

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln.

Teil 8: Löschwirksamkeit von Kohlendioxid, Halon 1211 und  
Halon 1301 bei einem Entstehungsbrand mit festen und  
flüssigen Brandstoffen und permanenter Wärmequelle.

**47**

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

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer  
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Forschungsbericht Nr.47

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Lösch-  
mitteln.

Teil 8: Löschwirksamkeit von Kohlendioxid,  
Halon 1211 und Halon 1301 bei einem  
Entstehungsbrand mit festen und  
flüssigen Brandstoffen und permanenter  
Wärmequelle.

von

Dipl.-Ing.Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

September 1982

FA.Nr.90(2/81)

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. VERSUCHSANLAGE UND MESSEINRICHTUNG	2
3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	4
4. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	6
4.1 Temperatur	6
4.2 Druck	15
4.3 Gaskonzentration	21
4.3.1 Kontinuierliche Gasanalyse	21
4.3.2 Pyrolyseprodukte	27
4.4 Optische Rauchdichte	28
4.5 Vergleich der Löschmittelmengen	29
5. ZUSAMMENFASSUNG	30
6. LITERATURVERZEICHNIS	32
7. TABELLEN UND BILDER	33

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die durch Brände verursachten Schäden sind oft so hoch, daß immer mehr gefordert wird, ortsfeste Löschanlagen zu installieren, die die Möglichkeit bieten, noch vor dem Eintreffen von Feuerwehreinheiten und unabhängig vom Bedienungspersonal, Brände im Entstehungsstadium zu bekämpfen bzw. zu löschen.

Bei ortsfesten Löschanlagen werden als Löschmittel sowohl Wasser als auch die gasförmigen Löschmittel Kohlendioxid und Halon eingesetzt. Beim Einsatz gasförmiger Löschmittel besteht der Vorteil darin, daß keine Folgeschäden durch das Löschmittel auftreten. Um einen Löscherfolg zu gewährleisten, muß Kohlendioxid im Brandfall in einer solchen Konzentration eingesetzt werden, daß in einer derartigen Atmosphäre Personen nicht mehr atmen können. Der Einsatz von Halon führt dagegen in einer wesentlich geringeren Konzentration zum Löscherfolg, so daß nach den vorgegebenen Richtlinien /1,2/ auch mit Personen besetzte Räume geflutet werden können.

Die bisherigen Arbeiten /3,4,5/ wurden weitergeführt. Die hier verwendeten festen und flüssigen Brandstoffe wurden durch eine im Modellversuchsraum sich befindende Wärmequelle aus glühenden Heizdrähten gezündet. Diese elektrische Wärmequelle blieb während der gesamten Versuchszeit eingeschaltet. Ziel der Untersuchungen war es, festzustellen, ob nach dem Löscheinsatz mit den gasförmigen Löschmitteln Kohlendioxid und Halon bei eingeschalteter elektrischer Wärmequelle bei den verwendeten Brandstoffen eine Rückzündung in der Löschatmosphäre möglich ist. Bei diesen Versuchen war zu erwarten, daß die Löschmittelkonzentrationen für einen Löscherfolg wegen der zugeschalteten Wärmequelle wesentlich höher liegen als bei den früheren Untersuchungen ohne zusätzliche Wärmequelle.

## 2. VERSUCHSANLAGE UND MESSEINRICHTUNG

Im nachfolgend beschriebenen Modellversuchsraum wurden bereits Untersuchungen durchgeführt. Bei einer Grundfläche von 1,00 m x 1,20 m und einer Höhe von 1,20 m besitzt der Raum ein Volumen von 1,45 m<sup>3</sup>. In einem Gerüst aus Winkeleisen sind feuerbeständige Mineralfaserplatten mit einer Dicke von 15 mm eingesetzt. Unterhalb der Modellraumdecke befindet sich in einer Ecke ein Abzug, der mit einer Klappe verschlossen werden kann. In Bodenmitte sind außer der vorhandenen verschließbaren Öffnung mit dem Durchmesser von 11 cm zusätzlich 8 durch eine Klappe verschließbare Öffnungen mit einer Gesamtfläche von 800 cm<sup>2</sup> angebracht, damit für die Verbrennung genügend Frischluft zugeführt werden kann. In den 4 Ecken der Decke sind Öffnungen von je 15 cm x 15 cm angebracht. Diese werden durch lose aufliegende Mineralfaserplatten mit Asbestschaum auf der Unterseite von außen verschlossen. Aufgrund ihres Eigengewichts geben diese Platten die Öffnungen erst bei einem Überdruck im Versuchsraum von mehr als 200 Pa frei. Ein Wegschleudern wird durch elastische Verbindungen verhindert. Bei größeren Druckänderungen im Raum, wie es bei Verpuffungen der Fall ist, werden diese Platten angehoben und somit der Druck abgebaut. Durch eine Sichtscheibe der Größe 60 cm x 70 cm in der Seitenwand können die Untersuchungen im Modellraum beobachtet werden. Durch eine verschließbare Öffnung der Größe 80 cm x 80 cm in der Frontseite kann innerhalb des Raumes gearbeitet werden (Bild 1).

Im Versuchsraum werden örtliche Temperaturen an 14 Meßstellen mit Mantel-Thermoelementen aus Chromel-Alumel mit einem Durchmesser von 1 mm gemessen. Bild 2 zeigt eine Anordnung der Meßstellen.

Ebenso wie bei früheren Untersuchungen wurden auch bei diesen Versuchen Druckmessungen durchgeführt, um genaueren Aufschluß über die Druckverhältnisse während des Brand- und Löschvorganges

zu erhalten. Die im Versuchsraum durch Temperatur- und Dichteunterschiede sowohl vor als auch nach dem Löscheinsatz auftretenden Druckverhältnisse werden mit Druckaufnehmern in 5 Raumhöhen aufgenommen (Bild 2). Es handelt sich dabei um Differenzdrücke gegenüber einer außerhalb des Versuchsraumes liegenden Vergleichsmeßstelle, d.h. zu Versuchsbeginn herrscht der Druck Null.

Um die Sichtverhältnisse im Versuchsraum besser beurteilen zu können, wird die optische Rauchdichte bestimmt. Als Maß für die optische Rauchdichte wird ein Lichtstrahl der Intensität  $I_0$  verwendet, der durch Rauchgaspartikel und/oder Löschmittel im Lichtstrahlengang auf einen niedrigeren Wert  $I$  abgeschwächt wird. Die Anordnung ist aus Bild 2 ersichtlich.

Die kontinuierliche Analyse der Gaskonzentrationen erfolgt mit Analysengeräten für Halon 1211 und Halon 1301 (Binos), Kohlendioxid und Kohlenmonoxid (Uras) und Sauerstoff (Magnos). Die Gase werden über Membranpumpen und vorgeschaltete Filter den Analysengeräten zugeführt.

Nach dem Löschmitteleinsatz von Halon 1211 und Halon 1301 entstehen im Brandraum Pyrolyseprodukte der Halone. Die Analyse von Pyrolysegasen erfolgte mit Prüfröhrchen. Die Gase werden mit Handpumpen über eine mit Teflon ausgekleidete Sonde den Prüfröhrchen zugeführt.

Das Löschmittel wird aus einer Vorratsflasche entnommen und über eine Löschdüse in der Mitte der Decke in den Versuchsraum eingeleitet (Bild 1). Das Öffnen und Schließen der Löschmittelzuleitung erfolgt derart, daß ein pneumatischer Antrieb über ein durch einen elektronischen Impulsgeber gesteuertes Magnetventil ausgelöst wird. Die Löschmittelmenge wird durch Wiegen der Druckflasche auf einer elektronischen Waage festgestellt.

die Registrierung der Meßwerte erfolgt mit einem Datenübertragungsgerät an einen Prozeßrechner. Mit Hilfe von Programmen werden die Meßwerte auf Disketten aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

### 3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die vorliegende Arbeit umfaßte 24 Versuche. In den Tabellen 1 und 2 sind die wichtigsten Daten sämtlicher Versuche aufgeführt, wie Löschmittel, Brandgut, Brandlast, Brandlast je m<sup>3</sup> Raum, Zeit bis zum Zünden, Vorbrennzeit, Löschbeginn, Flutungszeit, Löschmittelmenge, Löschmittelmenge je m<sup>3</sup> Raum, mittlere Löschmittelkonzentration, Löscherfolg, Rückzündung. Als fester Brandstoff wurde Holz in Form von Krippen (K) und als flüssige Brandstoffe wurden Spiritus (S) und Heizöl (H) verwendet. Über ein Füllrohr (Bild 1) konnten die flüssigen Brandstoffe nachgefüllt werden, sodaß gewährleistet war, daß zum Rückzünden noch flüssiger Brandstoff in der Wanne vorhanden war.

Die Brandstoffe wurden bereits bei früheren Untersuchungen /3,4,5/ eingesetzt, sodaß Vergleichsmöglichkeiten bestehen. Allerdings wurde Polyurethan-Weichschaum in diese Untersuchungen nicht einbezogen, da Vorversuche gezeigt haben, daß nach dem Ausgasen und/oder Abbrennen eine Rückzündung nicht eintritt.

Auf Bild 3 sind für die Brandstoffe Holzkrippe, Spiritus und Heizöl typische Flammen dargestellt. Das linke Bild zeigt die Flamme beim Verbrennen einer Holzkrippe. In der Mitte ist eine Spiritusflamme und rechts eine typisch flackernde Heizölflamme zu sehen. Die Flammenfotos wurden jeweils bei geöffneter Frontklappe und eingeschaltetem Abzugsventilator fotografiert, sodaß kaum Rauch zu sehen ist.

Auf Bild 4 ist eine Holzkrippe vor und nach erfolgreichem Löscheinsatz dargestellt. An der gelöschten Holzkrippe ist deutlich zu erkennen, daß, insbesondere an den Ecken der Krippe bzw. Enden der Einzelstäbe, das Holz noch nicht verbrannt war.

Zur Zündung wurde nicht wie bei den früheren Versuchen /3,4,5/ Spiritus verwendet, sondern im Versuchsraum eine aus glühenden Teilen bestehende Wärmequelle installiert. Voruntersuchungen mit vorhandenen Heizplatten führten zu keinem befriedigenden Ergebnis. So reichte z.B. die Heizleistung der Platten nicht aus oder die Temperaturverteilung der Platten war zu unterschiedlich. Außerdem konnte der Brandstoff nur auf die Plattenoberfläche gestellt werden, sodaß Flüssigkeiten nicht gezündet werden konnten.

Die für die weiteren Untersuchungen verwendete Wärmequelle bestand aus 3 Heizspiralen (Sonnenheizkörper) mit einem 220 V-Anschluß und einer max. Leistung von je 1000 W. Durch einen vorgeschalteten Transformator konnte die Spannung stufenlos geregelt werden. Die folgenden Versuche wurden mit einer Spannung von 150 V (680 W) durchgeführt, da bei Vorversuchen festgestellt wurde, daß diese Einstellung ausreichend war, um die Brandstoffe zu entzünden. Die Anordnung dieser Wärmequelle erlaubte es, das Brandgut sowohl über als auch unter den Heizspiralen anzuordnen. Auf Bild 4 ist die Anordnung deutlich zu erkennen.

Der Löschmitteleinsatz erfolgte bei allen Bränden nach einer Vorbrennzeit von etwa 2,5 min, was bei den hier verwendeten Holzkrippen einem Abbrand von ca. 20 Gew.-% entsprach. Nach dieser Zeit war zum einen eine starke Verbrennung erreicht und zum anderen noch genügend Brandstoff vorhanden, sodaß die Möglichkeit bestand, daß der Brandstoff nach einem erfolgreichen Löscheinsatz evtl. rückgezündet wird.

Bei Löschbeginn wurden die Zuluftöffnungen im Boden und die Klappe im Abzug geschlossen, um zu vermeiden, daß das Löschmittel aus dem Versuchsraum entweicht.

Bei den Untersuchungen wurden die Löschmittel Kohlendioxid, Halon 1211 und Halon 1301 eingesetzt. Der Druck in den Vorratsbehältern betrug bei Kohlendioxid ca. 56 bar, bei Halon 1211 ca. 15 bar und bei Halon 1301 ca. 25 bar.

Beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel wurden Konzentrationen von ca. 10 Vol.-% bis ca. 30 Vol.-% verwendet. Die beiden Halone wurden in einer Konzentration von ca. 2 Vol.-% bis ca. 14 Vol.-% eingesetzt. Die Volumenkonzentrationen wurden nach /1,2/ berechnet und sind in Tabelle 1 und 2 aufgeführt.

#### 4. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

##### 4.1 Temperatur

Um einen Überblick über das Abbrandverhalten von Krippen (K), Spiritus (S) und Heizöl (H) vor dem Löscheinsatz zu erhalten, sind auf den Bildern 5 und 6 die örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 (siehe Bild 2) dargestellt. Dabei wurde jeweils ein repräsentativer Versuch ausgewählt und die Temperaturverläufe vom Einschalten der Heizspiralen bis zum Löscheinsatz aufgetragen. Der Löszeitpunkt ist in diesen und allen folgenden Bildern durch eine senkrechte Linie gekennzeichnet. In der oberen Reihe wurde eine Holzkrippe als Brandstoff, in der mittleren Reihe Spiritus und in der unteren Reihe Heizöl als Brandstoff verwendet.

Bei den Temperaturen an den Meßstellen T1 und T2 ist zu beachten, daß sich die beiden Thermoelemente T1 und T2 zwar immer am gleichen Ort befanden, aber die Holzkrippen als Brandstoff über den Heizspiralen und die flüssigen Brandstoffe Spiritus und Heizöl unter den Heizspiralen angeordnet waren, sodaß das Thermoelement T1 sich entweder unter oder über dem Brandstoff befand.

Anhand der Temperaturkurven ist zu erkennen, daß beim Einschalten der Heizspiralen die Temperatur in der Raummitte an den Meßstellen T1 und T2 sofort ansteigt, während an den Meßstellen T3 bis T14 erst nach mehreren Minuten eine geringfügige Temperaturerhöhung sichtbar wird. Temperaturunterschiede beim Anheizvorgang können auf eine mehrmalige Benutzung der Heizspiralen

und die dadurch auftretenden Alterungserscheinungen sowie auf durch Korrosion bedingte Veränderungen zurückgeführt werden.

Wie die Bilder zeigen, ist bei gleicher Leistung von ca. 2 kW von den verwendeten Brandstoffen eine Holzkrippe am schwersten zu entzünden und Spiritus am leichtesten. Dies rührt daher, daß die Bildung brennbarer Gase durch Pyrolysevorgänge bei Holzkrippen etwas länger dauert. Dabei bildet sich zunächst an den Kanten Glut, bevor es zum Durchzünden kommt. Bei den Flüssigkeiten bildet sich durch die aufsteigenden heißen Dämpfe schneller ein zündfähiges Gemisch.

Beim Zünden der Brandstoffe steigt die Temperatur an allen Meßstellen steil an. Davon ausgenommen sind die Meßstellen in Bodennähe an der Wand (T6, T10) und die Meßstelle T1 bei den Versuchen mit Holzkrippen, die vom Abbrennen der Krippe im Gegensatz zum Abbrennen der Flüssigkeiten fast unbeeinflusst bleibt. Über dem Brandherd werden max. Temperaturen von 800 °C bis 1000 °C gemessen, die mit zunehmender Höhe und seitlichem Abstand abnehmen. Aufgrund der etwas größeren Flammenlänge und höheren Wärmestrahlung sind die Temperaturen bei den Versuchen mit Holzkrippen an den Meßstellen in Decken- und Wandnähe etwas höher. Die Temperaturen in Wandnähe nehmen von unten nach oben zu und erreichen ihren Maximalwert bei Holzkrippen bei ca. 300 °C und bei den Flüssigkeiten bei ca. 180 °C. Dies bedeutet, daß die heißen Rauchgase während der Brandphase senkrecht nach oben strömen und sich unter der Decke ausbreiten.

Die Bilder 7 bis 14 zeigen den zeitlichen Verlauf der örtlichen Temperaturen aller 24 Versuche an sämtlichen Meßstellen. Die Temperaturverhältnisse sind abhängig von der Zeit und von der Art und Menge der eingesetzten Löschmittel. Die Bilder sind so aufgeteilt, daß bei gleichem Löschmittel jeweils in der oberen Reihe die Versuche mit Holzkrippen, in der mittleren Reihe die Versuche mit Spiritus und in der unteren Reihe die Versuche mit Heizöl aufgetragen sind. Die beiden linken Spalten beinhalten

die Temperaturverläufe in der Raummitte (T1 bis T5) und die beiden rechten Spalten die Temperaturverläufe an der Wand und im Abzug (T6 bis T14). Die Art des Löschmittels und die rechnerisch ermittelte Löschmittelkonzentration ist jeweils auf den Bildern eingetragen. Durch die Eingabe des Löschmittels werden alle Flammen gelöscht, was einen Temperaturabfall an allen Meßstellen zur Folge hat. Lediglich die Meßstelle T1 bei den Versuchen mit Holzkrippen bleibt davon unberührt. Die Temperaturen an den Meßstellen T6, T7 und T10 steigen sogar etwas an, da durch das Eindüsen des Löschmittels die heißen Rauchgase nach unten gedrückt werden.

Auf Bild 7 sind die örtlichen Temperaturen T1 bis T14 beim Einsatz von ca. 11 Vol.-% CO<sub>2</sub> als Löschmittel eingetragen. Bei Holzkrippen als Brandstoff ist es nicht möglich, den Brand mit dieser CO<sub>2</sub>-Konzentration sofort abzulöschen, d.h. die Flammen werden zwar etwas eingedämmt, bleiben aber erhalten und die glühenden Holzteile bleiben unbeeinflusst. Nach einer Versuchszeit von 15 min waren die Flammen erloschen, nur Glut war übrig. Nach kurzem Öffnen der Zuluftklappe und der Abzugsklappe mit eingeschaltetem Ventilator entstanden neue Flammen. Nach dem Schließen beider Klappen nach einer Branddauer von 1,5 min gingen die Flammen wieder aus. Nach einer Versuchszeit von ca. 20 min waren nur noch verkohlte Holzreste vorhanden, die nicht mehr gezündet werden konnten, sodaß die Heizspiralen abgeschaltet wurden.

Bei Spiritus als Brandstoff (Bild 7) kann der Brand ebenfalls nicht gelöscht werden. Die Temperaturen fallen beim Eindüsen nur momentan ab, um dann sofort wieder anzusteigen. Die Flammen gingen erst aus, als der Spiritus in der Wanne verbrannt war, was nach ca. 9 min eintrat.

Auch Heizöl (Bild 7) konnte mit einer Löschmittelkonzentration von ca. 11 Vol.-% Kohlendioxid nicht abgelöscht werden. Nach einer Versuchszeit von 15 min wurde Heizöl in die

Wanne nachgefüllt (s. Bild 1), das 30 s später aufgrund der Wärmequelle bei geschlossenen Klappen wieder zündete. Es bildeten sich teils Flammen, teils wurden kleinere Verpuffungen beobachtet, was anhand der Temperaturkurven ebenfalls deutlich zu erkennen ist. Nach einer Versuchszeit von ca. 25 min war das Feuer aus. Durch das Öffnen beider Klappen wurde Luft zugeführt, sodaß sich nach weiteren 5 min das restliche Heizöl erneut entzündete und ausbrannte.

Das Eindüsen von ca. 17 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 8) in den Versuchsraum bewirkte bei den Holzkrippen, daß die Flammen erstickten, d.h. die hohen Temperaturen fallen ab. In der Krippe war jedoch, unterstützt von den Heizspiralen, noch genügend schwelende Glut vorhanden, die aber erst durch die Luftzufuhr beim Öffnen beider Klappen nach einer Versuchszeit von 26 min wieder rückzündete, wobei das restliche Holz verbrannte.

Im Falle von Spiritus als Brandstoff (Bild 8) wird der Brand im ersten Moment gelöscht, die Temperatur fällt an allen Meßstellen stark ab, erreicht aber wenige Augenblicke später ihren alten Wert. Dies bedeutet, daß der verdampfte Spiritus weiterbrannte bis die Wanne leer war.

Wird Heizöl als Brandstoff verwendet (Bild 8), fällt die Temperatur beim Löscheinsatz ebenfalls kurzzeitig ab und steigt nach ca. 20 s wieder an, d.h. das Heizöl brennt mit einer Flamme weiter, die etwas kleiner ist als beim Einsatz von ca. 11 Vol.-%  $\text{CO}_2$ , aber erst wegen Brennstoffmangel nach ca. 13 min erlischt. Auch durch das Nachfüllen von Heizöl nach ca. 15 min tritt keine Rückzündung auf, die Temperatur im gesamten Raum fällt ab. Um nachzuweisen, daß die Möglichkeit einer Rückzündung besteht, wurden nach einer Versuchszeit von 28 min beide Klappen geöffnet, sodaß Luft in den Versuchsraum einströmen konnte. Da die Wärmequelle ständig angeschaltet war, wurde außerdem genügend Wärme freigesetzt, sodaß nach einer kleinen Verzögerung das Heizöl

zündete und die Temperatur im Raum stark anstieg. Sobald die Flamme erlosch, fiel die Temperatur wieder ab.

Bei den Versuchen auf Bild 9 wurden Löschmittelkonzentrationen von ca. 24 Vol.-% Kohlendioxid verwendet. Bereits bei Holzkrippen als Brandstoff ist zu erkennen, daß der Einsatz einer höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentration die Temperaturen in der Raummitte schneller abfallen läßt. Eine Rückzündung mit Flammen trat innerhalb der gesamten Versuchszeit nicht mehr auf, d.h. die  $\text{CO}_2$ -Konzentration war so hoch, daß während des Versuches die Glut erloschen war. Die Krippe war nach einer Versuchszeit von 36 min in ihrem Gerüst noch vollständig erhalten, Hier wäre eine nochmalige Zündung zu einem früheren Zeitpunkt wie beim Versuch mit ca. 17 Vol.-%  $\text{CO}_2$  sicher möglich gewesen, wenn durch das Öffnen beider Klappen Luft zugeführt worden wäre.

