

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln.

Teil 9:

Löschwirksamkeit von CO₂, Halon 1211 und Halon 1301
bei einem Brand mit festen und flüssigen Brandstoffen
unterhalb der Decke und permanenter Wärmequelle.

49

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

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

Forschungsbericht Nr.49

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln.

Teil 9: Löschwirksamkeit von CO₂, Halon 1211 und
Halon 1301 bei einem Brand mit festen und
flüssigen Brandstoffen unterhalb der Decke
und permanenter Wärmequelle.

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Juli 1983

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. VERSUCHSANLAGE UND MESSEINRICHTUNG	2
3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	4
4. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	5
4.1 Temperatur	5
4.2 Druck	14
4.3 Gaskonzentration	20
4.3.1 Kontinuierliche Gasanalyse	20
4.3.2 Pyrolyseprodukte	25
4.4 Optische Rauchdichte	26
4.5 Vergleich	27
5. ZUSAMMENFASSUNG	29
6. LITERATURVERZEICHNIS	31
7. TABELLEN UND BILDER	32

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die Intensität der in der Praxis ablaufenden Brände werden einerseits durch die Anhäufung brennbarer Materialien und andererseits durch die Möglichkeit der Verbrennungsluftzufuhr bestimmt, wobei beide Einflüsse ineinandergreifen.

Um einem Brand wirkungsvoll entgegenzutreten zu können, werden immer häufiger ortsfeste Löschanlagen installiert. Bei diesen Anlagen werden als Löschmittel sowohl Wasser als auch die gasförmigen Löschmittel Kohlendioxid und Halon eingesetzt. Die gasförmigen Löschmittel verursachen nach dem Löscheinsatz keine unmittelbaren weiteren Schädigungen, wie dies nach dem Einsatz von Wasser häufig der Fall ist.

Während Kohlendioxid im Brandfall zur wirksamen Brandbekämpfung in solchen Konzentrationen eingesetzt werden muß, die auf Personen schädliche Auswirkungen haben, sind die Halone, die in wesentlich geringeren Konzentrationen eingesetzt werden, weitgehend ungefährlich, so daß Personen noch während der Flutung der Räume diese verlassen können.

In Fortführung der bisherigen Arbeiten /1,2,3,4/ werden in dem vorliegenden Bericht Untersuchungen über die Löschwirksamkeit gasförmiger Löschmittel beim Löschen verschiedener Brandstoffe in einem Modellversuchsraum durchgeführt. Die Brandstoffe wurden durch eine permanente Wärmequelle aus glühenden Heizdrähten gezündet, die auch während der gesamten Versuchszeit eingeschaltet blieb. Ziel der Untersuchungen war es, durch systematische Versuche festzustellen, inwieweit nach dem Einsatz der gasförmigen Löschmittel Kohlendioxid und Halon bei eingeschalteter elektrischer Wärmequelle bei den verwendeten Brandstoffen ein Löscherfolg bzw. eine Rückzündung in der Löschatmosphäre möglich ist, wenn der Brand nicht wie bisher in Bodennähe, sondern im Deckenbereich liegt.

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 m³. 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 8 durch eine Klappe verschließbare Öffnungen mit einer Gesamtfläche von 800 cm² 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 die 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 Dichte-

unterschiede 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_1 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

In der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt 24 Versuche durchgeführt, davon 12 Versuche mit dem Löschmittel Kohlendioxid und je 6 Versuche mit den Löschmitteln Halon 1211 und Halon 1301. In den Tabellen 1 und 2 sind die wichtigsten Daten sämtlicher Versuche aufgeführt, wie Löschmittel, Brandgut, Brandlast, Brandlast je m³ Raum, Zeit bis zum Zünden, Vorbrennzeit, Löscheintritt, Flutungszeit, Löschmittelmenge, Löschmittelmenge je m³ 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 einen Niveaubehälter (Bild 1) konnte der Pegel der flüssigen Brandstoffe in der Zündwanne so reguliert werden, daß zu jedem Zeitpunkt des Versuches die gleiche Menge flüssigen Brandstoffes in der Wanne vorhanden war.

Die verwendeten Brandstoffe wurden bereits bei früheren Untersuchungen /1,2,3,4/ eingesetzt, so daß Vergleichsmöglichkeiten bestehen. Allerdings wurde Polyurethan-Weichschaum in diesen Berichten nicht mit aufgeführt, da, wie bereits in /4/ erwähnt, Versuche gezeigt hatten, daß nach dem Ausgasen und/oder Abbrennen eine Rückzündung nicht mehr eintrat.

Die Zündung der Brandstoffe erfolgte wie bei früheren Untersuchungen /4/ mit einer Wärmequelle, die aus 3 Heizspiralen mit einem 220V-Anschluß und einer max. Leistung von je 1000W bestand. Durch einen vorgeschalteten Transformator konnte die Spannung stufenlos geregelt werden. Die Untersuchungen wurden mit einer Spannung von 150V (680W) durchgeführt, da diese Einstellung ausreichte, um die Brandstoffe zu entzünden. Die Wärmequelle wurde derart installiert, daß der feste Brandstoff über den Heizspiralen und die flüssigen Brandstoffe unter den Heizspiralen angeordnet werden konnten (Bild 1).

Der Löschmitteleinsatz erfolgte bei allen Bränden nach einer Vorbrennzeit von ca. 2,5 min, was bei den hier verwendeten Holzkrippen einem Abbrand von ca. 20 Gew.-% entsprach. Zum einen war nach dieser Zeit die vollentwickelte Brandphase erreicht und zum anderen war aufgrund des noch vorhandenen Brandstoffes eine Rückzündung nach dem Löscheinsatz möglich.

Durch das Schließen der Zuluft- und Abzugsklappen bei Löscheintritt wurde vermieden, daß eine größere Menge des jeweiligen Löschmittels aus dem Versuchsraum entwich.

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.

Das Löschmittel Kohlendioxid wurde in Konzentration von ca. 6 Vol.-% bis ca. 38 Vol.-%, die beiden Halone in Konzentrationen von ca. 3 Vol.-% bis ca. 15 Vol.-% eingesetzt. Die Tabellen 1 und 2 zeigen eine Übersicht über die Versuchsdaten.

4. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Temperatur

Die Bilder 3 bis 10 zeigen den zeitlichen Verlauf der örtlichen Temperaturen aller 24 Versuche an sämtlichen Meßstellen. Der Löscheintritt ist in diesen und allen folgenden Bildern durch eine dünne senkrechte Linie gekennzeichnet. In der linken oberen Ecke ist in jedem Bild angegeben, um welchen Brandstoff es sich handelt. Es gilt "K" für Krippen, "S" für Spiritus und "H" für Heizöl. Die Art des Löschmittels und die rechnerisch ermittelte Konzentration sind ebenfalls in den Bildern eingetragen. Die Bilder sind so angeordnet, daß sich in der oberen Reihe die Temperaturkurven für Krippen, in der Mitte die für Spiritus und

in der unteren Reihe die für Heizöl befinden.

Bei den Temperaturen an den Meßstellen T0 und T1 ist zu beachten, daß die beiden Thermoelemente je nach der Art des Brandstoffes örtlich variabel eingesetzt wurden (Bild 2). Bei früheren Untersuchungen /4/ wurde der Brandstoff sowie die Meßstelle T1 in Bodennähe angeordnet, während bei den hier vorliegenden Untersuchungen der Brandstoff und die Meßstelle T1 in Deckennähe installiert wurden. Die Meßstelle T0 wurde insbesondere dazu verwendet, die Temperatur des flüssigen Brandstoffes zu messen, während sie bei den Krippen, die mit Halon abgelöscht wurden, als weitere Temperaturmeßstelle innerhalb der Krippe dienen.

Vor dem Löscheinsatz zeigen die Temperaturen, wie schon bei früheren Untersuchungen, für gleiche Brandstoffe einen jeweils ähnlichen Temperaturverlauf. Beim Einschalten der Heizspiralen, die während der gesamten Versuchszeit eingeschaltet blieben, steigt die Temperatur zunächst an den Meßstellen T0, T1 und T5 an, die sich in unmittelbarer Nähe der Wärmequelle befinden. An den übrigen Meßstellen tritt eine Temperaturerhöhung erst einige Minuten später auf. Anhand der Bilder ist deutlich zu erkennen, daß bei gleicher Leistung der Wärmequelle von ca. 2kW in der Mehrzahl der Fälle die Holzkrippe am schwersten zu entzünden war, gefolgt von Heizöl und Spiritus. Dies rührt daher, daß die Bildung brennbarer Gase durch Pyrolysevorgänge bei Holzkrippen mehr Zeit in Anspruch nimmt, wobei zunächst Glut gebildet wird, bevor eine Zündung stattfindet. Bei den Flüssigkeiten, insbesondere Spiritus, der einen niedrigen Flammpunkt besitzt, bildet sich durch die aufsteigenden Dämpfe schneller ein zündfähiges Gemisch.

Bei allen Versuchen stieg beim Entzünden des Brandstoffes die Temperatur an den Meßstellen in Brandnähe steil an. So wurden innerhalb einer Holzkrippe an der Meßstelle T1 max. Temperaturen bis ca. 1000 °C gemessen. Bei den Flüssigkeiten lagen die

höchsten Temperaturen mit ca. 900 °C an der Meßstelle T5. Bei sämtlichen Bränden schlugen die Flammen an die Decke und wurden dort umgelenkt. Durch den heißen Brandrauch stieg auch die Temperatur an den oberen Meßstellen an der Wand, bei Holzkrippen bis auf ca. 150 °C, bei den Flüssigkeiten auf ca. 100 °C an, während an den übrigen Meßstellen ein geringerer Temperaturanstieg zu verzeichnen war.

Auf Bild 3 sind die örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Löschmittelkonzentrationen zwischen 6 Vol.-% und 7 Vol.-% CO₂ aufgetragen. Bei Holzkrippen als Brandstoff war es nicht möglich, den Brand mit einer derart niedrigen CO₂-Konzentration zu löschen. Die Krippe brannte nach dem Eindüsen von 7,4 Vol.-% Kohlendioxid weiter und glühte langsam aus, wie an der hohen Temperatur über der Krippe an der Meßstelle T5 zu erkennen ist. Sowohl bei diesem als auch bei allen weiteren Versuchen stiegen die Temperaturen an den Meßstellen unter dem Brandstoff bzw. an den Wänden beim Eindüsen des Löschmittel je nach der Höhe der Konzentration mehr oder weniger stark an, da beim Löscheinsatz die heißen Gase nach unten bzw. in Richtung der Wände abgedrängt wurden.

Das Ablöschen eines Spiritusbrandes mit 6,1 Vol.-% Kohlendioxid (Bild 3) brachte ebenfalls keinen Erfolg, denn der Spiritus brannte zunächst unvermindert weiter. Nach wenigen Minuten wurde die Flamme kleiner. Beim Öffnen sowohl der Zuluft- als auch der Abzugsklappe und eingeschaltetem Abzugsventilator nach ca. 17 min wurde die Flamme wieder größer.

Auch bei Heizöl als Brandstoff (Bild 3) war es nicht möglich, mit 6,3 Vol.-% Kohlendioxid die Flammen zu löschen. Die Flammen wurden zwar mit zunehmender Versuchszeit schwächer und gingen beinahe aus, flackerten jedoch nach ca. 26 min bei geschlossenem Raum erneut auf, um anschließend wieder kleiner zu werden.

Auch der Einsatz von 15,5 Vol.-% Kohlendioxid bei einer Holzkrippe (Bild 4) bewirkte nur eine langsame Temperaturabnahme, d.h. der Brand konnte ebenfalls nicht gelöscht werden, die Holzkrippe verbrannte vollständig.

Wurde eine Löschmittelkonzentration von 15,7 Vol.-% Kohlendioxid bei Spiritus als Brandstoff (Bild 4) verwendet, war die Flamme kurz erloschen, brannte aber anschließend bei geschlossener Klappe mit kleiner blauer Flamme weiter. Beim Öffnen beider Klappen nach einer Versuchszeit von ca. 18 min kam es zu einer Rückzündung, was im Bild 4 deutlich zu erkennen ist. Danach wurden die Klappen wieder geschlossen. Nach einer Versuchszeit von ca. 30 min entzündete sich der Spiritus auch bei geschlossenen Klappen. Eine Verpuffung nach ca. 25 min wurde an den Meßstellen nur schwach registriert.

Bei einer Konzentration von 17,3 Vol.-% Kohlendioxid und Heizöl als Brandstoff kann aufgrund der Temperaturkurven (Bild 4) geschlossen werden, daß die Flamme kurz erlosch, aber kurz darauf mit kleiner Flamme weiterbrannte und erst nach dem Öffnen der Klappen und Einschalten des Abzuges nach ca. 30 min stark aufblühte, da erst zu diesem Zeitpunkt genügend Luft in den Versuchsraum einströmen konnte.

Bei den auf Bild 5 aufgetragenen Temperaturkurven handelt es sich um Versuche, die mit Löschmittelkonzentrationen von ca. 24 Vol.-% Kohlendioxid durchgeführt wurden. Wurden Holzkrippen als Brandstoff verwendet, so erloschen die Flammen nicht sofort, sondern erst nach erneutem Aufflackern. Das Holz glühte jedoch noch sehr stark weiter, wie auch die hohen Temperaturen zeigten. Nach einer Versuchszeit von ca. 33 min erfolgte beim Einschalten des Abzuges bei geöffneten Klappen eine durch die Glutreste hervorgerufene starke Rückzündung.

Der Löscheinsatz bei einer Spiritusflamme (Bild 5) führte zum kurzzeitigen Erlöschen der Flamme, die jedoch sofort wieder

zündete. Nach wenigen Minuten brannte nur noch eine kleine blaue Flamme. Nach einer Versuchszeit von ca. 18 min flackerten die Flammen wieder kurzzeitig auf der gesamten Spiritusfläche, bildeten sich wieder zurück, wobei die kleine blaue Flamme noch vorhanden war usw., bis nach ca. 28 min durch Luftzufuhr, d.h. Öffnen beider Klappen und Einschalten des Abzugsventilators eine starke Rückzündung erfolgte.

Wurde der Brandstoff Heizöl (Bild 5) verwendet, fiel die Temperatur nach dem Löscheinsatz stark ab, um kurz danach wieder anzusteigen, d.h. der Brand konnte mit 23,6 Vol.-% Kohlendioxid nicht gelöscht werden. Das Heizöl brannte mit kleiner Flamme weiter, ging jedoch nach einigen Minuten Einwirkdauer ganz aus und entzündete sich erst wieder, als nach ca. 29 min durch die offenen Klappen Luft angesaugt wurde.

Die höhere Löschmittelkonzentration von 30,1 Vol.-% Kohlendioxid bewirkte bei Holzkrippen als Brandstoff das sofortige Löschen der Flammen. In Bild 6 ist zum Löschzeitpunkt das Absinken der Temperaturen zu erkennen. Lediglich innerhalb der Holzkrippe liegt die Gluttemperatur noch über 600 °C, die nur sehr langsam absinkt. Durch das Öffnen beider Klappen und eingeschaltetem Abzugsventilator entzündete sich das Holz erneut nach ca. 33 min und brannte aus.

Der Einsatz von 34,6 Vol.-% Kohlendioxid als Löschmittel beim Brandstoff Spiritus (Bild 6) ließ alle Temperaturen im Raum kurzzeitig fast auf den Nullpunkt absinken, um danach über dem Brandstoff wieder auf ca. 150 °C und an den Wänden auf ca. 50 °C anzusteigen. Nach einer Versuchszeit von ca. 20 min fand bei geschlossenen Klappen eine Rückzündung statt, wobei grün gefärbte Flammen den oberen Teil des Versuchsraumes kurzzeitig ausfüllten. Anschließend waren kleine Flammen sichtbar, was vor dem Rückzünden wegen der starken Vernebelung optisch nicht festgestellt werden konnte. Nachdem die Temperatur wieder abgesunken war, wurden nach ca. 33 min die Klappen geöffnet, wobei sich das Spiritus/Luft-Gemisch erneut entzündete.

Die Löschmittelkonzentration wurde hier höher als 30 Vol.-% gewählt, da frühere Untersuchungen /4/ bereits gezeigt hatten, daß Spiritus bei Konzentrationen unter 30 Vol.-% immer rückzündete.

Auf Heizöl wirkte die erhöhte CO₂-Konzentration (Bild 6) von 37,8 Vol.-% sofort. Die Flammen waren gelöscht und die Temperaturen fielen sehr stark ab, erreichten aber anschließend durch die konstante Wärmequelle über dem Brandstoff wieder Werte von ca. 200 °C wie vor dem Zünden. Nach einer Versuchszeit von ca. 15 min wurden wieder Flammen sichtbar, d.h. das Brennstoff/Luft-Gemisch zündete, was anhand der Temperatur deutlich zu erkennen war. Nachdem der Brand erloschen war, kam es bei geschlossenen Klappen nach ca. 24 min zu einer weiteren Rückzündung, wie auch die hohen Temperaturen zeigten. Der Brand ging 2 min später wieder aus und zündete bei geöffneten Klappen nach ca. 32 min wieder. Dies zeigt sehr deutlich, daß selbst bei hohen CO₂-Konzentrationen Rückzündungen stattfanden.

Die Bilder 7 bis 10 zeigen örtliche Temperaturen beim Ablöschen von Holzkrippen (K), Spiritus (S) und Heizöl (H) mit den Löschmitteln Halon 1211 und Halon 1301. Es wurden dabei mittlere Konzentrationen von ca. 3 Vol.-% bis ca. 15 Vol.-% verwendet. Die Heizspiralen blieben auch hier während der gesamten Versuchszeit eingeschaltet.

Beim Eindüsen von 3,4 Vol.-% Halon 1211 auf eine Holzkrippe (Bild 7) wurden die Flammen sehr klein und gingen kurz darauf aus. Die noch sichtbare Glut war ca. 10 min später beinahe erloschen, was auch an den Temperaturkurven zu erkennen ist. Nach dem Öffnen beider Klappen und Einschalten des Abzugsventilators nach ca. 33 min entstanden erst nach längerer Luftzufuhr wieder Flammen.

Auf Spiritus wirkte eine Konzentration von 3,1 Vol.-% Halon 1211 (Bild 7) derart, daß die Flammen bis auf die bereits bei früheren Versuchen auftretende kleine blaue Flamme erlosch. Die Temperatur über dem Brandstoff sank dabei stark ab. Der Spiritus zündete hier erst wieder, als nach ca. 33 min die beiden Klappen geöffnet und der Abzugsventilator eingeschaltet wurden.

Wurde der Löscheinsatz mit einer Konzentration von 3,5 Vol.-% Halon 1211 bei Heizöl als Brandstoff (Bild 7) durchgeführt, so fiel die Temperatur über dem Brandstoff steil ab, aber es konnte wegen der starken Vernebelung optisch nicht festgestellt werden, ob die Flamme vollständig gelöscht war. Anhand der erhöhten Temperaturen mußte jedoch auf einen nicht vollständig gelöschten Brand geschlossen werden, der sich nach ca. 26 min beim Öffnen beider Klappen wieder voll entwickelte.

Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen /4/ wurde beim Ablöschen einer Holzkrippe eine erhöhte Halon 1211-Konzentration von 14,5 Vol.-% (Bild 8) eingesetzt. Das Eindüsen brachte den erwarteten starken Temperaturabfall mit sich. Die Flammen wurden gelöscht, aber die Glut war noch vorhanden. Dies bedeutet, daß das spezifisch schwerere Halon schnell nach unten absank, so daß durch Leckageöffnungen von oben Luft angesaugt werden konnte. In Bild 8 ist dies an den hohen Temperaturen innerhalb und über der Krippe deutlich zu erkennen. Beim Öffnen der Klappen nach ca. 31 min entzündeten sich die glühenden Holzreste und brannten aus.

Bei Spiritus als Brandstoff und einer Halon 1211-Konzentration von 13,8 Vol.-% (Bild 8) war ebenfalls ein steiler Temperaturabfall zu verzeichnen. Die Flammen waren kurz erloschen, zündeten aber wieder und brannten zeitweise als kleine bläuliche oder auch gelbliche Flammen weiter. Auch hier entzündete sich der Brandstoff Spiritus erst beim Öffnen beider Klappen nach ca. 30 min und brannte über der gesamten Fläche weiter.

Der Brandstoff Heizöl wurde beim Löscheinsatz mit einer Konzentration von 10,3 Vol.-% Halon 1211 (Bild 8) ebenfalls nur kurzzeitig gelöscht. Sowohl hier als auch zuvor bei Spiritus sank das schwerere Löschmittel nach unten und Luft konnte durch Leckageöffnungen angesaugt werden. Aufgrund der Verqualmung im Raum konnte optisch jedoch nicht festgestellt werden, ob die Flamme ganz erloschen war. Nach einer Versuchszeit von ca. 28 min fanden im geschlossenen Raum mehrere Verpuffungen statt, d.h. die Heizölwolke entzündete sich unter der Decke schlagartig, wobei die Temperatur anstieg und wieder abfiel. Nach dem Öffnen beider Klappen nach ca. 34 min zündete das Heizöl ebenfalls und brannte weiter.

Bei den Untersuchungen mit dem Löschmittel Halon 1301 wurden ähnlich hohe Konzentrationen eingesetzt wie beim Löschmittel Halon 1211. Wurde Halon 1301 in einer Konzentration von 3,5 Vol.-% beim Brandstoff Holz (Bild 9) eingesetzt, so sank die Temperatur momentan ab, stieg aber sofort wieder an. Dies bedeutet, daß die Flamme zwar kurz erloschen war, das Holz aber sehr stark weiterglühte. Nach ca. 33 min, als die Klappen geöffnet wurden, glühte die restliche Krippe noch vollständig aus, ohne daß eine Rückzündung stattfand.

Die Wirkung einer Konzentration von 3,9 Vol.-% Halon 1301 auf einen Spiritusbrand (Bild 9) war, daß die Temperatur über dem Brandstoff stark abfiel, d.h. die Flammen wurden zur Seite abgedrängt, erschienen aber sofort wieder, um ca. 2 min später nur als kleine hellblaue bzw. gelbliche Flamme weiterzubrennen. Diese Flammen konnten an den Meßstellen nicht registriert werden, da sie nur am Rande des Behälters erschienen und die Thermoelemente in der Mitte angeordnet waren. Erst nach der Luftzufuhr nach ca. 34 min brannte der Spiritus normal weiter.

Eine Konzentration von 3,0 Vol.-% Halon 1301 auf Heizöl (Bild 9) eingedüst brachte ebenfalls keinen Löscherfolg, denn die Temperatur über dem Brandstoff war, wie im Bild deutlich zu erkennen ist, so hoch wie vor dem Löscheinsatz und sank erst einige Minuten später ab. Dabei konnten kleinere gelbliche Flammen wahrgenommen werden, die nach erneuter Luftzufuhr nach ca. 33 min größer wurden.

Der Einsatz von 10,5 Vol.-% Halon 1301 bei Holzkrippen als Brandstoff (Bild 10) bewirkte, daß die Flammen kurzzeitig erloschen, nochmals aufflackerten, um danach wieder zu erlöschen. Nach einigen Minuten war auch die Glut etwas zurückgegangen, die Temperatur fiel langsam ab. Bei Luftzufuhr nach ca. 33 min fielen die Temperaturen weiter ab, d.h. bis zu diesem Zeitpunkt war die Holzkrippe bereits vollständig verbrannt.

Beim Löscheinsatz mit einer Konzentration von 13,2 Vol.-% Halon 1301 war beim Brandstoff Spiritus (Bild 10) die Flamme zunächst gelöscht, brannte jedoch gleich darauf als kleine blaue Flamme weiter. In diesem Fall wurde an der Meßstelle T5 wieder eine höhere Temperatur aufgezeichnet. Nach dem Öffnen der Klappen und Einschalten des Abzugsventilators nach ca. 35 min fand eine Rückzündung statt.

Auch bei Heizöl als Brandstoff und einer Konzentration von 10,1 Vol.-% Halon 1301 (Bild 10) konnte der Brand nicht vollständig gelöscht werden. Nach einem kurzen Absinken der Temperatur brannte das Heizöl mit einer immer kleiner werdenden Flamme weiter, was anhand der Temperaturkurve an der Meßstelle T5 zu erkennen ist. Bei Luftzufuhr nach ca. 33 min entzündete sich die nun schon sehr klein gewordene Flamme wieder.

Wie zuvor beim Löschmittel Halon 1211 sanken nach dem Eindüsen auch die höheren Halon 1301-Konzentrationen aufgrund ihrer höheren Dichte sofort nach unten ab, so daß im oberen Teil des Raumes infolge des vorhandenen Unterdruckes Luft durch Leckageöffnungen eindringen konnte.

4.2 Druck

Auf den Bildern 11 bis 14 wurde der zeitliche Verlauf der örtlichen Druckdifferenzen zwischen Brandraum und Umgebung an der unteren Meßstelle D1 und an der oberen Meßstelle D5 aufgezeichnet. Die Druckdifferenzen an den Meßstellen D2 bis D4 sind nicht aufgeführt. Die Meßwerte liegen jeweils zwischen den an der Meßstelle D1 und D5 gemessenen Druckdifferenzen. Auf jeder Seite befinden sich in einer Reihe jeweils 2 Versuche mit gleichem Brandstoff aber mit unterschiedlich hohen Konzentrationen und in jeder Spalte variiert der Brandstoff von der Holzkrippe (K) über Spiritus (S) zum Heizöl (H), wobei die Meßstelle gleich bleibt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur Drücke bis $+ 10$ Pa aufgetragen, obwohl beim Eindüsen des Löschmittels oder auch bei Verpuffungen Spitzenwerte von über 200 Pa erreicht wurden, bei denen sich die Überdruckklappen öffneten.

Von Versuchsbeginn an bis zum Zünden des Brandstoffes war bei allen Versuchen der Druck im Raum ausgeglichen. Am Zündzeitpunkt stieg der Druck unterhalb der Decke an der Meßstelle D5 an, während in Bodennähe an der Meßstelle D1 keine Druckdifferenz auftrat, d.h. die Luftzufuhr für die Verbrennung war ausreichend. Im Verlauf des Brandes nahm bei den Holzkrippen der Druck an der Meßstelle D5 auf Werte zwischen 1 Pa und 3 Pa zu, während bei den flüssigen Brandstoffen Werte zwischen 0 Pa und 1 Pa gemessen wurden, d.h. daß bei Bränden in Bodennähe /4/ die Drücke unter der Decke generell höher lagen als bei Bränden unterhalb der Decke, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden.

Der Einsatz des Löschmittels verursachte jeweils eine Druckspitze, die aufgrund der Abtastfrequenz der Datenerfassungsanlage positiv oder negativ registriert wurde. Der Löszeitpunkt wurde in jedem Bild mit einer dünnen senkrechten Linie gekennzeichnet. Die Kennzeichnung der Druckmeßstelle findet sich im

linken unteren Eck jedes Einzelbildes.

Bei einer Löschmittelkonzentration von 7,4 Vol.-% CO_2 und einer Holzkrippe als Brandstoff (Bild 11) entstand in Bodennähe ein Unterdruck. Unterhalb der Decke strebte die Druckdifferenz gegen Null, d.h. Luft konnte unten angesaugt werden und die Hauptströmungsrichtung der Gase blieb von unten nach oben erhalten.

Ähnliche Druckverhältnisse stellten sich bei Spiritus als Brandstoff und einer Löschmittelkonzentration von 6,1 Vol.-% CO_2 ein (Bild 11). Auch hier konnten die Flammen nicht gelöscht werden.

Bei Heizöl als Brandstoff und einer Konzentration von 6,3 Vol.-% CO_2 (Bild 11) wurde sehr deutlich ein Abnehmen der Druckschwankungen bzw. der flackernden Flamme registriert. Im Raum lag eine von unten nach oben gerichtete Strömung vor, wobei durch den Unterdruck unten im Raum Luft von außerhalb angesaugt wurde.

Eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration auf 15,5 Vol.-% bei einer Holzkrippe als Brandstoff (Bild 11) brachte keine Veränderung der Druckverhältnisse gegenüber der geringeren Konzentration. Die beim Brand von unten nach oben gerichtete Strömung blieb auch nach dem Löschen erhalten.

Eine Löschmittelkonzentration von 15,7 Vol.-% CO_2 wirkte auf Spiritus zunächst wie bei der niedrigeren Konzentration (Bild 11). Druckschwankungen waren vorhanden, da die Flamme nicht vollständig gelöscht war. Das Öffnen beider Klappen mit eingeschaltetem Abzugsventilator verursachte nach einer Versuchszeit von ca. 18 min die hohen Druckspitzen, während die Spitzen nach ca. 25 min durch Verpuffungen bei wieder geschlossenen Klappen und die Spitzen nach ca. 30 min durch erneutes Rückzünden zustandekamen. In den Zeiten dazwischen war die Strömung von unten nach oben gerichtet.

Bei Heizöl als Brandstoff und einer Löschkonzentration von 17,3 Vol.-% (Bild 11) war andauernd eine kleinere Flamme vorhanden, die nicht erlosch, was auch an den Schwankungen zu erkennen war. Bei Frischluftzufuhr nach ca. 30 min wurden sowohl die Flammen als auch die Schwankungen wieder größer.

Bei einer Holzkrippe, die mit 23,3 Vol.-% CO_2 (Bild 12) abgelöscht wurde, wurde nach dem Erlöschen der Flammen ein Druckgefälle von unten nach oben festgestellt. Dies bedeutet, daß sich die Strömungsverhältnisse änderten, da das schwerere Löschmittel begann, nach unten abzusinken. Durch den Druckunterschied (Brandraum-Umgebung) konnte daher durch Leckageöffnungen Luft in den Versuchsraum eindringen. Der Druckabfall nach einer Versuchszeit von ca. 33 min kam durch die Rückzündung nach dem Öffnen der Klappen zustande.

Wurde als Brandstoff Spiritus und eine Löschkonzentration von 24 Vol.-% CO_2 verwendet (Bild 12), so traten größere Druckschwankungen auf, die darauf zurückzuführen sind, daß eine kleine Flamme flackernd weiterbrannte. Die Strömungsrichtung im Versuchsraum war von oben nach unten gerichtet, da das Löschmittel aufgrund seiner höheren Dichte nach unten absank, was bei geringeren Konzentrationen sehr viel später eintrat. Nach einer Versuchszeit von ca. 28 min wurden die Klappen geöffnet, und das Brennstoff/Luft-Gemisch entzündete sich wieder über der gesamten Fläche.

Eine Konzentration von 23,6 Vol.-% CO_2 auf Heizöl als Brandstoff eingedüst (Bild 12) verursachte ein Druckgefälle von unten nach oben, obwohl das Heizöl nach einigen Minuten mit kleiner Flamme weiterbrannte. Dies bedeutet, daß CO_2 -Löschkonzentrationen dieser Größe bei allen 3 Brandstoffen ausreichten, um die Strömungsrichtung im Versuchsraum umzukehren, so daß durch den vorhandenen Unterdruck im oberen Teil des Raumes Luft eindringen konnte. Nach ca. 29 min wurde Luft durch Öffnen der Klappen wieder zugeführt, so daß das Heizöl rückgezündet wurde.

Wurde die CO_2 -Konzentration bei Holzkrippen als Brandstoff auf 30,1 Vol.-% erhöht (Bild 12), so waren die Druckdifferenzen im Brandraum ausgeprägter, d.h. die höhere Dichte machte sich stärker bemerkbar. Das Löschmittel sank nach unten und Luft konnte wegen des Unterdruckes im oberen Teil des Raumes eindringen. Nach einer Versuchszeit von ca. 33 min wurden die beiden Klappen geöffnet und der Abzugsventilator eingeschaltet. Dabei zündete die Glut, wobei hohe Druckschwankungen auftraten.

Bei Spiritus als Brandstoff und einer CO_2 -Konzentration von 34,6 Vol.-% (Bild 12) wurde das Druckgefälle im Raum durch das Absinken des Löschmittels noch größer, so daß unterhalb der Decke Luft angesaugt wurde. Bei geschlossenen Klappen fand nach einer Versuchszeit von ca. 20 min eine Rückzündung statt. Im weiteren Versuchsverlauf traten nur die durch die kleine Flamme hervorgerufenen Druckschwankungen auf. Nach einer Versuchszeit von ca. 33 min wurde Frischluft zugeführt und die Flammen wurden größer.

Eine CO_2 -Konzentration von 37,8 Vol.-% wurde beim Brandstoff Heizöl eingedüst (Bild 12). Dadurch wurde im Versuchsraum ein Druckgefälle von unten nach oben hervorgerufen. Das schwerere Kohlendioxid sank auf den Boden des Raumes ab. Nach einer jeweiligen Versuchszeit von ca. 15 min und nach ca. 24 min entzündete sich das Heizöl, was jedoch nur kleine Druckspitzen hervorrief. Bei Luftzufuhr nach einer Versuchszeit von ca. 32 min brannte das Heizöl weiter und die Druckschwankungen wurden größer.

Beim Einsatz von 3,4 Vol.-% Halon 1211 bei einer Holzkrippe als Brandstoff (Bild 13) herrschten, hervorgerufen durch die Temperatur- und Dichteunterschiede, nur sehr geringe Druckunterschiede im negativen Bereich, so daß von außerhalb Luft eindringen konnte. Das Löschmittel sank nur sehr langsam nach unten ab. Nach einer Versuchszeit von ca. 33 min glich sich nach dem Zünden infolge Luftzufuhr der Druck wieder aus.

Beim Löschen des Spiritusbrandes mit 3,1 Vol.-% Halon 1211 (Bild 13) wurde im Raum ein kleines Druckgefälle von unten nach oben registriert. Trotz der vorhandenen kleinen blauen Flamme waren fast keine Schwankungen vorhanden. Diese traten erst bei Luftzufuhr nach einer Versuchszeit von ca. 33 min auf, als der Spiritus normal weiterbrannte.

Heizöl konnte mit einer Konzentration von 3,5 Vol.-% Halon 1211 (Bild 13) nicht vollständig gelöscht werden, was auch an den Druckschwankungen zu erkennen ist. Bei diesem Versuch war im negativen Bereich ein geringes Druckgefälle im Versuchsraum von unten nach oben vorhanden. Als nach einer Versuchszeit von ca. 26 min Luft zugeführt wurde, brannte das Heizöl wieder stärker, und der Druck glich sich aus. Dies bedeutet, daß Konzentrationen von etwas mehr als 3 Vol.-% bei diesen Bränden in der Größenordnung liegen, bei der die Strömungsrichtung der Gase im Versuchsraum umgekehrt wurden, d.h. niedrigere Konzentrationen reichen nicht aus, um das im Versuchsraum gut verteilte Halon so schnell absinken zu lassen, daß dadurch die aufwärts gerichtete Strömung in eine nach unten gerichtete Strömung umschlägt.

Wurde auf eine brennende Holzkrippe eine Konzentration von 14,5 Vol.-% Halon 1211 eingedüst (Bild 13) wurden die Flammen gelöscht und es wurde ein höheres Druckgefälle im Raum von unten nach oben registriert, d.h. das spezifisch schwerere Halon sinkt sofort mit größeren Turbulenzen im Raum nach unten ab, so daß im oberen Teil Luft angesaugt werden und im unteren Teil Gase austreten können. Als nach ca. 31 min durch Öffnen der Klappen und Einschalten des Abzugsventilators Luft zugeführt wurde, entzündeten sich die Holzreste und der Druck im Rauch glich sich wieder aus.

Bei Spiritus als Brandstoff und einer Konzentration von 13,8 Vol.-% Halon 1211 (Bild 13) entstand ebenso ein hohes Druckgefälle von unten nach oben im Versuchsraum wie zuvor, d.h. auch hier

sank das schwerere Halon sofort nach unten ab und konnte durch Leckageöffnungen aus dem Raum austreten, während durch den Unterdruck im oberen Teil des Raumes Luft einströmen konnte. Durch das Öffnen beider Klappen, d.h. durch Luftzufuhr nach einer Versuchszeit von ca. 30 min bildeten sich Flammen. Dadurch wurden Druckspitzen aufgezeichnet. Kurze Zeit später war der Druck im Raum ausgeglichen.

Eine Konzentration von 10,3 Vol.-% Halon 1211 und Heizöl als Brandstoff brachte im Druckverlauf keine Unterschiede zu den vorherigen Versuchen. Auch hier sank das Löschmittel nach unten ab. Verpuffungen nach einer Versuchszeit von 28 min wurden ebenso als Druckspitzen registriert wie das Rückzünden beim Öffnen beider Klappen und Einschalten des Abzugsventilators nach ca. 34 min.

Der Einsatz des Löschmittels Halon 1301 in Konzentrationen von 3,5 Vol.-% bei einer Holzkrippe, von 3,9 Vol.-% bei Spiritus und 3,0 Vol.-% bei Heizöl jeweils als Brandstoff (Bild 14) rief innerhalb des gesamten Versuchsraumes nur sehr geringe Druckunterschiede hervor. Diese Feststellung konnte bereits beim Löschmittel Halon 1211 in ähnlich hohen Konzentrationen getroffen werden.

Auch das Ablöschen mit Konzentrationen von 10,5 Vol.-% Halon 1301 bei einer Holzkrippe, von 13,2 Vol.-% bei Spiritus und von 10,1 Vol.-% bei Heizöl (Bild 14) brachte jeweils keine nennenswerten Unterschiede bei den Druckverhältnissen gegenüber Halon 1211 mit sich. Auch waren die Druckunterschiede im Versuchsraum aufgrund des Absinkens des schwereren Löschmittels Halon 1301 größer geworden, so daß im Unterdruckbereich unterhalb der Decke durch Leckageöffnungen Luft nachströmen konnte, während infolge Überdruckes in Bodennähe Gase nach außen dringen konnten.

