränden von:

- a) gasförmigen und flüssigen brennbaren Stoffen
- b) elektrischer Ausrüstung
- c) Maschinen mit Benzin oder brennbaren Flüssigkeiten
- d) Papier, Holz, Textilien
- e) Feststoffen

2.9.2. Halon

Die Halone 1301 und 1211 werden in [6] als farblos, geruchlos bzw. schwach süßlich riechend und elektrisch nichtleitend beschrieben. Bei Normaltemperatur werden die Halone in Druckflaschen bei 15 bar bzw. 2,5 bar aufbewahrt.

Die Löschwirkung der Halone 1301 und 1211 beruht auf dem Inhibitionseffekt, d.h. die durch die Verbrennungswärme aus den Halonen abgespaltenen Halogene bzw. Radikale haben auf den Verbrennungsvorgang eine hemmende Wirkung. Nach [6] und [7] liegt die löschwirksame Konzentration von Halon 1301 und Halon 1211 je nach Brandstoff in der Größenordnung von 3 Vol.-% bis 10 Vol.-%.

Die Halone 1301 und 1211 werden nach [6] als Löschmittel verwendet bei Bränden von:

- a) gasförmigen und flüssigen brennbaren Stoffen
- b) elektrischer und elektronischer Ausrüstung
- c) Maschinen mit Benzin oder brennbaren Flüssigkeiten
- d) Papier, Holz, Textilien
- e) Feststoffen

3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Installation einer ortsfesten Löschanlage dient dazu, einen Brand bereits in seiner Entstehungsphase zu bekämpfen, um ihn zu löschen bzw. klein zu halten, bis weitere Löschmaßnahmen, z.B. durch die Feuerwehr, vorgenommen werden können. Die hier vorgesehenen Untersuchungen haben den Zweck, die minimalen Löschkonzentrationen gasförmiger Löschmittel in einem Versuchsraum natürlicher Größe bei einem Entstehungsbrand zu bestimmen. Dabei soll die Konzentrationsverteilung der auftretenden Gaskomponenten im Versuchsraum mit den in Abschnitt 2.6. genannten Methoden der Gasanalyse bestimmt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden 4 Versuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde als Löschmittel nur Kohlendioxid verwendet. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten der 4 Versuche zusammengestellt. Neben der Brandlast ist der Abbrand bei Löscheintritt, der Löscheintritt selbst, die Flutungszeit, die eingesetzte Löschmittelmenge und die mittlere Löschmittelkonzentration im Versuchsraum eingetragen.

Als Brandgut wurden Krippen mit aufeinandergeschichteten Kanthölzern aus Kiefer mit den Abmessungen 4 cm x 4 cm x 42 cm verwendet. Die Stäbe wurden in 8 Lagen zu je 5 Stück aufeinandergeschichtet, was einer Masse von ca. 13 kg je Krippe entspricht.

Um einen Entstehungsbrand zu simulieren, der in der Regel nur auf einen eng begrenzten Raum beschränkt ist, wurde bei jedem Versuch jeweils nur eine Holzkrippe in der Mitte des Versuchsraumes aufgeschichtet.

Die Zündung der Holzkrippen erfolgte mit einer mit 100 ml Brennspritus gefüllten, in der Mitte unter der Krippe befindlichen Zündwanne mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm.

Der Löschbeginn erfolgte bei allen Versuchen bei einem Abbrand der Holzkrippen von ca. 20 Gew.-%. Aufgrund der Auflösung des Meßsignals der elektrischen Waage ließ sich der Abbrand jedoch nur auf ± 2 Gew.-% genau bestimmen.

Bei den Versuchen wurde die mittlere Löschmittelkonzentration im Versuchsraum zwischen 30 Vol.-% und 15 Vol.-% variiert, wobei den Berechnungen die NFPA-Richtlinien [5] zugrunde gelegt wurden.

4. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1. Temperaturmessung

Die Bilder 12 bis 14 zeigen die zeitlichen Verläufe der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T32 (siehe Bild 5), die mit Hilfe einer Datenerfassungsanlage aufgezeichnet wurden. Dabei wurden Temperaturen über 500 °C nach Fischer [8] korrigiert.

Beim ersten Versuch stiegen nach dem Zünden zunächst die Temperaturen an den Meßstellen T28 und T25 direkt über der Holzkrippe an und erreichten nach einer Versuchszeit von ca. 2 min Werte zwischen 800 °C und 1 000 °C.

Da die Flammen bereits nach ca. 1 min aus der Oberseite der Holzkrippe herausschlugen und die Rauchgase sich zunächst senkrecht nach oben ausbreiteten, stieg auch die Temperatur an den Meßstellen T29 und T26 an. An der Meßstelle T29, die sich ca. 40 cm über der Holzkrippe

(Meßhöhe 75 cm) befand, wurde eine Temperatur von ca. 1 000 °C angezeigt, an der Meßstelle T26 nur noch eine von 500 °C bis 600 °C, d.h. in einer Meßhöhe von 1,50 m erreichten nur noch einzelne Flammenfetzen das Thermoelement.

Unterhalb der Decke betrug die Temperatur nur noch ca. 300 °C. Daraus ist zu erkennen, daß an der Meßstelle T27 nur noch heiße Rauchgase vorhanden waren. Die Temperaturen an den Meßstellen T30 bis T32 (siehe Bild 5) lagen bereits wesentlich niedriger. In Bodennähe an der Meßstelle T30 wurden nur noch ca. 40 °C, in einer Meßhöhe von 1,50 m ca. 120 °C (T31) und unterhalb der Decke ca. 180 °C (T32) gemessen.

Die Temperaturverteilung an den Wänden des Versuchsraumes wurde mit den Thermoelementen T1 bis T24 aufgezeichnet. Bedingt durch den größeren Abstand vom Brandgut erfolgt der Temperaturanstieg langsamer. In Bodennähe steigt die Temperatur auf ca. 40 °C, in einer Meßhöhe von 1,50 m auf ca. 130 °C und in Deckennähe an den Meßstellen in der Wandmitte bis auf eine Temperatur von ca. 160 °C an.

Die oben genannten Temperaturen wurden bis zum Zeitpunkt des Löscheinsatzes, also bei einem Abbrand von ca. 20%, erreicht.

Die Temperaturverteilung im Versuchsraum vor dem Löscheinsatz kann wie folgt erklärt werden. Die heißen Rauchgase breiten sich vom Brandgut ausgehend senkrecht nach oben zur Decke hin aus und verteilen sich anschließend zunächst im oberen Teil des Versuchsraumes. Wie aus den Bildern zu erkennen ist, kühlen sich die Gase auf dem längeren Weg zu den oberen Raumecken hin (Meßstelle T3, T9, T15, T21) etwas mehr ab als bis zur Wandmitte unter der Decke (Meßstelle T6, T12, T18, T24).

In den Raumecken wurden sowohl in halber Raumhöhe als auch an der Decke gleich hohe Temperaturen gemessen. In Bodennähe dagegen wird der gesamte Versuchsraum um den Entstehungsbrand kaum erwärmt. Nach einer Versuchszeit von 9 min (Versuch 1) wurde der Löschvorgang eingeleitet, wodurch ein steiler Temperaturabfall im gesamten Versuchsraum zu verzeichnen war. Der Löschbeginn ist auf allen Bildern gekennzeichnet. Da der Brand vollständig gelöscht wurde, näherten sich die Temperaturen im gesamten Versuchsraum wenige Minuten nach dem Löscheinsatz einem Wert von etwa 40 °C. An den Meßstellen in Bodennähe trat beim Löscheinsatz kurzfristig ein geringerer Temperaturanstieg auf, der dadurch erklärt werden kann, daß das von oben eingegebene Löschmittel die heißen Rauchgase bei Löschbeginn nach unten drückt, wodurch die Temperaturen in Bodennähe für einige Sekunden um bis zu 20 °C anstiegen.

Bei Versuch 2, bei dem eine Löschmittelmenge von ca. 35 kg Kohlendioxid eingesetzt wurde, konnten keine Temperaturen aufgezeichnet werden, da während des Versuchs die gesamte Datenerfassungsanlage ausfiel. Bei Versuch 3 und Versuch 4 wurde jeweils eine Löschmittelmenge von ca. 20 kg bzw. ca. 15 kg Kohlendioxid in den Versuchsraum eingegeben (siehe Tabelle 1). Die Bilder 13 und 14 zeigen die zeitlichen Verläufe der örtlichen Temperaturen bei den Versuchen 3 und 4.

Nach dem Zünden steigt die Temperatur über der Brandstelle sehr schnell an und erreicht durch direkte Flammenberührung an den Meßstellen T28, T25 und T29 wieder jeweils ca. 900 °C bis 1 000 °C. An den im oberen Teil des Raumes über der Holzkrippe angeordneten Meßstellen T26 und T27 werden nach einer Versuchszeit von etwa 9 min über 500 °C bzw. über 300 °C gemessen. An der in gleicher Höhe wie T26 angeordneten Meßstelle T31 wurde ebenso wie

in Wandnähe nur eine Temperatur von ca. 150 °C registriert. In Bodennähe an der Wand lagen die Temperaturen wie beim 1. Versuch bei ca. 40 °C.

Der Löschbeginn nach einer Versuchszeit von 9,25 min (Versuch 3) bzw. 8,75 min (Versuch 4) hatte wieder den erwarteten Temperaturabfall zur Folge. Nach einer Versuchszeit von 30 min hatte sich an allen Meßstellen eine konstante Temperatur eingestellt; der Entstehungsbrand war vollständig gelöscht.

Anhand der Temperaturmessungen lassen sich für die durchgeführten Versuche gute Übereinstimmungen im Brandverlauf vor dem Löschmitteleinsatz erkennen. Die Temperaturen in der oberen Raumhälfte an der Wand liegen nahe beieinander. In den oberen Ecken des Raumes wurde generell eine um ca. 30 °C niedrigere Temperatur gemessen als in der Wandmitte im oberen Teil des Versuchsaumes, was auf die größere Entfernung der Ecken zum Brandgut und die damit verbundene Abkühlung der Gase zurückzuführen ist.

Bedingt durch den Einsatz von Kohlendioxid in unterschiedlichen Mengen weichen die Temperaturverläufe nach dem Löschmitteleinsatz voneinander ab. Besonders gut ist der in und über der Holzkrippe nach dem Löschbeginn unterschiedliche Temperaturabfall zu erkennen. Je weniger Löschmittel verwendet wurde, desto länger ist der Zeitraum bis zum Erreichen einer konstanten Temperatur von ca. 40 °C. Die Temperatur in der Holzkrippe (T28) ist bei Versuch 1 bereits 2 min nach Löschbeginn auf unter 100 °C gefallen, während bei Versuch 3 dazu 4 min und bei Versuch 4 ca. 7 min benötigt wurden, um die Temperatur unter 100 °C absinken zu lassen.

Wie bereits erwähnt wurde, konnten bei Versuch 2 keine Temperaturen erfaßt werden. Es ist jedoch anzunehmen, daß bei Versuch 2 die Temperaturwerte vor Löscheintritt mit denen der 3 anderen Versuche übereinstimmen und der Temperaturabfall auf einen Wert von weniger als $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der Brandlast (T28) zwischen den Werten von Versuch 1 und Versuch 3 eingeordnet werden kann.

4.2. Druckmessung

Der zeitliche Verlauf der örtlichen Druckdifferenzen an den im Versuchsraum angeordneten Druckmeßstellen D1 bis D6 (siehe Bild 5) sind für die Versuche 1,3 und 4 in den Bildern 15 bis 17 aufgezeichnet.

Bei Versuchsbeginn herrscht sowohl innerhalb des Versuchsraumes als auch außerhalb der gleiche Druck, sodaß alle sechs Druckaufnehmer den Wert Null anzeigen. Nach einer Branddauer von ca. 8 min wurde bei allen Versuchen an den Meßstellen D1 und D2 ein Unterdruck gegenüber außen von etwa 2 N/m^2 bis $2,5\text{ N/m}^2$ gemessen. Dies bedeutet, daß bei einer Fläche der Waageplattform von 21 m^2 , ein um 4,2 kg bis 5,25 kg größerer Massenverlust angezeigt wird als es dem weiteren Abbrand entspricht. Da bei allen Versuchen der Abbrand bei Löscheintritt mit ca. 20 Gew.-% vorgegeben war, um einen Vergleich zu ermöglichen, wurden die Meßwerte entsprechend korrigiert. Da aber, wie die Bilder 15 bis 17 zeigen, Druckschwankungen von ca. 1 N/m^2 auftraten, konnte der Massenverlust nur bis auf einen Wert von $\pm 1\text{ kg}$ korrigiert werden.

Bevor auf die Ergebnisse der Druckmessung näher eingegangen wird, soll zunächst der theoretische Zusammenhang der Druckverhältnisse in einem Brandraum erläutert werden.

Der Atmosphärendruck in einer Gassäule nimmt mit der Höhe ab. Dabei hängt die Druckabnahme von der Dichte der Gassäule bzw. deren Temperatur ab. Befindet sich in einem Raum ein Gas, dessen Dichte bzw. dessen Temperatur unterschiedliche Werte gegenüber der dem Raum umgebenden Atmosphäre aufweist, so ergibt sich infolge der unterschiedlichen Druckabnahme in den beiden Gassäulen eine mit der Höhe zunehmende Druckdifferenz. Da aber ein Raum nicht absolut dicht ist, sondern normalerweise immer Leckageöffnungen aufweist, setzt, sofern das in ihm befindliche Gas eine niedrigere Dichte und/oder höhere Temperatur als die Umgebungsatmosphäre aufweist, infolge des Auftriebes der leichteren Gassäule in dem Raum eine nach oben gerichtete Strömung ein. Gas strömt aus den oberen Leckageöffnungen des Raumes aus und wird durch aus der Umgebung durch die unteren Leckageöffnungen des Raumes einströmendes Gas ersetzt. Zwischen dem ausströmenden und dem einströmenden Gas bildet sich im Raum eine Ebene aus, in der der Absolutdruck in den beiden Gassäulen innerhalb und außerhalb des Raumes gleich ist. Unterhalb dieser sogenannten neutralen Druckzone herrscht ein Unterdruck und oberhalb ein Überdruck im Raum gegenüber der Umgebung. Diese Verhältnisse liegen z.B. bei einem Brand in einem Raum vor, wobei die Normdichte des Rauchgasstromes der Normdichte der Umgebungsluft wegen des hohen Stickstoffgehaltes beider Gasströme gleichgesetzt werden kann. Weist andererseits das in dem Raum befindliche Gas eine höhere Dichte und/oder niedrigere Temperatur als die Umgebungsatmosphäre auf, so tritt in dem Raum eine nach unten gerichtete Strömung ein, d.h. unterhalb der neutralen Druckzone ist ein Überdruck und oberhalb ein Unterdruck im Raum gegenüber der Umgebung vorhanden. Dadurch strömt nun Gas aus den unteren Leckageöffnungen des Raumes aus und durch die oberen Leckageöffnungen aus der Umgebung ein.

Wie die Bilder 15 bis 17 der Versuche 1, 3 und 4 zeigen, gibt der zeitliche Verlauf der örtlichen Druckkurven vor dem Löscheintritt die oben geschilderten Druckverhältnisse bei einem Brand in einem Raum gut wieder. Im unteren Teil des Versuchsraumes an den Meßstellen D1 und D2 ist vor Löscheintritt ein Unterdruck vorhanden, während im oberen Teil des Versuchsraumes an den Meßstellen D5 und D6 ein durch die größere Temperatur der Rauchgase gegenüber der Umgebungsluft ein Überdruck von ca. 5 N/m^2 auftritt. An den Meßstellen D3 (Versuch 1) und D4 (Versuch 3 und 4) wurde weder ein Unter- noch ein Überdruck angezeigt, d.h. die neutrale Druckzone liegt bei den hier durchgeführten Versuchen in einer Meßhöhe von 0,65 m (Versuch 1) bis 1,20 m (Versuch 3 und 4). Die Lage der neutralen Druckzone verlagert sich im Versuchsraum je nach Temperatur der Rauchgase etwas nach unten oder oben.

Der beim Eingeben des Löschmittels auftretende Überdruck im Versuchsraum wird durch die Datenerfassungsanlage sowohl als positive als auch als negative Druckspitze gezeichnet, was auf die Abtastfrequenz der Anlage zurückzuführen ist.

Bei einer Löschmittelmenge von ca. 40 kg CO_2 , wie sie bei Versuch 1 verwendet wurde, liegt nach der Löschmittelzugabe durch die großen Dichteunterschiede (Dichte bei 0°C und 1013 mbar: $\rho_{\text{CO}_2} = 1,977 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{Luft}} = 1,293 \text{ kg/m}^3$) und des raschen Abfalls der Rauchgastemperatur nicht mehr eine von unten nach oben, sondern eine von oben nach unten gerichtete Strömung vor, sodaß im unteren Teil des Versuchsraumes an der Meßstelle D1 ein Überdruck von ca. 5 N/m^2 gemessen wurde. An den Meßstellen D2 und D3 war noch ein Überdruck von ca. $3,5 \text{ N/m}^2$ vorhanden, der sich ebenso wie bei D1 erst nach einer

Versuchszeit von 30 min auf den Wert Null abgebaut hat. Die Meßstelle D4 hat bereits 1 min nach Löschbeginn keine Druckdifferenz mehr aufzuweisen, d.h. die neutrale Druckzone nach dem Einsatz von ca. 40 kg CO₂ als Löschmittel liegt in einer Meßhöhe über D4 bei ca. 1,40 m. Mit zunehmender Meßhöhe (D5, D6) entsteht im Versuchsraum ein Unterdruck von ca. 1,5 N/m² bis 2 N/m², der selbst nach einer Versuchszeit von 30 min noch nicht restlos abgebaut ist. Durch den hohen Überdruck im unteren Teil des Versuchsraumes strömt CO₂ durch die Leckageöffnungen aus und durch den Unterdruck im oberen Teil des Versuchsraumes Luft durch die Leckageöffnungen ein, was auch durch die Konzentrationsmessungen bestätigt wurde.

Bild 16 zeigt den zeitlichen Verlauf der örtlichen Druckdifferenzen von Versuch 3, Bild 17 den von Versuch 4. Im Gegensatz zu Versuch 1 wurden bei diesen beiden Versuchen nur Löschmittelmengen von ca. 20 kg bzw. ca. 15 kg eingesetzt. Wie aus den Bildern zu erkennen ist, wurde auch nach dem Löschmitteleinsatz an den Meßstellen D1 bis D3 ein geringer Unterdruck von ca. 0,5 N/m² bzw. ca. 1 N/m² registriert, der nach wenigen Minuten auf Null zurückgeht. An den Meßstellen D4 und D5 konnte nach der Löschmittelzugabe keine Druckdifferenz mehr festgestellt werden, während unterhalb der Decke an der Meßstelle D6 im Gegensatz zu Versuch 1 ein geringer Überdruck von ca. 1 N/m² auftritt, der langsam gegen Null abfällt. Dies bedeutet, daß bei Versuch 3 und Versuch 4 die nach oben gerichtete Strömung im Versuchsraum durch den langsameren Abfall der Rauchgastemperatur, wenn auch nur noch sehr geringfügig, aufrechterhalten wurde. Aufgrund der geringen Druckdifferenzen (Versuch 3 und 4) wird das Löschmittel CO₂, wie auch die Gaskonzentrationsmessungen gezeigt haben, sehr gleichmäßig im Versuchsraum verteilt.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen sollten bei den in der Praxis konzipierten CO₂-Löschanlagen berücksichtigt werden, wobei besonders auf den Einfluß der durch die Zugabe großer Mengen an Kohlendioxid hervorgerufenen Dichte- und somit Druck- bzw. Strömungsänderungen auf die Verteilung des Löschmittels im Raum geachtet werden muß.

4.3. Optische Rauchdichte

Die optische Rauchdichte wurde an der in Bild 6 eingezeichneten Stelle bestimmt. In den Bildern 18a, 22a und 24a ist die optische Rauchdichte bzw. die bezogene Beleuchtungsintensität I/I_0 über der Versuchszeit aufgetragen. Die Beleuchtungsintensität ist sehr stark von der Brandentwicklung abhängig. Sie nimmt gleich nach der Zündung der Holzkrippe langsam ab. Bis zum Zeitpunkt des Löscheinsatzes ist die Rauchentwicklung bereits so stark fortgeschritten, daß je nach Rauchentwicklung der Holzkrippe nur noch zwischen ca. 20% und 40% der ursprünglichen Lichtemission auf den Empfänger auftrifft.

Bei Löschbeginn sinkt durch das einströmende Löschmittel die Beleuchtungsintensität sofort auf Null ab, d.h. der Versuchsraum ist vollständig dunkel. Beim Einsatz von ca. 40 kg CO₂ (Versuch 1) nimmt die Rauchdichte ca. 5 min nach dem Löscheinsatz in Höhe der Meßstrecke wieder ab, d.h. das Löschmittel sinkt im Versuchsraum langsam nach unten ab. Nach einer Versuchszeit von 30 min ist in der Höhe der Meßstrecke bereits wieder eine Beleuchtungsintensität von ca. 50% der ursprünglichen Beleuchtungsintensität vorhanden.

Bei der Eingabe von ca. 15 kg bis ca. 20 kg CO₂ (siehe Versuche 3 und 4, Bilder 22a und 24a) ist eine Zunahme der Beleuchtungsintensität nach dem Löschvorgang während der Versuchszeit von 30 min nicht mehr festzustellen, d.h. durch das Löschmittel ist der Raum in Höhe der Meßstrecke optisch so dicht, daß die Beleuchtungsintensität auf dem Wert Null bleibt. Das Kohlendioxid ist nicht so stark wie bei Versuch 1 im Versuchsraum nach unten abgesunken, was auf die Druckverhältnisse zurückzuführen ist (siehe Abschnitt 4.2.).

4.4. Gaskonzentrationsmessung

Um eine Übersicht über die Ergebnisse aus den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Gasanalysen zu erhalten, ist der Verlauf der zeitlichen Mittelwerte der örtlichen Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid als auch die örtlichen Konzentrationen dieser Gaskomponenten aus momentanen Einzelanalysen (Gaschromatograph), in den Bildern 18 bis 25 dargestellt. Außerdem sind in den Tabellen 2 bis 5 neben der Probennummer und der Versuchszeit die einzelnen Konzentrationswerte der Gaskomponenten Kohlendioxid, Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Methan und Stickstoff, die mit dem Gaschromatographen ermittelt wurden, eingetragen. Da die Gesamtkonzentration für eine Probe jeweils zu 100 Vol.-% gesetzt wurde, ist eine geringe Überschreitung z.B. der O₂-Konzentration über 21 Vol.-% möglich, da die analysierten Gase nicht die Gesamtheit aller in der Probe vorhandenen Gaskomponenten darstellen. In den in den Tabellen 2 bis 5 aufgeführten N₂-Konzentrationen sind andere Inertgase wie z.B. Argon enthalten. Daher ist es möglich, daß N₂-Konzentrationen von 79 Vol.-% geringfügig überschritten werden.

In Bild 18a ist für Versuch 1 der in einer Höhe von 0,35 m kontinuierlich gemessene zeitliche Verlauf der Mittelwerte der örtlichen CO_2 -Konzentration aufgetragen. Vor Löschbeginn steigt die CO_2 -Konzentration auf einen Wert von ca. 17 Vol.-% an. Nach dem Einsatz des Löschmittels erkennt man deutlich den Anstieg der Kohlendioxidkonzentration bis auf ca. 38 Vol.-%, die nach einer Versuchszeit von 30 min gleichmäßig auf ca. 15 Vol.-% wieder abgenommen hat.

Die momentanen Einzelwerte, die mit dem Gaschromatographen in der gleichen Meßhöhe bestimmt werden, sind mit einem Kreuz gekennzeichnet. Diese Werte liegen nach dem Löschbeginn bei einer etwas höheren CO_2 -Konzentration, zeigen aber die gleiche abfallende Tendenz. Weiterhin sind in diesem Bild die Meßwerte, die in 2 weiteren Meßhöhen (o, Δ) über der Holzkrippe ermittelt wurden, eingetragen. Die angegebene Nr. ist mit der Nr. der Absaugesonde im Versuchsraum, wie sie in Bild 6 eingezeichnet ist, identisch.

In einer Meßhöhe von 1,50 m bzw. 2,30 m über der Holzkrippe fällt nach dem Einsatz des Löschmittels der Momentanwert der örtlichen Konzentration fast mit dem direkt über der Krippe gemessenen Wert zusammen. Während die CO_2 -Konzentration unterhalb der Decke in einer Meßhöhe von 2,30 m bereits nach 5 min auf ca. 17 Vol.-% abgesunken ist und nach 24,5 min nur noch ca. 5 Vol.-% aufweist, bleibt die CO_2 -Konzentration in einer Meßhöhe von 1,50 m noch einige Minuten lang bei über 30 Vol.-%, und erreicht nach 24,5 min ebenfalls einen Wert von 7 Vol.-%, d.h. in halber Raumhöhe bleibt die höhere Konzentration länger erhalten als an der Decke; das schwerere Kohlendioxid sinkt langsam nach unten.

Die Bilder 18b und 18c zeigen die Momentanwerte der Konzentration an den Meßstellen Nr. 4 bis Nr. 9. Da sich die Holzkrippe in der Mitte des Versuchsraumes befindet, liegen vor dem Löscheinsatz die CO_2 -Konzentrationen an den Meßstellen in Bodennähe (Nr.4 und Nr. 7) ebenso niedrig wie im oberen Teil des Raumes. Nach dem Löscheinsatz ist der zeitliche Verlauf der CO_2 -Konzentration ebenso wie in der Raummitte.

Der Verlauf der O_2 -Konzentration ist dem der CO_2 -Konzentration entgegengesetzt. Nach dem Zünden der Holzkrippe fällt die O_2 -Konzentration unmittelbar darüber an Meßstelle Nr. 1 stark ab. Kurz vor Löschbeginn wurde sowohl mit der kontinuierlichen als auch mit der diskontinuierlichen Gasanalyse ein Wert unter 5 Vol.-% gemessen. Im übrigen Versuchsraum wurden 15 Vol.-% Sauerstoff oder mehr festgestellt, wie die Bilder 19a, 19b, 19c zeigen.

Nach dem Löscheinsatz ist die O_2 -Konzentration im gesamten Versuchsraum weit unter 15 Vol.-% abgesunken, was die Voraussetzung zum Ablöschen eines Brandes ist. Nach einer Versuchszeit von 30 min ist die O_2 -Konzentration in einer Meßhöhe von 0,35 m auf ca. 15 Vol.-% angestiegen, während unterhalb der Decke bereits 5 min nach dem Löscheinsatz wieder ca. 17 Vol.-% und mehr Sauerstoff gemessen wurden. Nach einer Versuchszeit von 25 min ist in der oberen Hälfte des Versuchsraumes bereits wieder eine O_2 -Konzentration von ca. 20 Vol.-% vorhanden. Die Ursache für eine derartige Konzentrationsverteilung liegt an den bereits beschriebenen Druckverhältnissen im Versuchsraum.

Die Werte der CO -Konzentration über der Holzkrippe stiegen vor dem Löschbeginn bis auf ca. 6 Vol.-% an, sanken aber nach dem Löscheinsatz nach kurzer Zeit auf Null ab. Mit Hilfe der Gaschromatographie konnte nach dem Löschen nur

noch wenig oder kein Kohlenmonoxid mehr hergestellt werden, wie auch aus den Tabellen zu erkennen ist. Die Konzentrationswerte für Methan und Stickstoff sind wegen der Übersichtlichkeit nur in den Tabellen aufgeführt.

In den Bildern 20 und 21 sind für Versuch 2 die gemessenen Momentanwerte der örtlichen Konzentrationen von CO_2 , O_2 und CO eingetragen. Die Konzentrationsänderungen vor Löschbeginn sind auf das Abbrandverhalten der Holzkrippe zurückzuführen.

Nach dem Löscheinsatz einer Löschmittelmenge von 34,3 kg steigt die CO_2 -Konzentration im gesamten Versuchsraum auf über 30 Vol.-% an, fällt aber nach einer Versuchszeit von 23,5 min auf ca. 20 Vol.-% ab; an der Decke werden nur noch unter 10 Vol.-% gemessen.

Die O_2 -Konzentration hat nach dem Löscheinsatz im gesamten Versuchsraum einen Wert von ca. 13 Vol.-% erreicht, steigt aber dann ähnlich wie bei Versuch 1 wieder an. Ein Unterschied aufgrund der eingesetzten geringeren Löschmittelmenge macht sich darin bemerkbar, daß die gemessenen Konzentrationswerte in den 3 Meßhöhen nicht mehr so weit auseinanderliegen wie bei Versuch 1, d.h. das Kohlendioxid sinkt nicht mehr ganz so stark nach unten. Es ist anzunehmen, daß die Druckverteilung im Versuchsraum in etwa der bei Versuch 1 entspricht.

Kohlenmonoxid konnte nach dem Löschmitteleinsatz bei diesen Versuchen nicht mehr nachgewiesen werden.

Bei den Versuchen 3 und 4 wurden Löschmittelmengen von ca. 20 kg und ca. 15 kg verwendet, also bedeutend weniger als bei den beiden ersten Versuchen.

In den Bildern 22 und 23 sind für Versuch 3, in den Bildern 24 und 25 für Versuch 4 die örtlichen Konzentrationen von CO_2 , O_2 und CO eingetragen.

Die CO_2 -Konzentration bei Versuch 3 stieg nach dem Löscheinsatz im gesamten Versuchsraum nur noch auf ca. 28 Vol.-% an, bei Versuch 4 waren es nur noch etwa 20 Vol.-%. Die Meßkurve aus der kontinuierlichen Gasanalyse zeigt lediglich noch einen schwachen Anstieg der CO_2 -Konzentration.

Nach einer Versuchszeit von etwa 25 min ist die CO_2 -Konzentration im Versuchsraum bei Versuch 3 auf ca. 21 Vol.-% und in den Ecken auf ca. 15 Vol.-% abgesunken. Bei Versuch 4 hat sich nach ca. 25 min dagegen die CO_2 -Konzentration im gesamten Versuchsraum gleichmäßig auf ca. 14 Vol.-% verringert.

Die O_2 -Konzentration über der Holzkrippe weist einen ähnlichen Verlauf wie bei den vorherigen Versuchen auf. Im Gegensatz zu Versuch 1 und Versuch 2 bleibt jedoch die O_2 -Konzentration im gesamten Versuchsraum bis auf einen kleineren Anstieg in den oberen Ecken des Versuchsraumes bei Versuch 3 konstant, was auf die bereits erwähnten Druckverhältnisse zurückzuführen ist.

Bei Versuch 3 liegt die O_2 -Konzentration während einer Versuchszeit von ca. 25 min bei ca. 14 Vol.-% und bei Versuch 4 bei ca. 16 Vol.-%. Der mit der Sonde Nr. 1 ermittelte Meßwert der CO_2 - und O_2 -Konzentration in einer Meßhöhe von 0,35 m bei Versuch 3 nach einer Versuchszeit von 14,75 min kann darauf zurückgeführt werden, daß während des Transports an die Meßstelle aufgrund von Undichtigkeiten Luft in das Gassammelrohr eingetreten ist.

Die kontinuierlich gemessene CO-Konzentration fällt nach wenigen Minuten auf einen Wert von Null Vol.-% ab. Anhand der mit der diskontinuierlichen Analyse ermittelten Werte ist das Absinken der CO-Konzentration früher zu erkennen (Bild 23a und 25a).

Das unterschiedliche Absinken der CO₂-, bzw. Ansteigen der O₂-Konzentrationen bei den Versuchen 1 bis 4 ist auf den Einsatz der verschieden großen Löschmittelmengen zurückzuführen. Die Löschmittelmenge von 39,7 kg bei Versuch 1 verursacht nach dem Löschen unterschiedliche Druckverhältnisse im Versuchsraum. Durch den im oberen Teil des Versuchsraumes entstandenen Unterdruck strömt durch undichte Stellen Luft in den Versuchsraum ein, so daß schon nach wenigen Minuten unterhalb der Decke die CO₂-Konzentration weit unter den kurz nach dem Löscheinsatz gemessenen Wert abgesunken ist bzw. die O₂-Konzentration stark zugenommen hat. Der Überdruck im unteren Teil des Versuchsraumes läßt das Kohlendioxid durch undichte Stellen im Versuchsraum ausströmen.

Bei Versuch 2 wirkt sich die etwas niedrigere Löschmittelmenge von 34,5 kg so aus, daß der Unterdruck etwas geringer ist und deshalb das Ansaugen von Luft in den Versuchsraum geringer ist, wie auch aus den Bildern 20 und 21 sowie aus den Tabellenwerten zu erkennen ist.

