

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchung der Löschverfahren und Löschmittel
zur Bekämpfung von Bränden gefährlicher Güter

(Fortsetzung des Forschungsberichtes Nr. 86)

96

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V – Unterausschuß “Feuerwehrangelegenheiten”

Forschungsbericht Nr. 96

**Untersuchung der Löschverfahren
und Löschmittel zur Bekämpfung
von Bränden gefährlicher Güter
(Fortsetzung des Forschungsberichtes Nr. 86)**

von
Dipl.-Ing. C. Axel Föhl
und
Dipl.-Ing. (FH) Peter Basmer

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1995

FA-Nr. 149 (4/93)
und 153 (4/94)

ISSN 0170-0060

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	GC/MS-MESZTECHNIK	10
2.1	Physikalische Grundlagen	10
2.2	Der Ion Trap Detector™	16
2.3	Das EM 640	18
3.	VERSUCHSAUFBAU	20
3.1	Versuchsstand	20
3.2	Probenahme	22
4.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	23
4.1	Polyethylen (PE)	23
4.2	Polystyrol (PS)	26
4.3	Elektrokabel mit PVC-Isolierung	28
4.4	Polyvinylchlorid-Hartschaum (PVC)	31
4.5	Hart-Polyvinylchlorid (PVC)	33
4.6	Polycarbonat (PC)	34
4.7	Polyoxymethylen (POM)	36
5.	VERSUCHSERGEBNISSE	38
5.1	Polyethylen (PE)	41
5.2	Polystyrol (PS)	45
5.3	Elektrokabel mit PVC-Isolierung	48
5.4	Polyvinylchlorid-Hartschaum (PVC)	51
5.5	Hart-Polyvinylchlorid (PVC)	54
5.6	Polycarbonat (PC)	55
5.7	Polyoxymethylen (POM)	56
6.	BEWERTUNG DER UNTERSUCHUNGEN	58
6.1	Bewertung des Meßverfahrens	58
6.2	Vergleich der Ergebnisse	63
6.3	Verbesserung des Meßverfahrens	66
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	69
8.	LITERATURVERZEICHNIS	73
9.	BILDER UND TABELLEN	82

1. EINLEITUNG

Das Ausmaß der Gefahr, die ein Brand gefährlicher Güter für den Menschen und für die Umgebung darstellen kann, soll abgeschätzt werden, weil die Kenntnis der freigesetzten Giftstoffe, ihrer Gefährlichkeit und ihrer Konzentration mitbestimmt, welche Schutz- und welche Löschmaßnahmen von den Einsatzkräften zu ergreifen sind. Dabei steht derzeit nicht die Frage nach dem Atemschutz für den Feuerwehrmann im Vordergrund, denn wenn man einmal beobachtet, mit welcher Ausrüstung die alltäglichsten Brände bekämpft werden, scheint diese momentan als beantwortet zu gelten, weil es – auch ohne daß im Brandherd die Anwesenheit polycyclischer oder -halogener Aromaten zu befürchten ist – Kohlendioxid und -monoxid ratsam erscheinen lassen, die Einsatzkräfte mit schwerem Atemschutz auszustatten.

Aber

- ob die Umgebung tatsächlich evakuiert werden muß, weil für die Menschen in der Nachbarschaft eine akute Gefahr besteht, oder ob es sinnvoller erscheint, Türen und Fenster schließen zu lassen;
- ob die Brandstätte eingedämmt werden muß, damit kontaminiertes Löschwasser und ausgeschwemmte Gefahrstoffe nicht Grund- und Oberflächenwasser verseuchen, oder ob es statthaft ist, sie in ausreichender Verdünnung in die Kanalisation zu spülen; und nicht zuletzt
- welches Löschmittel – Wasser, Schaum, Trockenlöschmittel... – eingesetzt werden soll,

hängt von der Zusammensetzung der Stoffe ab, die sich im Brandherd befinden, von ihrem eigenen Toxizitätspotential und von dem der Reaktionsprodukte, die sich während des Brandes und während des Löschens bilden können.