Es läßt sich eindeutig feststellen, daß das Verhalten der beiden Halone beim Löscheinsatz auf die 3 Brandstoffe Holzkrippe, Spiritus und Heizöl bei gleich hohen Konzentrationen und gleichem Brandstoff in ihrer Tendenz ähnliche Druckkurven ergaben.

4.3 Gaskonzentrationen

4.3.1 Kontinuierliche Gasanalyse

Die Bilder 15 bis 20 zeigen die örtlichen Konzentrationswerte in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Auf jedem Bild wurde sowohl die Konzentration des jeweiligen Löschmittels wie CO₂ bzw. Halon 1211 und Halon 1301 aufgetragen als auch die zugehörigen Konzentrationswerte für Sauerstoff und Kohlenmonoxid bzw. Sauerstoff und Kohlendioxid. Bei der gestrichelten Kurve für die CO₂-Konzentration handelt es sich dabei um die mit der Absaugsonde Nr.3 in einer Meßhöhe von 0,15 m aufgenommenen Werte, während alle anderen Meßkurven mit der Absaugsonde Nr. 1 in einer Meßhöhe von 1,05 m direkt über dem Brandstoff aufgenommen wurden. Jedes Bild umfaßt 4 Versuche, wobei die vertikal angeordneten Kurven zu je einem Versuch mit gleichem Brandstoff und gleich hoher Löschmittelkonzentration gehören.

Beim Brand einer Holzkrippe stieg an der Meßstelle über dem Brandstoff die CO₂-Konzentration bis auf ca. 15 Vol.-% an, die O₂-Konzentration fiel im Mittel auf ca. 5 Vol.-% ab und die CO-Konzentration erreichte max. Werte von etwas über 10 Vol.-% (Bild 15).

Der Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel verursachte je nach eingegebener Konzentration einen mehr oder weniger steilen Anstieg (Bild 15). Es ist sehr deutlich an der gestrichelten CO₂-Kurve zu erkennen, daß vor dem Löscheinsatz nur minimale CO₂-Konzentrationen in Bodennähe auftraten, während nach dem

Eindüsen, d.h. bei geschlossenen Klappen, sich das Löschmittel im gesamten Raum ziemlich gleichmäßig verteilte und bei den 4 aufgetragenen verschieden hohen Konzentrationen diese im Laufe der Versuchszeit nur langsam abfielen. Dies hing vor allem mit der nicht gelöschten Glut der Holzkrippe zusammen. Der darauf zurückzuführende Auftrieb verursachte eine geringe Strömung, wodurch auch bei der hohen CO_2 -Konzentration das schwerere Löschmittel nur langsam absank. Erst nach erneuter Luftzufuhr, d.h. Öffnen beider Klappen und Einschalten des Abzugsventilators, fiel die CO_2 -Konzentration ab.

Die O_2 -Konzentration lag bei den 4 hier verwendeten CO_2 -Löschmittelkonzentrationen nach dem Löscheinsatz bei weniger als 15 Vol.-%. Dies bedeutet, daß bei gelöschten Flammen keine Rückzündung mangels Sauerstoff auftreten konnte. Eine Rückzündung trat erst am Versuchsende nach dem Öffnen beider Klappen und Betätigen des Abzugsventilators auf.

Die CO -Konzentration, die beim Brand über 10 Vol.-% angestiegen war, fiel nach dem Löscheinsatz unabhängig von der Konzentration des eingesetzten Löschmittels auf unter 2 Vol.-% ab (Bild 15).

Auf Bild 16 wurden die jeweiligen Konzentrationen für 4 Versuche beim Ablöschen eines Spiritusbrandes aufgetragen. Bei den 3 Versuchen mit den geringeren Löschkonzentrationen war die CO_2 -Konzentration im Raum gut verteilt, während nach dem Eindüsen von 34,6 Vol.-% CO_2 ein starkes Absinken des CO_2 -Gehaltes im oberen Teil des Raumes festgestellt wurde. Im unteren Teil konnte wie bei den vorherigen Versuchen eine langsame Abnahme der CO_2 -Konzentration registriert werden. Als bei diesem Versuch nach ca. 20 min eine starke Rückzündung stattfand, stieg die CO_2 -Konzentration an der oberen Meßstelle wieder steil an. In Bodennähe dagegen wurde keine Änderung festgestellt. Das Öffnen der Klappen und Einschalten des Abzugsventilators brachte bei diesem und allen weiteren Versuchen jeweils die erwarteten Konzentrationsänderungen.

Die O_2 -Konzentration erreichte wenige Minuten nach dem Eindüsen der CO_2 -Löschmittelkonzentrationen (Bild 16) an der Meßstelle einen Wert, der umso höher lag, je höher die eingesetzte CO_2 -Konzentration war. Dies ist dadurch zu erklären, daß das Kohlendioxid absinkt und im oberen Teil des Raumes aufgrund des Unterdruckes Luft eindringen konnte. Dadurch war es möglich, daß sich in diesem Bereich nach ca. 20 min ein Brennstoff/Luft-Gemisch bilden konnte, das eine starke Rückzündung über der gesamten Fläche hervorrief. Dadurch fiel die O_2 -Konzentration stark ab, stieg jedoch anschließend wieder an. Das Absinken der O_2 -Konzentration kam sonst nur durch das Öffnen der Klappen und Einschalten des Abzugsventilators und den dadurch hervorgerufenen Brand zustande.

Die CO-Konzentrationen (Bild 16) lagen beim Einsatz der niedrigeren CO_2 -Löschkonzentrationen höher als beim Einsatz der höheren CO_2 -Löschkonzentrationen. Dies lag daran, daß der Spiritus in der Löschatmosphäre stärker weiterbrannte und durch die unvollkommene Verbrennung mehr CO gebildet wurde. Unabhängig von der Höhe des eingedüsten Löschmittels stieg die CO-Konzentration zum Zeitpunkt der Rückzündung wieder an. Beim Verbrennen von Heizöl lagen die CO_2 -Werte und die CO-Werte niedriger als bei Spiritus, die O_2 -Konzentrationen dementsprechend etwas höher (Bild 17).

Nach dem Ablöschen von Heizöl mit ähnlich hohen CO_2 -Konzentrationen (Bild 17) konnte anhand der Meßwerte eine wie bei Spiritus entsprechende Verteilung der Gase im Raum festgestellt werden. Die CO_2 -Konzentration verteilte sich trotz des mit geringerer Intensität weiterbrennenden Heizöls im Versuchsraum ziemlich gleichmäßig. Bei der Konzentration von 37,8 Vol.-% Kohlendioxid als Löschmittel sank der CO_2 -Gehalt im oberen Teil des Versuchsraumes stark ab, die O_2 -Konzentration nahm zu, so daß das Heizöl wie bereits der Spiritus rückzünden konnte.

Die O₂-Konzentrationen (Bild 17) lagen bei den beiden niedrigen Löschkonzentrationen bei etwas über 10 Vol.-%, während sie bei den beiden höheren Löschkonzentrationen auf mehr als 16 Vol.-% anstiegen, d.h. daß sich insbesondere beim letzten Versuch ein brennbares Gemisch bilden und rückzünden konnte.

Die CO-Konzentrationen (Bild 17) lagen bei allen 4 Versuchen während der gesamten Versuchszeit unterhalb 3 Vol.-% und somit etwas niedriger als bei den Versuchen mit Spiritus.

Die Bilder 18 bis 20 zeigen den zeitlichen Verlauf der örtlichen Konzentration mit Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel. Die mittleren Konzentrationen liegen zwischen ca. 3 Vol.-% und ca. 15 Vol.-%. Auf jedem Bild wurden je zwei Versuche mit den Löschmitteln Halon 1211 und Halon 1301 mit unterschiedlich hohen Konzentrationen aufgetragen. Dabei wurden auf Bild 18 Holzkrippen, auf Bild 19 Spiritus und auf Bild 20 Heizöl als Brandstoff eingesetzt.

Die Halon-Konzentration stieg beim Löscheinsatz etwa auf den jeweils rechnerisch ermittelten Wert an und fiel während der Versuchszeit je nach der Höhe der eingedüsten Konzentration mehr oder weniger stark ab. Das Absinken insbesondere bei den höheren Konzentrationen ist darauf zurückzuführen, daß das Halon schwerer ist als alle anderen vorhandenen Gase und deshalb bereits bei geringem Überdruck in Bodennähe durch Leckageöffnungen aus dem Versuchsraum entweichen kann.

Beim Einsatz von Holzkrippen als Brandstoff (Bild 18) erreichte die O₂-Konzentration an der Meßstelle nach dem Eindüsen Werte von weniger 12 Vol.-%. Nach einer Versuchszeit war bei den beiden geringeren Löschkonzentrationen der Sauerstoffgehalt wieder auf über 15 Vol.-% angestiegen, während bei den höheren Löschkonzentrationen erst nach dem Öffnen beider Klappen wieder mehr als 15 Vol.-% gemessen wurden.

Die CO₂-Konzentration fiel nach dem Löscheinsatz unabhängig von der Höhe der Löschkonzentration von max. 18 Vol.-% zunächst steil und anschließend langsamer ab und erreichte vor dem Öffnen der Klappen Werte von weniger als 4 Vol.-%. Die im Bild nicht aufgetragene CO-Konzentration lag nach dem Löscheinsatz bei ca. 10 Vol.-% und fiel nur langsam ab, da die Glut innerhalb der Holzkrippe nicht sofort vollständig gelöscht wurde und deshalb durch unvollständige Verbrennung weiter CO produziert wurde.

Auf Bild 19 wurden die örtlichen Konzentrationen in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei Spiritus als Brandstoff aufgetragen. Sowohl beim Löschmittel Halon 1211 als auch bei Halon 1301 wurde ganz deutlich der Unterschied für den Einsatz niedriger bzw. höherer Konzentrationen erkennbar. Die Halon-Konzentration blieb beim Eindüsen von 3,1 Vol.-% Halon 1211 bzw. 3,9 Vol.-% Halon 1301 während der Versuchszeit etwa konstant, fiel aber bei den Löschkonzentrationen von 13,8 Vol.-% Halon 1211 bzw. 13 Vol.-% von ca. 19 Vol.-% auf ca. 2 Vol.-% bzw. von ca. 15 Vol.-% auf ca. 4 Vol.-% ab. Auch hier sank das schwerere Halon nach unten ab und Frischluft konnte aufgrund des vorhandenen Unterdruckes in in Deckennähe angesaugt werden. Die Konzentrationsänderungen gegen Ende der Versuchszeit sind auf das Öffnen der Klappen zurückzuführen.

Die O₂-Konzentration (Bild 19) erreichte nach dem Löscheinsatz mit den niedrigen Konzentrationen Werte zwischen 17 Vol.-% und 19 Vol.-%. Bei den höheren Löschkonzentrationen lagen die O₂-Konzentrationen zwischen 10 Vol.-% und 12 Vol.-%.

Die örtliche CO₂-Konzentration sank bei allen 4 Versuchen auf unter 3 Vol.-% ab, die CO-Konzentration lag bei den niedrigen Konzentrationen bei ca. 5 Vol.-%, bei den höheren Konzentrationen bei ca. 10 Vol.-%. Das Öffnen der Klappen bewirkte die bereits erwähnten Änderungen.

Die Verwendung von Heizöl als Brandstoff (Bild 20) brachte nach dem Einsatz der beiden Halone unabhängig von der eingesetzten Konzentration bei allen 4 Versuchen einen Abfall der örtlichen Halon-Konzentrationen innerhalb 15 min auf Werte zwischen 0 und 2 Vol.-%.

Die O₂-Konzentrationen erreichten zu diesem Zeitpunkt Werte zwischen 14 Vol.-% und 18 Vol.-%. Aufgrund der aufgezeichneten Spitzen kann auf ein Weiterbrennen nach dem Löscheinsatz bzw. Rückzünden geschlossen werden.

Auch bei den CO₂-Konzentrationen konnten aufgrund der eingesetzten Halon-Konzentrationen keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden, sie fielen nach dem Eindüsen auf unter 6 Vol.-% ab. Die CO-Konzentrationen lagen bei Werten unter 5 Vol.-% und wiesen gleichfalls keine Abhängigkeit von der Höhe der eingedüsten Halon-Konzentration auf.

4.3.2 Pyrolyseprodukte

Für die Analyse von Pyrolyseprodukten der Halone nach dem Löscheinsatz wurden Prüfröhrchen für die folgenden Gase eingesetzt: HF, HCl, HBr, COCl₂, COBr₂, Cl₂, Br₂. In Tabelle 3 wurden der jeweilige Brandstoff, die zugehörige Halon-Löschkonzentration und der Zeitpunkt des Beginns der Probenentnahme eingetragen. Daneben wurde die mit den Prüfröhrchen gemessene Konzentration aufgelistet. Bei Überschreiten der Meßbereichsgrenze eines Prüfröhrchens oder Gasundurchlässigkeit infolge Verschmutzung der Filtervorschicht wurde die Anzahl der Hübe mit angegeben, nach denen der eingetragene Wert erreicht wurde. Durch die bei jedem Prüfröhrchentyp vorgegebene Hubzahl stellt diese bis zu einigen Minuten andauernde Messung einen zeitlichen Mittelwert dar.

Tabelle 3 zeigt deutlich, daß die direkt über dem Brandstoff ermittelten Schadstoffkonzentrationen fast in allen Fällen erheblich über den Werten für die max. Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Werte) lagen. Eine Abhängigkeit von der eingesetzten Löschmittelkonzentration konnte aufgrund dieser Werte nicht abgeleitet werden. Wie bei früheren Untersuchungen /4/ konnte die Bildung der Pyrolyseprodukte hauptsächlich auf die während des gesamten Versuches eingeschalteten Heizspiralen zurückgeführt werden. An diesen hellrot glühenden Drähten konnte sich das betreffende Halon dauernd zersetzen. Entsprechende Untersuchungen /3/ zeigten, daß bei geringerer Glutbildung auch weniger Schadstoffe entstehen. Diese Tatsache sollte bei realen Bränden mit toxischen Gefahren beachtet werden.

4.4 Optische Rauchdichte

Auf den Bildern 21 und 22 wurde für alle 24 Versuche die Beleuchtungsintensität I/I_0 in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragen. Bei den auf Bild 21 dargestellten Versuchen wurde Kohlendioxid und bei den auf Bild 22 dargestellten Halon als Löschmittel eingesetzt. Der Brandstoff wurde vertikal in der Reihenfolge Holzkrippen, Spiritus, Heizöl angeordnet.

Bei Holzkrippen als Brandstoff trat während der Brandphase in Höhe der Meßstrecke nur eine geringe Abnahme der Intensität auf. Ausgenommen waren 2 Versuche, bei denen die Sicht durch den Schwelvorgang stark abnahm und erst beim Durchzünden wieder besser wurde.

Wurden die flüssigen Brandstoffe Spiritus und Heizöl verwendet, so konnte bis zum Löscheinsatz bei allen Versuchen nur eine geringe Sichtbehinderung festgestellt werden (Bild 21 und 22).

Das Eindüsen des jeweiligen Löschmittels verursachte unabhängig von der Höhe der eingesetzten Konzentration bei Holzkrippen und

Heizöl als Brandstoff eine Verminderung der Beleuchtungsintensität auf den Wert Null, d.h. es bestand keine Sicht mehr.

Bei Spiritus als Brandstoff dagegen waren die Sichtverhältnisse nach dem Löscheinsatz besser als bei Holzkrippen oder bei Heizöl, da Spiritus selbst beim Verbrennen weniger Ruß bildet. Außerdem konnte bei Spiritus die Flamme nicht ganz vollständig gelöscht werden, so daß auch dadurch Schwankungen in der Beleuchtungsintensität auftraten (Bild 21 und 22). Ein Ansteigen der Beleuchtungsintensität war nur dann festzustellen, wenn das schwerere Löschmittel im Laufe der Versuchszeit nach unten absank oder in höherem Maße, wenn die Klappen geöffnet und der Abzugsventilator eingeschaltet wurden und/oder erneut Flammen entstanden.

4.5 Vergleich der Löschmittelmengen

In Tabelle 4 wurden neben den von der NFPA (5) empfohlenen Werten für ortsfeste Löschanlagen die aus Brand- und Löschversuchen ermittelten Werte angegeben. Dabei wurde unterschieden, ob der jeweilige Brand in Bodennähe (unten) oder in Deckennähe (oben) stattfand. Weiterhin wurde vermerkt, ob eine zusätzliche Unterstützung einer Wärmequelle vorhanden war oder nicht. Die Beurteilung, ob der Brand nach dem Eindüsen des Löschmittels gelöscht war oder nicht, konnte nicht immer eindeutig erfolgen. Deshalb wurden zusätzliche Indizes angefügt, die aussagen, ob nach dem Erlöschen der Flammen noch Glut vorhanden war oder ob die "normalen Flammen" zwar gelöscht, aber eine kleine bläuliche, ca. 5 cm bis 10 cm große Flamme weiterbrannte bei Spiritus als Brandstoff immer der Fall war.

Die Tabelle erhebt auf keinen Fall einen Anspruch auf Vollständigkeit in bezug auf genaue Grenzwerte bei den Konzentrationsangaben, da hierzu die Anzahl der Versuche nicht ausreichte.

Sie zeigt vielmehr deutlich die Tendenz, daß bei einem Brand ohne zusätzliche Wärmequelle die Löschkonzentration des jeweiligen Löschmittels niedriger liegt als bei einem Brand mit Wärmequelle.

Ebenso deutlich kann die Feststellung getroffen werden, daß zum Löscherfolg eines Brandes mit zusätzlicher Wärmequelle, der in Bodennähe (unten) stattfindet, weniger Löschmittel eingesetzt werden muß, als bei einem Brand im Deckenbereich (oben), da hier der Brand gelöscht sein muß, bevor das spezifisch schwerere Löschmittel nach unten absinkt und Frischluft zum Brandherd vordringen kann.

Im Gegensatz zu den Brandversuchen kann bei einem realen Brand davon ausgegangen werden, daß die Meldung eines Brandes früher erfolgt und deshalb auch der Löscheinsatz dementsprechend schneller eingeleitet werden kann, sodaß die Wahrscheinlichkeit für eine Rückzündung gering ist. Sind Wärmequellen im Brandraum vorhanden (Glutnester, glühendes Metall, usw.), so läßt sich durch eine längere Einwirkdauer ein vollständiges Ablöschen eines Brandes erreichen. Dies gilt nur in eingeschränktem Maße, wenn der Brand samt Wärmequelle sich im oberen Teil des Raumes befindet. In diesem Fall sinkt, wie mehrfach erwähnt, das eingesetzte Löschmittel nach unten, so daß aufgrund der Strömungs- bzw. Druckverhältnisse Frischluft eindringen und Rückzündungen verursacht werden können.

