

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln  
in Räumen natürlicher Größe

Teil 1: Auswertung des in- und ausländischen Schrifttums  
über Untersuchungen mit Halon als Löschmittel

# 32

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

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

Forschungsbericht Nr. 32

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln  
in Räumen natürlicher Größe

Teil 1: Auswertung des in- und ausländischen Schrift-  
tums über Untersuchungen mit Halon als Lösch-  
mittel

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
Februar 1978

FA.Nr. 73 (3/76)

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. NOMENKLATUR DER HALOGENKOHLENWASSERSTOFFE	2
3. GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG	3
4. ANWENDUNG	4
5. CHEMISCHE UND PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN	6
6. LÖSCHWIRKUNG	8
7. TOXISCHE WIRKUNG	15
8. KORROSIONSV ERHALTEN	26
9. LABOR- UND PRAXISNAHE VERSUCHE	27
10. ZUSAMMENFASSUNG	40
11. LITERATURVERZEICHNIS	42
12. TABELLEN UND BILDER	59

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die Tendenz zur Errichtung immer größerer Gebäudekomplexe für Produktions- und Lagerzwecke sowie die Entwicklung von neuen, mit erhöhten Brandrisiken behafteten technologischen Verfahren und die zunehmende Verwendung brennbarer Materialien bei Bau- und Werkstoffen haben zweifelsohne zu einer Erhöhung der Brandrisiken und im Brandfall auch der Schadenshöhen geführt.

Während die Aufgabe des vorbeugenden Brandschutzes in einer Verringerung des Brandrisikos besteht, wie z.B. im Bausektor durch die Ausbildung von Brandabschnitten und Rettungswegen, durch die Auswahl geeigneter feuerwiderstandsfähiger Konstruktionselemente und durch die Verwendung schwer entflammbarer Baustoffe, hat der abwehrende Brandschutz die Aufgabe, Probleme der schnellen und sicheren Brandmeldung zu lösen sowie für den Brandfall geeignete Löschverfahren und Löschmittel vorzuhalten, um ein Optimum des Personen- und Objektschutzes zu erreichen.

Neben den Löschmitteln Wasser, Schaum, Trockenlöschpulver und Kohlendioxid wurden in den letzten Jahren immer häufiger Halogenkohlenwasserstoffe (Halone) als Löschmittel sowohl im zivilen als auch im militärischen Bereich eingesetzt, um Personen und Sachwerte zu schützen. Dabei muß gewährleistet sein, daß Personen vor der Einwirkung toxischer Brandgase und Zersetzungsprodukte der Halone geschützt werden.

Ein weiteres Problem beim Löschvorgang ist, eine mögliche Korrosion bei den Werkstoffen weitgehend zu verhindern, die sowohl mit dem Löschmittel selbst als auch mit Produkten der Reaktion zwischen Löschmittel und Brandgasen in Berührung kommen.

Die im vorliegenden Bericht durchgeführte Auswertung des in- und ausländischen Schrifttums über Halone in Bezug auf Per-

sonen- und Objektschutz soll einerseits die Fachwelt über den Stand des Wissens und der Technik auf diesem Gebiet unterrichten und andererseits der Forschungsstelle für Brandschutztechnik als Grundlage für ein Forschungsprogramm zur Klärung des Verhaltens von Halonen als Löschmittel anhand von Brand- und Löschversuchen in einem Raum natürlicher Größe dienen.

## 2. NOMENKLATUR DER HALOGENKOHLENWASSERSTOFFE

Die Kurzbezeichnung "Halon" (Zusammensetzung der Anfangs- und Endbuchstaben des englischen Gattungsbegriffs halogenated hydrocarbon, halogenierte Kohlenwasserstoffe) und der numerische Schlüssel zur Bezeichnung der chemischen Struktur wurden 1950 vom Corps of Engineers der US Army eingeführt (NFPA Bulletin No. 44, März 1950) [1, 2, 3, 4, 5]. Diese Kurzbezeichnung und Nomenklatur wird seitdem in der internationalen Fachliteratur allgemein verwendet. Jedes Halon wird dabei durch eine Zahl dargestellt. Von links nach rechts gelesen gibt

die erste Ziffer die Zahl der Kohlenstoffatome,  
die zweite Ziffer die Zahl der Fluoratome,  
die dritte Ziffer die Zahl der Chloratome  
die vierte Ziffer die Zahl der Bromatome und  
die fünfte Ziffer die Zahl der Jodatome an.

Ist eines dieser Elemente nicht im Halon enthalten, wird dies durch eine Null in der Zahl zum Ausdruck gebracht, wobei endständige Nullen fortfallen. Wasserstoffmoleküle werden nicht besonders gekennzeichnet.

Difluorchlorbrommethan wird z.B. als Halon 1211 beziffert, d.h. es setzt sich aus 1 Kohlenstoffatom, 2 Fluoratomen, 1 Chloratom und 1 Bromatom zusammen.

In vielen Veröffentlichungen wird noch eine ältere Bezeichnung der Halone verwendet, bei der die chemische Bezeichnung mit Buchstaben abgekürzt wird. Darüberhinaus gibt es noch eine Kurzbezeichnung für Kältemittel mit dem Buchstaben "R" (= Refrigerants) und mehrstelligen Ziffern, die auf einem anderen numerischen Schlüssel beruht, der in DIN 8962 erläutert ist. So sind beispielsweise Halon 1301 und BTM sowie das Kältemittel R 13 B 1 chemisch identische Substanzen.

In Tabelle 1 sind nach [6, 7] einige wichtige Halone mit ihrer chemischen Bezeichnung, chemischen Formel und Halonummer eingetragen. Außerdem ist die Buchstabenkurzform und auch diejenige der Kältemittel angegeben.

### 3. GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG

Seit fast 100 Jahren ist die Löschwirkung halogener Kohlenwasserstoffe bekannt [5, 8] und ihre Bedeutung als Löschmittel nimmt in den letzten Jahren immer mehr zu. Vor allem aber finden Halogenkohlenwasserstoffe mit Fluor bei Kältemitteln und Lösungsmitteln sowie als Treibgase für Aerosole und Schaumkunststoffe Verwendung. Demgegenüber dienen bromierte Halogenkohlenwasserstoffe meist als Feuerlöschmittel [1, 9].

Am Anfang der Entwicklung des Einsatzes von halogenierten Kohlenwasserstoffen als Löschmittel stand der Tetrachlorkohlenstoff, ein Substitutionsprodukt des Methans, dessen Chloratome im Laufe der Zeit wegen der hohen Toxizität von Tetrachlorkohlenstoff immer mehr durch Brom- und Fluoratome ersetzt wurden.

Die in Europa bereits bekannten Feuerlöscher mit Tetrachlorkohlenstoff kamen in den USA erst 1908 auf den Markt. Während des 2. Weltkrieges wurde in England und in den USA das Brom-

methan als Löschmittel eingesetzt [10], während in Deutschland das Chlorbrommethan als Löschmittel für die Luftwaffe weiterentwickelt wurde [12, 13]. Erste Veröffentlichungen über Tetrafluordibromäthan erschienen nach Rainaldi [11] im Jahre 1932. Aber erst nach dem 2. Weltkrieg wurde dieses Halon eingehend untersucht.

Die Untersuchungen über Halone wurden nach dem 2. Weltkrieg weitergeführt, da man die große Bedeutung der Halone als Löschmittel bei Bränden in Flugzeugen, in gepanzerten Fahrzeugen und in U-Booten erkannt hatte [2, 14, 15].

In der Bundesrepublik Deutschland ist seit 1964 die Verwendung von Tetrachlorkohlenstoff, seit ungefähr der gleichen Zeit der Einsatz von Brommethan und seit 1975 die Verwendung von Chlorbrommethan als Löschmittel verboten. Diese älteren Halone sind aufgrund ihrer toxischen Wirkungen, insbesondere in geschlossenen Räumen, zu gefährlich. Auf der Suche nach unschädlicheren aber möglichst schnell wirkenden Löschmitteln wurden Halone gefunden, die sich durch geringere Toxizität und gleichzeitig bessere Wirksamkeit auszeichnen, wie z.B. das Difluorchlorbrommethan, das Difluordibrommethan, das Trifluorbrommethan und das Tetrafluordibromäthan, um nur die wichtigsten zu nennen.

#### 4. ANWENDUNG

Die Ansichten über die Anwendung von Halonen als Löschmittel gehen weit auseinander. In Berichten über Halon 1211 [16, 17], Halon 1301 [18, 19, 20] und Halon 2402 [11] werden als Anwendungsgebiete die Brandklassen A, B und C genannt [21, 22, 23].

Nach der Europäischen Norm EN 2 [24] werden die Brandklassen wie folgt eingeteilt:

Klasse A: Brände fester Stoffe, hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Glutbildung verbrennen.

Klasse B: Brände von flüssigen oder flüssig werdenden Stoffen

Klasse C: Brände von Gasen

Klasse D: Brände von Metallen

Da Halone den elektrischen Strom nicht weiterleiten und auch keine Rückstände bilden, sind sie besonders für den Einsatz in elektrischen Anlagen geeignet.

Halone sind dagegen nicht geeignet bei Bränden der Brandklasse D, d.h. mit reaktionsfähigen Metallen wie Natrium, Kalium, Magnesium, Titan, Zirconium, Uran, Plutonium, sowie bei Bränden von Chemikalien, die ihren eigenen Sauerstoff enthalten wie Cellulosenitrate, Schießpulver usw.

In der Bundesrepublik Deutschland sind die Halone 1211 und 1301 für die Brandklassen B und C zugelassen. In Ländern wie den USA und der Schweiz sind dagegen auch Handfeuerlöscher für Brände der Klasse A anerkannt. Versuche von Höpfe [1] zeigten, daß mit einem nassen Halonstrahl Brände der Klasse A erfolgreich abgelöscht werden können. Halone sind also auch für Autobrände geeignet.

Nash [25] schlägt Halon 1211 und Halon 1301 besonders bei Schwelbränden vor. Rainaldi [11] empfiehlt Halon 2402 in Tropfen der Größe 0,6 mm bis 3 mm mit löslichen oder unlöslichen Treibgasen als Nebel im Brandraum zu versprühen.

In besonderem Maße sollten Halone jedoch dort eingesetzt werden, wo der Folgeschaden eines Brandes höher wäre als der Brandschaden selbst. Nicht zuletzt wird dabei an die sich in einem Raum befindenden Personen gedacht, die im Brandfall besonders geschützt werden müssen. Bei der Anwendung müssen verschiedene Faktoren wie Löschwirksamkeit, Toxizität und auch die Kostenfrage berücksichtigt werden. In mehreren Veröffentlichungen [4, 8, 12, 17, 19, 23, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] werden unter Hinweis auf die saubere und leichte

Anwendung sowie die gute Löschwirkung von Halonen nachfolgende Anwendungsgebiete aufgeführt, z.B. bei Bränden in Räumen die nicht verschmutzt werden dürfen, Museen, Bibliotheken, Banksafes, Sammlungen, Fernmelde- und TV-Zentralen, Computer-Anlagen, Generatoren, Motoren, Transformatoren und anderen elektrischen Einrichtungen, bei Kabelschächten, Gängen unter der Erde, Krankenhäusern, Haushalten, bei Satelliten-, Microwellen-, Pipeline-Pumpstationen und auch bei Autos, Schienenfahrzeugen, Flugzeugen aller Art, Panzern, U-Booten und Schiffen aller Art sowie bei Bohrtürmen, -inseln, chemischen Produktionsstätten und zur Explosionsunterdrückung.

In Europa und Australien wird nach Hammack [10] hauptsächlich Halon 1211 verwendet, sei es in ortsfesten Anlagen oder in tragbaren Löschern. Als Einsatzbereich für Halon 1202 werden hauptsächlich Flugzeuge genannt. Vor allem in den USA findet Halon 1301 bei Bränden der Klasse A und B Anwendung und als Einsatzgebiet von Halon 2402 anstelle von Schaum werden Brände von Erdölprodukten genannt.

## 5, CHEMISCHE UND PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Tabelle 2 zeigt chemische und physikalische Eigenschaften der wichtigsten Halone: 1001, 1011, 1202, 1211, 1301, 2402. Die Zahlenwerte wurden aus verschiedenen Veröffentlichungen zusammengestellt und bei unterschiedlichen Werten die am häufigsten vorkommenden angegeben [2, 5, 6, 7, 9, 14, 17, 18, 19, 21, 23 - 53, 129 ]. Weitere Eigenschaften wie z.B. Verdampfungswärme, Dichte bei anderen Temperaturen usw. können ebenfalls diesen Veröffentlichungen entnommen werden. Bild 1 zeigt den Dampfdruck als Funktion der Temperatur für fünf Halone [7].

Scheichl [2] beschreibt Brommethan (Halon 1001) als farbloses Gas mit schwachem Geruch. Chlormethan (Halon 101) dagegen ist eine schwere wasserhelle Flüssigkeit von charakteristischem Geruch. Halon 1011 wird in [54] als farblose, im Dunkeln unbegrenzt haltbare Flüssigkeit beschrieben, die sich nicht entmischt.

Halon 1211 ist nach [19] unter Normalbedingungen ein farbloses, geruchloses, bzw. nach [23] süßlich riechendes, elektrisch nichtleitendes Gas. Durch Kompression und Wärmeentzug ist es wegen seines Siedepunktes bei  $-4^{\circ}\text{C}$  leicht zu verflüssigen. Außerdem wird in [16, 17] Halon 1211 wegen seines hohen Fluorgehaltes als chemisch sehr stabil beschrieben. Weiterhin wird auf die Löslichkeit von Stickstoff und Kohlendioxid in Halon 1211 hingewiesen, die linear mit dem Druck steigt. So ist Halon 1211 auch in den meisten organischen Lösungsmitteln gut löslich [51]. Dazu gehören z.B. Alkohol, Ester, Äther, Aliphate, Aromate.

Halon 1301 ist ein farbloses, geruchloses, nach Scheichl [33] schwach riechendes, elektrisch nicht leitendes Gas, [8, 23, 44] das zur Aufbewahrung verflüssigt wird.

Scheichl [55] beschreibt flüssige Halone als vorzügliche Lösungsmittel für Harze, Fette und Wachse. Die Wasserlöslichkeit ist dagegen gering, es tritt eine Verseifung ein.

Generell ändern sich die Eigenschaften der Halone, wenn einzelne Halogenatome durch andere ersetzt werden. So trägt Fluor zur Stabilität des Moleküls bei und ist als inert zu betrachten. Brom erhöht dagegen die Löschwirksamkeit [10].

In [36] werden Bindungsenergien für Halogene mit Kohlenstoff und auch ihre Atomabstände angegeben. Diese sind in Tabelle 3 aufgeführt. Aus dieser Tabelle geht hervor, daß die Verbindung mit Fluor die größte Bindungsenergie besitzt und deshalb, wie schon erwähnt, die größte Stabilität aufweist.

## 6. LÖSCHWIRKUNG

Bei Bränden müssen die Löschmittel auf das vorhandene Brandrisiko bzw. auf die zu schützenden Materialien abgestimmt sein, da die Löschmittel in unterschiedlicher Weise in das Brandgeschehen eingreifen [2, 56, 57, 58, 59, 60, 61].

Es können drei Hauptlöscheffekte je nach Art des Brandes und des eingesetzten Löschmittels unterschieden werden:

1. der Kühleffekt, 2. der Stickeffekt und 3. der Inhibitionseffekt (antikatalytischer Effekt). Halone wirken im Gegensatz zu den anderen Löschmitteln hauptsächlich durch den Inhibitionseffekt auf einen Brand ein. Dabei haben die durch die Verbrennungswärme aus den Halonen abgespaltenen Halogene bzw. Radikale eine hemmende Wirkung auf den Verbrennungsvorgang, d.h. die Verbrennungsreaktionen werden eingeschränkt oder unterbrochen. Auf die verschiedenen dabei auftretenden Reaktionsmechanismen wird in [5, 13, 23, 34, 39, 42, 53, 62, 63, 64, 65] näher eingegangen. Aufgrund der auf dem Inhibitionseffekt beruhenden Löschwirksamkeit des Halons ist es um so löschwirksamer je leichter sich Halogene und Radikale aus dem Halonmolekül abspalten lassen.

Friedrich [28] stellte in Untersuchungen fest, daß die Löschwirksamkeit von Halogenverbindungen abhängig ist von der Menge des frei werdenden Halogens pro Zeiteinheit und von der Menge des pro Zeiteinheit auf den Brandherd auftreffenden Halons. Mit abnehmender Bindungsenergie nimmt die Löschwirksamkeit der Halone zu, da pro Zeiteinheit mehr löschaktive Halogenradikale freiwerden. Die Abnahme der Löschwirksamkeit mit der Zunahme der Bindungsenergie ist auch aus Tabelle 4 ersichtlich [5]. Friedrich weist auch die große Löschwirksamkeit von Halonen mit unterschiedlichen Halogenatomen wie z.B. Difluordibrommethan oder Difluorchlorbrommethan nach. Dies kann mit einer besonders leichten Abspaltbarkeit der Halogene erklärt werden, die Friedrich mit Hilfe

des Satzes von Rayleigh darauf zurückführt, daß durch die Einführung schwerer Halogenatome in das Halonmolekül alle Bindungen in ihm geschwächt werden.

Nach Leloup [34] nimmt die Löschwirksamkeit der Halogenkohlenwasserstoffe mit der Atommasse des Halogens und seiner Konzentration im Molekül zu. Dies wird deutlich, wenn man die Chlor- und Bromderivate des Methans vergleicht:  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CHCl}_3$  sind brennbar, während  $\text{CCl}_4$  ein Löschmittel ist. Die vier Verbindungen  $\text{CH}_3\text{Br}$ ,  $\text{CH}_2\text{Br}_2$ ,  $\text{CHBr}_3$  und  $\text{CBr}_4$  können durch die größere Atommasse des Halogens Brom sämtlich als Löschmittel angewendet werden.

In [28] wird nachgewiesen, daß Jodverbindungen die beste Löschwirkung besitzen, was auf die schwache chemische Bindung des Jods im Halon zurückzuführen ist, d.h. Jod wird in der Flamme am schnellsten abgespalten. Auch in [34] wird auf die Instabilität des Jods im Halon hingewiesen, wodurch eine bessere Wirkung als Löschmittel vermutet wird.

In [5] wird mit Hilfe der Thermodynamik nachgewiesen, daß Jodkohlenwasserstoffe den Chlorkohlenwasserstoffen als Löschmittel überlegen sind, da schon bei niedrigen Temperaturen ein Zerfall in Radikale erreicht wird und somit ihre Löschwirkung im Brandfall früher eintritt.

Auch Kučer [29] stellte fest, daß mit Kohlenstoff verbundenes Chlor bedeutend schwächer auf einen Brand einwirkt als Jod und Brom. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, daß der chemische Beitrag von Jod- und Brom-substituierten Kohlenwasserstoffen im Löschprozeß gegenüber dem thermischen Beitrag mehr als 3 mal so groß ist.

Scheichl weist in [2] ebenfalls darauf hin, daß die Beständigkeit des Halons beim Löschvorgang mit höher werdendem Fluor-gehalt im Molekül des betreffenden Halons zunimmt. Die Lösch-

fähigkeit selbst wird in erster Linie vom Bromgehalt im Molekül bestimmt.

Gross [14] gibt für die Halone 1011, 1211 und 1301 etwa die gleiche Löschwirksamkeit an, wobei der tiefliegende Siedepunkt bei Halon 1301 einen Nachteil gegenüber Halon 1211 bedeutet, da es immer als Dampf aus der Düse entweicht, während Halon 1211 je nach Düsenform und Treibgas noch in flüssiger Form auf den Brandherd gelangen kann, was sich in bezug auf die Treffsicherheit positiv auswirkt.

Darüberhinaus gibt Höppe [17] für Halon 2402 an, daß es wie alle Hochsieder nur als flüssiger Löschmittelstrahl ausgestoßen werden kann.

Nach Kleier [66] beruht die unterschiedliche Löschwirkung der Halone auf der unterschiedlichen Zerfallsgeschwindigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit der Radikale bei der Reaktion während des Löschvorganges.