Als sich die Erkenntnis durchsetzte, daß nach einem Brand der durch das Wasser verursachte Schaden oftmals größer ist als der, den das eigentliche Feuer anrichtet,

wurden Alternativlöschmittel und Löschmittelzusätze entwickelt, um die Löschwirkung zu verbessern, beziehungsweise den Wasserbedarf zu verringern: Gasförmige Löschmittel beispielsweise für elektrische Schaltanlagen oder Zusätze von Quellkörpern, mit denen die Forschungsstelle für Brandschutztechnik vor einigen Jahren so erfolgreich experimentierte, daß es gelang, eine im vollentwickelten Brand stehende Gartenhütte mit einer Wassermenge von wenig mehr als 30 Litern zu löschen.

Aber das Chemikalienlager von SANDOZ war keine Gartenhütte... Die Folgen jenes Brandes sind bekannt: Verseuchung des Flusses und seiner Uferzonen fast auf der gesamten Länge und das, obwohl nur ein sehr geringer Teil ($\approx 2\%$) der dort gelagerten Chemikalien in den Fluß gespült worden ist [1].

Bis zu diesem Ereignis wurden Löschmittel – das gilt für alle Löschmittel, nicht nur für Wasser – ausschließlich nach ihrer Löschwirkung beurteilt: Sie sollten ein Schadensfeuer eindämmen, im wesentlichen durch Abkühlung des Brandgutes oder durch Verdrängung des zur Verbrennung erforderlichen Sauerstoffs. Nach SANDOZ war das in dem Sinn zu überdenken, daß Löschmittel und -verfahren nicht nur nach ihrer Löschwirkung und nach möglichen Unverträglichkeiten mit dem Brandgut beurteilt werden müssen, sondern auch danach, in welchem Ausmaß Böden, Gewässer und Atmosphäre kontaminiert werden. Wie ernst gerade auch letzteres, die Atmosphäre, genommen wird, ist daran zu erkennen, daß das Halon-Löschverfahren in Deutschland inzwischen verboten wurde.

Sicher bleibt Wasser wegen seiner guten Löschwirkung einerseits, wegen seiner hohen Verfügbarkeit und seiner relativ einfachen Handhabung andererseits das weitaus am häufigsten verwendete Löschmittel. Doch neben der Gefahr, daß es mit verschiedenen brennbaren und auch nicht brennbaren Stoffen heftig bis explosiv unter Freisetzung von großen Wärmemengen, brandförderndem Sauerstoff, brennbaren oder toxischen Reaktionsprodukten reagieren kann, ist zu berücksichtigen,

daß sich die brennenden Chemikalien oder ihre Reaktionsprodukte im Löschwasser lösen können und mit diesem dann im Erdreich versickern und das Grundwasser verderben oder Oberflächengewässer verseuchen, weil sie mit dem Löschwasser in Flüsse oder Seen geschwemmt werden. Die durch den SANDOZ-Brand ausgelöste Umweltkatastrophe hat jedenfalls verdeutlicht, daß Wasser zum Löschen von Bränden von Chemikalien und anderen gefährlichen Stoffen nicht länger unbedenklich eingesetzt werden darf, wenn derartige Sekundärschäden zu befürchten sind.

In welchen Fällen Wasser und in welchen besser ein anderes Löschmittel verwendet werden sollte, ist in speziellen Handbüchern nachzuschlagen. Sie enthalten Zusammenstellungen von gefährlichen Chemikalien und ihren Eigenschaften. Leider sind diese Zusammenstellungen nicht kongruent – weder was die Auswahl der Stoffe noch was die Beschreibung ihrer Gefährlichkeit betrifft – und dementsprechend variieren die empfohlenen Maßnahmen, wie und mit welchen Mitteln Brände zu löschen oder Leckagen einzudämmen seien. Als Beispiel einer solchen Variation mögen die Anweisungen zur Bekämpfung von Feuer im “Handbuch der gefährlichen Güter” (Bild 1 [2]) und die Hinweise zum Brandfall in den “Merkblättern Gefährliche Arbeitsstoffe” (Bild 2 [3]) für den Fall gelten, daß sich Chrom-Schwefelsäure im Brandherd befindet. Die selbst nicht brennbare Chrom-Schwefelsäure ist ein in der chemischen Industrie verwendetes, stark ätzendes und oxidierendes Reinigungsmittel. “Vor Feuchtigkeit schützen und Trockenlöschpulver einsetzen” kontrastiert mit “Brandbekämpfung mit viel Wasser im Sprühstrahl”. Solche Differenzen gilt es aufzuklären, weil das Ergreifen der richtigen Notfallmaßnahmen nicht davon abhängen darf, aus welchem Handbuch der jeweils verantwortliche Einsatzleiter seine Gefahrstoff-Informationen bezieht.