Bei Versuch 3 und besonders bei Versuch 4 tritt im Gegensatz zu Versuch 1 und Versuch 2 nach dem Löscheinsatz sogar ein sehr kleiner Überdruck (Bild 16b und 17b) auf, sodaß bei diesen beiden Versuchen keine Luft in den Versuchsraum eingesaugt wird. Das Löschmittel CO₂ bzw. der Sauerstoff ist im Gegensatz zu den Versuchen mit den größeren Löschmittelmengen im gesamten Versuchsraum auch noch nach einer Versuchszeit von ca. 30 min gleichmäßig im Raum verteilt. Auch nach dieser Zeit ist ein Absinken

der CO_2 - bzw. Ansteigen der O_2 -Konzentration noch nicht festzustellen.

Die Absolutwerte der CO_2 -Konzentration liegen beim Einsatz größerer Mengen Kohlendioxid (Versuch 1 und 2) jedoch in Bodennähe noch wesentlich höher als beim Einsatz kleinerer Mengen Kohlendioxid (Versuch 3 und 4). Im oberen Teil des Versuchsraumes liegen durch das Ansaugen von Luft die Absolutwerte der CO_2 -Konzentration aber wesentlich niedriger bzw. der O_2 -Konzentration wesentlich höher, sodaß ein Brand unterhalb der Decke evtl. wieder aufflammen könnte. Diese Gefahr besteht besonders bei Glutbränden.

4.5. Brandmelder

Der über der Tür des Versuchsraumes installierte Ionisationsrauchmelder (siehe Bild 6) sprach bei allen 4 Versuchen bereits nach einer Versuchszeit zwischen 1 min und 2 min an, sodaß im Ernstfall eine CO_2 -Löschanlage nicht erst nach einem Abbrand der Holzkrippe von ca. 20 Gew.-%, sondern bei einer wesentlich geringeren Brandentwicklung anspricht und den Brand dementsprechend früher löscht.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Um im Rahmen eines längerfristigen Forschungsauftrages gasförmige Löschmittel wie Kohlendioxid und Halogenkohlenwasserstoffe (Halone) untersuchen zu können, wurde ein Versuchsraum natürlicher Größe errichtet. Die Grundfläche des Versuchsraumes beträgt ca. 21 m^2 . Ein Zwischenboden wurde als Waageplattform ausgebildet, sodaß während des Versuchsablaufes der Massenverlust des Brandgutes durch Abbrand bestimmt werden kann. Die lichte Höhe des Raumes beträgt $2,40 \text{ m}$ und somit das Raumvolumen 50 m^3 .

Das Löschmittel wird aus Druckflaschen entnommen und über 2 Düsen in den Versuchsraum eingegeben.

Das Temperaturfeld wird mit Hilfe der 32 im gesamten Versuchsraum verteilten Thermoelemente bestimmt. Die Messung der Druckverteilung im Versuchsraum erfolgt an 6 im Versuchsraum befindlichen Druckmeßstellen. Außerdem werden die Konzentrationen der während der Brand- und Löschversuche auftretenden Gaskomponenten ermittelt. Die Messung der optischen Rauchdichte zeigt die starke Sichtbehinderung sowohl durch den Brand als auch durch den Einsatz des Löschmittels. Für die hier beschriebenen Versuche wurde als Löschmittel nur Kohlendioxid verwendet.

Die Temperatur vor dem Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel stieg in Raummitte über der Holzkrippe auf ca. $800 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ an, während in Wandnähe nur ca. $200 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen wurden. Nach dem Löschen sank die Temperatur zunächst steil ab und erreichte allmählich Umgebungstemperatur; der Brand war gelöscht.

Bei Einsatz größerer Löschmittelmengen wurde im oberen Teil des Versuchsraumes ein Unterdruck festgestellt, der zur Folge hatte, daß durch undichte Stellen im Versuchsraum

Luft eindringen konnte, wie auch anhand der Konzentrationsmessungen zu erkennen ist. Im unteren Teil des Versuchsraumes herrschte Überdruck, sodaß größere Löschmittelmengen nach außen entweichen konnten. Die dazugehörigen Werte der CO_2 -Konzentration lassen für diesen Fall deutlich ein schnelles zeitliches Absinken erkennen. Entsprechend schnell verläuft der Anstieg der O_2 -Konzentration.

Bei kleineren Löschmittelmengen ist nach dem Einsatz des Löschmittels im oberen Teil des Versuchsraumes nur ein geringer Überdruck vorhanden, sodaß die CO_2 -Konzentrationen bzw. die O_2 -Konzentrationen im Laufe der Versuchszeit nur geringfügig abfielen bzw. anstiegen. Im unteren Teil tritt ein Ausgleich des im Raum absinkenden Löschmittels sowie der eingesaugten Luft ein, sodaß kaum Konzentrationsunterschiede im Verlauf der Versuchszeit auftreten. Die Untersuchungen werden mit den Löschmitteln Kohlendioxid und Halon weitergeführt.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Schatz, H.: Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe.
Teil 1: Auswertung des in- und ausländischen Schrifttums über Untersuchungen mit Halon als Löschmittel
Forschungsbericht Nr. 32 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß
"Feuerwehrangelegenheiten" (1978).
- [2] John, R.: Rauchgas- und Luftströme durch Öffnungen in Brandräumen.
In: 5. Internationales Brandschutz-Seminar 1976 in Karlsruhe.
Karlsruhe: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (1976)
Bd. 1, S. 39-61.
- [3] Seeger, P.G.: Luft- und Rauchgasströmung in einem Gebäude im Brandfall.
VFDB-Zeitschrift 26 (1977), Nr. 3,
S. 90-99.
- [4] Vorschriften für die Errichtung und den Betrieb ortsfester Kohlendioxid- (CO₂-) Feuerlöschanlagen. Verband der Sachversicherer e.V.,
Technische Prüfstelle, Köln (1962).

- [5] Carbon dioxide extinguishing systems.
NFPA No. 12 - 1977, S. 1-93,
In: National Fire Codes,
Boston: NFPA (1978).
- [6] Standard halogenated fire extinguishing agent systems - Halon 1301 and Halon 1211.
NFPA No. 12 A - 1977, S. 1-128,
NFPA No. 12 B - 1977, S. 1-91,
In: National Fire Codes,
Boston: NFPA (1978).
- [7] DIN 14270, Halon-Löschmittel
Februar 1977.
- [8] Fischer, S.: Zur Messung hoher Temperaturen in strömenden Gasen mit Thermoelementen.
Die Technik 23 (1968) Nr. 1,
S. 29-33.

7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Schematische Übersicht der Versuchsdaten.

Versuch Nr.	1	2	3	4
Rauminhalt	50	50	50	50
Brandgut	1 Holzkrippe	1 Holzkrippe	1 Holzkrippe	1 Holzkrippe
Brandlast	12,65	12,8	13,4	13,0
Löschmittel	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂
Abbrand bei Löschbeginn	2,28	2,3	2,9	2,79
Abbrand bei Löschbeginn	18	18	21,6	21,5
Löschbeginn	9	8	9,25	8,75
Flutungszeit	28	24	18	16
Löschmittelmenge	39,7	34,3	19,4	15,5
Mittlere Löschmittelkonzentration	30,8	27,8	17,9	14,8

Tabelle 2a. Versuch 1 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 1, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	16,47	1,85	6,13	2,56	72,99
2	9,5	38,42	10,28	0,56	0,00	50,74
3	14,5	36,82	11,59	0,00	0,00	51,59
4	19,5	33,21	12,50	0,00	0,00	54,29
5	24,5	30,42	13,28	0,00	0,00	56,31

Volumenkonzentration Sonde Nr. 2, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	5,63	14,93	0,00	0,00	79,43
2	9,5	37,15	11,56	0,00	0,00	51,29
3	14,5	32,61	12,74	0,00	0,00	54,65
4	19,5	15,65	17,31	0,00	0,00	67,04
5	24,5	7,23	19,47	0,00	0,00	73,30

Volumenkonzentration Sonde Nr. 3, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	4,27	16,64	0,00	0,00	79,09
2	9,5	37,57	11,48	0,00	0,00	50,95
3	14,5	17,05	16,69	0,00	0,00	66,26
4	19,5	8,30	19,18	0,00	0,00	72,52
5	24,5	5,20	20,06	0,00	0,00	74,75

Tabelle 2b. Versuch 1 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 4, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	1,65	19,64	0,00	0,00	78,71
2	9,5	37,41	11,53	0,00	0,00	51,06
3	14,5	34,55	12,23	0,00	0,00	53,22
4	19,5	27,03	14,27	0,00	0,00	58,70
5	24,5	22,24	15,60	0,00	0,00	62,16

Volumenkonzentration Sonde Nr. 5, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	2,92	18,32	0,00	0,00	78,76
2	9,5	37,77	11,48	0,00	0,00	50,75
3	14,5	32,66	12,71	0,00	0,00	54,62
4	19,5	15,65	17,22	0,00	0,00	67,13
5	24,5	8,67	19,23	0,00	0,00	72,10

Volumenkonzentration Sonde Nr. 6, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	3,27	17,67	0,00	0,00	79,06
2	9,5	35,44	11,93	0,00	0,00	52,62
3	14,5	14,71	17,32	0,00	0,00	67,97
4	19,5	5,69	19,77	0,00	0,00	74,53
5	24,5	4,60	20,26	0,00	0,00	75,13

Tabelle 2c. Versuch 1 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 7, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	2,83	18,36	0,00	0,00	78,81
2	9,5	33,17	12,32	0,00	0,00	54,51
3	14,5	37,43	11,81	0,00	0,00	50,76
4	19,5	28,56	13,76	0,00	0,00	57,68
5	24,5	22,75	15,20	0,00	0,00	62,04

Volumenkonzentration Sonde Nr. 8, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	3,23	17,80	0,00	0,00	78,97
2	9,5	37,23	11,57	0,00	0,00	51,20
3	14,5	33,68	12,46	0,00	0,00	53,86
4	19,5	14,57	17,62	0,00	0,00	67,81
5	24,5	7,92	19,32	0,00	0,00	72,76

Volumenkonzentration Sonde Nr. 9, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,5	3,32	17,73	0,00	0,00	78,95
2	9,5	37,44	11,54	0,00	0,00	51,03
3	14,5	8,28	19,07	0,00	0,00	72,65
4	19,5	5,11	19,89	0,00	0,00	75,00
5	24,5	3,97	20,33	0,00	0,00	75,71

Tabelle 3a. Versuch 2 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 1, Meßhöhe 0,35 m

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	14,83	4,73	3,96	0,00	76,48
2	8,5	31,10	11,78	0,00	0,00	57,13
3	13,5	30,57	13,11	0,00	0,00	56,33
4	18,5	25,65	14,36	0,00	0,00	59,98
5	23,5	20,55	15,85	0,00	0,00	63,59

Volumenkonzentration Sonde Nr. 2, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	4,63	15,97	0,00	0,00	79,40
2	8,5	31,87	13,07	0,00	0,00	55,06
3	13,5	26,32	14,37	0,00	0,00	59,31
4	18,5	20,36	15,65	0,00	0,00	63,99

Volumenkonzentration Sonde Nr. 3, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	3,66	17,03	0,00	0,00	79,31
2	8,5	31,47	12,92	0,00	0,00	55,61
3	13,5	11,88	17,81	0,00	0,00	70,31
4	18,5	9,70	18,66	0,00	0,00	71,64

Tabelle 3b. Versuch 2 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 4, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	0,97	20,02	0,00	0,00	79,00
2	8,5	31,94	13,03	0,00	0,00	55,03
3	13,5	27,55	14,24	0,00	0,00	58,21
4	18,5	21,39	15,54	0,00	0,00	63,07

Volumenkonzentration Sonde Nr. 5, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	2,31	18,46	0,00	0,00	79,24
2	8,5	32,39	12,85	0,00	0,00	54,76
3	13,5	23,09	15,18	0,00	0,00	61,74
4	18,5	15,00	17,22	0,00	0,00	67,78
5	23,5	4,38	19,82	0,00	0,00	75,80

Volumenkonzentration Sonde Nr. 6, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	2,85	18,03	0,00	0,00	79,12
2	8,5	28,00	13,71	0,00	0,00	58,30
3	13,5	14,01	17,57	0,00	0,00	68,43
4	18,5	9,30	18,83	0,00	0,00	71,88

Tabelle 3c. Versuch 2 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 7, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	2,22	18,60	0,00	0,00	79,18
2	8,5	32,14	12,86	0,00	0,00	54,99
3	13,5	26,57	14,30	0,00	0,00	59,13
4	18,5	20,31	15,89	0,00	0,00	63,81

Volumenkonzentration Sonde Nr. 8, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	2,71	17,96	0,00	0,00	79,33
2	8,5	33,20	12,50	0,00	0,00	54,29
3	13,5	21,59	15,51	0,00	0,00	62,89
4	18,5	13,52	17,69	0,00	0,00	68,79

Volumenkonzentration Sonde Nr. 9, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	7,5	2,82	18,02	0,00	0,00	79,16
2	8,5	32,46	12,73	0,00	0,00	54,81
3	13,5	14,84	17,08	0,00	0,00	68,08
4	18,5	8,52	18,77	0,00	0,00	72,71

Tabelle 4a. Versuch 3 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 1, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	12,62	6,97	4,90	1,48	74,02
2	9,75	28,78	9,19	2,41	0,07	59,55
3	14,75	1,34	21,10	0,00	0,00	77,56
4	19,75	22,40	14,13	0,00	0,00	63,47
5	24,75	21,84	14,22	0,00	0,00	63,94

Volumenkonzentration Sonde Nr. 2, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	9,54	11,47	0,24	0,00	78,75
2	9,75	22,89	14,06	0,00	0,00	63,04
3	14,75	24,23	13,53	0,00	0,00	62,24
4	19,75	23,36	13,79	0,00	0,00	62,85
5	24,75	21,84	14,46	0,00	0,00	63,70

Volumenkonzentration Sonde Nr. 3, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	6,54	14,58	0,00	0,00	78,88
2	9,75	25,65	12,97	0,00	0,00	61,37
3	14,75	24,69	13,34	0,00	0,00	61,97
4	19,75	23,08	13,85	0,00	0,00	63,07
5	24,75	21,07	14,44	0,00	0,00	64,49

Tabelle 4b. Versuch 3 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 4, Meßhöhe 0,35 m.						
Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	2,72	18,36	0,00	0,00	78,92
2	9,75	27,38	12,70	0,00	0,00	59,92
3	14,75	24,69	13,67	0,00	0,00	61,65
4	19,75	23,09	13,87	0,00	0,00	63,04
5	24,75	22,11	14,22	0,00	0,00	63,67
Volumenkonzentration Sonde Nr. 5, Meßhöhe 1,50 m.						
Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	4,06	17,11	0,00	0,00	78,82
2	9,75	27,81	12,65	0,00	0,00	59,54
3	14,75	25,78	13,05	0,00	0,00	61,17
4	19,75	24,02	13,59	0,00	0,00	62,39
5	24,75	17,69	15,64	0,00	0,00	66,67
Volumenkonzentration Sonde Nr. 6, Meßhöhe 2,30 m.						
Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	4,62	16,52	0,00	0,00	78,86
2	9,75	23,82	13,42	0,00	0,00	62,77
3	14,75	25,21	13,36	0,00	0,00	61,43
4	19,75	21,22	14,43	0,00	0,00	64,35
5	24,75	15,54	16,22	0,00	0,00	68,24

Tabelle 4c. Versuch 3 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 7, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	4,07	17,13	0,00	0,00	78,80
2	9,75	27,67	12,67	0,00	0,00	59,65
3	14,75	24,86	13,51	0,00	0,00	61,63
4	19,75	22,53	14,24	0,00	0,00	63,23
5	24,75	22,10	14,21	0,00	0,00	63,69

Volumenkonzentration Sonde Nr. 8, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	4,65	16,62	0,00	0,00	78,73
2	9,75	27,60	12,76	0,00	0,00	59,64
3	14,75	24,81	13,40	0,00	0,00	61,79
4	19,75	21,47	14,41	0,00	0,00	64,12
5	24,75	21,39	14,69	0,00	0,00	63,91

Volumenkonzentration Sonde Nr. 9, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,75	4,65	16,52	0,00	0,00	78,83
2	9,75	27,21	12,76	0,00	0,00	60,03
3	14,75	24,74	13,46	0,00	0,00	61,80
4	19,75	19,98	14,86	0,00	0,00	65,16
5	24,75	13,51	16,78	0,00	0,00	69,71

Tabelle 5a. Versuch 4 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 1, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	16,11	1,75	5,92	1,61	74,61
2	9,25	21,35	8,92	2,88	0,05	66,80
3	14,25	15,10	15,80	0,00	0,00	69,10
4	19,25	14,43	16,17	0,00	0,00	69,40
5	24,25	14,16	16,30	0,00	0,00	69,55

Volumenkonzentration Sonde Nr. 2, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	6,00	14,66	0,00	0,00	79,34
2	9,25	19,60	14,37	0,11	0,00	65,92
3	14,25	15,46	15,74	0,00	0,00	68,80
4	19,25	15,13	16,07	0,00	0,00	68,80
5	24,25	14,74	16,14	0,00	0,00	69,13

Volumenkonzentration Sonde Nr. 3, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	5,05	15,65	0,00	0,00	79,31
2	9,25	19,62	14,39	0,00	0,00	65,99
3	14,25	16,11	15,49	0,00	0,00	68,40
4	19,25	15,38	15,82	0,00	0,00	68,80
5	24,25	14,52	16,16	0,00	0,00	69,32

Tabelle 5b. Versuch 4 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 4, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	2,19	18,98	0,00	0,00	78,83
2	9,25	19,53	14,34	0,00	0,00	66,12
3	14,25	15,02	16,06	0,00	0,00	68,92
4	19,25	14,54	16,19	0,00	0,00	69,27
5	24,25	15,42	15,84	0,00	0,00	68,74

Volumenkonzentration Sonde Nr. 5, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	3,22	17,77	0,00	0,00	79,00
2	9,25	19,55	14,58	0,00	0,00	65,86
3	14,25	17,97	14,70	0,00	0,00	67,32
4	19,25	16,52	15,41	0,00	0,00	68,07
5	24,25	13,90	16,04	0,00	0,00	70,05

Volumenkonzentration Sonde Nr. 6, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	3,94	16,88	0,00	0,00	79,18
2	9,25	16,55	15,08	0,00	0,00	68,37
3	14,25	16,88	15,28	0,00	0,00	67,84
4	19,25	15,49	15,84	0,00	0,00	68,66
5	24,25	14,71	15,90	0,00	0,00	69,39

Tabelle 5c. Versuch 4 Gaschromatograph.

Volumenkonzentration Sonde Nr. 7, Meßhöhe 0,35 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	3,39	17,61	0,00	0,00	79,00
2	9,25	19,25	14,39	0,00	0,00	66,36
3	14,25	15,76	15,58	0,00	0,00	68,66
4	19,25	15,70	15,50	0,00	0,00	68,81
5	24,25	14,47	16,31	0,00	0,00	69,21

Volumenkonzentration Sonde Nr. 8, Meßhöhe 1,50 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	3,79	17,06	0,00	0,00	79,16
2	9,25	19,40	14,55	0,00	0,00	66,06
3	14,25	16,34	15,49	0,00	0,00	68,17
4	19,25	15,51	15,80	0,00	0,00	68,69
5	24,25	14,37	16,26	0,00	0,00	69,36

Volumenkonzentration Sonde Nr. 9, Meßhöhe 2,30 m.

Probe	Zeit [min]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]
1	8,25	3,77	16,98	0,00	0,00	79,25
2	9,25	19,33	14,58	0,00	0,00	66,09
3	14,25	15,19	15,82	0,00	0,00	68,99
4	19,25	15,23	15,91	0,00	0,00	68,86
5	24,25	14,44	15,93	0,00	0,00	69,63

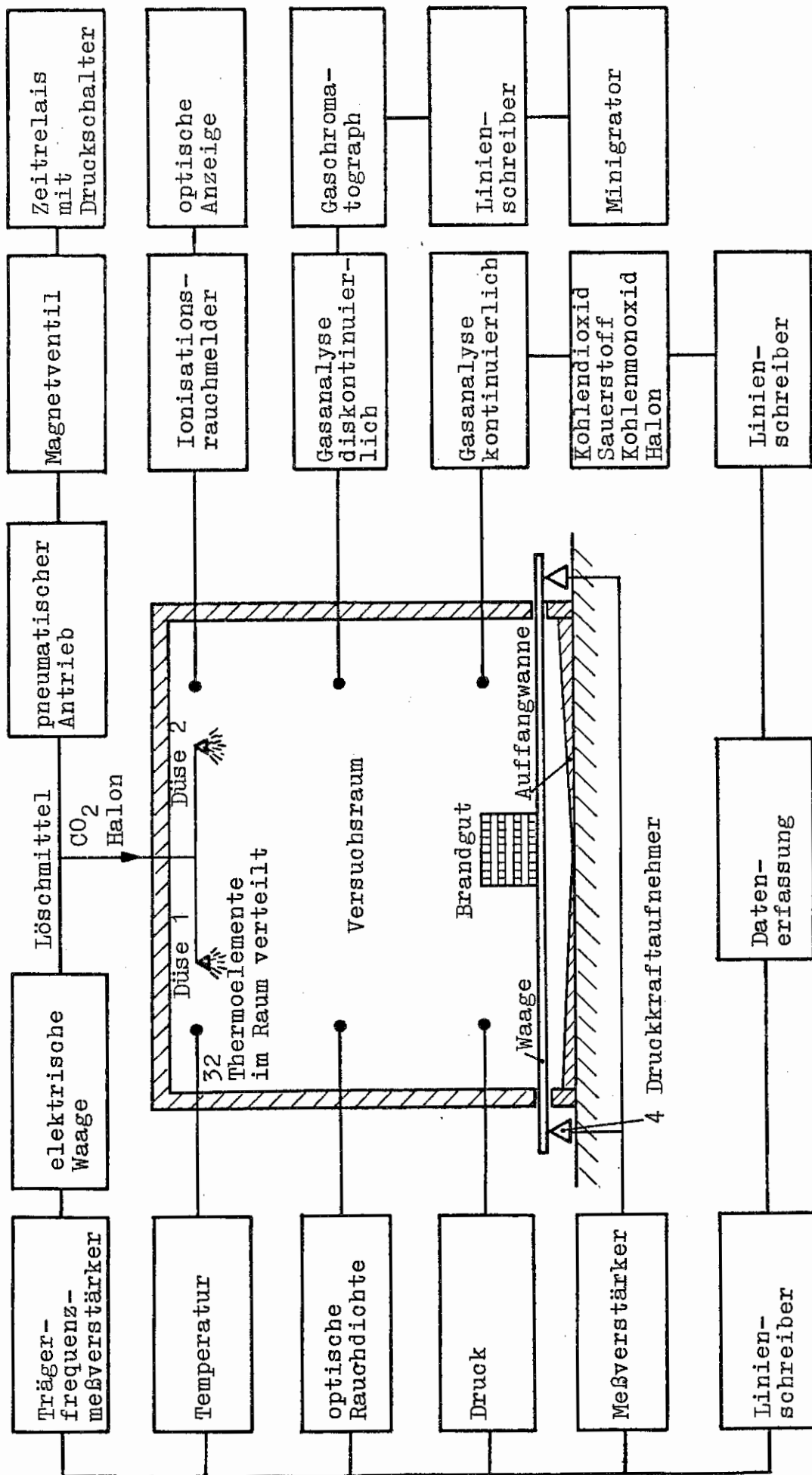


Bild 1. Schema der Versuchsanordnung.

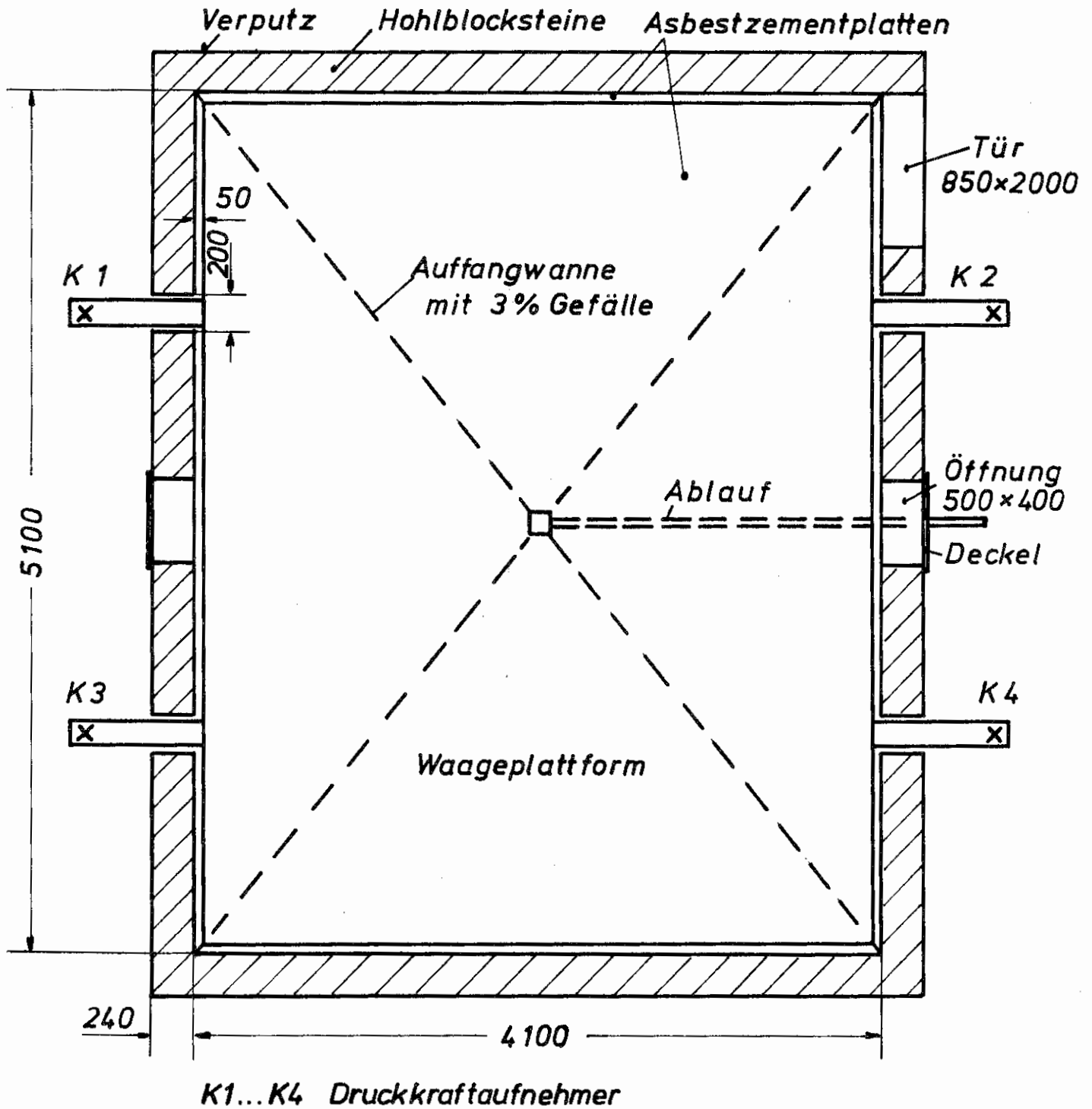


Bild 2. Grundriß des Versuchsraumes.

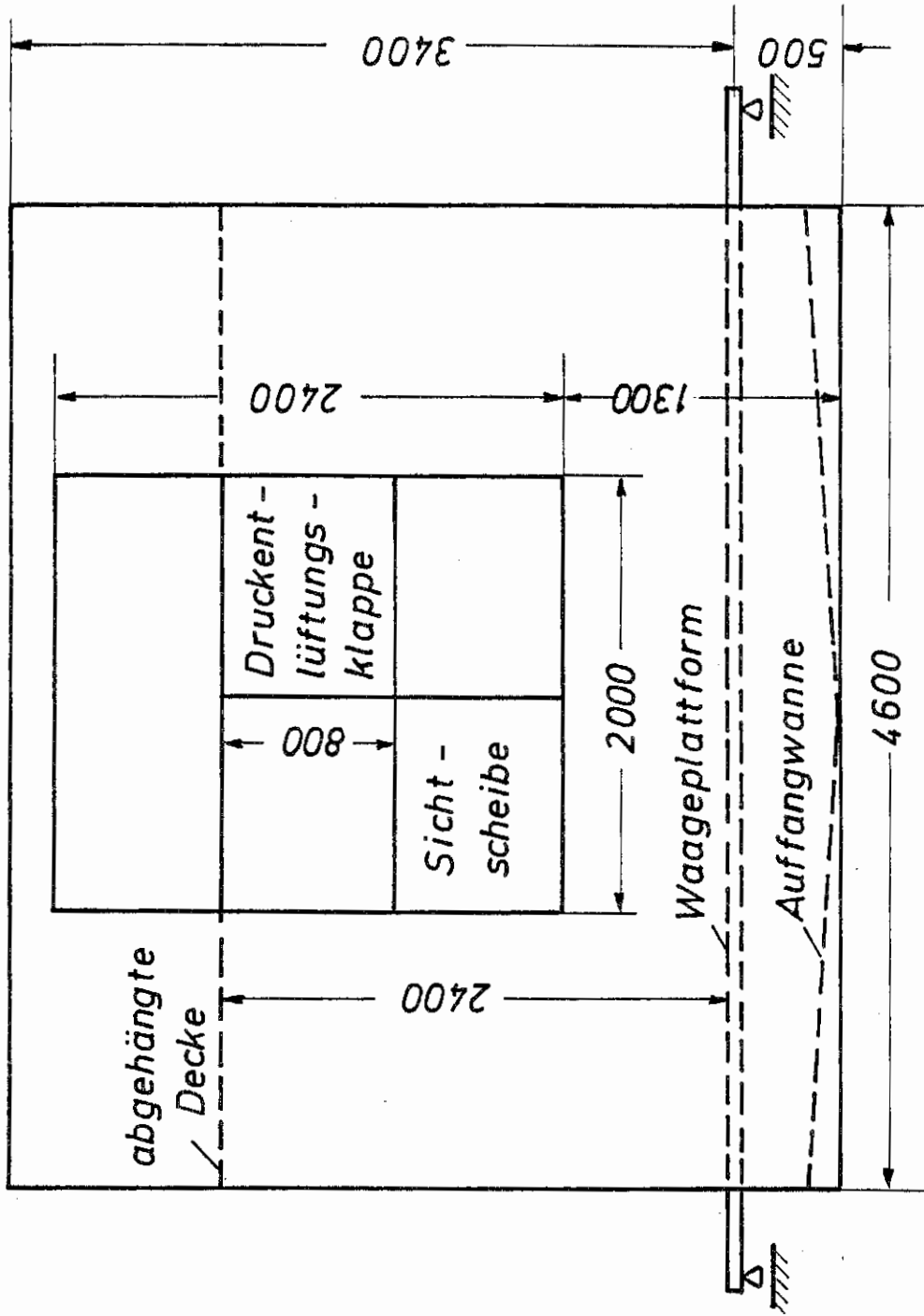


Bild 3. Vorderansicht des Versuchsraumes.