Der Kühleffekt kann beim Einsatz dieser Löschmittel vernachlässigt werden, da die Verdampfungsenthalpie der Halone nur zwischen 167 kJ/kg und 251 kJ/kg liegt im Gegensatz zum Wasser, dessen Verdampfungsenthalpie 2257 kJ/kg beträgt. So gibt Scheichl [55] für Halon 104 eine Verdampfungsenthalpie von 193 kJ/kg, für Halon 1001 260 kJ/kg, für Halon 1202 121 kJ/kg und für Halon 1301 117 kJ/kg an. Graf [22] erwähnt die gleichen Werte für Halon 104 und Halon 1202 und gibt für Halon 1011 eine Verdampfungsenthalpie von 159 kJ/kg an.

Nach den NFPA-Richtlinien [23] und DIN 14270 [3] liegt die löschwirksame Konzentration von Halon 1211 und Halon 1301 je nach Brandstoff in der Größenordnung von 3 Vol.-% bis 10 Vol.-%. Wegen dieser verhältnismäßig geringen Konzentration bei der Anwendung dieser Löschmittel ist der Erstreckungseffekt ebenfalls auszuschalten.

Um die verschiedenartigen Brände löschen zu können, werden unterschiedliche Halonkonzentrationen benötigt. So erwähnt Hammack in [68], daß zum Löschen im Innern eines Transportflugzeuges eine Konzentration des Löschmittels Halon 1301 von 3 Vol.-% bis 5 Vol.-% bei Luftabschluß notwendig ist.

Höppe [69] hält in geschlossenen Räumen eine Halonkonzentration von 1 Vol.-% bis 5 Vol.-% je nach Brandlast für erforderlich. In [70] wird ebenfalls eine Konzentration von 5 Vol.-% zum Löschen offener Brände in geschlossenen Räumen vorgeschlagen, wogegen tiefer sitzende Brände auch mit einer Konzentration bis zu 7 Vol.-% nicht zu löschen sind.

Kleier [67] gibt an, daß die meisten Brandrisiken bei Raumflutung mit einer Konzentration von 4 Vol.-% bis 6 Vol.-% Halon 1211 oder Halon 1301 sicher beherrscht werden können.

In Tabelle 5 sind die löschwirksamen Konzentrationen einiger Halone nach Engibous und Torkelson [7] und nach [13] angegeben, wobei zum Vergleich der Wert für  $\text{CO}_2$  mit aufgeführt ist. In [5, 11, 22, 65] werden löschwirksame Konzentrationen weiterer Halonlöschmittel angegeben.

Bild 2 zeigt die Änderung der Zündgrenzen von n-Heptan bei Zusatz der Halone 1202, 1211, 1301 und 2402 in Abhängigkeit von der Löschmittelkonzentration nach [7] und [11]. Zündgrenzbereiche für weitere Brandstoffe befinden sich in [13, 71] und in qualitativer Form in [23, 40, 72].

In Bild 3 ist die löschwirksame Konzentration von Halon 1211 in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft für verschiedene Brennstoffe aufgetragen [73].

Untersuchungen zur Bestimmung der minimalen Löschkonzentration in Luft wurden hauptsächlich an 2 Brennern durchgeführt [13, 73, 74]. Bild 4 zeigt den "Halbkugel-Brenner", bei dem die Luft und das Löschmittel von unten durch eine Schicht aus Glaskugeln

geleitet werden und der gasförmige oder flüssige Brennstoff von oben durch ein Rohr auf eine am anderen Ende des Rohres befindliche Halbkugel aus Sintermetall gelangt.

Bild 5 zeigt den "Düsen-Brenner", bei dem sowohl der Brennstoff als auch das Luft/Löschmittel-Gemisch von unten zugeführt werden. Das Gemisch aus Luft und Löschmittel strömt im ersten Fall an der Brennstoffaustrittshalbkugel, im zweiten Fall an der Brennstoffaustrittsdüse vorbei. Beide Versuchsanordnungen sind von einem Glasmantel umgeben.

Tabelle 6 gibt die minimale löschwirksame Konzentration für Halon 1301 und Halon 1211 nach [13, 18, 23, 39, 43, 50] in Luft für verschiedene Brandstoffe wieder. Bemerkenswert ist vor allem die hohe erforderliche Halonkonzentration von 20 Vol.-% und mehr, um ein Wasserstoff/Luft-Gemisch zu löschen, was auf den großen Zündbereich dieses Brenngases zurückzuführen ist. Zum Teil davon abweichende Angaben und Angaben über minimale löschwirksame Konzentrationen für weitere Stoffe befinden sich auch noch in [7, 13, 39, 40, 45, 68, 75, 76].

Bei der Zersetzung der Halone muß unterschieden werden zwischen dem physiologischen Verhalten der unveränderten Halonmoleküle und dem der Pyrolyseprodukte.

Halone zerfallen bei Berührung mit Flammen und Oberflächen mit mehr als 480 °C. Mit dem Wasserstoff, der bei den Verbrennungsreaktionen entsteht, werden Zersetzungsprodukte wie Halogensäuren (HF, HCl, HBr), freie Halogene (F<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub>) und Kohlenstoffhalogenide (COF<sub>2</sub>, COCl<sub>2</sub>, COBr<sub>2</sub>) gebildet [1, 12, 19]. Zersetzungsprodukte der Halone sind schon bei sehr geringen Mengen im ppm-Bereich geruchlich wahrnehmbar. Sie werden in Ausnahmesituationen für kurzzeitige Belastung trotz Überschreitung des MAK-Wertes toleriert [1]. Die Menge der Zerfallsprodukte hängt von der Größe des Brandes, der Brandtemperatur, der Konzentration des Halons und der Löschzeit ab.

Engibous und Torkelson [7] zeigen in einem Diagramm (s. Bild 6) die thermische Zersetzung von 5 Halonen (1011, 1202, 1211, 1301, 2402) auf. Die Kontaktzeit beträgt 2 Sekunden. Besonders deutlich ist der schon bei einer Temperatur von ca. 330 °C einsetzende Zerfall von Halon 1202. Die Zersetzung von Halon 1301 beginnt dagegen erst bei einer Temperatur von ca. 550 °C. Aufgrund dieses Bildes kann der Einsatzbereich der Halone in Abhängigkeit von dem zu erwartenden Brandrisiko entschieden werden.

Kern [42] führte Pyrolyseversuche mit vier Halonen durch. Für die Pyrolyse unter Luftabschluß seien hier einige wichtige Temperaturen wiedergegeben. Chlorbrommethan (Halon 1011) zerfällt oberhalb 400 °C rasch und ist bei 800 °C quantitativ zersetzt. Die Zersetzung von Difluorchlorbrommethan (Halon 1211) beginnt bei ca. 450 °C, bis ca. 650 °C entweicht nur Brom, ab 650 °C tritt Chlor auf und fester Kohlenstoff scheidet sich ab. Von ca. 850 °C an ist auch Fluor unter den Zersetzungsprodukten zu finden. Bei Difluordibrommethan (Halon 1202) beginnt die Zersetzung bereits bei 400 °C, was auf eine leichtere Abspaltbarkeit des Bromatoms hinweist. Trifluorbrommethan (Halon 1301) ist das stabilste Halon, da der Zerfall erst ab ca. 550 °C beginnt. Fluor und Kohlenstoff werden erst ab 900 °C abgeschieden. Einzelheiten über die Pyrolyse mit Sauerstoff, in reduzierender Atmosphäre, in Kontakt mit Metall und in Flammen können der Veröffentlichung entnommen werden.

Die Temperaturabhängigkeit der Halonzersetzung wird auch von Sylvia [77] erwähnt. Bei einer Temperatur von 400 °C wird Halon 2402 zu 7 % und bei einer Temperatur von 800 °C zu 100 % zersetzt.

Gross [14] gibt bei der Berührung von Halon 1011 mit einer Metalloberfläche bei einer Temperatur über 450 °C lediglich eine geringe Phosgenbildung ( $\text{COCl}_2$ ) an.

Kleier [67] befaßte sich mit der Abhängigkeit der Zersetzung von Halon 1211 von der Brandtemperatur und dem Flammenvolumen. Er stellte fest, daß sich bei einer Temperatur von 450 °C Brom abspaltet; ab 650 °C wird Chlor und ab 850 °C wird Fluor gebildet. Daraus ist die hohe thermische Stabilität des Fluors zu erkennen.

In einem weiteren Bericht [41] wird angegeben, daß Halon 1011 erst ab einer Temperatur über 600 °C in Kohlenstoff (Ruß), HCl und HBr zerfällt. Bei Halon 1211 treten bei einer Temperatur über 700 °C Brom und Chlor als Spaltprodukte auf; außerdem werden höhere Halogenkohlenwasserstoffe gebildet. Bei Halon 1301 wird bei einer Temperatur über 800 °C Brom abgespalten, wobei sich Hexafluoräthan bildet.

Jensen [20] gibt für Halon 1301 eine Zerfallstemperatur von 410 °C an, wobei die Zersetzungsprodukte HF und HBr entstehen. Dagegen gibt Cholin [78] für Halon 1301 eine Zerfallstemperatur von 480 °C an.

Reinhold [79] macht Angaben über die im Mittel auftretenden Zersetzungsprodukte HF + HBr + HCl, wenn eine Konzentration von 5 Vol.-% Halon pyrolysiert wird. Bei Halon 1211 entstehen 7 ppm, bei Halon 1301 6 ppm und bei Halon 2402 24 ppm dieser Zersetzungsprodukte.

In der aus einer Veröffentlichung von Höppe [1] entnommenen Tabelle 7, die sich auf die MAK-Liste 1976 bezieht, sind physiologische Effekte von Halonen und ihren Brandfolgeprodukten eingetragen (Human-Werte). Den Angaben werden Ergebnisse aus Untersuchungen mit Halon 1211 und Halon 1301 gegenübergestellt.

## 7. TOXISCHE WIRKUNG

Im Gegensatz zu den schon seit längerem bekannten Halonen tritt bei den neuerdings als Löschmittel verwendeten Halonen eine wesentlich geringere Vergiftungsgefahr auf. Eine Gefährdung von Personen infolge von Pyrolyseprodukten des Brandes selbst, wie z.B. CO und CO<sub>2</sub>, ist weitaus wahrscheinlicher als die, die bei einer kurzen Löschzeit durch die geringe Pyrolyse des eingesetzten Halons entsteht.

In [80] wird ebenfalls die schnelle Entdeckung und Löschung eines Brandes mit z.B. Halon 1301 als Löschmittel als Voraussetzung dafür angesehen, daß keine hohen Brandtemperaturen erreicht werden und somit auch nur sehr geringe Mengen an giftigen Zersetzungsprodukten entstehen. Bei kurzer Einwirkungsdauer stellen thermische Zersetzungsprodukte des Halons fast kein Risiko für Personen dar. Eine Analyse zeigte, daß die HF-Konzentration und die Konzentration der freien Halogene beim Löschvorgang nur kurzzeitig bis auf 300 ppm anstieg, was zwar eine Reizung von Haut und Schleimhäuten verursacht, aber keine lebensgefährliche Bedrohung für Personen darstellt.

Auch in [2, 3, 20, 41, 79] wird die toxische Wirkung der Zersetzungsprodukte von Halonen erwähnt. Höpfe [1] sieht Halon 1301 als ein praktisch ungiftiges Gas an, wenn es als Löschmittel in Konzentrationen nicht über 5 Vol.-% angewendet wird. In einem Raum mit einer derartigen Halonkonzentration ist ein kurzzeitiger Aufenthalt noch möglich. Nach einem Brand mit Verqualmung muß jedoch in jedem Falle gelüftet werden. Die DIN 14406 [81] schreibt deshalb die folgende Kennzeichnung nicht nur für Kohlendioxid -, sondern auch für Halon - Löscher vor: Vorsicht bei Verwendung in engen, schlecht belüfteten Räumen (gesundheitsschädliche Gase).

In [18, 70, 82] finden sich Hinweise auf die geringe Toxizität der Halone 1211 und 1301. Nach den NFPA - Richtlinien [23]

bestehen für die Anwendung von Halon 1301 als Löschmittel bis zu 7 Vol.-% in mit Personen besetzten Räumen keine Einschränkungen. Eine Anwendung zwischen 7 Vol.-% und 10 Vol.-% Halon sollte nur erfolgen, wenn die Räumung eines mit Personen besetzten Raumes innerhalb einer Minute erfolgen kann. Bei Halonkonzentrationen von 10 Vol.-% bis 15 Vol.-% Halon sollte der Raum sofort verlassen und bei einer Konzentration von mehr als 15 Vol.-% Halon müssen für Personen besondere Schutzmaßnahmen getroffen werden. Für Halon 1211 wird gefordert, daß im Brandfall der Einsatz dieses Löschmittels nur in Frage kommt, wenn die betreffenden Räume in weniger als 30 Sekunden von Personen verlassen werden können. Halon setzt im normalen Anwendungsbereich die Sauerstoffkonzentration nicht unter Maß herab und stellt somit keine ernsthafte Gefährdung von Personen dar [80]. Es wird deshalb als ein außerordentlich sicheres Löschmittel bezeichnet, das bis zu einer Konzentration von 10 Vol.-% keine gesundheitsschädigenden Auswirkungen verursacht. Bei einer Konzentration über 10 Vol.-% ist jedoch beim Menschen mit Beschwerden zu rechnen [8].

Scheichl [2, 33] weist auf Untersuchungen hin, wonach beim Einsatz von Halon 1011 eine Konzentration von 6,5 Vol.-% bereits nach 15 Minuten zum Tode führt. Dagegen seien durch Pyrolyseprodukte des Halons 1011 noch keine Schädigungen aufgetreten.

In [7, 47, 48] wird auf die hohe Giftigkeit von Halon 104 und Halon 1001 hingewiesen; Halon 1011 besitzt narkotische Wirkungen [54], Halon 1202 greift das Zentralnervensystem an. Halon 1301 wird dagegen als praktisch ungiftig beschrieben.

Graf [22] bezeichnet die toxische Wirkung der Halone als absolut relativ. Sie besteht aus mehreren Faktoren:

a) der feststellbaren relativen Schädlichkeit des Mittels (S)

- b) der subjektiven Widerstandsfähigkeit des Betroffenen (W)
- c) der schädlichen Konzentration (C)
- d) der Einwirkungsdauer (T)
- e) des Verhältnisses der subjektiven, physiologischen Reizschwelle zur letalen Dosis (Reizwirkung - Abwehr) (R)

Die Vergiftungsmöglichkeit (V) eines Organismus durch Einwirkung eines beliebigen Mittels kann nach Graf durch die Beziehung:

$$V = \frac{S \cdot C \cdot T}{W \cdot R}$$

dargestellt werden. Diese Beziehung zeigt, daß die relative Giftigkeit allein kein Kriterium für die Gefährlichkeit eines Mittels ist. Außerdem ist auch die Regenerationsgrenze eines Betroffenen zu beachten.

Im folgenden wird auf Untersuchungen eingegangen, die sich mit der toxikologischen Wirkung der Halone auf Tiere befassen. Die Tierversuche sollen helfen, evtl. Gefahren durch Halone oder deren Zersetzungsprodukte für Lebewesen frühzeitig zu erkennen, um im Brandfall Menschen vor lebensbedrohenden Stoffen schützen zu können.

Von Gross [14] werden Untersuchungen an Tieren mit verschiedenen Halonen beschrieben. Injektionen von Halon 1011 rief z.B. bei weißen Mäusen Mattigkeit hervor; Spätschädigungen traten jedoch nicht auf. Hautversuche am Kaninchenohr zeigten gewisse Reizwirkungen. Inhalationsversuche mit Katzen, Kaninchen und Meerschweinchen verliefen mit dem Ergebnis, daß bei einer Versuchsdauer von 1 Stunde und einer Halonkonzentration bis zu 50 mg/l Luft alle Tiere den Versuch überstanden. Bei einer Halonkonzentration von 110 mg/l Luft und einer Einwirkungsdauer von 1 Stunde trat entweder Narkose oder Tod ein und auch bei einer Versuchsdauer von 6 bzw. 8 Stunden und einer Halonkonzentration von 45 mg/l Luft überlebte keines der Versuchstiere.

Wie die Darstellung der Toxizität verschiedener Halone und Kohlendioxid auf Bild 7 nach [7, 14] zeigt, nimmt die gesundheitlich zulässige Konzentration an Halonen mit zunehmender Inhalationsdauer ab. Für die Kurven werden Konzentrationswerte verwendet, die bei Meerschweinchen, Ratten und Guinea-Schweinen bei der zugehörigen Inhalationsdauer gerade noch nicht tödlich wirken.

Halon 1211 wurde mit einer Konzentration von 324000 ppm an Ratten getestet. 6 Minuten nach der 15 minütigen Expositionszeit gingen alle Tiere ein. Bei der Zersetzung des Halons bei einer Temperatur von 800 °C stieg die Konzentration des pyrolysierten Dampfes auf 7650 ppm an, was zum Tode der Versuchstiere bereits bei Versuchsende führte (s.auch Tabelle 9). Dieses Ergebnis macht deutlich, daß beim Einsatz von Halon möglichst wenig Pyrolyseprodukte entstehen sollten, d.h. der Brand sollte so schnell gelöscht sein, daß eine Zersetzung bei höheren Temperaturen nicht auftritt.

Torkelson, Oyen und Rowe erwähnen in [48] für Halon 1011 für Mäuse eine tödliche Dosis von 4,3 g/kg und für Ratten eine tödliche Dosis von 7 g/kg.

Versuche an Albinoratten und Meerschweinchen mit Halon 1301 in einer Konzentration von 40 Vol.-% und 60 Vol.-% über einen Zeitraum von 2 Stunden erbrachten keinerlei Schädigungen der Tiere. Ebenso günstig verliefen Langzeitversuche, wobei die Gesamtinhalationszeit 70 Stunden betrug. Scholz und Weigand [38], die diese Untersuchungen durchführten, stellten auch bei Ratten, Meerschweinchen, Hunden und Katzen praktisch keine Schädigungen fest.

Ford [39] berichtet von nicht näher bezeichneten Tierversuchen mit einer Konzentration von 50 Vol.-% Halon 1301, die ebenfalls von den Tieren überlebt wurde.

Weigand [83] beobachtete jedoch bei Inhalationsversuchen mit einer Konzentration von 60 Vol.-% Halon 1211 Auswirkungen auf die in [38] bereits genannten Tiere, nämlich Ratten, Meerschweinchen, Hunde und Katzen, die teilweise zum Tod führten. Untersuchungen mit einer längeren Inhalationszeit bei einer Konzentration von 5 Vol.-% Halon 1211 führten zu kurzzeitigen Verhaltensstörungen, die nach 14 Tagen wieder verschwanden. Auch nach längerer Einatmung von 20 Vol.-% Halon 1301 war keine organschädigende Wirkung zu erkennen.

In [80, 84] wird von Inhalationsversuchen an Tieren mit Halon 1301 berichtet. Die Einatmungsdauer betrug 5 Minuten. Bei Hunden trat bei einer Konzentration von 5 Vol.-% bis 10 Vol.-% eine unregelmäßige Herzfunktion auf, jedoch nur wenn Adrenalin im Blut vorhanden war. Ansonsten konnte wie bei Albinoratten, die sogar eine Konzentration von 83,4 Vol.-% Halon 1301 bei einer Einwirkungszeit von 15 Minuten überstanden, keine nachteiligen Wirkungen festgestellt werden. Nach einer Expositionszeit von 2 Stunden konnte bei Affen, Kaninchen, Meerschweinchen und Ratten, die zwischen 10 Vol.-% und 20 Vol.-% Halon 1301 eingeatmet hatten, lediglich Sehstörungen und Rastlosigkeit festgestellt werden; Todesfälle traten nicht auf.

In [85] wird auf Untersuchungen verwiesen, die mit nicht näher bezeichneten Tieren und Halonkonzentrationen durchgeführt wurden. Als Löschmittel wurden dabei Halon 1211 und Halon 1301 verwendet.