Die Untersuchungen zeigen, daß bei Halon als Löschmittel auch die Bildung von Spaltprodukten stark vom Vorhandensein einer Wärmequelle im Raum abhängig ist. Der Ort des Brandes spielt für die jeweils in unmittelbarer Nähe festgestellten Konzentrationen keine Rolle. Die Verteilung im Raum ist jedoch abhängig vom Ort des Brandes. Es sollte beim Einsatz von Halon als Löschmittel beachtet werden, daß das Eindüsen so früh als möglich und innerhalb des vorgeschriebenen Zeitraumes von 10 s stattfindet, so daß ein Zersetzen in gesundheitsschädliche Stoffe infolge

höherer Temperaturen weitestgehend vermieden wird.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines langfristigen Forschungsauftrages wurden Untersuchungen mit den gasförmigen Löschmitteln Kohlendioxid, Halon 1211 und Halon 1301 durchgeführt. Die eingesetzten Konzentrationen lagen bei Kohlendioxid zwischen ca. 6 Vol.-% und ca. 38 Vol.-% und bei Halon zwischen ca. 3 Vol.-% und ca. 15 Vol.-%. Die Löschwirkungen sind unterschiedlich, so daß bei Halon (Inhibitionseffekt) wesentlich geringere Konzentrationen notwendig sind als bei Kohlendioxid (Stickeffekt). Die Brand- und Löscheversuche wurden in einem Raum mit einem Volumen von 1,5 m³ durchgeführt, wobei als fester Brandstoff Holz und als flüssige Brandstoffe Spiritus und Heizöl verwendet wurden. Der Brandstoff und die Wärmequelle wurden jeweils im oberen Teil des Raumes angeordnet im Unterschied zu früheren Untersuchungen, bei denen der Brandstoff mit und ohne Wärmequelle in Bodennähe angeordnet wurden. Die Wärmequelle, bestehend aus glühenden Heizdrähten, wurde auch zum Zünden des Brandstoffes verwendet, der als Feststoff über und als Flüssigkeit unter den Heizdrähten angeordnet wurde. Durch die während der gesamten Versuchszeit eingeschaltete Wärmequelle war die Möglichkeit einer Rückzündung gegeben.

Innerhalb des Versuchsraumes wurde die Temperatur an 14 Meßstellen ermittelt, wobei vor dem Löscheinsatz Werte von max. 1000 °C bei Holzkrippen und max. 900 °C bei den Flüssigkeiten erreicht wurden. In Bodennähe wurde nur eine geringe Temperaturerhöhung festgestellt. Nach dem Löscheinsatz fallen die Temperaturwerte in Abhängigkeit von der eingesetzten Konzentration. Rückzündungen wurden als Spitzen registriert.

Vor dem Löscheinsatz war der Druck in Bodennähe ausgeglichen, während in Deckennähe ein geringer Überdruck herrschte. Nach dem Eindüsen von kleineren Konzentrationen blieb die von unten nach oben gerichtete Strömung erhalten, während bei höheren Konzentrationen ein Druckgefälle von unten nach oben vorherrschte, d.h. das schwerere Löschmittel sank aufgrund seiner höheren Dichte nach unten ab und durch Leckageöffnungen konnte im oberen Teil des Raumes Luft eindringen.

Die Konzentrationswerte der Löschmittel sowie der Brandgase, Luft und Pyrolyseprodukte stiegen bzw. fielen in Abhängigkeit von der eingesetzten Löschkonzentration, d.h. bei höheren Löschmittelkonzentrationen in Nähe des Brandherdes wurde der Brand gelöscht. Reichte die Löschkonzentration zu einem Zeitpunkt innerhalb der Versuchszeit nicht mehr aus, war die O_2 -Konzentration größer und der Brand entwickelte sich erneut, was wiederum Rückwirkungen auf sämtliche gemessene Konzentrationswerte hervorrief.

Die Beleuchtungsintensität des Brandrauches und der Löschgase im Brandraum war auch hier abhängig von der Art des Brandstoffes und der eingesetzten Löschmittelkonzentration, so daß die Sichtverhältnisse im Brandraum sich dementsprechend gut oder schlecht einstellten.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Schatz, H.: Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe.
Teil 3: Über die Löschwirksamkeit von Kohlendioxid beim Entstehungsbrand in einem Versuchsraum natürlicher Größe.
Forschungsbericht Nr.37 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten" (1979)
- /2/ Schatz, H.: Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe.
Teil 6: Vergleichende Untersuchung der Löschwirksamkeit 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 "Feuerwehrangelegenheiten" (1980)
- /3/ 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)

- /4/ Schatz, H.: 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.
Forschungsbericht Nr.47 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten" (1982)
- /5/ Standard on carbon dioxide extinguishing systems.
NFPA No.12 - 1980, S.1-103;
Standard on halogenated fire extinguishing agent systems.
Halon 1301 - NFPA No.12A - 1980, S.1-129;
Halon 1211 - NFPA No.12B - 1980, S.1-91;
In: National Fire Codes, Boston: NFPA (1982)
- /6/ Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und biologische Arbeitsstofftoleranzwerte.
DFG, Dt. Forschungsgemeinschaft
Weinheim: Verlag Chemie, 1983

7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Schematische Übersicht der Versuchsdaten.

Löschmittel	CO ₂		CO ₂		CO ₂		CO ₂		CO ₂	
	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂
Rauminhalt	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	H	H	H
Brandlast	380	380	380	380	-	-	-	-	-	-
Brandlast je Volumeneinheit	-	-	-	-	150	150	150	150	150	150
Zeit bis zum Zünden	262	262	262	262	83	83	83	93	93	93
Vorbrennzeit	810	590	480	480	155	275	260	230	280	360
Flutungszeit	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Löschmittelmenge	2,0	1,5	3,5	4,0	2,5	2,0	3,5	7,0	1,0	8,0
Löschmittelmenge je Volumeneinheit	213	490	811	1150	175	497	843	1396	180	1623
Mittlere Löschmittelmittelkonzentration	147	338	559	793	121	343	581	962	124	386
Löschmittelkonzentration bei Flammen	7,4	15,5	23,5	30,1	6,1	15,7	24,0	34,6	6,3	17,3
Löschmittelkonzentration bei Glut	nein	nein	ja ¹⁾	ja	nein	ja ²⁾	ja ²⁾	ja	nein	ja ²⁾
Zustand bei geschlossenen Klappen	nein	nein	nein	nein	-	-	-	-	-	-
Zustand bei geöffneten Klappen	brennt	brennt	glüht	glüht	brennt	zündet ³⁾	zündet ³⁾	zündet ³⁾	brennt	zündet
Zustand bei geöffneten Klappen	brennt	brennt	zündet	zündet	brennt	zündet	zündet	zündet	brennt	zündet

1) 5 min 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	K	K	S	S	H	H	K	K	S	S
Rauminhalt	m ³	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	S	S	H	H	K	K	S	S	H
Brandlast	g	380	380	120	120	135	135	380	380	120	120	135
Brandlast	ml	-	-	-	-	150	150	150	150	150	150	150
Brandlast je Volumeneinheit	g/m ³	262	262	83	83	93	93	262	262	83	83	93
Zeit bis zum Zünden	s	370	390	280	260	330	310	455	340	310	230	390
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	0,75	5,0	1,5	5,0	1,25	3,5	2,0	6,25	1,5	6,0	1,75
Löschmittelmenge	g	365	1756	332	1658	376	1189	330	1069	370	1386	282
Löschmittelmenge je Volumeneinheit	g/m ³	252	1212	228	1143	259	820	228	737	255	956	194
Mittlere Löschmittelm-konzentration	Vol.-%	3,4	14,5	3,1	13,8	3,5	10,3	3,5	10,5	3,9	13,2	3,0
Löscherfolg bei Flammen		ja ¹⁾	ja	ja ²⁾	ja ²⁾	nein	ja	nein	ja	nein	ja ²⁾	ja ²⁾
Löscherfolg bei Glut		nein	nein	-	-	-	-	nein	ja ¹⁾	-	-	-
Zustand bei geschlossenen Klappen		glüht	glüht	zündet ³⁾	zündet ³⁾	zündet ³⁾	zündet ³⁾	glüht	zündet	zündet ³⁾	zündet ³⁾	zündet ³⁾
Zustand bei geöffneten Klappen		zündet	zündet	zündet	zündet	zündet	zündet	glüht	zündet	zündet	zündet	zündet

1) 5 min 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	Hubzahl n=10 max. 500 ppm n=1 max. 5000 ppm		Hubzahl n=5 max. 15 ppm	Hubzahl n=10 max. 3 ppm n=1 max. 500 ppm
	1211 Vol.-%	1301 Vol.-%			HCl+HBr ppm	HBr ppm		
Holzkrrippe	3,4	1301	2 15	> 15 (n=1) -	> 500 (n=5) > 500 (n=10)		1 0,5	0,5 0,2
Holzkrrippe	14,5		2	> 15 (n=2)	350 (n=3)		0 (n=3)	1 (n=5)
Spiritus	3,1		2 15	> 15 > 15 (n=15)	20 (n=10) 20 (n=10)		10 10	2 5 (n=5)
Spiritus	13,8		2 15	> 15 (n=1) > 15 (n=2)	> 500 (n=1) -		> 15 (n=1) 10	1 0,5
Heizöl	3,5		2	> 15 (n=5)	100 (n=5)		2	0,2 (n=5)
Heizöl	10,3		2	> 15 (n=5)	200 (n=5)		5	0,5 (n=5)
Holzkrrippe	3,5	3,5	2 15	> 15 (n=4) > 15		250 20		2,5 2,5
Holzkrrippe	10,5		2 15	> 15 (n=2) -		150 20		0,5 0,5
Spiritus	3,9	3,9	2 15	> 15 (n=4) > 15 (n=6)		180 20		1 0,5
Spiritus	13,2		2 15	> 15 (n=3) > 15 (n=5)		80 270		2 1,5
Heizöl	3,0		2	> 15 (n=3)		50		0,3
Heizöl	10,1		2	> 15 (n=3)		80		0,5

MAK-Wert /6/: HF: 3,0 ppm HCl: 5,0 ppm HBr: 5,0 ppm COCl₂: 0,1 ppm Cl₂: 0,5 ppm Br₂: 0,1 ppm

Tabelle 4. Löschmittelmengen im Vergleich.

Löschmittel	Brandgut	Brand unten ohne /2,3/ Wärmequelle		Brand unten mit /4/ Wärmequelle		Brand oben mit Wärmequelle		empfohlene Werte /5/ Vol.-%
		gelöscht Vol.-% ⁴⁾	nicht gelöscht Vol.-%	gelöscht Vol.-%	nicht gelöscht Vol.-%	gelöscht Vol.-%	nicht gelöscht Vol.-%	
CO ₂	PU	15,3	-	-	-	-	-	-
	K	14,8	18,4	24,0	23,5	30,1	30,1	-
	S	16,8	24,0	31,2	24,0	34,6	34,6	43
	H	17,5	17,3	30,1	23,6	37,8	37,8	34
Halon 1211	PU	2,9	-	-	-	-	-	-
	K	2,9	2,7	4,5	3,4	14,5	14,5	5
	S	2,8	7,4	13,8	3,1	13,8	13,8	5
	H	3,0	2,6	4,4	3,5	10,3	10,3	-
Halon 1301	PU	3,2	-	-	-	-	-	-
	K	2,0	-	2,0	3,5	10,5	10,5	5
	S	3,2	2,1	13,9	3,9	13,2	13,2	5
	H	3,1	2,2	3,4	3,0	10,1	10,1	-

PU = Polyurethan-Weichschaum 1) nur noch Glut vorhanden
 K = Krippe 2) kleine blaue Flamme - spätere Rückzündung bei geschlossenen Klappen
 S = Spiritus 3) 10 min Einwirkdauer gefordert
 H = Heizöl 4) kleinste verwendete Konzentration