Wurde der Löscheinsatz bei einer Spiritusflamme mit ca. 24 Vol.-%  $\text{CO}_2$  durchgeführt (Bild 9), so wurde die Flamme zunächst gelöscht, was am Temperaturabfall zu erkennen ist. Nach ca. 1 min zündete der in der Wanne verbliebene Spiritus wieder und die Temperatur im Raum stieg an. Sie fiel ab, als die Wanne leer war. Das Nachfüllen von Spiritus nach ca. 15 min bewirkte zunächst nichts, die Temperatur im Raum blieb konstant. Nach einer Versuchszeit von 20 min jedoch zündete der verdampfte Spiritus schlagartig, die Druckentlastungsklappen öffneten sich kurzzeitig und die Temperatur im Raum stieg wieder steil an. In weniger als 1 min später war die von oben nach unten wandernde blaue Flamme, die zunächst den oberen Teil des Raumes erfüllte und dann auf der Wanne bzw. den Heizspiralen aufsaß, erloschen. Bild 15 verdeutlicht diesen Vorgang. Der Vorgang kann wie folgt erklärt werden. Nach dem Ablöschen sank das Kohlendioxid aufgrund seiner höheren Dichte nach unten ab, während die Dämpfe des durch die Heizspiralen erwärmten Spiritus nach oben stiegen und sich unterhalb der Decke sammelten. Die Zündung trat erst dann auf, als sich ein zündfähiges Gemisch gebildet hatte. Die Flamme wanderte anschließend nach unten, da durch die geänderten Strömungen sich

jetzt auch hier ein Spiritus/Luft-Gemisch entwickeln und anschließend entzünden konnte.

Bei gleicher Löschmittelkonzentration von ca. 24 Vol.-% CO<sub>2</sub> und Heizöl als Brandstoff (Bild 9) fällt die Temperatur an allen Meßstellen ab, der Brand war bis auf kleine Flammen gelöscht, die nach ca. 4 min völlig erloschen. Um sicher zu sein, daß zu diesem Zeitpunkt noch Heizöl in der Wanne war, wurde nach ca. 19 min nachgefüllt. Weitere 3 min später zündete das Heizöl wieder und brannte ca. 12 min in der Löschatmosphäre sehr heftig weiter. Das heißt, es mußte erst soviel Heizöl verdampfen bis sich ein zündfähiges Gemisch gebildet hatte.

Wurde zum Löschen eine mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 30 Vol.-% Kohlendioxid verwendet (Bild 10), so fiel bei Holzkrippen als Brandstoff die Temperatur im Raum ebenfalls stark ab. Die Glut blieb jedoch noch einige Minuten erhalten, erlosch dann und die Temperatur sank langsam weiter. Eine Rückzündung bei geschlossenen Klappen fand nicht mehr statt.

Auf Spiritus wirkte die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration (Bild 10) sofort. Die Temperatur sank beim Löscheinsatz an manchen Meßstellen sogar unter die Umgebungstemperatur ab. Bereits nach einer Versuchszeit von 10 min wurde Spiritus nachgefüllt, doch das Feuer blieb aus. Erst nach einer Versuchszeit von ca. 27 min gab es bei geschlossenen Klappen eine Rückzündung. Die Flammen schlugen bis unter die Decke des Raumes, die Druckentlastungsklappen sprachen an und Luft konnte dadurch in den Raum gelangen. Die Temperatur stieg steil an, um ca. 2 min später wieder abzufallen; der Spiritus war verbrannt.

Auch der Brandstoff Heizöl (Bild 10) wurde durch den Löscheinsatz mit 30 Vol.-% CO<sub>2</sub> sofort gelöscht, was am starken Temperaturabfall zu erkennen ist. Erst durch erneute Luftzufuhr beim Öffnen beider Klappen zündete durch die Wärmezufuhr der andauernd eingeschalteten Heizspiralen das Heizöl wieder und die Temperatur stieg steil an. Danach brannte das Heizöl langsam ab und die Temperatur sank.

Die Bilder 11 und 14 zeigen örtliche Temperaturkurven beim Ablöschen von Holzkrippen (K), Spiritus (S) und Heizöl (H) mit Halon 1211 und Halon 1301. Es wurden dabei mittlere Konzentrationen von ca. 2 Vol.-% bis ca. 14 Vol.-% verwendet. Die Heizspiralen blieben auch hier wieder während der gesamten Versuchsdauer eingeschaltet.

Der Löscheinsatz von ca. 2,5 Vol.-% Halon 1211 bei einer Holzkrippe (Bild 11) bewirkte einen raschen Temperaturabfall, d.h. die Flammen waren erloschen. Es ist jedoch auf dem Bild deutlich zu erkennen, daß auf Grund erhöhter Temperaturen noch Glut vorhanden sein mußte, die ca. 10 min später erlosch. Bei Beendigung des Versuches waren noch Holzreste vorhanden. Deshalb ist anzunehmen, daß eine Rückzündungsmöglichkeit bei Luftzufuhr, d.h. Öffnen beider Klappen, bis ca. 10 min nach dem Löscheinsatz bestanden hätte.

Bei Spiritus als Brandstoff (Bild 11) fiel beim Eindüsen die Temperatur im Brandraum bis auf die bodennahen Meßstellen kurz ab. Die Spiritusflamme erlosch jedoch nicht, sondern brannte bläulich weiter, bis nach völligem Abbrennen des Spiritus die Raumtemperatur abnahm.

Ähnlich wie bei Spiritus waren die Verhältnisse bei Heizöl (Bild 11), das ebenso nicht sofort abgelöscht werden konnte. Hier traten bis zum Ausbrennen stark pulsierende Flammen auf, was im Bild deutlich zu erkennen ist.

Das Eindüsen einer Konzentration von 4,5 Vol.-% Halon 1211 auf eine brennende Holzkrippe (Bild 12) brachte den erwarteten Temperaturabfall mit sich. Auch hier war noch Glut vorhanden, die bei dieser Halon 1211-Konzentration etwas schneller erlosch. Bei weiterer Erhöhung der Löschmittelkonzentration wurde lediglich diese Zeit etwas verkürzt.

Bei Spiritus als Brandstoff (Bild 12) wurde die Menge des zugeführten Löschmittels bis auf eine Konzentration von ca. 14 Vol.-% Halon 1211 gesteigert. Bei der Zugabe des Löschmittels erfolgte ein steiler Temperaturabfall, der auf einen Löscherfolg schließen ließ. Sowohl Versuche mit etwas geringeren Konzentrationen als auch dieser Versuch zeigten, daß eine Spiritusflamme mit bis zu 14 Vol.-% Halon 1211 nicht abgelöscht werden konnte, was durch die Sichtscheibe deutlich beobachtet werden konnte. Zwar ging die Flammenlänge stark zurück und die Färbung der Flamme war nur noch leicht hellblau, aber sie brannte weiter. Daß an den Temperaturmeßstellen kein Ausschlag angezeigt wurde, liegt daran, daß die kleine noch ca. 10 cm lange Flamme etwas seitlich von den Meßstellen brannte.

Beim Brandstoff Heizöl (Bild 12) war nach dem Löscheinsatz mit ca. 4,5 Vol.-% Halon 1211 noch eine erhöhte Temperatur festzustellen, was auf ein kurzes Aufflackern von Flammen schließen ließ, doch konnte wegen der großen Rauchentwicklung optisch keine Flamme beobachtet werden. Durch erneutes Nachfüllen war die Möglichkeit zur Rückzündung gegeben, die aber nicht erfolgte. Nach Versuchsende war noch Heizöl in der Wanne, das bei Luftzufuhr, d.h. Öffnen beider Klappen, sicherlich früher gezündet hätte.

Bei den Untersuchungen wurde auch das Löschmittel Halon 1301 eingesetzt. Die mittleren Löschmittelkonzentrationen wurden etwas niedriger gewählt als bei Halon 1211, um zusätzliche Zwischenwerte zu erhalten, da die Löschwirksamkeit beider Halone bei früheren Untersuchungen /4,5/ als sehr ähnlich beurteilt wurde.

Anhand der Temperaturverläufe ist zu erkennen, daß für eine Holzkrippe als Brandgut bereits eine Löschmittelmenge von ca. 2 Vol.-% Halon 1301 genügte (Bild 13), um die Flamme zu löschen. Allerdings war eine Einwirkdauer von einigen Minuten notwendig, um auch die Glut zum Erlöschen zu bringen.

Auch das Eindüsen von ca. 2 Vol.-% Halon 1301 auf eine Spiritusflamme (Bild 13) bewirkte einen steilen Abfall der Temperatur. Aber auch hier konnte die Flamme nicht gelöscht werden. Der Spiritus brannte mit sehr kleiner Flamme weiter bis keine Flüssigkeit mehr vorhanden war. Beim erneuten Einfüllen von Spiritus in die Wanne nach ca. 21 min brannte dieser sofort mit hellblauer kleiner Flamme weiter. Nach einer Versuchszeit von ca. 30 min war genügend Spiritus zusätzlich verdampft, sodaß das im Raum entstandene Gemisch bei geschlossenen Klappen trotz kleiner Flamme bis unter die Decke durchzündete und ausbrannte. Das Durchzünden ist am steilen Temperaturanstieg zu erkennen. An der Temperaturkurve nicht zu erkennen ist jedoch die während der gesamten Versuchszeit brennende kleine blaue Flamme.

Mit ca. 2 Vol.-% Halon 1301 war der Brandstoff Heizöl (Bild 13) nicht zu löschen. Bei der Eindüsung ging die Flamme nur momentan aus und erschien mit einer kleineren Verpuffung wieder. Dies war solange der Fall bis das Heizöl aufgebraucht war. Nach dem Nachfüllen zündete das Heizöl erst wieder, als die Klappen nach ca. 28 min geöffnet wurden und brannte aus.

Der Einsatz einer Konzentration von 3,5 Vol.-% Halon 1301 auf eine Holzkrippe als Brandstoff (Bild 14) unterscheidet sich in seiner Auswirkung auf den Temperaturverlauf nur unwesentlich von dem mit 2 Vol.-% Halon 1301, d.h. die Flamme erlischt sofort und die Glut nach einer Einwirkzeit von einigen Minuten. Das Öffnen der Klappen nach einer Versuchszeit von ca. 30 min bewirkt keine Rückzündung, sondern lediglich ein schnelleres Absinken der Temperatur im Raum.

Auch bei Spiritus als Brandstoff und ca. 14 Vol.-% Halon 1301 (Bild 14) ist kein Löscherfolg vorhanden. Der Spiritus brennt ebenfalls wie beim Einsatz von Halon 1211 als Löschmittel mit einer kleinen hellblauen Flamme weiter. In diesem Fall wurde kontinuierlich Spiritus nachgefüllt, sodaß die Wanne immer Spiritus enthielt. Nach einer Versuchszeit von 30 min wurde beobachtet, daß beim Abschalten der Heizspiralen die Flamme

sofort erlosch. Beim Wiedereinschalten zündete auch der Spiritus und brannte mit kleiner blauer Flamme weiter, was anhand der Temperaturkurven nicht zu ersehen ist.

Bei einem weiteren Versuch mit ca. 3,5 Vol.-% Halon 1301 als Löschmittel und Heizöl als Brandstoff (Bild 14) waren die Flammen nach kurzem Aufflackern gelöscht. Erst beim Öffnen der Klappen nach ca. 29 min zündete das Heizöl wieder wie an der Temperaturerhöhung zu erkennen ist. Etwa 10 s später wurden die Klappen wieder geschlossen. Trotz Löschmittelverlustes wurden die Flammen kleiner und gingen nach ca. 2,5 min wieder aus. Der Temperaturabfall zeigt dies deutlich. Nach erneuter Luftzufuhr durch Öffnen der Klappen zündete das Heizöl sofort wieder und brannte bis zum Ende der Versuchszeit aus.

#### 4.2 Druck

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur Drücke bis  $\pm 10$  Pa dargestellt, jedoch traten auch Druckspitzen von über 200 Pa auf. Auf den Bildern 16 bis 19 wurde der zeitliche Verlauf der örtlichen Druckdifferenzen an der unteren Meßstelle D1 und an der oberen Meßstelle D5 eingezeichnet. Die Werte an den Meßstellen D2 bis D4 sind nicht aufgeführt. Sie liegen zwischen denjenigen an der unteren und oberen Meßstelle.

Beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel befinden sich auf jedem Bild (Bilder 16 und 17) in einer Reihe jeweils 2 Versuche mit unterschiedlich hohen Konzentrationen. In jeder Spalte variiert der Brandstoff von der Holzkrippe über Spiritus zum Heizöl und die Meßstelle bleibt gleich. Die Bilder 18 und 19 zeigen die örtlichen Druckdifferenzen beim Löscheinsatz von Halon 1211 und Halon 1301 in unterschiedlichen Konzentrationen.

Alle Versuche zeigen im Gegensatz zu früheren Untersuchungen /5/ vor dem Löscheinsatz an der Meßstelle D1 in Bodennähe einen ausgeglichenen Druck. Dies bedeutet, daß eine Vergrößerung der

Bodenöffnungen von früher ca. 100 cm<sup>2</sup> auf jetzt ca. 800 cm<sup>2</sup> eine genügend große Luftzufuhr für die Verbrennung zuläßt, um keine Druckschwankungen in Bodennähe zu erhalten. Dies gilt bei den drei hier verwendeten Brandstoffen. Die Abgase treten in der oberen Ecke des Modellraumes durch einen Abzug aus.

Bedingt durch die Temperaturerhöhung und die nach oben steigenden heißen Gase wurde ein von unten nach oben steigender Überdruck registriert, der vor dem Löscheinsatz unterhalb der Decke an der Meßstelle D5 zwischen 2 Pa und 4 Pa erreicht. Die durch das Eindüsen des jeweiligen Löschmittels auftretende Druckspitze wurde aufgrund der Abtastfrequenz der Datenerfassungsanlage positiv oder negativ registriert. Der Löscheinsatz ist auch hier durch eine senkrechte Linie gekennzeichnet. Durch das Schließen der Zu- und Abluftklappen und dem gleichzeitigen Löscheinsatz änderten sich die Druckverhältnisse im Versuchsraum schlagartig.

Beim Brandstoff Holzkrippe (Bild 16) und der kleinsten CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 11 Vol.-% entstand im Mittel in Bodennähe ein geringer Unterdruck und in Deckennähe etwas Überdruck, d.h. die von unten nach oben gerichtete Strömung blieb erhalten. Durch Fugen trat Frischluft am Boden ein, während unterhalb der Decke aufgrund des Überdruckes Gase austraten. Nach Erlöschen der Flammen war der Kurvenverlauf ruhiger, bis beim Öffnen der Klappen nach 15 min erneute Flammen einen starken negativen Druck hervorriefen. Dies bedeutet, daß im gesamten Raum Luft angesaugt wurde. Das Schließen der Klappen brachte den Brand zum Erliegen, die Glut ging langsam aus, und der Druck glich sich aus.

Spiritus konnte mit ca. 11 Vol.-% CO<sub>2</sub> (Bild 16) nicht abgelöscht werden. Die Drücke blieben im Mittel negativ, d.h. von außerhalb wurde Luft angesaugt bis die Flamme mangels Brennstoffzufuhr erlosch.

Heizöl als Brandstoff (Bild 16) konnte ebenfalls nicht abgelöscht werden. Anhand der Druckkurven wird deutlich, daß das Heizöl nach ca. 9 min erlosch, wobei durch die nach oben gerichtete Strömung ein Druckgefälle von oben nach unten entstand. Das Rückzünden des Heizöls war an den pulsierenden Schwankungen zu erkennen. Nach dem Erlöschen stellte sich das Druckgefälle wieder ein. Durch Öffnen beider Klappen nach 29 min zündete das Heizöl noch einmal und brannte dann aus. Der Druck war wieder ausgeglichen.

Beim Eingeben der Löschmittelmenge von ca. 17 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 16), bei der die Holzkrippe durch vorhandene Glutnester weiterschwelte, waren die Druckschwankungen kleiner. Das Öffnen beider Klappen nach ca. 26 min bewirkte in Bodennähe einen Druckausgleich, während in Deckennähe durch die nach oben strömenden Gase ein leichter Überdruck entstand.

Nach dem Löscheinsatz bei Spiritus als Brandstoff (Bild 16) werden durch das Weiterbrennen wie bei der niedrigeren CO<sub>2</sub>-Menge große Druckschwankungen registriert, die abnehmen, wenn der Spiritus verbrannt ist.

Da beim Eingeben von ca. 17 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 16) in den Brandraum auch das brennende Heizöl nicht gelöscht wurde, traten große Druckschwankungen auf, die mit kleiner werdender Flamme auch kleiner wurden. Als die Flamme aufgrund nicht mehr vorhandenen Heizöls erlosch, herrschte im ganzen Versuchsraum gleicher Druck. Das anschließende Nachfüllen bewirkte keine Druckänderung. Erst bei der Rückzündung nach ca. 28 min traten wieder die erwarteten hohen Drücke auf.

Der Einsatz von ca. 24 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 17) hatte zur Folge, daß ein sehr geringes Druckgefälle von unten nach oben entstand, d.h. das Löschmittel sank aufgrund seiner höheren Dichte nach unten und Luft konnte aufgrund des Druckunterschiedes (Umgebung-Brandraum) in den Versuchsraum einströmen.

Bei Spiritus als Brandstoff (Bild 17) traten durch das Rückzünden nach dem Löscheinsatz große Druckschwankungen auf, die nach dem Erlöschen der Flamme in Bodennähe auf Null und in Deckennähe auf einen leichten Unterdruck zurückgingen. Die schlagartige Rückzündung nach ca. 20 min verursachte hohe Drücke, sodaß sich, wie bereits erwähnt, die Überdruckklappen öffneten. Nach dem Erlöschen der Flamme herrschte im gesamten Raum leichter Unterdruck.

Durch das Eindüsen einer Kohlendioxidkonzentration von etwa 24 Vol.-% auf brennendes Heizöl (Bild 17) entstand ein Druckgefälle von unten nach oben, d.h. daß diese Konzentration ausreichte, um die Strömungsrichtung umzukehren. Das erneute Einfüllen von Heizöl hatte die Rückzündung nach ca. 22 min mit der bei Heizöl üblichen flackernden Flamme zur Folge. Dadurch wurden Druckschwankungen hervorgerufen, die mit der Flammenhöhe abnahmen.

Die größte hier verwendete Kohlendioxidmenge von ca. 30 Vol.-% (Bild 17) ließ beim Eindüsen auf eine brennende Holzkrippe den Druck in Bodennähe sehr gering und in Deckennähe negativ werden. Dadurch wurde im oberen Teil des Raumes Luft angesaugt, d.h. die höhere  $\text{CO}_2$ -Konzentration von ca. 30 Vol.-% kehrte die anfänglich von unten nach oben gerichtete Strömungsrichtung aufgrund der großen Dichteunterschiede um. Das Öffnen beider Klappen und Anschalten des Ventilators verursachte die erneute Zündung, wobei die bekannten Druckschwankungen auftraten.

Beim Brandstoff Spiritus (Bild 17) fiel der Druck in Bodennähe auf kleine positive und in Deckennähe auf kleine negative Werte ab, die sich nicht änderten bis der Spiritus rückzündete und hohe Druckwerte registriert wurden. War der Spiritus verbrannt, fand ein Druckausgleich statt.

Der Löscheinsatz bei Heizöl (Bild 17) wurde anhand der Druckkurven ähnlich wie der bei Spiritus aufgezeichnet. Der wesentliche Unterschied bestand jedoch darin, daß eine Rückzündung nur bei geöffneten Klappen erfolgte, was auch an den Druckschwankungen ersichtlich war.

Die Druckkurven erreichen beim Ablöschen einer Holzkrippe mit ca. 2,5 Vol.-% bzw. ca. 4,5 Vol.-% Halon 1211 (Bild 18) in Bodennähe einen geringen Überdruck. In Deckennähe herrschte bei der geringeren Konzentration ein Druckausgleich, während bei der höheren Konzentration von 4,5 Vol.-% Halon 1211 in Deckennähe ein leichter Unterdruck erzeugt wurde.

Spiritus und Heizöl konnten mit einer Konzentration von 2,5 Vol.-% Halon 1211 (Bild 18) nicht gelöscht werden. In beiden Fällen brannte die Flüssigkeit aus, was an den Druckschwankungen zu erkennen ist. Nach dem Erlöschen der Flammen herrschte in beiden Fällen nur ein sehr geringes Druckgefälle von oben nach unten, d.h. die ursprünglich nach oben gerichtete Strömung wurde, wenn auch nur gering, beibehalten.

Die Tendenz der Druckverläufe bei einer Löschmittelkonzentration von 4,5 Vol.-% Halon 1211 bei den Brandstoffen Spiritus und Heizöl sind ähnlich, wurden jedoch nur für Heizöl als Brandstoff aufgetragen (Bild 18), da hier die Flamme gelöscht werden konnte. In diesem Falle liegt ein Druckgefälle von unten nach oben vor, d.h. die Strömungsrichtung wurde umgekehrt und das spezifisch schwerere Halon sank nach unten ab und oben wurde die Luft angesaugt.

Bei Spiritus wurden die Druckkurven, ebenso wie bei den Temperaturkurven, für eine mittlere Löschmittelkonzentration von ca. 14 Vol.-% aufgetragen. An der Meßkurve sind keine Anzeichen für das optisch beobachtete Weiterbrennen mit kleiner blauer Flamme zu erkennen. Durch die hohe Halon-Konzentration baute sich ein von unten nach oben reichendes starkes Druckgefälle auf, d.h. die Strömung war von oben nach unten gerichtet, wobei

im oberen Teil des Raumes Luft angesaugt wurde und im unteren Teil Gase austraten.

Wird beim Brand einer Holzkrippe eine Halon 1301-Konzentration von 2 Vol.-% (Bild 19) eingegeben, so stellt sich in Deckennähe ein Überdruck ein, d.h. die ursprüngliche Strömung von unten nach oben wird beibehalten. Bei Zugabe einer Löschmittelkonzentration von 3,5 Vol.-% Halon 1301 gleicht sich der Druck im Raum aus.

Werden 2 Vol.-% Halon 1301 beim Spiritusbrand eingegeben, so findet ein Druckausgleich statt. Beim Rückzünden des Spiritus mit kleiner blauer Flamme nach ca. 21 min werden minimale Druckspitzen aufgezeichnet. Beim Durchzünden im gesamten Raum erhöht sich der Druck um ein Vielfaches, um beim Erlöschen der Flamme wieder auf Null abzusinken.

Die Druckspitzen weisen daraufhin, daß Heizöl mit einer Löschmittelkonzentration von 2 Vol.-% Halon 1301 nicht gelöscht werden konnte (Bild 19). Nach dem Erlöschen der Flamme durch Brandstoffmangel ist ein geringes Druckgefälle von oben nach unten vorhanden. Nach einer Versuchszeit von ca. 28 min, d.h. 11 min nach dem Nachfüllen des Heizöls wurden durch das Rückzünden bei geöffneten Klappen hohe Druckspitzen angezeigt, die sich nach dem Ausbrennen wieder ausglich.

Beim Eindüsen einer Löschmittelkonzentration von 3,5 Vol.-% Halon 1301 auf die flüssigen Brandstoffe Spiritus und Heizöl (Bild 19) zeigten sich ähnliche Druckkurven wie bei Verwendung von Halon 1211. Direkt nach dem Löscheinsatz war auch bei diesem Versuch das kurze Aufflammen des Heizöls bis zum Erlöschen zu erkennen. Die Druckänderungen nach ca. 29 min waren auf das Zünden des Heizöls beim Öffnen der Klappen zurückzuführen.