Die Durchsicht der einschlägigen Handbücher und gesetzlichen Verordnungen [2...39] zeigt, daß bei vielen chemischen Stoffen der gegenwärtige Kenntnisstand über die Wirkung der üblichen Löschmittel noch so mangelhaft ist, daß es offenbar nicht möglich ist, ein optimales Löschmittel zu empfehlen. Dies ist sicherlich auch

dadurch begründet, daß in zuverlässigen chemischen Handbüchern Löschangaben bisher weitgehend fehlen.

Der SANDOZ-Brand hatte nicht nur die Kontamination des Rheins zur Folge, sondern auch eine Vielzahl öffentlicher und veröffentlichter Reaktionen:

- Der deutsche Umweltminister forderte von der chemischen Industrie rückhaltlose Information der Öffentlichkeit und den weiteren Ausbau ihres hohen Sicherheitsstandards [40];
- die Firma SANDOZ begann, ihre Produktions- und Lagerstätten mit ortsfesten Löschanlagen und mit Löschwasser-Rückhaltebecken auszurüsten [41];
- der Verband der Chemischen Industrie (VCI) veranstaltete ein Symposium über Brände und ihre Vermeidung [42];
- die Verleger und Software-Hersteller produzierten eine Flut von Gefahrstoffhand- und -taschenbücher, elektronischen Diagnosesystemen und -dateien [43...48], die natürlich die Widersprüche in den etablierten Nachschlagewerken weiter verbreiten; und
- die Forschungsstelle für Brandschutztechnik erhielt den Auftrag, diesen Widersprüchen nachzuspüren.

Bei den Stoffen, die im Brandfall ein besonderes Gefahrenpotential entfalten, ist zu unterscheiden, ob sie stationär, das heißt, in Lagern, bei der Produktion, im Handel oder bei der Weiterverarbeitung auftreten oder beweglich als Gefahrgut-Transporte. Für beide Fälle sind unterschiedliche Vorsorgemaßnahmen entwickelt worden.

Für Gefahrgut-Transporte auf Schiene und Straße und zur See existieren seit über 20 Jahren Kennzeichnungssysteme, die weitgehend übereinstimmen und nahezu im gesamten europäischen Raum Gültigkeit haben [4...15]: Deutlich sichtbare Kennziffern signalisieren, zu welcher Gefahrenklasse die Ladung gehört. Mit ihrer Hilfe können die Einsatzkräfte im Falle eines Unfalls oder Brandes entscheiden, welche

Maßnahmen zu ergreifen sind. Diese Entscheidungen werden erleichtert durch das Transportunfall-Informations- und -Hilfeleistungssystem (TUIS) der chemischen Industrie [49...52].

Das Gefahrenpotential ortsfester Gefahrstoffagglomerationen in Industrie und Handel stand im Mittelpunkt des erwähnten VCI-Symposiums [42], nachdem die gravierende Schädigung des Rheins durch den SANDOZ-Brand drastisch vor Augen geführt hatte, daß bei einem Chemie-Brand nicht nur die Wirkungen von Hitze, Druck und eventuell entstehenden giftigen Gasen zu berücksichtigen sind, sondern daß auch die unkontrollierte Verschleppung von Gemischen aus Löschmitteln und gefährlichen Stoffen in den Boden, in das Wasser und in die Luft verhindert werden muß [53, 54], indem beispielsweise

- auch das nach einer Minimierung der Löschwassermenge noch anfallende Restwasser in geeigneten Rückhaltesystemen aufgefangen wird [54...57];
- die Pläne für die Alarmierung der Feuerwehr optimiert werden [58...60], möglicherweise in der Art, daß mit Hilfe eines Gefahrstoff-Katasters [61] die Einsatzkräfte schon mit dem Einlaufen des Alarms darüber informiert werden, welchen Gefahrstoffen sie im Brandherd konfrontiert sein werden; und dadurch, daß
- "grundsätzlich untersucht wird, welche Stoffe im Brandfalle gebildet werden können und wie ihre Gefährlichkeit für Mensch und Umwelt einzuschätzen ist" [53].