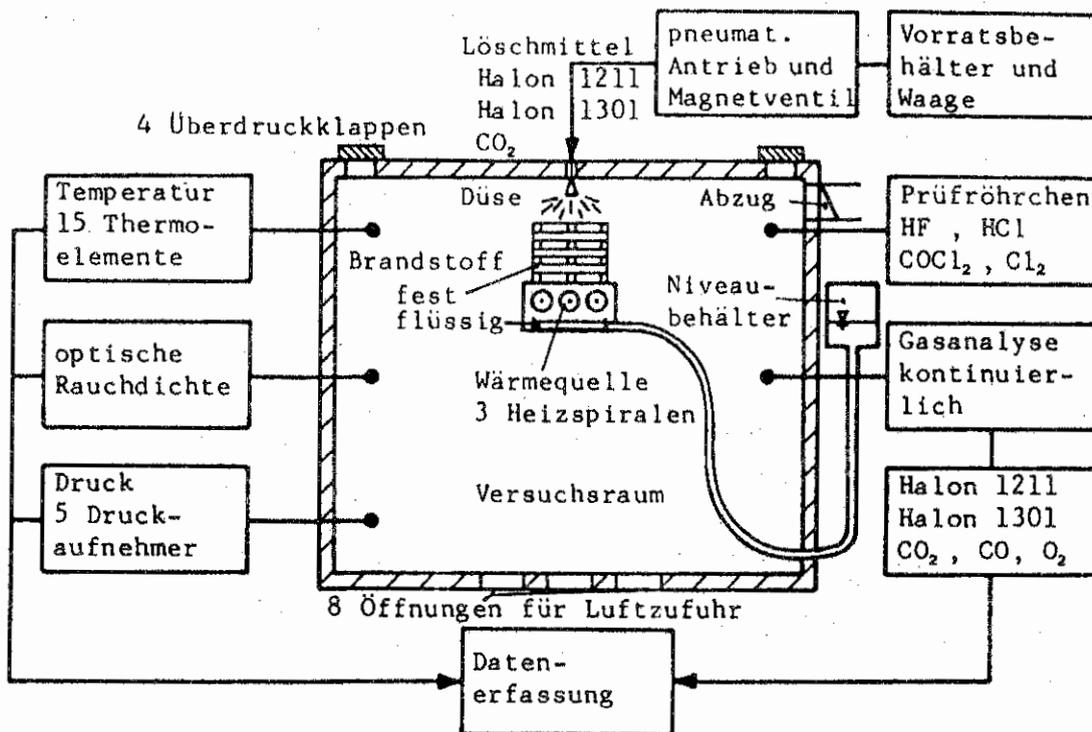


Bild 1. Schema der Versuchsanordnung

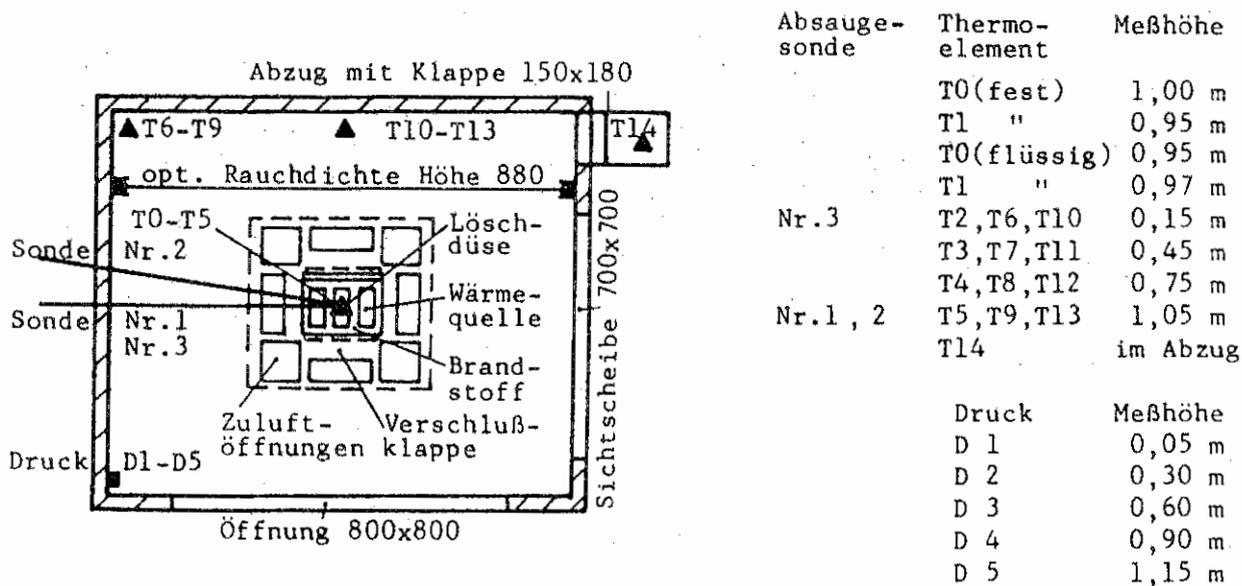


Bild 2. Lage der Meßstellen im Versuchsraum

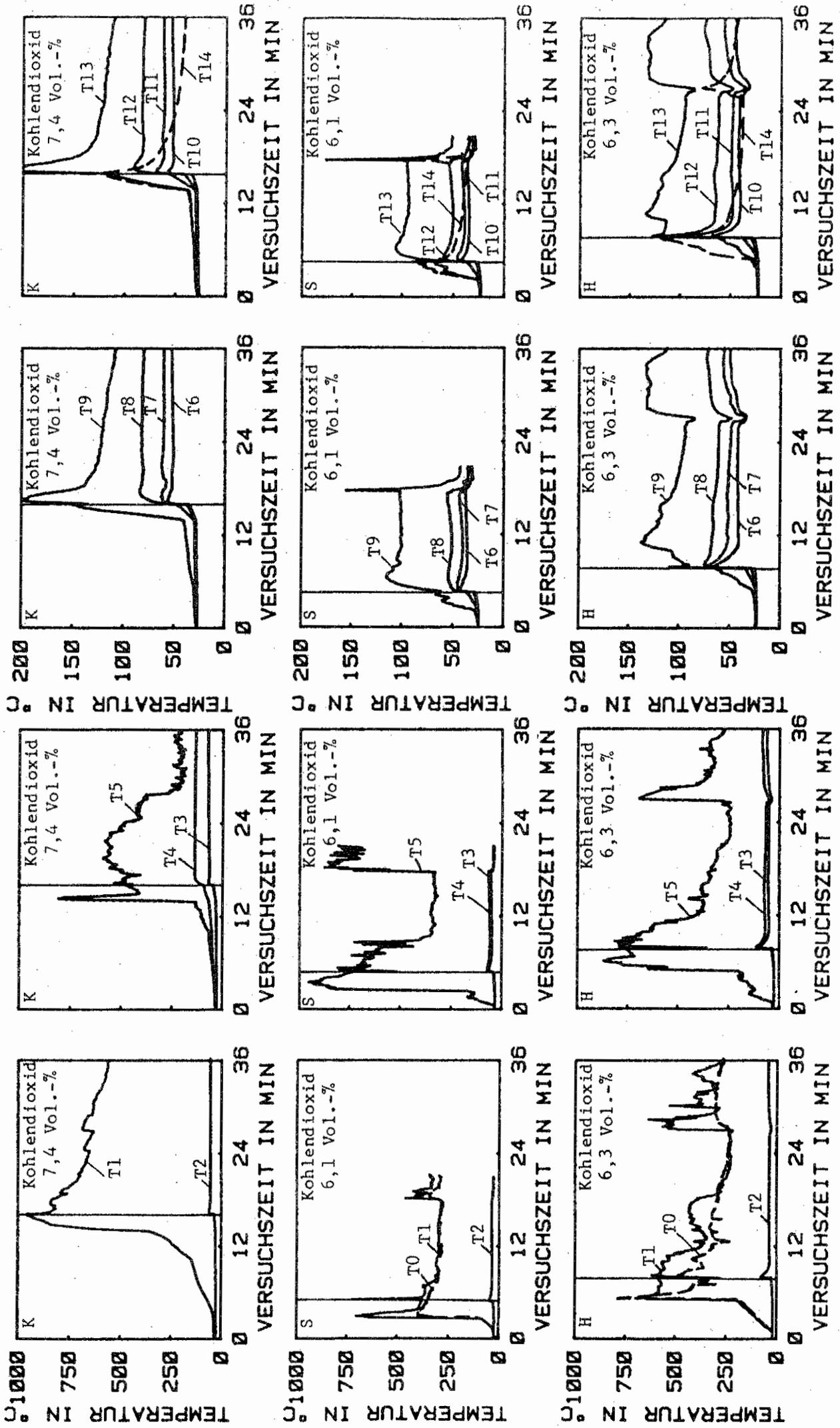


Bild 3. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

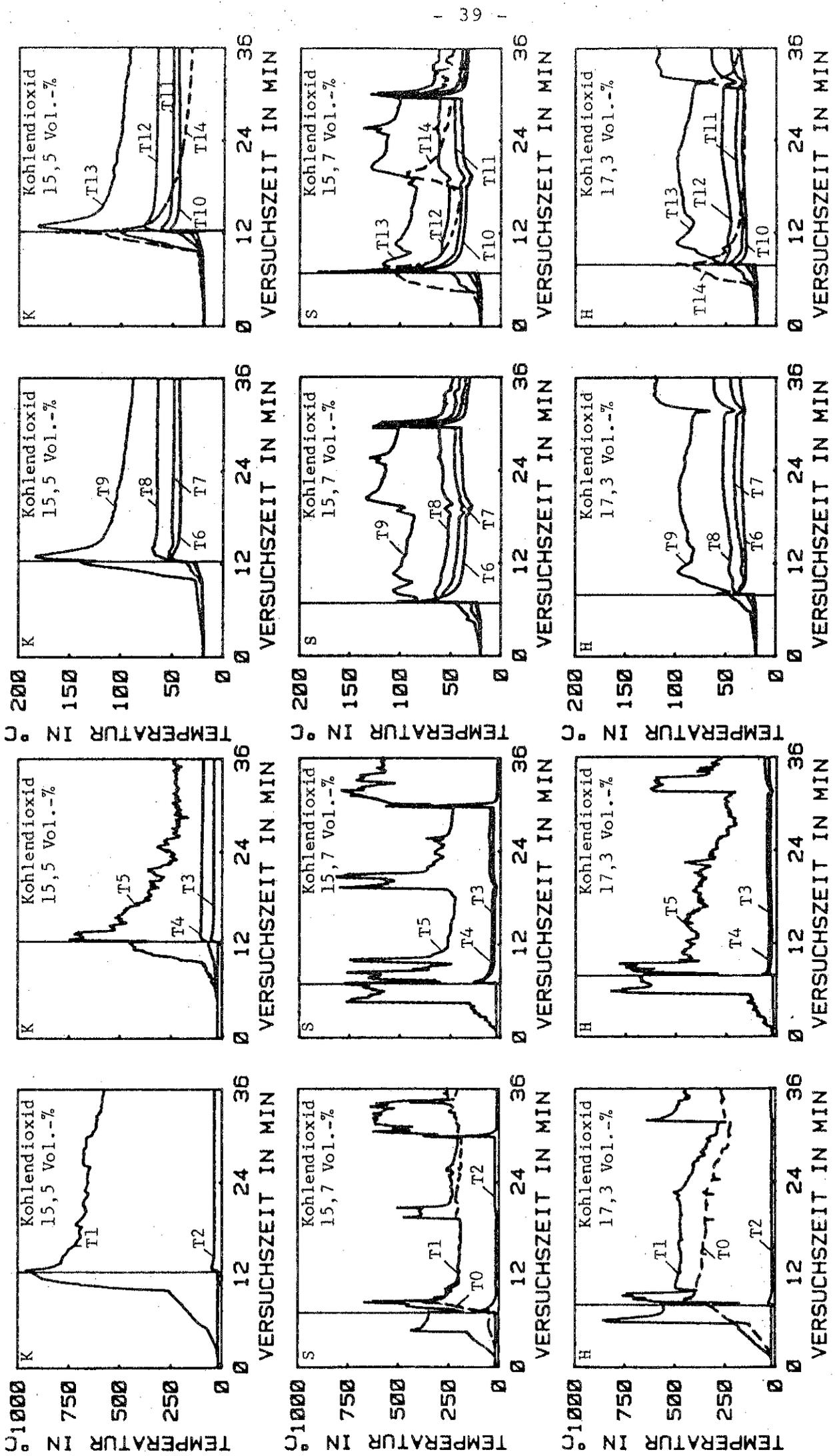


Bild 4. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

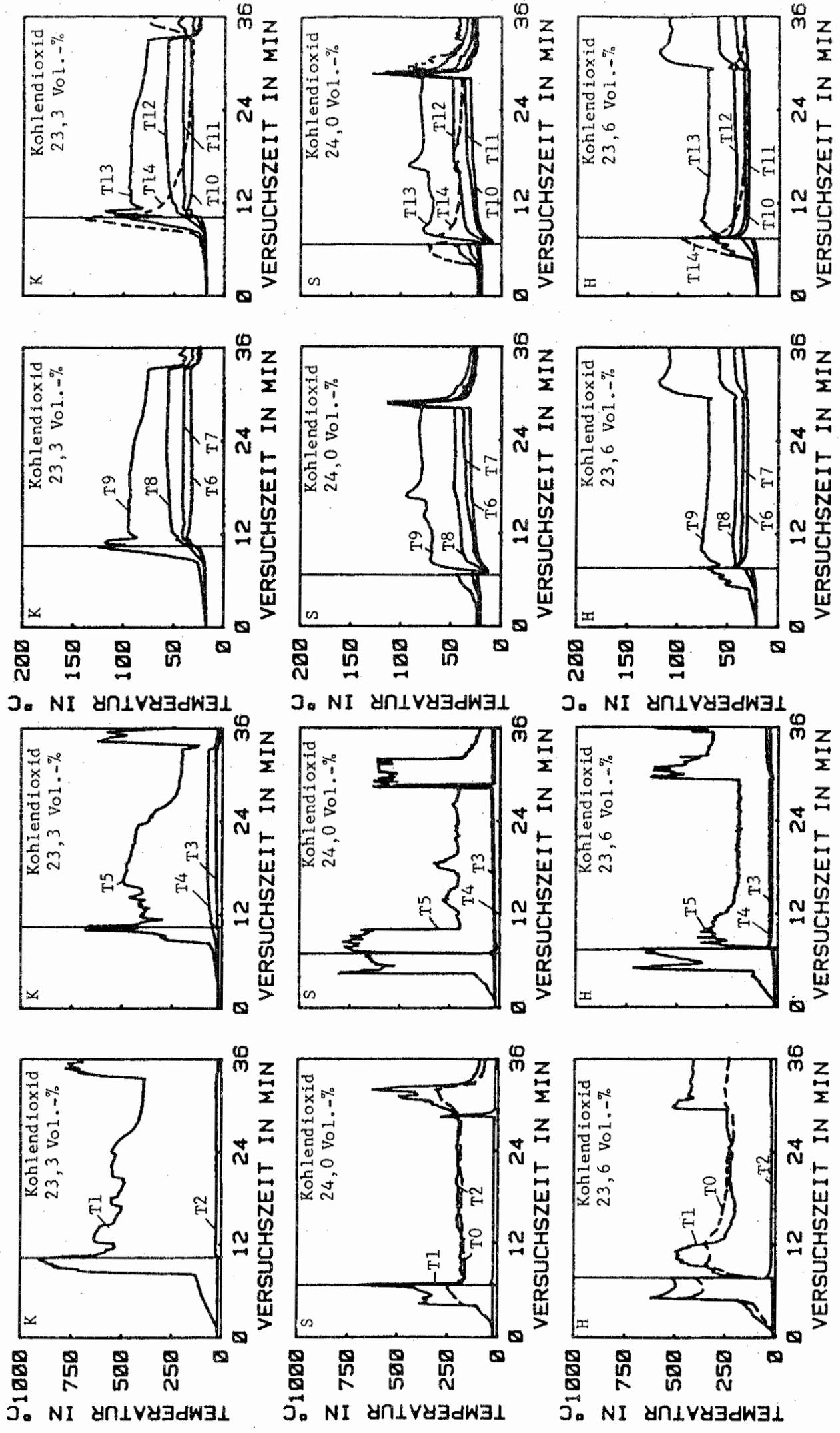


Bild 5. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

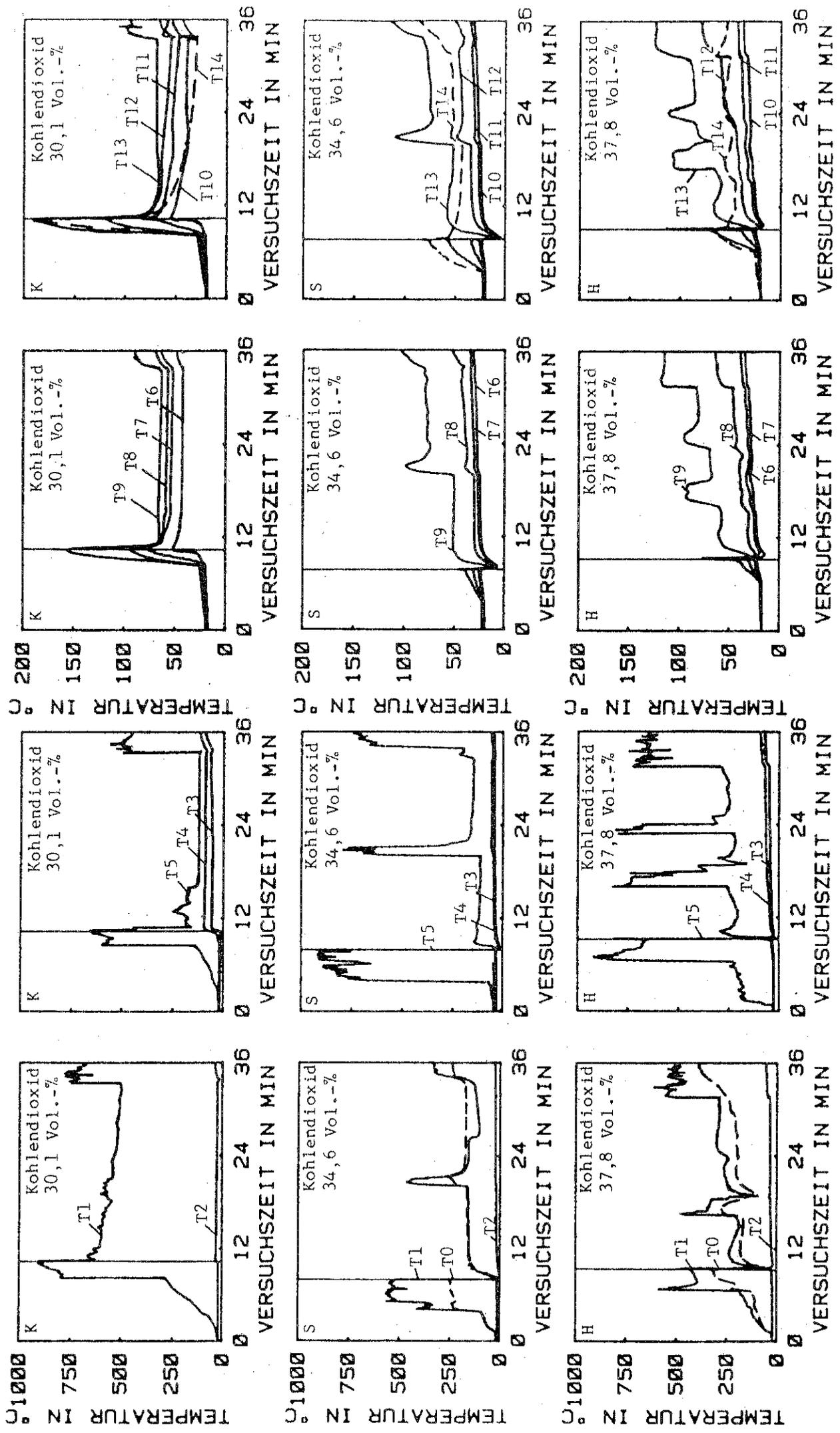


Bild 6. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

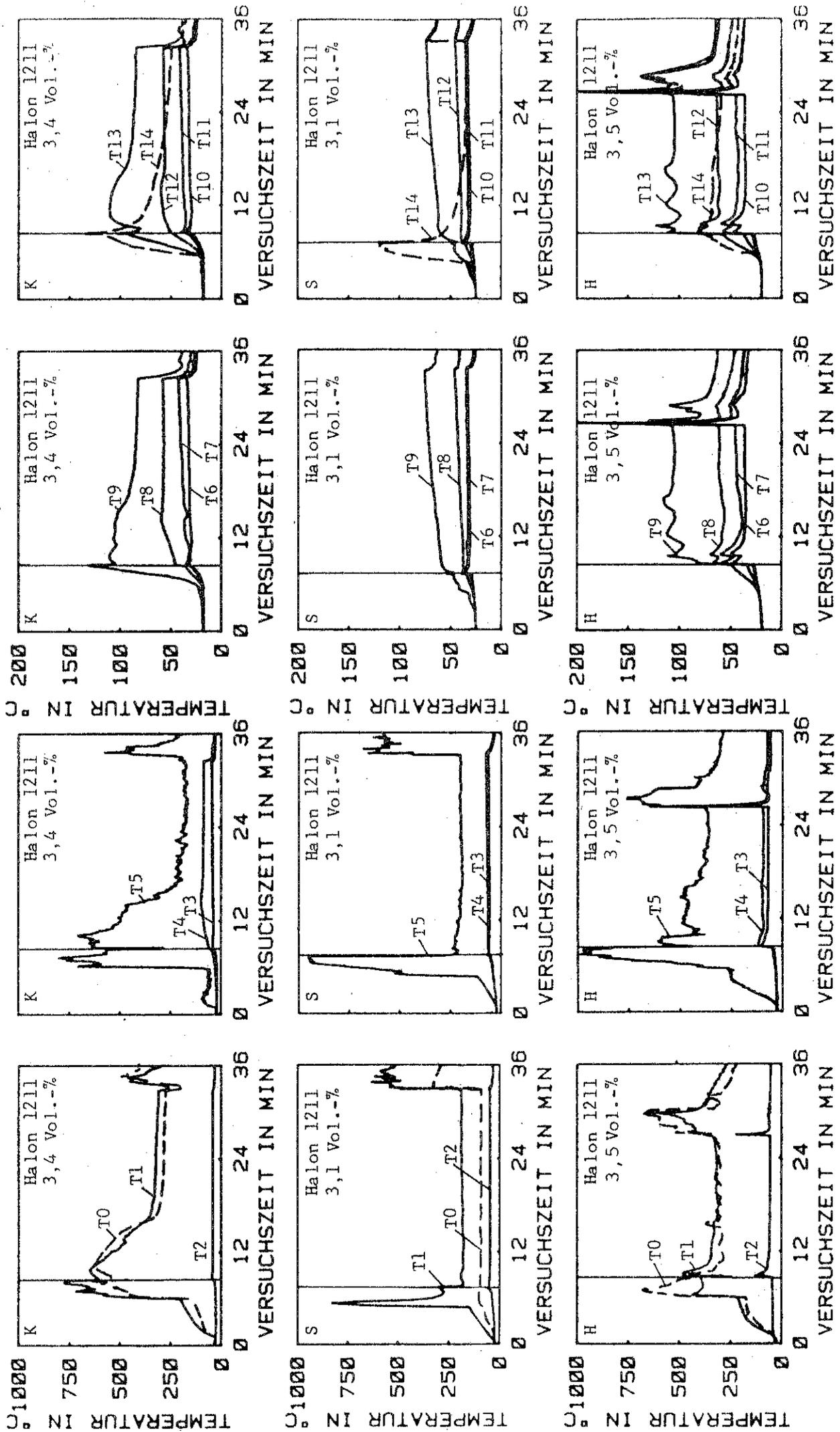


Bild 7. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Halon 1211 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

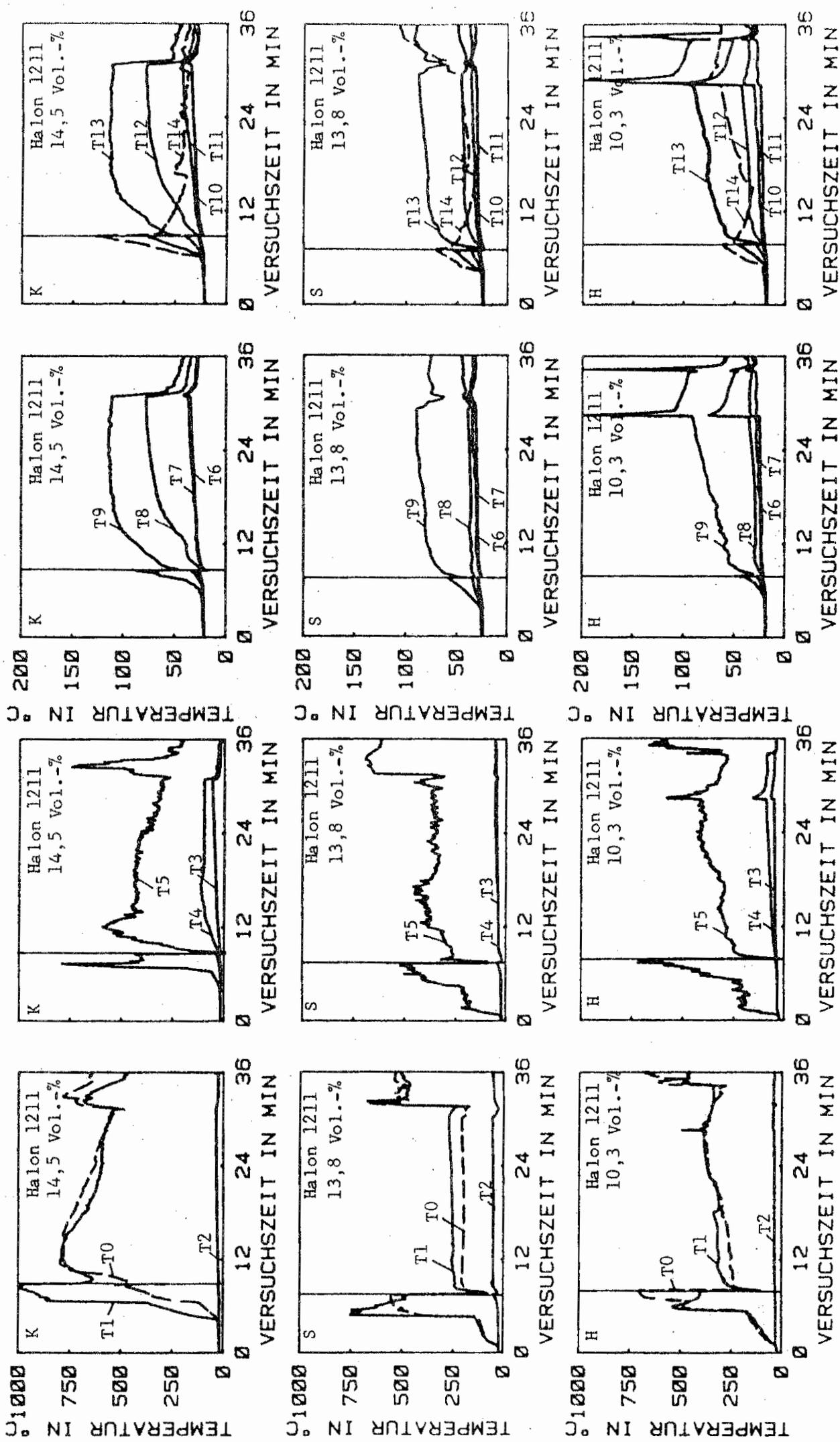


Bild 8. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Halon 1211 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