Für den Brandstoff Spiritus wurde der Versuch mit der höchsten hier eingesetzten Löschmittelkonzentration von ca. 14 Vol.-% Halon 1301 aufgezeichnet, da geringere Halon-Konzentrationen auch nicht zum völligen Erlöschen der Flammen führten. Das Druckgefälle von unten nach oben war sehr groß, d.h. die Strömungsrichtung der Gase im Versuchsraum war von oben nach unten gerichtet. Nach einer Versuchszeit von 36 min wurden die Heizspiralen abgeschaltet, und die kleine blaue Flamme erlösch sofort. Beim nochmaligen Einschalten der Heizspiralen brannte auch die kleine Flamme wieder, was auf die erneute Wärmezufuhr zurückzuführen war.

#### 4.3 Gaskonzentration

##### 4.3.1 Kontinuierliche Gasanalyse

Auf den Bildern 20 bis 25 sind die örtlichen Konzentrationswerte aufgetragen. Neben dem jeweiligen Löschmittel Kohlendioxid bzw. Halon 1211 und Halon 1301 ist die O<sub>2</sub>-Konzentration und die CO-Konzentration bzw. CO<sub>2</sub>-Konzentration aufgetragen. Jedes Bild umfaßt 4 Versuche, wobei die vertikal angeordneten Kurven zu je einem Versuch mit gleicher Löschmittelkonzentration gehören.

Vor dem Löscheinsatz steigt beim Abbrennen der Holzkrippen die CO<sub>2</sub>-Konzentration am Meßort bis ca. 15 Vol.-% an, die O<sub>2</sub>-Konzentration fällt bis auf ca. 5 Vol.-% ab und die CO-Konzentration erreicht Werte bis zu 10 Vol.-%.

Auf Bild 20 sind in horizontaler Richtung die Meßkurven für Holzkrippen als Brandstoff und Kohlendioxid als Löschmittel in 4 verschiedenen hohen Konzentrationen gegenübergestellt. Nach dem Löscheinsatz steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration an der Meßstelle jeweils um etwa den rechnerisch ermittelten Wert an, um dann mit fortschreitender Versuchszeit abzunehmen. Die O<sub>2</sub>-Konzentration sinkt aufgrund der trägeren Anzeige des Meßgerätes infolge einer größeren Meßkammer etwas später als zum Löschezeitpunkt ab und

steigt entgegengesetzt zur  $\text{CO}_2$ -Konzentration mit zunehmender Versuchszeit langsam an. Die CO-Konzentration fällt nach dem Eindüsen des Löschmittels auf Werte unter 3 Vol.-% ab.

Bei der Eindüsung von ca. 11 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 20) in den Versuchsraum wurde nach einer Versuchszeit von 15 min beim Erlöschen der Flammen ein steiler Abfall der  $\text{CO}_2$ -Konzentration registriert. Zur gleichen Zeit nahm die  $\text{O}_2$ -Konzentration zu. Durch kurzes Öffnen und Schließen beider Klappen zündete die Holzkrippe zwar wieder, aber es gab keine Konzentrationsänderung. Nach ca. 20 min war die Krippe völlig verbrannt und die Heizspiralen wurden abgeschaltet. Das anschließende Öffnen der Klappen hatte zur Folge, daß die  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf den Wert Null abfiel und die  $\text{O}_2$ -Konzentration den Umgebungswert annahm. Die CO-Konzentration fiel nach dem Löschen ab, wobei das Erlöschen und Zünden des Holzes nur geringe Schwankungen verursachte.

Die Menge von ca. 17 Vol.-% Löschmittel (Bild 20) ließ die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Raum steil ansteigen und die  $\text{O}_2$ -Konzentration und die CO-Konzentration weiter absinken als bei der kleineren  $\text{CO}_2$ -Menge von ca. 11 Vol.-%. Das Absinken der  $\text{CO}_2$ -Konzentration bzw. das Ansteigen der  $\text{O}_2$ -Konzentration nach ca. 26 min waren auf das Öffnen der Klappen mit Rückzündung zurückzuführen. Die CO-Konzentration stieg dabei auf ca. 2 Vol.-% an, um dann auf den Wert Null abzufallen.

Eine Erhöhung der Löschkonzentration auf ca. 24 Vol.-% bzw. ca. 30 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 20) hatte zur Folge, daß am Ende jeden Versuches die Holzkrippen in ihrer Form noch vollständig erhalten waren. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration fiel bis zur Versuchszeit von 36 min um ca. 15 Vol.-% ab und die  $\text{O}_2$ -Konzentration stieg um ca. 5 Vol.-% an, d.h. das schwerere Löschmittel sank im Versuchsraum nach unten. Der CO-Anteil lag unter 1 Vol.-%. Es ist anzunehmen, daß zu einem früheren Zeitpunkt die Holzkrippe durch Öffnen der Klappen rückgezündet hätte.

Aus den Untersuchungen mit Holzkrippen kann geschlossen werden, daß bei geschlossenen Klappen der Löscherfolg von der eingegebenen Löschmittelkonzentration abhängt. Bei wenig Kohlendioxid gehen die Flammen nicht aus, bei etwas mehr Kohlendioxid erlöschen zwar die Flammen, aber die Glut kann weiter-schwelen. Höhere Konzentrationen haben zur Folge, daß auch die Glut zu einem früheren Zeitpunkt erlischt.

Wurde Spiritus als Brandstoff (Bild 21) verwendet, so wichen die Meßkurven vor dem Löscheinsatz erheblich voneinander ab, was darauf zurückzuführen war, daß die Wanne unterhalb der Heizspiralen angeordnet war und die Flamme durch die glühenden Heizspiralen beeinflußt nicht immer an der gleichen Stelle auf die Sonde auftraf. Vom optischen Eindruck her war bei der Spiritusflamme jedoch kein Unterschied zu erkennen.

Eine Löschmittelkonzentration von ca. 11 Vol.-% (Bild 21) reichte nicht aus, um die Flamme zu löschen. Nach dem Löscheinsatz stieg die  $\text{CO}_2$ -Konzentration an, die  $\text{O}_2$ -Konzentration blieb niedrig und die  $\text{CO}$ -Konzentration veränderte ihren Maximalwert kaum. Nach dem Erlöschen der Flamme nach ca. 9 min infolge Brandstoffmangel wurden noch ca. 14 Vol.-%  $\text{CO}_2$ , etwa 15 Vol.-%  $\text{O}_2$  und weniger als 0,5 Vol.-%  $\text{CO}$  gemessen.

Die Eingabe einer  $\text{CO}_2$ -Konzentration von ca. 17 Vol.-% (Bild 21) war für einen Löscherfolg immer noch zu gering. Obwohl an der Meßstelle die  $\text{O}_2$ -Konzentration wie zuvor bei max. 15 Vol.-% lag, reichte dies zum Ersticken der Flamme nicht aus, da im übrigen Raum noch genügend Sauerstoff vorhanden war, was bereits bei früheren Untersuchungen nachgewiesen wurde.

Auch eine weitere Erhöhung der Löschkonzentration auf 24 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 21) vermochte die Flamme nur für wenige Minuten zu löschen. Sofern noch Brandstoff vorhanden war, was durch Nachfüllen gewährleistet wurde, verlängerte sich die Zeit,

in der die Flamme nicht brannte mit dem Erhöhen der eingedüsten Löschmittelkonzentration. Der Einsatz von 24 Vol.-%  $\text{CO}_2$  ließ den Spiritus nach einer Versuchszeit von ca. 18 min erneut mit blauer Flamme weiterbrennen und nach ca. 22 min durchzünden, wodurch die  $\text{O}_2$ -Konzentration kurzfristig stark absank und die  $\text{CO}$ -Konzentration stark anstieg. Nach dem Erlöschen mangels Spiritus sank bei geschlossenen Klappen die  $\text{CO}_2$ -Konzentration langsam ab, während die  $\text{O}_2$ -Konzentration anstieg, da jetzt das schwerere Kohlendioxid nach unten absank.

Das Eindüsen einer  $\text{CO}_2$ -Konzentration von ca. 30 Vol.-% ließ den Spiritus erst nach einer Versuchszeit von ca. 27 min zurückzünden. Dabei fiel die  $\text{CO}_2$ -Konzentration sehr steil ab, weil sich durch den kurzfristig starken Überdruck im Raum die Druckentlastungsklappen öffneten und Kohlendioxid entweichen konnte.

Beim Verbrennen von Heizöl wurden  $\text{CO}_2$ -Werte von ca. 7 Vol.-%,  $\text{O}_2$ -Konzentrationen bis ca. 5 Vol.-% und  $\text{CO}$ -Werte bis ca. 3 Vol.-% erreicht (Bild 22).

Durch das Eingeben des Löschmittels von ca. 11 Vol.-%  $\text{CO}_2$  stieg auch hier die  $\text{CO}_2$ -Konzentration sprunghaft an und fiel im Laufe der Versuchszeit wieder leicht ab. Da die Flamme nicht gelöscht wurde, schwankte die  $\text{O}_2$ -Konzentration etwas und pendelte sich nach dem Erlöschen der Flamme nach 10 min auf ca. 16 Vol.-% und nach 15 min auf ca. 15 Vol.-% ein. Erst das Öffnen der Klappen nach 30 min mit Luftzufuhr und anschließendem Brand hatten einen Einfluß auf die Konzentrationswerte, während die kleinen Verpuffungen zuvor nicht registriert wurden. Die  $\text{CO}$ -Konzentration sank nach dem Erlöschen der Flamme auf unter 1 Vol.-% ab.

Die Zugabe von ca. 17 Vol.-% Kohlendioxid auf brennendes Heizöl (Bild 22) läßt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf über 20 Vol.-% ansteigen. Sie fiel während der Versuchszeit langsam ab. Nach dem Erlöschen der Flamme nach ca. 13 min erreichte die  $\text{O}_2$ -Konzentration Werte von ca. 14 Vol.-%.

Die CO-Konzentration sank wie zuvor auf unter 1 Vol.-% ab. Das Öffnen beider Klappen und Einschalten des Ventilators nach ca. 28 min machte sich in einem starken Absinken des Kohlendioxids und starken Ansteigen des Sauerstoffs bemerkbar. Es ist anzunehmen, daß sich bei geschlossenen Klappen noch ein zündfähiges Gemisch gebildet hätte, wie es auch bei etwas mehr CO<sub>2</sub> als Löschmittel der Fall war, wie der nächste Versuch zeigte.

Der Einsatz höherer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 24 Vol.-% bzw. 30 Vol.-% als Löschmittel (Bild 22) ließ die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen weiter ansteigen, die O<sub>2</sub>-Konzentrationen weiter absinken, wobei das Heizöl bei der Zugabe von 24 Vol.-% bei geschlossenen Klappen nach einer Versuchszeit von ca. 21 min rückzündete und beim Eindüsen von ca. 30 Vol.-% nicht mehr. Dabei erreichte die O<sub>2</sub>-Konzentration Werte zwischen 11 Vol.-% und 13 Vol.-%. Eine Rückzündung wurde hier erst nach dem Öffnen beider Klappen nach ca. 30 min registriert, als Luft in den Raum gelangte und CO<sub>2</sub> durch den Ventilator abgesaugt wurde. Dadurch fiel die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum stark ab. Die O<sub>2</sub>-Konzentration sank innerhalb der Flamme ab und die CO-Konzentration stieg an. Nach dem Ausbrennen nach ca. 35 min stieg die O<sub>2</sub>-Konzentration wieder an und die CO-Konzentration fiel auf Null ab.

Die Bilder 23 bis 25 zeigen den zeitlichen Verlauf der örtlichen Konzentration mit Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel. Die mittleren Konzentrationen für den Einsatz von Halon liegen zwischen 2 Vol.-% und 14 Vol.-%. Jedes Bild beinhaltet Messungen eines Brandstoffes, wobei jeweils zwei Versuche mit zwei verschiedenen hohen Konzentrationen Halon 1211 und zwei Versuche mit Halon 1301 als Löschmittel einander gegenübergestellt sind.

Beim Löscheinsatz stieg die Konzentration des Halons steil an und fiel im Laufe der Versuchszeit durch Leckageverluste langsam ab.

Die O<sub>2</sub>-Konzentration erreichte unabhängig von den hier verwendeten Löschmittelkonzentrationen (Bild 23) erst nach dem Erlöschen der Glut ihren Endwert zwischen 14 Vol.-% und 16 Vol.-%. Er wurde bei beiden Halonen schneller erreicht, je höher die eingegebene Löschkonzentration war. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration lag nach dem Löschen unter 6 Vol.-% und die CO-Konzentration, die nicht aufgetragen wurde, fiel zunächst auf unter 8 Vol.-%, um dann noch weiter abzusinken.

Wurden Spiritus als Brandstoff und die beiden Halone als Löschmittel eingesetzt (Bild 24), so stieg beim Löscheinsatz die Halon-Konzentration entsprechend der eingedüsten Menge an. In diesem Versuch wird besonders deutlich, daß innerhalb der Versuchszeit bei hohen Halon-Konzentrationen von ca. 14 Vol.-% das jeweilige Halon um bis zu 40% des beim Löscheinsatz registrierten Wertes abnahm, während bei geringer Konzentration praktisch kein Absinken erfolgt. Dies ist damit zu erklären, daß das schwere Halon im Raum nach unten absank und unterhalb der Decke wegen des Unterdruckes Luft einströmen konnte. Die O<sub>2</sub>-Konzentration am Meßort erreichte unabhängig von der Höhe der jeweils eingegebenen Halon-Konzentration Werte zwischen 16 Vol.-% und 20 Vol.-%. Bis auf die bereits erwähnte Änderung durch Luftzufuhr lassen sich Schwankungen im Kurvenverlauf nur durch die Strömungsverhältnisse aufgrund unterschiedlicher Gasdichten im Versuchsraum erklären. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration liegt nach dem Löscheinsatz unter 4 Vol.-% und die CO-Konzentration unter 8 Vol.-%.

Bild 25 zeigt die örtlich gemessenen Konzentrationen mit Heizöl als Brandstoff und Halon als Löschmittel. Waren keine äußeren Einflüsse, wie z.B. Öffnen der Klappen, vorhanden, so fiel die jeweilige Halon-Konzentration langsam ab. Bei Eingabe von ca. 2,5 Vol.-% Halon 1211 brannte die Flamme zunächst weiter, wurde jedoch kleiner und erlosch, als kein Heizöl mehr vorhanden war. Die O<sub>2</sub>-Konzentration hatte zu diesem Zeitpunkt einen Wert von über 16 Vol.-% erreicht. Die etwas höhere Halon 1211-Konzentration von ca. 4,5 Vol.-% genügte, um das Heizöl zu löschen.

Die O<sub>2</sub>-Konzentration stieg dabei auf konstant 17,5 Vol.-%, die CO<sub>2</sub>-Konzentration und CO-Konzentration lagen unter 4 Vol.-%.

Beim Eindüsen von ca. 2 Vol.-% Halon 1301 (Bild 25) erreichte die O<sub>2</sub>-Konzentration Werte von ca. 18 Vol.-%. Ein Weiterbrennen des Heizöls konnte visuell beobachtet werden, während anhand der Konzentrationskurven nichts zu erkennen war. Lediglich das Öffnen beider Klappen und Anschalten des Ventilators mit der darauffolgenden Rückzündung nach einer Versuchszeit von 28 min wurde registriert.

Mit einer Löschmittelkonzentration von ca. 3,5 Vol.-% Halon 1301 wurden die Flammen gelöscht. Die Konzentrationen blieben bis auf Leckverluste solange konstant, bis die Klappen geöffnet wurden, und das Heizöl erneut brannte.

#### 4.3.2 Pyrolyseprodukte

Es wurden folgende Pyrolyseprodukte gemessen: HF, HCl, HBr, COCl<sub>2</sub> und COBr<sub>2</sub>. Die einzelnen Konzentrationswerte sind in Tabelle 3 angegeben. Die Messungen erfolgten zu den in der Tabelle angegebenen Zeiten. Bei Überschreiten der Meßbereichsgrenze eines Prüfröhrchens wurde die Anzahl der Hübe mit angegeben, nach denen diese Grenze erreicht wurde. Die bis zu mehreren Minuten dauernden Messungen stellen zeitliche Mittelwerte dar.

Wie aus der Tabelle 3 zu ersehen ist, liegen die während der Versuche gemessenen Schadstoffkonzentrationen fast in allen Fällen erheblich über den Werten für die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Werte). Die Tabelle zeigt deutlich, daß für die vorliegenden Untersuchungen praktisch keine Abhängigkeit vom eingesetzten Brandstoff vorliegt, d.h. daß im Gegensatz zu früheren Untersuchungen, bei denen geringere Schadstoffkonzentrationen gemessen wurden, die Erhöhung der Pyrolyseprodukte hauptsächlich auf die während des gesamten Versuches glühenden Heizspiralen zurückzuführen ist. An diesen hellrot glühenden

Drähten kann sich das entsprechende Halon bei Temperaturen über 500 °C dauernd zersetzen. Bei früheren Untersuchungen /4,5/ konnte bereits festgestellt werden, daß bei glutbildenden Brandstoffen mehr schädliche Pyrolyseprodukte freiwerden, als bei flüssigen Brandstoffen. Diese Untersuchungen sind außerordentlich wichtig, wenn man die toxischen Gefahren bei realen Bränden betrachtet.

#### 4.4 Optische Rauchdichte

Die Bilder 26 und 27 zeigen für alle 24 Versuche die Beleuchtungsintensität  $I/I_0$  in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Auf Bild 26 wurde Kohlendioxid und auf Bild 27 Halon als Löschmittel eingesetzt. Der Brandstoff variiert jeweils von oben nach unten in der Reihenfolge Hölzkrippe, Spiritus, Heizöl.

Vor dem Löscheinsatz trat beim Zündvorgang bei Krippen eine Sichtbehinderung erst mit dem Einsetzen des Schwelvorganges auf (Bilder 26 und 27). Beim Durchzünden verbesserten sich die Sichtverhältnisse meistens wieder. Wurde Spiritus als Brandstoff verwendet (Bilder 26, 27) blieb die Rauchdichte sehr gering, während bei Heizöl (Bilder 26, 27) die Beleuchtungsintensität bereits vor dem Löscheinsatz auf den Wert Null abnahm, d.h. innerhalb des Raumes bestand keine Sicht mehr.

Nach dem Löscheinsatz sowohl von Kohlendioxid als auch von Halon (Bilder 26, 27) fiel beim Löschvorgang an Krippen die Beleuchtungsintensität auf den Wert Null ab, d.h. der Raum war völlig dunkel. Ein Ansteigen der Beleuchtungsintensität war nur dann festzustellen, wenn die Klappen geöffnet wurden und /oder erneut Flammen entstanden (Bild 26).

Bei Spiritus als Brandstoff wurden sowohl beim Löschmittel Kohlendioxid als auch bei Halon die Sichtverhältnisse weniger beeinträchtigt als bei den anderen Brandstoffen, da der Spiritus selbst weniger Ruß bildet.

Beim Brandgut Heizöl war es gleichgültig, ob Kohlendioxid oder Halon als Löschmittel verwendet wurde, die Sichtverhältnisse blieben schlecht. Dabei war es gleichgültig, ob der Brand gelöscht war oder erneut Flammen entstanden. Das Öffnen der Klappen und Einschalten des Ventilators machte sich jedoch sofort in einer Verbesserung der Sichtverhältnisse bemerkbar (Bild 26).

#### 4.5 Vergleich der Löschmittelmengen

In Tabelle 4 sind die aus Brandversuchen mit und ohne Rückzündungsmöglichkeit ermittelten Mindestlöschkonzentrationen angegeben. Sie sind neben den von der NFPA /2/ empfohlenen Werte für ortsfeste Löschanlagen aufgelistet. Anhand dieser Tabelle wird deutlich, daß die für Brände ohne zusätzliche Wärmequelle ermittelten Konzentrationswerte erheblich niedriger liegen als die Werte, die für Brände mit zusätzlicher Wärmequelle ermittelt wurden. Die empfohlenen Werte für ortsfeste Löschanlagen bei gelagerten Flüssigkeiten liegen beim Löschmittel Kohlendioxid noch darüber. Dadurch können auch Verluste durch Undichtigkeiten im Raum ausgeglichen werden. Die Löschmittelkonzentration für die Löschmittel Halon 1211 und Halon 1301 liegt bei Bränden mit zusätzlicher Wärmequelle ebenfalls wesentlich höher. Die empfohlenen Werte (Tabelle 4) liegen teilweise niedriger als die bei diesen Versuchen ermittelten Werte. Da die Auslösung bzw. der Löscheinsatz im Realfall früher erfolgt, kann der Brand sofort bekämpft werden, sodaß die Wahrscheinlichkeit für eine Rückzündung gering ist.

Der Vergleich der Brand- und Löschversuche mit und ohne zusätzliche Wärmequelle zeigt außerdem, daß nach dem Einsatz von Halon als Löschmittel die Bildung von Spaltprodukten bei noch zusätzlich vorhandenen Wärmequellen, wie z.B. Glutnester, glühende Metallteile, usw. wesentlich verstärkt wird.

Dies bedeutet, daß beim Einsatz von Halon als Löschmittel, Brände möglichst schnell und mit geringen Löschmittelkonzentrationen gelöscht werden sollten. Dadurch wird vermieden, daß größere Mengen an Spaltprodukten entstehen. Diese Gefahr besteht besonders dann, wenn bei Bränden mit Glutbildung das Halon so lange zersetzt wird, bis die Temperaturen einen unteren Wert erreicht haben, bei dem eine Pyrolyse der Halone nicht mehr möglich ist.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines Forschungsauftrages wurden in einem Versuchsraum mit einem Volumen von ca. 1,5 m<sup>3</sup> Untersuchungen mit den gasförmigen Löschmitteln Kohlendioxid, Halon 1211 und Halon 1301 durchgeführt. Als fester Brandstoff wurde Holz sowie die Flüssigkeiten Spiritus und Heizöl verwendet. Die beim Löscheinsatz verwendeten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen lagen zwischen ca. 10 Vol.-% und ca. 30 Vol.-%, die Halon-Konzentrationen zwischen ca. 2 Vol.-% und ca. 14 Vol.-%. Die verschiedenen hohen Löschmittelkonzentrationen resultieren aus der unterschiedlichen Löschwirkung von Kohlendioxid (Stickeffekt) und Halon (Inhibitionseffekt).

Die Zündung des jeweiligen Brandstoffes erfolgte mit einer unter dem Feststoff bzw. über der Flüssigkeit angeordneten Wärmequelle aus glühenden Heizdrähten, die auch während der gesamten Versuchsdauer eingeschaltet waren, um nach dem Löscheinsatz eine Rückzündung des Brandstoffes zu ermöglichen. Die Auslösung der Löschanlage erfolgte manuell.