Weil mit der zunehmenden Zahl gefährlicher Stoffe, die produziert, transportiert, gelagert oder verarbeitet werden, die Notwendigkeit wächst, über gesicherte Informationen für den Schadensfall verfügen zu können, lautete der Tenor dieses Symposiums [42]: "Wir sollten mehr darüber wissen, welche Art der Brandbekämpfung jeweils den größten Erfolg verspricht" [53].

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde beauftragt,

1. an Hand von Brandversuchen zu ermitteln, welche feuerwehrrelevanten Giftstoffe während eines Brandes und beim Löschen gebildet werden, und
2. den Wissensstand über die Wirkung der Löschmittel soweit zu verbessern, daß Aussagen darüber möglich werden, welches Löschmittel im Brandfall für einen bestimmten Stoff eindeutig gut, welches weniger gut, welches nicht geeignet oder welches gar gefährlich ist.

Eine klare, eindeutige Angabe kann von ausschlaggebender Wichtigkeit für die Effizienz der Brandbekämpfung und den Schutz von Mensch und Umwelt sein. Für die Stoffe, für die Wasser als Löschmittel weniger geeignet bis gefährlich ist, ist zu untersuchen, welche anderen Mittel zum Löschen in Frage kommen. Kriterium für die Anwendbarkeit eines Alternativ-Löschmittels muß seine Wirksamkeit beim Eindämmen des Brandes und die Umweltverträglichkeit möglicher Reaktionsprodukte von Brandgut und Löschmittel sein.

In den ersten Berichten über diesen Forschungsauftrag [62, 63] wurden die Stoffe aufgelistet, die nach Angaben in der einschlägigen Literatur nicht mit Wasser gelöscht werden dürfen. Als Grundlage für diese Liste dienten die in der Störfallverordnung [64, 65] genannten Chemikalien. In einer synoptischen Darstellung (wie in Tabelle 1) wurden die sechs wichtigsten Gefahrstoff-Kennzeichnungssysteme auf diese Stoffe angewandt. Es stehen jeweils nebeneinander:

- in Spalte 4 und 5: die Identifikationsnummer und die Gefahrenklasse der Vereinten Nationen (UN) [4],
- in Spalte 7: der Code der National Fire Protection Association (NFPA-Diamant) [2, 17],
- in Spalte 8: der Hazchem-Code der Londoner Feuerwehr [18],

- in Spalte 10: die Arbeitsplatzkennzeichnung nach der berufsgenossenschaftlichen Unfallverhütungsvorschrift VBG 125 – in der Tabelle durch ⊕ symbolisiert [3, 22, 24, 25],
- in Spalte 11: die Kemler-Zahl [8...12] (in Deutschland offiziell: Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr) und
- in Spalte 13: die Risiko- und Sicherheitssätze der Gefahrstoff-Verordnung (GefStoffV) [20...22].

Diese Zusammenstellung ist selbstverständlich lückenhaft und muß deshalb fortgeschrieben und vervollständigt werden – ebenso wie die zu Rate gezogenen Handbücher. Die weiteren Spalten in dieser Zusammenstellung enthalten die Nummer, unter der die Substanz beim Chemical Abstracts Service registriert wird (Spalte 3: CARN [66]) und Quellenangaben, die sich auf die wichtigsten Gefahrstoff-Nachschlagewerke beziehen (Spalte 6 und 9 [2, 3]). Bedauerlicherweise ist die Fortführung der Merkblattsammlung von Graf-Eulenburg-Webner (Spalte 12: GEW [34]) eingestellt worden, doch ist nach Auskunft des Verlages vorgesehen, ein ähnlich feuerwehr-spezifisches Nachschlagewerk wieder aufzulegen.

Um die Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Kennzeichnungssystemen zu prüfen, wurde zuerst kontrolliert, welche Stoffe in den konsultierten Gesetzestexten und Nachschlagewerken [2...4, 8...12, 17, 18, 20...22] enthalten sind. Schon hier zeigt sich eine große Diskrepanz: Lediglich die 20 in Tabelle 1 aufgeführten, nicht mit Wasser zu löschenden, Substanzen werden in allen verwendeten Zusammenstellungen genannt! Und untersucht man nun ihre inhaltliche Kongruenz, so zeigt sich, daß die oben genannten 6 Kennzeichnungssysteme tatsächlich bei den Alkalimetallen Kalium, Lithium, Natrium von Wasser abraten: Diese drei Stoffe