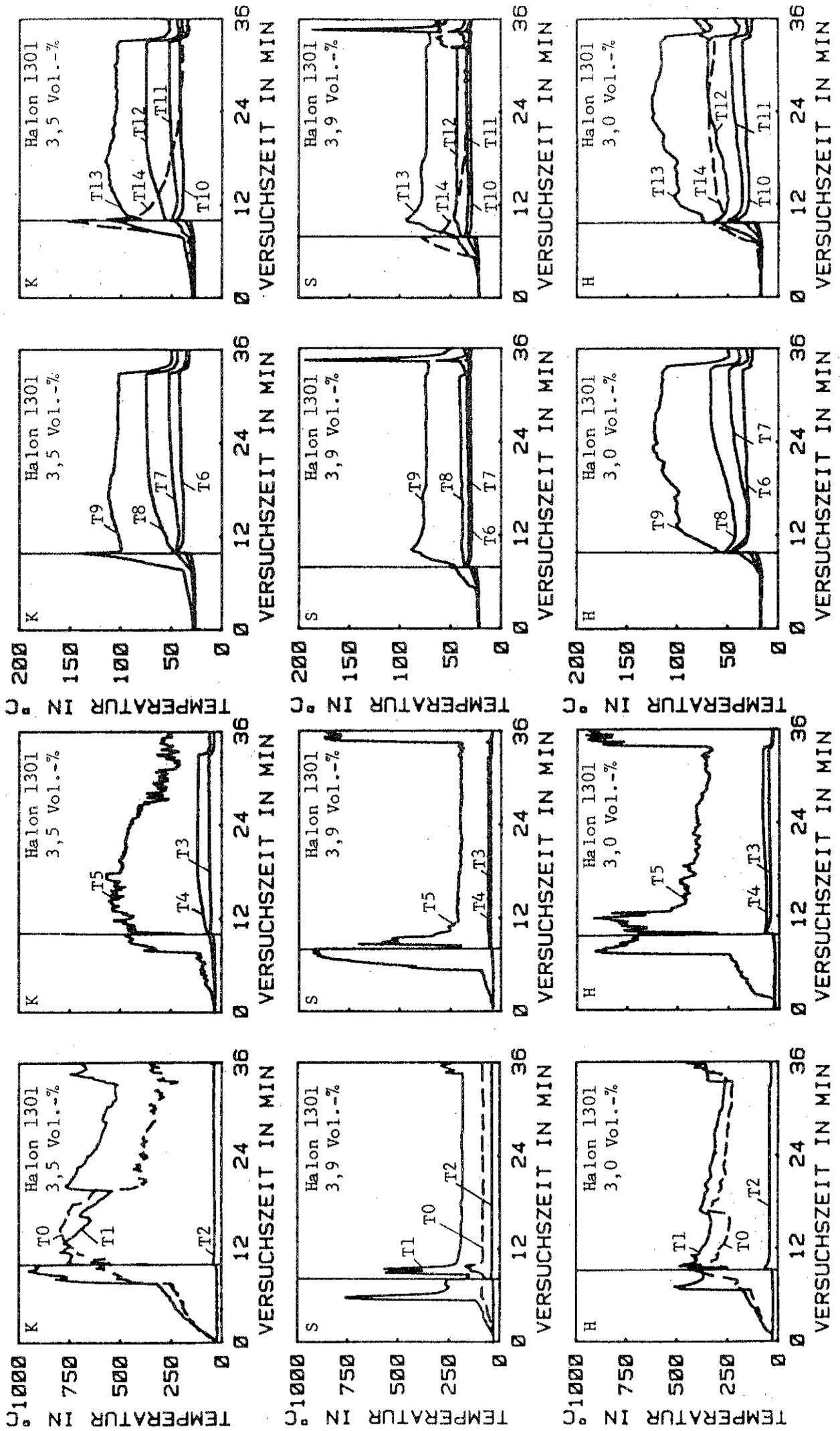


Bild 9. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Halon 1301 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

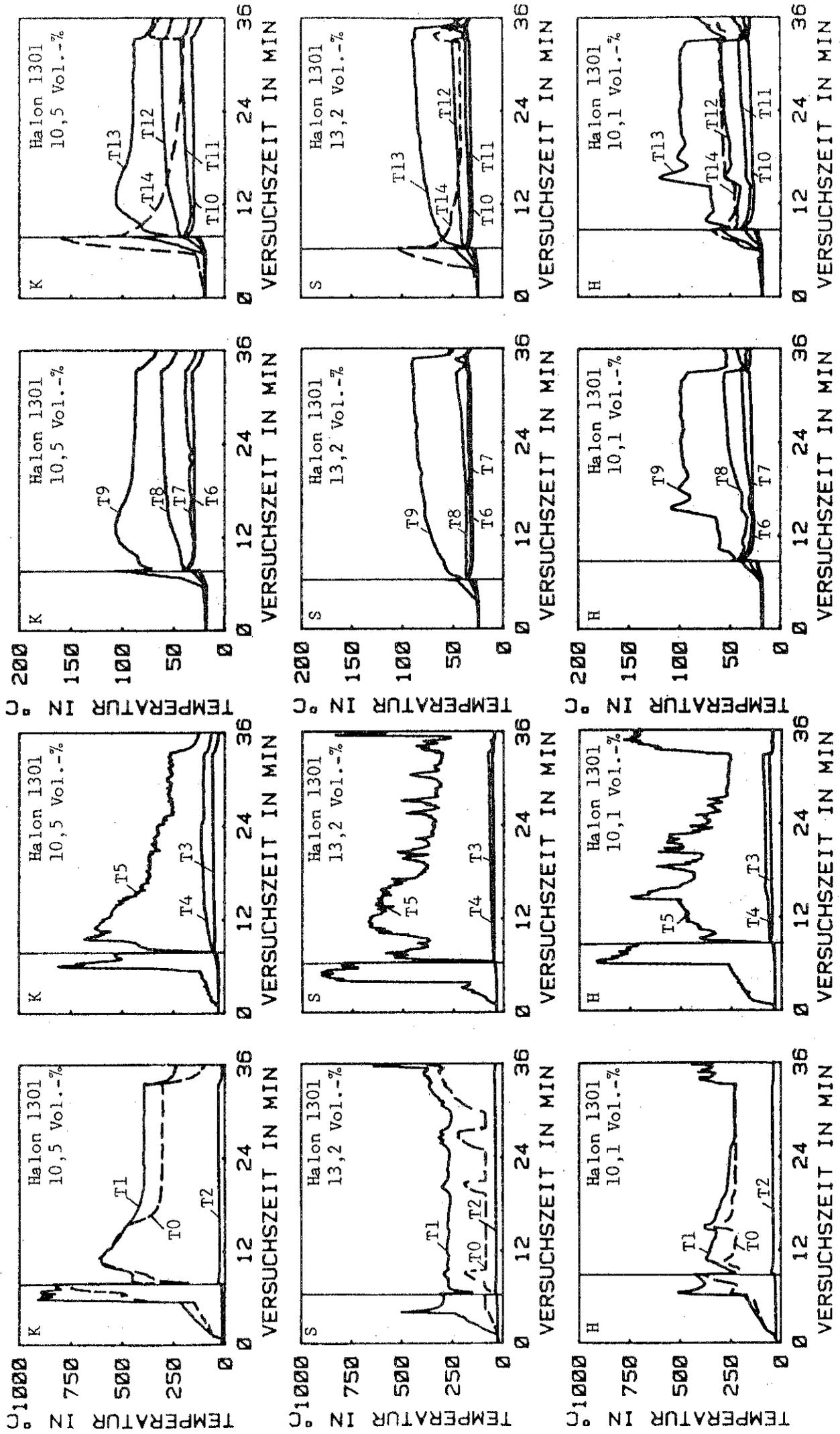
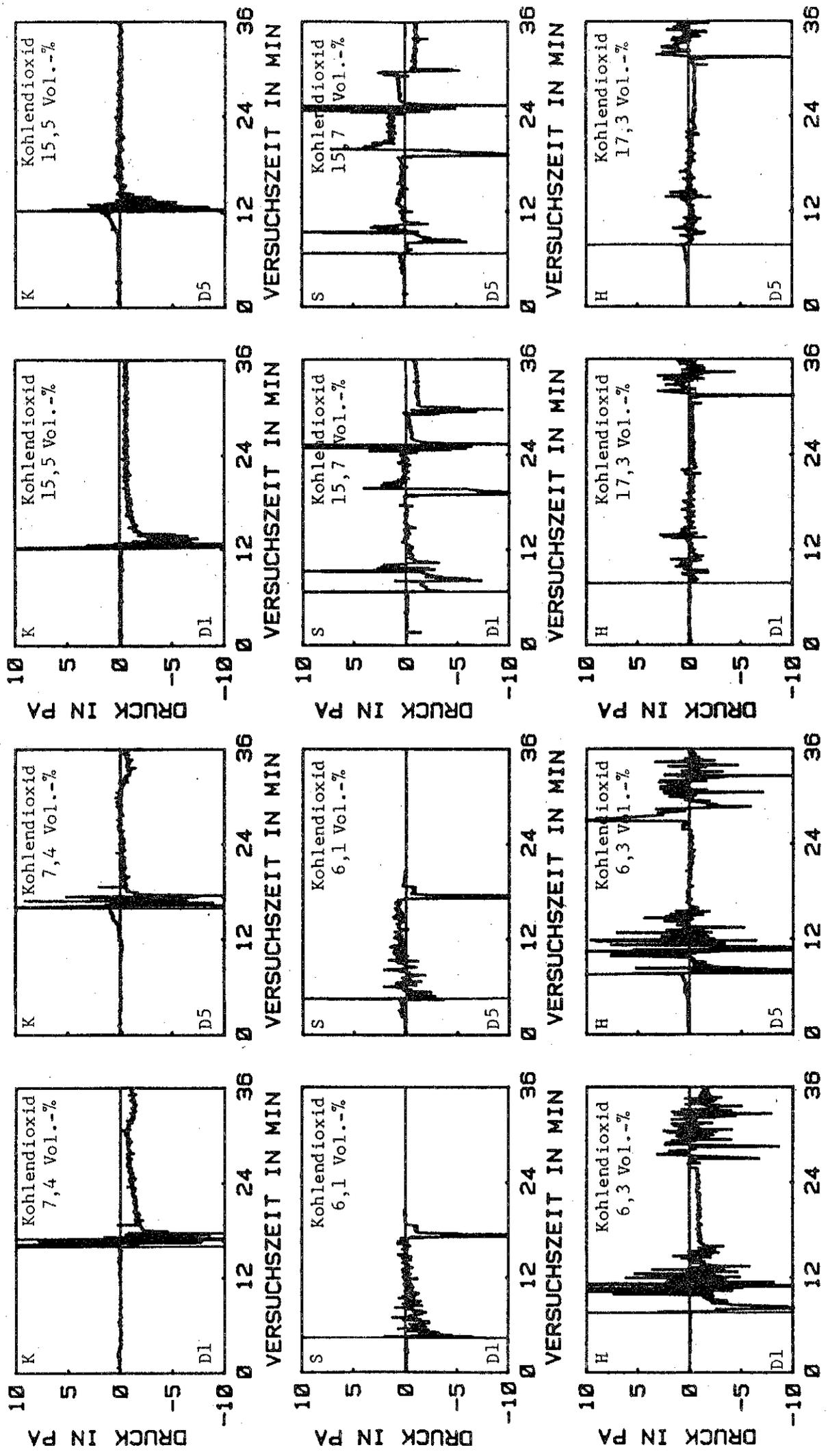


Bild 10. Zeitlicher Verlauf der örtlichen Temperaturen an den Meßstellen T0 bis T14 beim Einsatz von Halon 1301 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.



VERSUCHSZEIT IN MIN VERSUCHSZEIT IN MIN VERSUCHSZEIT IN MIN VERSUCHSZEIT IN MIN

Bild 11. 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.

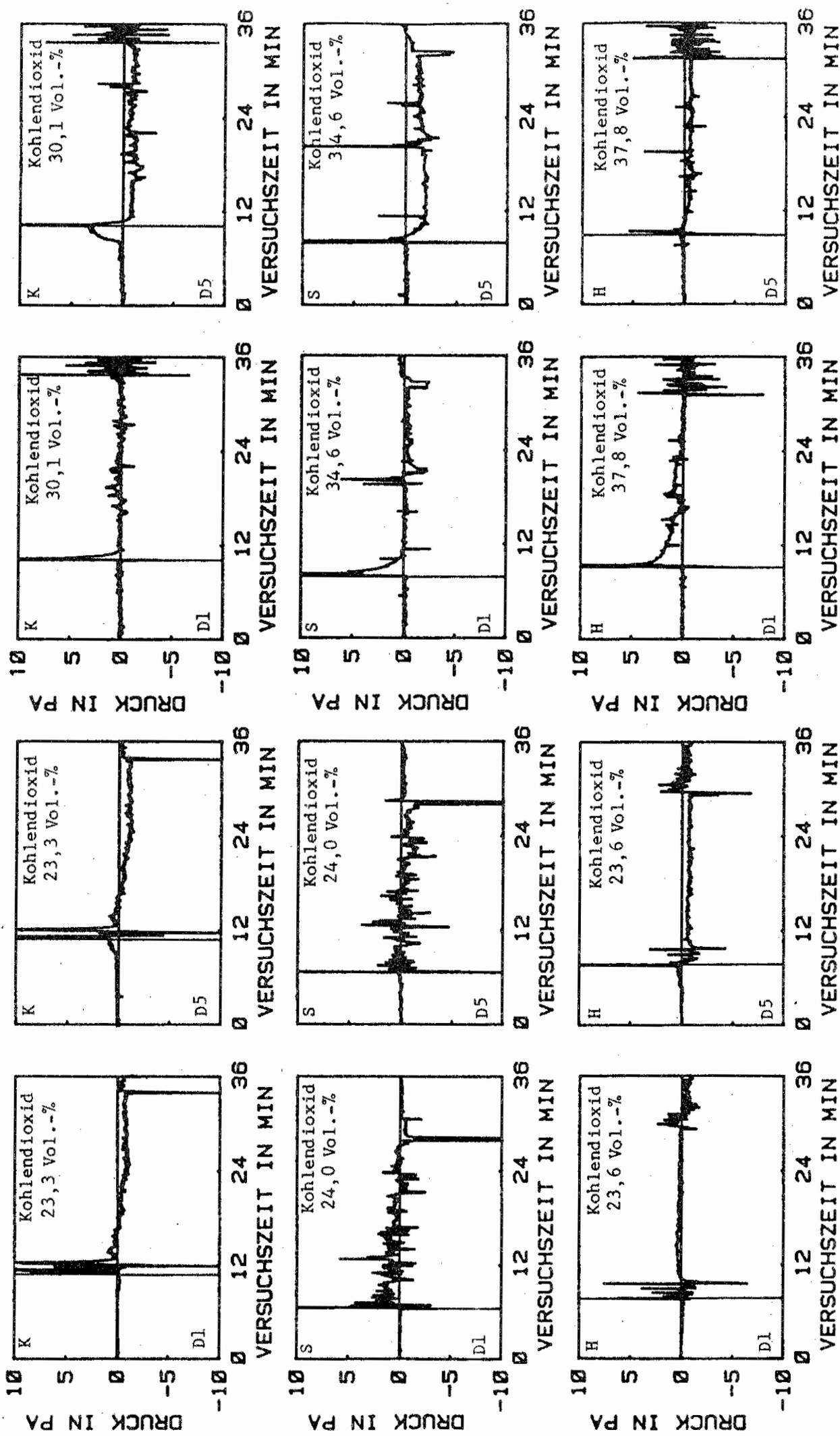


Bild 12. Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen D1 und D5 beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