Das Temperaturfeld wurde an 14 im Versuchsraum verteilten Meßstellen bestimmt. Die Messung der Druckdifferenzen erfolgte an 5 verschieden hoch angebrachten Meßstellen. Die Brand- und Löschgase wurden während der gesamten Versuchszeit kontinuierlich analysiert. Dagegen wurden einige Zersetzungsprodukte der Halone zu vorgegebenen Zeitpunkten mit Prüfröhrchen gemessen. Die Sichtverhältnisse im Brandraum wurden mittels einer

Meßstrecke zur Bestimmung der optischen Rauchdichte beurteilt.

Vor dem Löschmitteleinsatz wurden im Versuchsraum über dem Brandherd Temperaturen von max. 1000 °C und an den Wänden bis ca. 250 °C gemessen. Bei der Löschmitteleingabe fiel die Temperatur in Abhängigkeit der eingesetzten Löschmittelkonzentration ab, stieg jedoch erneut an, wenn der Brand nicht gelöscht wurde.

Bei den hier durchgeführten Versuchen herrschte während der Brandphase in Bodennähe ein ausgeglichener Druck und in Deckennähe leichter Überdruck. Nach dem Löscheinsatz war bei der jeweils geringeren Löschmittelkonzentration der Druck im gesamten Versuchsraum in etwa gleich, während bei den jeweils höheren Löschmittelkonzentrationen ein Druckgefälle von unten nach oben vorherrschte, d.h. die größere Löschmittelkonzentration sank aufgrund ihrer höheren Dichte nach unten, sodaß in Deckennähe Luft eindringen konnte.

Die Konzentrationswerte der Löschmittel stiegen nach dem Löscheinsatz etwa um die rechnerisch ermittelten Werte an. Während der Versuchszeit fiel die jeweilige Löschmittelkonzentration langsam ab und die Sauerstoffkonzentration nahm zu. Konnte der Brand nicht gelöscht werden oder zündete der Brandstoff erneut, so entstanden Konzentrationsänderungen. Durch die glühenden Heizdrähte entstanden größere Mengen schädlicher Pyrolyseprodukte.

Die Sichtverhältnisse im Brandraum vor dem Löscheinsatz waren beim Brandstoff Spiritus relativ gut. Bei Holz als Brandstoff verschlechterten sich die Sichtverhältnisse während des Ausgasens und wurde nach dem Zünden wieder besser, da die Gase teilweise verbrannten. Beim Brandstoff Heizöl war keine Sicht mehr vorhanden. Nach dem Löscheinsatz war bei Holz und Heizöl der Versuchsraum völlig dunkel, während sich bei Spiritus nur eine geringe Sichtverschlechterung einstellte. Bei einer Rückzündung verbesserten sich die Sichtverhältnisse wieder.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Prüfröhrchen-Taschenbuch  
Luftuntersuchungen und technische Gasanalyse  
mit Dräger-Röhrchen.  
Lübeck, 4.Ausgabe, 1979
- /2/ Standard on carbon dioxide extinguishing systems.  
NFPA No.12 - 1977, S.1-93;  
Standard on halogenated fire extinguishing agent  
systems - Halon 1301  
NFPA No.12A - 1977, S.1-128;  
Halon 1211  
NFPA No.12B - 1977, S.1-91;  
In: National Fire Codes, Boston: NFPA (1980)
- /3/ Schatz,H.: Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Lösch-  
mitteln in Räumen natürlicher Größe.  
Teil 3: Über die Löschwirksamkeit von Kohlen-  
dioxid beim Entstehungsbrand in einem Versuchs-  
raum natürlicher Größe.  
Forschungsbericht Nr.37 der Arbeitsgemeinschaft  
der Innenministerien der Bundesländer  
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrange-  
legenheiten" (1979)
- /4/ Schatz,H.: Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Lösch-  
mitteln in Räumen natürlicher Größe.  
Teil 6: Vergleichende Untersuchung der Löschwirk-  
samkeit von Kohlendioxid, Halon 1211 und Halon 1301  
bei einem Entstehungsbrand in einem Versuchsraum  
natürlicher Größe und in einem Versuchsraum im  
Modellmaßstab.  
Forschungsbericht Nr.42 der Arbeitsgemeinschaft  
der Innenministerien der Bundesländer  
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrange-  
legenheiten" (1980)

/5/ Schatz, H.: Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln.

Teil 7: Vergleichende Untersuchung der Löschwirksamkeit von Kohlendioxid, Halon 1211 und Halon 1301 bei einem Entstehungsbrand mit festen und flüssigen Brandgütern.

Forschungsbericht Nr.45 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer  
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten" (1981)

## 7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Schematische Übersicht der Versuchsdaten.

Löschmittel	CO <sub>2</sub>																			
Rauminhalt m <sup>3</sup>	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
Brandgut	K	K	K	K	S	S	S	S	S	S	S	S	S	H	H	H	H	H	H	H
Brandlast g	380	380	380	380	120	120	120	120	120	120	120	120	120	135	135	135	135	135	135	135
Brandlast ml	-	-	-	-	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Brandlast je g/m <sup>3</sup> Volumeneinheit	262	262	262	262	83	83	83	83	83	83	83	83	83	93	93	93	93	93	93	93
Zeit bis zum Zünden s	315	500	510	420	210	190	200	180						280	310	320	245			
Vorbrennzeit min	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Flutungszeit s	1,5	2,0	3,0	3,5	1,0	1,75	3,0	4,0						1,5	2,0	3,5	4,5			
Löschmittelmenge g	344	600	843	1125	323	533	845	1213						348	559	904	1152			
Löschmittelmenge je Volumeneinheit g/m <sup>3</sup>	237	414	581	776	223	368	583	837						240	386	623	794			
Mittlere Löschmittelmittelkonzentration Vol.-%	11,4	18,4	24,0	29,6	10,8	16,6	24,0	31,2						11,5	17,3	25,3	30,1			
Löscherefolg bei Flammen	nein	ja 1)	ja	ja	nein	nein	ja 2)	ja 2)						nein	ja 2)	ja	ja			
Löscherefolg bei Glut	nein	nein	ja 1)	ja 1)	-	-	-	-						-	-	-	-			
Zustand bei geschlossenen Klappen	brennt	glüht	zündet	zündet	brennt	brennt	zündet	zündet						brennt	brennt	zündet	zündet			
Zustand bei geöffneten Klappen	brennt	zündet	zündet	zündet	brennt	brennt	zündet	zündet						brennt	brennt	zündet	zündet			

1) 5min Einwirkdauer

2) nur kurz erloschen

3) kleine blaue Flamme - spätere Rückzündung

Tabelle 2. Schematische Übersicht der Versuchsdaten.

Löschmittel	Halon 1211		Halon 1211		Halon 1211		Halon 1211		Halon 1301		Halon 1301	
	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
Rauminhalt	m <sup>3</sup>	K	S	H	K	S	K	S	H	H	H	H
Brandgut		380	120	135	380	120	380	120	135	135	135	135
Brandlast	g	-	-	150	150	-	150	150	150	150	150	150
Brandlast je Volumeneinheit	g/m <sup>3</sup>	262	83	93	262	83	262	83	93	93	93	93
Zeit bis zum Zünden	s	510	185	350	870	210	830	275	350	350	320	320
Vorbrennzeit	min	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Flutungszeit	s	1,0	0,75	1,0	1,5	6,0	1,75	1,5	1,5	1,5	1,75	1,75
Löschmittelmenge	g	288	257	272	188	1655	330	195	200	200	320	320
Löschmittelmenge je Volumeneinheit	g/m <sup>3</sup>	199	177	188	130	1141	228	135	138	138	221	221
Mittlere Löschmittelm-konzentration	Vol.-%	2,7	2,4	2,6	2,0	13,8	3,5	2,1	2,2	2,2	3,4	3,4
Löschserfolg bei Flammen		ja	nein	nein	ja	ja <sup>2)</sup>	ja	nein	ja <sup>1)</sup>	ja <sup>1)</sup>	ja	ja
Löschserfolg bei Glut		nein	-	-	ja <sup>1)</sup>	-	ja	-	-	-	-	-
Zustand bei geschlossenen Klappen		zündet nicht	brennt	brennt	zündet nicht	zündet <sup>3)</sup>	zündet nicht	brennt	zündet	zündet	zündet	zündet nicht
Zustand bei geöffneten Klappen		zündet nicht	brennt	brennt	zündet nicht	zündet	zündet nicht	brennt	zündet	zündet	zündet	zündet

1) 5min Einwirkdauer

2) nur kurz erloschen

3) kleine blaue Flamme - spätere Rückzündung

Tabelle 3. Direkt über dem Brandstoff gemessene Pyrolyseprodukte.

Brandstoff	Halon-Konzentration		Zeit der Probenentnahme nach Löschbeginn min	Hubzahl n=20 max. 15 ppm HF ppm	Hubzahl n=10 max. 500 ppm n=1 max. 5000 ppm HCl+HBr ppm		Hubzahl n=5 max. 15 ppm COCl <sub>2</sub> +COBr <sub>2</sub> ppm	
	1211 Vol.-%	1301 Vol.-%			ppm	ppm	COCl <sub>2</sub> +COBr <sub>2</sub> ppm	COBr <sub>2</sub> ppm
Holzkrippe	2,7		2 15 20	> 15 (n=5) 15 15	150 100 80		5 0 0	
Holzkrippe	4,5		2 20	> 15 (n=3) > 15 (n=5)	1000 750		5 5	
Spiritus	2,4		2	0	10		0	
Spiritus	13,8		2 20	0 -	2000 1800		>15 >15	
Heizöl	2,6		2 10	> 15 (n=5) > 15 (n=2)	120 80		1 1	
Heizöl	4,4		2 25	> 15 (n=5) > 15 (n=5)	120 50		2,5 1	
Holzkrippe		2	2	> 15 (n=1)		200		-
Holzkrippe		3,5	2	> 15 (n=1)		400		-
Spiritus		2,1	2 15	> 15 (n=1) 7 (n=1)		50 50		- -
Spiritus		13,9	2	-		50 (n=5)		-
Heizöl		2,2	2 15	> 15 (n=1) > 15 (n=1)		200 80		- -
Heizöl		3,4	2 20	> 15 (n=1) > 15 (n=1)		180 50		- -

MAK-Wert: HF: 3,0 ppm HCl: 5,0 ppm HBr: 5,0 ppm COCl<sub>2</sub>: 0,1 ppm

Tabelle 4. Löschmittelmengen im Vergleich.

Löschmittel	Brandgut	Brand ohne/4,5/ Wärmequelle gelöscht Vol.-% <sup>4)</sup>	Brand mit Wärmequelle		empfohlene Werte /2/ Vol.-%
			nicht gelöscht Vol.-%	gelöscht Vol.-%	
CO <sub>2</sub>	PU	15,3	-	-	-
	K	14,8	18,4	24,0 <sup>1)</sup>	-
	S	16,8	24,0	31,2 <sup>2)</sup>	43
	H	17,5	17,3	30,1	34
Halon 1211	PU	2,9	-	-	-
	K	2,9	2,7	4,5 <sup>1)</sup>	5 <sup>3)</sup>
	S	2,8	7,4	13,8 <sup>2)</sup>	5
	H	3,0	2,6	4,4	-
Halon 1301	PU	3,2	-	-	-
	K	2,0	-	2,0 <sup>1)</sup>	5 <sup>3)</sup>
	S	3,2	2,1	13,9 <sup>2)</sup>	5
	H	3,1	2,2	3,4	-

PU = Polyurethan-Weichschaum

K = Krippe

S = Spiritus

H = Heizöl

1) nur noch Glut vorhanden

2) kleine blaue Flamme-- spätere Rückzündung bei geschlossenen Klappen

3) 10 min Einwirkdauer gefordert

4) kleinste verwendete Konzentration

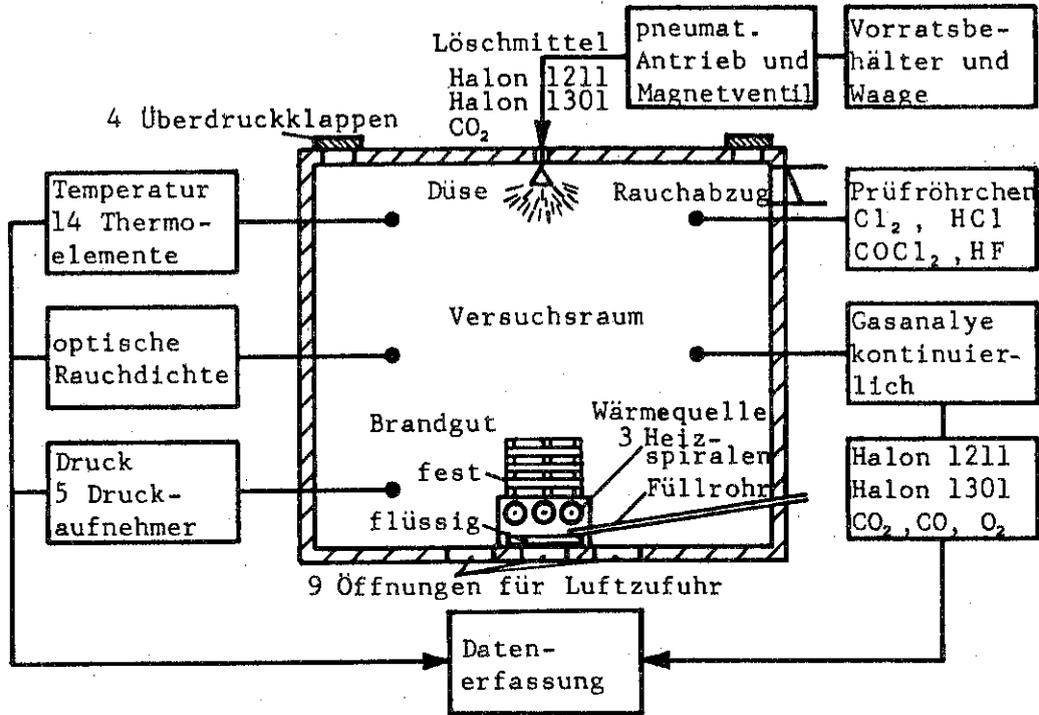


Bild 1. Schema der Versuchsanordnung

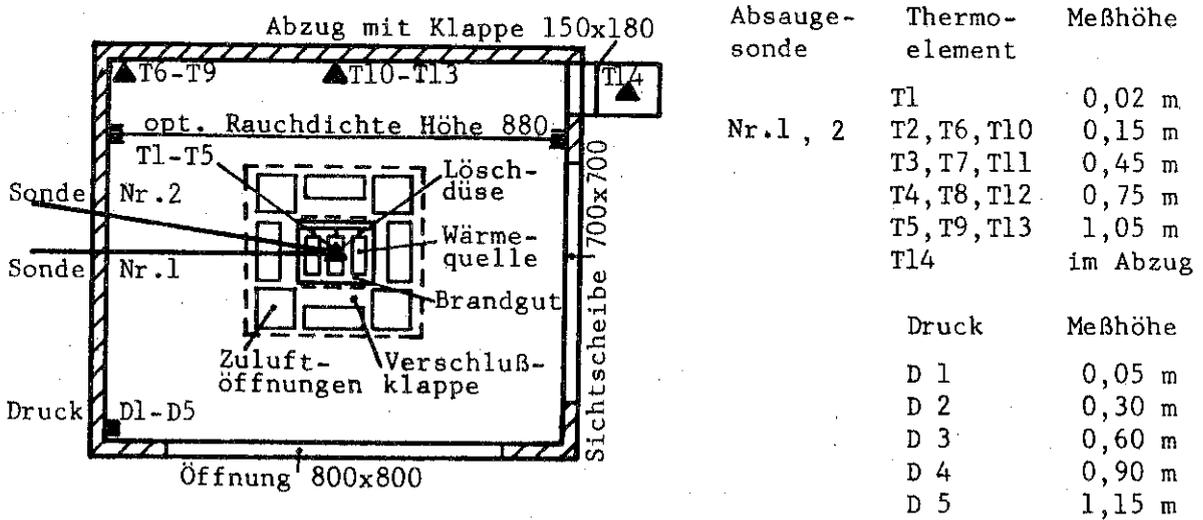
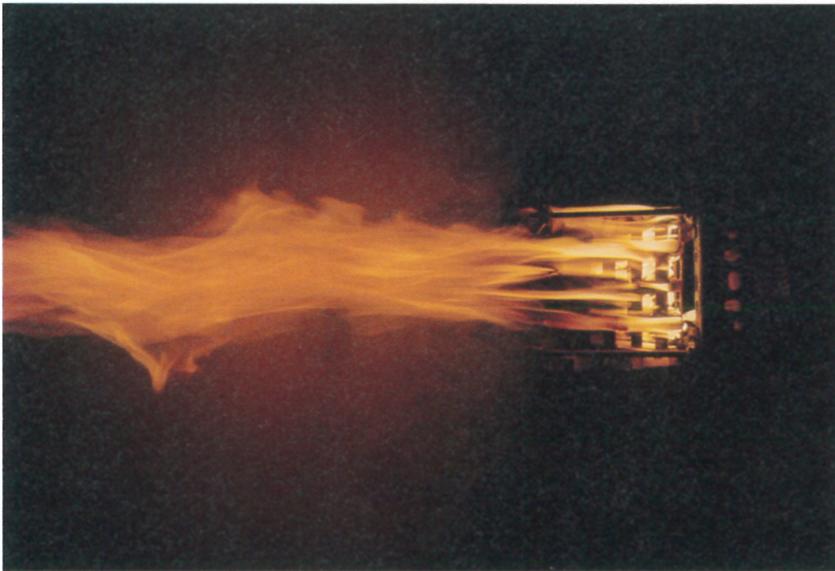
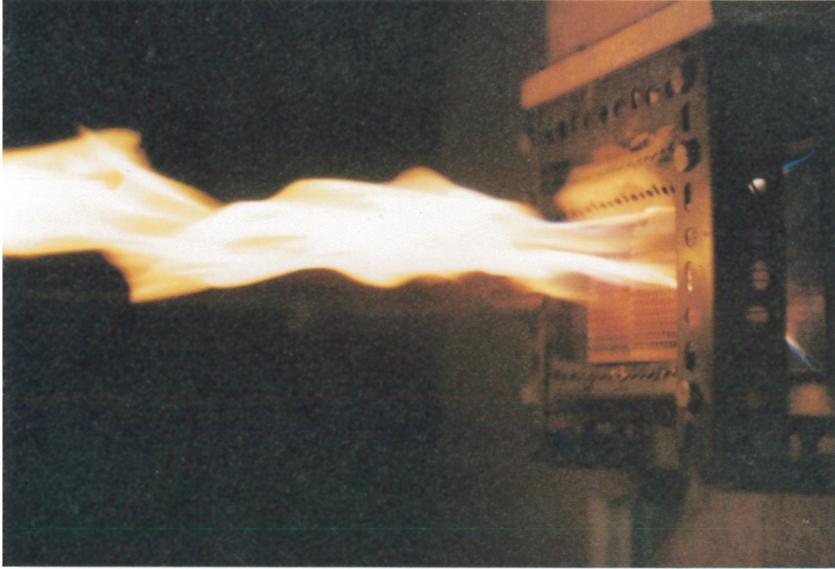


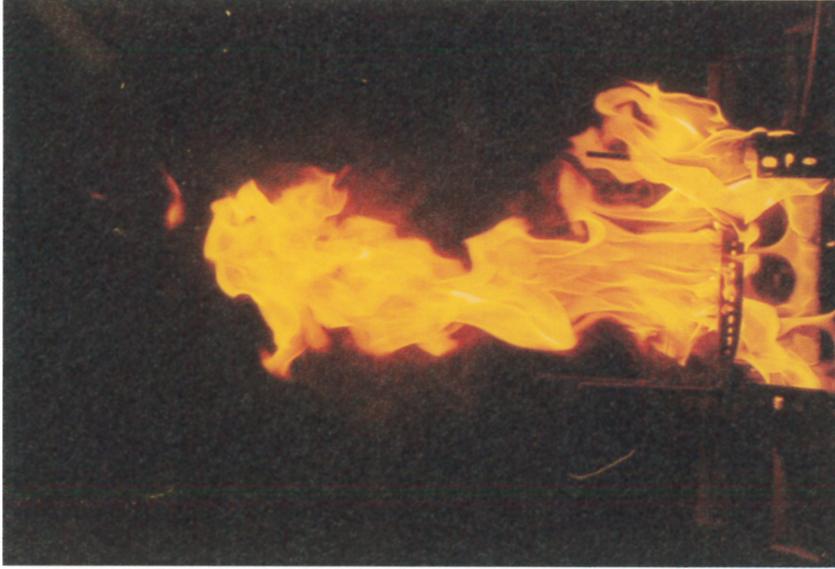
Bild 2. Lage der Meßstellen im Versuchsraum



Holzkrippe (K)



Spiritus (S)



Heizöl (H)

Bild 3. Typische Flammen der Brandstoffe Holzkrippe, Spiritus und Heizöl.

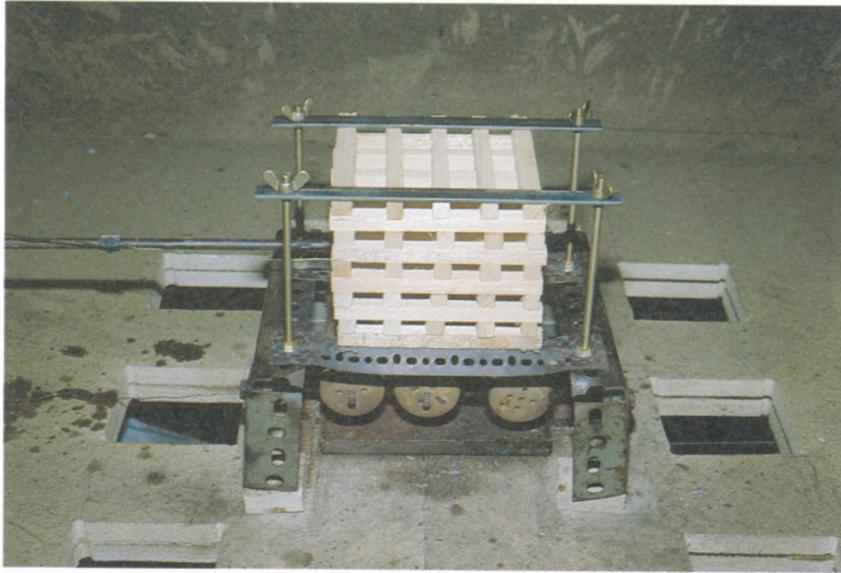


Bild 4a. Holzkippe vor dem Löscheinsatz.