Untersuchungen an Tieren wurden von Engibous und Torkelson [7] an Ratten und Guinea-Schweinen durchgeführt, wobei die Halone 104, 1011 1202, 1211, 1301 und 2402 verwendet wurden. Während einer Testreihe wurden die zu inhalierenden Halonkonzentrationen und die Expositionszeiten variiert. Größere organschädigende Wirkungen riefen lediglich Halon 104,

Halon 1011 und Halon 1202 hervor, während bei Halon 1211, Halon 1301 und Halon 2402 keine nennenswerten Schäden auftraten. Meerschweinchen überlebten sogar Inhalationsversuche bei einer Konzentration von 37 Vol.-% Halon 1301.

Eickstedt, Panksch und Höppe [35] beschreiben sehr ausführlich tierexperimentelle Untersuchungen mit den Halonen 1202, 1211 und 2402, die zu dem Ergebnis führten, daß bei den untersuchten Versuchstieren (Ratten, Katzen) die Konzentrationen, die toxische Symptome auslösten, bei Halon 1211 höher lagen als bei Halon 2402. Mischungen von Halon 1202 und Halon 1211 erhöhte ebenfalls die toxische Wirkung auf die Versuchstiere.

McHale [86] berichtet von Studien an Ratten, Guinea-Schweinen und Hunden. Unter anderem testete er Halon 1301, das ernste Herzstörungen verursachte, als die Versuchstiere den beim Löschen eines Aceton-Brandes entstehenden Dämpfen ausgesetzt wurden.

Die Underwriters Laboratories führten tierexperimentelle Untersuchungen mit dem Ziel durch, die vergleichswisen Lebensgefahren verschiedener Chemikalien zu klassifizieren [7, 19, 23, 45, 63]. Wie diese Klassifizierung in Tabelle 8 erkennen läßt, ist Halon 1301 ein Löschmittel mit der geringsten Giftwirkung. Tetrafluordibromäthan (Halon 2402) wird nach [8, 20] nicht in Gruppe 4, sondern in Gruppe 5 eingereiht. Tetrachlorkohlenstoff wird von [7] auch in die Gruppe 2 eingeordnet.

Die vom US Army Chemical Center für die Toxizität verschiedener Halone ermittelten Werte werden in zahlreichen Veröffentlichungen übernommen oder ergänzt. Diese mit ALC (angenäherte letale Konzentration, approximate lethal concentration) bezeichneten Werte wurden aus Tests ermittelt,

bei denen weiße Ratten 15 Minuten lang verschiedenen Halonen ausgesetzt wurden. Die Halone wurden sowohl in ihrem natürlichen Dampfzustand als auch in Form von Dämpfen, die durch thermische Zersetzung in einem eisernen Rohr bei 800 °C erhalten wurden, untersucht.

Tabelle 9 gibt ALC-Werte aus verschiedenen Veröffentlichungen [2, 5, 7, 11, 14, 16, 21, 22, 31, 32, 37, 38, 39, 41, 50, 55, 59, 63, 70, 87, 88, 89, 90, 129] von einigen Halonen und Kohlendioxid wieder.

Gross [14] sieht beim Löschmittel Halon 1211 bei einer Konzentration von 200 000 ppm noch keine Gefahr durch die Halondämpfe drohen, während bei einer Konzentration von 300 000 ppm und einer Einwirkdauer der Dämpfe von 15 Minuten die Auswirkungen tödlich sind.

Klinkmüller [91] gibt für die Konzentration an Dämpfen von Halon 104, die nach einer halben Stunde tödlich wirkt, einen Wert von 50 000 ppm an.

Gross und Baumann [57] berichten über Untersuchungen mit Halon 1011 an weißen Mäusen bzw. Ratten. Die mittlere letale Dosis wurde bei den Mäusen nach einer Beobachtungszeit von 8 Stunden zu 2994 ppm und bei den Ratten nach einer Beobachtungszeit von 3 Stunden zu 40 000 ppm festgestellt.

Sylvia [77] erwähnt tierexperimentelle Versuche mit Halon 1211. Die ALC-Werte für Ratten lagen bei einer Einwirkungsdauer von 30 Minuten bei einer Halonkonzentration von 23 Vol.-% und bei einer Einwirkungsdauer von 15 Minuten bei einer Halonkonzentration von 30 Vol.-%. Bei Guinea-Schweinen lagen die ALC-Werte bei einer Expositionszeit von 15 bis 30 Minuten bei der niedrigeren Halonkonzentration von 23 Vol.-%.

In Tabelle 10 sind die ALC-Werte aus verschiedenen Veröffentlichungen [11, 18, 23, 39, 63] für einzelne Pyrolyseprodukte von Halonen zusammengestellt. Besonders auffällig sind die stark differierenden ALC-Werte bei Bromwasserstoff.

Im Gegensatz zu Tierversuchen, die unbeschränkt durchgeführt werden können, ist man bei Untersuchungen mit Beteiligung von Personen auf Freiwillige angewiesen.

Höppe [1] weist darauf hin, daß bei Untersuchungen mit Halon 1211 noch kein Fall bekannt wurde, bei dem durch Ansprühen eine Person zu Schaden gekommen ist. Ebenso kann die Schädlichkeit der Einwirkung von pyrolysiertem Halon auf Wunden negativ beschieden werden.

In [92] wurden Personen einem Halon 1211/Luft-Strom von 10 l/min mit einer nicht näher bezeichneten Halonkonzentration ausgesetzt, wobei nach dem Einatmen Unkonzentriertheit und Schwindelgefühl auftraten. Die schädigenden Wirkungen konnten durch das Einatmen frischer Luft wieder schnell beseitigt werden.

Sylvia erwähnt in seinem Bericht über das Symposium an der National Academy of Sciences in Washington [77], daß Clark Untersuchungen durchführte, in deren Verlauf nach der Einwirkung von Halon 1211 auf Personen ihre inneren Organe genau untersucht wurden. Als Ergebnis wurde festgestellt, daß bei einer Halonkonzentration von 4 Vol.-% bis 5 Vol.-% noch keine Schädigungen auftraten, daß jedoch nach einer Einwirkungszeit von 1 Minute starkes Schwindelgefühl und nach einigen Minuten Herzflimmern auftrat. Nach längerer Einwirkungszeit wird das Herz direkt angegriffen.

In [80] wird auf Untersuchungen über die Auswirkungen von Halon 1301 auf Menschen hingewiesen, die durch das Einatmen

giftiger Zersetzungsprodukte dieses Halons auftraten. Dabei wurde festgestellt, daß bis zu einer Halonkonzentration von 5 Vol.-% und einer Einwirkdauer von 3 1/2 Minuten keine Beeinträchtigung der Körperfunktion und der Ansprechbarkeit auftraten. Bei einer Halonkonzentration von 7 Vol.-% bis 10 Vol.-% entwickelte sich ein Gefühl der Beschwingtheit; Kopfschmerzen und Konzentrationsschwierigkeiten traten auf. Diese Untersuchungen zeigten, daß bis zu einer Konzentration von 7 Vol.-% die Wirkung des Halons 1301 erträglich bleibt, während bei einer Halonkonzentration von 10 Vol.-% bei längerer Einwirkung das Risiko der Bewußtlosigkeit hinzukommt. Weiterhin wird bei Menschen eine Konzentration bis zu 6 Vol.-% Halon 1301 in geschlossenen Räumen für unbedenklich gehalten. Zum gleichen Ergebnis kommt das Research-Council Advisory Center: Personen können ohne merkliches Risiko maximal 5 Minuten lang bis zu 6 Vol.-% Halon 1301 ausgesetzt werden.

Nach [19] traten bei einer Einwirkdauer von 5 Minuten bei einer Konzentration von 7 Vol.-% Halon 1301, wenn überhaupt, nur ganz geringe Schädigungen des Zentralnervensystems auf. Bei einer Einwirkdauer von mehreren Minuten und einer Halonkonzentration bis zu 10 Vol.-% machten sich Schwindelgefühl und Konzentrationsschwierigkeiten bemerkbar. Diese Symptome traten bei einer Einwirkdauer unter 1 Minute nicht auf. Bei einer Konzentration von 10 Vol.-% Halon 1301 und mehr wurden obige Erscheinungen stärker. Sie können bei einer Einwirkdauer von mehr als 1 Minute lähmend wirken. Konzentrationen bis zu 20 Vol.-% rufen nach längerer Einwirkungszeit Bewußtlosigkeit mit damit verbundener Lebensgefahr hervor. Bei einem Einsatz von Halon 1301 im Brandfall bedeutet dies, daß sich bei Konzentrationen unter 7 Vol.-% Menschen nicht länger als 4 bis 5 Minuten, bei mehr als 7 Vol.-% möglichst überhaupt nicht in dem betreffenden Raum aufhalten sollten.

Außerdem wurde festgestellt, daß selbst bei Einatmung einer Konzentration von 15 Vol.-% Halon 1301 in den ersten 30 Sekunden noch keinerlei Auswirkungen zu erkennen waren; diese zeigten sich erst nach der Absorption des Halons im Körper.

In [79, 93] werden Inhalationsversuche mit 2 Freiwilligen erwähnt, bei denen nach dem Einatmen von 4,1 Vol.-% Halon 1211 nach 2 bzw. 3 Minuten keine Veränderungen der Hirn- und der Herzströme auftraten.

Thorne [46] gibt einige durch Halone bei Menschen hervorgerufene Erscheinungen an. Zunächst werden nur leichte Beschwerden bemerkt, dann treten Benommenheit und Konzentrationsmangel auf, später Erregtheit, Konzentrationsverlust, Bewußtseinsstörungen und anschließend Lähmung des Atemzentrums mit Todesfolge. Als narkotische Konzentrationen gibt er für Halon 1211 eine Konzentration von 5 Vol.-% und für Halon 1301 eine Konzentration von 7,5 Vol.-% an.

Scholz und Weigand [38] fanden auch in der Praxis bestätigt, daß Halon 1301 praktisch ungiftig ist. Ebenso wie die chronischen Inhalationsversuche bei Tieren keine pathologischen Veränderungen hervorriefen, wurden auch bei den Beschäftigten in den Produktions- und Abfüllbetrieben, bei welchen mit einer Dauereinwirkung kleiner Halonmengen gerechnet werden muß, niemals diesbezügliche Schädigungen beobachtet. Bei der genauen Untersuchung von ca. 30 Personen wurde festgestellt, daß Beeinträchtigungen der Leber auf den im Betrieb viel verwendeten Tetrachlorkohlenstoff (Halon 104) zurückzuführen waren. Die fluorierten Produkte der Halonreihe riefen auch bei chronischer Einwirkung kleiner Mengen keine toxischen Wirkungen hervor, d.h. sie sind praktisch ungiftig. In [91] wird ebenfalls auf mögliche Schädigungen bei Menschen durch Halon 104 hingewiesen.

Ford [39] berichtet von Untersuchungen, bei denen Personen 20 Minuten lang einer Konzentration bis zu 17 Vol.-% Halon 1301 ausgesetzt waren. Unterhalb einer Konzentration von 10 Vol.-% wurden keine nachteiligen Wirkungen bekannt, über 10 Vol.-% traten Schwindelgefühl und Konzentrationschwierigkeiten auf, die mit zunehmender Halonkonzentration immer stärker wurden. Er folgert demnach, daß ein Einatmen höherer Halonkonzentrationen kurzfristig möglich ist ohne dauerhafte Schädigungen hervorzurufen.

Jansen [21] und Haines [94] erwähnen kurzzeitige Inhalationsversuche mit Halon 1211 und Halon 1301 bei Konzentrationen von 4 Vol.-% bzw. 7 Vol.-%, die symptomlos vertragen wurden, wobei Haines bei Halon 1301 eine Einwirkungszeit von 5 Minuten und bei Halon 1211 eine von 1 Minute angibt.

Für die Festlegung der Konzentrationen an schädlichen Stoffen, die in mit Personen besetzten Räumen vorhanden sein dürfen, wird vor allem in Europa auf Werte der MAK-Liste zurückgegriffen. MAK bedeutet "Maximale Arbeitsplatz Konzentration", d.h. die maximal zulässige Konzentration eines schädlichen Dampfes, Gases oder Staubes in Luft, die an einem Arbeitsplatz bei täglicher achtstündiger Inhalation und jahrelanger Exposition ohne gesundheitliche Nachteile ertragen werden kann.

Scheichl [2] gibt für die Halone 1001, 1011, 1202 und 1301 sowie zum Vergleich für Schadstoffe, die zum Teil giftiger sind, die in Tabelle 11 aufgeführten MAK-Werte an. Der MAK-Wert für Chlorwasserstoff wurde aus [31, 32, 95, 96], der für Phosgen aus [62] und der für Tetrachlorkohlenstoff (Halon 104) aus [91] entnommen. In Tabelle 12 gibt Schmidt [87] eine Gegenüberstellung von MAK-Werten aus der UdSSR, DDR und USA für verschiedene Halone wieder, die aber nur im Fall der USA bis auf einen Wert mit denen von [2] übereinstimmen, während die MAK-Werte aus der UdSSR und DDR zum Teil weit unterhalb der in [2] genannten liegen.

## 8. KORROSIONSV ERHALTEN

Die Korrosionswirkung der Halone sollte so gering wie möglich sein, um sowohl Behälter, Leitungen usw., in denen das Löschmittel aufbewahrt wird, als auch die mit dem Halon zu schützenden Einrichtungen während des Löscheinsatzes nicht zu schädigen.

In [16] sind die durch Versuche ermittelten Werte für die durchschnittliche Abtragung im Jahr für verschiedene Metalle durch Halon 1211 zusammengestellt. Sie sind in Tabelle 13 wiedergegeben. Tabelle 14 zeigt die Einwirkung verschiedener Halone auf Metalle nach Downing [97]. Man erkennt, daß fast bei allen Halonen die Korrosionswirkung bei Metallen im nassen Zustand stark zunimmt. Mit dem Wassergehalt der Halone nimmt ebenfalls die Korrosionswirkung zu, wobei fluorhaltige Halone gegenüber chlor- und bromhaltigen weniger korrosiv wirken. Auch in [6, 17] wird auf das indifferente Verhalten fluorhaltiger Halone gegenüber Metallen hingewiesen.

Nach [98] wirkt trockenes Chlorbrommethan (Halon 1011) bis zu einem maximalen Wassergehalt von 0,02 % praktisch nicht korrodierend auf Stahl, Messing und Blei. Auch in [41] wird erwähnt, daß bromhaltige Halone übliche Werkstoffe nicht angreifen, sofern keine Feuchtigkeit hinzutritt.

Wilke [99] weist auf Untersuchungen über die Aggressivität der Pyrolyseprodukte von Chlorbrommethan auf Metalle hin. So werden von Halon 1011 z.B. Eisen stark (100 %), Aluminium weniger stark (30 %), Blei noch weniger (25 %) und Zink gar nicht angegriffen. Gegen Messing scheinen dagegen die Halone bevorzugt aggressiv zu wirken. Doch durch die geringe pyrolytische Zersetzung der Halone in der Brandhitze von nur 1 % bis 2 %, sofern das Löschmittel sachgemäß eingesetzt wird, sind die eintretenden Schäden beim Löschen nicht groß. Bei anderen

Materialien wie Kunststoffen, Gummi, Lacke und Farben reicht die Skala der Strukturveränderungen bis zur völligen Auflösung der Substanzen.

Nach [5, 55] werden allgemein den Halogenwasserstoffsäuren, die bei der Pyrolyse des Halons während der Löschung eines Brandes entstehen, Korrosionseigenschaften zugeschrieben.

Engibous und Torkelson [7] beschreiben Auswirkungen verschiedener Halone auf verschiedene Metalle und Kunststoffe, wobei manche stark, manche gar nicht angegriffen werden. Dabei wurde festgestellt, daß die nachstehend genannten 5 Halone in der aufgeführten Reihenfolge zunehmend korrosiv wirken: Halon 1301, Halon 1211, Halon 2402, Halon 1202, Halon 1011.

## 9. LABOR- UND PRAXISNAHE VERSUCHE

Studien über die Chemie der Verbrennung und der Flammeninhibition sind sehr komplex. Um konstante Versuchsbedingungen zu erhalten, werden Untersuchungen oft an Diffusions- und Vormischflammen durchgeführt.

Scheichl [2] stellte fest, daß bei der Unterdrückung der Entzündung von Methan/Luft-Gemischen sich Halon 1001 fünfmal wirksamer als Kohlendioxid und achtmal wirksamer als Stickstoff bezogen auf die Mole der zugesetzten Löschmittel erwies.

In [100] wurde die Verringerung der Verbrennungsgeschwindigkeit bei brennenden Methan/Luft-Gemischen bei Zugabe von Halon 1001 und Halon 1301 gemessen mit dem Ergebnis, daß die Wirkung dieser Halone als gleichwertig anzusehen ist. In [101] wurde lediglich der Einfluß von Halon 1001 bei Zugabe zu Methan/Luft-Gemischen bestimmt.

In [102] wurde anhand von Untersuchungen festgestellt, daß bei der Zumischung der Halone 1001, 1211 und 1301 zu Gemischen bestehend aus Methan/Luft, Propan/Luft und n-Butan/Luft die Verbrennungsgeschwindigkeit abnimmt. Dabei ist es gleichgültig, ob das Halon der Luft oder dem Brandstoff beigemischt wird.

Untersuchungen in [103] hatten zum Ziel, die Ausbreitung des Löschmittels Halon 1301 in einem elektrisch gezündeten Methan/Luft-Gemisch festzustellen. Anhand der aus derartigen Modellversuchen gewonnenen Erkenntnisse sollen Explosionen an zündfähigen Gemischen in Bergwerken durch den Einsatz von Halon 1301 verhindert werden.

Strasser, Liebman und Kuchta beschreiben in [104] Versuche mit Mischungen von Brenngasen, Sauerstoff und Löschmitteln. Mit einer Interferenztechnik wurde die Wirkung von Halon 1301 und von Kohlendioxid auf die Flammgeschwindigkeit in Methan/Luft-Gemischen geprüft.

In [105] werden Untersuchungen erwähnt, bei denen die Verbrennungsgeschwindigkeit von Methan/Luft-Gemischen durch Zugabe von Halon 1301 verringert wurde. In [106] wird zusätzlich auf die Abhängigkeit der Verbrennungsgeschwindigkeit von der Temperatur hingewiesen.

Friedrich [107] benutzte bei Löschversuchen eine Schale mit einer Oberfläche von  $56,8 \text{ cm}^2$ , die mit Brandstoffen wie Benzin, Benzol, Alkohol, Ketone, Äther usw. gefüllt wurde. Die Untersuchungen zeigten, daß die Löschwirksamkeit von Halon 1202 größer war als die von Halon 2402. Außerdem wurde bei Tankbrandversuchen an einem Tank mit dem Durchmesser von 1,2 Meter festgestellt, daß die Löschkraft von CB-X und CB (Halon 1011) der von Tetrachlorkohlenstoff und Kohlendioxid überlegen war.

In [22, 52] werden Versuche mit verschiedenen Gemischen aus Brenngasen und Löschmittelzusätzen beschrieben. Es wird festgestellt, daß sowohl bei laminaren als auch bei turbulenten Flammen die Flammenlänge mit zunehmendem Löschmittelzusatz zunimmt. Fotografien verdeutlichen diese Aussage. Inertgase üben auf die Verbrennungsgeschwindigkeit den geringsten Einfluß aus. Es folgen die Halone mit Chlor, darauf die mit Brom, dann die mit Chlor und Brom und schließlich die mit Fluor und Brom. Die inhibierende Wirkung der Halone nimmt mit steigender Brenngastemperatur ab. Es werden daher größere Halonmengen benötigt. Bild 8 zeigt den Einfluß von Halonen auf die Verbrennungsgeschwindigkeit eines stöchiometrischen Propan/Luft-Gemisches.

Petrella und Sellers [47] untersuchten die Wirkung von Stickstoff und der Halone 1001, 1011, 1211, 1202, 1301 und 2402 bei verschiedenen Propan/Luft-Gemischen. Die Flamme wurde länger, wenn Halon dem Luftstrom beigemischt wurde. Außerdem änderte sich die Form und Farbe der Flamme und Ruß wurde sichtbar. Nach Zugabe einer höheren Halonkonzentration erlosch die Flamme.