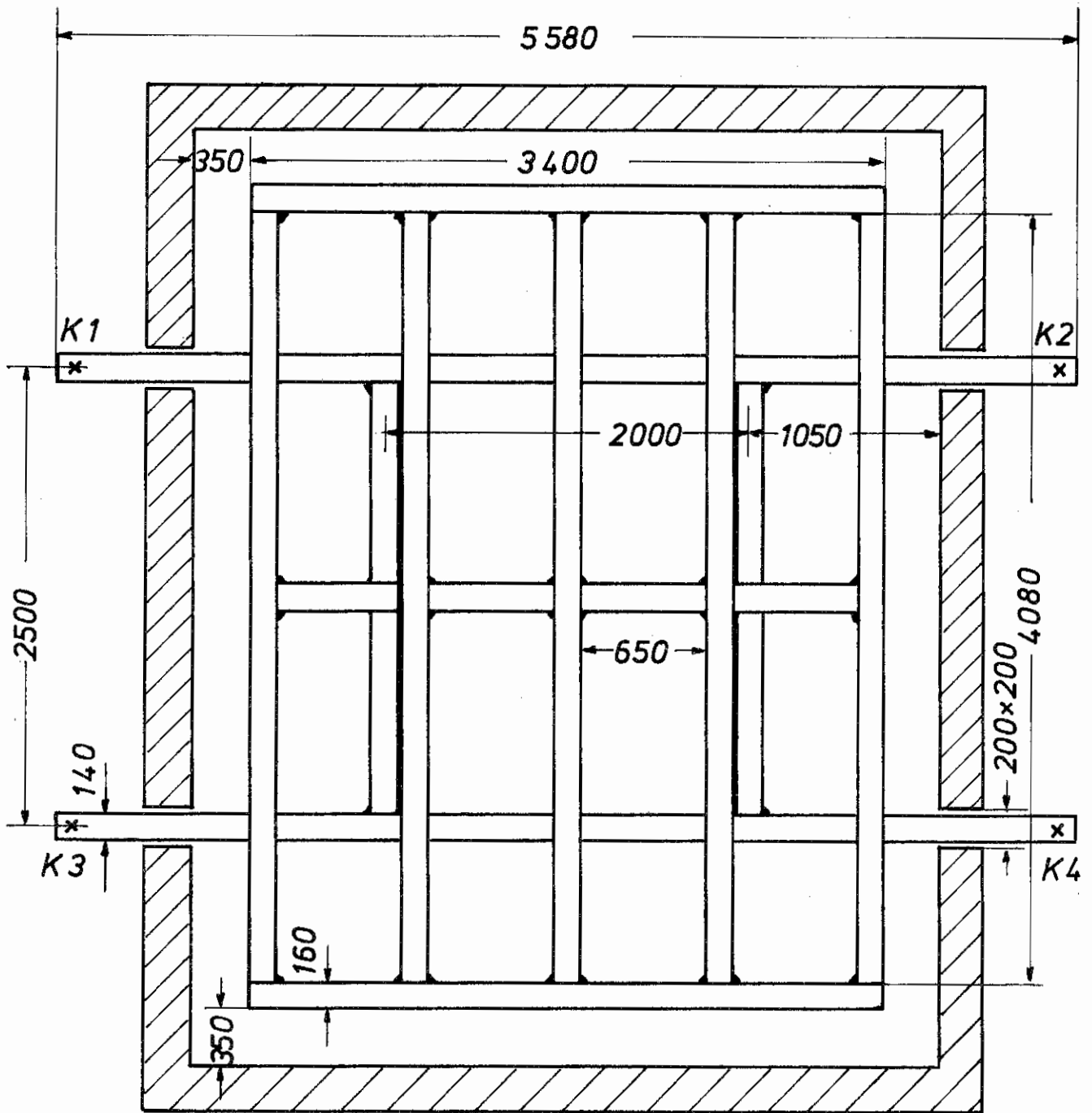
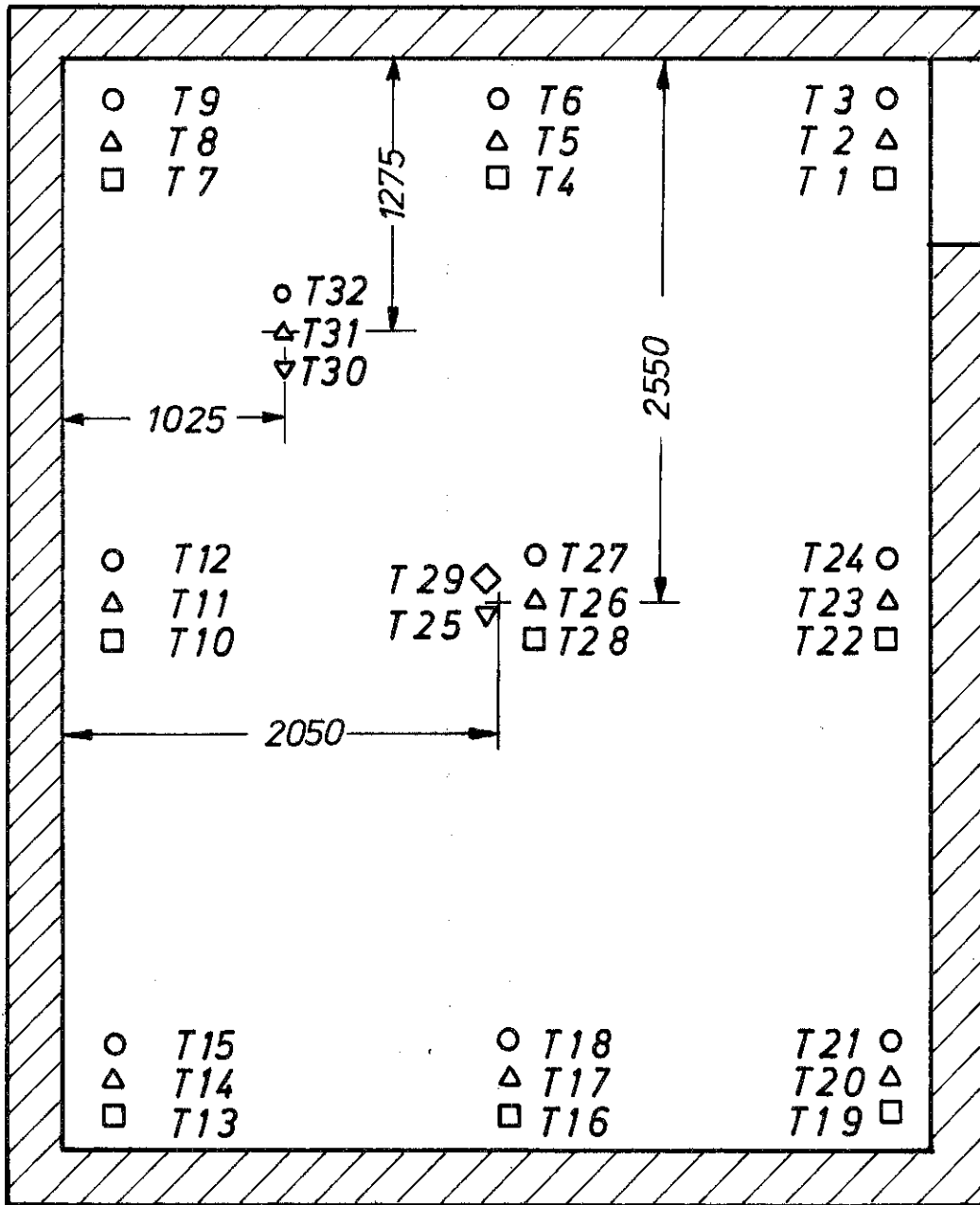
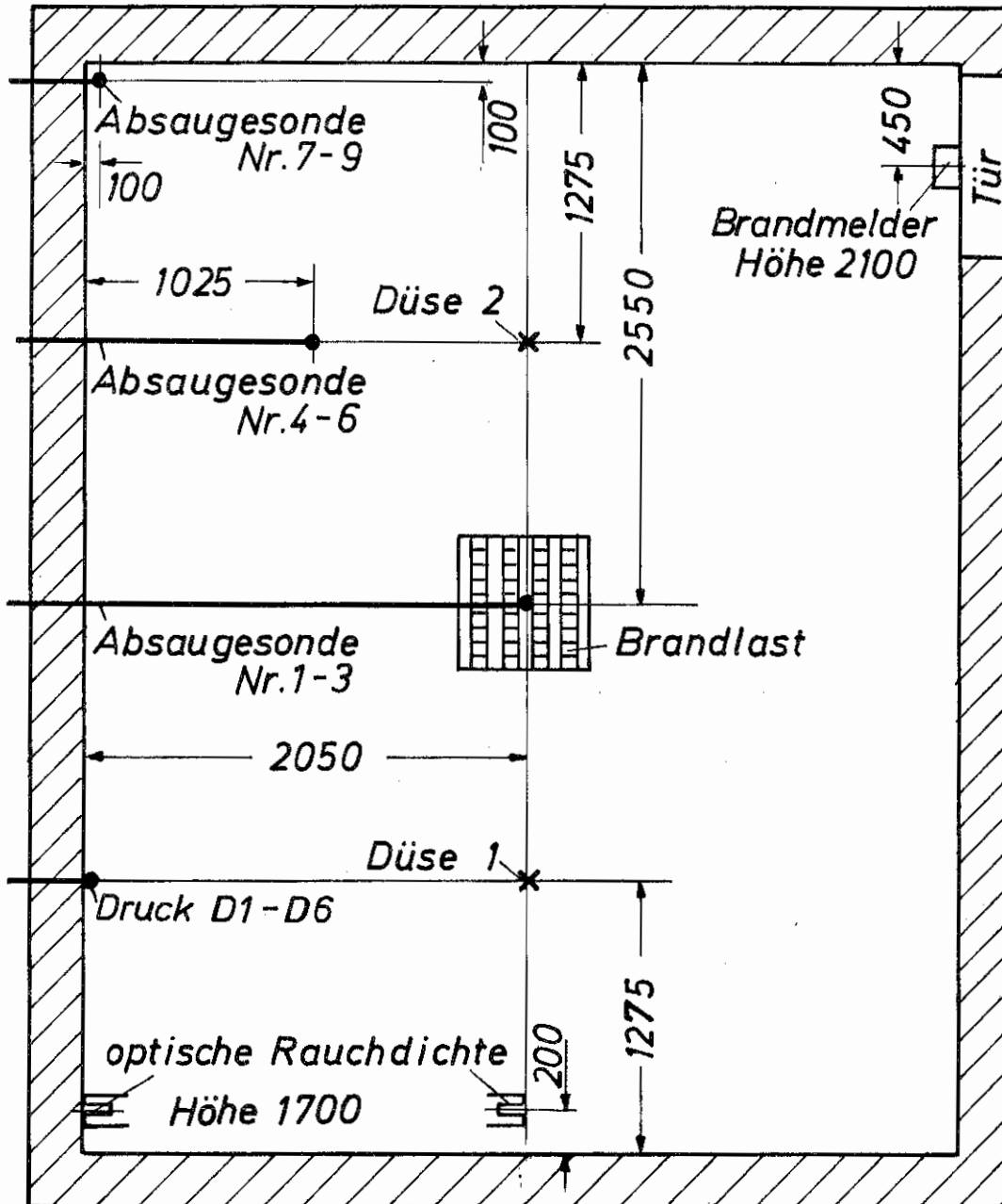


Bild 4. Unterbau der Waagekonstruktion.



T 1 bis T 24	0,10m Wandabstand
□	0,10m Meßhöhe
▽	0,35m Meßhöhe
◇	0,75m Meßhöhe
△	1,50m Meßhöhe
○	2,30m Meßhöhe

Bild 5. Lage der Temperaturmeßstellen im Versuchsraum.



Absaugesonde	Meßhöhe [m]
Nr. 1,4,7	0,35
Nr. 2,5,8	1,50
Nr. 3,6,9	2,30
Druck	
D1	0,00
D2	0,10
D3	0,65
D4	1,20
D5	1,75
D6	2,30

Bild 6. Lage der Brandlast, der Löschdüsen und der Meßstellen im Versuchsraum.

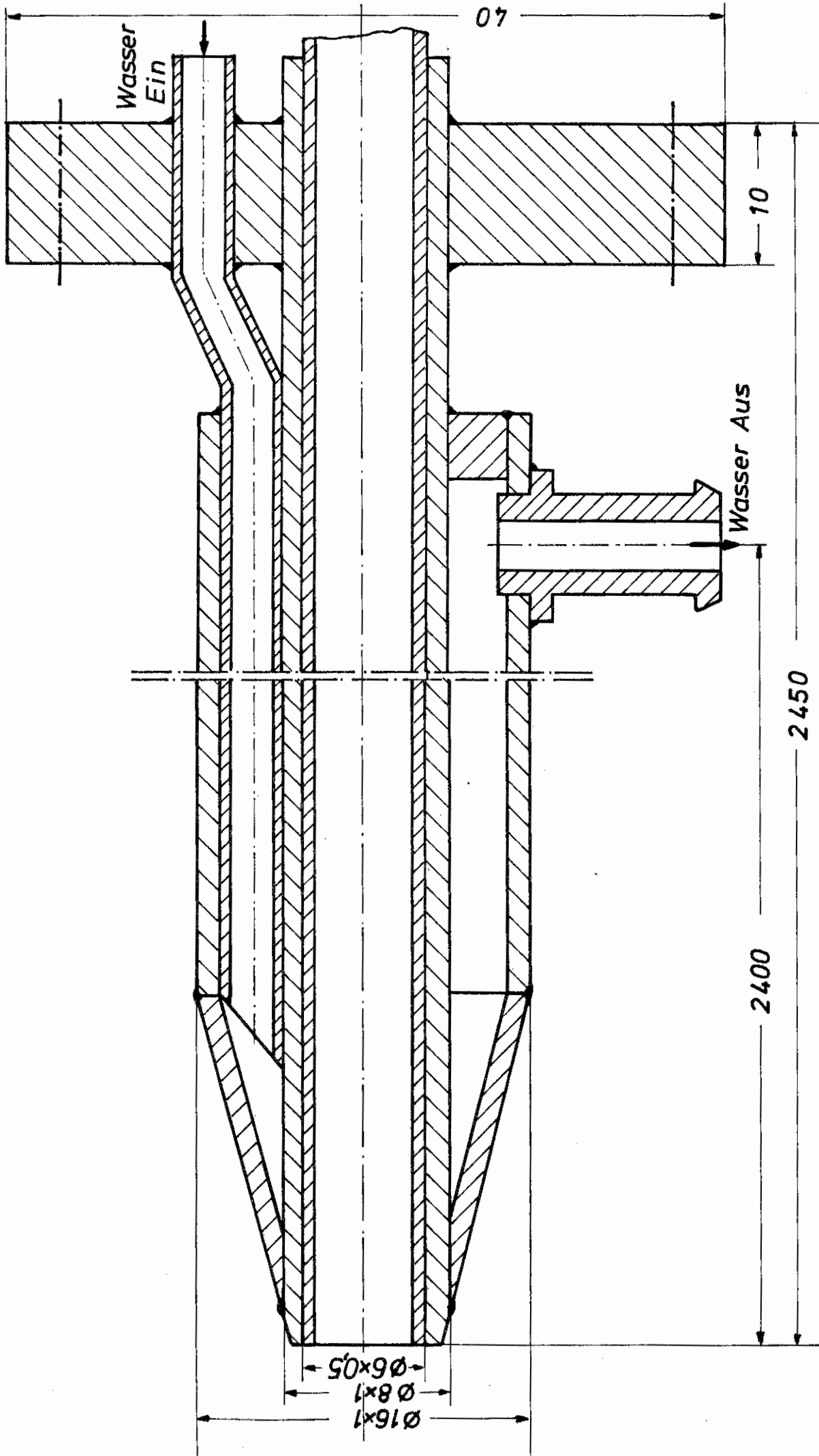


Bild 7. Wassergekühlte Absaugsonde.

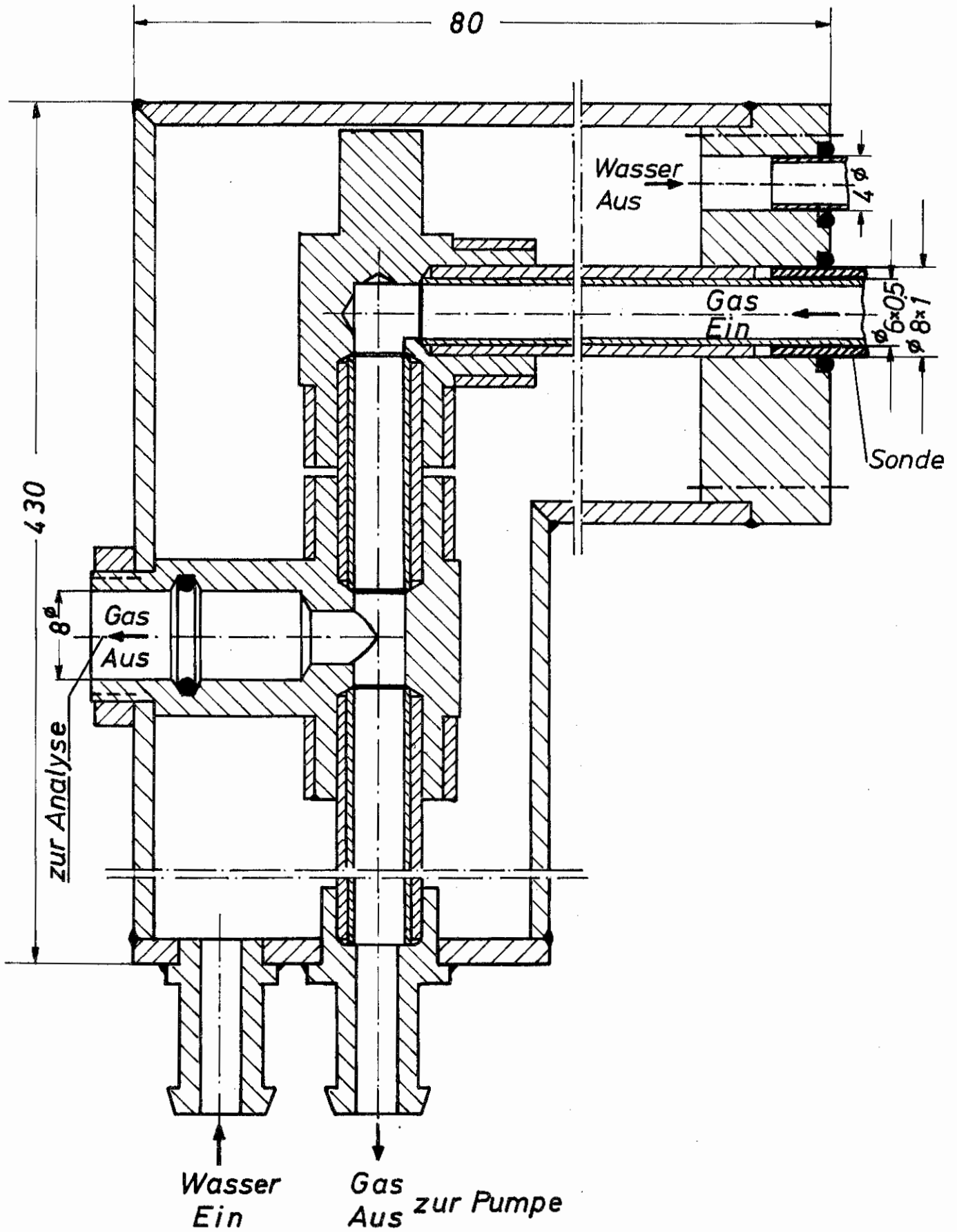


Bild 8. Verteilersystem zur Entnahme von Gasproben

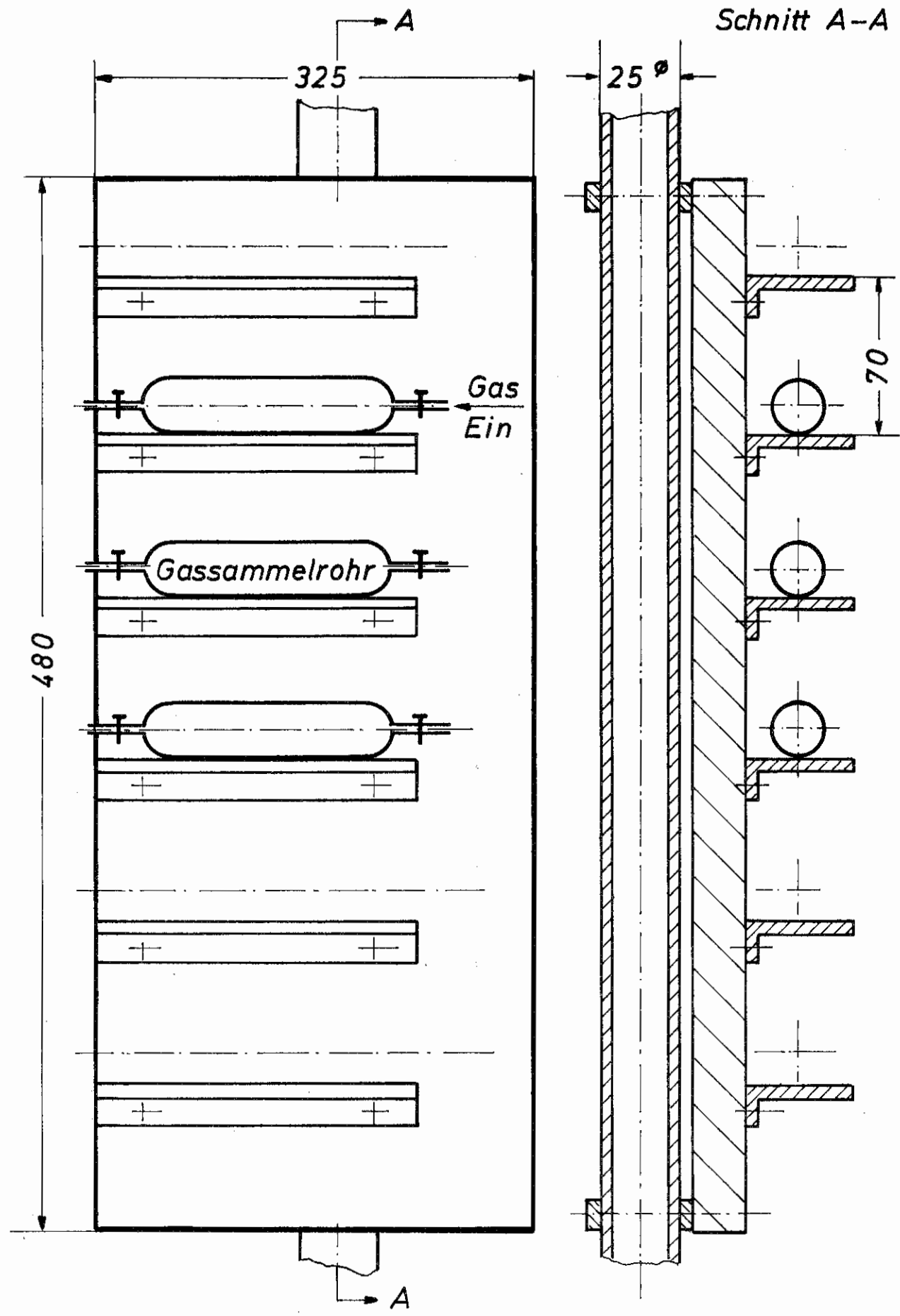


Bild 9. Halterung für 6 Gassammelrohre.

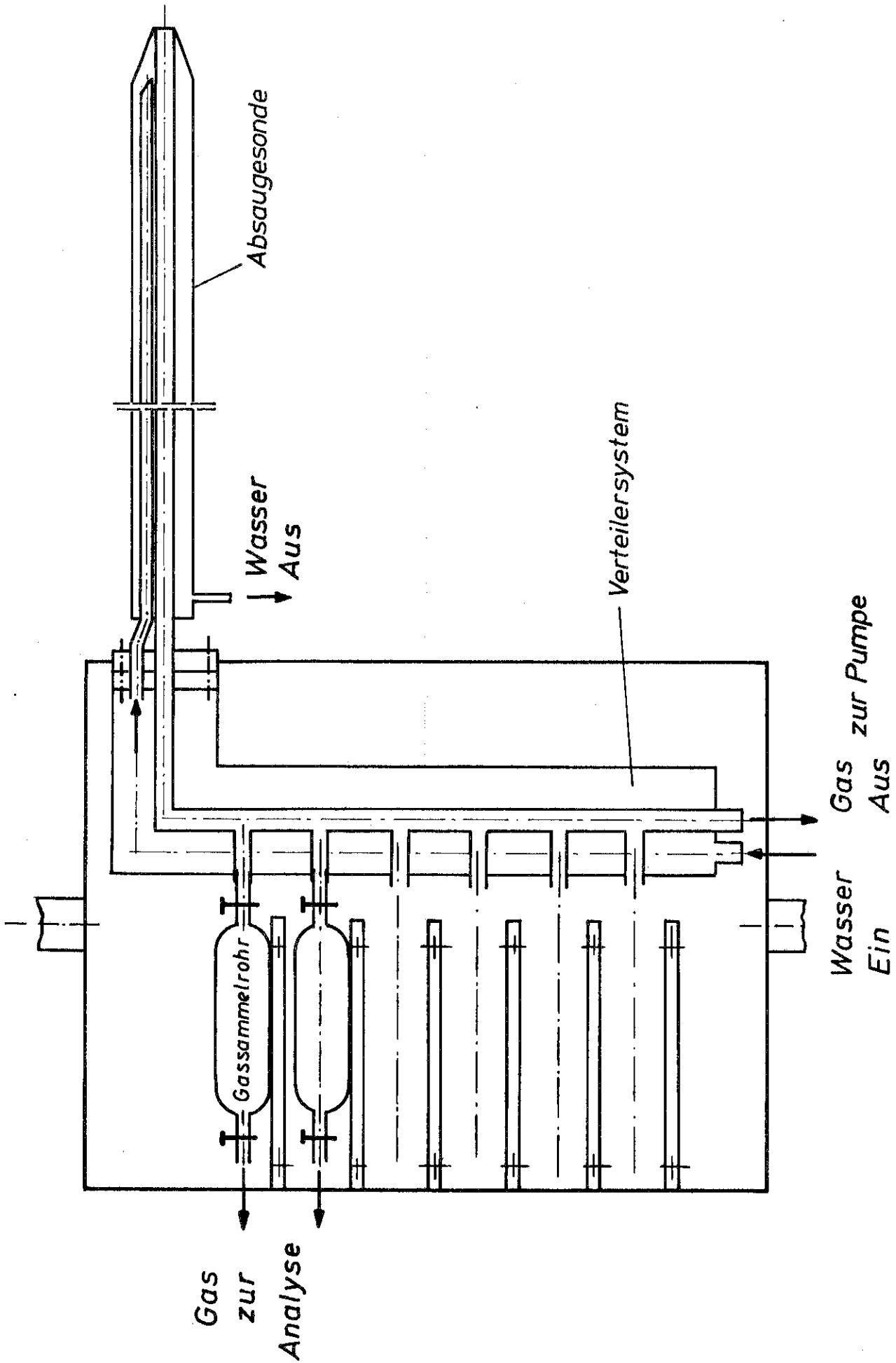


Bild 10. Schematische Darstellung des Probeentnahmesystems.

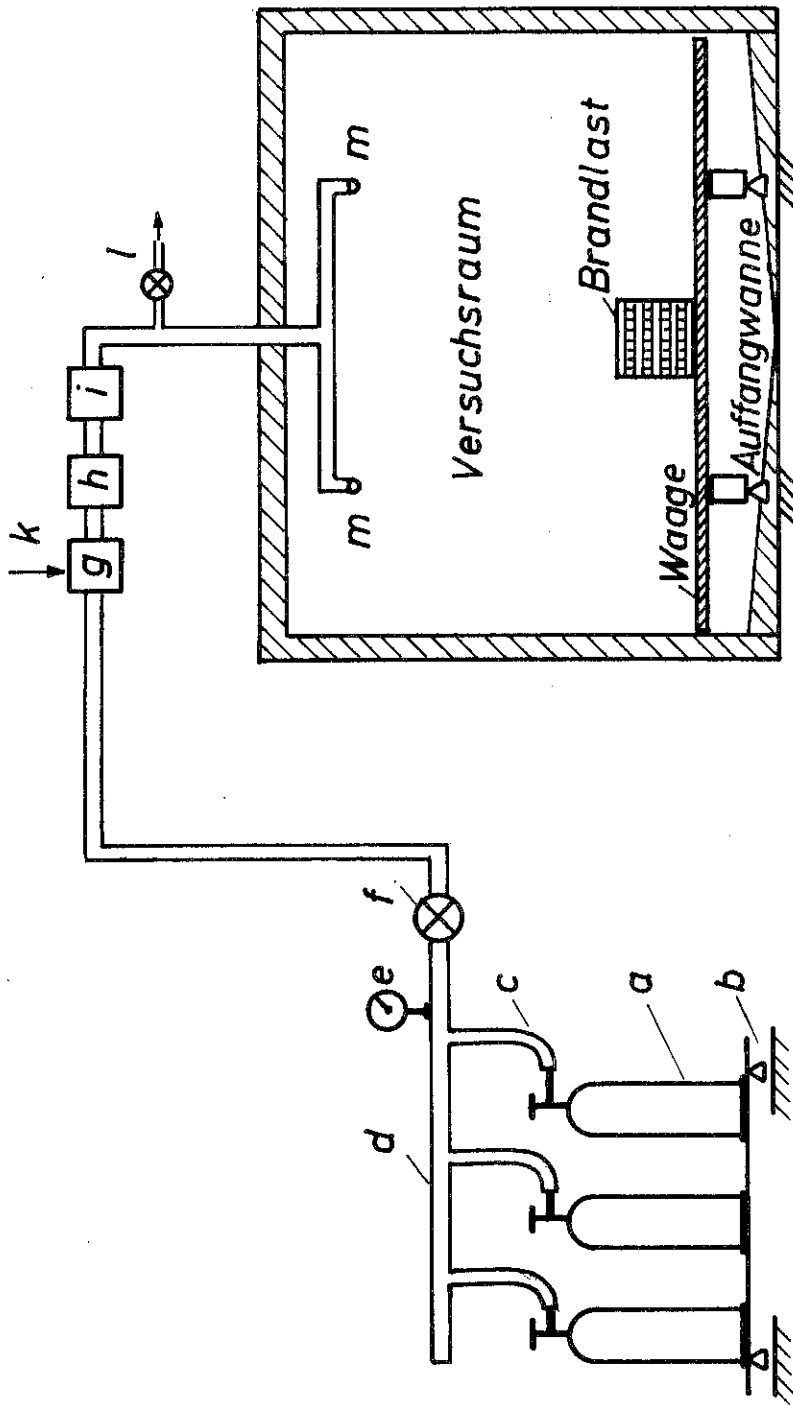


Bild 11. Schema der Löschanlage.



Bild 12a. Versuch 1 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T25, T28 und T29.

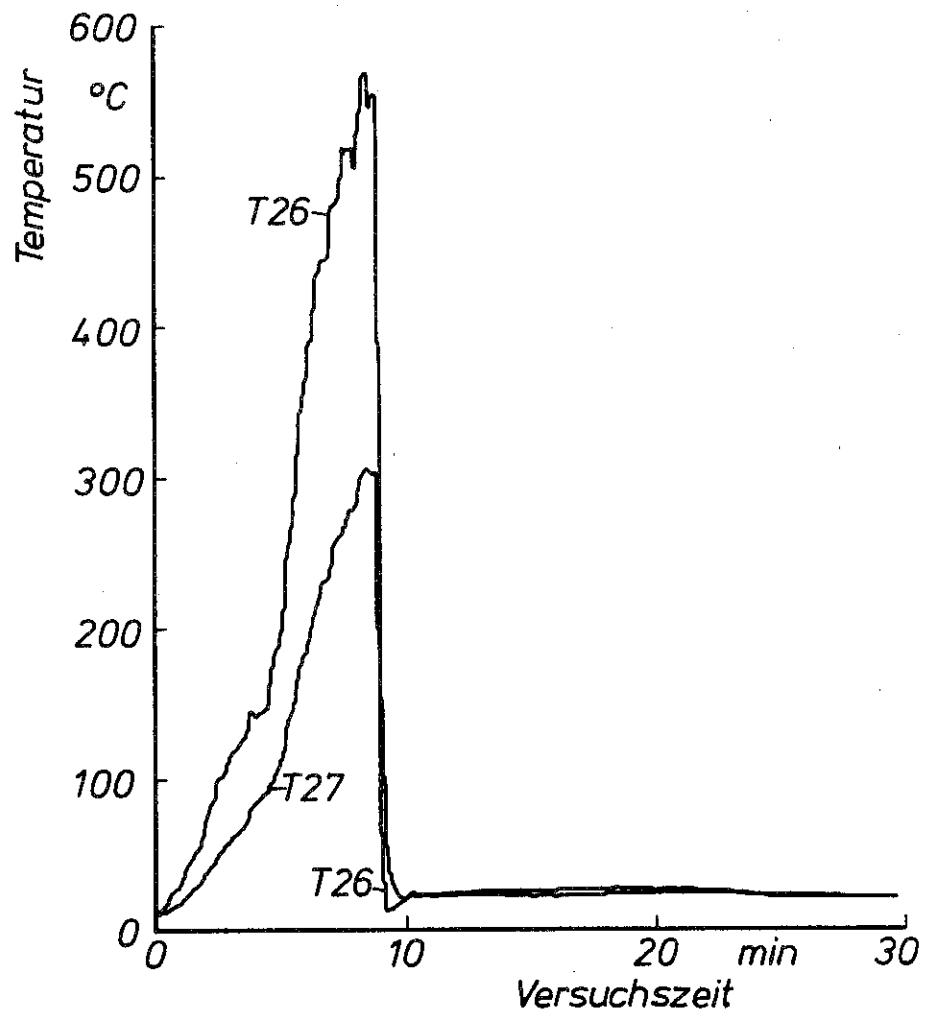
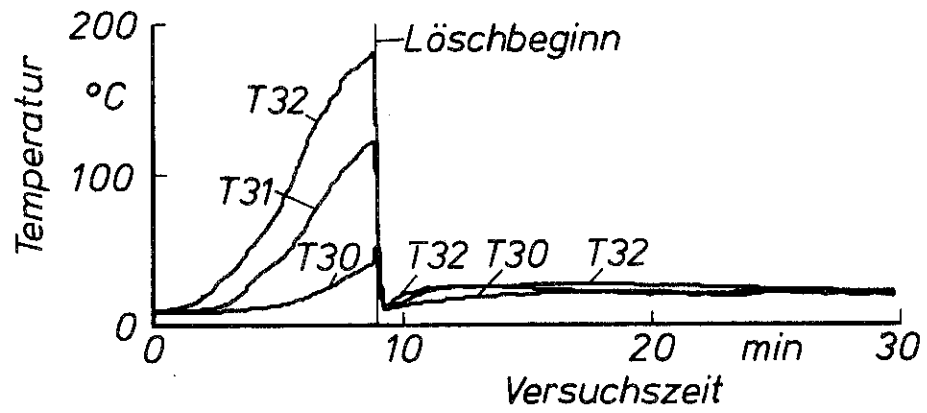


Bild 12b. Versuch 1 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T26, T27, T30, T31 und T32.