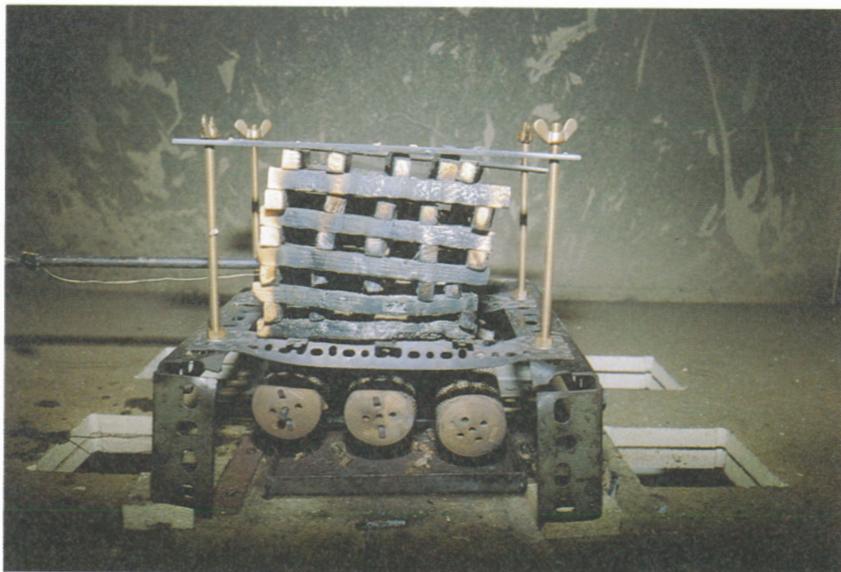


Bild 4b. Holzkippe nach erfolgreichem Löscheinsatz.

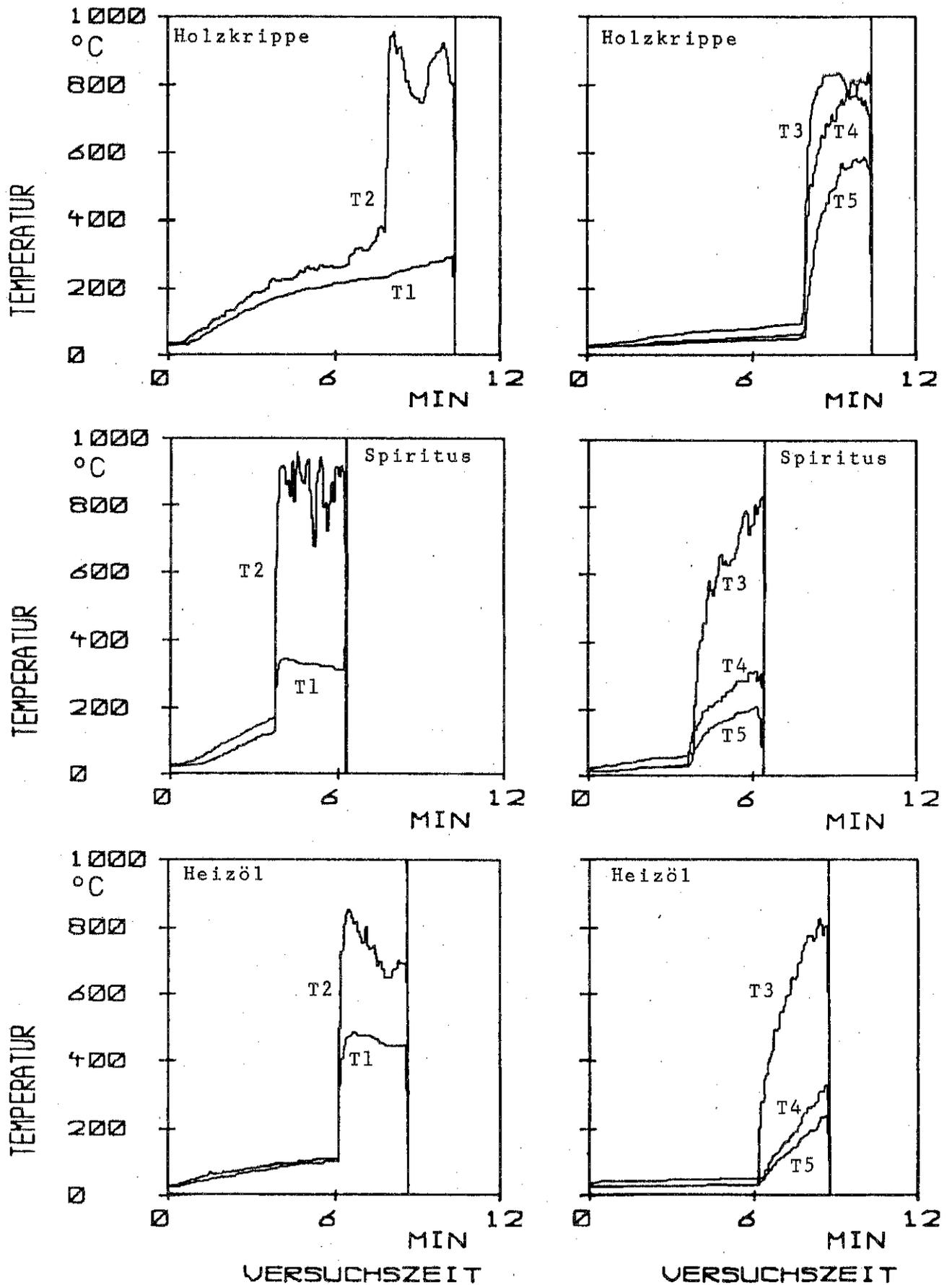


Bild 5. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T5 vor dem Löscheinsatz.

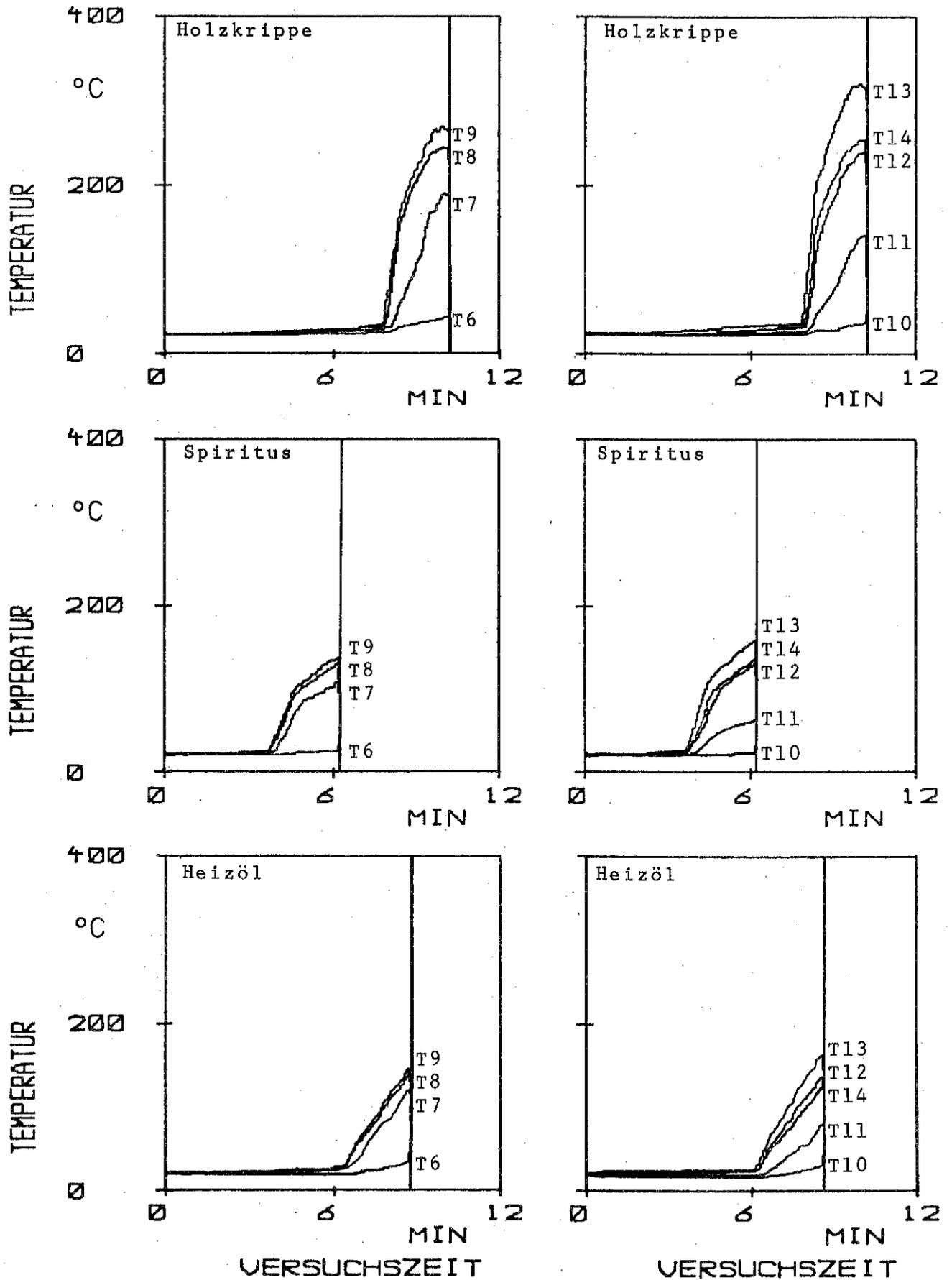


Bild 6. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T6 bis T14 vor dem Löscheinsatz.