McHale [65] erwähnt Laborversuche an Vormischflammen, bei denen z.B. die Löschmittel  $\text{CF}_3\text{Br}$  in einer Konzentration von 6,1 Vol.-% und  $\text{CF}_4$  in einer Konzentration von 26 Vol.-% einem n-Heptan/Luft-Gemisch zugegeben werden mußte, um in beiden Fällen die Flamme zu löschen. Daraus ist zu erkennen, daß dem Brom die entscheidendere Rolle beim Löschvorgang zukommt.

Von Engibous und Torkelson [7] wurden mit verschiedenen Halonen (1011, 1202, 1211, 1301, 2402) mit Brandstoff gefüllte Wannen abgelöscht, wobei die Art des Brandstoffes, die Vorbrennzeit sowie Halonmenge und Ausstoßrate variiert wurden. Gemessen wurden dabei Größen wie Löschzeiten, Windgeschwindigkeiten und Temperaturen. Einzelheiten können den umfangreichen Tabellen ihres Berichtes entnommen werden.

In [108] wird über den Einbau einer Löschanlage mit Halon 1301 im Winterthur Museum (USA) berichtet, wobei Räume zwischen ca.  $300 \text{ m}^3$  und  $1300 \text{ m}^3$  Inhalt im Brandfall mit Halonkonzentrationen zwischen 5,2 Vol.-% und 10 Vol.-% geschützt werden sollen.

Ford [109] untersuchte 5 Jahre später die Halon 1301 Löschanlage im Winterthur Museum. Es trat in dieser Zeit nur einmal ein Brand auf, der nicht mit Halon-Löschern unter Kontrolle gebracht werden konnte, sodaß die stationäre Anlage ansprach und das Feuer in 5 Sekunden löschte. Der Schaden beschränkte sich auf eine Maschine. Die Halon-Löschanlage war 24 Stunden nach dem Löschvorgang wieder funktionsfähig.

Rainaldi [11] beschreibt einen Versuch mit n-Hexan als Brandstoff, bei dem nach 30 s Vorbrennzeit eine Löschung mit Halon 2402 erfolgte. Dabei wurden die Konzentrationen von Bromwasserstoff und der Gesamtfluorgehalt zu 56 ppm bzw. zu 5 ppm bestimmt. Außerdem beschreibt er einen Versuch an einem 8000 KW Transformator der Größe  $3 \text{ m} \times 1,18 \text{ m} \times 3,10 \text{ m}$  bei einer Vorbrennzeit von 120 Sekunden. Mit 24 kg Halon 2402 konnte der Brand nach  $2 \frac{1}{2}$  s erfolgreich gelöscht werden.

Wilson [110] testete Holzkrippen in einem Raum und in einem beiderseits offenen Tunnel. Ebenfalls wurden Tests mit einem brennenden Abfallbehälter in einem Flugzeugrumpf einer DC 8 unternommen. In allen Fällen konnte mit einer Konzentration von 5 Vol.-% Halon 1301 innerhalb weniger Sekunden gelöscht werden.

Guise [111] gibt einen Vergleich von Halonkonzentrationen an, die erforderlich sind, um Diffusionsflammen aus verschiedenen Brandstoffen zu löschen.

Reinhold [79] gibt für die Löschung eines Holzglutbrandes gemäß DIN 14406 mit ca. 7 kg Holz mit 1 Vol.-% bis 5 Vol.-% Halon

für Halon 1211 die gemessenen Zersetzungsprodukte HCl + HBr mit knapp 1 ppm und für die Halone 1301 bzw. 2402 das Zersetzungsprodukt HBr mit ca. 3 ppm bzw. 10 ppm an. Die gemessenen Werte lassen erkennen, daß im Bereich von 4 Vol.-% bis 5 Vol.-% die Halone 1211 und 1301 hinsichtlich ihrer Stabilität als gleichwertig anzusehen sind, während das Halon 2402 offensichtlich stärker zur Zersetzung neigt. Wie die Versuche zeigten, liegen die Konzentrationen der Zerfallsprodukte bei der Anwendung der Halone in dem genannten Konzentrationsbereich noch unterhalb der Konzentration von 5 ppm, die als MAK-Wert angegeben wird.

Reinhold und Siebel [93] berichten über Untersuchungen in verschieden großen Versuchsräumen mit den Halonen 1211, 1301, und 2402, wobei Konzentrationen zwischen 1 Vol.-% und 5 Vol.-% verwendet wurden. Während des Brandversuches wurden Abbrand, Rauchgase mit Drägerröhrchen und fotometrischer Analyse, Temperaturen, Druckschwankungen im Raum und die Feuchte gemessen. Beispielsweise wurde Holz, Gummi, Pappe mit 1 Vol.-% Halon und brennbare Flüssigkeiten mit 2 Vol.-% bis 3 Vol.-% Halon gelöscht. Magnesiumbrände dagegen konnten mit Halonen nicht gelöscht werden. Die Löschwirkung der 3 Halone wurde als gleichwertig angesehen und auch für den Einsatz in EDV-Anlagen vorgeschlagen, da sofort eine löschfähige Konzentration aufgebaut werden kann. Pyrolyseversuche an einem Holzglutbrand ergaben z.B. folgende Werte: HCl < 12 ppm, CO < 1 Vol.-%, CO<sub>2</sub> < 4 Vol.-%, während bei PVC ca. 40 ppm HCl entstanden.

In [5] werden Versuche beschrieben, die mit Gasgemischen bzw. mit den Brandstoffen Benzin, Benzol, Alkohol, Ketone, Äther und ähnlichen leicht entzündbaren Stoffen in verschiedenen großen Testschalen und Halonen als Löschmittel durchgeführt wurden. Die relativen Vergleiche der Versuche, so Schreiber [13], führten zu dem Ergebnis, daß die fluorierten Bromkohlenwasserstoffe in Laborversuchen die günstigeren Werte ergaben.

In [19] wird ein Versuch beschrieben, bei dem Heptan auf einer Fläche von  $2,5 \text{ m}^2$  in einem Raum von  $285 \text{ m}^3$  brannte. Der Löschvorgang mit Halon 1301 innerhalb von  $1/2$  Sekunde erzeugte einen HF-Gehalt von 12 ppm. Nach einer Löschdauer von 10 Sekunden und einer Branddauer von 9 Minuten wurde in einem ähnlichen Versuch eine HF-Konzentration von 250 ppm festgestellt. Diese Ergebnisse werden in [84] bestätigt; es werden dort HF-Konzentrationen zwischen 10 ppm und 300 ppm angegeben.

Jensen [20] macht Angaben über Zersetzungsprodukte bei nicht näher beschriebenen Lösversuchen der Ansul Company mit Halon 1301. Es entstanden HF-Konzentrationen zwischen 0 ppm und 33 ppm und HBr-Konzentrationen zwischen 0 ppm und 26,3 ppm.

In [68] wird über Lösversuche mit Halon 1301 in einer Lockheed C-130 berichtet. In diesen Versuchen wurde der Brand, nachdem er eine bestimmte Temperatur erreicht hatte, mit Halonkonzentrationen von 3 Vol.-% und 5 Vol.-% erfolgreich gelöscht.

Sylvia [77] berichtet von Versuchen mit Halon 1301. Bei einem kleinen Brand von ca.  $10 \text{ dm}^2$  Fläche und einer Versuchsdauer von 25 Sekunden entstanden HF-Konzentrationen zwischen 1667 ppm und 1907 ppm, bei einer Versuchsdauer von 15 Sekunden HF-Konzentrationen zwischen 1101 ppm und 1208 ppm. Es entwickelten sich also mit zunehmender Branddauer mehr Pyrolyseprodukte.

Cholin [78] beschreibt Brände mit Holz- und Baumwollfasern, die nur mit einer Eingabe von 20 Vol.-% Halon 1301 bei einer Einwirkungszeit von 30 Minuten unter Kontrolle gehalten, jedoch nicht gelöscht werden konnten. Bei Lösversuchen in einem Computerraum wurden als Brandstoffe sowohl Flüssigkeiten (Alkohol) als auch Feststoffe (Papierkörbe) verwendet. Die Vorbrennzeit betrug bei jedem Versuch 30 Sekunden. Der Brand konnte mit einer Konzentration von 3,7 Vol.-% Halon 1301

in maximal 8 Sekunden gelöscht werden. Die Einwirkungszeit betrug 30 Minuten. Bei diesen Untersuchungen wurden Konzentrationen der Zersetzungsprodukte des Halons bestimmt. Die HF-Konzentrationen betragen zwischen 24 ppm und 116 ppm, die HBr-Konzentrationen zwischen 6 ppm und 38 ppm. Nach Versuchsende mußte nur eine Computerkarte ausgetauscht werden. Daraus folgt, daß Halon 1301 ohne Risiko in Computerräumen eingesetzt werden kann.

In [80] wird über Löschversuche berichtet, die in einem Versuchsraum mit einem Gesamtvolumen von 16 m<sup>3</sup> stattfanden. Als Brandmaterial diente sowohl eine nicht näher bezeichnete Flüssigkeit als auch Stoffe, die gewöhnlich in EDV-Anlagen vorkommen wie z.B. EDV-Magnetbänder, -spulen, -karten, -papier und elektronische Computerteile. So konnte z.B. der vollentwickelte Brand eines Papierkorbes, gefüllt mit zerknülltem Papier und Magnetband, nach einer Vorbrennzeit von 80 Sekunden mit 6 Vol.-% bzw. 7 Vol.-% Halon 1301 innerhalb von 2 Sekunden gelöscht werden; lediglich Papier glühte noch etwas nach. Bei der Untersuchung der unverbrannten Computerbauteile konnten keinerlei Beschädigungen durch das Löschmittel festgestellt werden.

In [82] wurden Löschversuche in einem Computerraum mit Klimaanlage bei einer Temperatur zwischen 20 °C und 21 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 45 % bis 50 % durchgeführt. Als Brandstoff wurde z.B. Alkohol verwendet. Die Vorbrennzeit betrug 30 Sekunden. Der Löschvorgang erfolgte mit einer Konzentration von 3,7 Vol.-% Halon 1301. Der Brand war nach 7 Sekunden gelöscht. Die Einwirkungszeit betrug 30 Minuten. Je 5 Proben wurden nacheinander an verschiedenen Raumstellen entnommen und auf die Zersetzungsprodukte HF und HBr untersucht. Die HF-Konzentration lag zwischen 2 ppm und 116 ppm, die HBr-Konzentration zwischen 2 ppm und 38 ppm. Auch bei weiteren Löschversuchen (Computerabfälle oder Zeitungspapier in Papierkörben) konnte der Brand schnell gelöscht werden, wobei keine höheren Konzentrationen an Zersetzungsprodukten als die genannten entstanden.

Cholin [112] untersuchte in einer Reihe von 24 Löschversuchen die Löschwirkung von Halon 1301 bei verschiedenen Brandstoffen wie z.B. Papier, PVC, Polyuräthan und Alkohol. Die Raumabmessungen betragen ca.  $9,5 \text{ m}^3$  und ca.  $56,6 \text{ m}^3$ . Bei Änderung der Versuchsparameter wie Raumtemperatur, Vorbrennzeit, Ausströmdruck des Halons und Einwirkdauer wurden die Zersetzungsprodukte HF und HBr zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Die höchsten Konzentrationen wurden bei einem Versuch mit zerknülltem Papier in einem Korb nach 35 Sekunden Vorbrennzeit und einer Branddauer von 4 Minuten mit einer HF-Konzentration von 192 ppm und einer HBr-Konzentration von 298 ppm festgestellt. Bei den anderen Versuchen lagen die gemessenen Werte um ca. eine Größenordnung niedriger. Die dabei verwendeten löschwirksamen Konzentrationen lagen zwischen 3,6 Vol.-% und 20 Vol.-% Halon 1301, je nachdem, ob es sich um Oberflächenbrände oder um tiefer sitzende Brände handelte. Weitere Einzelheiten sind dem Bericht zu entnehmen.

In [113] wurde der Einfluß von 20 Inhibitoren (auch Halone) auf die Verbrennung verschiedener Brenngas/Luft-Gemische untersucht. So wurde z.B. die Zündtemperatur von Propan/Luft-Gemischen durch Zugabe von Methylhalogeniden in folgender Reihenfolge erhöht:  $\text{CH}_3\text{J} > \text{CH}_3\text{Br} > \text{CH}_3\text{Cl} > \text{CH}_3\text{F}$ .

In einer sehr ausführlichen Studie [114] wird über Arbeiten an einem Computerbrand-Prüfschema berichtet. Dafür wurde in zahlreichen Versuchen Halon 1301 getestet. Versuchsaufbau, Brandstoffe und Halonkonzentration wurden variiert. Ziel war die Bestimmung der korrosiven Auswirkung von Halon 1301 und seiner Zersetzungsprodukte auf im Computerbereich verwendete Metalle. Bei allen Versuchen lagen die maximalen HF- und HBr-Konzentrationen unter 150 ppm, nur Äthanol ließ die HF-Konzentration bis zu 1700 ppm ansteigen. Ebenfalls wurde bei verschiedenen Produkten wie z.B. PVC der freiwerdende Chlorwasserstoff bis zu einem Wert von 6000 ppm gemessen. Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß nichts Nachteiliges über den Einsatz von Halon 1301 bei Bränden von Computer-Werkstoffen ausgesagt wird.

Williamson [115] beschreibt einen Versuchsaufbau zum Testen von Halon 1301 und Kohlendioxid. Dabei unterscheidet er 3 Gruppen von Brandstoffen: Brandstoffe, die schmelzen, Brandstoffe, die nicht schmelzen und relativ luftundurchlässig sind und solche, die porös sind. Für Oberflächenbrände reichen nach seinen Angaben 20 Vol.-%  $\text{CO}_2$  und 3,5 Vol.-% Halon 1301 aus, während tiefer sitzende Brände je nach Brandstoff eine längere Einwirkungszeit und höhere Halonkonzentrationen benötigen.

In [116] wird von Brandversuchen in einem mit Computer- und elektronischen Bauteilen sowie einer Halon-Löschanlage ausgestatteten Raum berichtet. Die Brandlast bestand aus Paxolin-Tafeln bzw. Holzkrippen. Als Löschmittel wurde Halon 1211 verwendet. So wurde z.B. eine Holzkrippe nach einer Vorbrennzeit von 5 Minuten mit 5 Vol.-% Halon 1211 gelöscht. Nach einer Versuchsdauer von 20 Minuten wurden die nachstehenden Verbrennungs- und Zersetzungsprodukte mit Dräger-Röhrchen bestimmt:  $\text{HCl} + \text{HBr}$  20 ppm,  $\text{HF}$  5 ppm,  $\text{CO}$  500 ppm,  $\text{CO}_2$  1000 ppm,  $\text{Cl}_2 + \text{Br}_2 < 0,2$  ppm,  $\text{COCl}_2 < 0,2$  ppm. An im Versuchsraum belassenen Computerkarten konnten nach dem Löschvorgang weder sichtbare noch Funktionsänderungen aufgrund des Halons und seiner Zersetzungsprodukte festgestellt werden. Bei mit Paxolin-Tafeln als Brandlast durchgeführten Versuchen lagen die Konzentrationswerte der Zersetzungsprodukte wesentlich höher, wie folgende Aufstellung zeigt:  $\text{HCl} + \text{HBr} > 100$  ppm (geschätzt 200 ppm),  $\text{HF}$  75 ppm,  $\text{CO}$  1000 ppm,  $\text{COCl}_2$  1 ppm. Es gab auch hier keinen Hinweis auf schädliche Wirkungen des Halons oder der Zersetzungsprodukte auf die sich im Raum befindenden elektronischen Bauteile. Durch den Brand selbst wurden dagegen einige Bauteile schwer beschädigt. Das zum Vergleich herangezogene Kohlendioxid verursachte ebenfalls keine zusätzlichen Schäden.

Bei Sayers [26] wurde eine Schale mit n-Heptan in einem Raum gezündet und nach dem Ablöschen des Brandes mit einem Halon-

Löscher nachstehende Spaltprodukte des Löschmittels Halon 1211 bestimmt: HCL + HBr 2 ppm, HF 0,5 ppm, Cl<sub>2</sub> + Br<sub>2</sub> < 0,1 ppm, COCl<sub>2</sub> < 0,25 ppm.

In [72] werden 6 Tests beschrieben, die in einem kleinen Versuchsraum stattfanden. Als Brandstoffe dienten z.B. Alkohol und Zeitungspapier, während als Löschmittel Halon 1301 in einer Mindestkonzentration von 5 Vol.-% eingesetzt wurde. Während der gesamten Versuchsdauer wurden sowohl der Temperatur- als auch der Druckverlauf im Raum gemessen und mathematisch ausgewertet.

Poeschl [76] führte insgesamt 62 Löschversuche mit Halon 1301 durch. Die Vorbrennzeit lag zwischen 10 und 20 Sekunden. Bei diesen Versuchen wurden in einem Raum 9 verschiedene Brandstoffe getestet und als Ergebnis eine mittlere Löschkonzentration von 3,5 Vol.-% Halon 1301 ermittelt. Außerdem wurden nicht näher angegebene Werte wie Temperatur, Ausströmzeit des Halons, Druck, Löschzeit und Feuchtigkeit gemessen.

Curry [117] erwähnt Halon-Löschanlagen für Rennwagen, wobei zweifelhaft bleibt, ob das System auch während der Fahrt funktioniert.

McHale [118] berichtet von Brandversuchen in kleinerem Maßstab, wobei mit 3,5 Vol.-% Halon 1301 gelöscht wurde. Als Brandstoffe wurden Karton und Aceton verwendet. Das Ergebnis war, daß um so weniger HF entstand, je kürzer die Löschzeit war. Bei Karton wurde nach 2,5 s und 10 s eine HF-Konzentration von 75 ppm bzw. 210 ppm, bei Aceton nach 4,2 s und 10 s eine HF-Konzentration von 100 ppm bzw. 390 ppm ermittelt. Die Daten wurden auf eine Raumgröße von 28,32 m<sup>3</sup> (1000 ft<sup>3</sup>) normiert und mit Untersuchungen anderer Autoren verglichen, wobei im Mittel ein HF-Wert von 5,71 ppm/(s·m<sup>2</sup>) Flammenoberfläche errechnet wurde.

Schwenke beschreibt in [119] Großversuche an einem 200 m<sup>2</sup> großen Becken, in dem auf einer Wasserunterlage jeweils ein 5000 l Benzin/Kerosin-Gemisch entzündet wurde. Die Vorbrennzeit betrug jeweils 60 Sekunden. Als Löschmittel wurden Emulsionen wässriger Lösungen von Schaummitteln mit höher-siedenden Halonen sowie mit niedrig siedenden Halonen eingesetzt. Die Löschmittelaufgabe auf den Brand erfolgte mit 4 C-Rohren; die Löszeit lag unter 1 Minute.

In [120] wurden Diffusionsflammen verschiedener flüssiger Brandstoffe mit Hilfe von Halon 1211/Luft- und Halon 1301/Luft-Gemischen gelöscht. Die Löschkonzentrationen waren von der Strömungsgeschwindigkeit des an der Diffusionsflamme vorbeiströmenden Halon/Luft-Gemisches abhängig.

In [121] werden ppm-Werte für Zersetzungsprodukte der Halone 1301, 1211, 2402 und 1011 angegeben. Dabei wurde bei jeweils einem Brand in einem Raum von 50 m<sup>3</sup> in einem Fall der Raum 30 s lang total geflutet, im anderen Fall der Brand nur örtlich gelöscht. Bei diesen Versuchen wurde bei der örtlichen Löschung die 2 bis 3-fache Menge an Zersetzungsprodukten gegenüber der Raumflutung frei.

Halon Nr.	Fluten des Raumes				örtliche Löschung			
	Konzentrationswerte in ppm							
	HF	HCl	HBr	COCl <sub>2</sub>	HF	HCl	HBr	COCl <sub>2</sub>
1301	350	-	20	-	950	-	50	-
1211	350	60	30	-	950	170	80	-
2402	750	-	50	-	2000	-	120	-
1011	-	200	40	10	-	580	110	20

Brennemann und Charney beschreiben in [122], wie in einem Flugsimulator ein Brand gelegt und mit einer Halonanlage mit Halon 1301 gelöscht wurde. Bei der Löschung kam es darauf an, eine Halonkonzentration von 5 Vol.-% zu erreichen und diese 10 Minuten aufrechtzuerhalten.