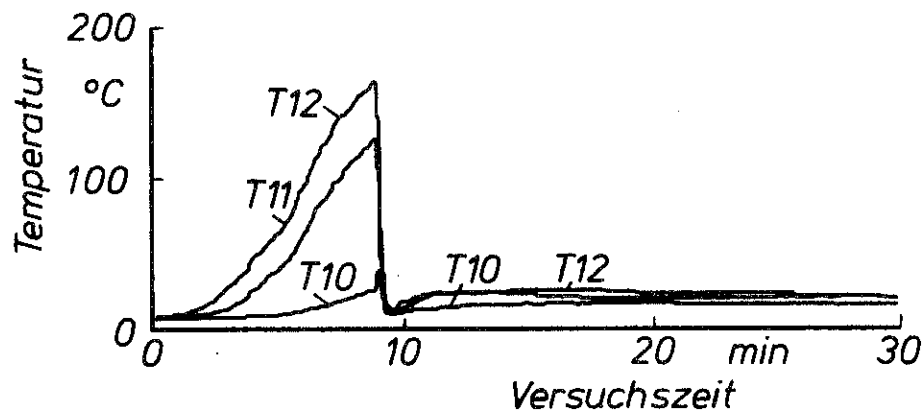
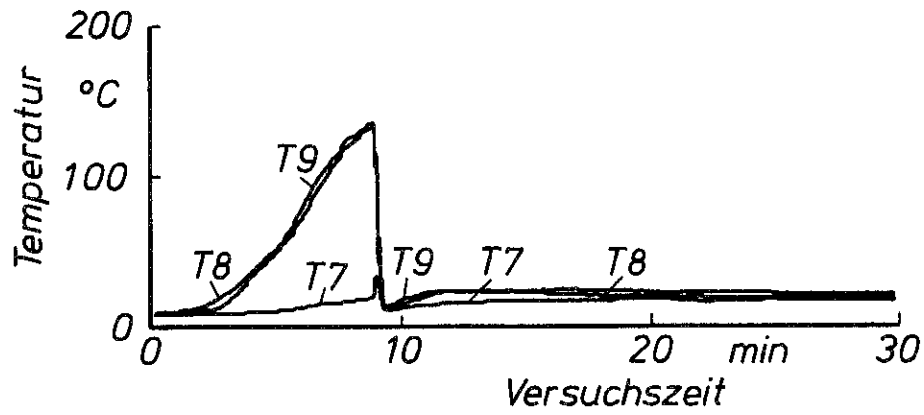
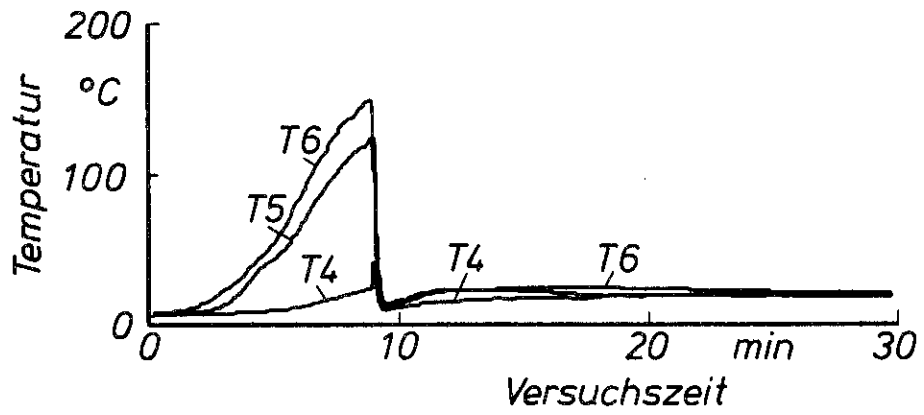
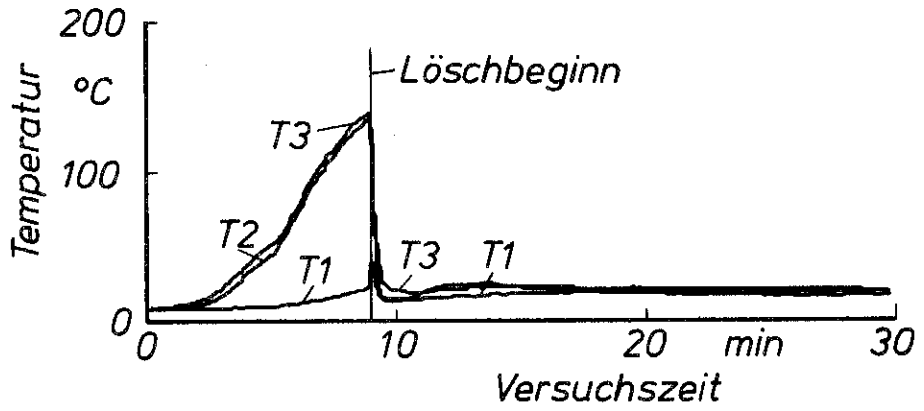


Bild 12c. Versuch 1 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T12.

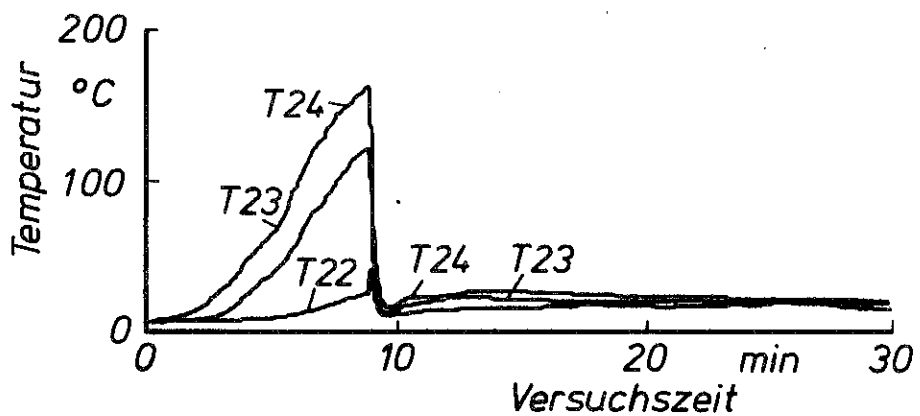
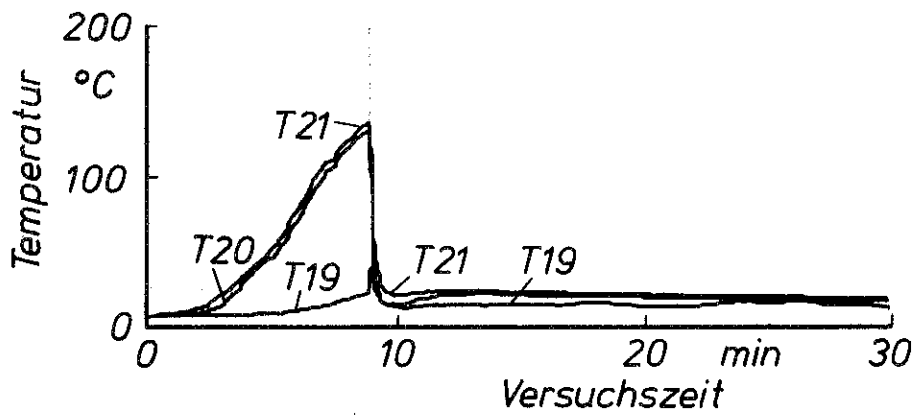
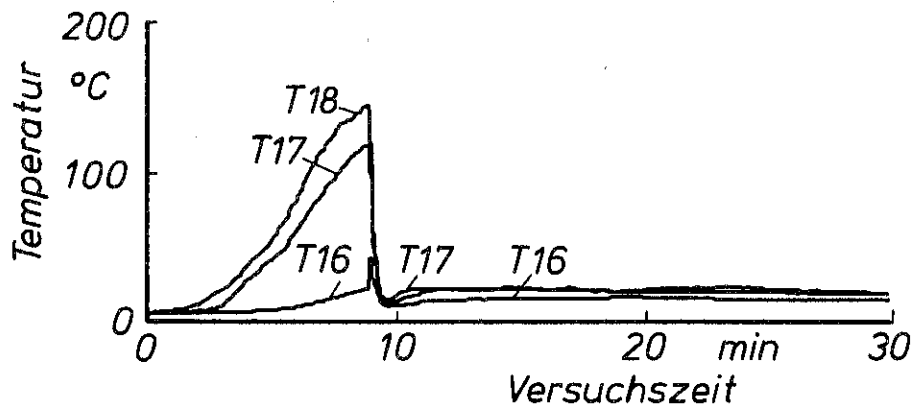
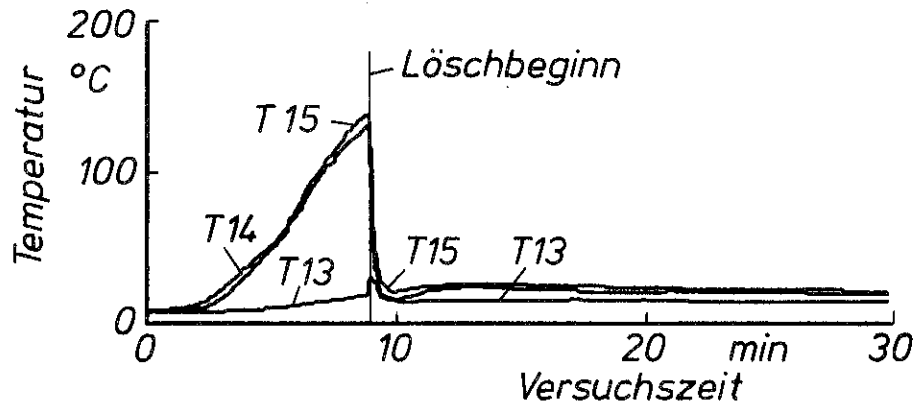


Bild 12d. Versuch 1 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T13 bis T24.

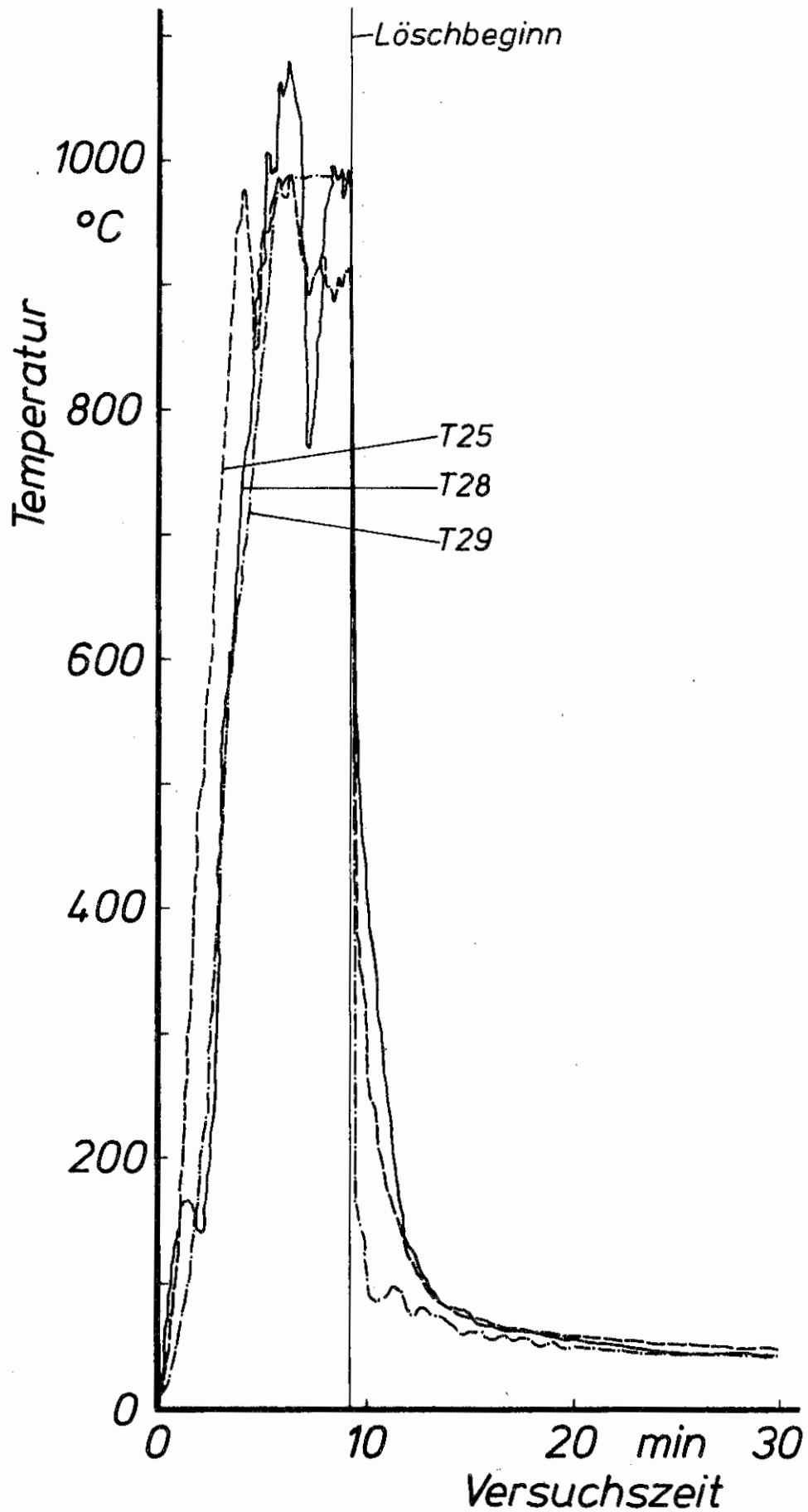


Bild 13a. Versuch 3 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T25, T28 und T29.

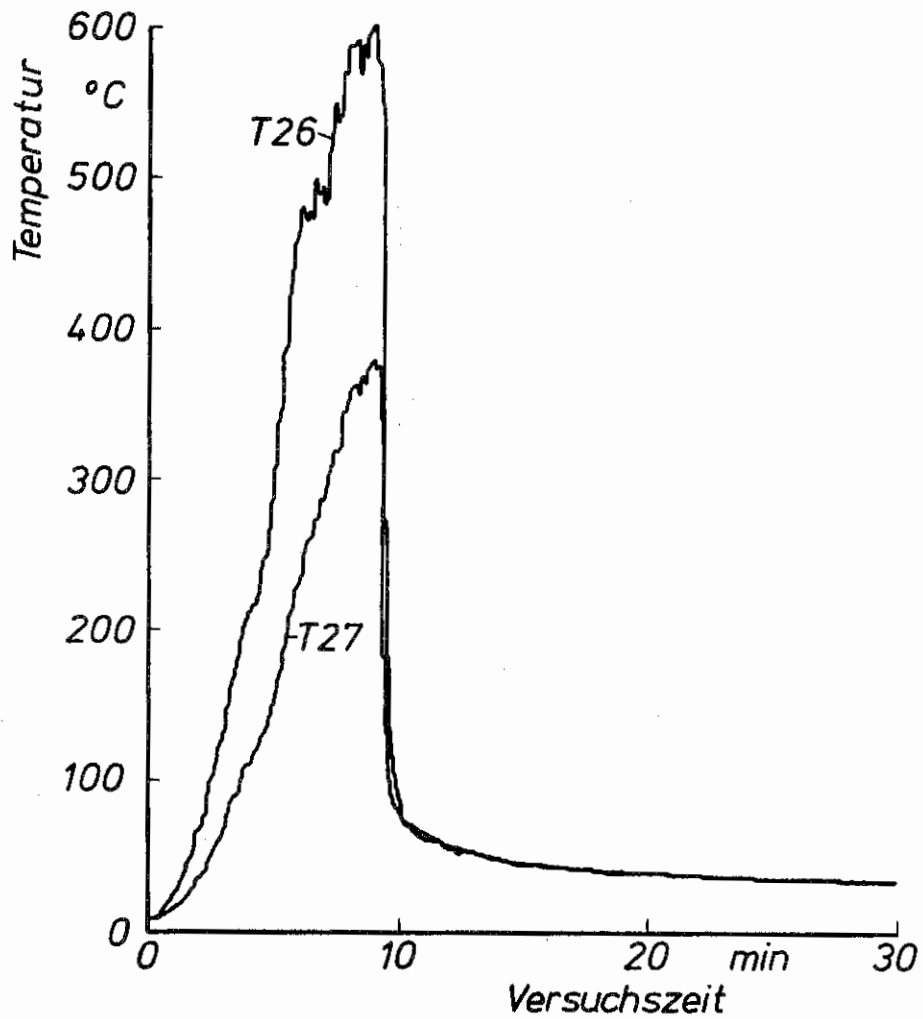
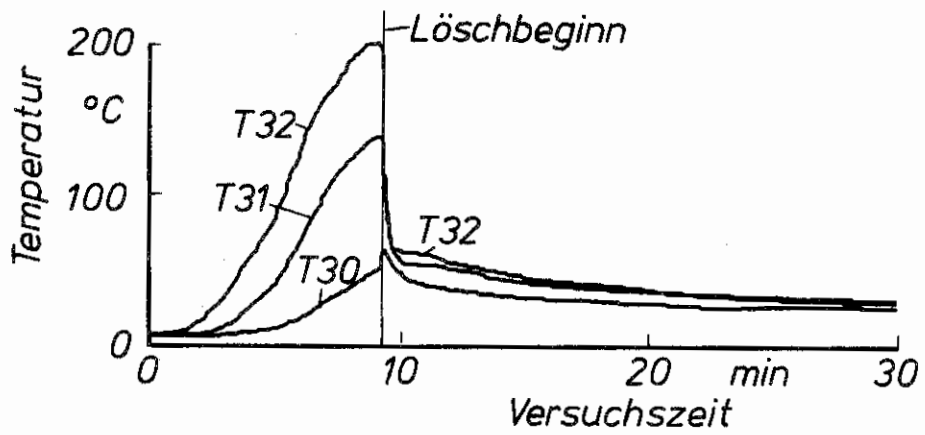


Bild 13b. Versuch 3 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T26, T27, T30, T31 und T32.

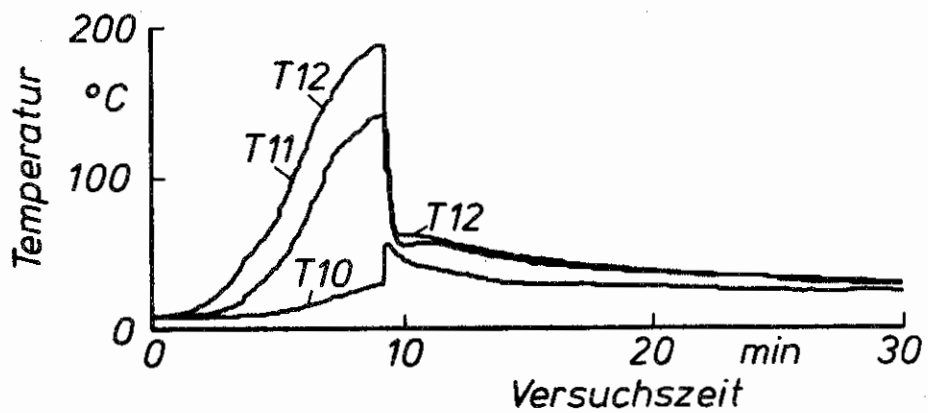
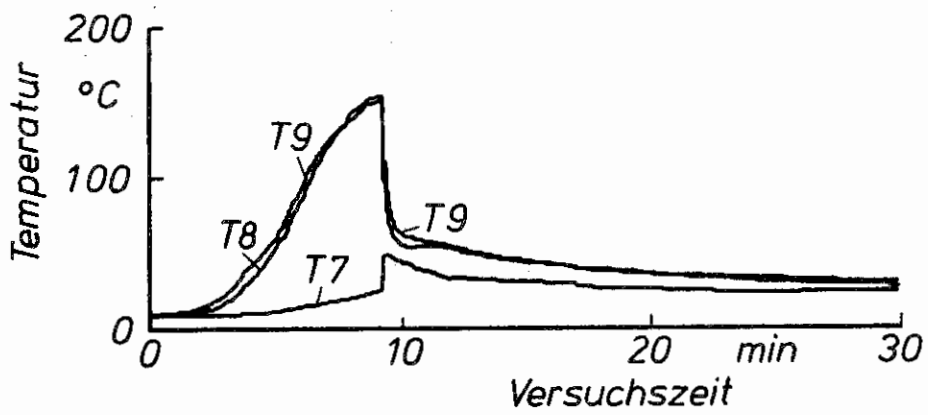
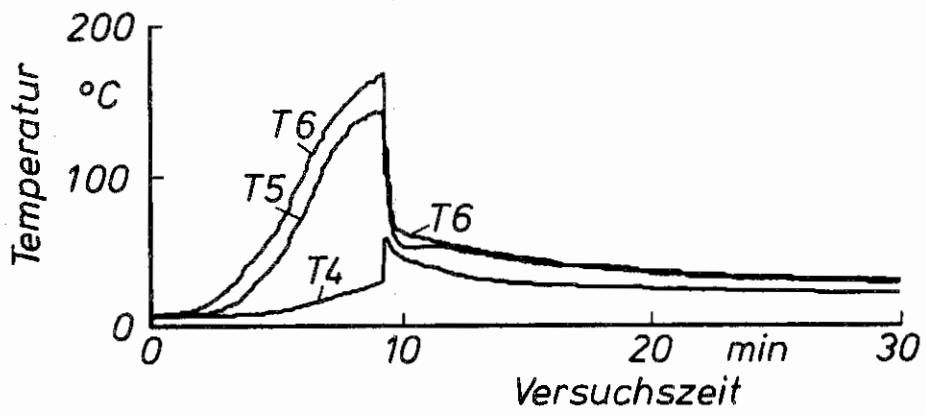
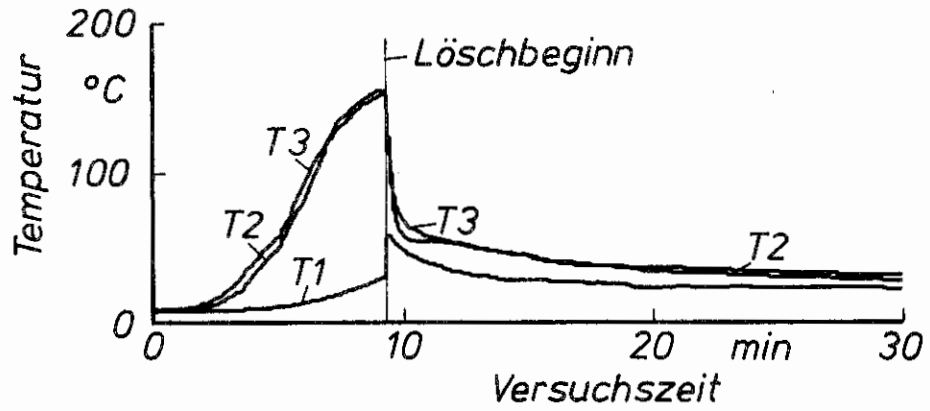


Bild 13c. Versuch 3 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T12.

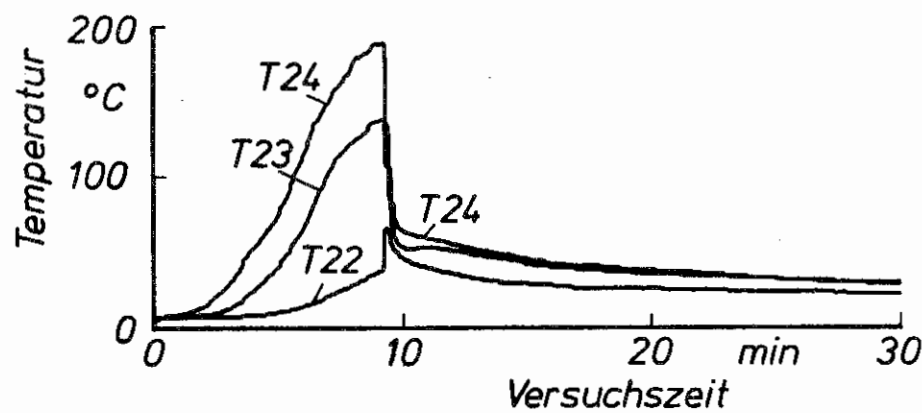
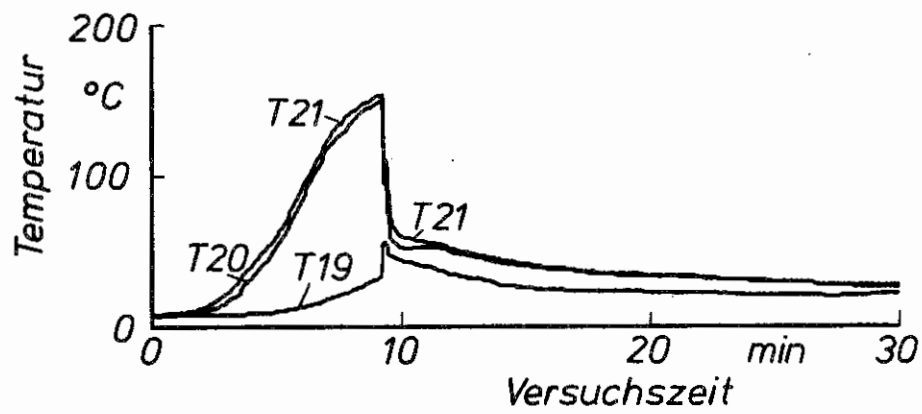
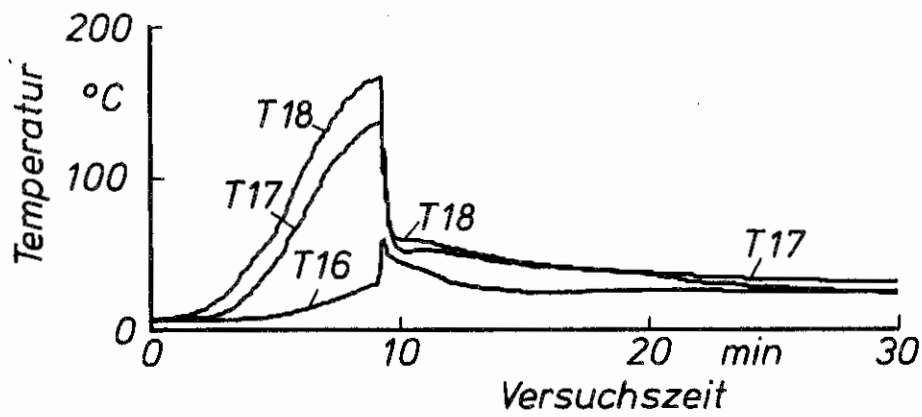
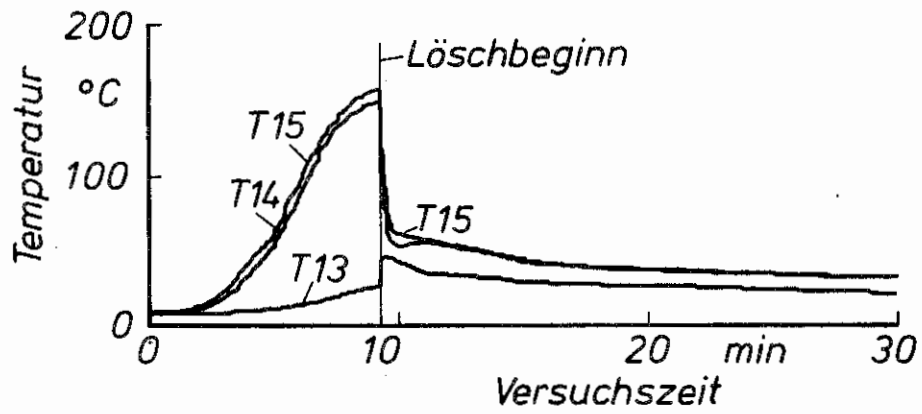


Bild 13d. Versuch 3 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T13 bis T24.

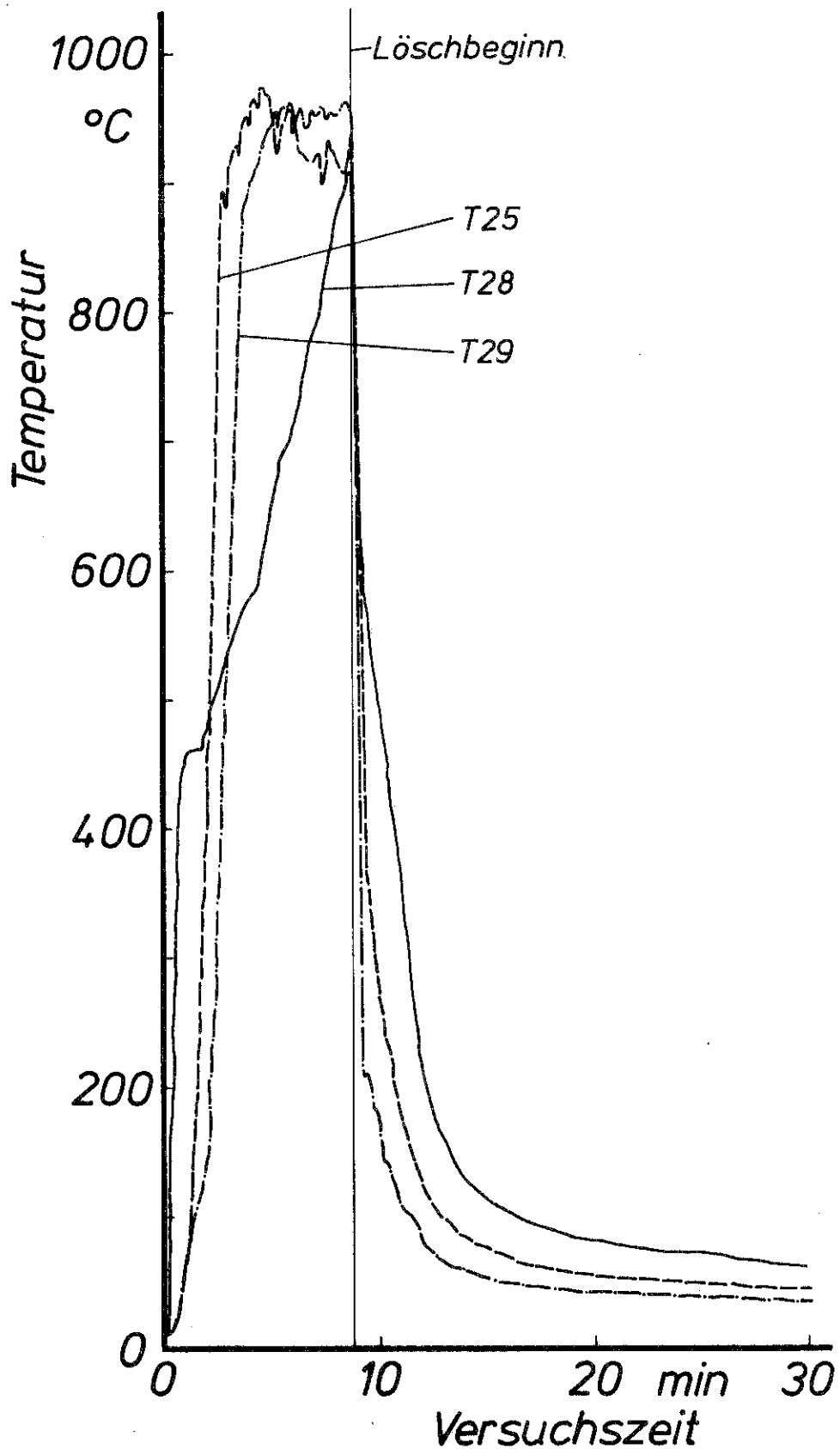


Bild 14a. Versuch 4 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T25, T28 und T29.