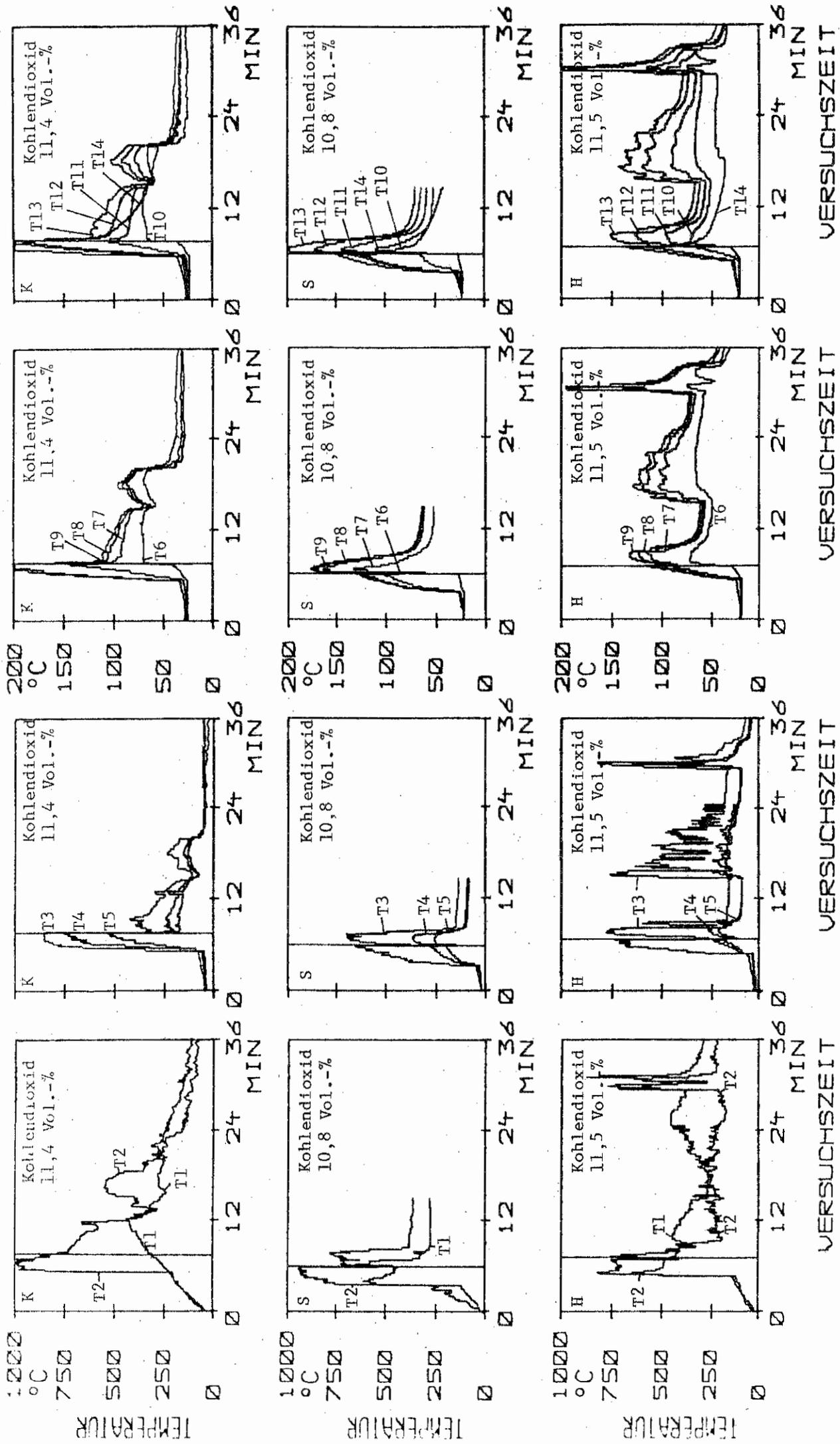


Bild 7. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

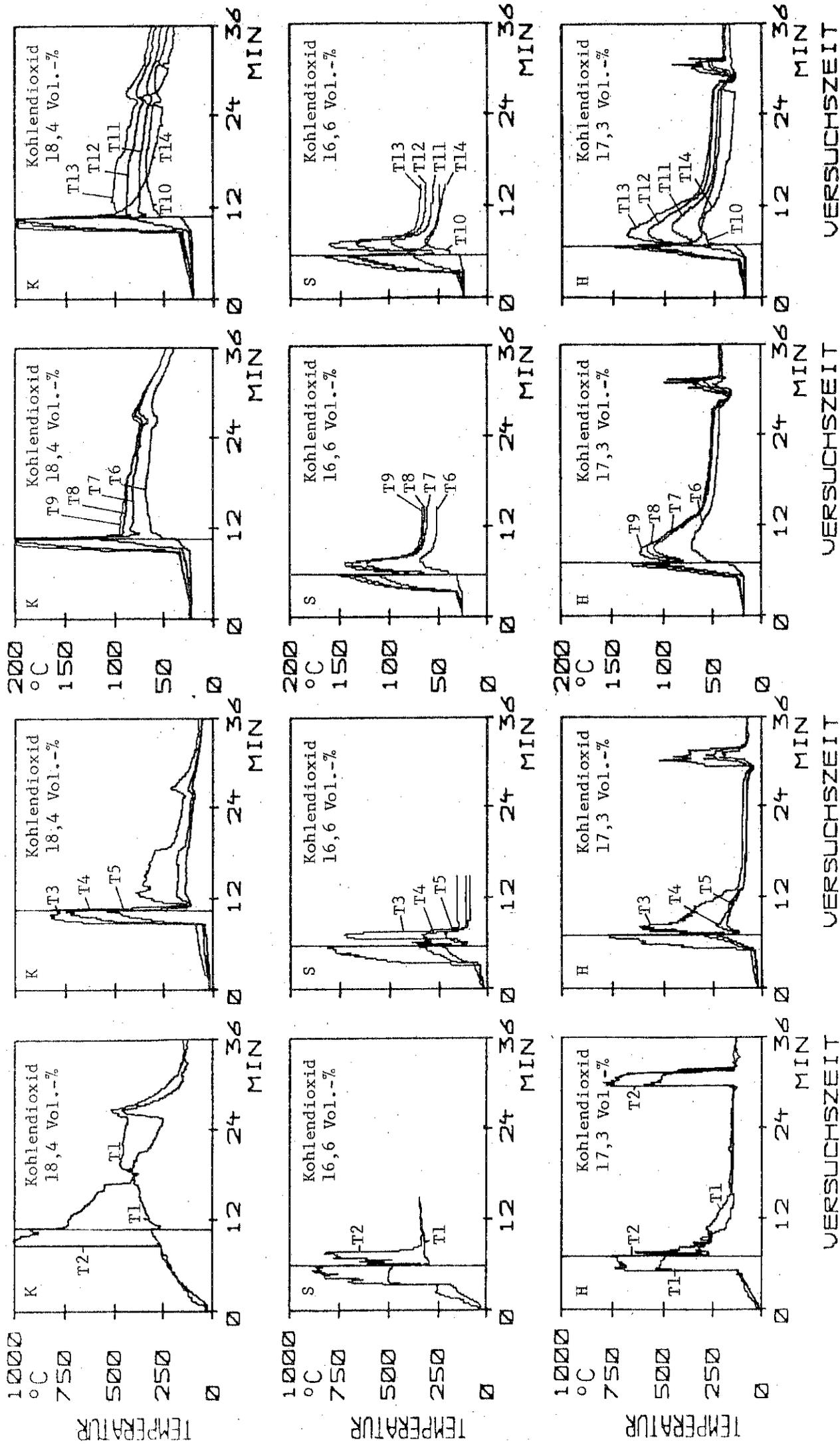


Bild 8. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

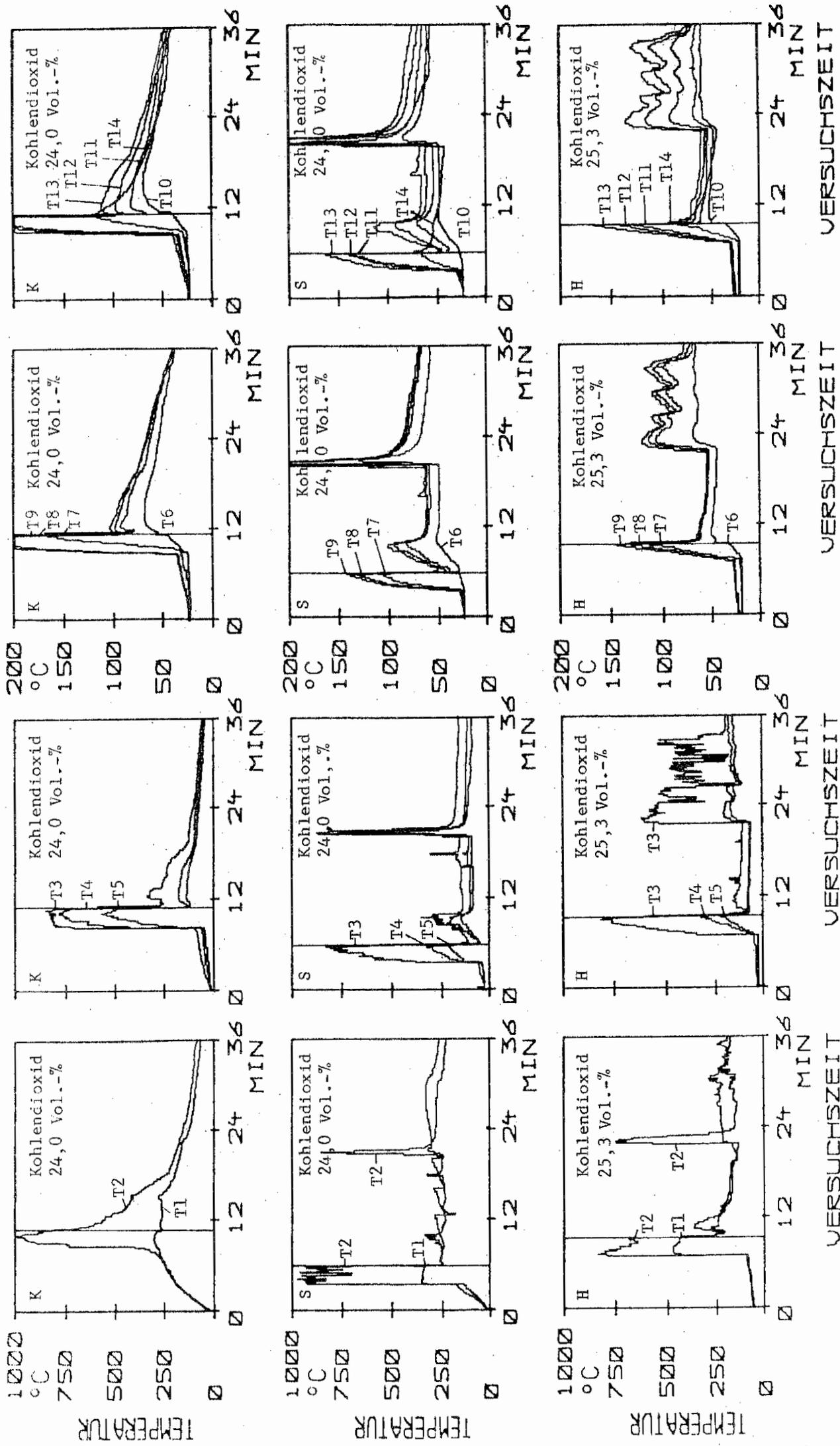


Bild 9. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

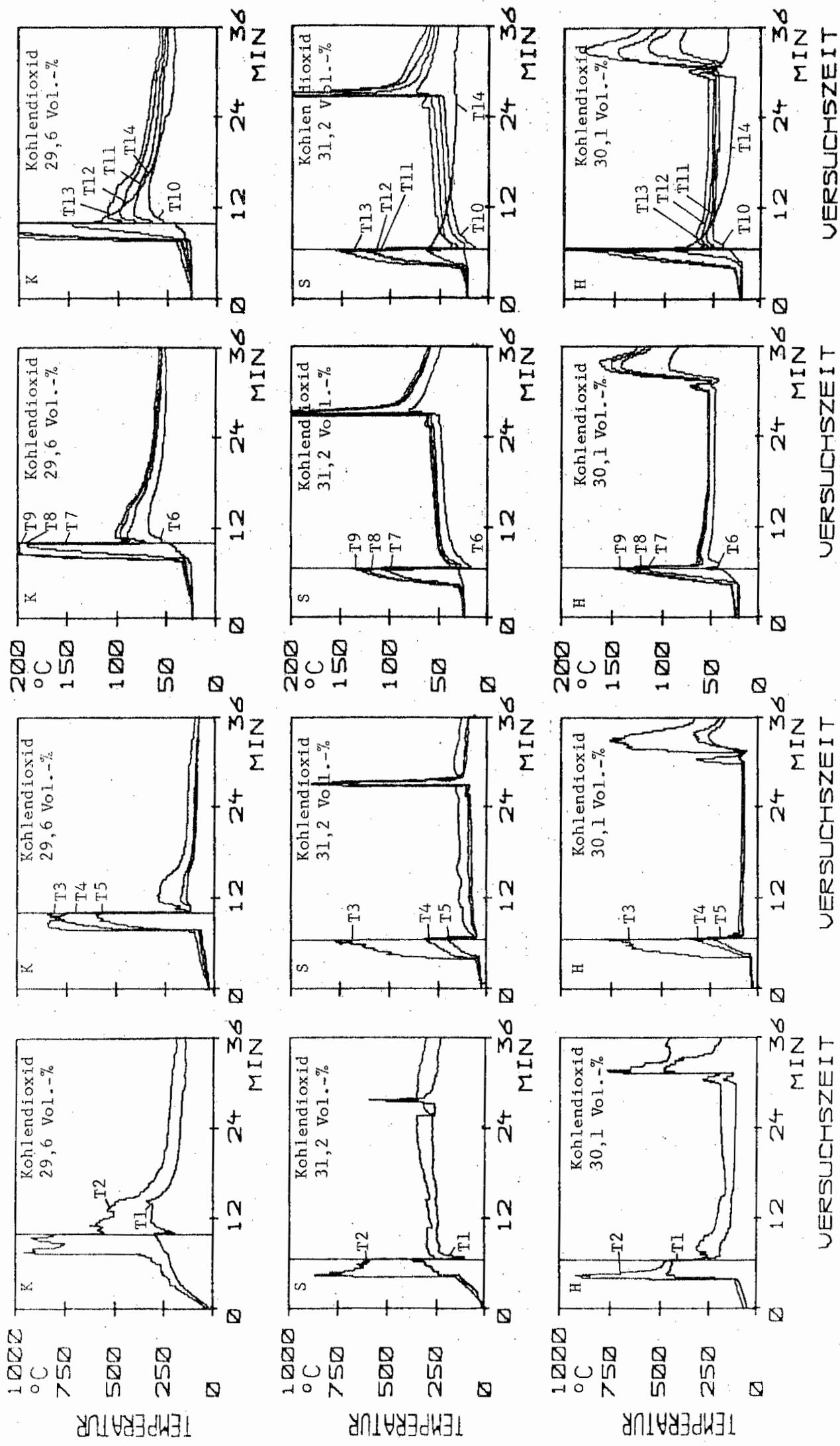
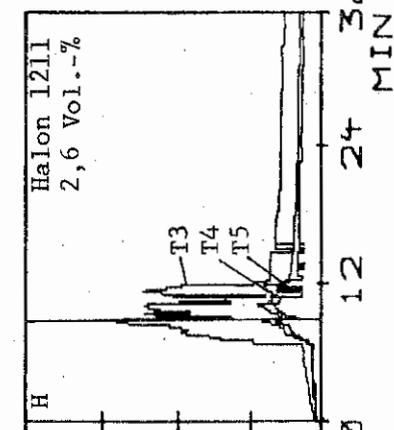
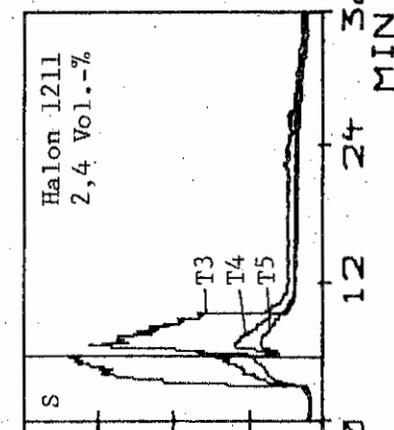
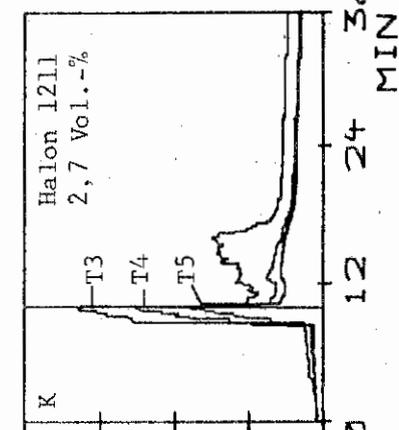
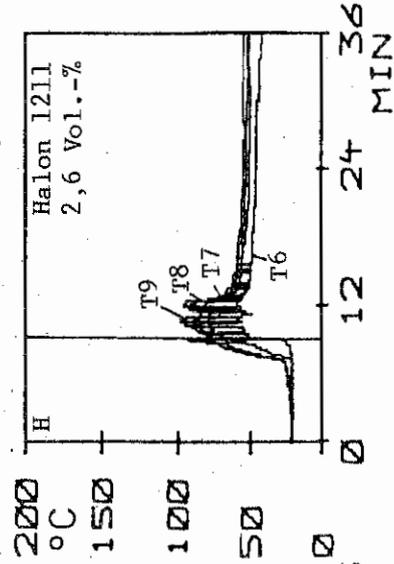
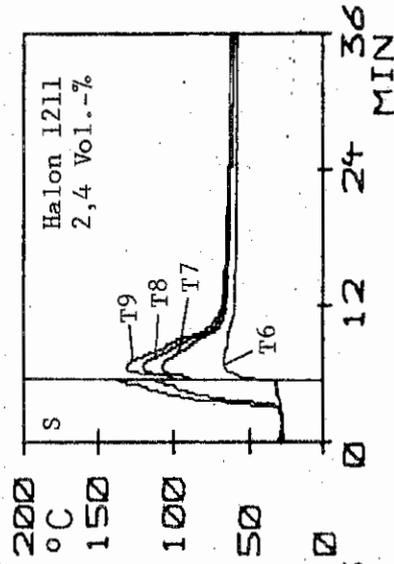
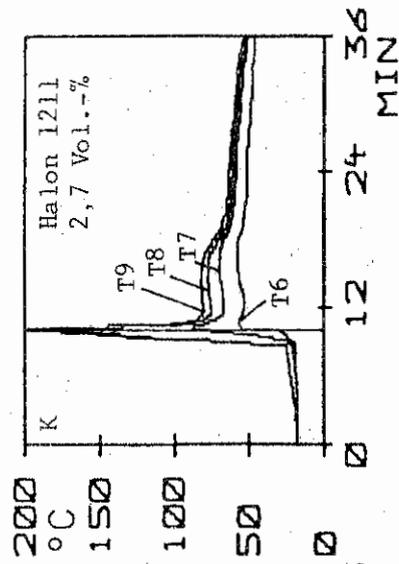
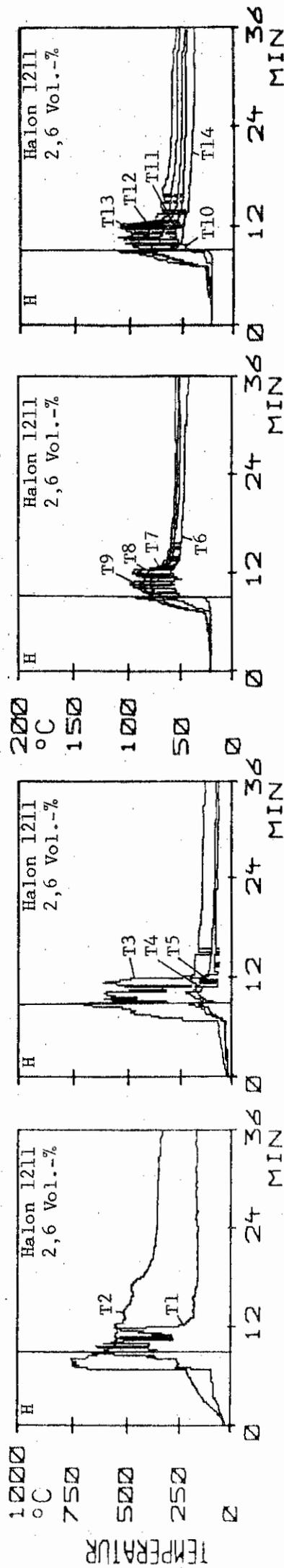
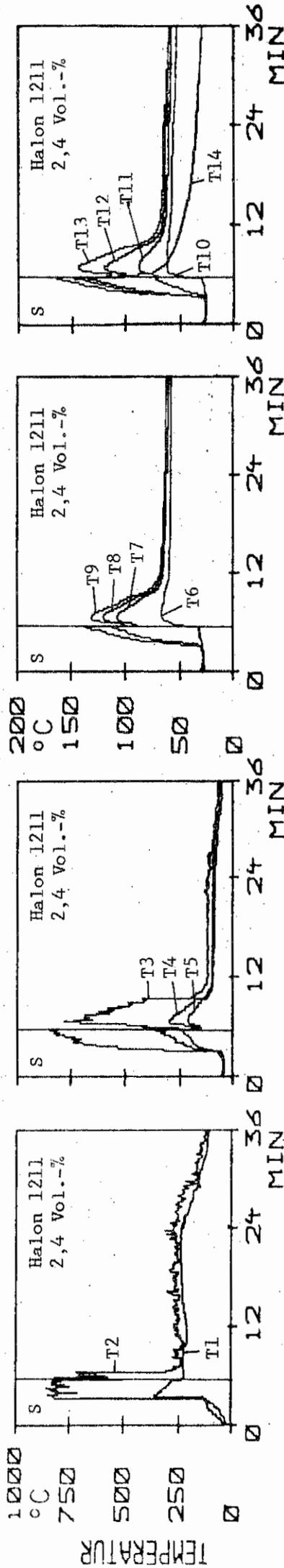
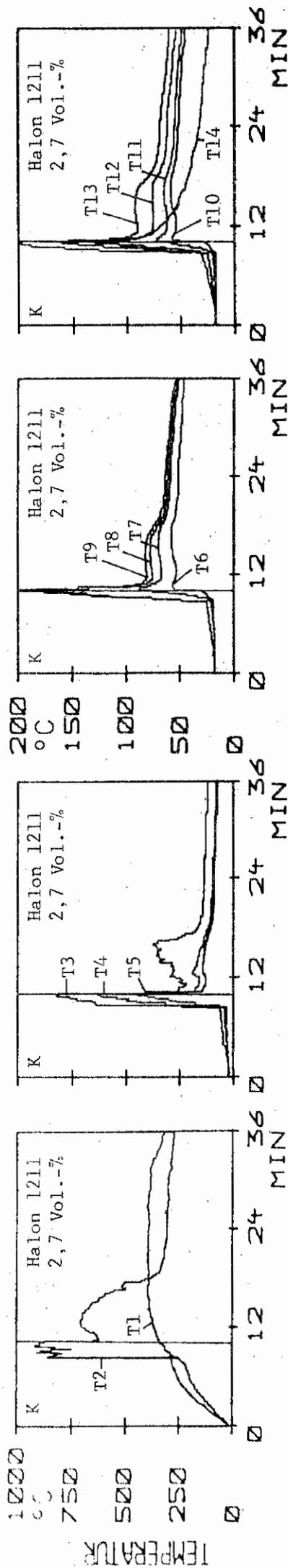


Bild 10. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.



VERSUCHSZEIT

Bild 11. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Halon 1211 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

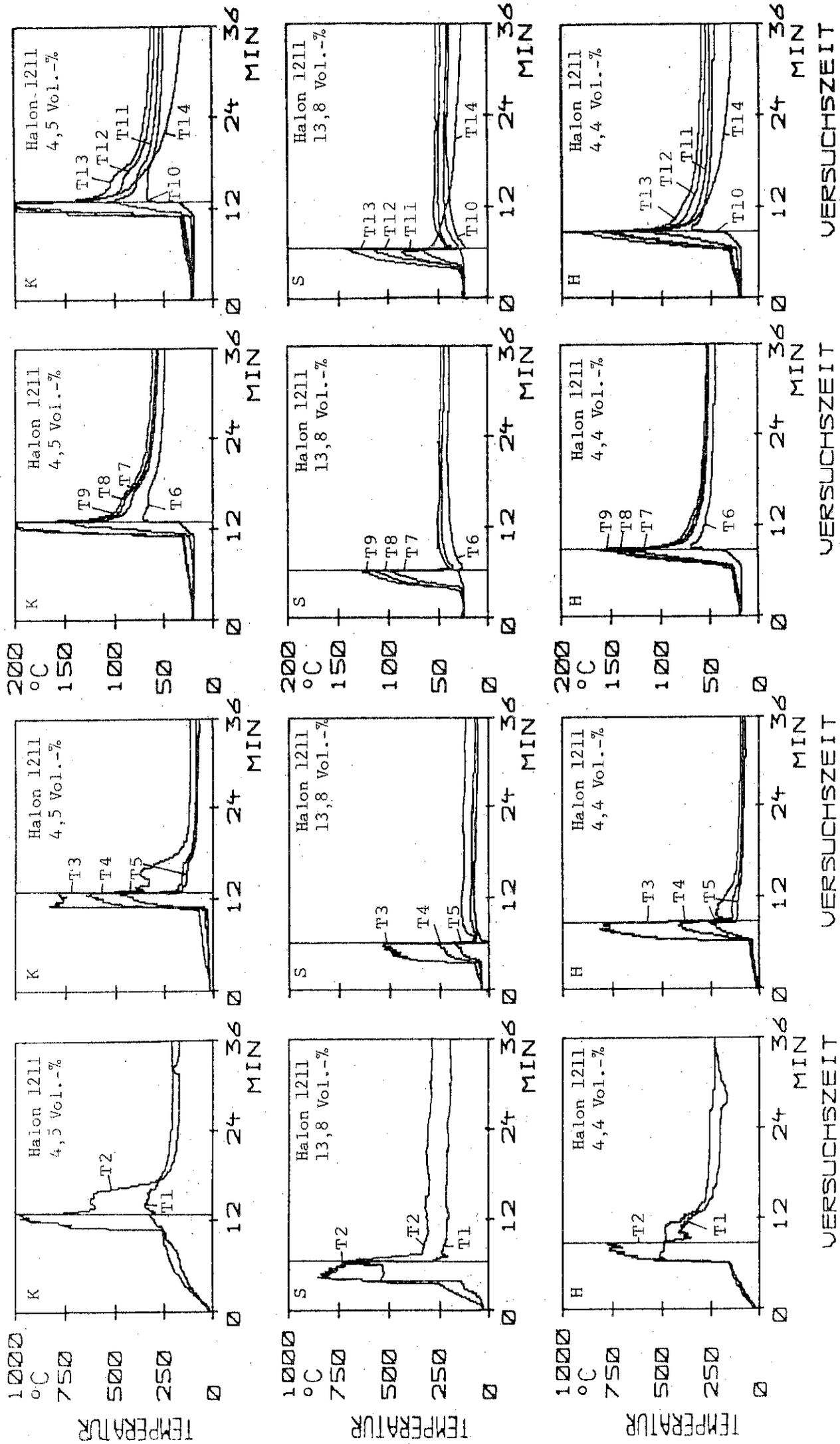


Bild 12. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Messstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Halon 1211 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

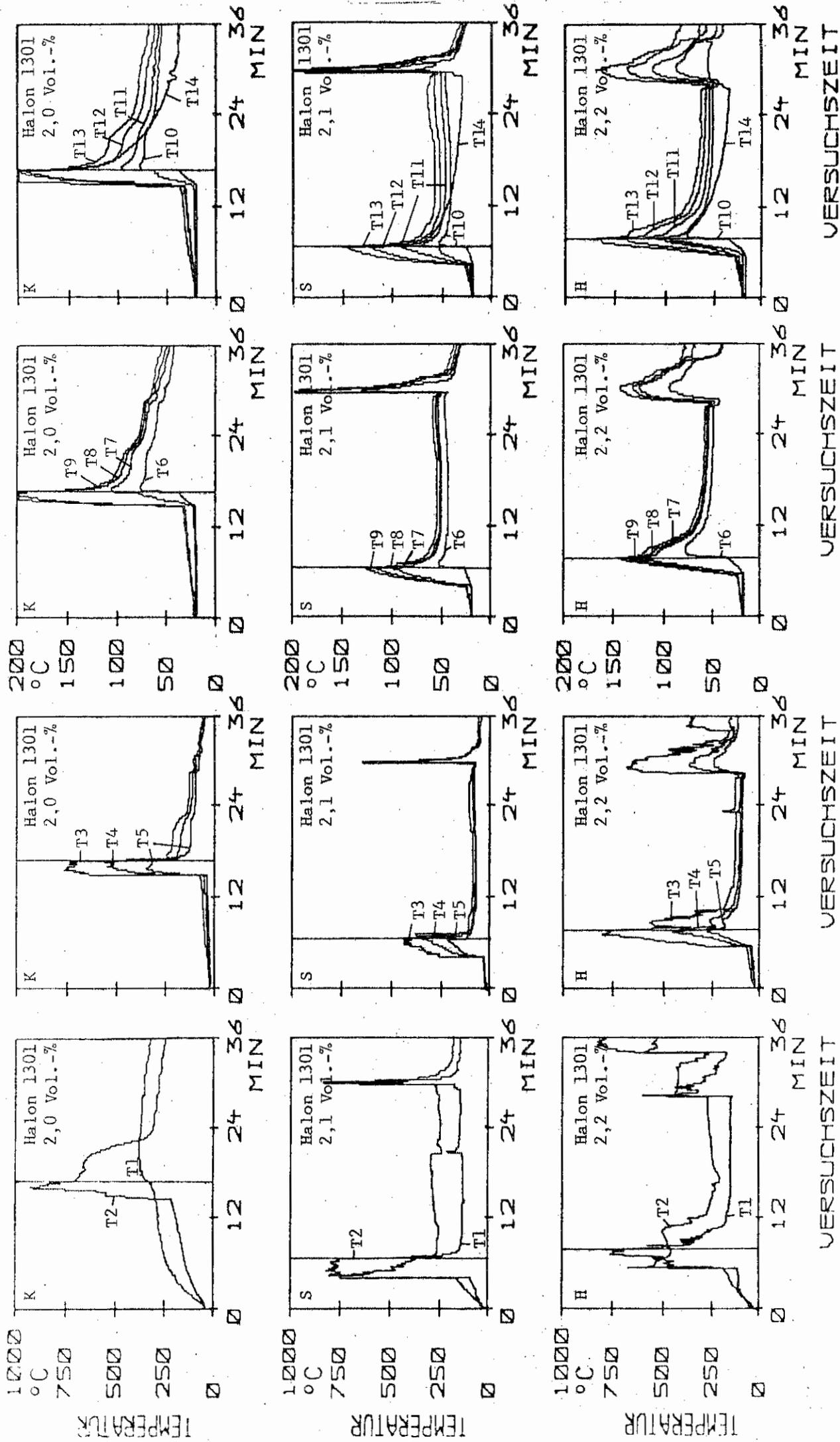


Bild 13. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Halon 1301 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

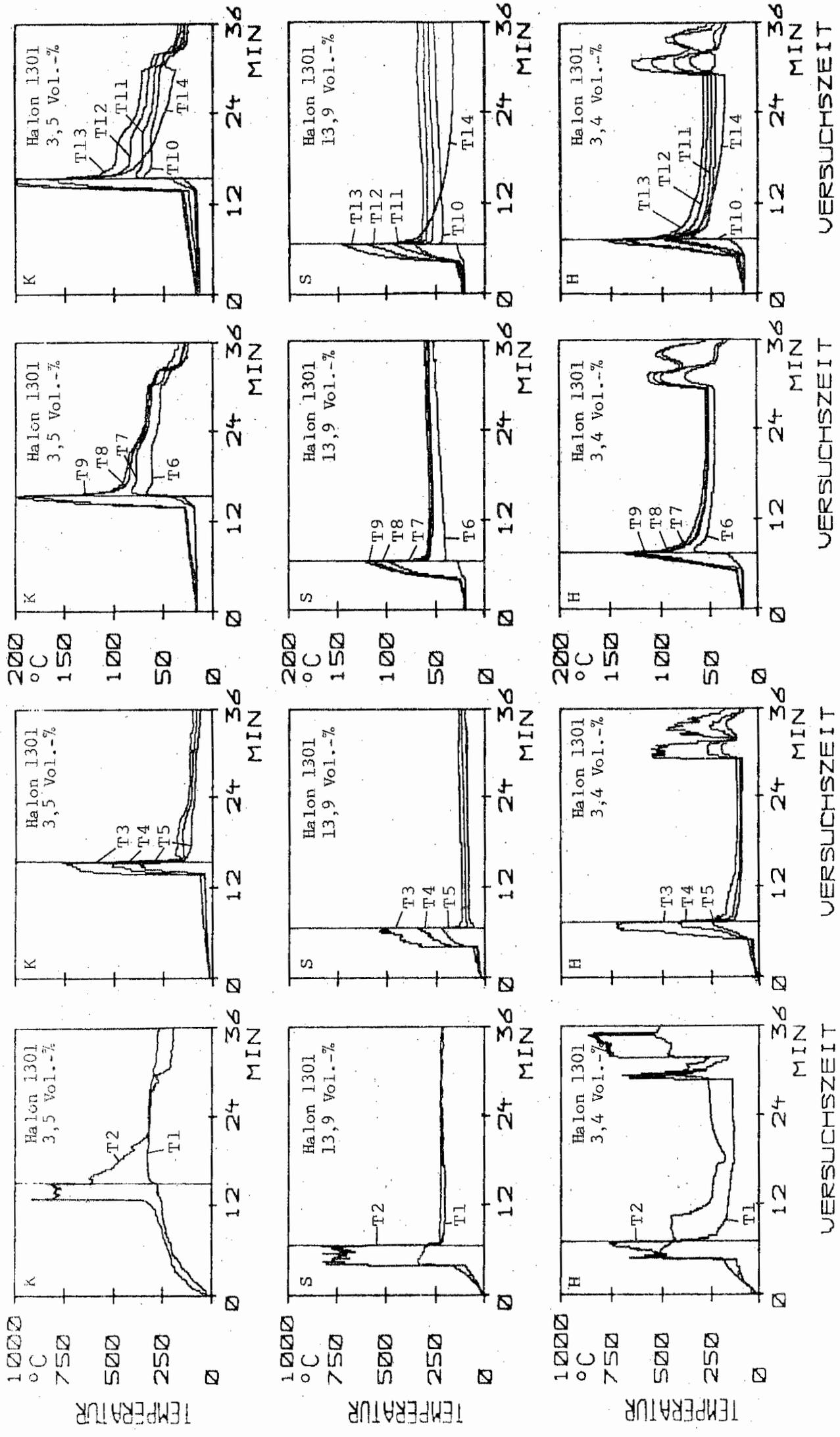


Bild 14. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T14 beim Einsatz von Halon 1301 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.



Bild 15. Spiritusflamme nach der Rückzündung in einem  $\text{CO}_2$  /Luft-Gemisch.