Mit Ausnahme eines Brandes in einem Flugzeugtriebwerk benötigte man für Versuche mit den in [13, 43, 73] näher beschriebenen Testbrennern (s. Bild 6 und 7) zum Löschen der Flammen höhere Konzentrationen als bei nicht näher beschriebenen praxisnahen Versuchen, die mit dem gleichen Brandstoff durchgeführt wurden. Dies kann in erster Linie auf die idealen Versuchsbedingungen am Modellbrenner zurückgeführt werden.

Zersetzungsprodukte, die bei einem relativ zur Raumgröße kleinen n-Heptan-Brand entstanden, wurden in [123] mit denen verglichen, die sich bei einem relativ großen Brand entwickelten. Als Löschmittel wurde Halon 1301 eingesetzt. Beim kleineren Brand entstanden HF-Konzentrationen zwischen 1,4 ppm und 1,8 ppm bzw. HBr-Konzentrationen zwischen 2,1 ppm und 3,5 ppm, beim größeren Brand wurden HF-Konzentrationen zwischen 320 ppm und 1907 ppm bzw. HBr-Konzentrationen zwischen 38 ppm und 397 ppm gemessen. Die für Menschen gefährlichen Werte wurden hier übertroffen, sodaß Atemschutz notwendig wird.

In [124] wurde durch Versuche festgestellt, daß mit Halon 1301 in Konzentrationen zwischen 5 Vol.-% und 6 Vol.-% zwar zellulose Brandstoffe äußerlich gelöscht werden können, aber tiefer sitzende Glut weiterglüht. Für tiefer sitzende Brände sind daher höhere Halonkonzentrationen und Einwirkzeiten über 10 Minuten erforderlich.

In [22] wurde Halon am benzinübergossenen Auto und bei einem Vergaserbrand mit gutem Erfolg getestet. Auch finden sich dort Angaben über die Reichweite eines Halonlöschers.

Bei Untersuchungen in [23] und in [63] wurde ein kleiner n-Heptan-Brand mit Halon 1211 gelöscht. Im ersten Brandversuch traten nach einer Löschzeit von 1 s Konzentrationen von 1 ppm HCl + HBr, 0,5 ppm HF und unter 0,1 ppm Cl<sub>2</sub> + Br<sub>2</sub> auf, und in einem weiteren Brandversuch wurden nach einer

Löschzeit von 10 s Konzentrationen von 50 ppm HCl + HBr, 10 ppm HF und 2,5 ppm Cl<sub>2</sub> + Br<sub>2</sub> gemessen. Phosgen wurde in beiden Versuchen mit weniger als 0,25 ppm angegeben.

Löschversuche mit Halon 1001 im Modellmaßstab zur Simulation der Löschung von Bränden in Düsenflugzeugen wurden in [125] bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten unternommen. Das Halon wurde in einem Windkanal mit der Luft gemischt. Als Brandstoff diente Kerosin in einem Behälter mit einer Düsenflamme.

Crosby und Mackay [27] beschreiben Löschversuche in zwei Räumen, in denen 28 Personen verblieben. Die Meßgeräte zeigten nach dem Fluten mit Halon 1301 eine Konzentration zwischen 5 Vol.-% und 8 Vol.-% und nach 5 Minuten noch eine Konzentration von 5,8 Vol.-% bis 6 Vol.-% an. Anschließend verblieb die Konzentration, obwohl einige Personen den Raum betraten oder verließen (Türöffnen), bei 5 Vol.-% und war nach 30 Minuten erst auf 4,8 Vol.-% abgefallen. Ein Streichholz konnte in dieser Atmosphäre nicht gezündet werden. Die anwesenden Personen kamen nicht zu Schaden.

In [126] wurde anhand von Versuchen in einem Flugzeug die erforderliche Löschkonzentration an Halon 1001 und Halon 1011 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bestimmt.

Dyer [127] beschreibt Tests mit Halon 1211, das als Spray auf Diffusionsflammen, wie sie bei Kerosin-Bränden auftreten, gesprüht wurde. Dabei wurden verschiedene Parameter wie Luftgeschwindigkeit, Behälterdruck, Temperatur und Halonkonzentration geändert mit dem Ergebnis, daß der Brand nicht immer gelöscht werden konnte.

In zahlreichen Löschversuchen wurden nach [128] n-Heptan-Brände mit einer Flächenausdehnung zwischen 0,2 m<sup>2</sup> und 7 m<sup>2</sup> nach einer Vorbrennzeit von 30 Sekunden mit Mischungen von

Halon 1301 und Halon 1211 gelöscht. Es wurde festgestellt, daß eine Mischung von Halon 1301 und 1211 im Verhältnis 25 : 75 als Löschmittel am zuverlässigsten wirkt .

## 10. ZUSAMMENFASSUNG

Halogenkohlenwasserstoffe als Löschmittel gewinnen in den letzten Jahren neben den herkömmlichen Löschmitteln wie Wasser, Schaum, Pulver und CO<sub>2</sub> immer mehr an Bedeutung.

Die Anwendung ist für die in der Bundesrepublik Deutschland hauptsächlich verwendeten Halogenkohlenwasserstoffe Halon 1211 (Difluorchlorbrommethan, CF<sub>2</sub>ClBr) und Halon 1301 (Trifluorbrommethan, CF<sub>3</sub>Br) auf Brände der Klassen B und C beschränkt, während im Ausland (z.B. USA) Halone auch als Löschmittel für Brände der Klasse A zugelassen sind.

Neben den giftigen Brandgasen treten beim Ablöschen eines Brandes mit Halonen giftige Zersetzungsprodukte auf, deren Konzentrationen im Rauchgas gesundheitsschädliche Werte annehmen können. Der Grad der Giftigkeit ist von mehreren Einflußgrößen abhängig wie z.B. der Brandraumtemperatur, der Halonkonzentration und der Löschdauer. Je kürzer die Löschzeit ist, desto weniger entstehen toxische Zersetzungsprodukte.

Bisher wurde die Toxizität von Halonen und ihren Zersetzungsprodukten sowohl in zahlreichen Untersuchungen an Tieren als auch unter Beteiligung von Menschen bestimmt, um im Brandfall beim Einsatz als Löschmittel die Wirkung auf Lebewesen genauer beurteilen zu können.

Die Zersetzungsprodukte einiger Halone sind korrosiv, d.h. sie können Werkstoffe angreifen und somit ihre Verwendungsfähigkeit nach einem Löschvorgang beeinträchtigen. Dies bedeutet, daß

bei Vorhandensein mancher Metalle und einiger Kunststoffe im Brandraum eine Anwendung von Halonen als Löschmittel ohne zusätzlich zum Brand auftretende Folgeschäden nicht möglich ist.

Um die Löschwirksamkeit von Halon-Löschmitteln festzustellen, werden bereits seit Jahren labor- und praxisnahe Brandversuche durchgeführt. Anhand der bisherigen Untersuchungen konnten aufschlußreiche Erkenntnisse gewonnen werden, ohne daß jedoch eine eindeutige Klärung der Anwendbarkeit von Halon-Löschmitteln erreicht wurde.

In diesem Bericht wurden Arbeiten aus der Literatur zusammengestellt und ausgewertet, um einerseits die Fachwelt zu unterrichten und andererseits der Forschungsstelle für Brandschutztechnik als Grundlage für Brand- und Löschversuche mit Halonen in einem Raum natürlicher Größe zu dienen.

## 11. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Höpfe, W.: Halone für die Sicherheit.  
Brandschutz, Deutsche Feuerwehr-  
Zeitung 31 (1977) Nr. 8, S. 218-222
- [2] Scheichl, L.: Halogenwasserstoffe als Feuerlösch-  
mittel unter Berücksichtigung der Ab-  
grenzung ihrer Anwendungsmöglichkeiten  
gegen andere Lösungsverfahren.  
VFDB-Zeitschrift 10 (1961) Nr. 1,  
S. 1-11
- [3] DIN 14 270, Halon-Löschmittel.  
Februar 1977
- [4] Höpfe, W.: Zur Nomenklatur der Halogen-Kohlen-  
wasserstoffe.  
Aerosol report 4 (1965) Nr. 2,  
S. 37-41
- [5] Schreiber, H.M. Löschmittel. Chemisch-physikalische  
Porst, P.: Vorgänge beim Verbrennen und beim  
Löschen.  
Berlin: Staatsverlag der DDR, 1972
- [6] Höpfe, W.: Fluorierte Halone, Löschmittel für  
die Risiken von heute und morgen.  
Brandschutz, Deutsche Feuerwehr-  
Zeitung 25 (1971) Nr. 2, S. 34-36
- [7] Engibous, D.L. A study of vaporizable extinguishants.  
Torkelson, T.R.: WADC Technical Report, Jan. 1960,  
S. 59-463

- [ 8] Trocken und ohne Rückstände löschen mit Halon.  
Cerberus Alarm, Zeitschrift über modernen Brandschutz (1975) Nr. 66
- [ 9] Merkblatt für den Umgang mit Fluorkohlenwasserstoffen.  
FKW - Merkblatt, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Zentralstelle für Unfallverhütung Bonn:Best.Nr.ZH 1/409, (1973) Nr. 5
- [10] Hammack, J.M.: Talking extinguishing equipment.  
Fire Journal 64 (1970) Nr. 3, S. 60-62
- [11] Rainaldi, N.: Advance report on Halon 2402.  
Fire Technology 6 (1970) Nr. 1, S. 59-67
- [12] Scheichl, L.: Halone für die Brandbekämpfung.  
VFDB-Zeitschrift 15 (1966) Nr. 4, S. 110-114
- [13] Gann, R.G.(Hrsg): Halogenated fire suppressants.  
Washington, D.C.: ACS Symposium series 16, American Chemical Society, 1975
- [14] Gross, E.: Die Toxizität der Halogenkohlenwasserstoffe Halon 1011 -  $\text{CH}_2\text{ClBr}$ , Halon 1211 -  $\text{CH}_2\text{ClBr}$ , Halon 1301- $\text{CF}_3\text{Br}$  unter Berücksichtigung der Anwendung gegen Brände in gepanzerten Fahrzeugen, in Flugzeugen und geschlossenen U-Booten.  
Gutachten, Bundesminister für Verteidigung, Bonn

- [15] Spiegel, Th.: Halone als Löschmittel.  
Der Feuerwehrmann 19 (1969) Nr. 10,  
S. 269-271
- [16] KC-Feuerlöschmittel Halon 1211.  
Hannover: Kali Chemie AG, L XI 74 3000
- [17] Höpfe, W.: Brandschutz in Aerosol-Betrieben.  
Aerosol report 12 (1973)
- [18] Fire extinguishing systems, design  
manual, Halon 1301.  
Belleville: Walter Kidde and Company,  
F - 41426 B 9-1-75 U.L. Ex 2826,  
Sept. 1972, revised Aug. 1975
- [19] Ultra-schnelle Feuermelde- und Löschanlagen mit "Halon 1301" (Bromtrifluormethan).  
Langenfeld: Steel GmbH, 1972
- [20] Jensen, R.: Halogenated extinguishing agent systems.  
Fire Journal 66 (1972) Nr. 3, S. 37-39
- [21] Jansen, G.: Halon 1211 und 1301.  
Optimale Löschmittel für die Brandbekämpfung.  
Sicherheitsingenieur (1974) Nr. 11 u.12
- [22] Graf, R.: Halogenierte Kohlenwasserstoffe als  
Löschmittel.  
VFDB-Zeitschrift 2 (1953) S. 55-60

- [23] Standard halogenated fire extinguishing agent systems - Halon 1301 and Halon 1211. NFPA No.12 A - 1973, S. 1-80. NFPA No.12 B - 1973, S. 1-78. In: National Fire Codes. Boston: NFPA(1977)
- [24] DIN EN 2, Brandklassen. Februar 1973
- [25] Nash, P.: The detection and extinction of fires in factories. The British Journal of Occupational Safety (1969) Nr. 87, 88, S. 1-8
- [26] Sayers, D.R.: Halon 1211 - areas of particular effectiveness. Fire Journal 67(1973) Nr. 6, S. 14-15
- [27] Crosby, G. Testing Halon 1301 system design. Mackay, D.J.: Fire Journal 71 (1977) Nr. 6, S. 74-75 und S. 107-109
- [28] Friedrich, M.: Untersuchungen über die Löschwirkung halogenierter Kohlenwasserstoffe. VFDB-Zeitschrift 6 (1957) Nr. 1, S. 23-25 u. Nr. 2, S. 59-65
- [29] Kučer, V.M.: Über die Einschätzung des hemmenden Beitrages halogener organischer Verbindungen beim Löschen von Flammen. Unser Brandschutz 25 (1975) Nr. 5, S. 40-45 (wiss.-techn. Beil. 3)

- [30] Franck, T.E.: Clean room fire protection using Halon 1301.  
Fire Journal 65 (1971) Nr. 2, S. 77-79
- [31] Ammersdorfer, F.: Halogenlöschmittel - warum nicht?  
Brand aus 82 (1974) Nr. 9, S. 321-322
- [32] Ammersdorfer, F.: Warum nicht Halone?  
Brandschutz 28 (1974) Nr. 9, S. 254-255
- [33] Scheichl, L.: Entstehung und Bekämpfung von Flugzeugbränden in der Luft.  
Soldat und Technik (1961) Nr. 1,  
S. 34-37
- [34] Leloup, R.: L'emploi des Halogénés comme agents extincteurs.  
Revue Technique du Feu 6 (1965) Nr. 10,  
S. 52-59
- [35] Eichstedt, K.W. Tierexperimentelle Untersuchungen zur  
Pauksch, H.W. akuten Toxizität von Halonen.  
Höppe, W.: Die Berufsgenossenschaft (1970) Nr. 7
- [36] Le bromochlorodifluorométhane (CBrClF<sub>2</sub>).  
Revue Technique du Feu  
13 (1972) Nr. 114, S. 3-9
- [37] Frigen 13 B1 als Feuerlöschmittel.  
Frankfurt (M): Farbwerke Hoechst,  
März 1962
- [38] Scholz, J. Toxikologische Untersuchungen an Tri-  
Weigand, W.: fluormonobrommethan.  
Zentralblatt für Arbeitsmedizin 14  
(1964), S. 129-131

- [39] Ford, C.L.: Halon 1301 fire extinguishing agent: properties and applications. Fire Journal 64 (1970) Nr. 6, S. 36-37 u. S. 41
- [40] Echternacht, J.E.: Halon extinguishing systems design criteria. Fire Journal 65 (1971) Nr. 6, S. 51-55 u. S. 66
- [41] Bromhaltige Halon Feuerlöschmittel. Frankfurt (M): Technisches Merkblatt C 1677 der Farbwerke Hoechst, Juli 1968
- [42] Kern, J.: Über chemische Vorgänge bei der Brandbekämpfung mit Halonen. Deutsche Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht 68-04, Januar 1968
- [43] Miller, M.J.: Recent research activity on fire and explosions by Factory Mutual Research. Boston: Factory Mutual Research, RC 76 - TP - 75, October 1976
- [44] Rosenhan, A.K.: A fire - fighter's guide to halogens. Fire International 3 (1971) Nr. 31, S. 30-32
- [45] Instruction manual for application, installation, operation and maintenance of Kidde sentinel automatic KPH series Halon 1301 pre-engineered systems. Belleville: Walter Kidde and Company, U.L.Ex-2826, June 1976

- [46] Thorne, P.F.: The anaesthetic hazard in total flooding systems using BCF and BTM. Fire 63 (1971) Nr. 790, S. 543
- [47] Petrella, R.V. Flame inhibition by bromine compounds.  
Sellers, G.D.: Fire Technology 6 (1970)Nr. 2, S. 93-101
- [48] Torkelson, T.R. The toxicity of Bromochloromethan  
Oyen, F. (Methylen Chlorobromid) as determined  
Rowe, V.K.: on laboratory animals.  
Industrial Hygiene Journal 21 (1960)  
Nr. 4, S. 275-286
- [49] Northey, J.: Halon extinguishing agents.  
Fire prevention (1977) Nr. 122, S.22-24
- [50] Einige Kriterien für den Vergleich von Halon 1301 und Halon 1211 als Feuerlöschmittel.  
Ugine Kuhlmann Nr. 465 - D 12 - 75
- [51] Bromhaltige Halon - Feuerlöschmittel.  
Feuerwehr-Informationen der Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt (1970)
- [52] Dehn, K. Versuche über das chemische und physikalische Verhalten von Löschmitteln, insbesondere von Halonen.  
Fiala, R.: In: Jahrbuch der WGLR (1962) S. 559-567
- [53] Schreiber, H.: Halogenkohlenwasserstoffe als Löschmittel.  
Unser Brandschutz 18 (1968) Nr. 5, S. 33-38

- [54] Feuerlöschmittel CB und CB-X.  
Zulassungsnummer PL-6/57  
Frankfurt (M): Farbwerke Hoechst,  
März 1964
- [55] Scheichl, L.: Brandlehre und chemischer Brandschutz.  
2. Auflage,  
Heidelberg: Hüthig Verlag(1958)
- [56] Fiala, R.: Über die Löschwirkung von Halonen.  
Deutsche Luft- und Raumfahrt,  
Forschungsbericht 66-16, März 1966
- [57] Gross, E. Stationäre Feuer-Löschanlagen.  
Baumann, W.: Die Berufsgenossenschaft (1957) Nr. 7
- [58] Automatische Löschanlagen.  
Brand aus 82 (1974) Nr. 8, S. 297-301
- [59] Halone als Löschmittel.  
Österreichische Feuerwehr 24 (1970)  
Nr. 4, S. 82-83
- [60] Definition der Löscheffekte.  
Die Österreichische Feuerwehr 31  
(1977) Nr. 2, S. 28-29
- [61] Definition der Löscheffekte.  
Brand aus 84 (1976) Nr. 11, S. 443-444
- [62] Neues Drägerröhrchen für die Bestimmung  
von Phosgen.  
Zentralblatt für Arbeitsmedizin und  
Arbeitsschutz 19 (1969) Nr. 4, S. 122

- [63] McKinnen, G.P.      The halogenated extinguishing agents.  
Tower, K.:              (Chapter 4).  
Fire Protection Handbook 14  
Boston: NFPA Section 13 (1976),  
S. 20-26
- [64] Spence, D.            The role of negative halogen ions in  
McHale, E.T.:           hydrocarbon flame inhibition.  
Combustion and Flame 24 (1975) Nr. 2,  
S. 211-215
- [65] McHale, E.T.:        Survey of vapor phase chemical agents  
for combustion suppression.  
Fire Research Abstracts Reviews  
11 (1969) Nr. 2, S. 90-104
- [66] Creitz, E.C.:        Extinction of fires by halogenated com-  
pounds - a suggested mechanism.  
Fire Technology 8 (1972) Nr. 2, S.131-140
- [67] Kleier, H.:          Ortsfeste Löschanlagen mit dem Lösch-  
mittel Halon.  
VFDB-Zeitschrift 22 (1973) Nr. 4,  
S. 134-138
- [68] Hammack, J.M.:      Talking extinguishing equipment.  
Fire Journal 66 (1972) Nr. 4, S. 43-44
- [69] Höppe, W.:          Besserer Feuerschutz durch Halone?  
adi Nachrichten (1972) Nr. 74
- [70]                        Gaseous agent fire extinguishing  
systems for computer facilities.  
Chicago: Cardox, Chemetron Corp.,  
2-176 (1973)