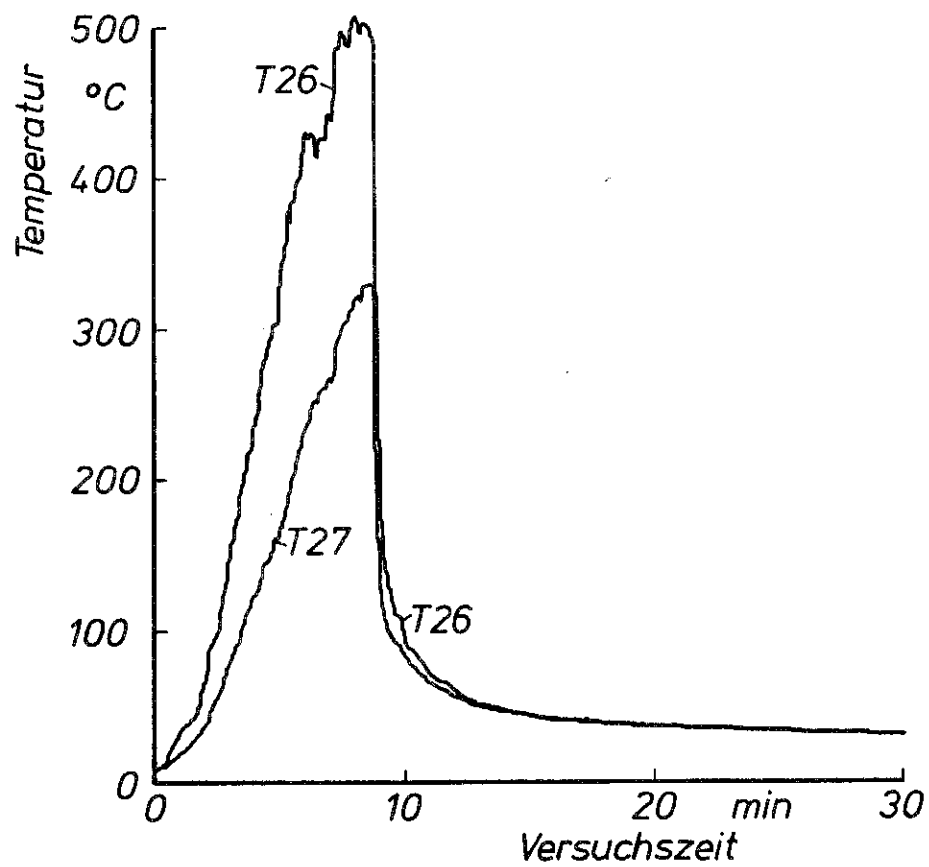
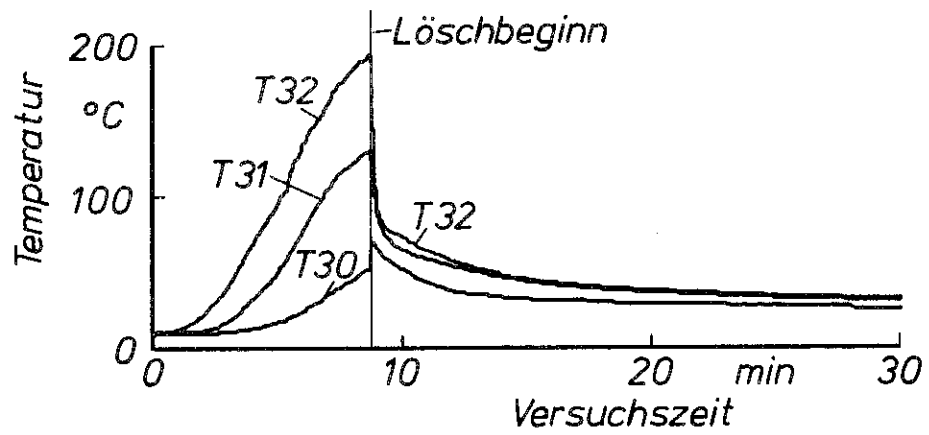


Bild 14b. Versuch 4 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T26, T27, T30, T31 und T32.

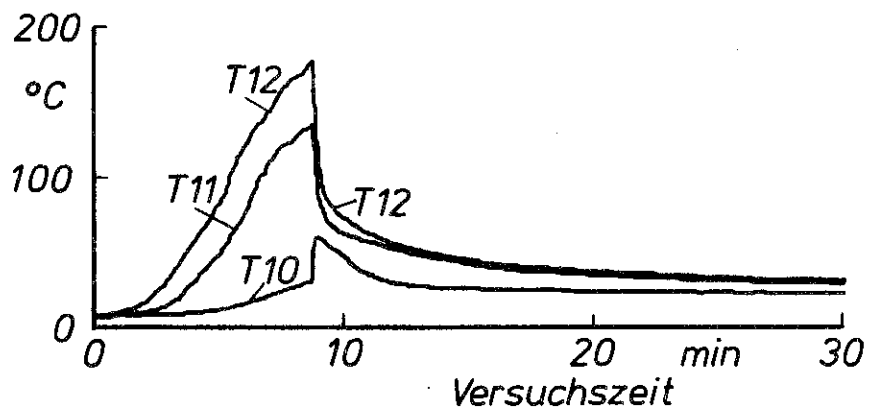
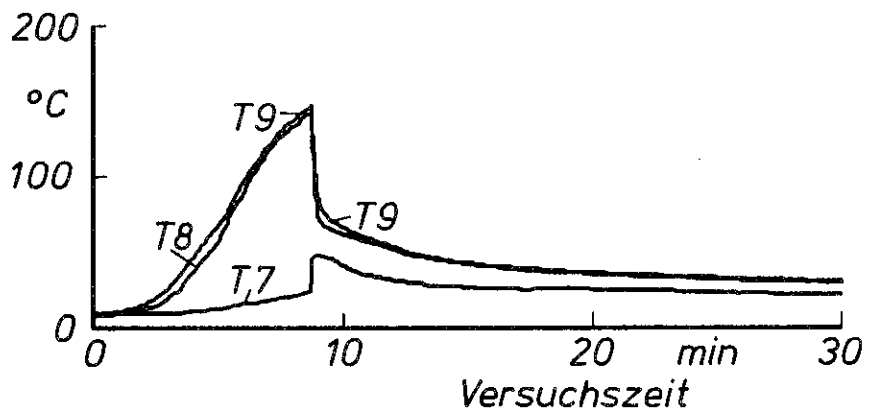
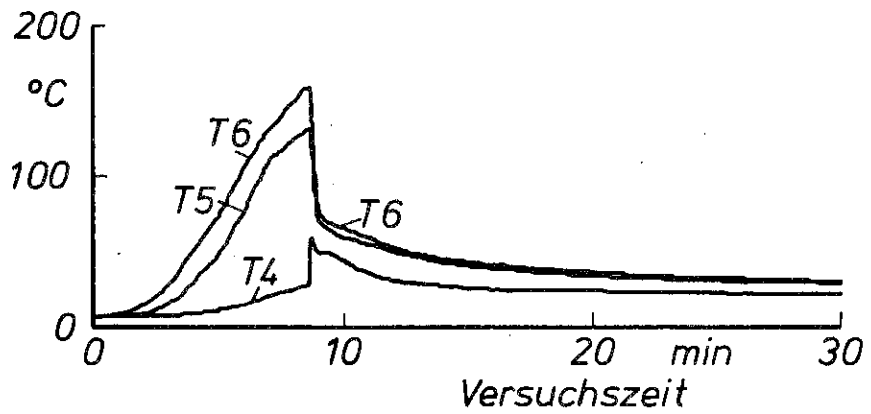
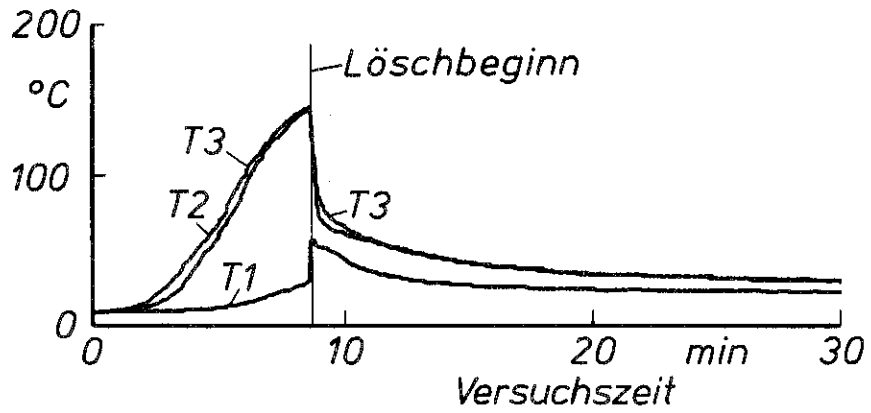


Bild 14c. Versuch 4 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T12.

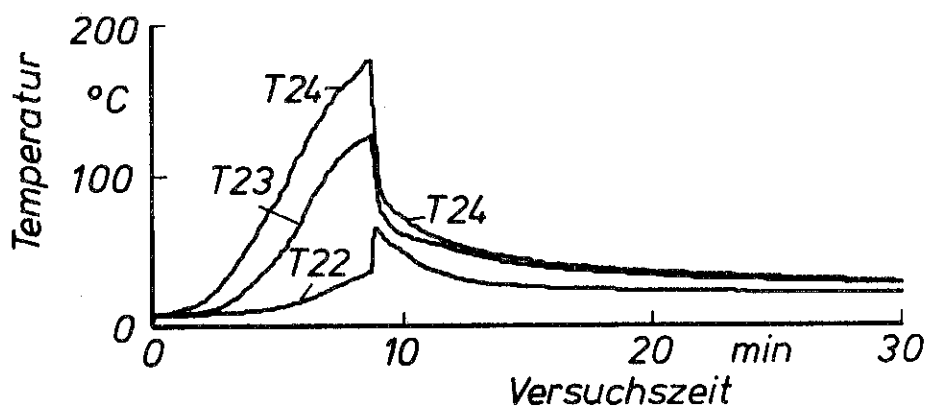
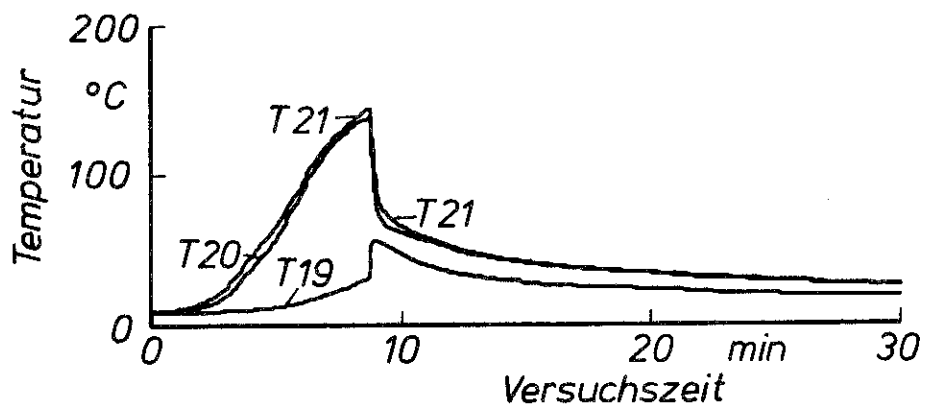
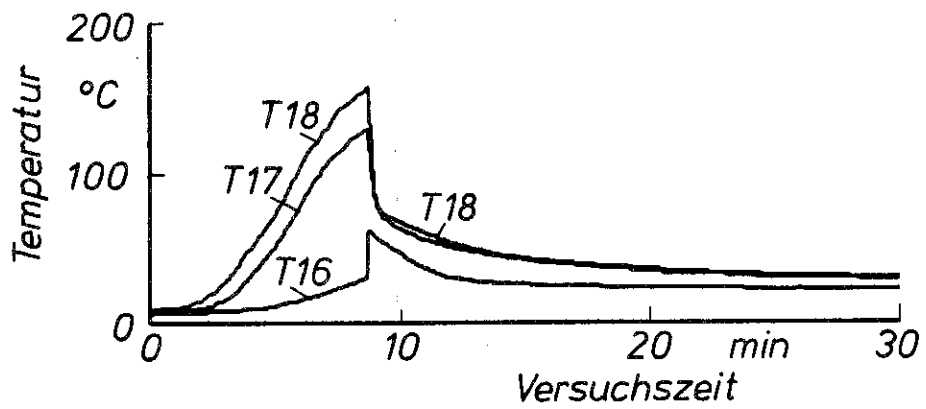
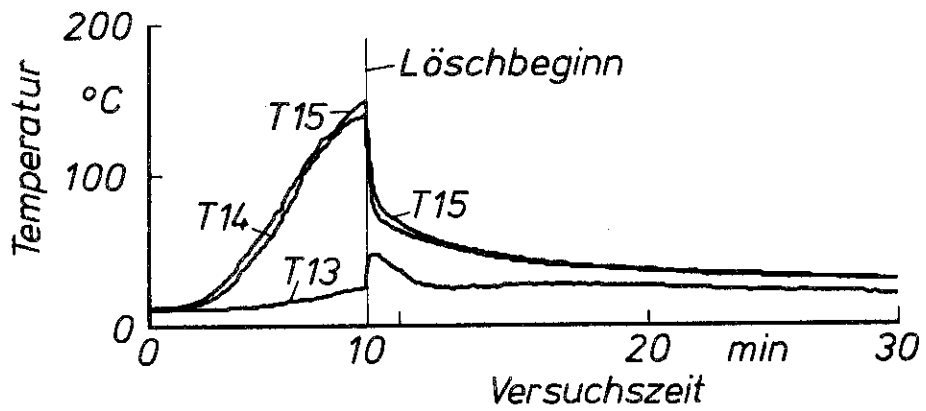


Bild 14d. Versuch 4 Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen an den Meßstellen T 13 bis T24.

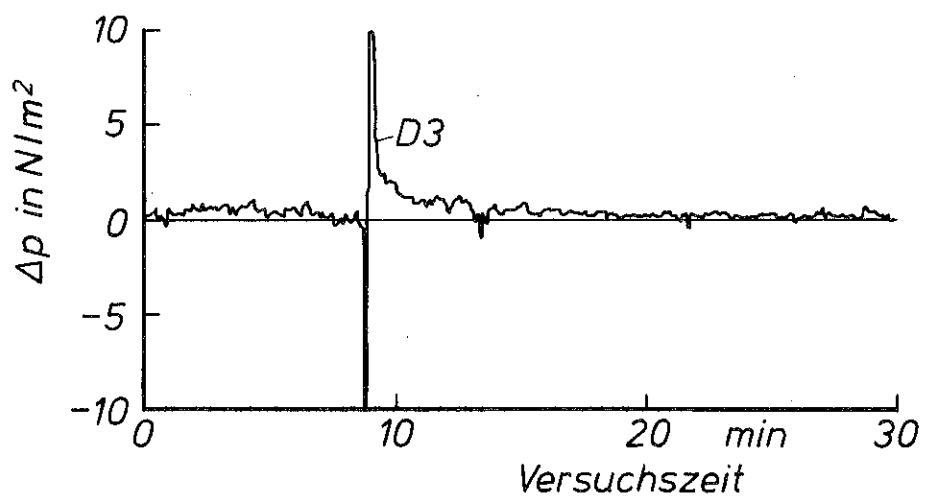
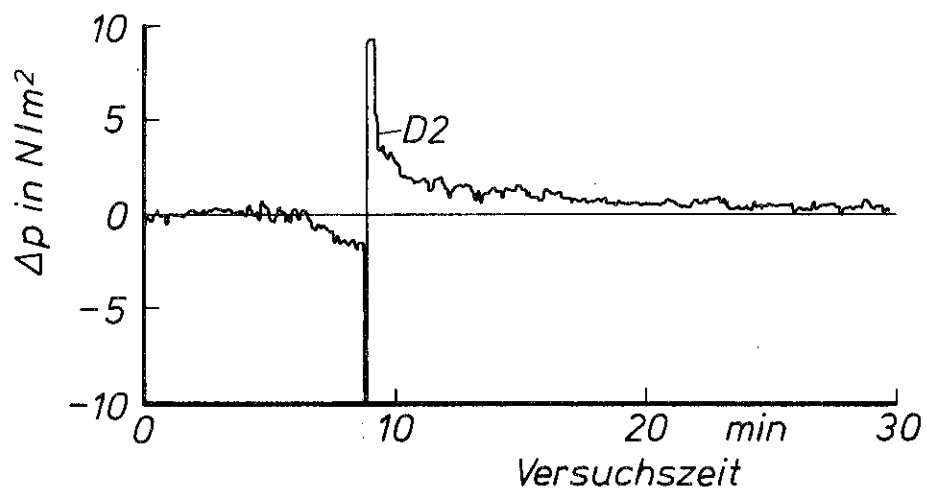
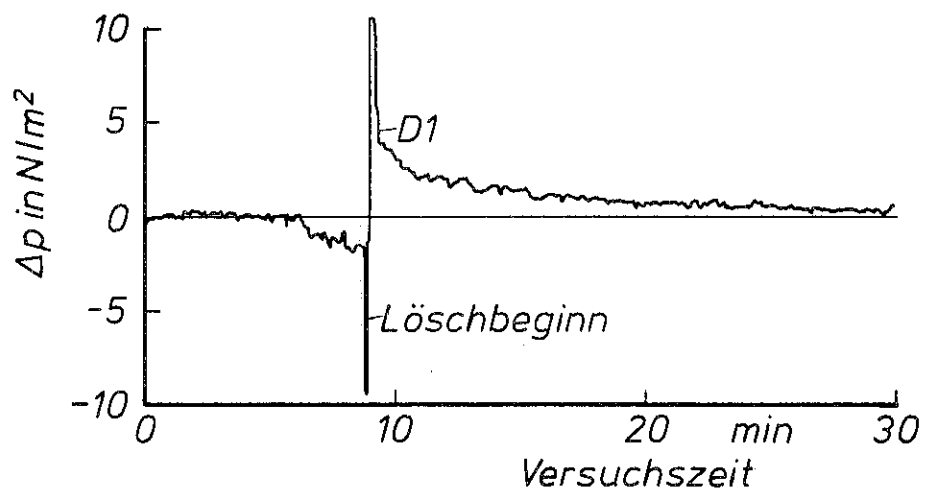


Bild 15a. Versuch 1 Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit der Versuchszeit in den 3 Meßhöhen D1, D2 und D3.

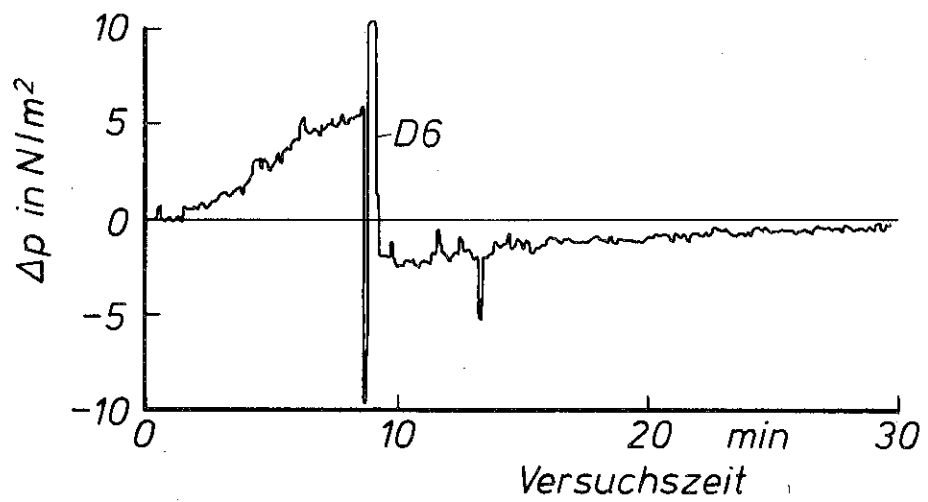
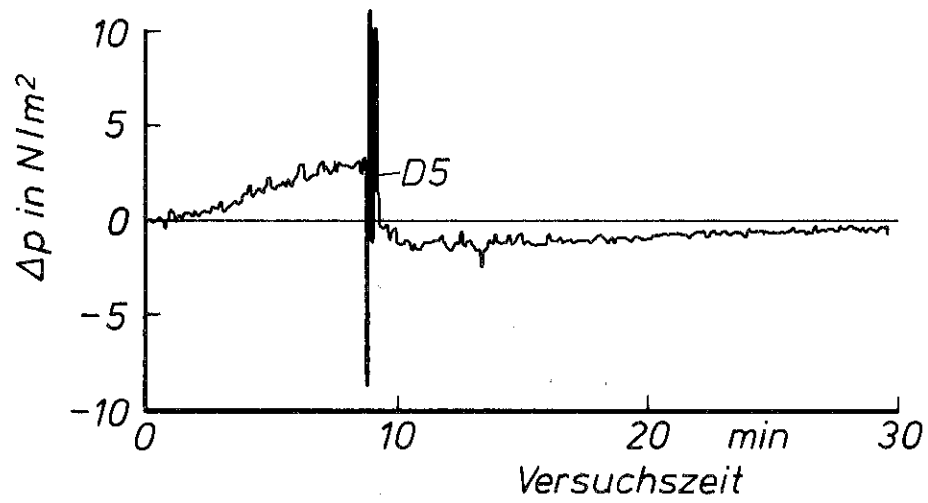
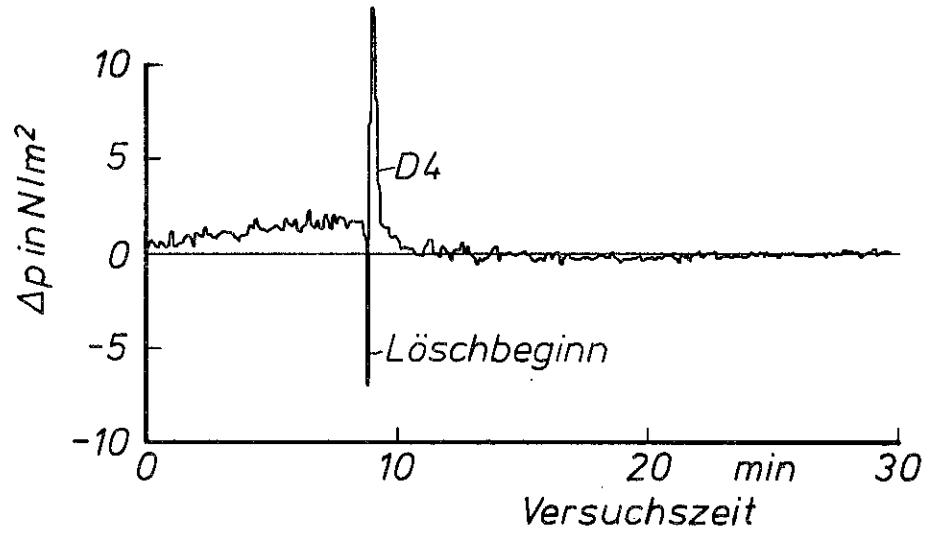


Bild 15b. Versuch 1 Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit der Versuchszeit in den 3 Meßhöhen D4, D5 und D6.

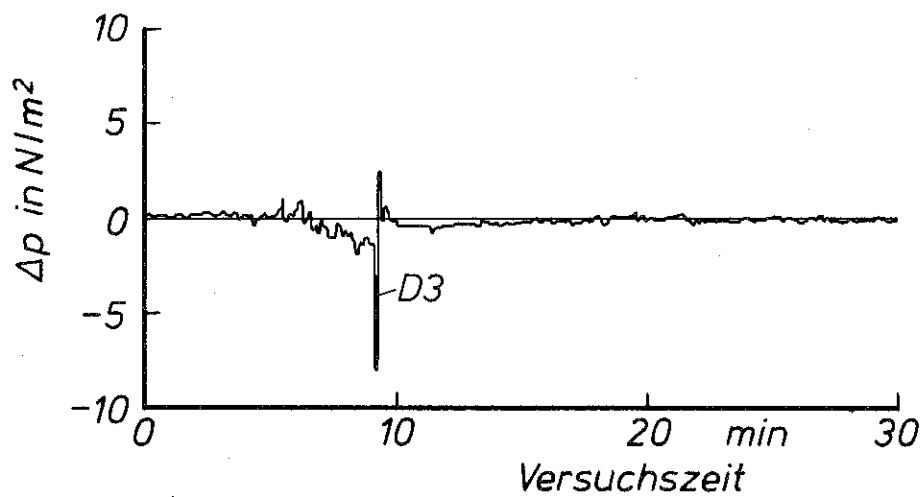
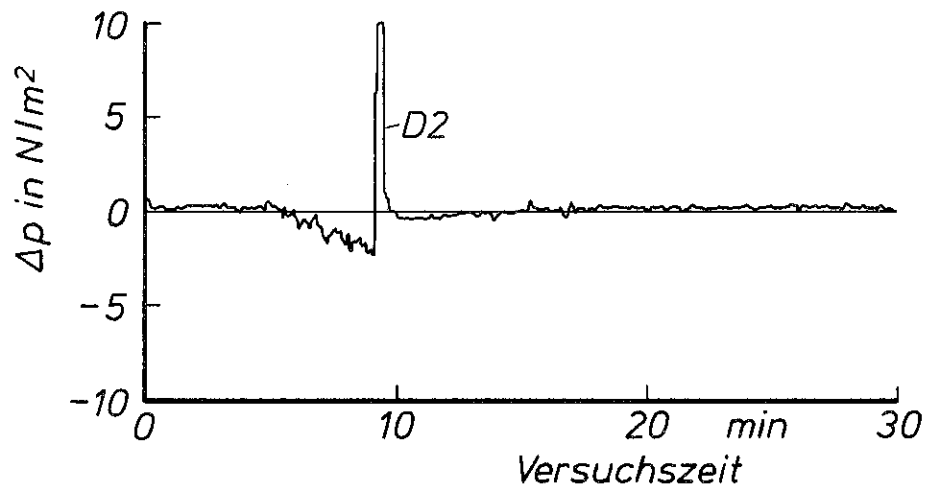
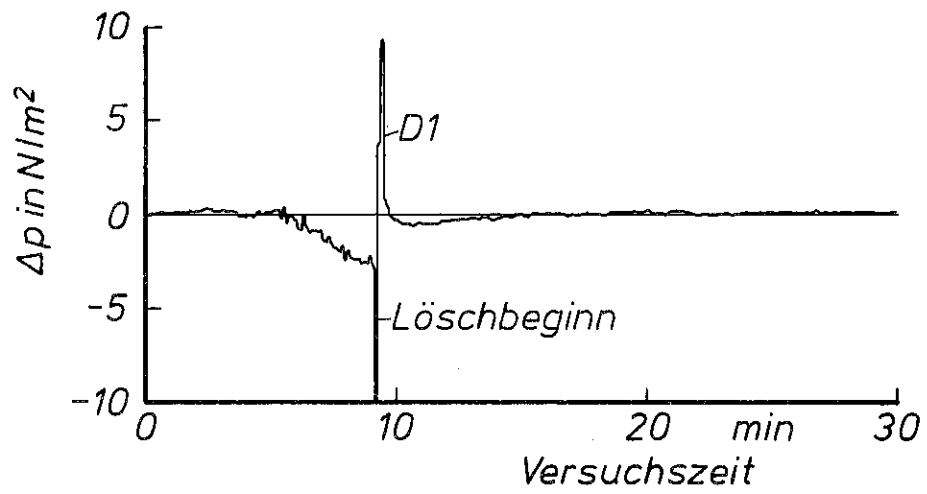


Bild 16a. Versuch 3 Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit der Versuchszeit in den 3 Meßhöhen D1, D2 und D3.

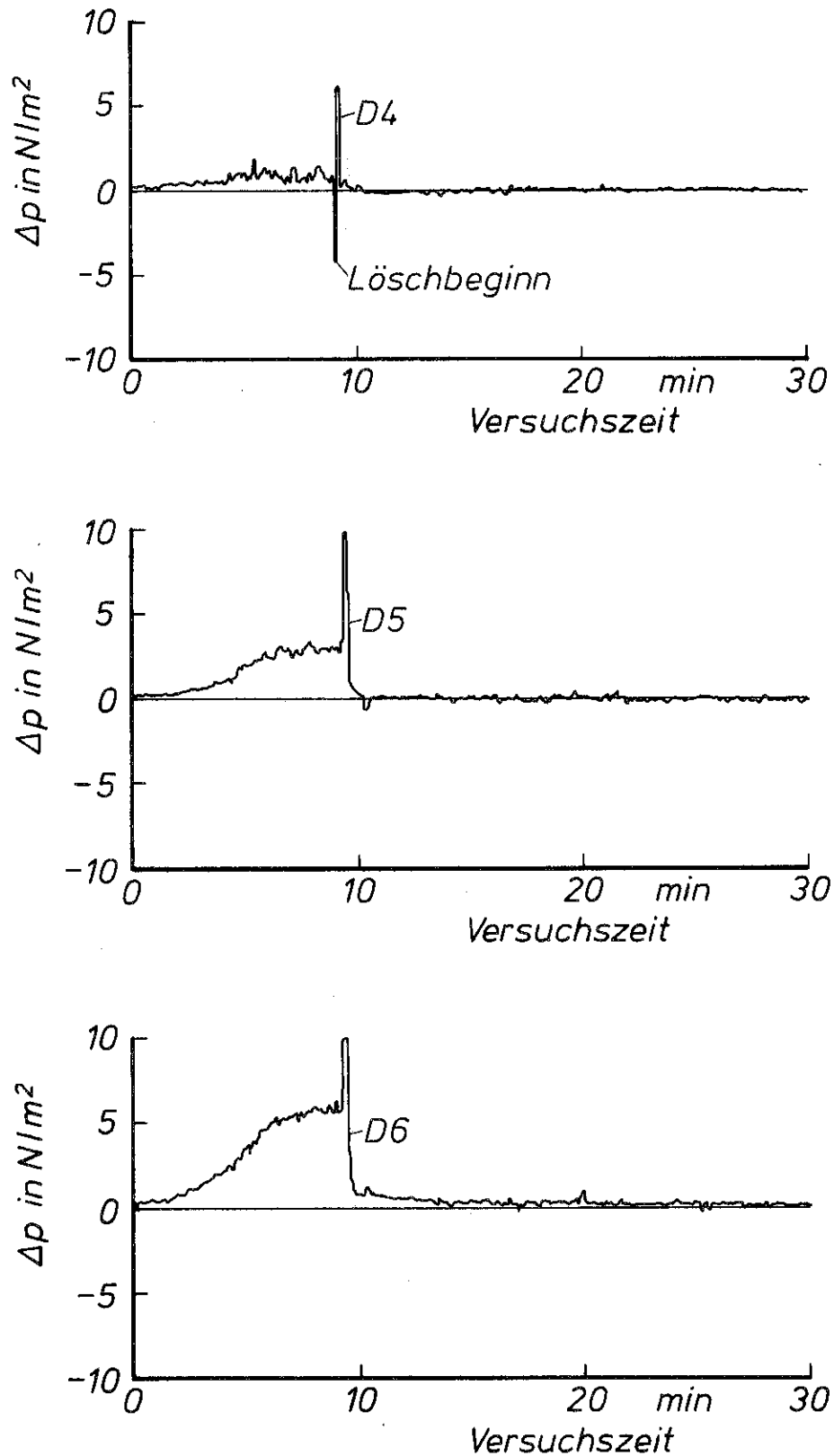


Bild 16b. Versuch 3 Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit der Versuchszeit in den 3 Meßhöhen D4, D5 und D6.

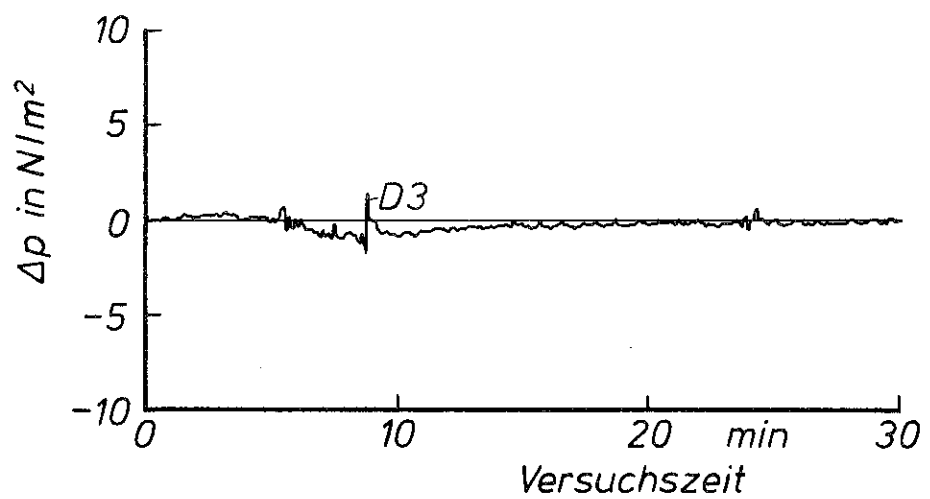
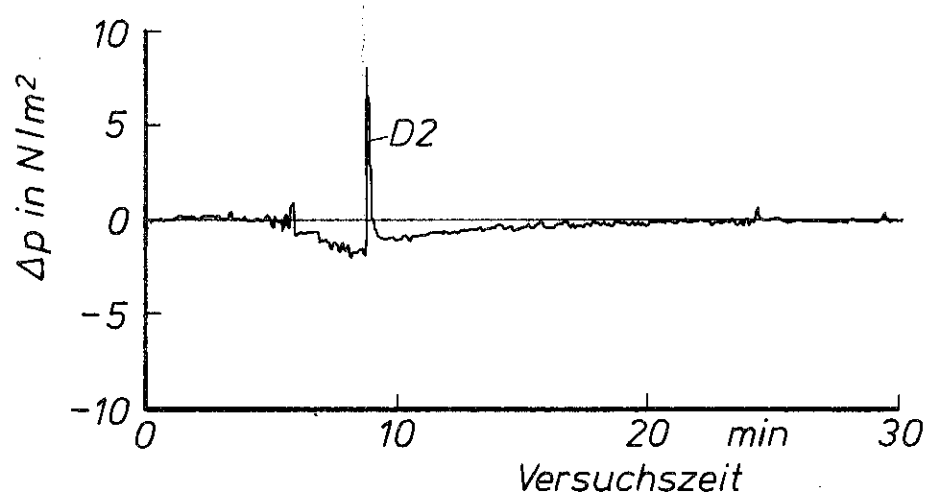
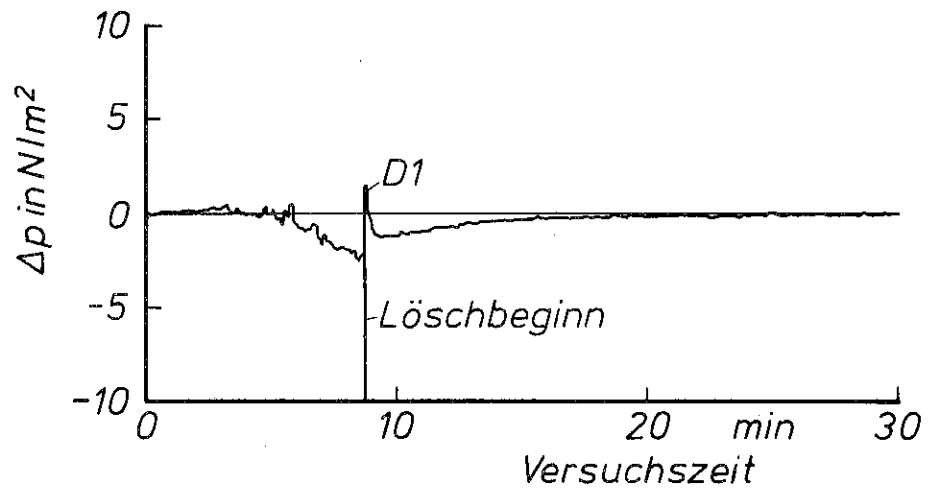


Bild 17 a. Versuch 4 Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit der Versuchszeit in den 3 Meßhöhen D1, D2 und D3.