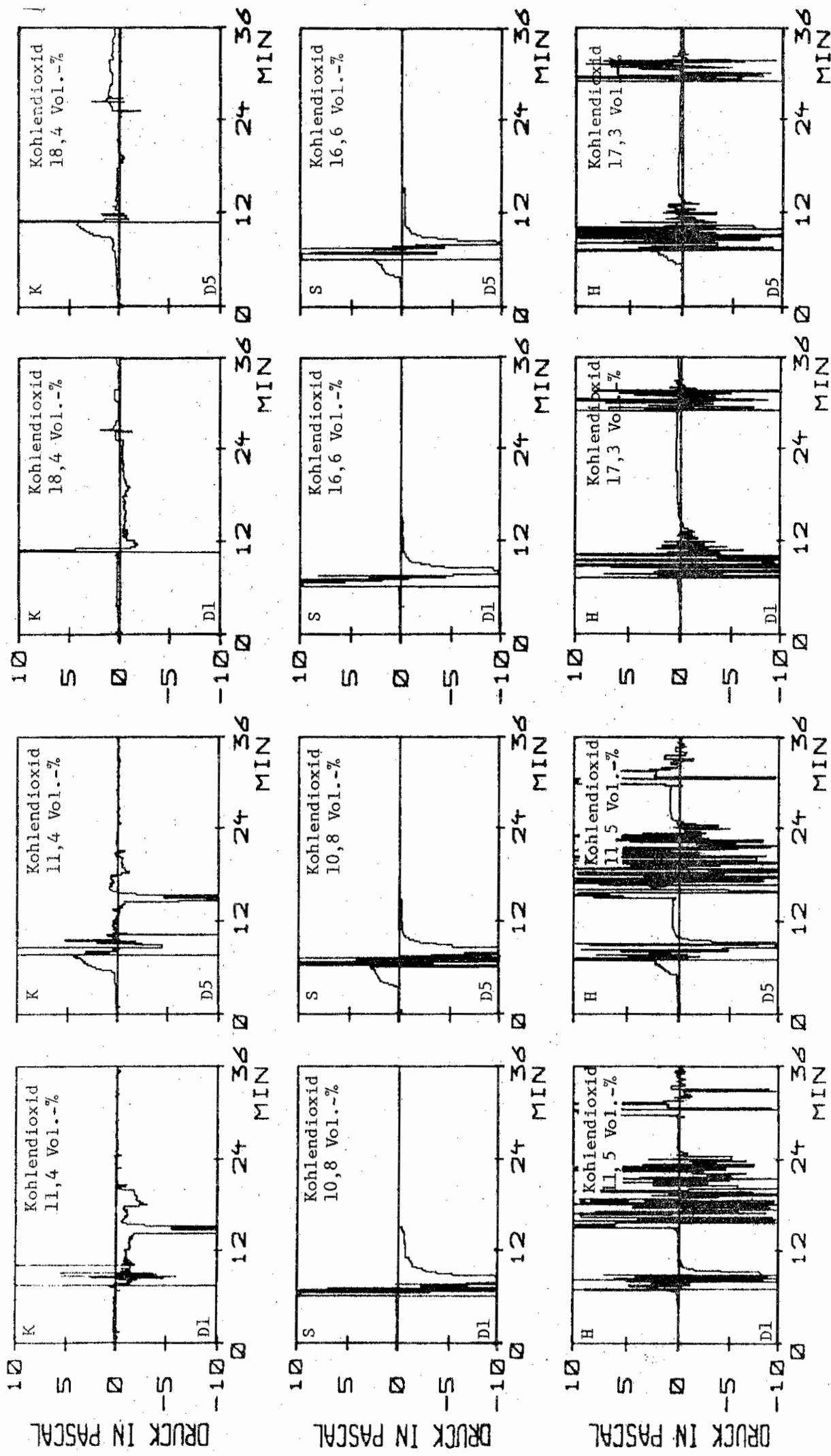


Bild 16. Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen D1 und D5 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

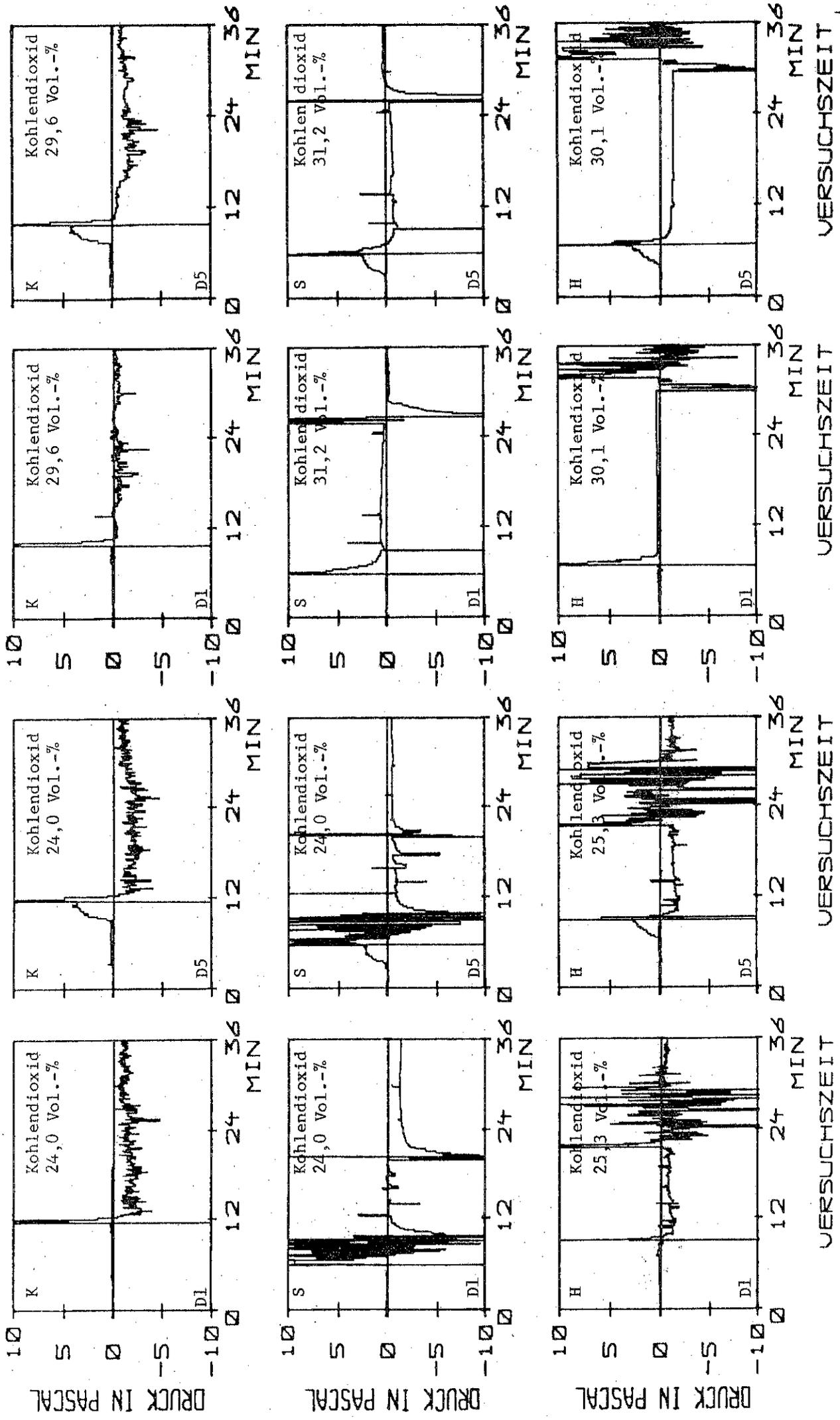


Bild 17. Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen D1 und D5 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

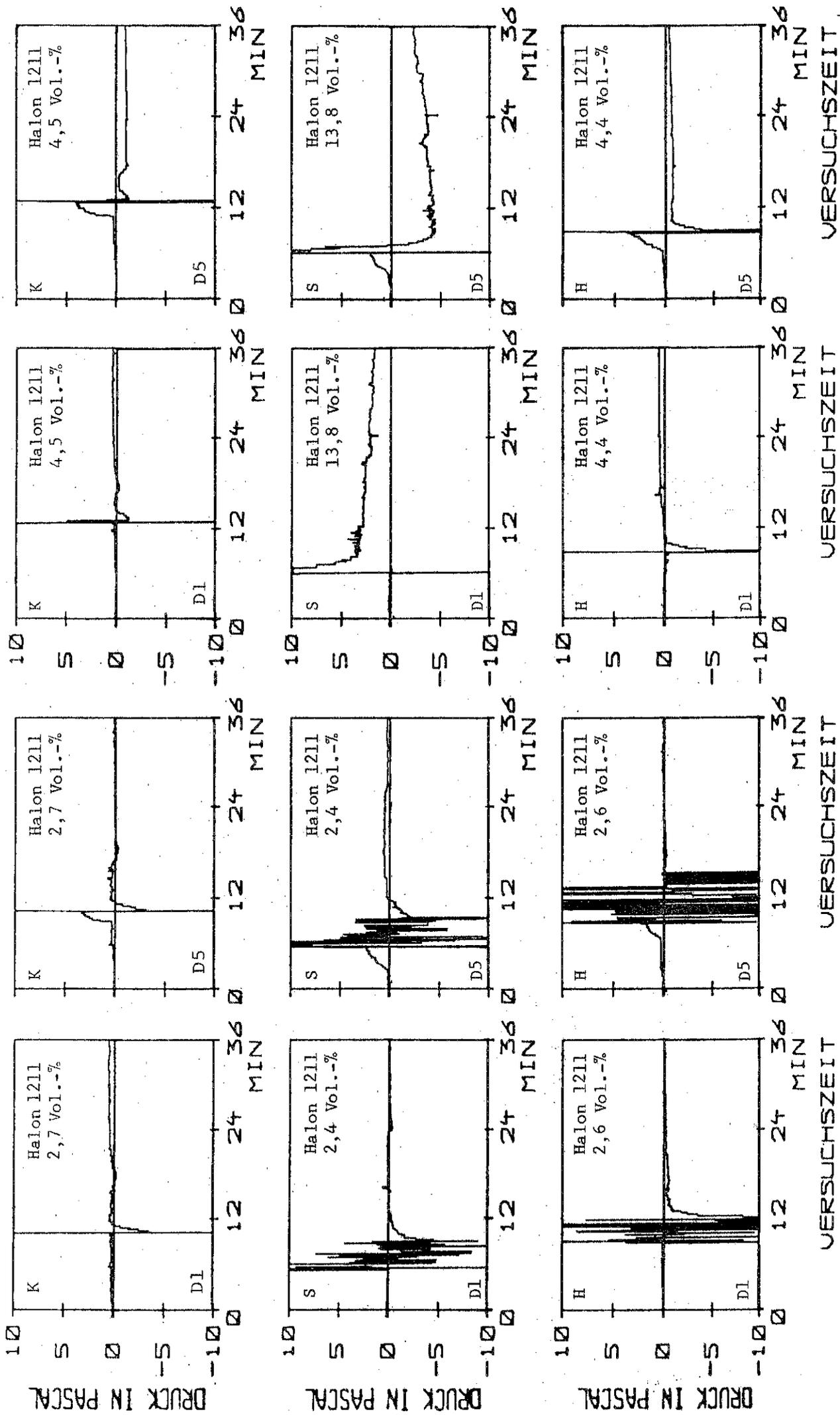


Bild 18. Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen D1 und D5 beim Einsatz von Halon 1211 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

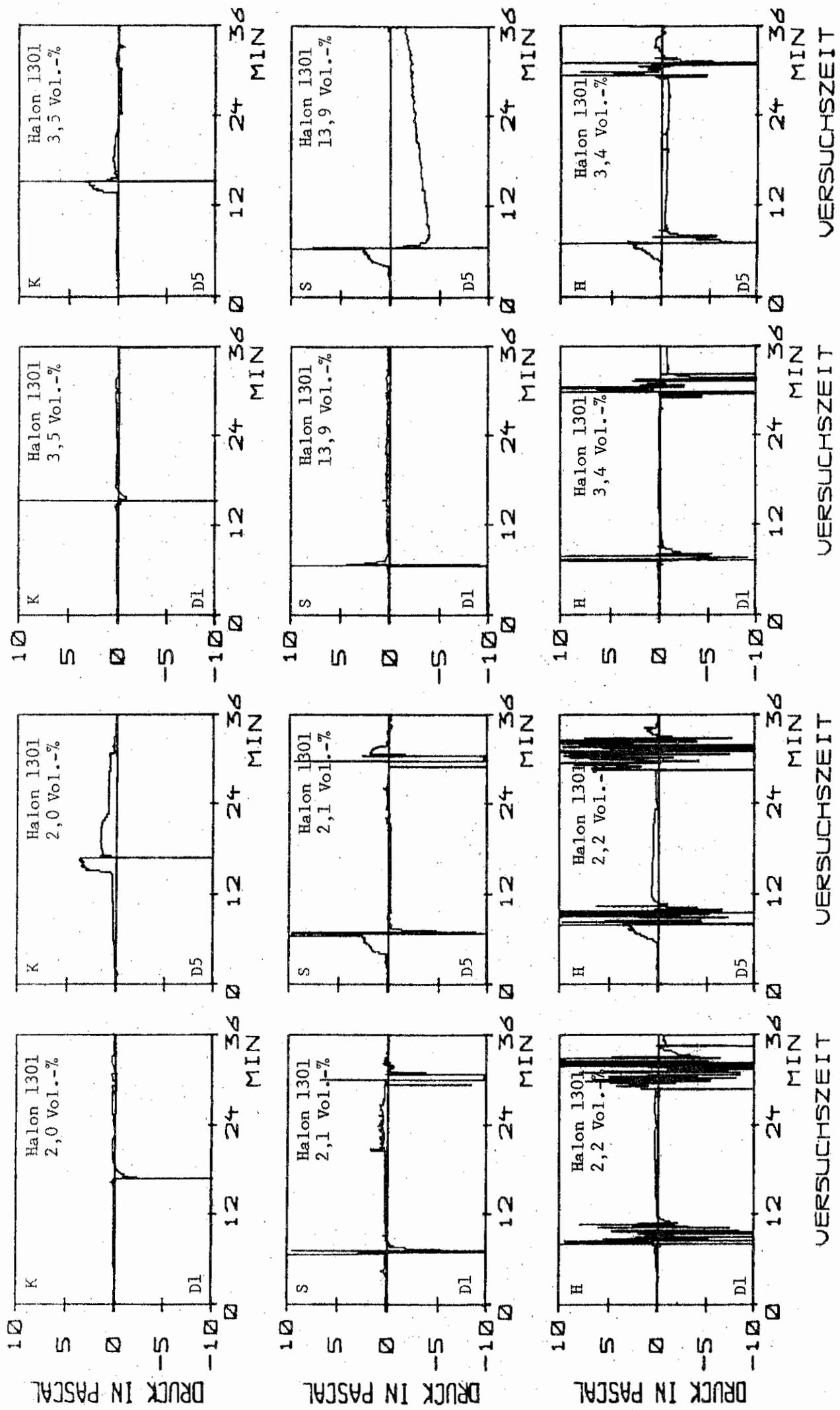


Bild 19. Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen D1 und D5 beim Einsatz von Halon 1301 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

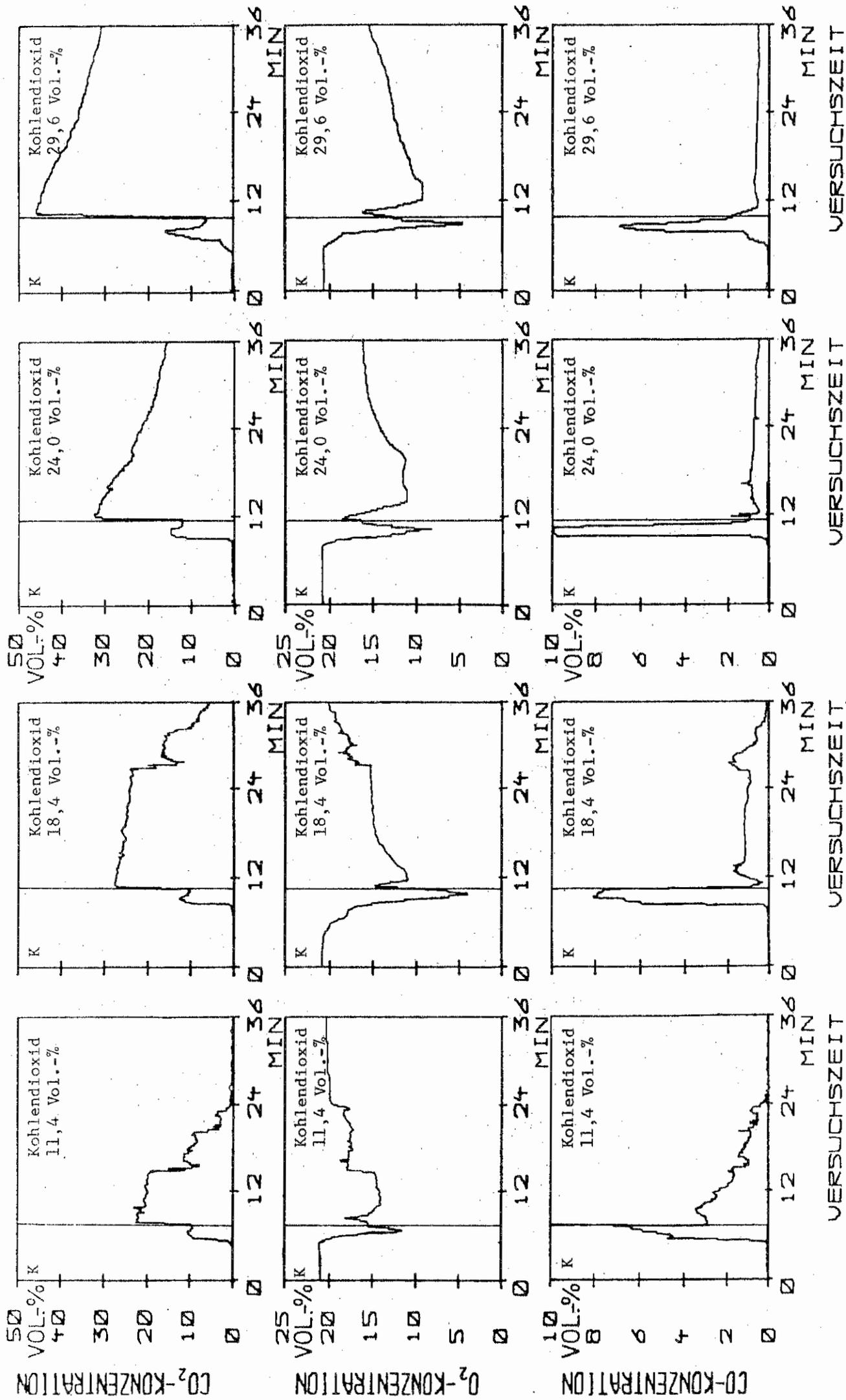


Bild 20. Verlauf der örtlichen Konzentration von CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und CO in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Holz als Brandstoff.

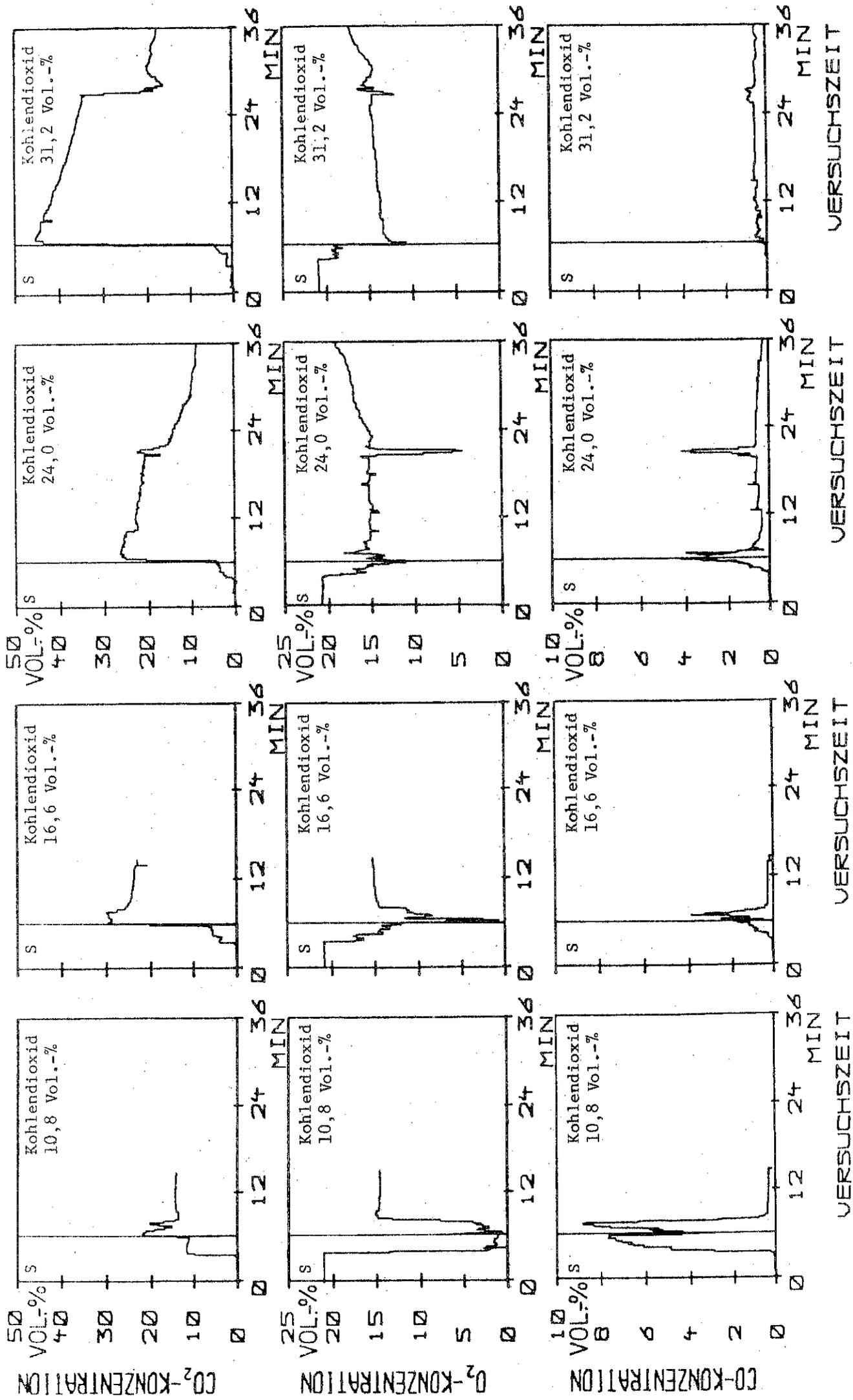


Bild 21. Verlauf der örtlichen Konzentration von CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und CO in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Spiritus als Brandstoff.