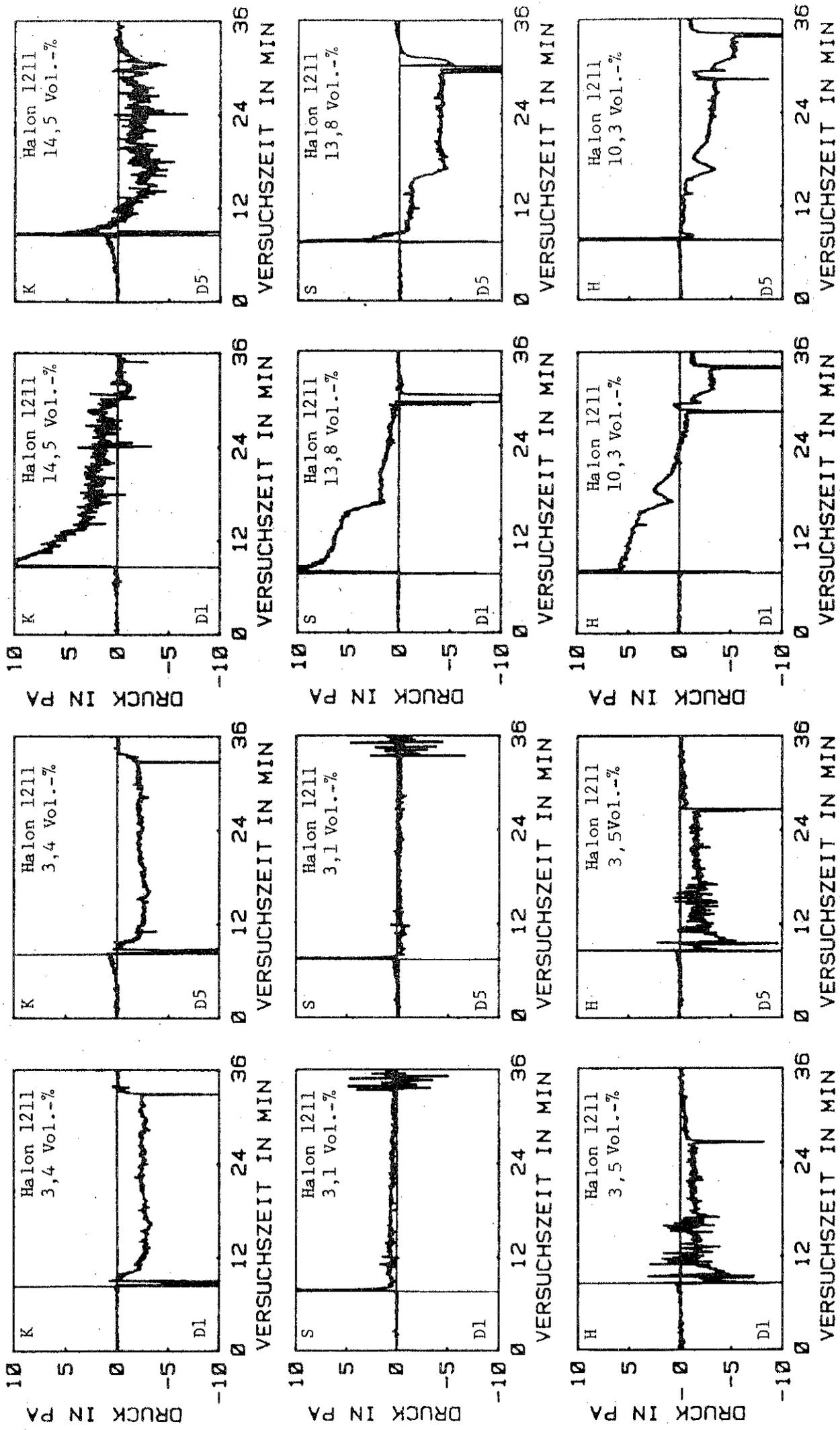


Bild 13. Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen D1 und D5 beim Einsatz von Halon 1211 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

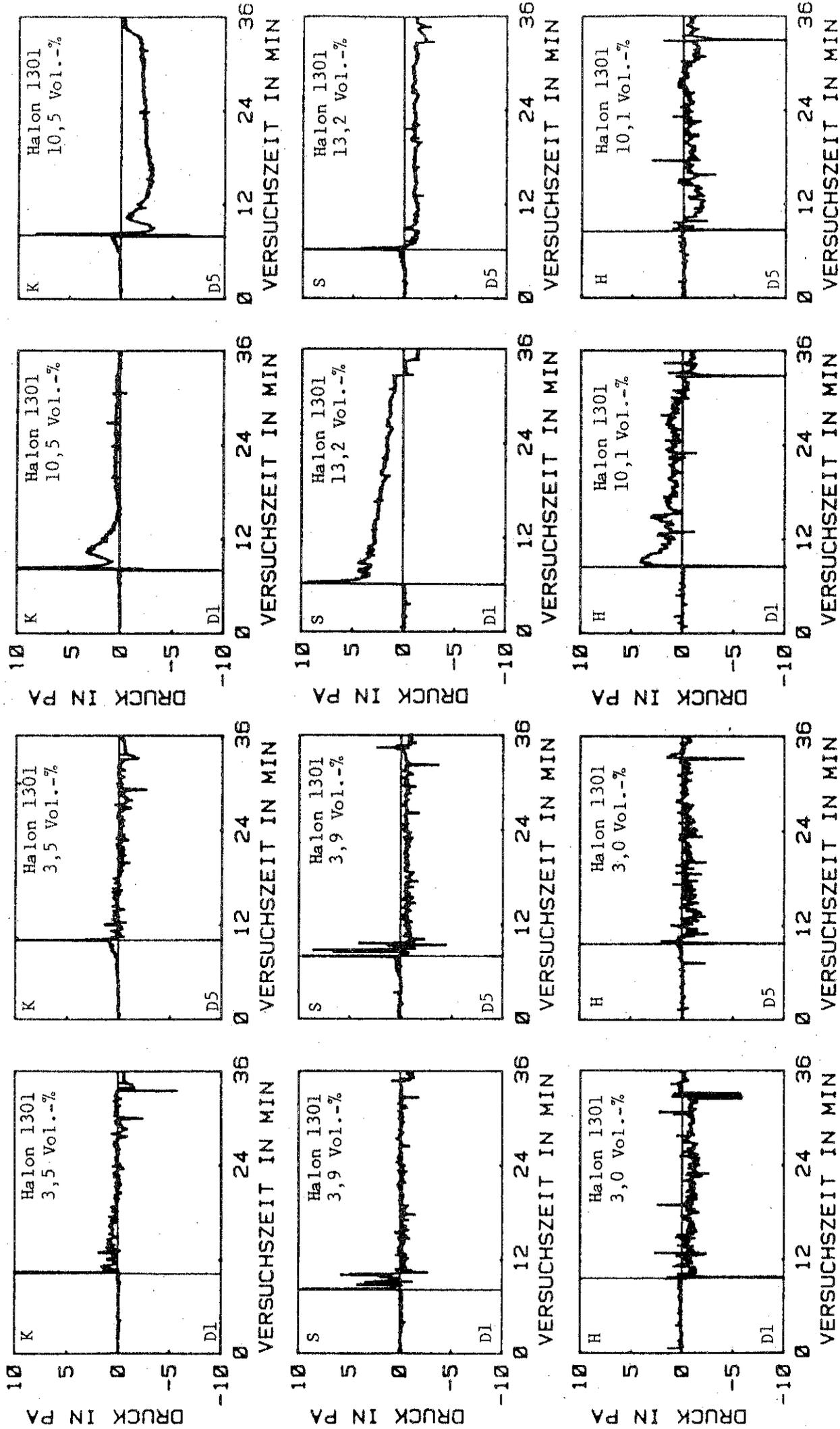


Bild 14. Druckdifferenz (Brandraum-Umgebung) in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen D1 und D5 beim Einsatz von Halon 1301 als Löschmittel bei den Brandstoffen Holz, Spiritus und Heizöl.

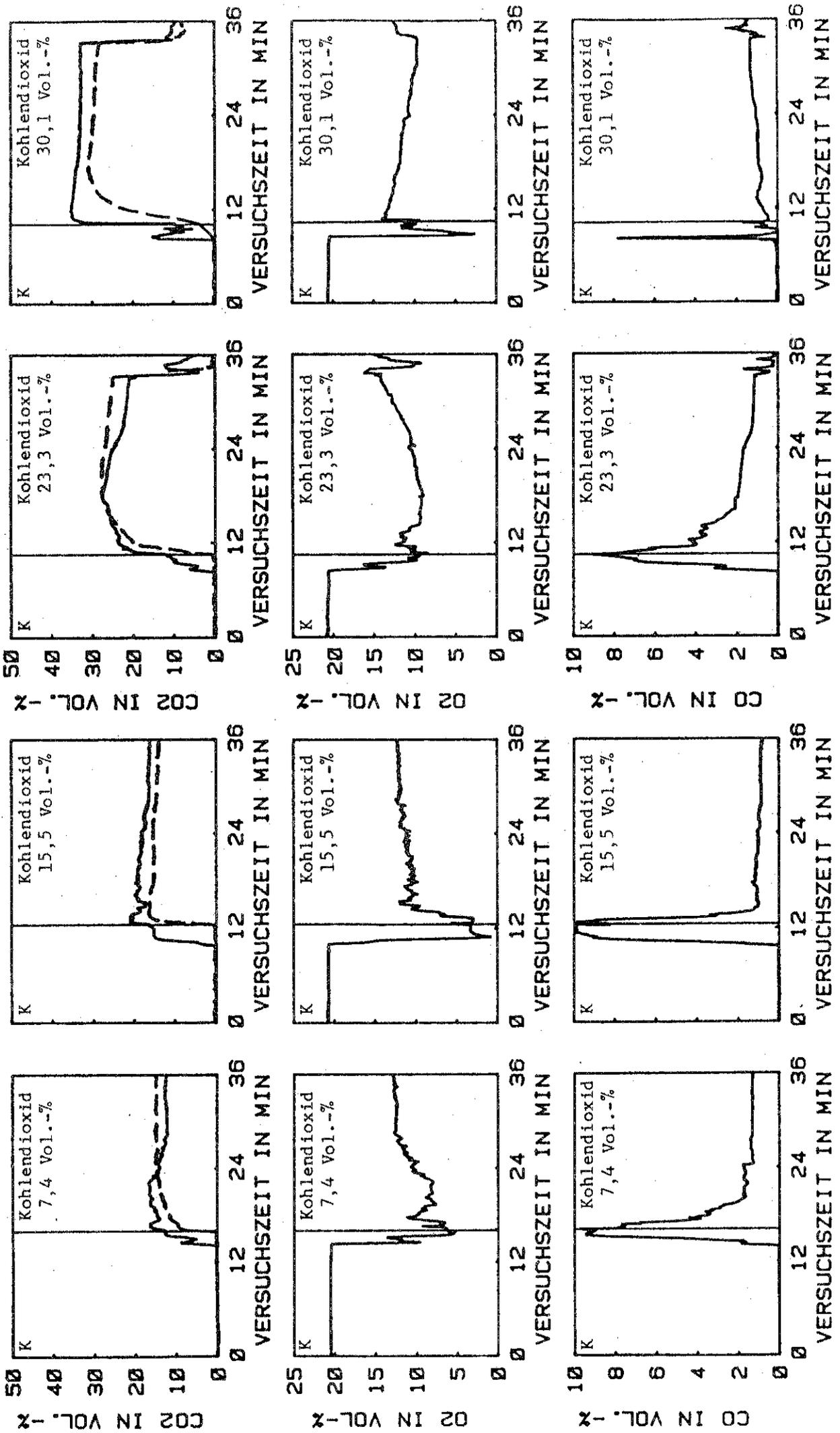


Bild 15. Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂, O₂ und CO in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Holz als Brandstoff.

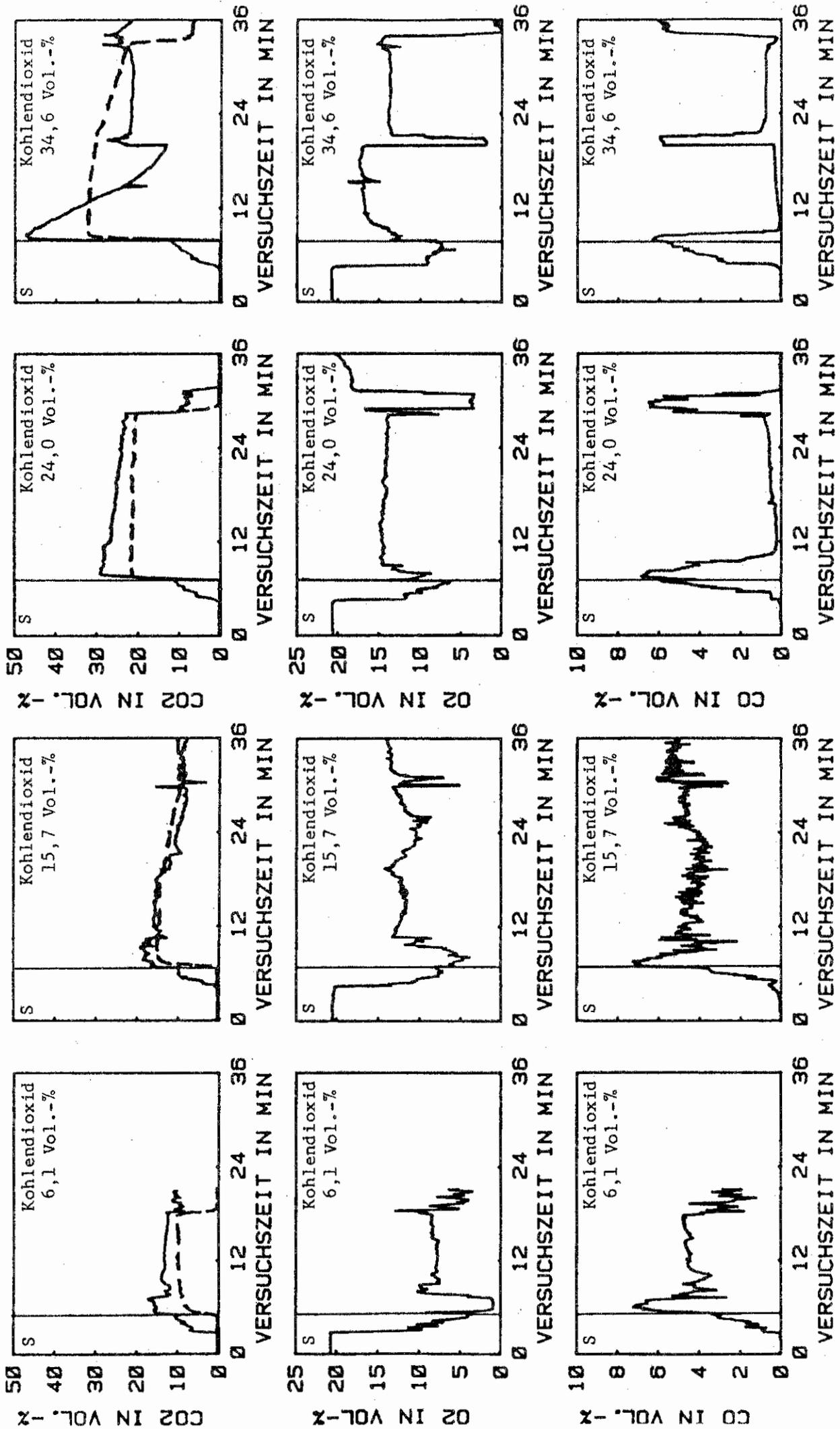


Bild 16. Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂, O₂ und CO in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Spiritus als Brandstoff.

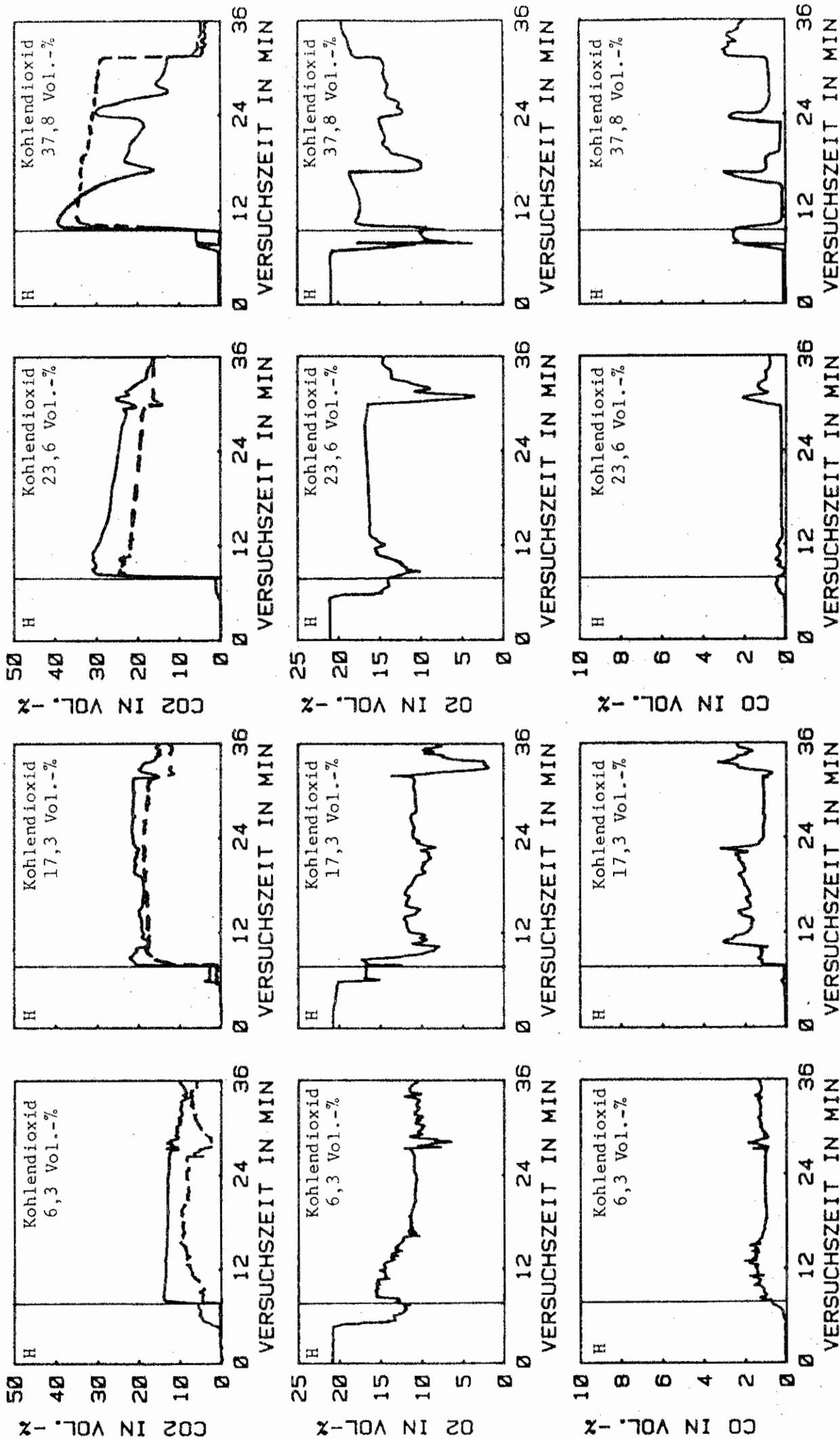


Bild 17. Verlauf der örtlichen Konzentration von CO₂, O₂ und CO in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Heizöl als Brandstoff.