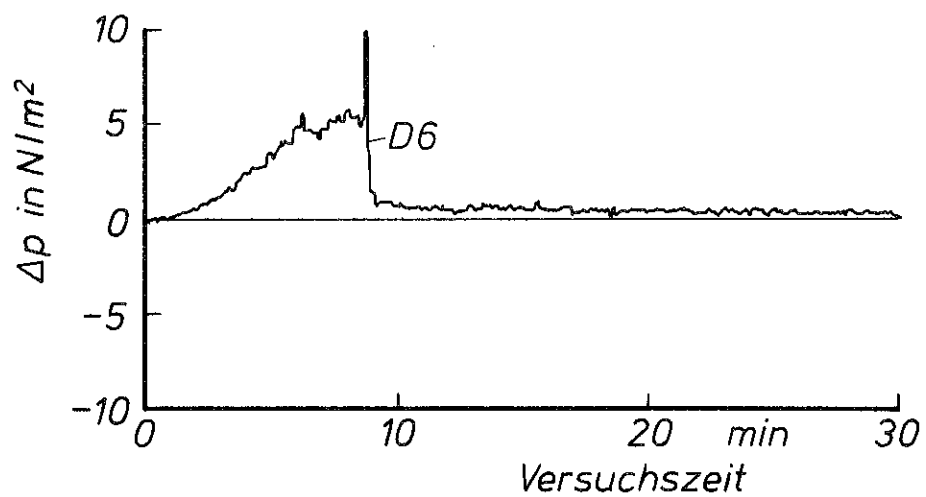
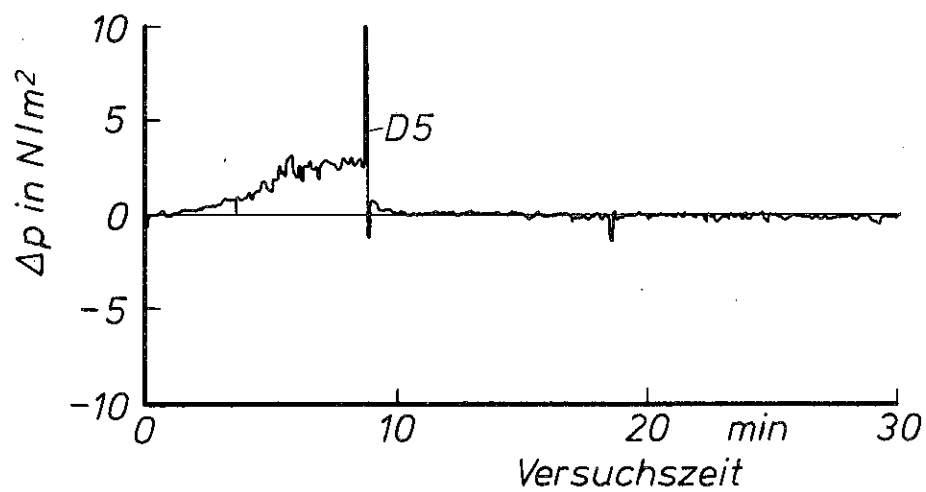
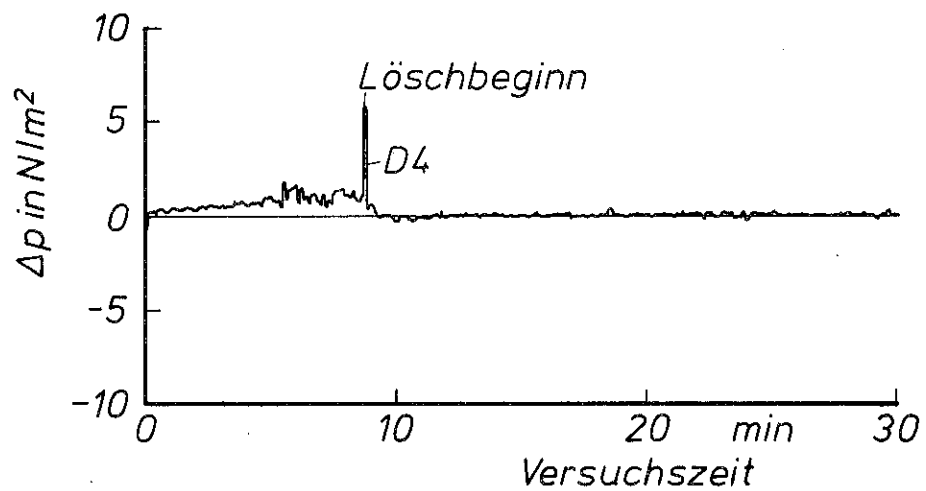


Bild 17b. Versuch 4 Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit der Versuchszeit in den 3 Meßhöhen D4, D5 und D6.

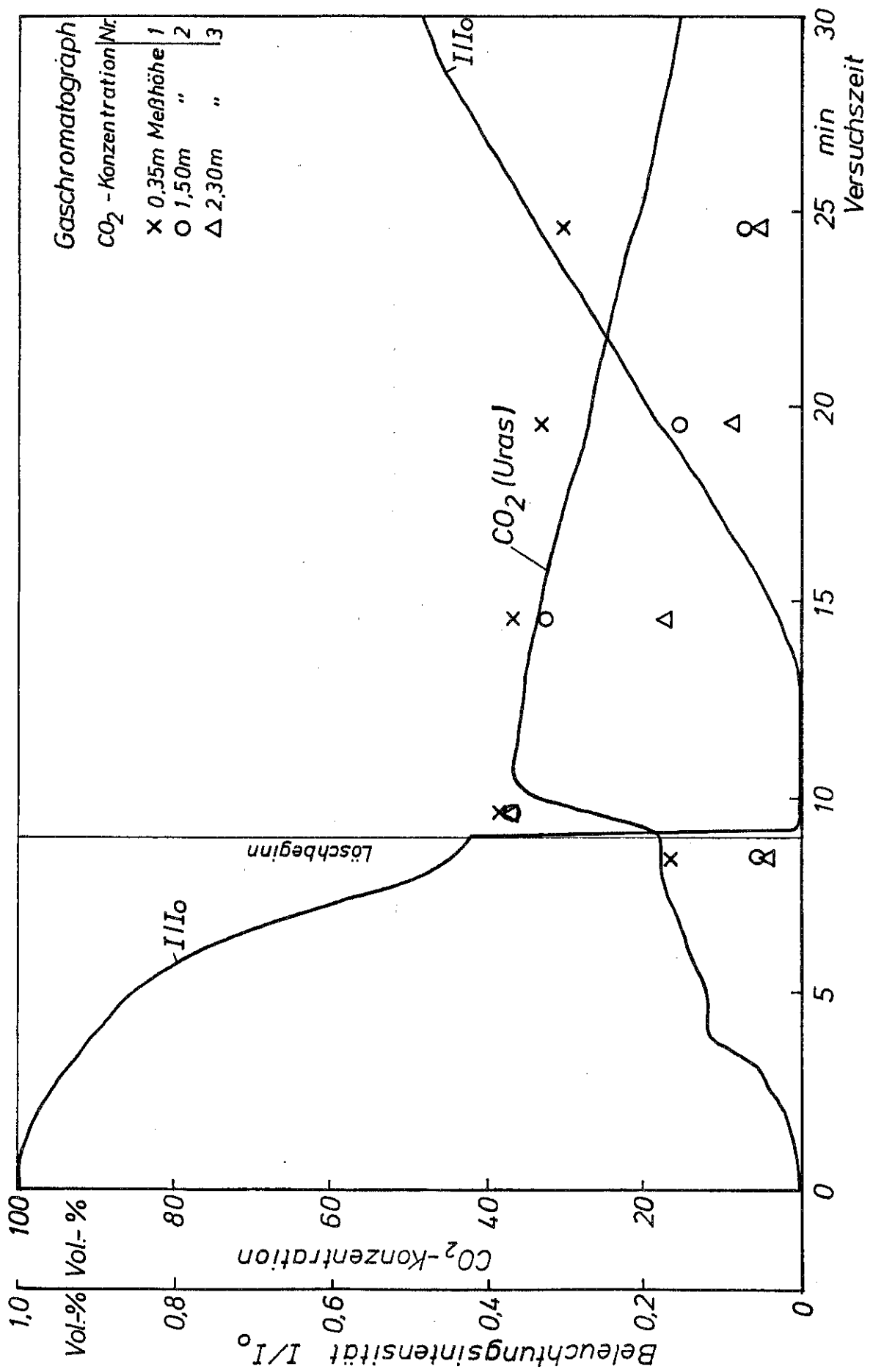


Bild 18a. Versuch 1 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ und der Beleuchtungsintensität I/I₀ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

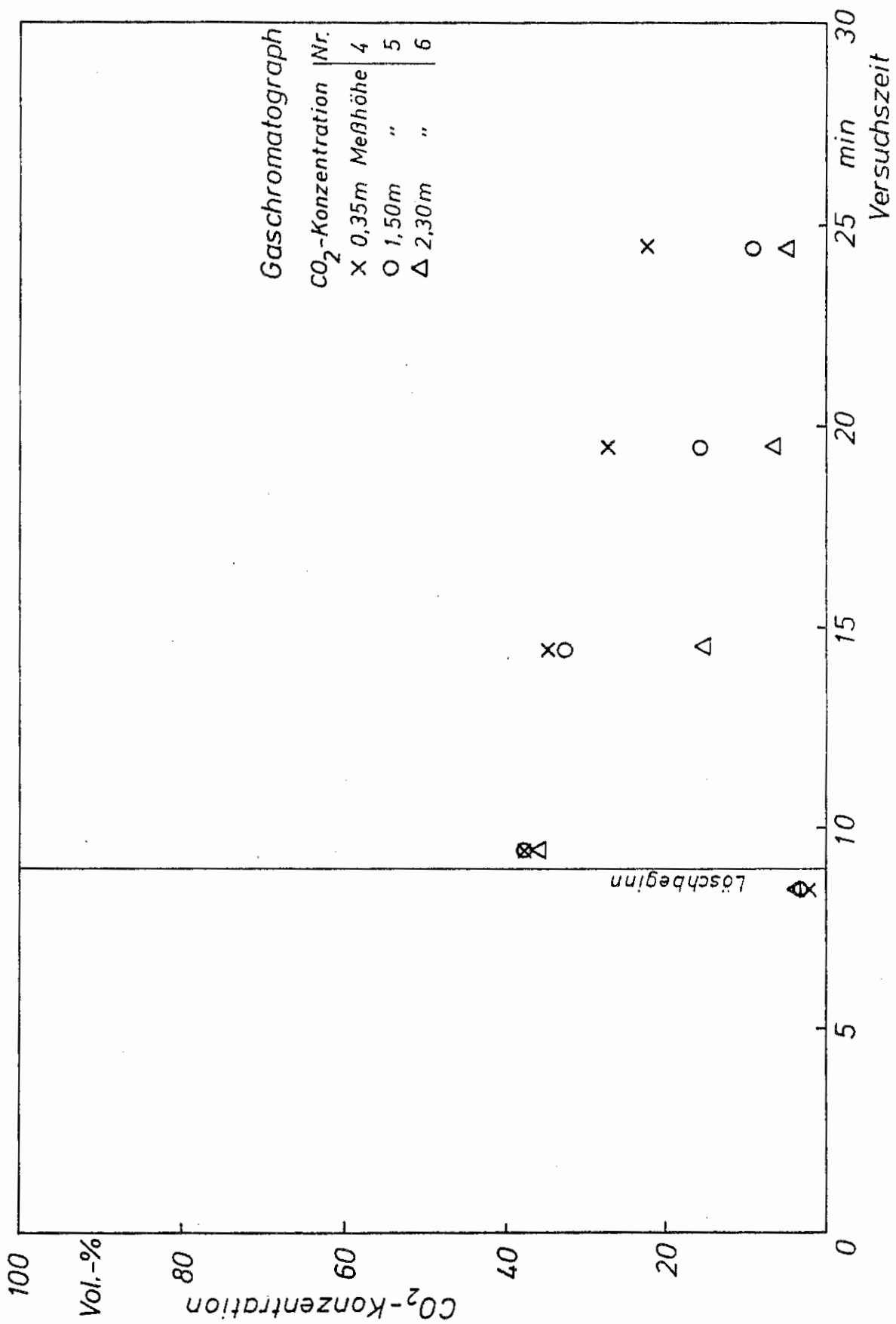


Bild 18b. Versuch 1 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

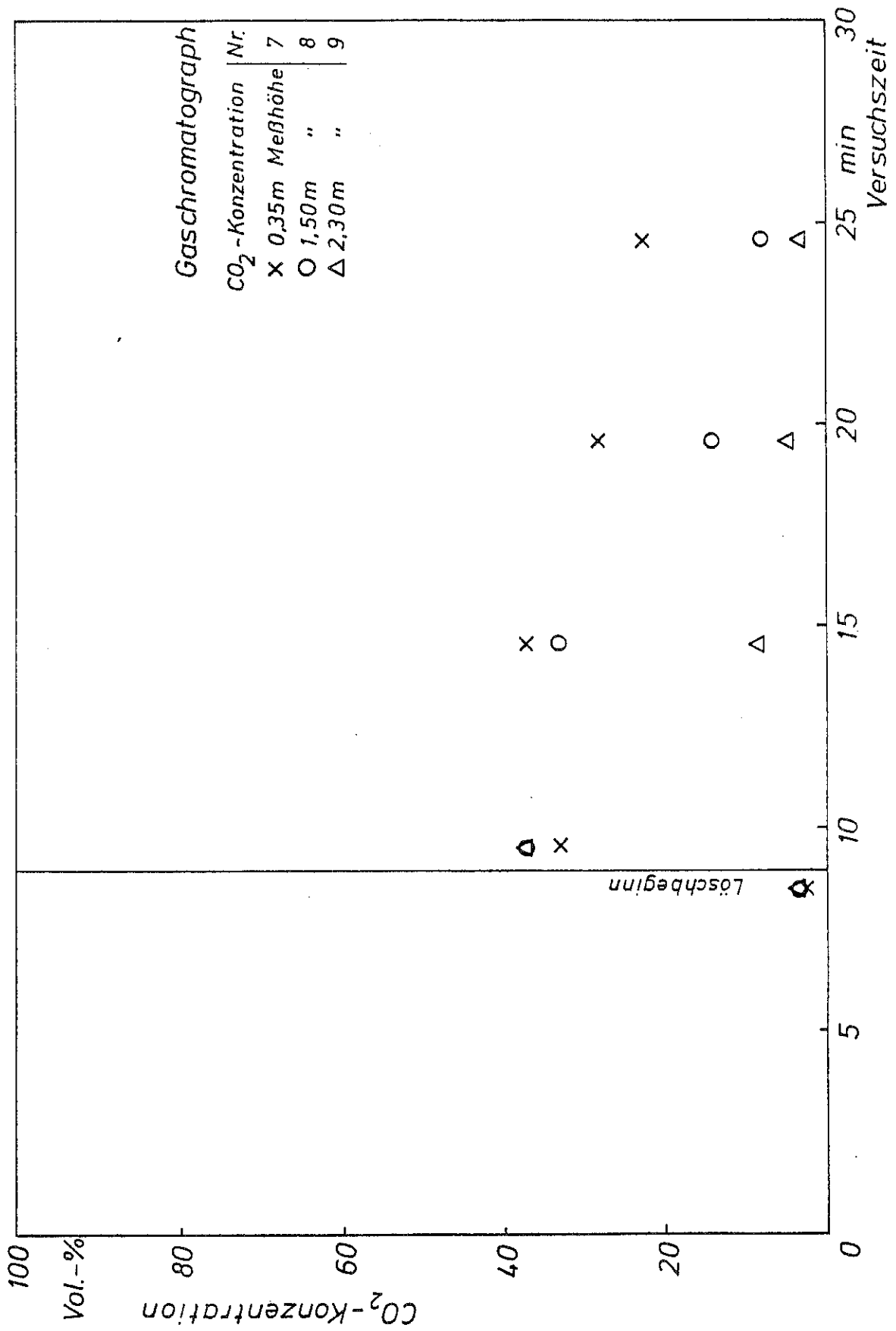


Bild 18c. Versuch 1 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

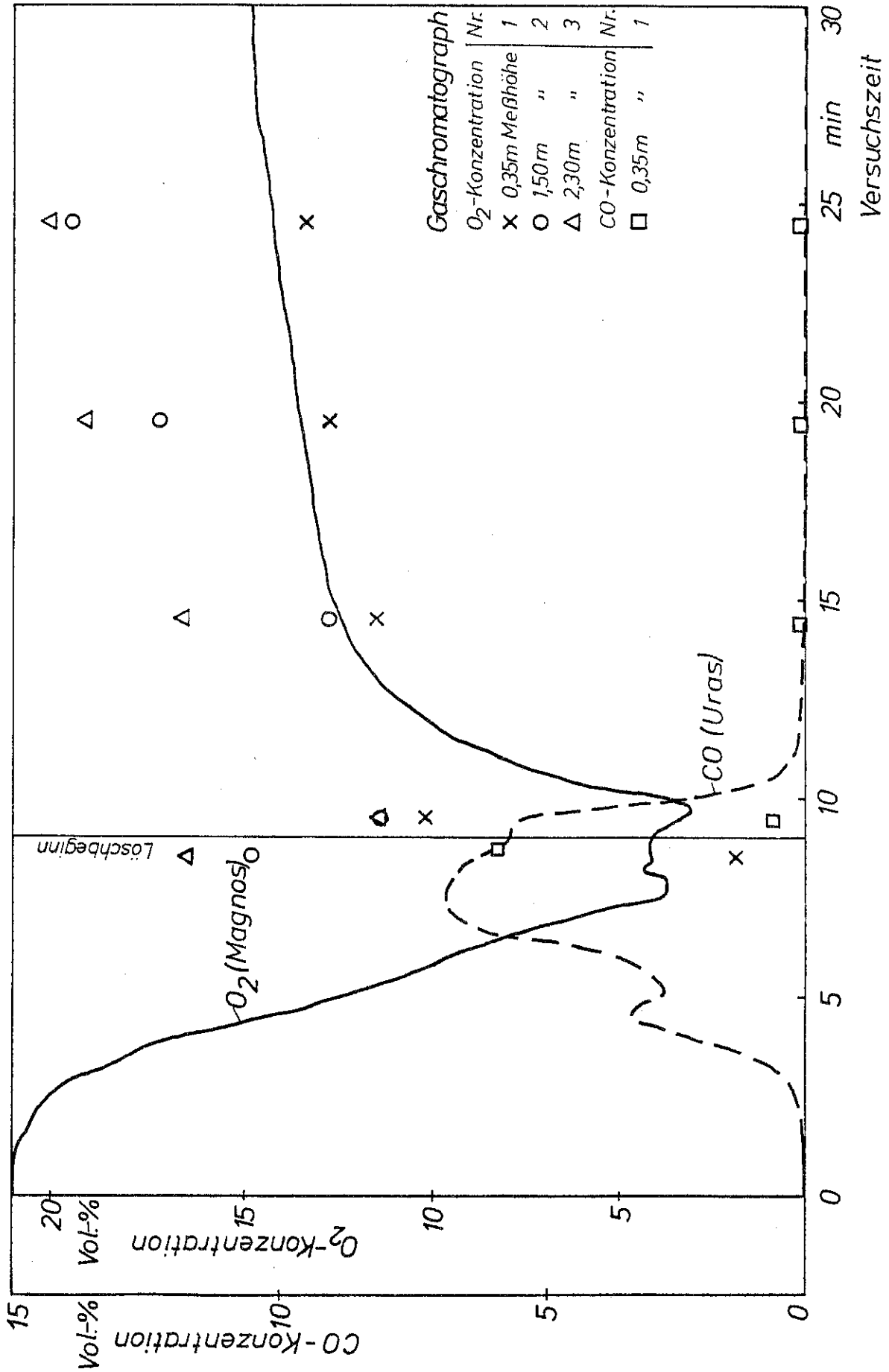


Bild 19a. Versuch 1 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO und O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

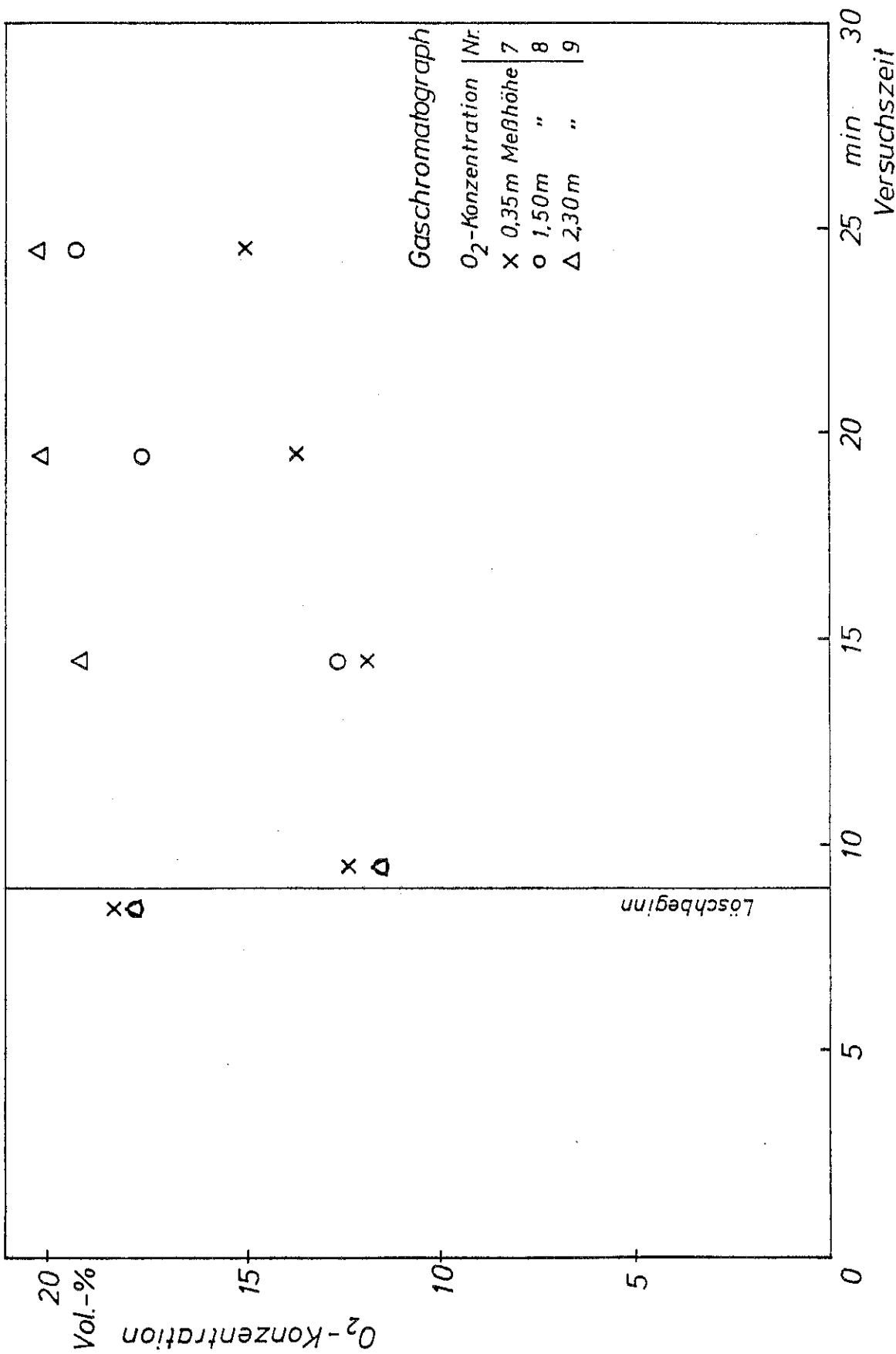


Bild 19b. Versuch 1 Verlauf der örtlichen Konzentration von O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

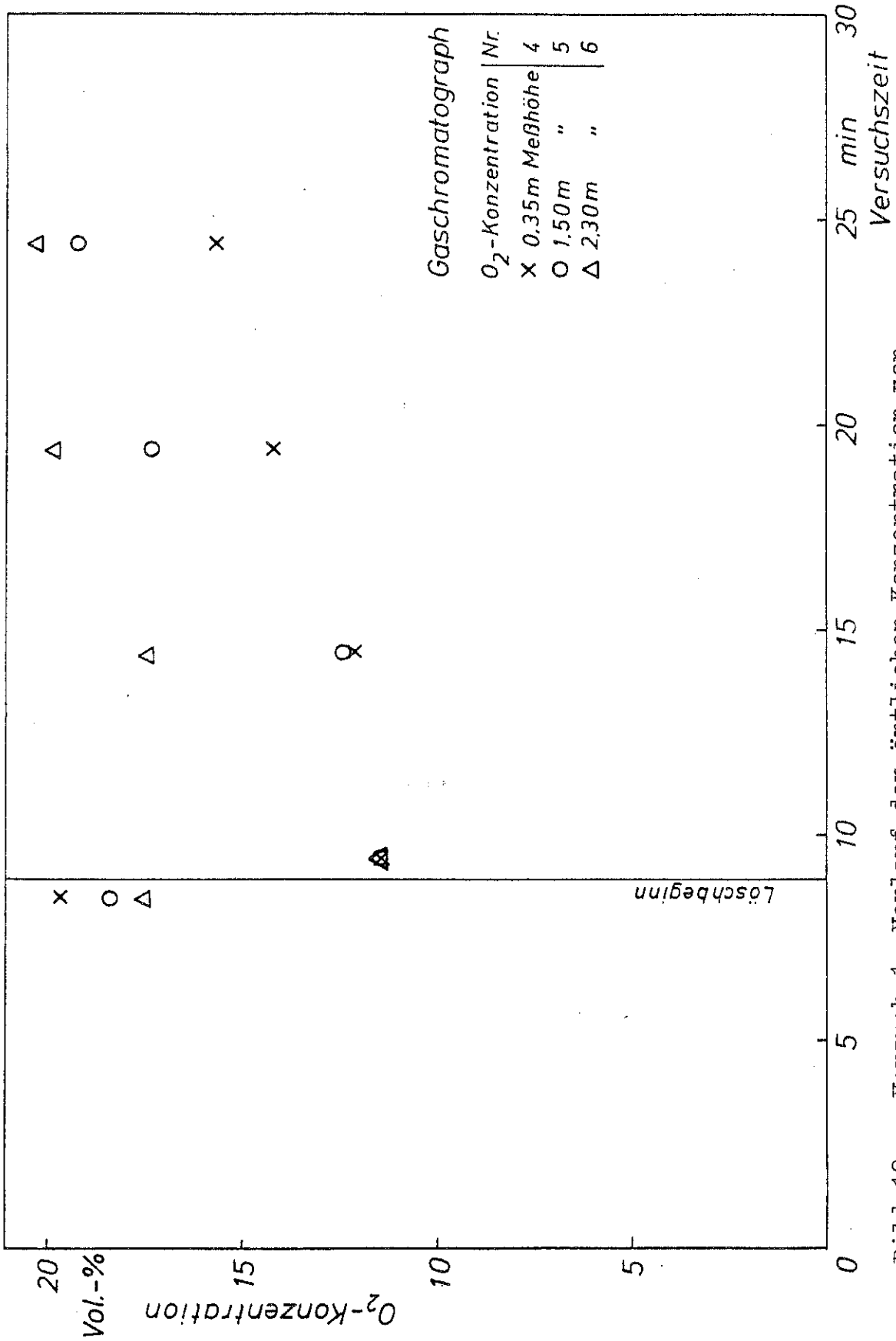


Bild 19c. Versuch 1 Verlauf der örtlichen Konzentration von O_2 in Abhängigkeit der Versuchszeit.