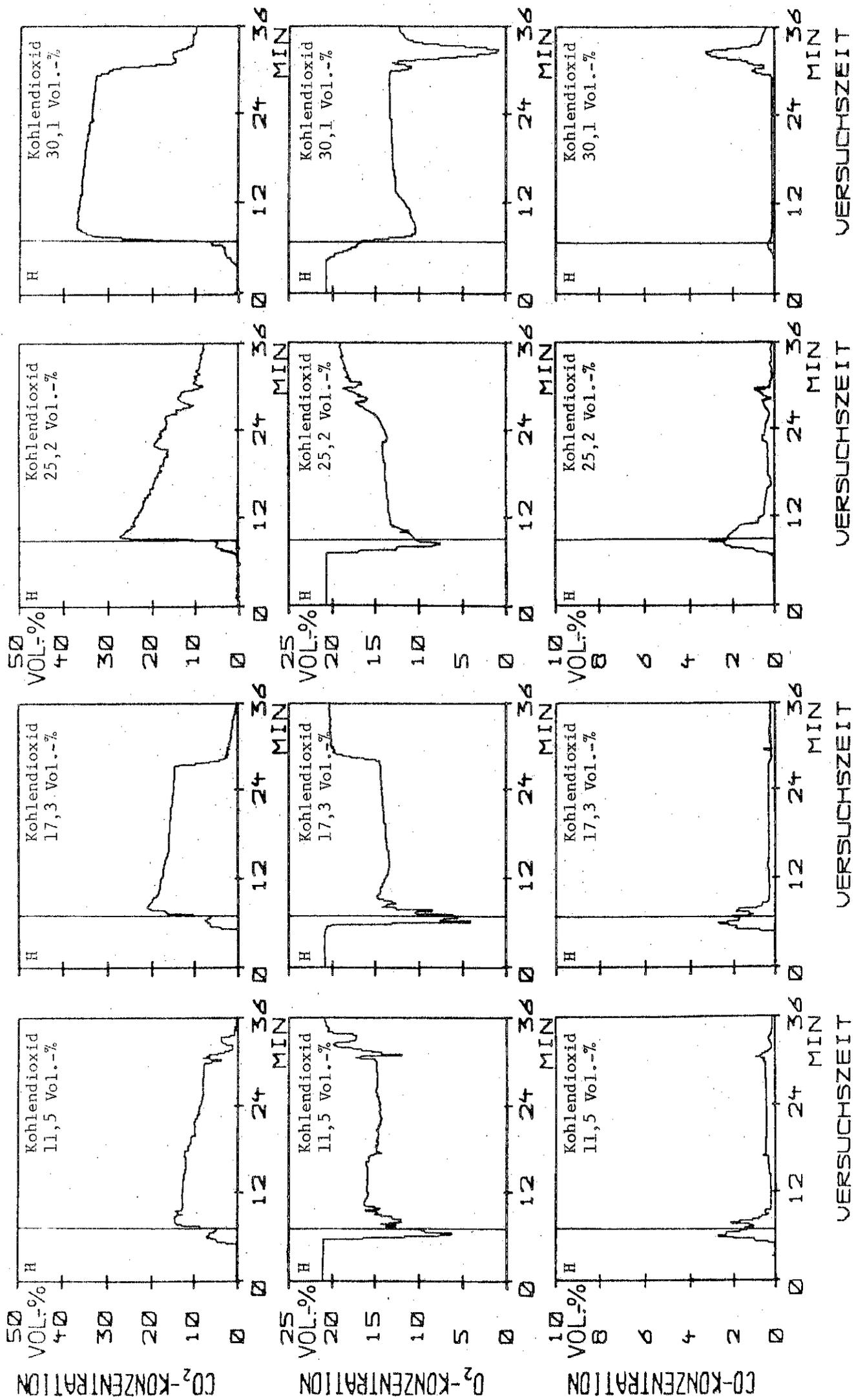


Bild 22. Verlauf der örtlichen Konzentration von CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und CO in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Heizöl als Brandstoff.

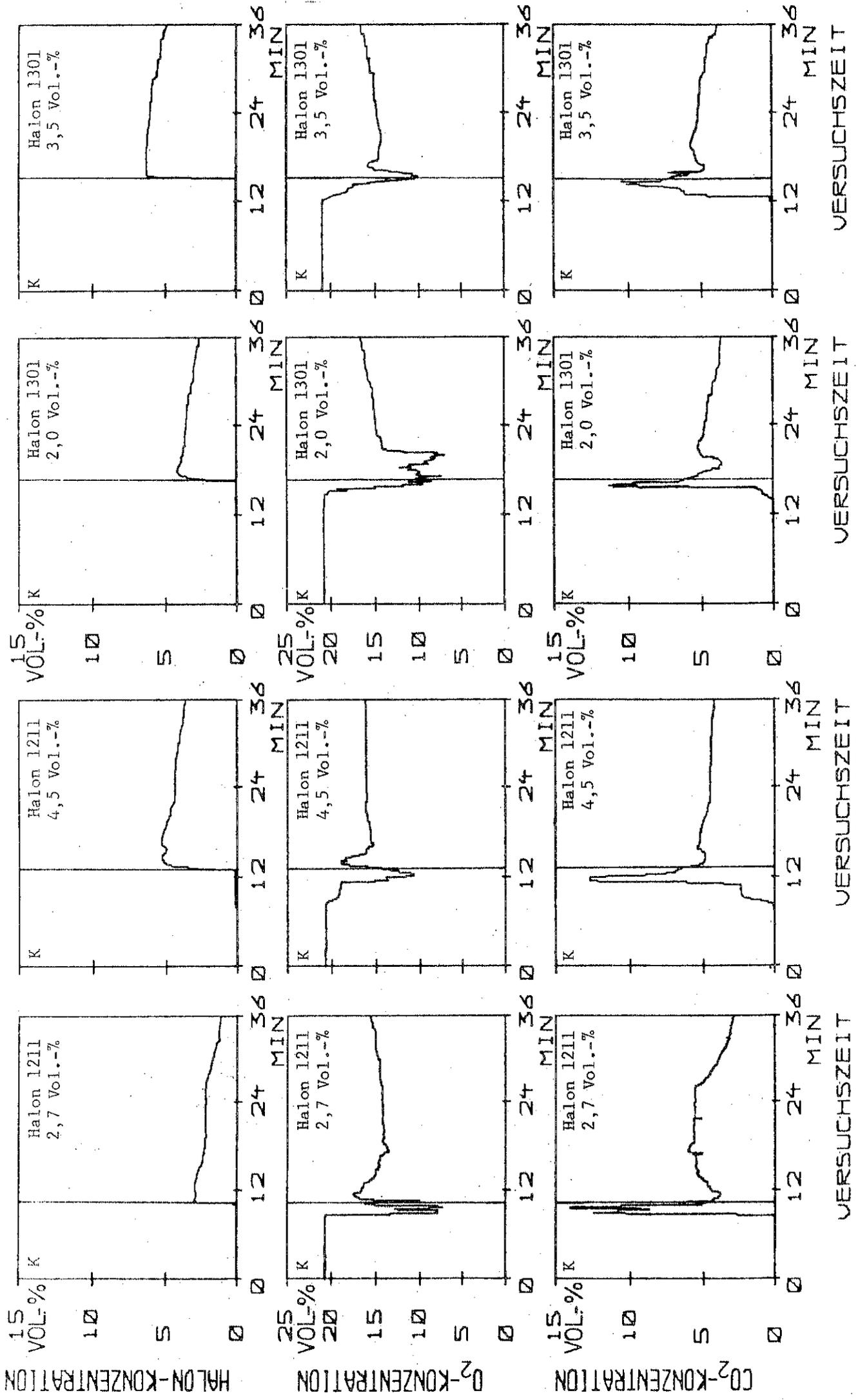


Bild 23. Verlauf der örtlichen Konzentration von Halon 1211, Halon 1301, O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Holz als Brandstoff.

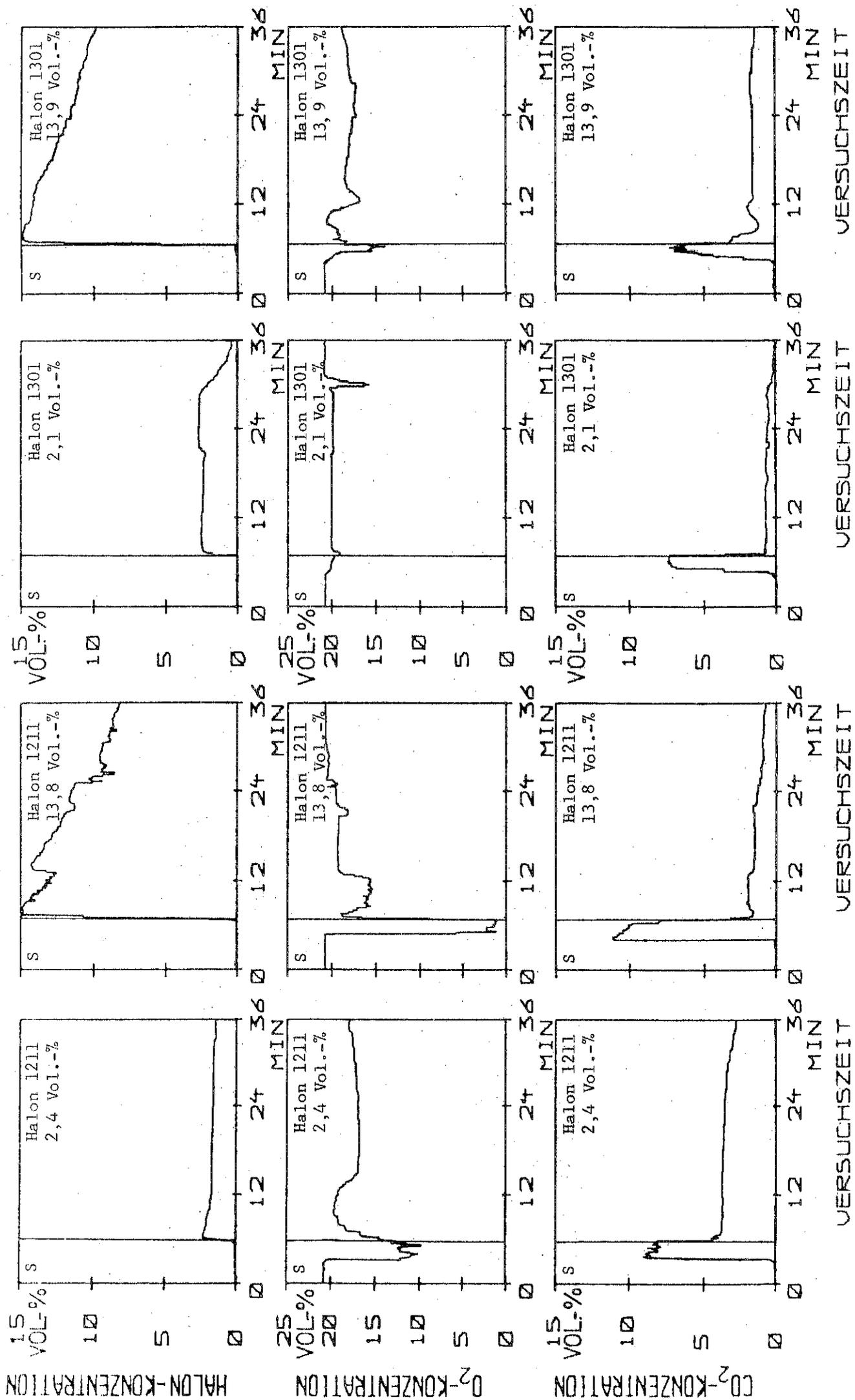


Bild 24. Verlauf der örtlichen Konzentration von Halon 1211, Halon 1301, O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Spiritus als Brandstoff. 8

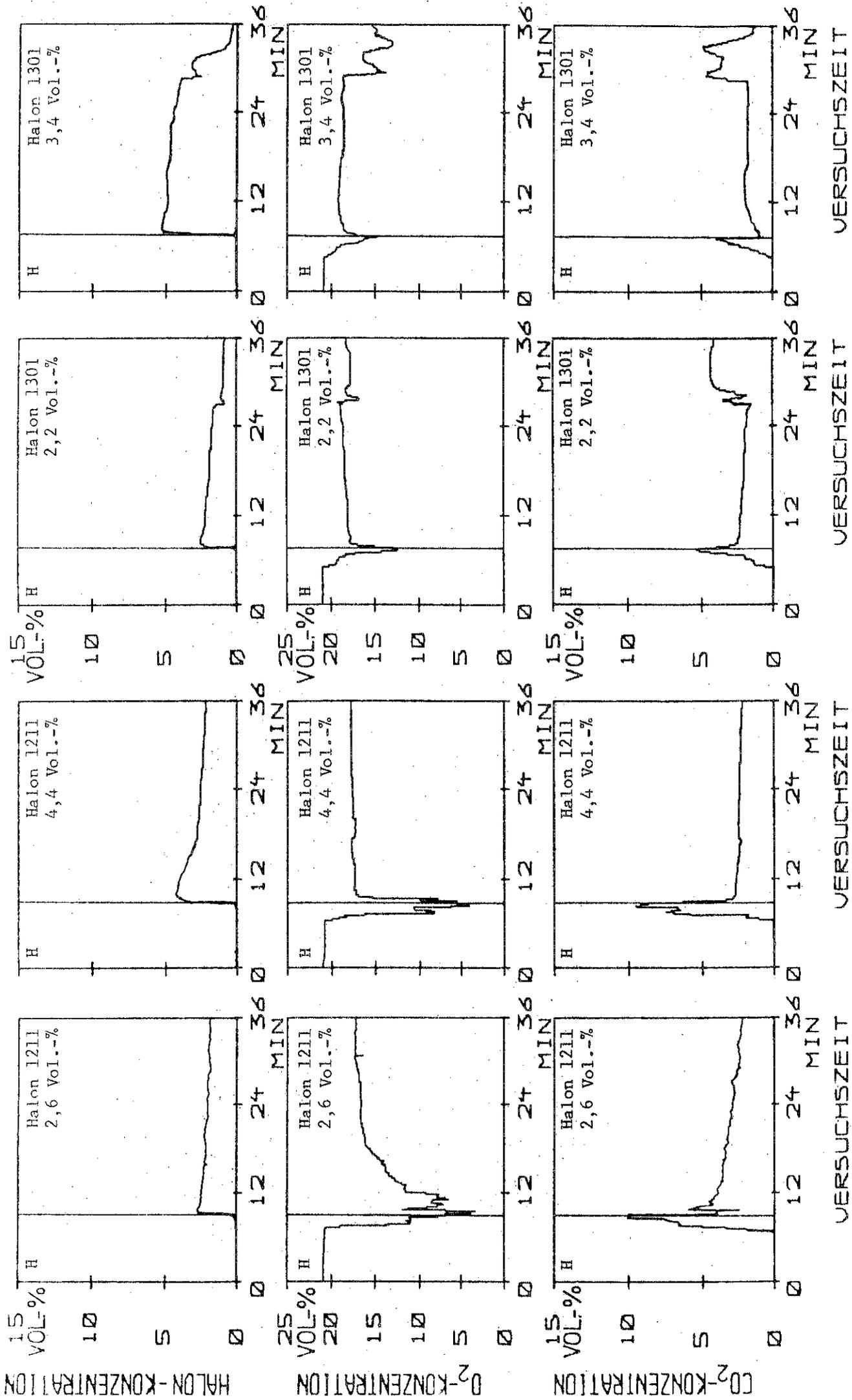


Bild 25. Verlauf der örtlichen Konzentration von Halon 1211, Halon 1301, O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Heizöl als Brandstoff.

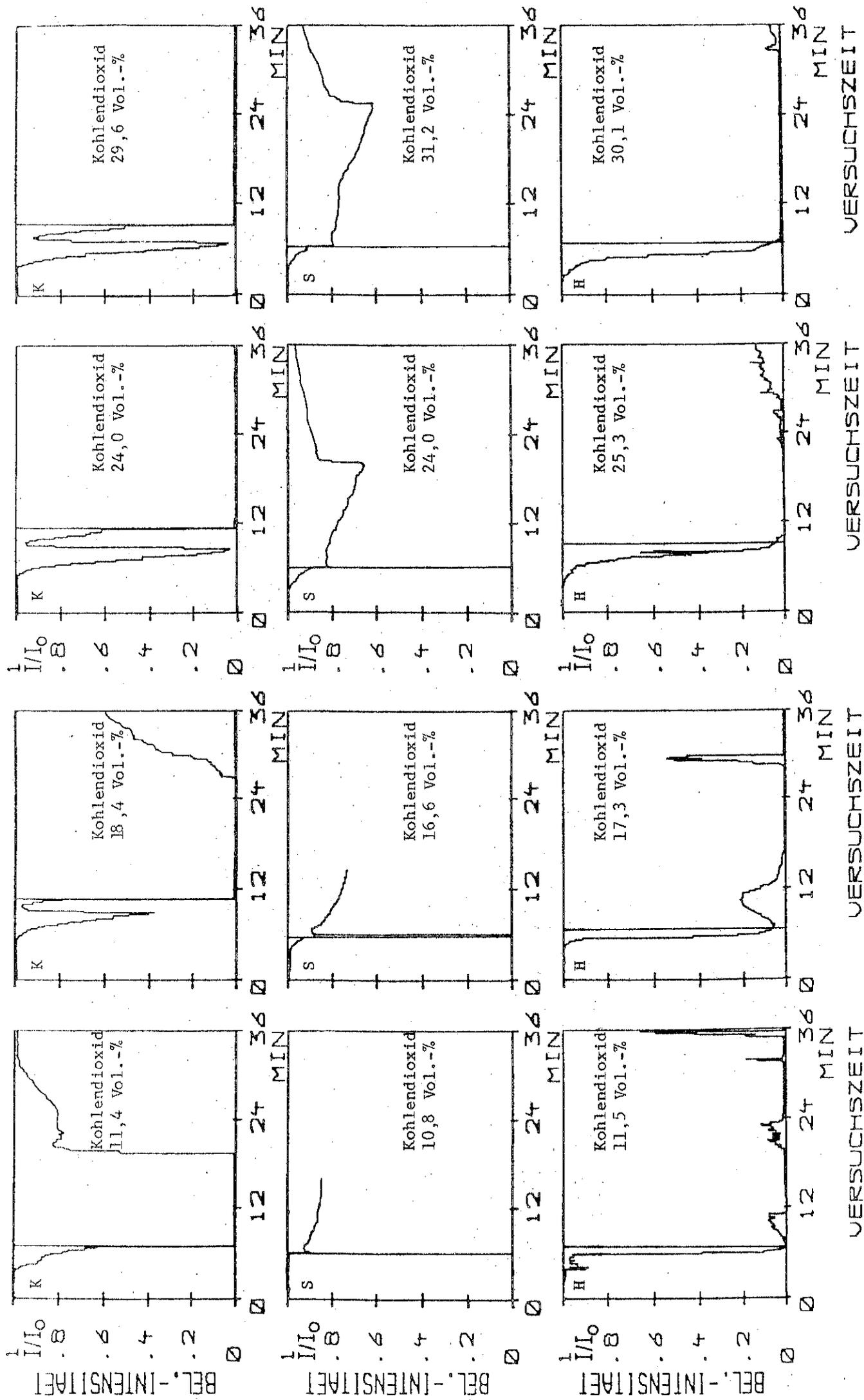


Bild 26. Verlauf der Beleuchtungsintensität I/I<sub>0</sub> in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Holz, Spiritus und Heizöl als Brandstoff.

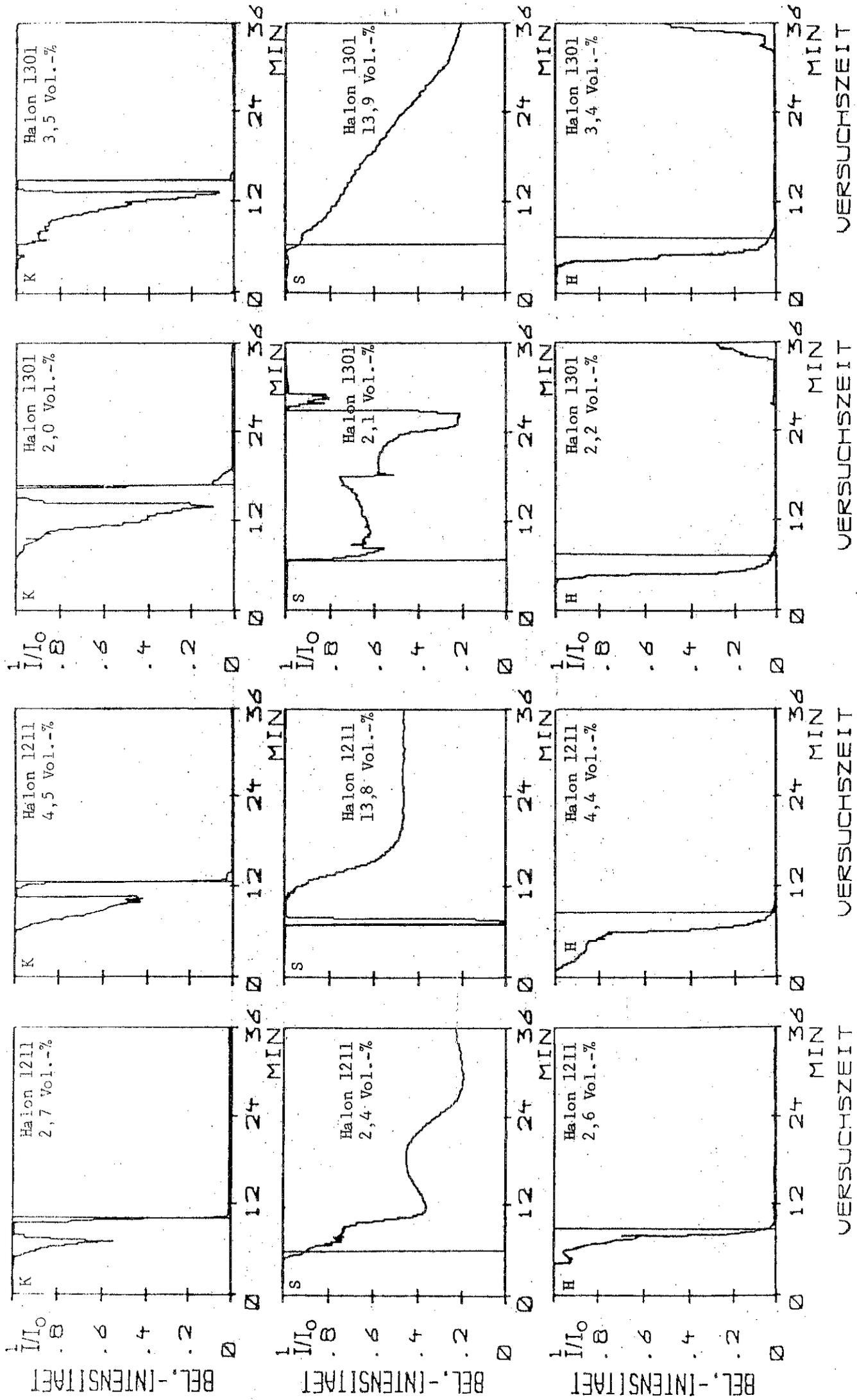


Bild 27. Verlauf der Beleuchtungsintensität  $I/I_0$  in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Holz, Spiritus und Heizöl als Brandstoff.