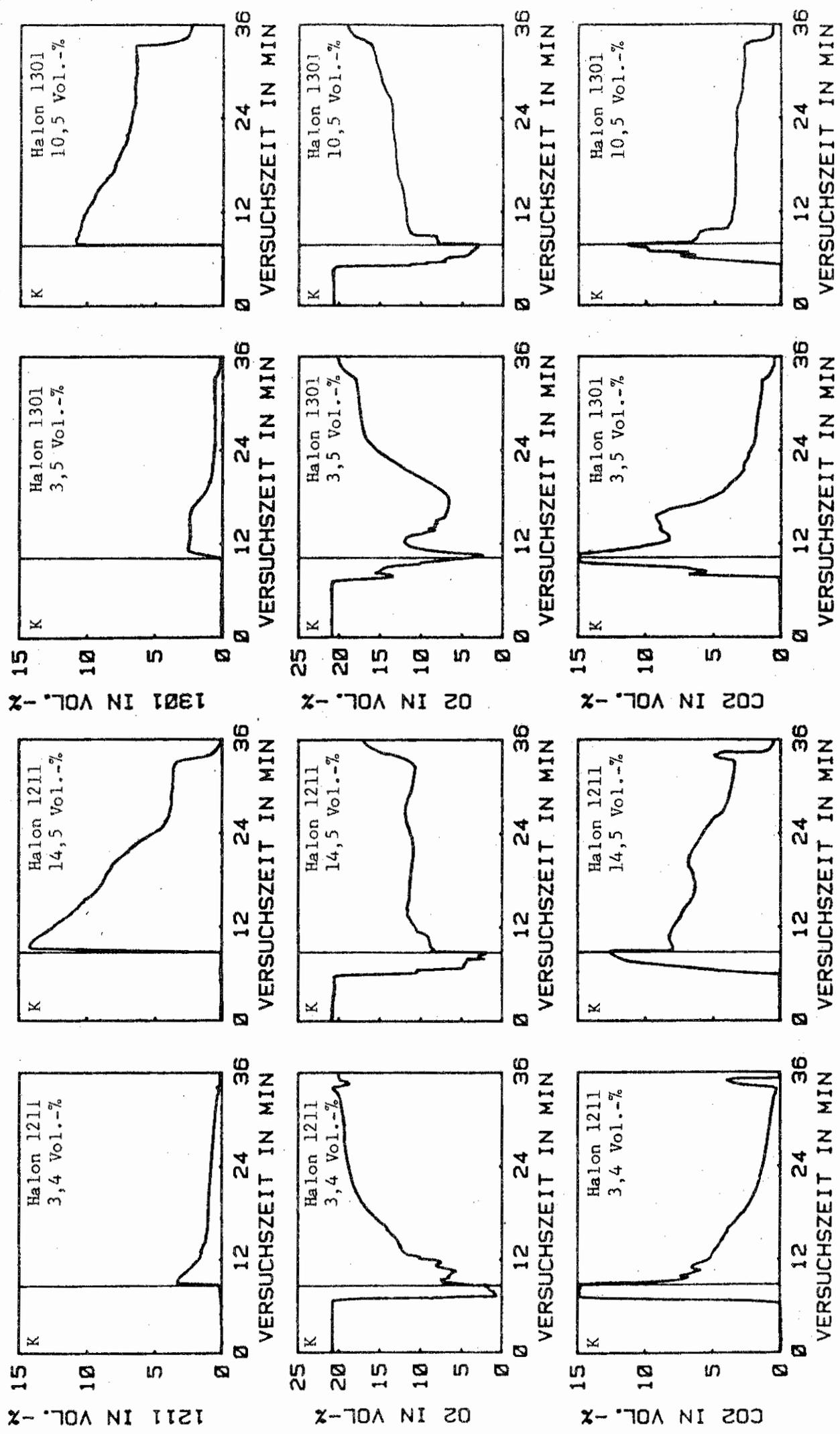


Bild 18. Verlauf der örtlichen Konzentration von Halon 1211, Halon 1301, O₂ und CO₂ in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Holz als Brandstoff.

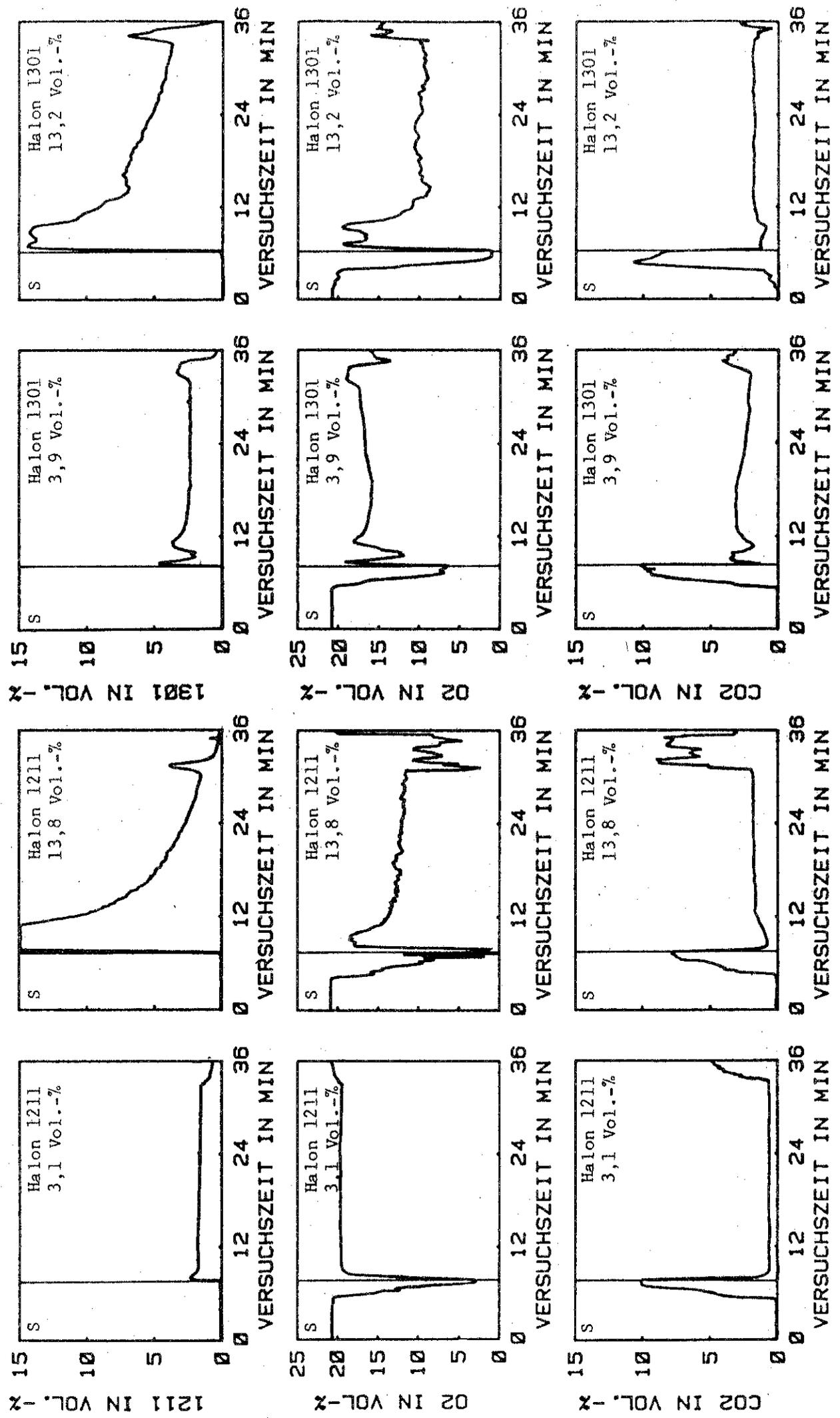


Bild 19. Verlauf der örtlichen Konzentration von Halon 1211, Halon 1301, O₂ und CO₂ in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Spiritus als Brandstoff.

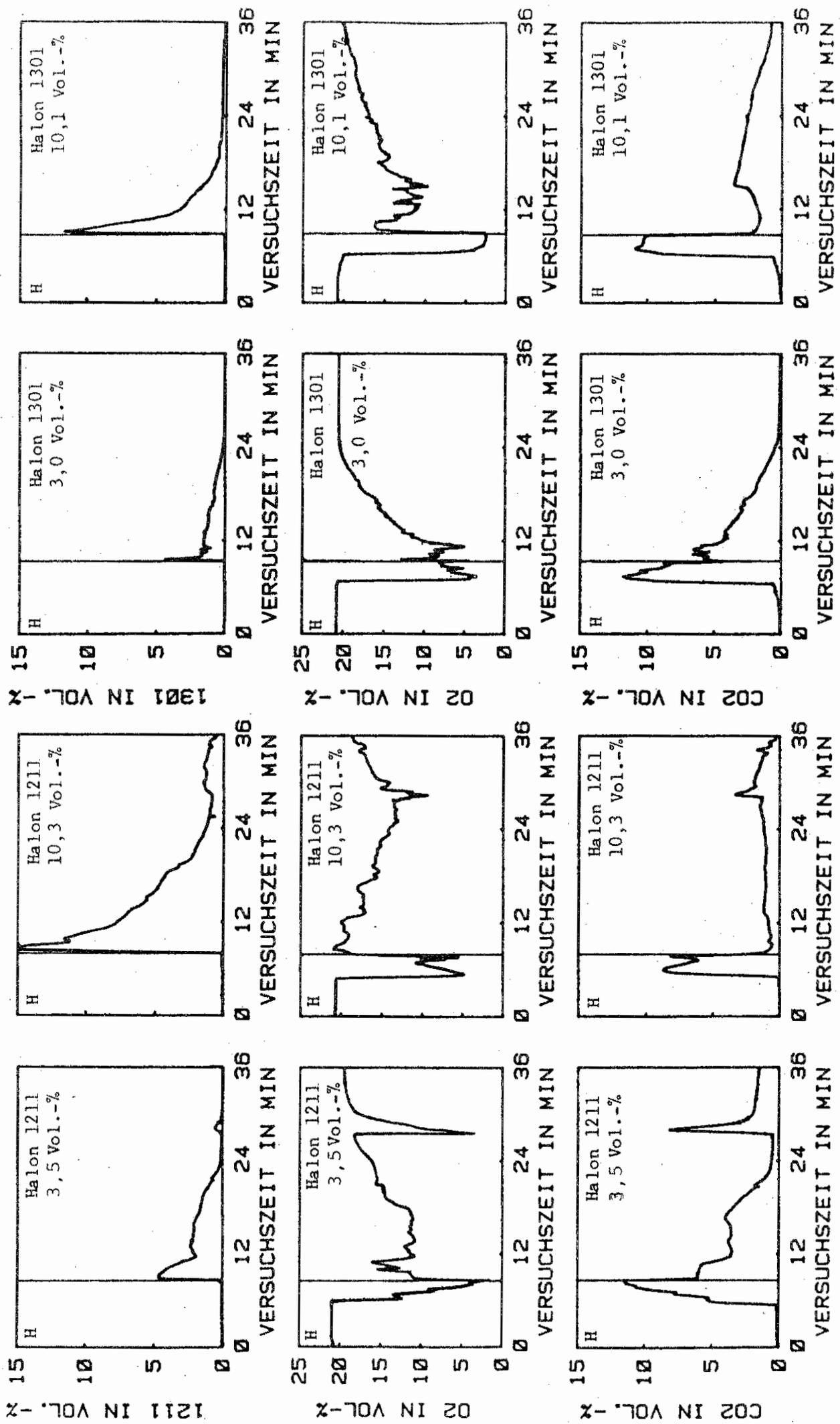


Bild 20. Verlauf der örtlichen Konzentration von Halon 1211, Halon 1301, O₂ und CO₂ in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Heizöl als Brandstoff.

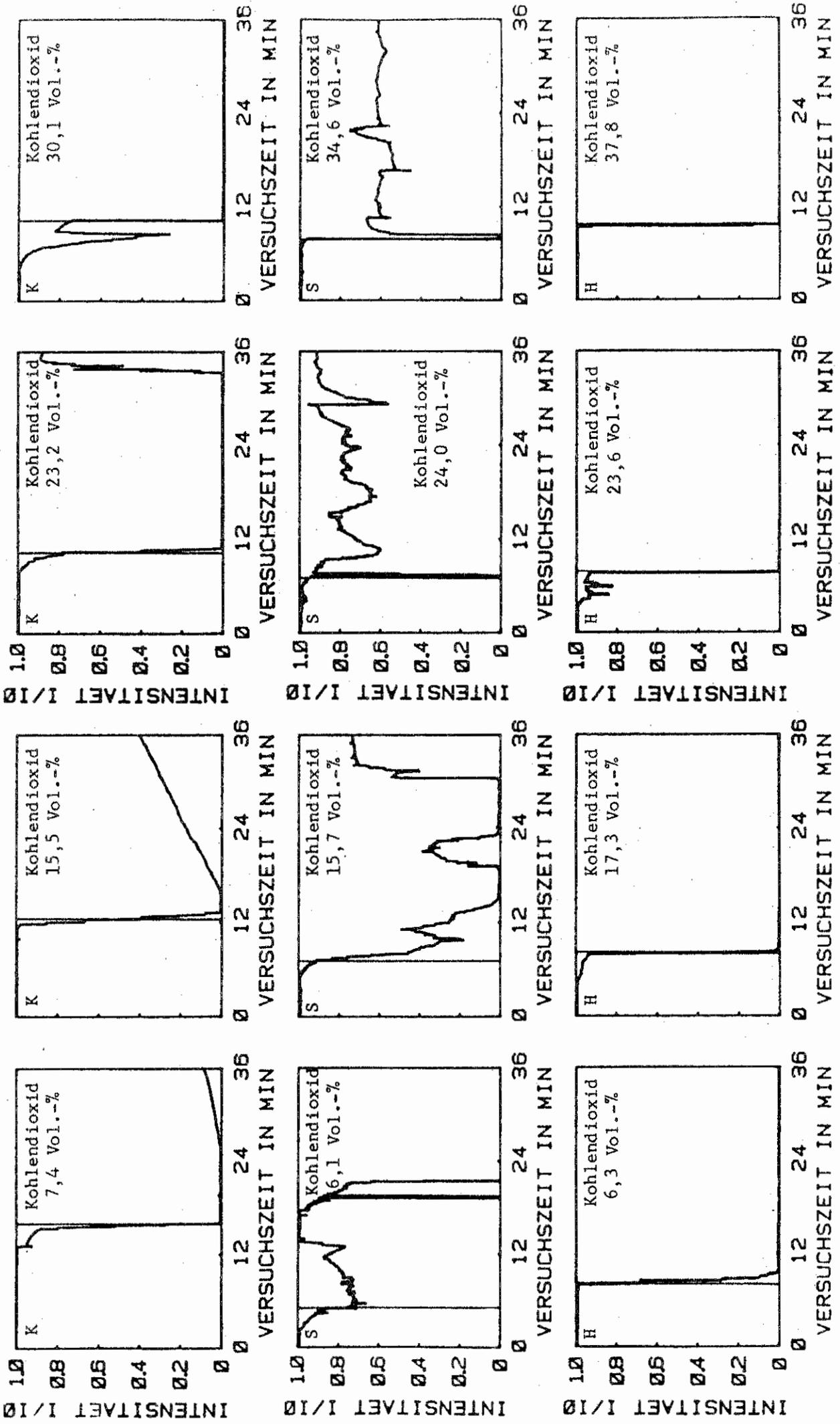


Bild 21. Verlauf der Beleuchtungsintensität I/I₀ in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Kohlendioxid als Löschmittel und Holz-, Spiritus und Heizöl als Brandstoff.

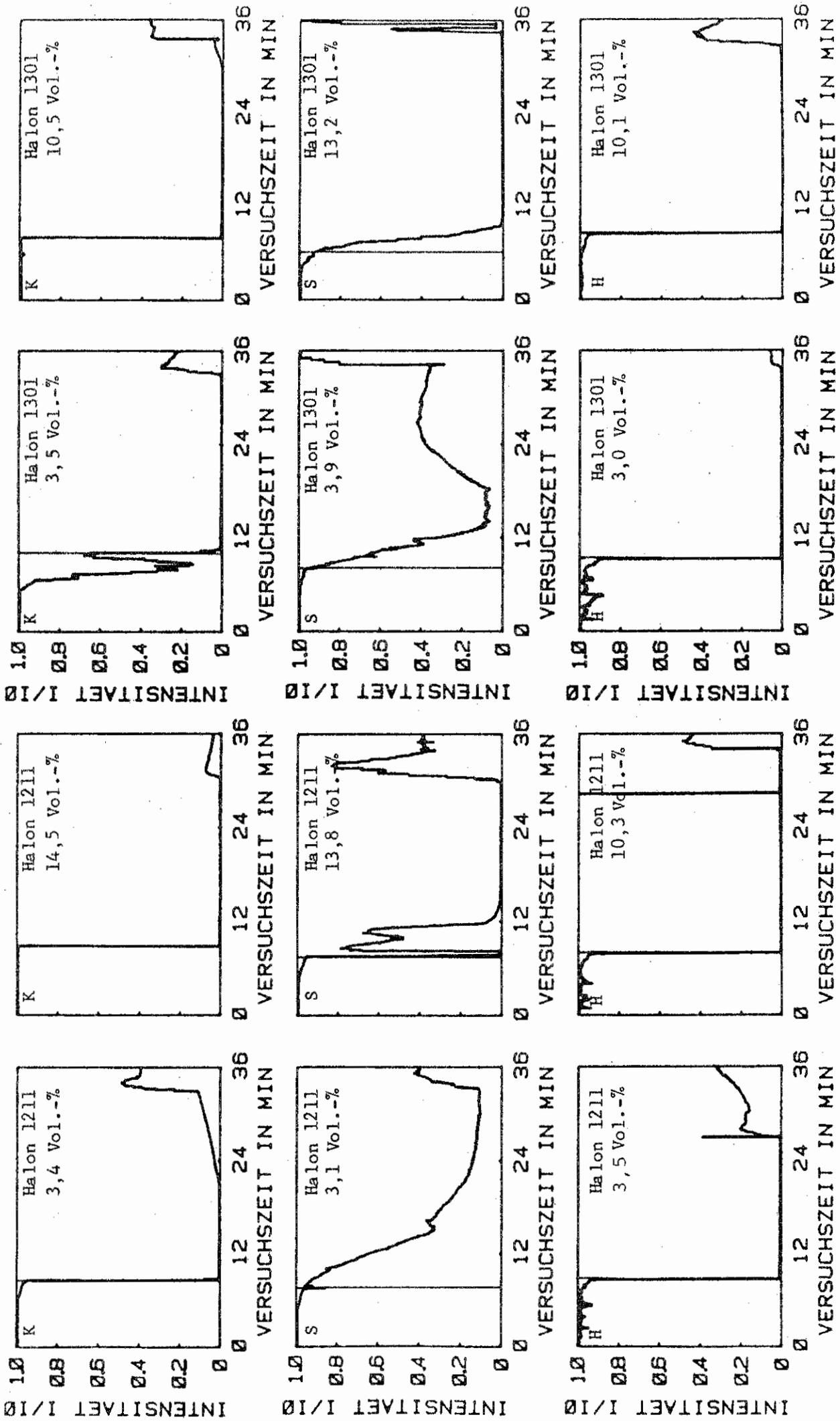


Bild 22. Verlauf der Beleuchtungsintensität I/I₀ in Abhängigkeit von der Versuchszeit beim Einsatz von Halon 1211 und Halon 1301 als Löschmittel und Holz, Spiritus und Heizöl als Brandstoff.