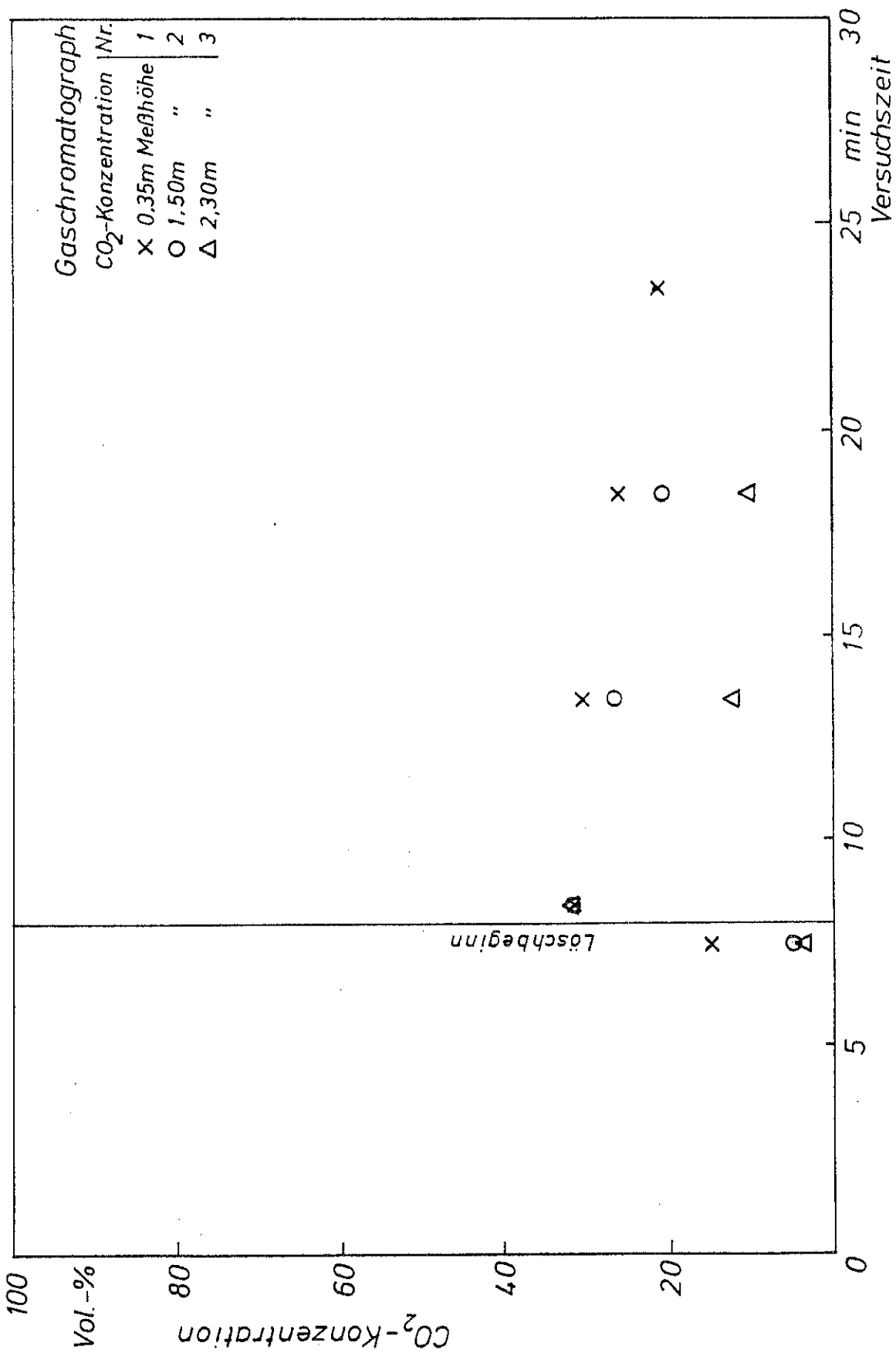


Bild 20a. Versuch 2 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

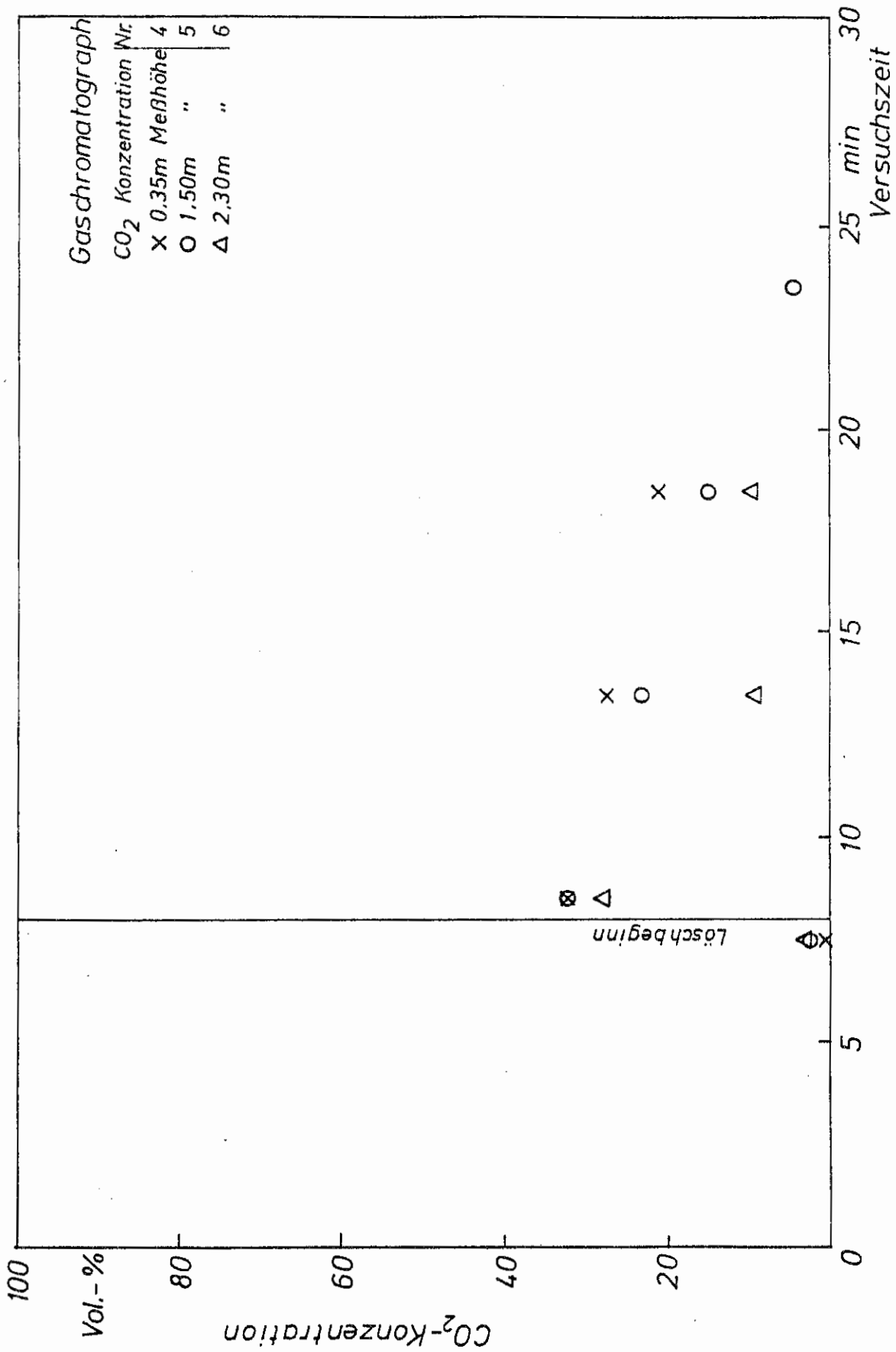


Bild 20b. Versuch 2 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

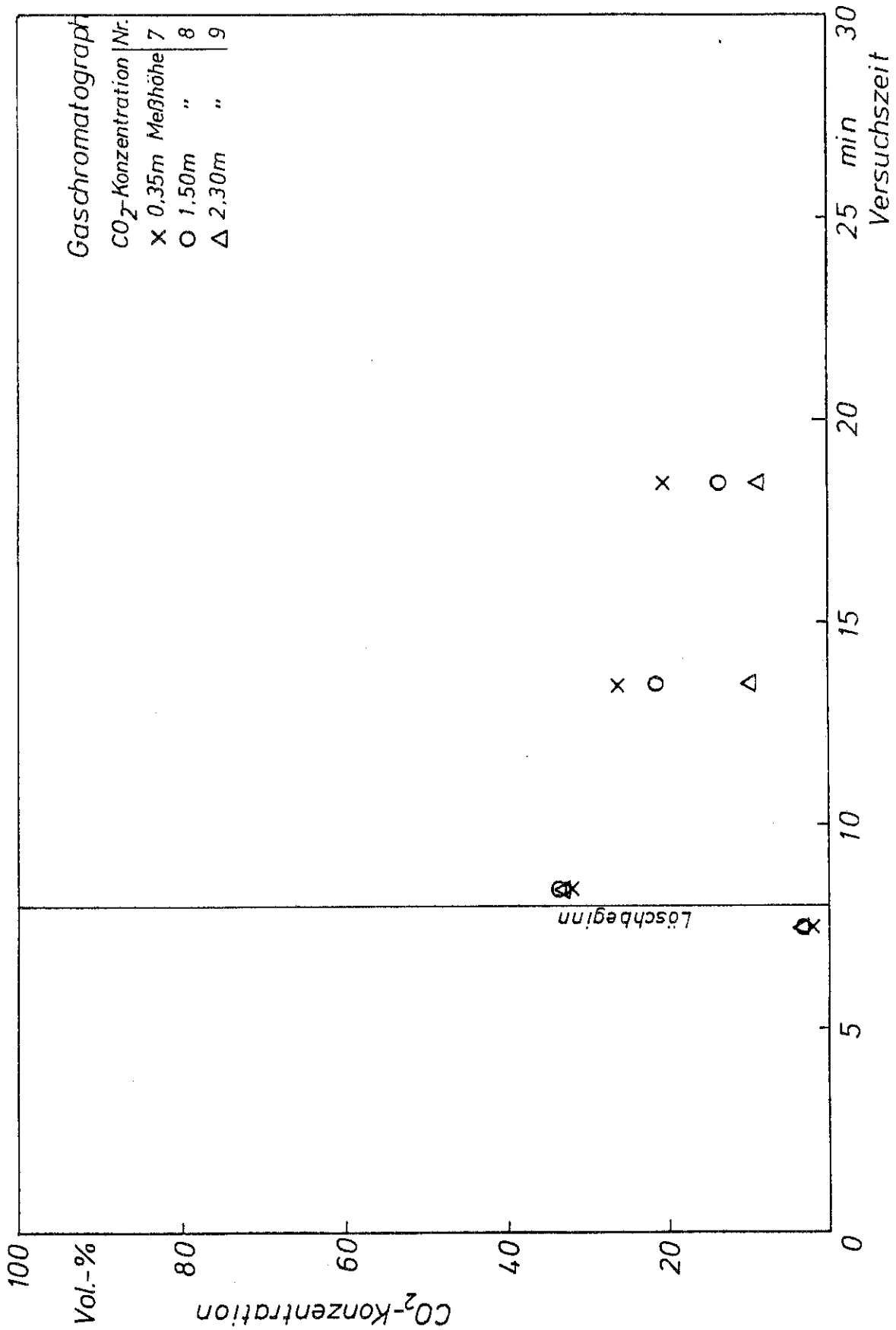


Bild 20c. Versuch 2 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

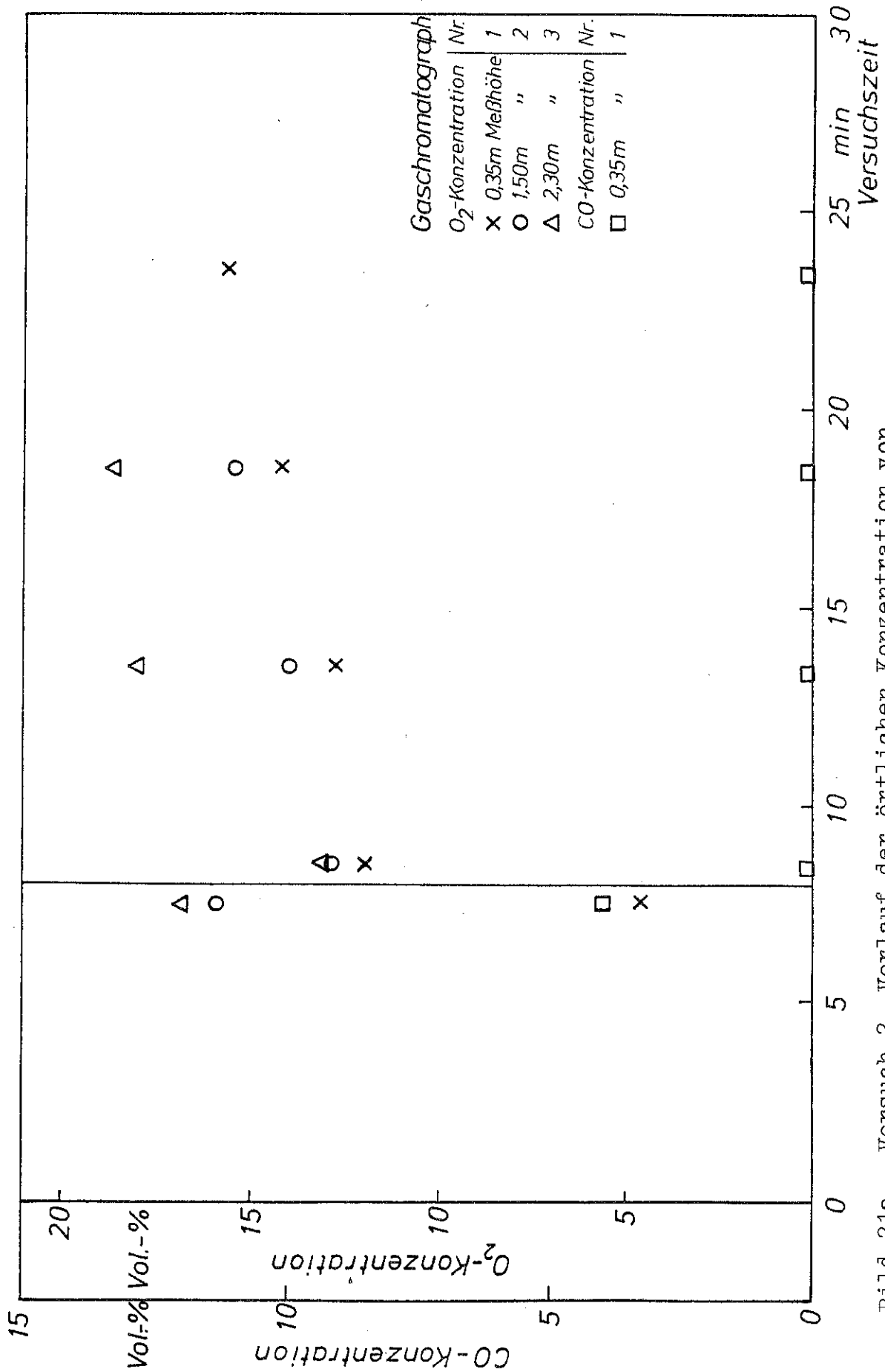


Bild 21a. Versuch 2 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO und O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

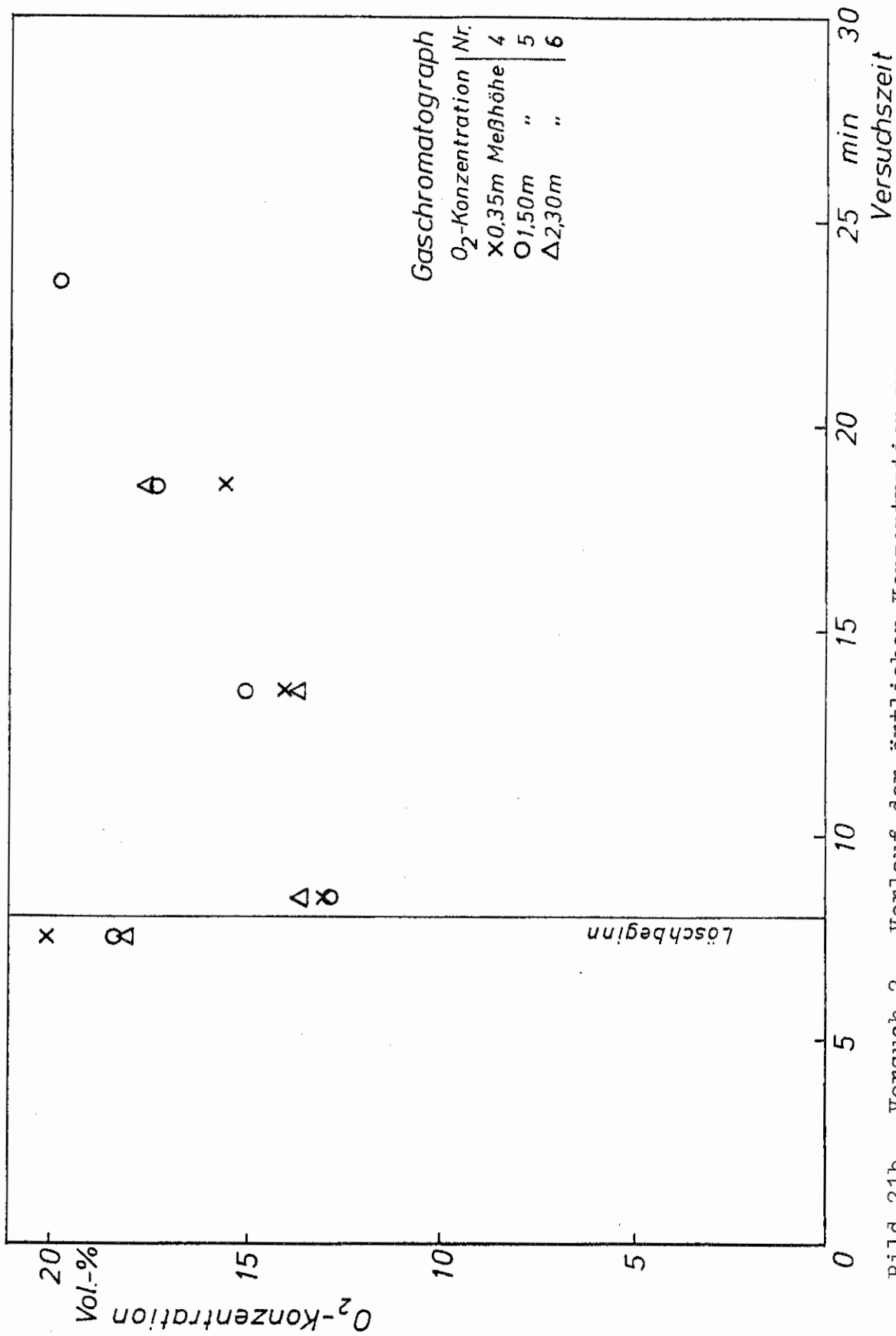


Bild 21b. Versuch 2 Verlauf der örtlichen Konzentration von O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

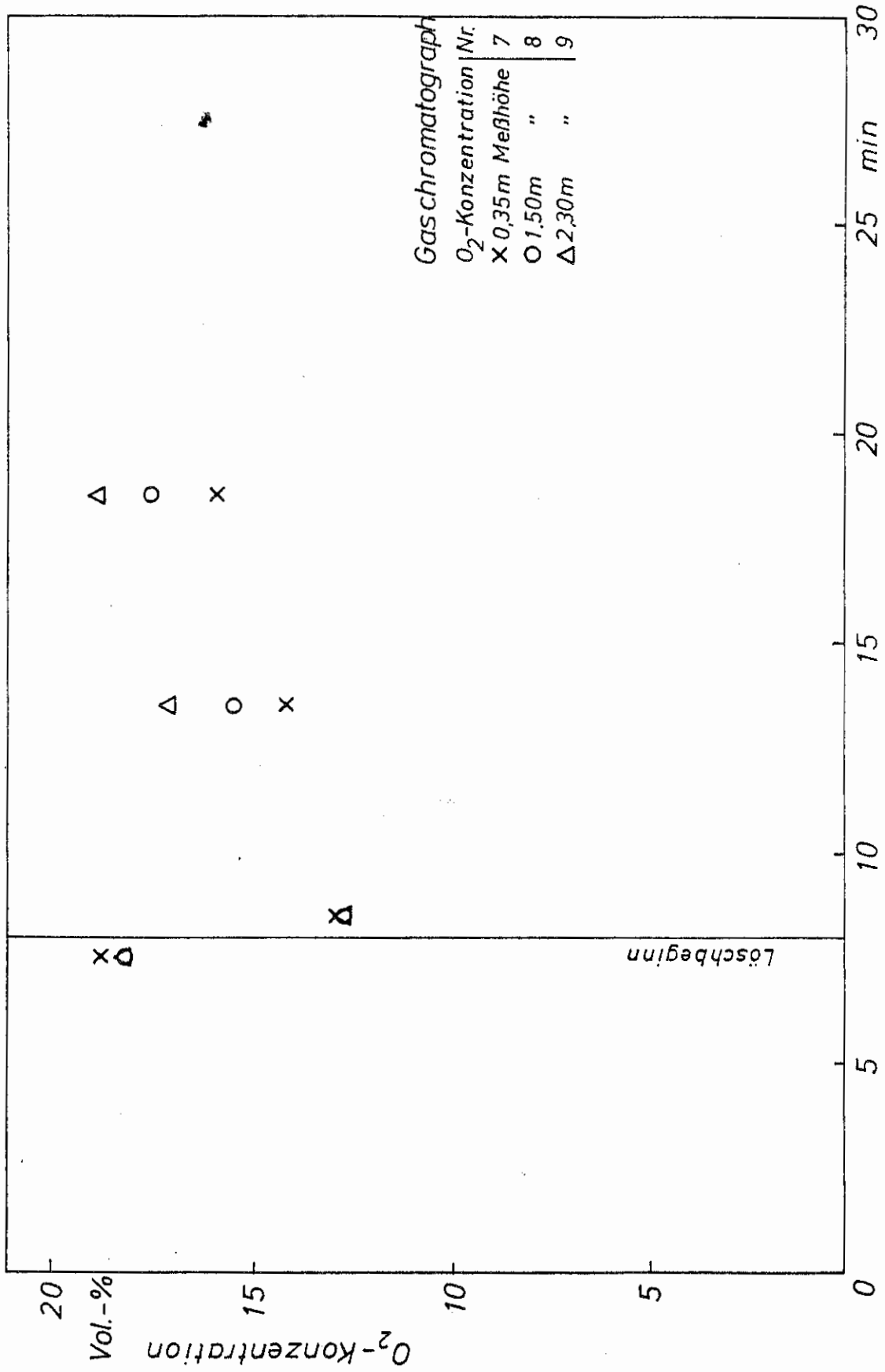


Bild 21c. Versuch 2 Verlauf der örtlichen Konzentration von O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

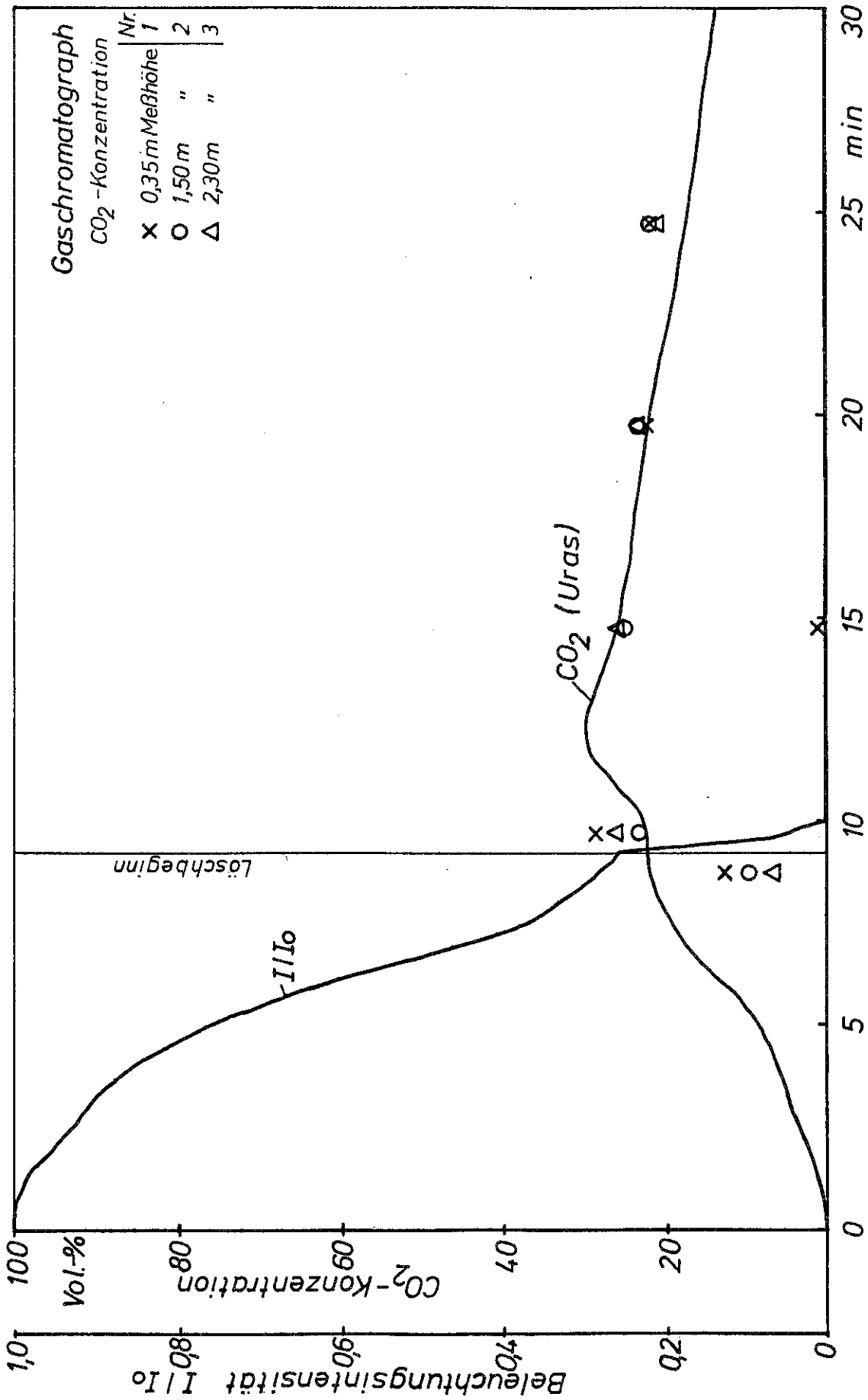


Bild 22a. Versuch 3 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ und der Beleuchtungsintensität I/I₀ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

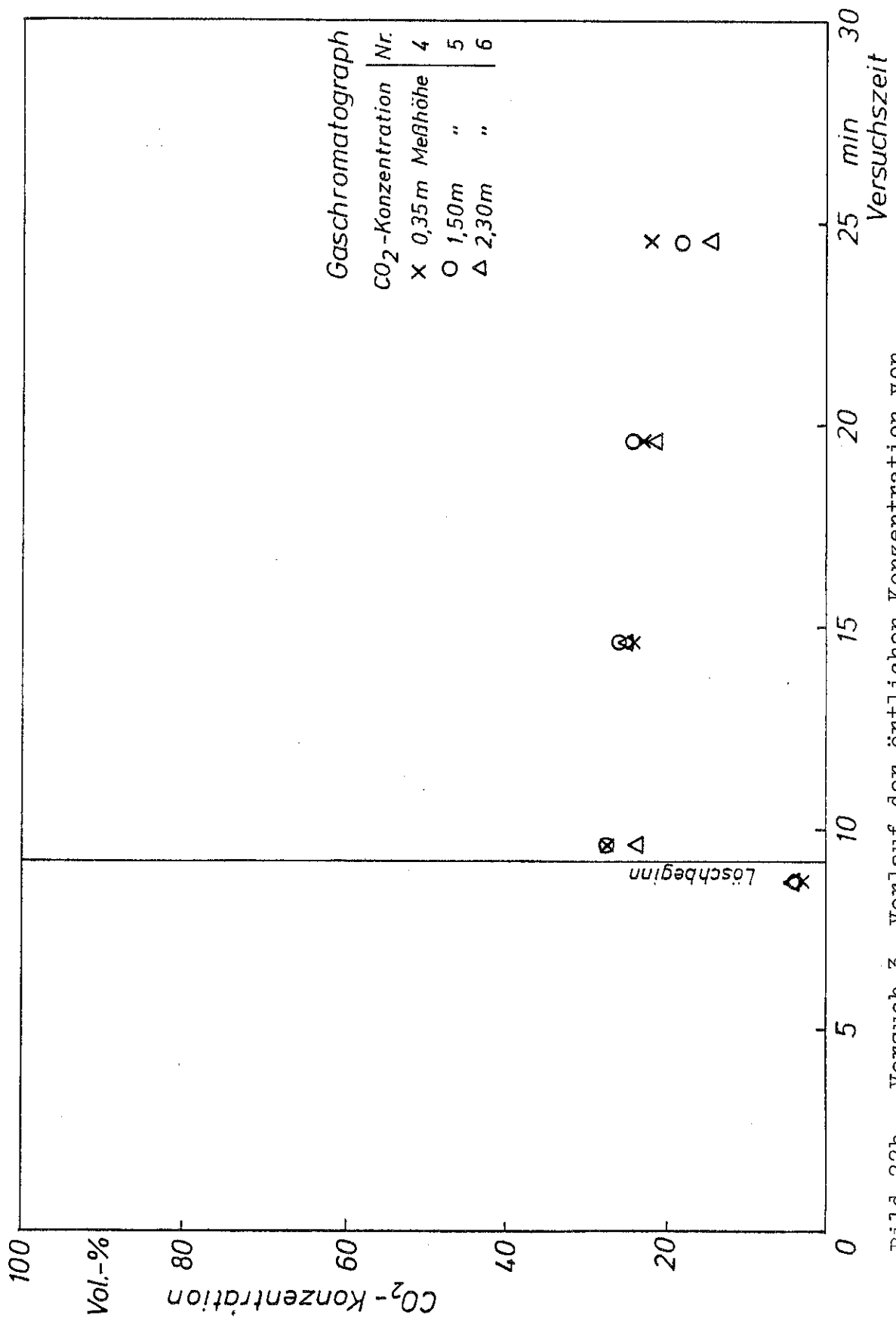


Bild 22b. Versuch 3 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

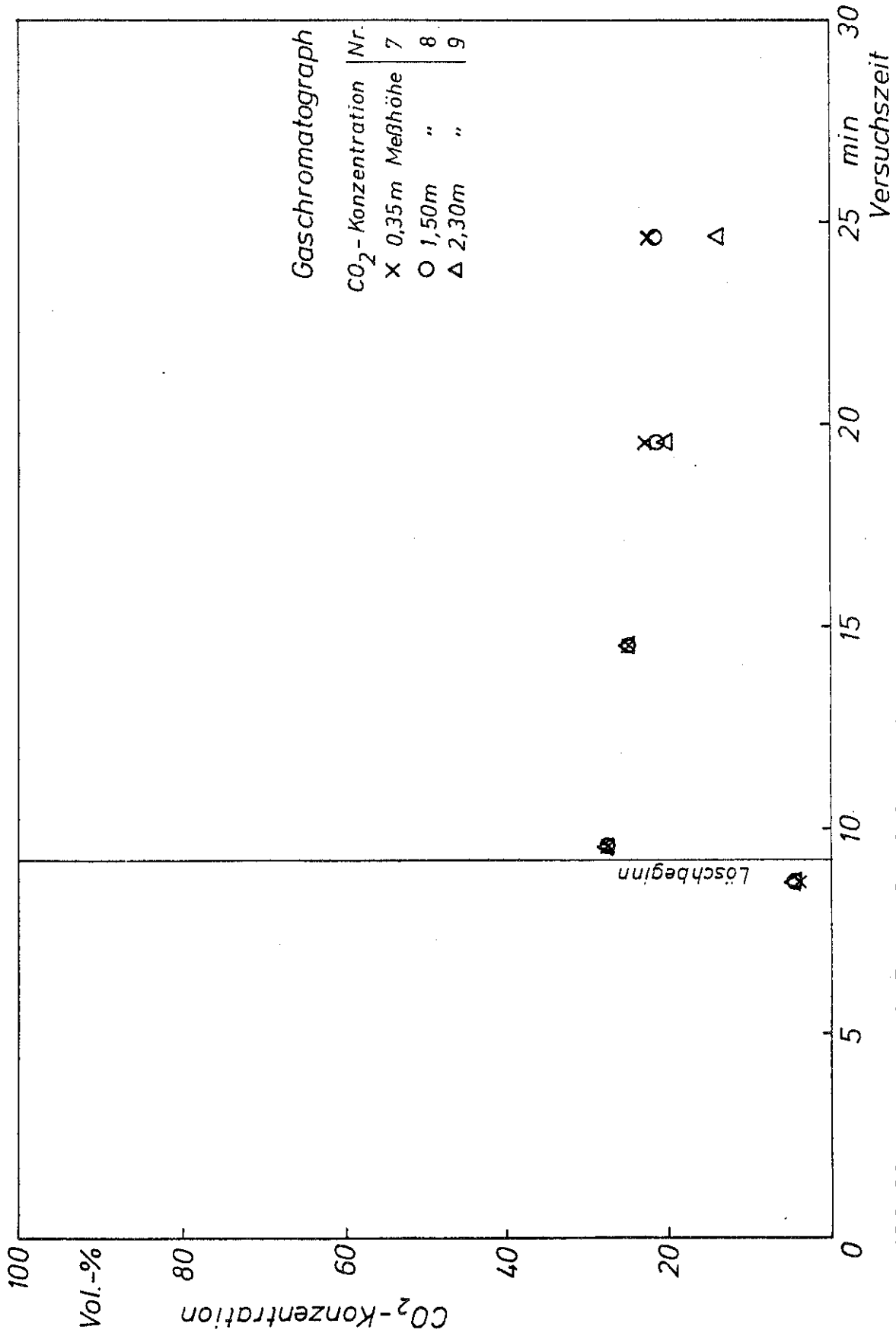


Bild 22c. Versuch 3 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

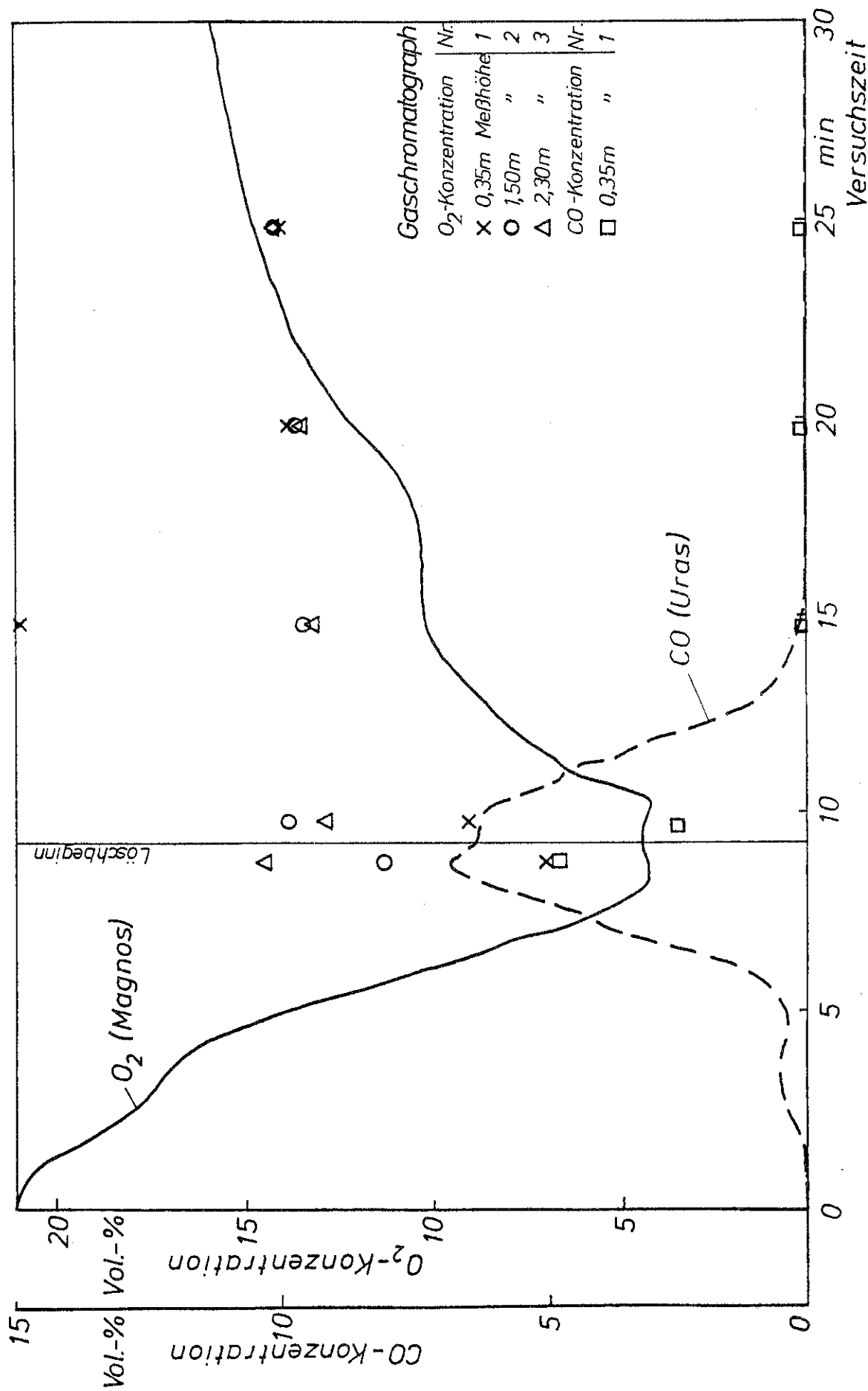


Bild 23a. Versuch 3 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO und O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