- [71] Bajpai, S.N.: An investigation of the extinction of diffusion flames by halons. *Fire and Flammability* 5 (1974) Nr. 4, S. 255-267
- [72] Peterson, P.: Talking extinguishing equipment. *Fire Journal* 67 (1973) Nr. 2, S. 70-73
- [73] Hirst, R. Measurement of flame - extinguishing  
Booth, K.: concentrations.  
*Fire Technology* 13 (1977) Nr. 4, S. 296-315
- [74] Miller, M.J.: The use of halons for flame suppression. In: Internationales Brandschutz-Seminar 1976 in Karlsruhe. Karlsruhe: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. 1976, Bd. 2, S. 195-219
- [75] Monachov, V.T. Untersuchung der Löschmittelkonzentra-  
Černyšova, M.M.: tion beim Gaslöschverfahren.  
*Unser Brandschutz* 21 (1971) Nr. 12, S. 121-122 u. S. 126
- [76] Poeschl, P.M.: Large-scale Halon 1301 fire test program. *Fire Journal* 67 (1973) Nr. 6, S. 35-38
- [77] Sylvia, D.: Symposium evaluates Halons. *Fire Engineering* 125 (1972) Nr. 9, S. 32-33
- [78] Cholin, R.R.: Testing the performance of Halon 1301 on real computer installations. *Fire Journal* 66 (1972) Nr. 5, S. 105-108

- [79] Reinhold, B.: Brandschutz mit Halonen.  
Brandschutz, Deutsche Feuerwehr-  
Zeitung 25 (1971) Nr. 2
- [80] Versuchsbericht über Halon 1301.  
Walter Kidde and Company, Northolt  
Middlesex, Juli 1972
- [81] DIN 14 406, Tragbare Feuerlöscher.  
November 1976
- [82] Fact-finding report on estinguishment  
of class A and B fires in elektronik  
computerrooms with Halon 1301.  
Underwriters Laboratories,  
Elmsford, New York: Safety First Products  
Corp., File NC 535, Januar 1972
- [83] Weigand, W.: Untersuchungen über die Inhalations-  
toxizität von Fluorderivaten des Methan,  
Äthan und Cyclobutan.  
Zentralblatt für Arbeitsmedizin, (1971)  
Nr. 5, S. 149-156
- [84] Eckert, R.D.: Fire protection series.  
Nuclear Power, Standard No.676,  
Pennsylvania 19020
- [85] Feuerlöschen mit Halon.  
Die Berufsgenossenschaft 29 (1977) Nr.4,  
S. 162
- [86] McHale, E.T.: Life support without combustions hazards.  
Fire Technology 10 (1974) Nr. 1, S.15-24

- [87] Schmidt, P.: Gesundheitsgefahren bei der Anwendung von Halonen zur Brandbekämpfung. Unser Brandschutz 18 (1968), S. 66-70 (wiss.-techn. Beil. 3)
- [88] Automatische Löschanlagen für elektronische Einrichtungen. Brandverhütung (1976) Nr. 115, S. 12-13
- [89] Malcolm, J.E.: Halogenated extinguishing agents, Part II. NFPA Quarterly 45 (1951) Nr. 2, S. 119
- [90] Chambers, W.H.: In: Baader, E.W., Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin. Band 2, (1961) Nr. 1, S. 454-512
- [91] Klinkmüller, A.: Die Gefährlichkeit des Tetrachlorkohlenstoffs wieder einmal unter Beweis gestellt. Die Werkfeuerwehr (1965) Nr. 4, S. 6
- [92] Toxicity of BCF. Fire prevention (1971) Nr. 91, S. 25-26
- [93] Reinhold, B.  
Siebel, W.: Untersuchungen für den Löscheinsatz von Halonen in stationären Löschanlagen. Minimax Versuchsbericht Nr. F 19 2. überarbeitete Auflage, August 1971
- [94] Haines, E.E.: The case for Halon 1301. Fire 66 (1973) Nr. 820, S. 249-250
- [95] Bestimmung von Chlorwasserstoff nach dem Prüfröhrchenverfahren. Zentralblatt für Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz 19 (1969) Nr. 4, S. 122

- [ 96] Das neue chemische Löschmittel  
Halon 1211.  
Die Österreichische Feuerwehr 29  
(1975) Nr. 1, S. 14-15
- [ 97] Downing, R.C. Halogenated extinguishing agents,  
Eiseman, B.J.: part I.  
Research at the Jackson Laboratory,  
NFPA Quarterly, Oktober 1951, S. 115
- [ 98] Fire protection handbook.  
12. Auflage,  
Boston: NFPA (1962), S. 15-38
- [ 99] Wilke, W.: Löschmittel und Korrosionsschäden.  
VFDB-Zeitschrift 17 (1968) Nr. 1,  
S. 28-30, Nr. 2, S. 31-37
- [100] Friedman, R. Inhibition of opposed-jet methane-  
Levy, J.B.: air diffusion flames.  
The effects of alkali metal vapours and  
organic halides.  
Combustion and Flame 7 (1963) Nr. 3,  
S. 195-201
- [101] Edmondson, H. The burning velocity of methane - air  
Heap, M.P.: flames inhibited by methyl bromide.  
Combustion and Flame 13 (1969) Nr. 5,  
S. 472-478
- [102] Milne, T.A. The use of the counterflow diffusion  
Green, C.L. flame in studies of inhibition effec-  
Benson, D.K.: tiveness of gaseous and powdered agents.  
Combustion and Flame 15 (1970) Nr. 3,  
S. 255-264

- [103] Burgess, D.S. Spatial and temporal distributions  
Donalson, W.F. of Halon 1301 from a commercial  
Furno, A.K. extinguisher.  
Kuchta, J.M. Bureau of Mines Report of Investi-  
Summers, C.R.: gations (1971) Nr. 7515
- [104] Strasser, A. Methane flame extinguishment with  
Liebman, I. layered Halon or Carbon Dioxide.  
Kuchta, J.M.: Fire Technology 10 (1974) Nr. 1,  
S. 25-34
- [105] Biordi, J.C. On the inhibition of low pressure  
Lazzara, C.P. quenched flames by  $CF_3Br$ .  
Papp, J.F.: Combustion and Flame 24 (1975) Nr. 3,  
S. 401-403
- [106] Hayes, K.F. Inhibition by  $CH_3Br$  of  $CH_4$  / air  
Kaskan, W.E.: flames stabilized on a porous burner.  
Combustion and Flame 24 (1975) Nr. 3,  
S. 405-407
- [107] Friedrich, M.: Über die Löschwirkung von mehrfach und  
ungemischt halogenierten Kohlenwasser-  
stoffen.  
In: Chem. Zeitung 81 (1957) Nr. 16,  
S. 526-531
- [108] Dowling, J.H. Halon 1301 total flooding system for  
Ford, C.B.: "Winterthur Museum"  
Fire Journal 63 (1969) Nr. 6, S. 10-14
- [109] Ford, Ch.: Winterthur revisited (a history of a  
fire extinguishant Halon 1301 system).  
Fire Journal 69 Nr. 1, S. 81-82

- [110] Wilson, R.: The extinguishing thing.  
Fire Journal 64 (1970) Nr. 1, S. 17-21
- [111] Guise, A.B.: Note on limiting oxygen index for Halons.  
Fire Technology 6 (1970) Nr. 4,  
S. 320-322
- [112] Cholin, R.R.: How deep is deep? Use of Halon 1301  
on deep - seatet fires.  
Fire Journal 66 (1972) Nr. 2, S. 19-23
- [113] Morrison, M.E. The effekt of burning velocity  
Scheller, K.: inhibitors on the ignition of hydro-  
carbon - oxygen - nitrogen mixtures.  
Combustion and Flame 18 (1972) Nr. 1,  
S. 3-12
- [114] Ford, C.L.: Halon 1301 - Computerbrand - Prüf-  
schema.  
Vorläufiger Bericht  
E.I. du Pont de Nemours & Company, Inc.  
"Freon" Products Division  
Wilmington, Delaware 19898 (1972)
- [115] Williamson, H.V.: Halon 1301 - minimum concentrations  
for extinguishing deep - seated fires.  
Fire Technology 8 (1972) Nr. 4,  
S. 269-277
- [116] BCF (Halon 1211) für Computereinsatz  
PN-72-200-0.  
Imperial Chemical Industries Limited  
PO Box 13 The Heath Runcorn Cheshire  
(1972)

- [117] Curry, T.H.: Halon 1301 protects racing cars.  
Fire Journal 67 (1973) Nr. 2, S. 17-19  
u. S. 40
- [118] McHale, E.T.: Scaling of fire extinguishment data.  
Fire Technology 9 (1973) Nr. 3,  
S. 171-175
- [119] Schwenke, C.: Halone gegen Flugzeugbrände.  
VDI-Nachrichten (1974) Nr. 12, S. 11
- [120] Bajpai, S.N. Inerting characteristics of halogenated  
Wagner, J.P.: hydrocarbons (Halons).  
Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev.  
14 (1975) Nr. 1, S. 54-59
- [121] Yamashika, S. Halogenated poisonous gases produced  
Hosokai, R. from the thermal decomposition of  
Morikawa, T.: Halons applied to fire.  
Report of Fire Research Institute of  
Japan 24 (1974) Nr. 38, S. 1-8
- [122] Brennemann, J.J. Testing a total flooding Halon 1301  
Charney, M.: system in a computer installation.  
Fire Journal 68 (1974) Nr. 6, S. 105-109
- [123] Ford, C.B.: Talking fire protection systems.  
Fire Journal 69 (1975) Nr. 6, S. 80-81
- [124] Fielding, G.H. Halon 1301: mechanism of failure to  
Woods, F.J.: extinguish deep-seated fires.  
Fire and Flammability 6 (1975), S. 37-43
- [125] Hirst, R. The extinction of fires in aircraft  
Farenden, P.J. jet engines - part I, small-scale  
Simmens, R.F.: simulation of fires.  
Fire Technology 12 (1976) Nr. 4,  
S. 266-275 u. S. 289

- [126] Hirst, R.                   The extinction of fires in aircraft  
Farenden, P.J.: jet engines - part II, full - scale  
fire tests.  
Fire Technology 13 (1977) Nr. 1,  
S. 59-67
- [127] Dyer, J.H.                   The extinction of fires in aircraft  
Marjoram, M.J. jet engines - part IV, extinction of  
Simmons, R.F.: fires by sprays of Bromochlorodifluoro-  
methan.  
Fire Technology 13 (1977) Nr. 3,  
S. 223-230
- [128] Breen, D.E.:               Interactions in binary Halon mixtures  
used as fire suppressants.  
Fire Technology 13 (1977) Nr. 4,  
S. 261-265 u. S. 281
- [129] Scheichl, L.:               Brandschutztechnik in der Luftfahrt.  
Band 1,  
Bad Honnef: Osang Verlag (1973)

12. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Bezeichnung einiger für Löschzwecke verwendeter Halone nach [6, 7].

Chemische Bezeichnung	Chemische Formel	Halon Nr.	Buchstaben Bezeichnung	Kältemittel "R"
Tetrachlorkohlenstoff	$\text{CCl}_4$	104	CTC	10
Brommethan	$\text{CH}_3\text{Br}$	1001	MB	
Chlorbrommethan	$\text{CH}_2\text{ClBr}$	1011	CB, CBM	30B1
Difluordibrommethan	$\text{CF}_2\text{Br}_2$	1202	DDM, DB, DBDF	12B2
Difluorchlorbrommethan	$\text{CF}_2\text{ClBr}$	1211	BCF	12B1
Trifluorbrommethan	$\text{CF}_3\text{Br}$	1301	BTM	13B1
Tetrafluordibromäthan	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$	2402	TDE	114B2

Tabelle 2. Chemische und physikalische Eigenschaften einiger Halone  
 nach [2, 5, 6, 7, 9, 14, 17, 18, 19, 21, 23 - 53, 129].

Halon Nr.	1001	1011	1202	1211	1301	2402
Molekulargewicht	94,95	129,4	209,8	165,4	148,9	259,9
Bromgehalt		61,7	76,2	48,4	53,7	61,5
Siedepunkt bei 1013 mbar	3,6	67,8	24,2	-4,0	-57,8	47,5
Erstarrungspunkt	-94,0	-88,90	-141,6	-160,5	-168,0	-110,4
Dampfdruck bei 20 °C	1,93	0,18	0,89	2,53	14,63	0,36
bei 70 °C				9,15	43,0	2,0
Dichte bei 20 °C						
Flüssigkeit	1,732	1,92	2,29	1,83	1,575	2,18
Dampf gesättigt				17,4	116,8	3,95
bei 1013 mbar	3,974	5,78		6,8	6,25	
Spezifisches Dampfvolumen bei 1013 mbar und 20 °C	194,0	296,8	198,2	145,0	160,0	92,0
Kritische Temperatur		47,0	42,2	41,9	67,0	214,5
Kritischer Druck		0,641	0,844	0,713	0,745	0,790
Kritische Dichte				0,773	0,827	
Spezifische Wärme bei 20 °C						

Tabelle 3. Atomabstand und Bindungsenergie nach [36].

		Atomabstand $10^{-10}$ m	Bindungsenergie kJ/mol
C - H	CH <sub>4</sub>	1,09	413,7
C - F	CF <sub>4</sub>	1,36	485,7
C - Cl	CCl <sub>4</sub>	1,71	328,7
C - Br	CBr <sub>4</sub>	1,94	259,6

Tabelle 4. Zunahme der Löschwirkung von den Chlor- über die Brom- zu den Jodverbindungen und von den Halogenwasserstoffverbindungen zu den Methyl- und Äthylverbindungen nach [5].

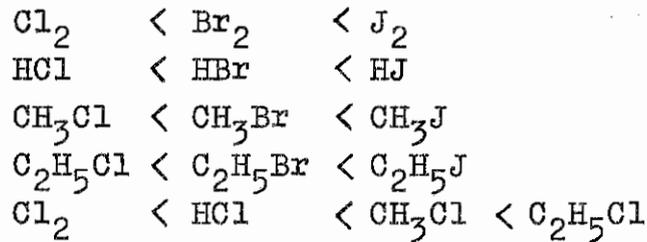


Tabelle 5. Löschwirksame Konzentration einiger Halone und Kohlendioxid nach [7, 13].

	Halon Nr.	Vol.-%
Tetrachlorkohlenstoff	104	11,5
Brommethan	1001	9,7
Difluorchlorbrommethan	1211	9,3
Chlorbrommethan	1011	7,6
Trifluorbrommethan	1301	6,1
Tetrafluordibromäthan	2402	4,9
Difluordibrommethan	1202	4,2
Kohlendioxid		29,5

Tabelle 6. Minimale löschwirksame Konzentration in Vol.-%  
für Halon 1301 und Halon 1211 in Luft nach  
[13, 18, 23, 39, 43, 50].

	alt	neu*	alt	neu*
Denaturierter Alkohol	4,0			
n-Butan	2,9		4,1	
i-Butan	3,3		3,9	
Koblendisulfid	12,0		2,7	
Kohlenmonoxid	1,0			
Äthan	3,3		5,6	
Äthylalkohol	4,0	5,0	5,0	5,0
Äthylen	7,2	8,2	6,5	8,6
n-Heptan	3,7	5,0	4,3	5,0
Wasserstoff	20,0		22,6	
Kerosin	2,8		4,2	
Benzin		5,0	3,9	5,0
Methan	2,0	5,0	4,3	5,0
Propan	3,2	5,2	4,8	5,8
Aceton		5,0	4,2	5,0
Naphtalin	6,6			
Holz, Papier	5,0			
Polyurethanschaum	3,0			

\* in den NFPA-Richtlinien 1977 und in [43] enthalten.

Tabelle 7. Physiologische Effekte von Halonen und ihren Brandfolgeprodukten: Human-Werte nach [1].

	Halon 1211/1301 ppm	HF ppm	HCl ppm	HBr ppm	F <sub>2</sub> ppm	Cl <sub>2</sub> ppm	Br <sub>2</sub> ppm	CO ppm
kurzzeitig tolerierbar (ca. 1 Min.)	über 50 000							
unterste Geruchsschwelle	geruchlos		1-5 15	2		0,02-0,3	0,01	geruchlos
MAK-Wert	1301:1000 1211:noch nicht festgelegt, vor- aussichtlich 1000	3	5	5	0,1	0,5	0,1	
unangenehm		22	35	5		2-4	0,5-1	1500-2000
Halsreizung usw.		ca. 10	10					1
kurzzeitig tolerierbar (bis 1/2 Std.), unter Umständen gefährlich lebensgefährlich/ tödlich		10	50	200		50 40-60		64
Löschkonzentration Pyrolyseprodukte- Konz. bei Raumflutungs- versuchen	30000-50000	50-250	1000-2000			1000		4000-10000
1211 Versuch a		10						
Versuch b							2,5	
Versuch c		76						
1301 Versuch a		12-250						
Versuch b								
Versuch c		101		58				

Quelle: MAK-Liste 1976

G.A. Purt, Einführung in die Brandlehre, S. 84, Rentschverlag 1969

Tabelle 8. Klassifizierung vergleichsweiser Lebensgefahren verschiedener Chemikalien der Underwriters' Laboratories (auf Tierversuchen basierend) nach [7, 19, 23, 45, 63].

Gruppe	Beschreibung	Beispiele
6 (geringste Giftwirkung)	Gase oder Dämpfe, die in Konzentrationen bis zu mindestens 20 Volumenprozenten bei Einwirkdauer in der Größenordnung von 2 Stunden keine Verletzungen hervorzurufen scheinen.	Trifluorbrommethan (Halon 1301) Difluordichlormethan (Halon 122)
5	Gase oder Dämpfe, die wesentlich weniger giftig sind als Gruppe 4, aber giftiger als Gruppe 6.	Difluorchlorbrommethan (Halon 1211) Dichlormethan (102) Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ), Äthan, Propan, Butan Tetrafluordibromäthan (Halon 2402) nach [8, 20]
4	Gase oder Dämpfe, die in Konzentrationen in der Größenordnung von 2 bis 2,5 % bei Einwirkdauer in der Größenordnung von 2 Stunden tödlich sind oder schwere Verletzungen hervorrufen.	Chlormethan (Halon 101) Difluordibrommethan (Halon 1202) Bromäthan (Halon 2001) Tetrafluordibromäthan (Halon 2402)
3	Gase oder Dämpfe, die in Konzentrationen in der Größenordnung von 2 bis 2,5 % bei Einwirkdauer in der Größenordnung von einer Stunde tödlich sind oder schwere Verletzungen hervorrufen.	Chlorbrommethan (Halon 1011) Tetrachlorkohlenstoff (Halon 104) Chloroform (Halon 103)
2	Gase oder Dämpfe, die in Konzentrationen in der Größenordnung von 1/2 bis 1 % bei Einwirkdauer von 1/2 Stunde tödlich sind oder schwere Verletzungen hervorrufen.	Brommethan (Halon 1001) Ammoniak
1	Gase oder Dämpfe, die in Konzentrationen in der Größenordnung von 1/2 bis 1 % bei Einwirkdauer in der Größenordnung von 5 Minuten tödlich sind oder schwere Verletzungen hervorrufen.	Schwefeldioxid

Tabelle 9. AIC - Werte einiger Halone und Kohlendioxid nach [2, 5, 7, 11, 14, 16, 21, 22, 31, 32, 37, 38, 39, 41, 50, 55, 59, 63, 70, 87, 88, 89, 90, 129].

Halon Nr.	AIC - Werte natürlicher Dampf mg/l	ppm	Gefährlichkeit nach [87]	AIC - Wert pyrolysiertes Dampf mg/l	ppm
104	180	27 500 28 000 29 000	weniger gefährlich als 1001	2	300
1001	21 23	5 000 5 900	gefährlich	60	9 600
1011	313 340	65 000	weniger gefährlich	20	4 000
1202	470 471	54 000	weniger gefährlich	16	1 850
1211	2200	324 000 350 000	ungefährlich	52	7 630 7 650
1301	5075	800 000 824 000 832 000 900 000	ganz ungefährlich	86	14 000 19 000
2402	1336 1340	126 000			5 000 1 600
CO <sub>2</sub> [50,59]		658 000			658 000

Die AIC-Werte in Gewichtsanteilen (mg/l) müssen nicht denen in Volumenanteilen (ppm) entsprechen, da sie aus verschiedenen Veröffentlichungen entnommen wurden.

Tabelle 10. ALC - Werte von Pyrolyseprodukte von Halon 1211 und Halon 1301  
 nach [11, 18, 19, 23, 39, 63].

Halon Nr.	HF ppm	HCl ppm	HBr ppm	Cl <sub>2</sub> ppm	Br <sub>2</sub> ppm	F <sub>2</sub> ppm	COF <sub>2</sub> ppm	COBr <sub>2</sub> ppm	COCl <sub>2</sub> ppm
1211	2 500	4 750	4 750	350	550	375	1 500	100-150	100-150
1301	2 500		1 500 4 650 4 750		550		1 500	100-150	

Tabelle 11. MAK-Werte für einige Halone und Vergleichsstoffe nach [2, 9, 31, 32, 35, 57, 62, 91, 95, 96, 129].

	mg/m <sup>3</sup>	ppm
Halon 104	65	10 25
Halon 1001	80	
Halon 1011	2100 1050	400 200
Halon 1202	860	100
Halon 1301	6100	1000
Aceton	2400	
Äthylalkohol	1900	
Benzol	80	
Isopropylalkohol	980	
Methylalkohol	260	
Terpentin	560	
Kohlendioxid		5000
Chlorwasserstoff		5
Phosgen		0,1

Die MAK-Werte in Gewichtsanteilen (mg/m<sup>3</sup>) müssen nicht denen in Volumenanteilen (ppm) entsprechen, da sie aus verschiedenen Veröffentlichungen entnommen wurden.

Tabelle 12. MAK - Werte in  $\text{mg}/\text{m}^3$  aus der UdSSR, DDR und USA nach [87].

Halon Nr.	UdSSR	DDR	USA
104	20	50	65
1001	1	50	80
1011	-	500	1050
1202	-	500	860
1301	-	5000	6100

Tabelle 13. Durchschnittliche Abtragung durch Halon 1211 nach [16].

	Gasphase $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{a}}$	Flüssigkeitsphase $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{a}}$
Stahl Werkst. Nr. 4571	95	121
Stahl blank Werkst. Nr. 1 0333 605	339	359
Weißblech	109	86
Aluminium	22	326
Nickel	23	86
Kupfer	29	54
Messing	28	100
Blei	5	242

Tabelle 14. Einwirkung einiger Halone auf Metalle nach Downing [97].

Halon	Halon-Nr.	Durchschnittliche Durchdringung in $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{a}}$					
		Stahl		Messing		Aluminium	
		trocken	naß	trocken	naß	trocken	naß
$\text{CF}_3\text{Br}$	1301	1,90	192,62	3,17	74,08	1,48	124,88
$\text{CF}_2\text{Br}_2$	1202	1,69	131,23	1,48	793,75	1,48	116,42
$\text{CHF}_2\text{Br}$	1201	2,33	165,1	17,99	635,0	0,63	105,83
$\text{CF}_2\text{ClBr}$	1211	2,33	173,57	12,7	920,75	1,69	114,3
$\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$	2402	3,17	296,33	12,06	814,92	0,85	105,83
$\text{C}_2\text{F}_3\text{ClBr}_2$	2312	5,08	264,58	783,17	2487,08	0,21	17,57
$\text{CCl}_4$	104	3,17	196,85	18,41	455,08	3175,0	114,3
$\text{CH}_3\text{Br}$	1001	88,9	1375,83	656,17	529,17	3175,0	3175,0
$\text{CH}_2\text{ClBr}$	1011	57,15	592,67	423,33	3429,0	3175,0	3175,0

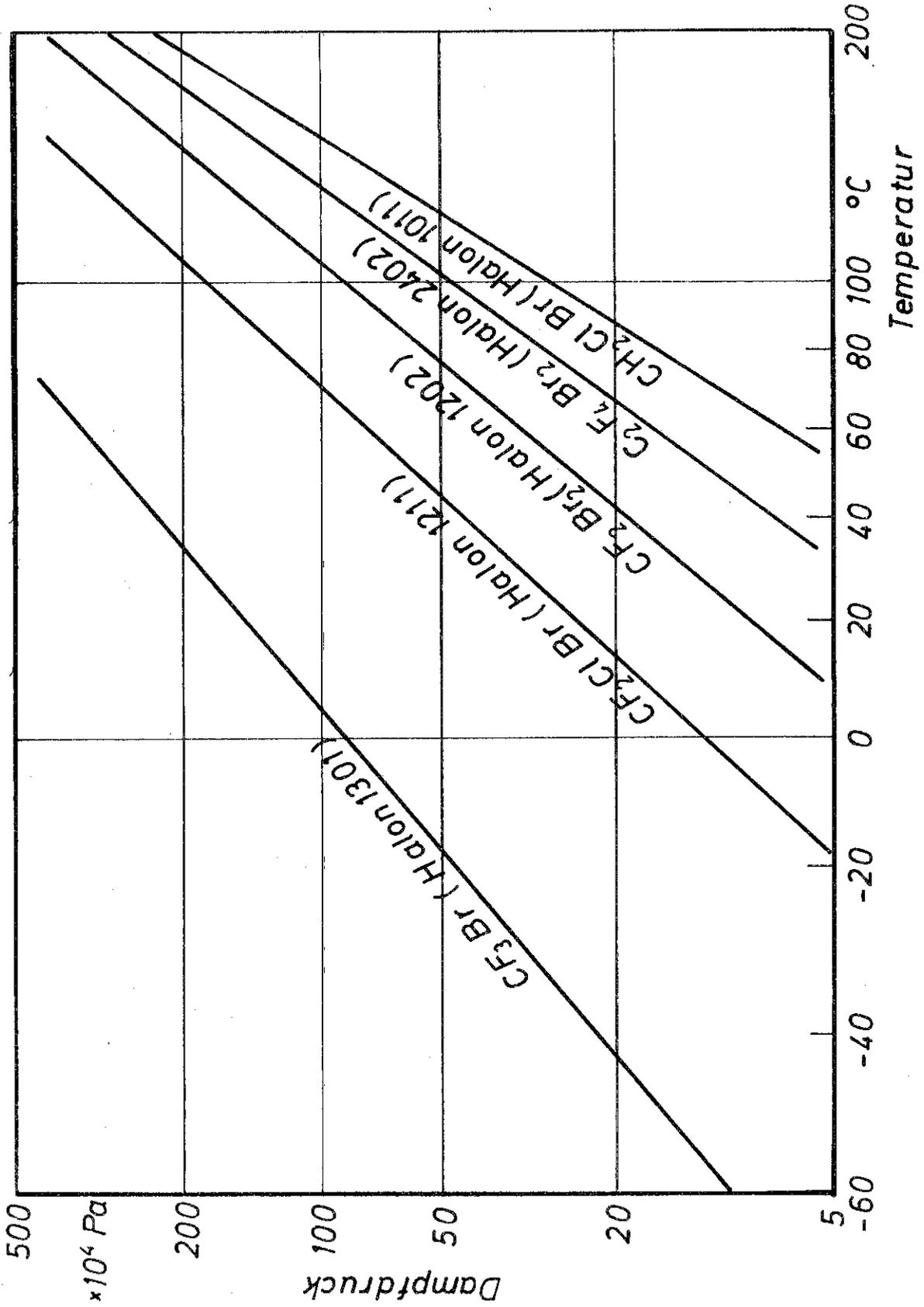


Bild 1. Dampfdruck einiger Halone als Funktion der Temperatur nach [7].

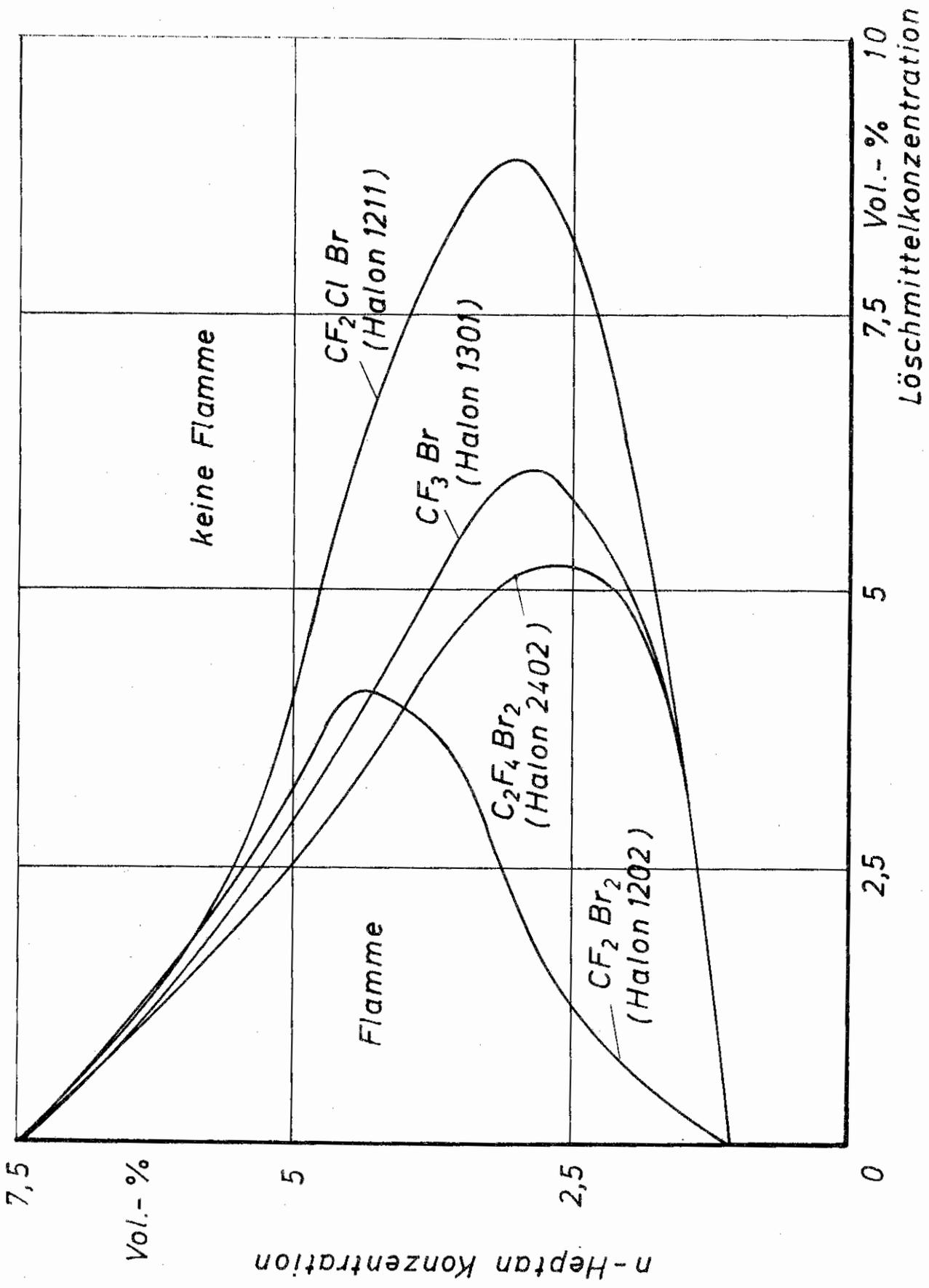


Bild 2. Änderung der Zündgrenzen von n-Heptan bei Zusatz von Halon 1202, Halon 1211, Halon 1301 und Halon 2402 in Abhängigkeit von der Löschmittelkonzentration nach [7,11].

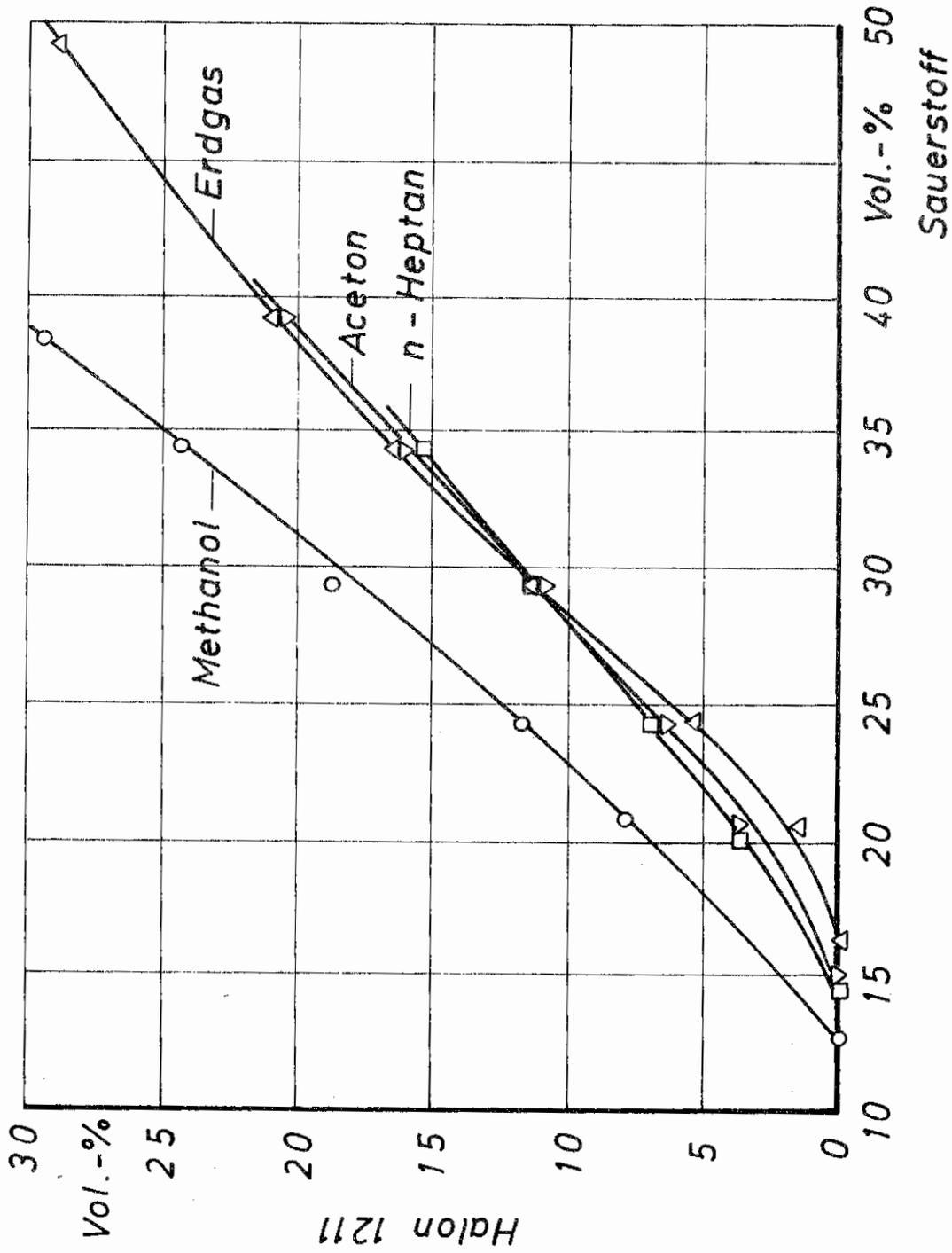


Bild 3. Löschrückständige Konzentration von Halon 1211 in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration nach [72].

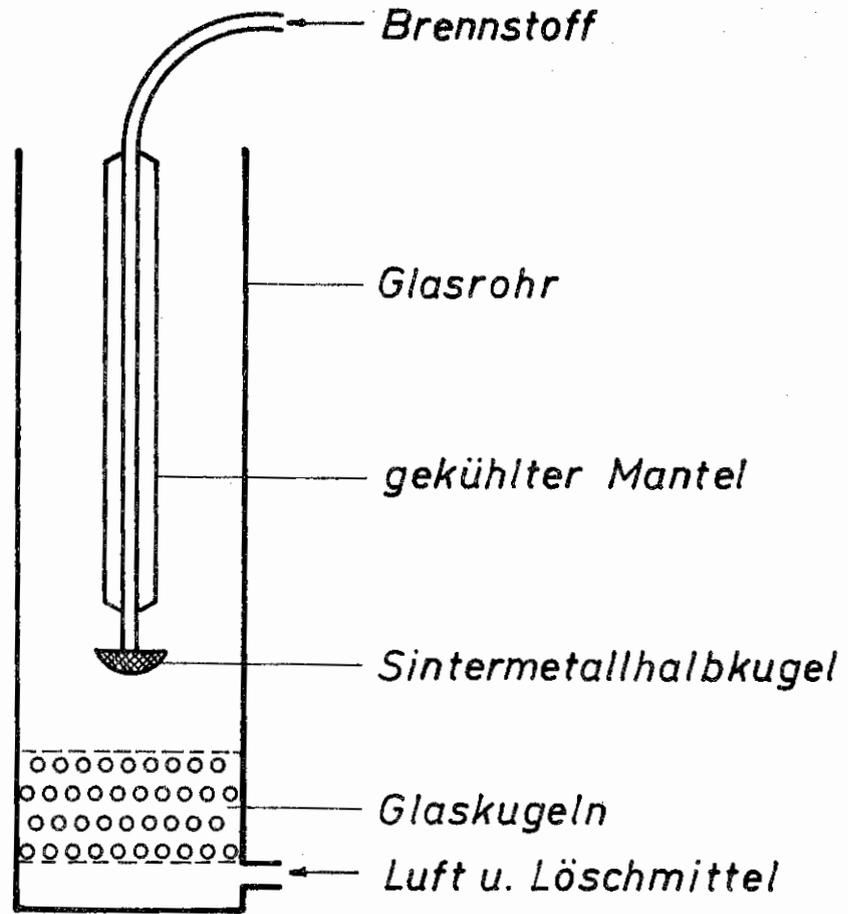


Bild 4. Schematische Darstellung des "Halbkugel-Brenners" nach [13, 72].

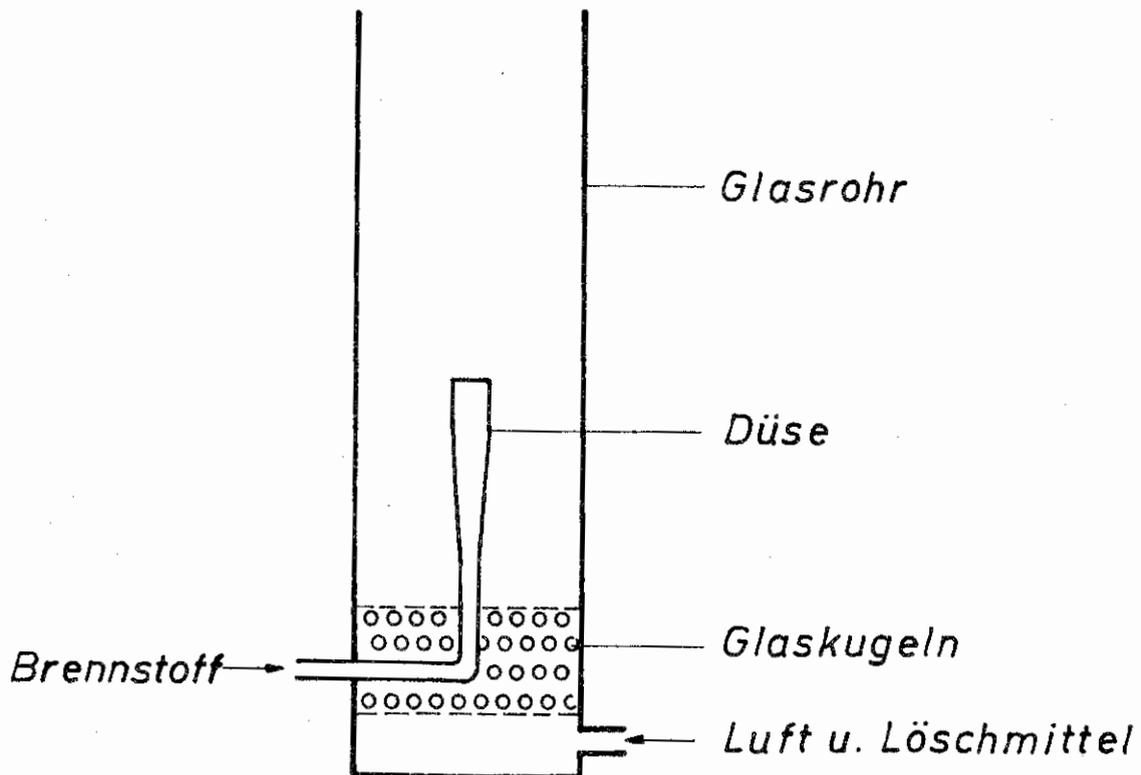


Bild 5. Schematische Darstellung des "Düsen-Brenners" nach [13, 72].