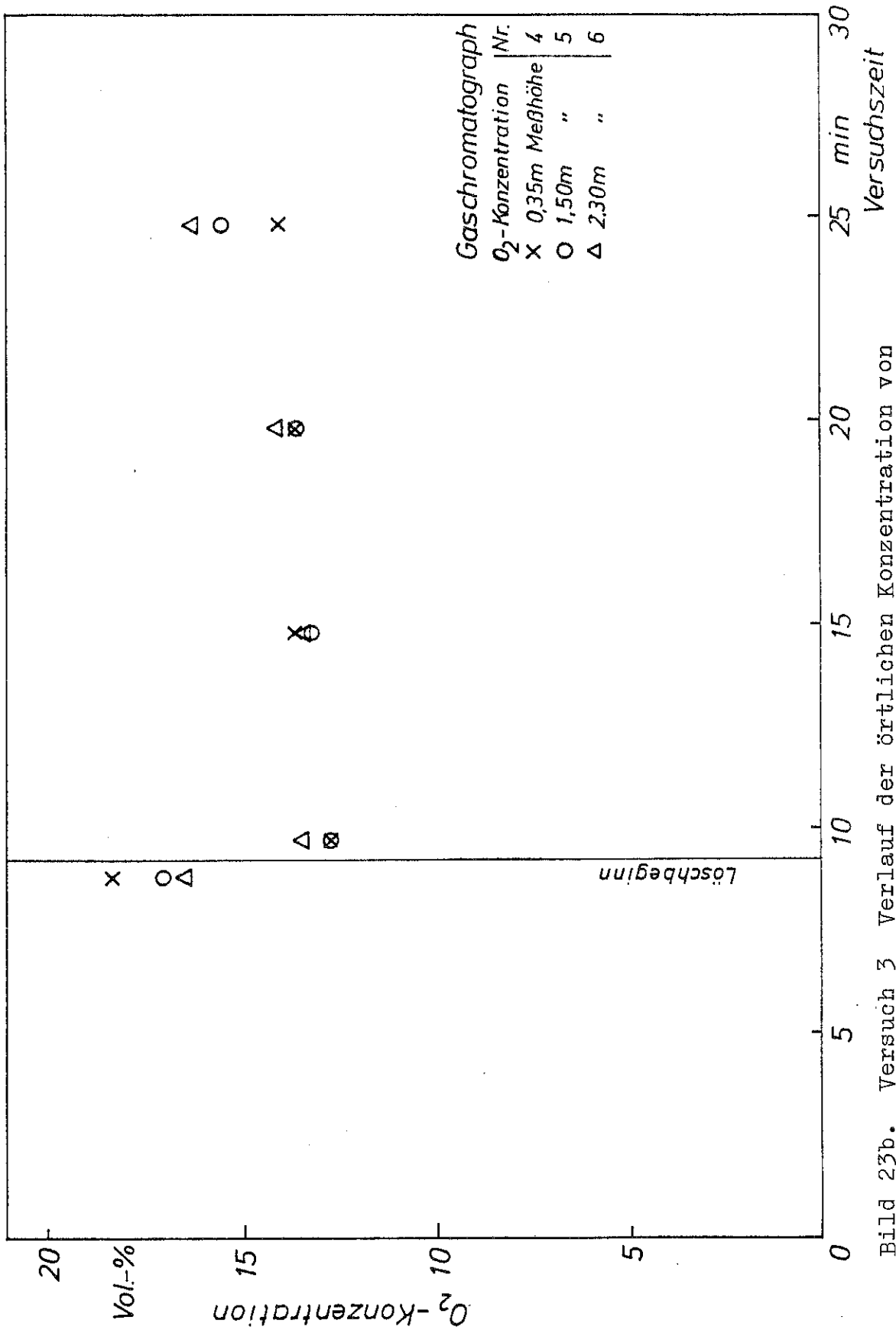


Bild 23b. Versuch 3 Verlauf der örtlichen Konzentration von O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

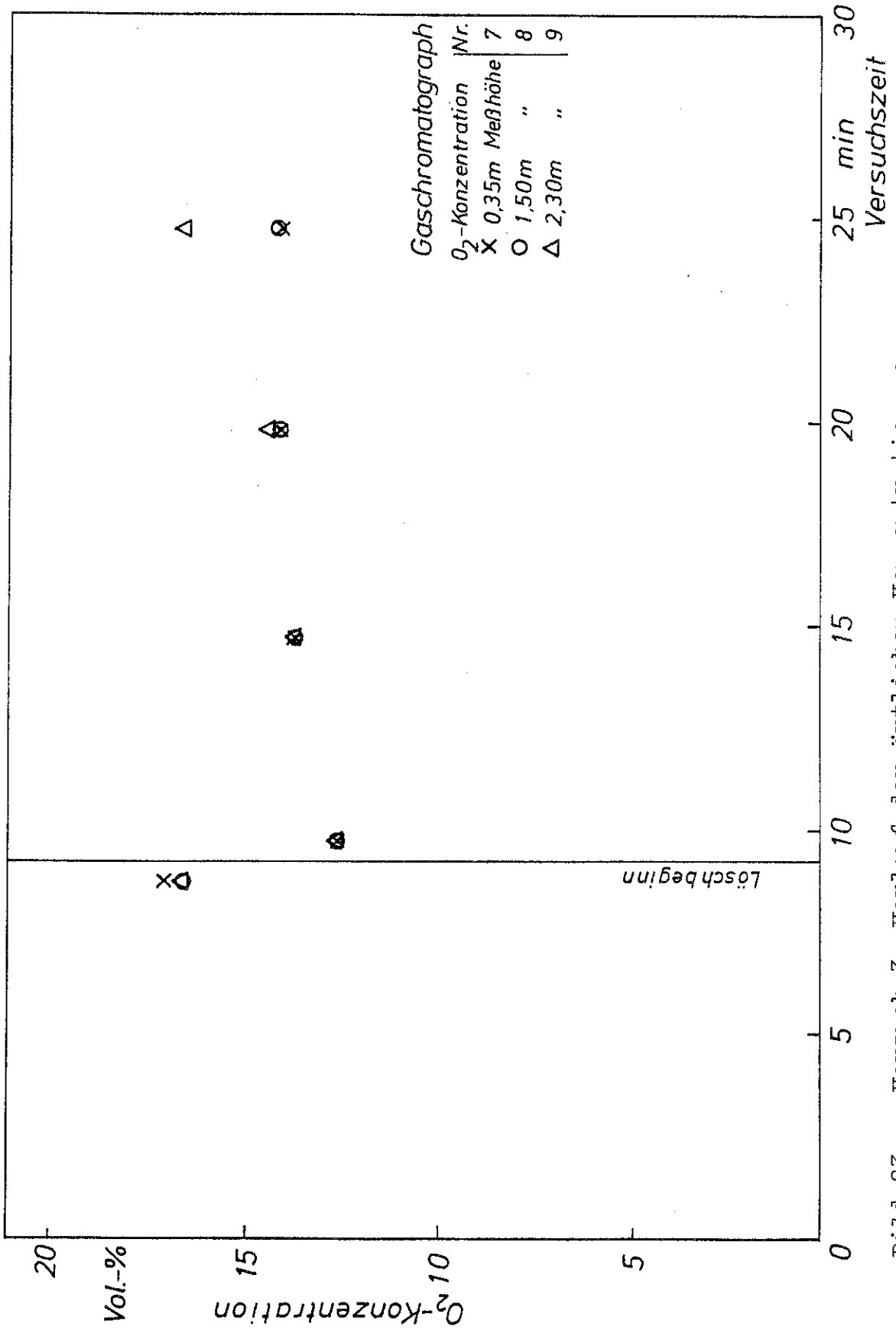


Bild 23c. Versuch 3 Verlauf der örtlichen Konzentration von O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

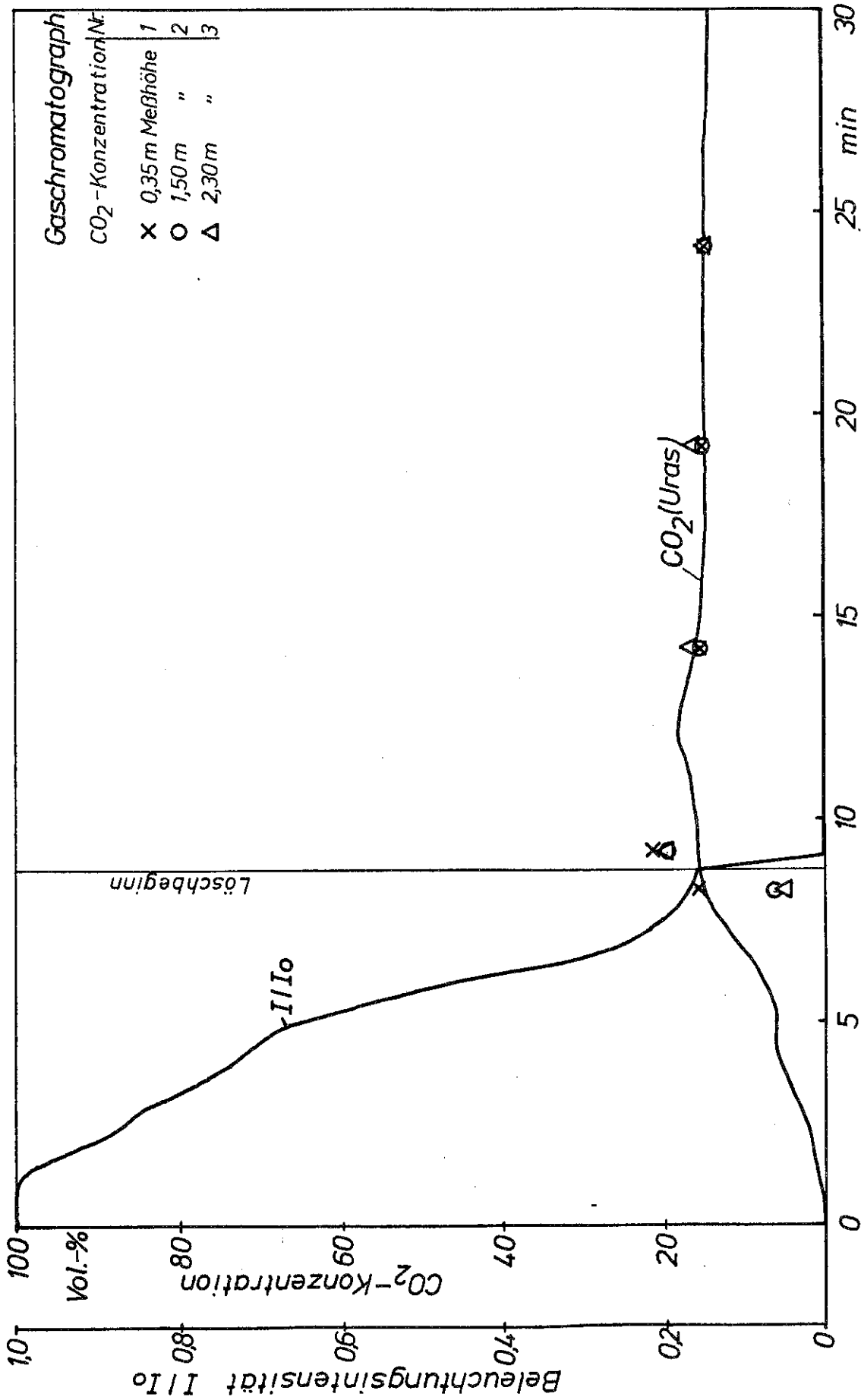


Bild 24a. Versuch 4 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ und der Beleuchtungsintensität I/I_0 in Abhängigkeit der Versuchszeit.

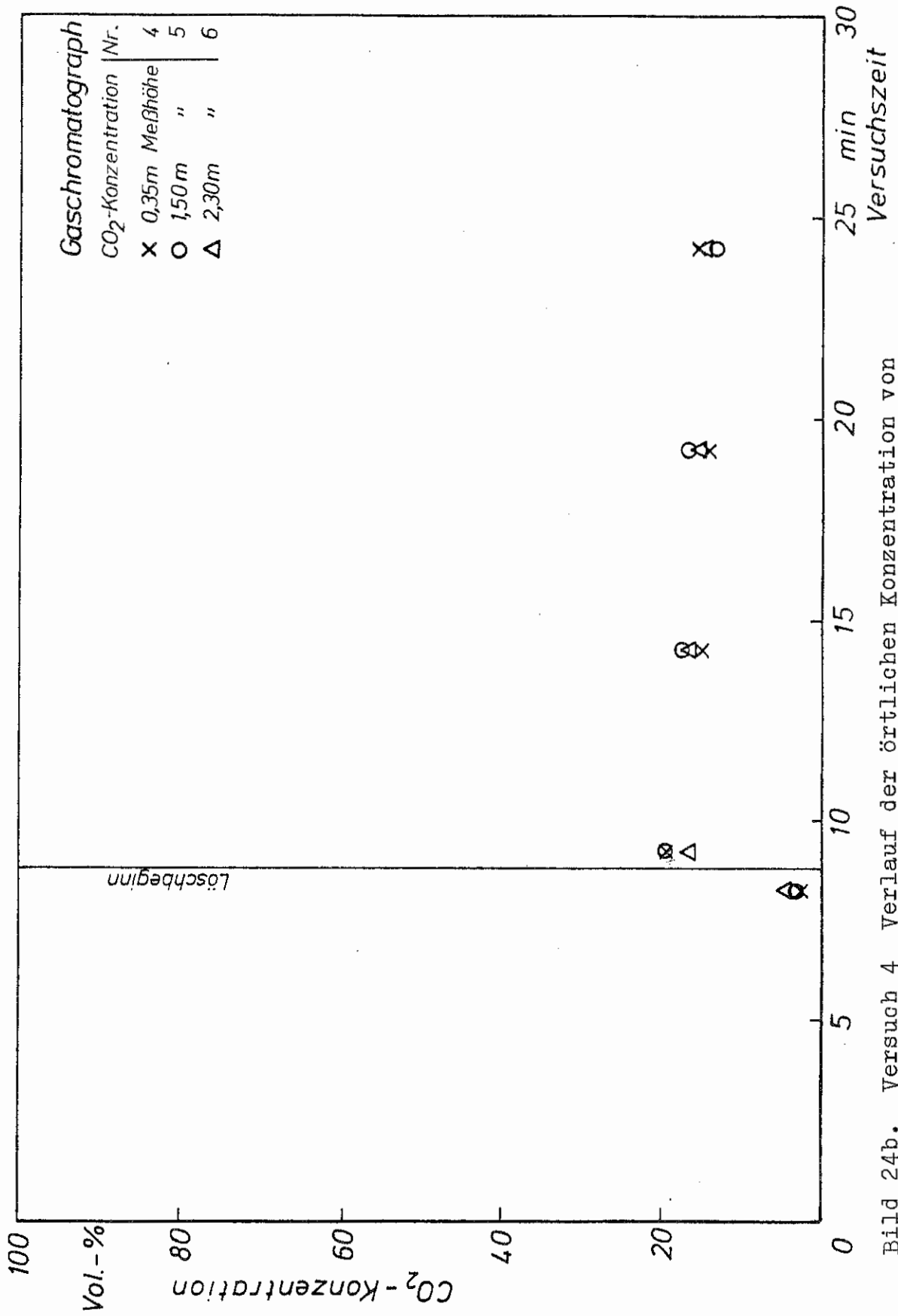


Bild 24b. Versuch 4 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

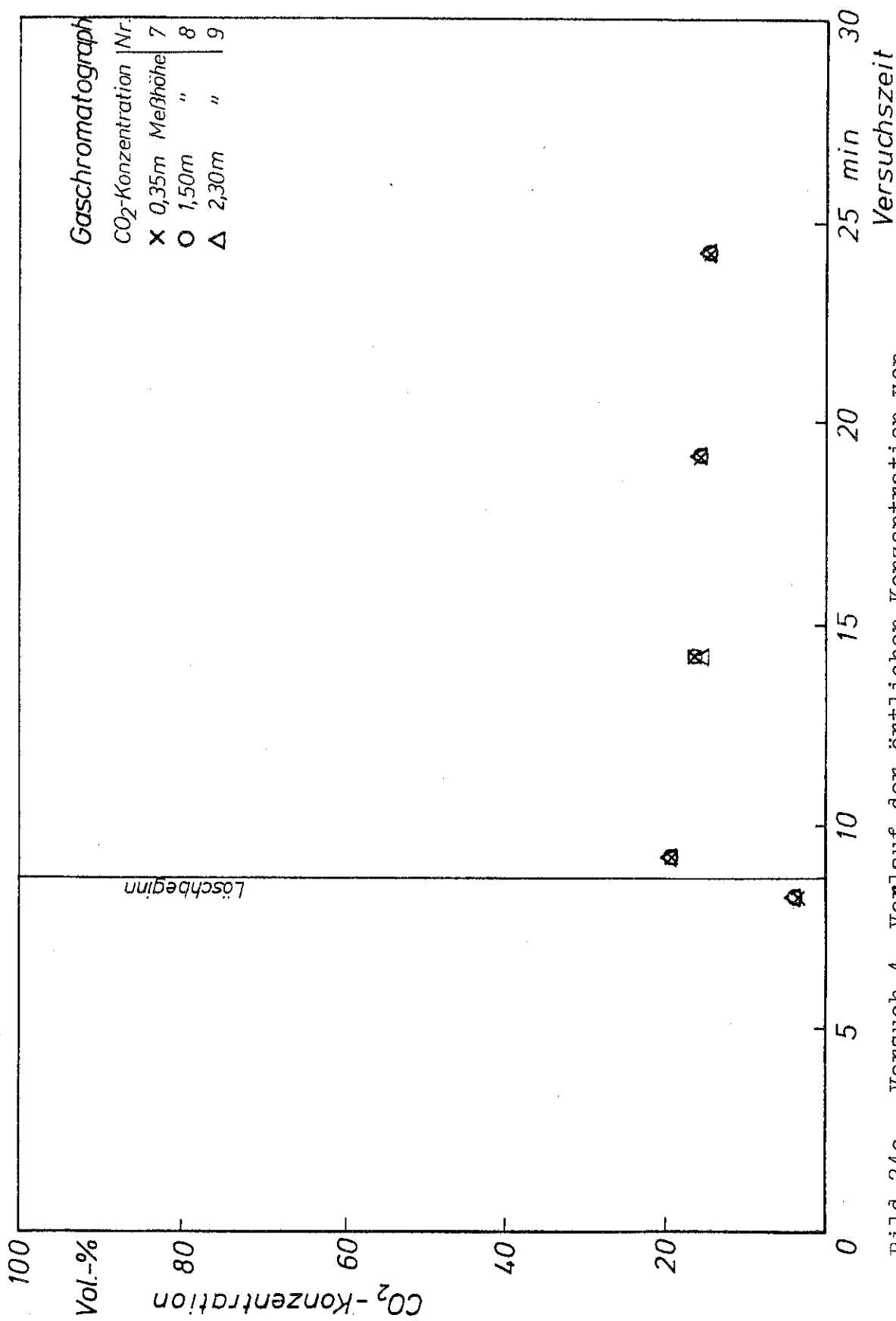


Bild 24c. Versuch 4 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

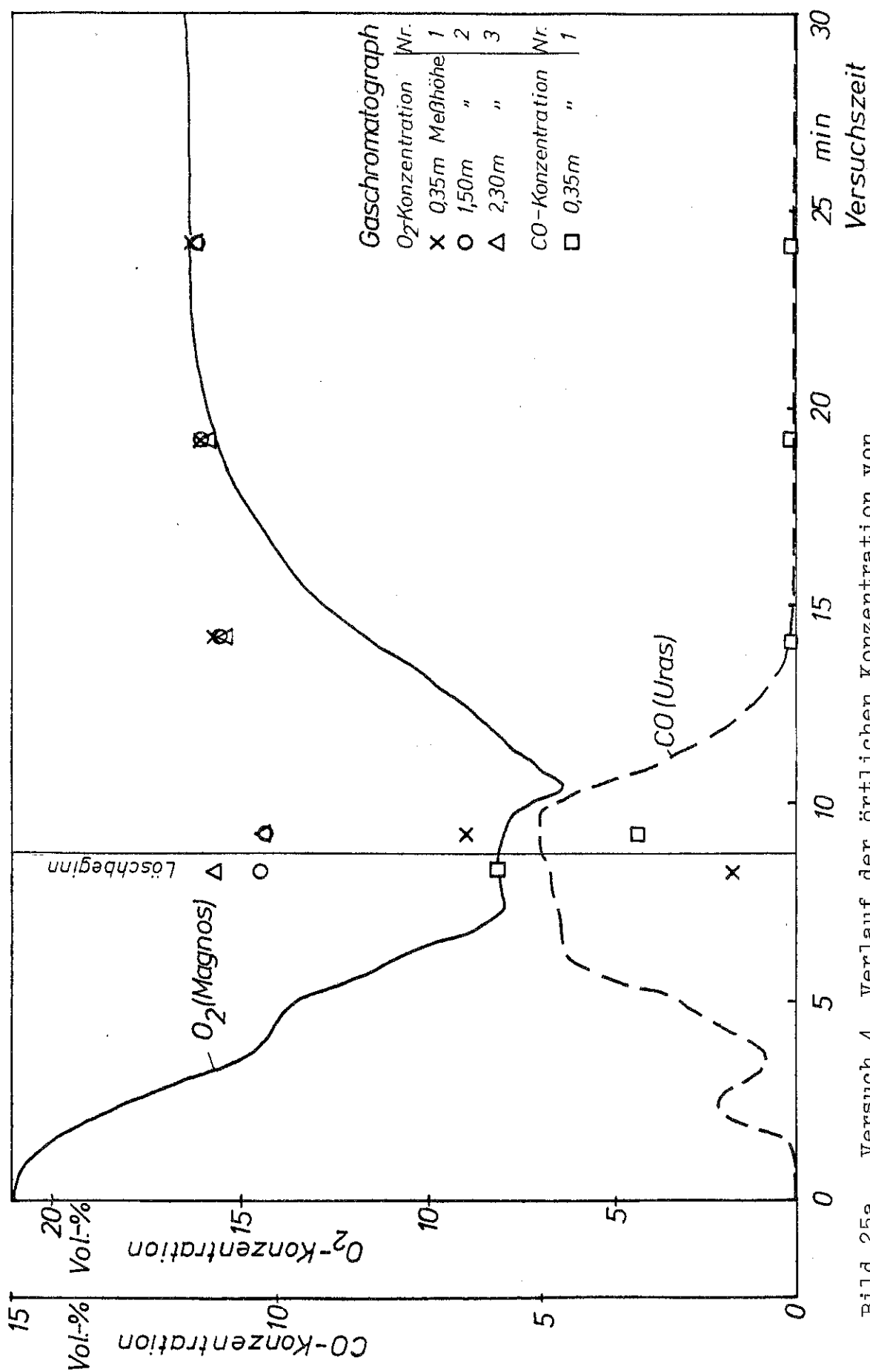
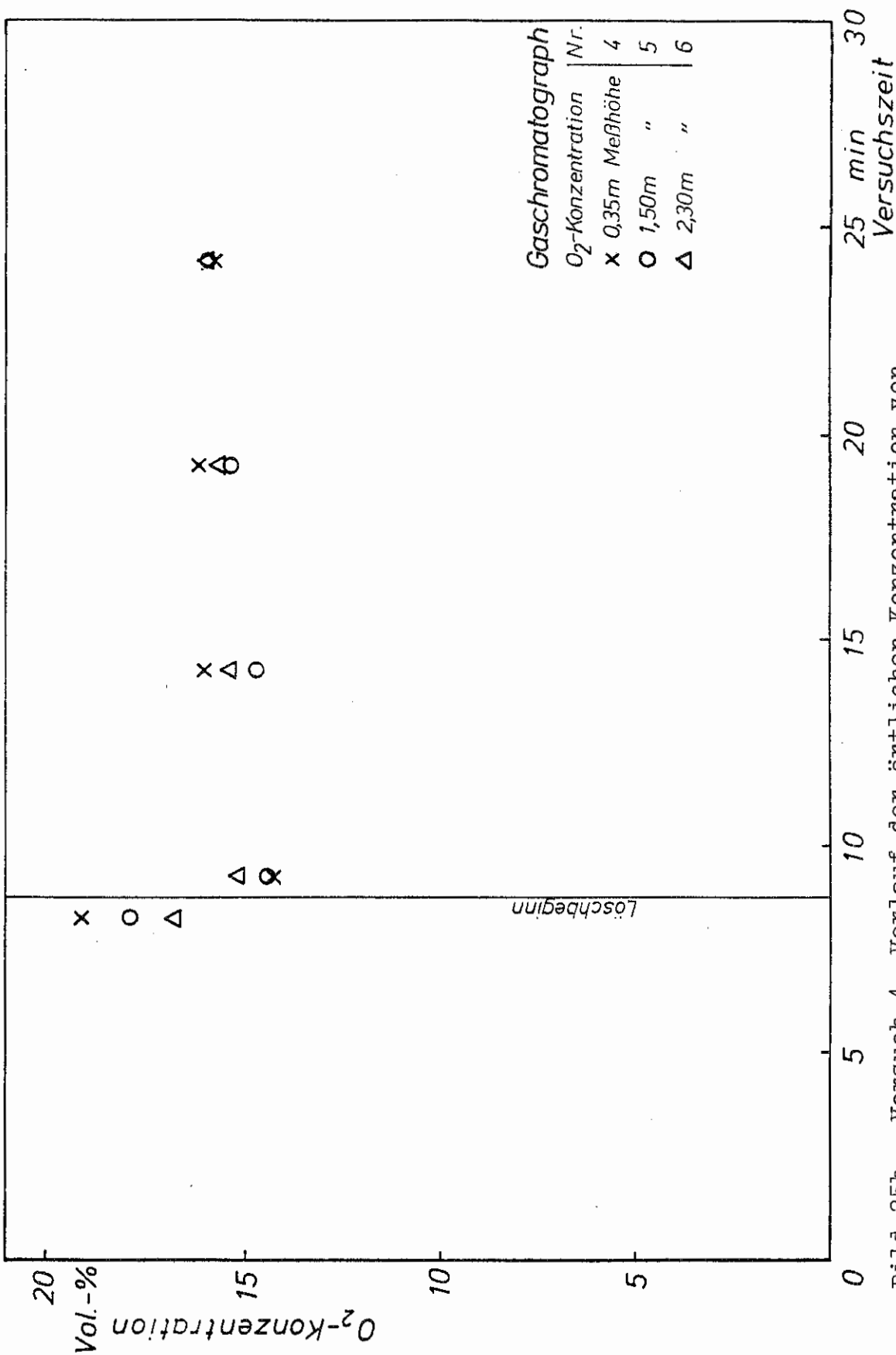


Bild 25a. Versuch 4 Verlauf der örtlichen Konzentration von CO und O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.



Gaschromatograph

O ₂ -Konzentration	Nr.
x 0,35m Meßhöhe	4
o 1,50m "	5
Δ 2,30m "	6

Bild 25b. Versuch 4 Verlauf der örtlichen Konzentration von O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.

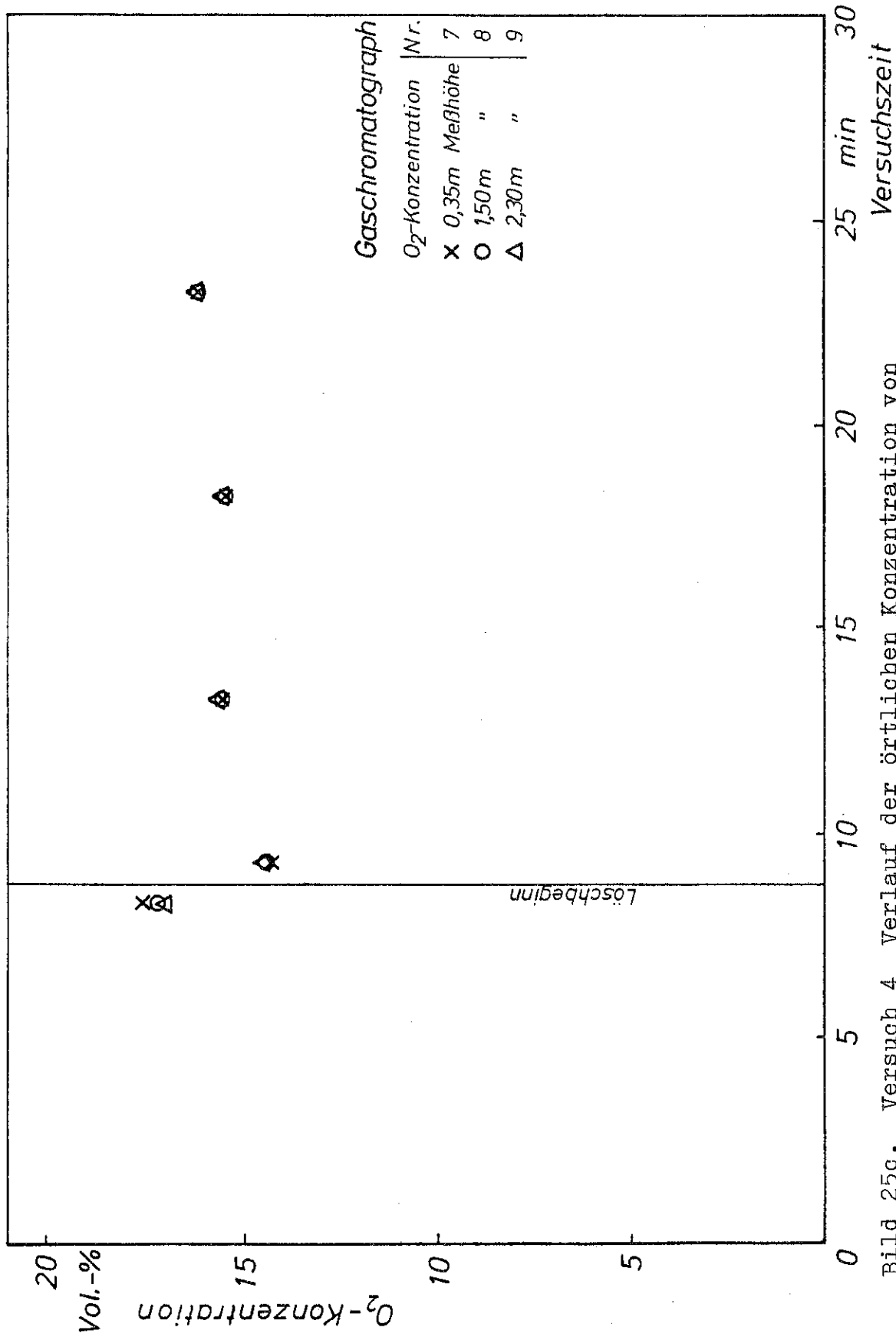


Bild 25c. Versuch 4 Verlauf der örtlichen Konzentration von O₂ in Abhängigkeit der Versuchszeit.