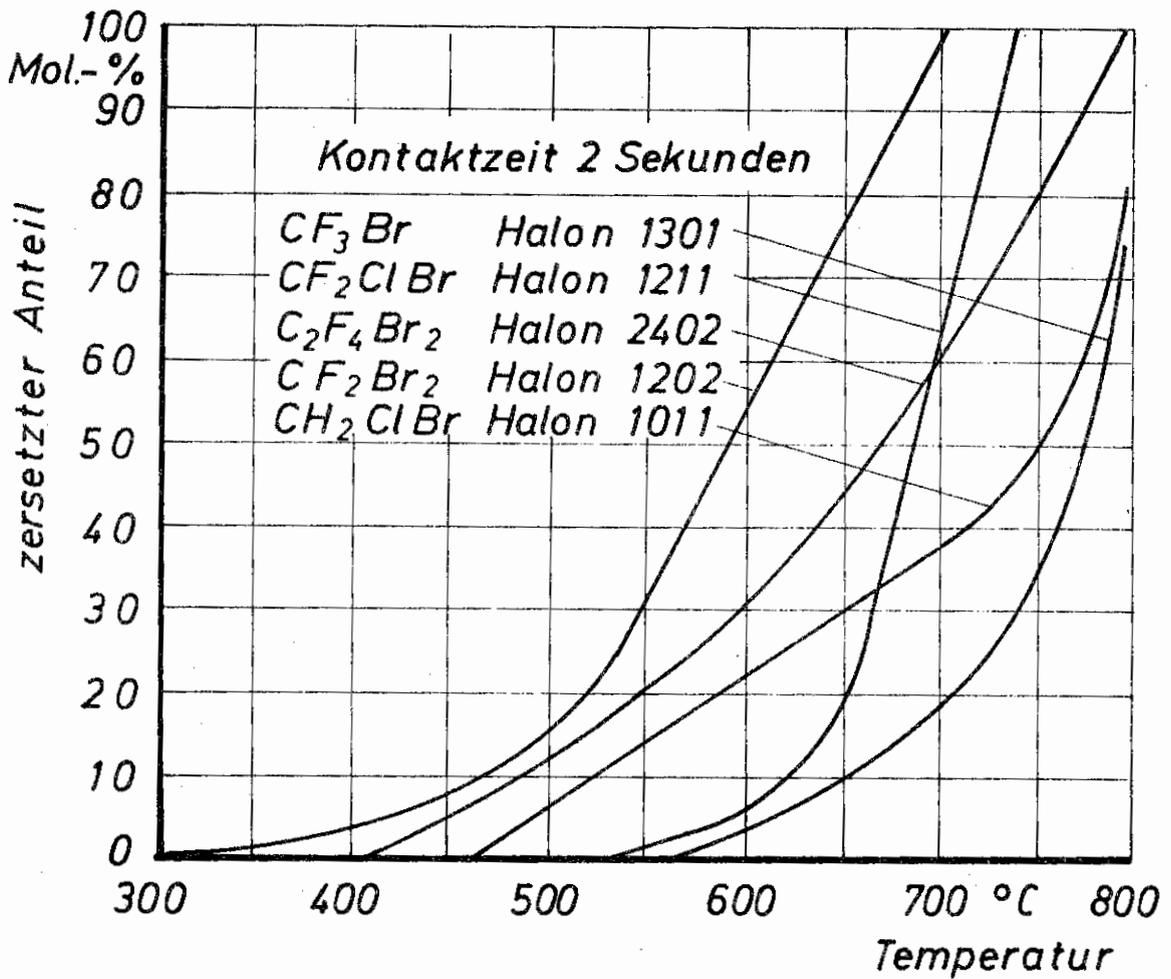


Bild 6. Thermische Zersetzung von Halon 1011, Halon 1202, Halon 1211, Halon 1301 und Halon 2402 nach [7].

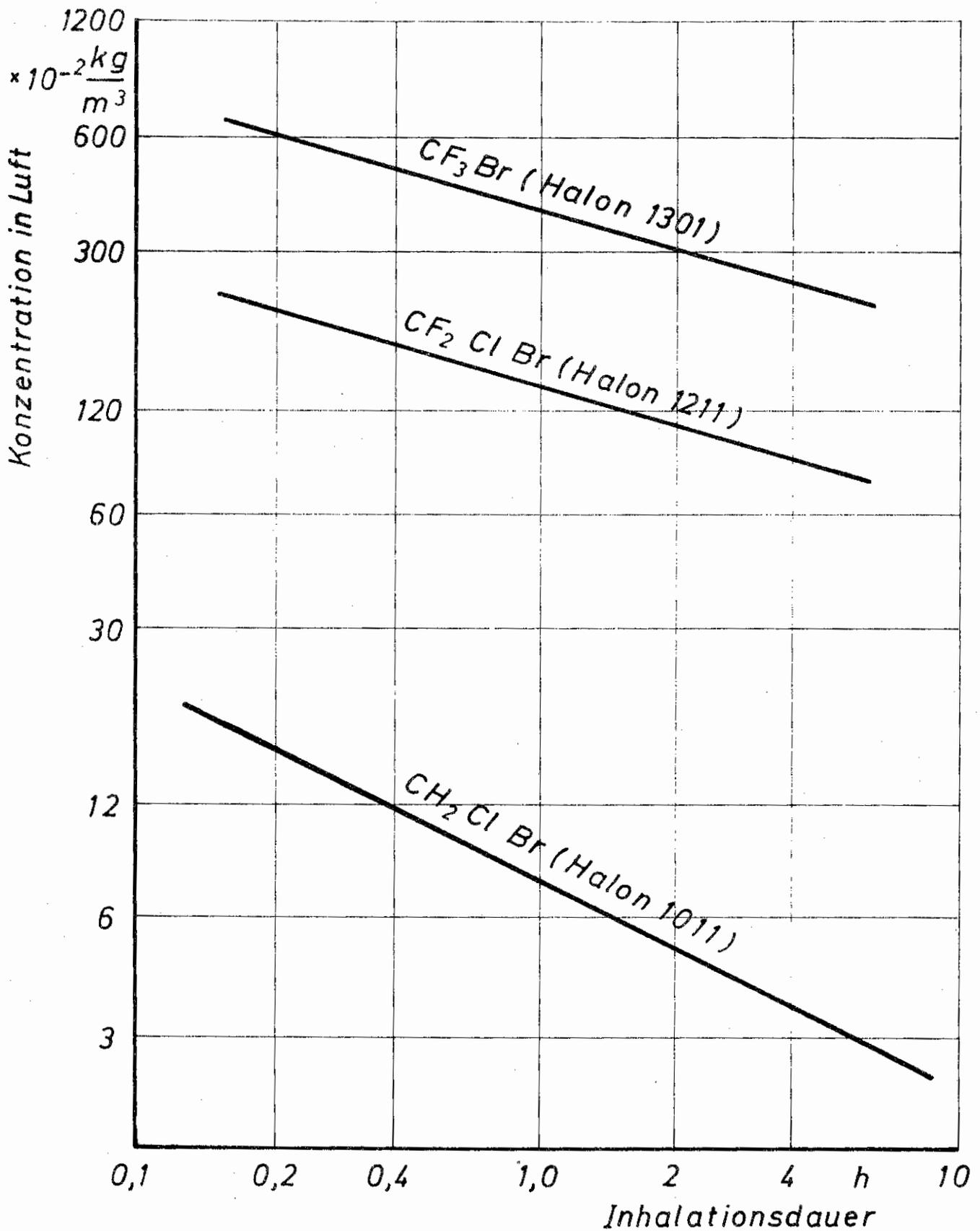


Bild 7. Toxizität einiger Halone nach [7,14].  
Konzentrationen, die bei Meerschweinchen gerade noch keine tödliche Wirkung ausüben (LTC=0) bei 1 atm und 21 °C.

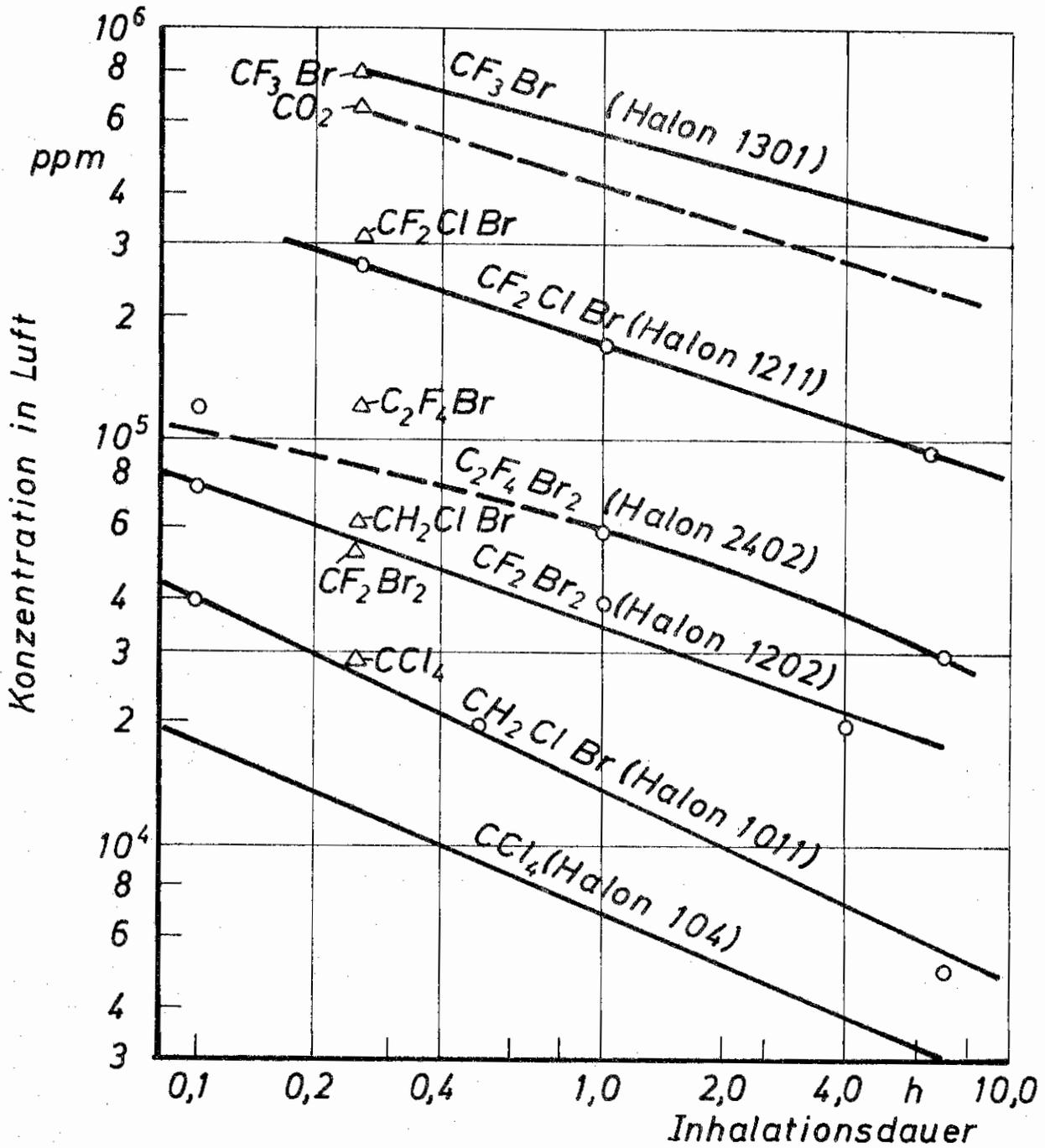


Bild 7. Fortsetzung

Toxizität einiger Halone und Kohlendioxid nach [7].  
Konzentrationen, die bei Ratten gerade noch keine  
tödliche Wirkung ausüben (LTC=0) bei 1 atm und 21 °C.

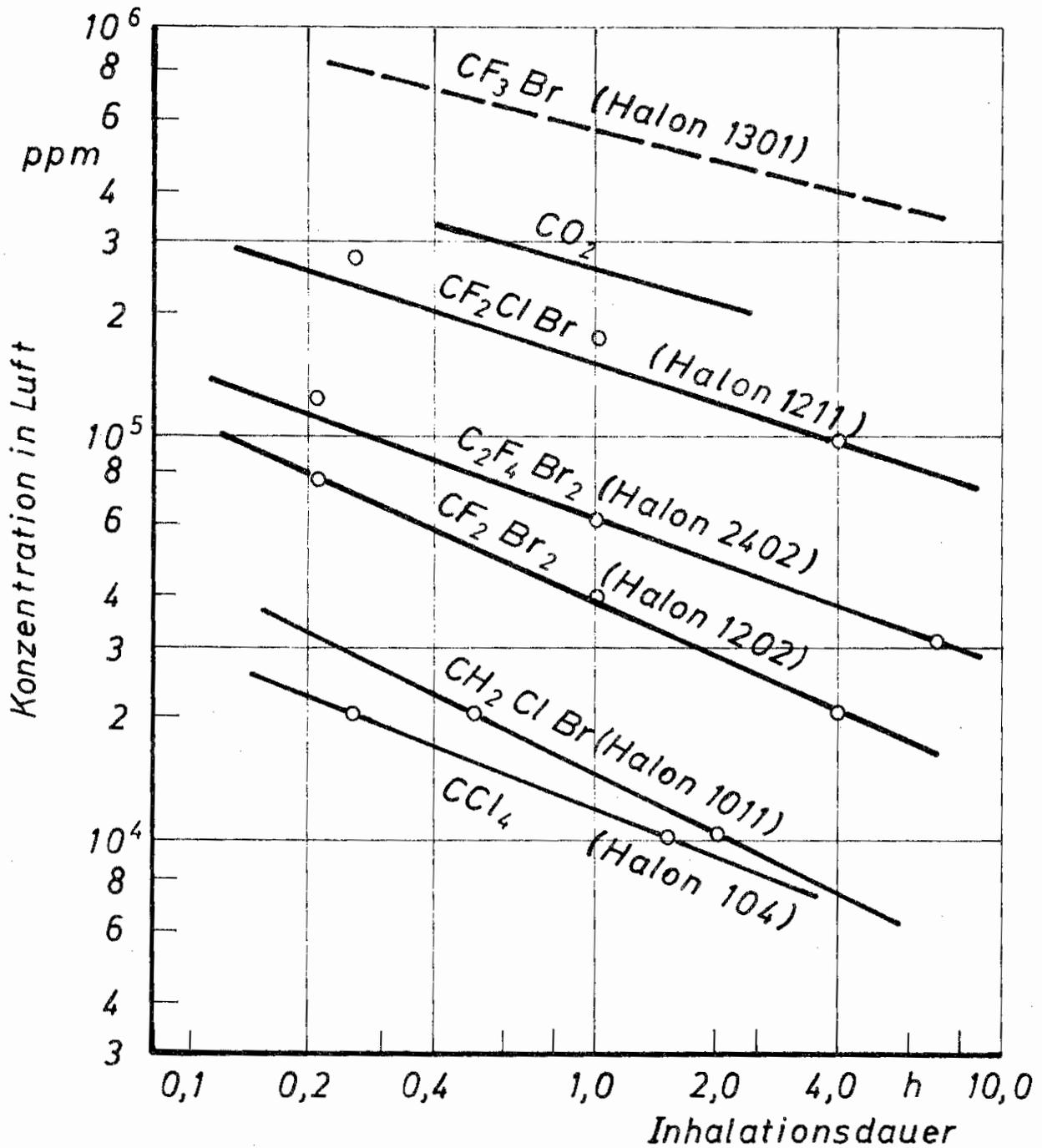


Bild 7. Fortsetzung

Toxizität einiger Halone und Kohlendioxid nach [7].

Konzentrationen, die bei Guinea-Schweinen gerade noch keine tödliche Wirkung ausüben (LTC=0) bei 1 atm und 21 °C.

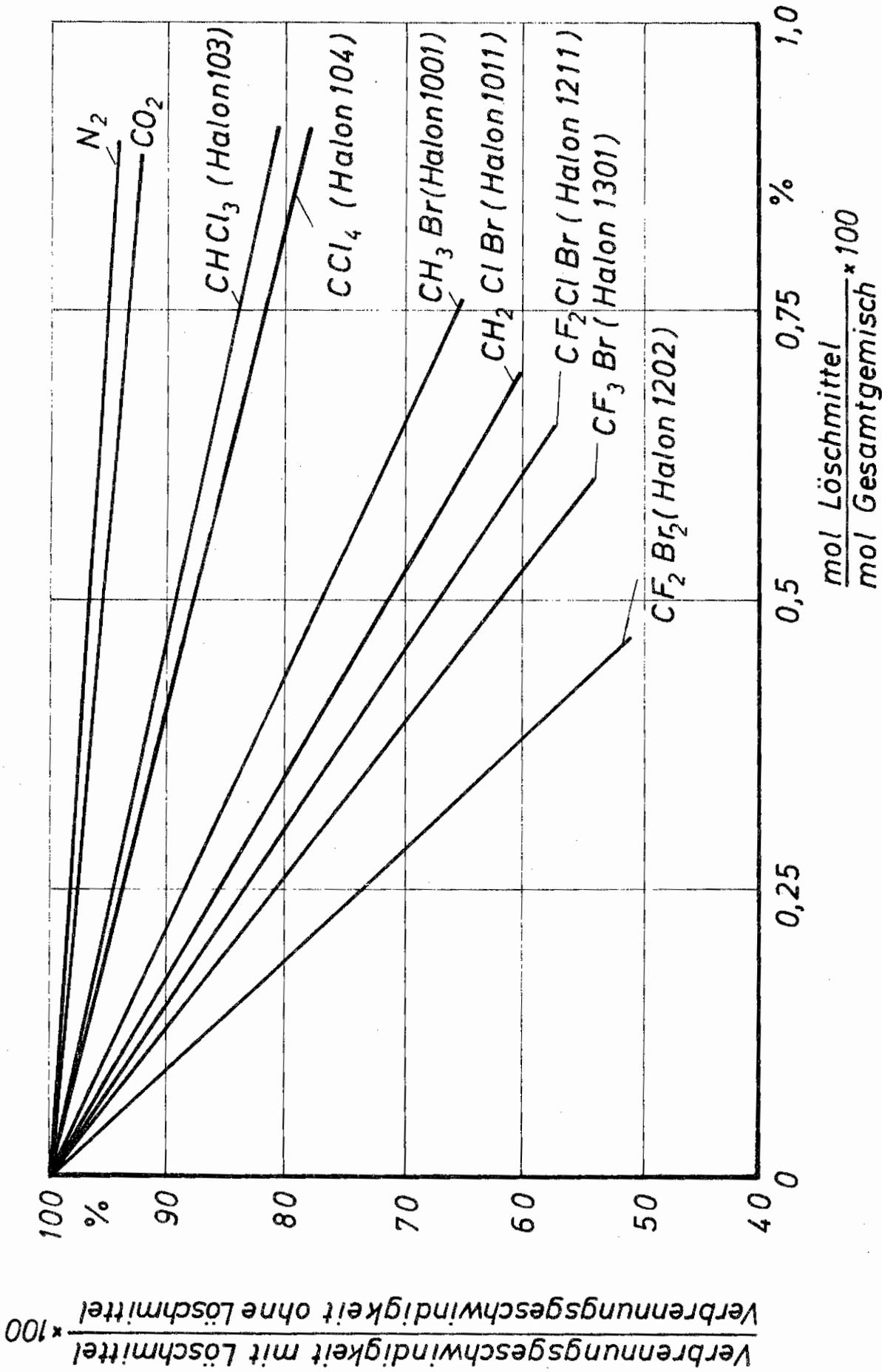


Bild 8. Einfluß einiger Halone, Kohlendioxid und Stickstoff auf die Verbrennungsgeschwindigkeit nach [52, 56]. Propan-Luft stöchiometrisch, Gemischtemperatur 20 °C.