- gehören zur UN-Gefahrenklasse 4.3¹⁾ und
- führen
 - das durchgestrichene W im NFPA-Diamanten²⁾,

1) Stoffe, die bei Berührung mit Wasser brennbare Gase entwickeln [4]

2) kein Wasser zum Löschen verwenden [2, 17]

- die 4 im Hazchem-Code³⁾ und
- das X in der Kemler-Zahl⁴⁾. Sie
- benötigen zur Kennzeichnung
 - ihrer Verpackung⁵⁾ die Risikosätze R 14 und R 15 und den Sicherheitssatz S 43 und
 - des Arbeitsplatzes das Schild mit dem rot durchgestrichenen Wassereimer⁶⁾ [3, 22].

Aber dies sind in der Tat die einzigen drei Stoffe, bei denen sich diese Übereinstimmung findet. Bei allen anderen gibt es Abweichungen, sei es, daß der entsprechende Code fehlt, weil er von der dafür zuständigen Behörde noch nicht zugeteilt wurde, sei es, daß das jeweilige Gefährdungspotential eben unterschiedlich beurteilt wird, wie an dem Beispiel der Chrom-Schwefelsäure deutlich wird:

- das "Handbuch der gefährlichen Güter" [2] verzeichnet den NFPA-Code 303 W⁷⁾ und den Hazchem-Code 4 W⁸⁾,
- während die "Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe" [3] weder den VBG-Eimer, noch das Kemler-X und auch nicht die entsprechenden R- und S-Sätze enthalten.

³⁾ nur Trockenlöschmittel verwenden [18]

⁴⁾ reagiert in gefährlicher Weise mit Wasser [8...12]

⁵⁾ R 14: reagiert heftig mit Wasser [20...22],
R 15: reagiert mit Wasser unter Bildung leicht entzündlicher Gase,
S 43: zum Löschen ... verwenden, geeignetes Löschmittel ist vom Hersteller anzugeben, wenn Wasser die Gefahr erhöht, ist anzufügen: Kein Wasser verwenden!

⁶⁾ Verbot, mit Wasser zu löschen [24, 25]

⁷⁾ hohe Gesundheitsgefahr, nicht brennbar, chemisch sehr aggressiv, kein Wasser zum Löschen verwenden [17]

⁸⁾ nur Trockenlöschmittel verwenden, eindeichen, eindringen in die Kanalisation und in offene Gewässer unterbinden, kann heftig bis explosionsartig reagieren, Vollschutz-Anzug und umluft-unabhängiges Atemgerät erforderlich [18]

Um die Frage nach den angemessenen Maßnahmen im Falle eines Gefahrstoffbrandes richtig beantworten zu können, ist es erforderlich zu wissen, welche Stoffe sich im Brandherd befinden oder sich durch chemische Reaktionen bilden können. Wenn keines der oben aufgeführten Kennzeichnungs- und Informationssysteme zur Verfügung steht, muß analysiert werden. In der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wird zur Analyse die Gaschromatographie/Massenspektrometrie (GC/MS) verwendet – unter anderem auch um zu prüfen, inwieweit sich dieses Verfahren für den Einsatz bei der Feuerwehr eignet, da diese in zunehmendem Maße zur Bestimmung der bei Bränden mit gefährlichen Gütern auftretenden Stoffe auf analytische Methoden zurückgreifen muß und deshalb erwartet, daß ein derartiges Analysegerät bei solchen Feuerwehreinsätzen von großer Bedeutung sein wird [67...73].

Neben der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) befaßt sich auch die Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) mit der Untersuchung der Feuerwehrauglichkeit dieses Meßverfahrens, indem am Arbeitsbereich Meßtechnik ein im Bundeswehreinsatz als Kampfgasspürgerät erprobtes Instrument weiterentwickelt wird [74...78]. Im Unterschied hierzu arbeitet die FFB mit einem Laborgerät, dessen lange Trennsäule Gasgemische zwar besser zu trennen vermag, das in puncto Mobilität und Schnelligkeit dem Gerät der TUHH jedoch unterlegen ist.

Die Ergebnisse der beiden Geräte differieren, was die beiden in Bild 3 und 4 dargestellten Analysen verdeutlichen sollen [79]: Bei der Verbrennung von PVC-Hartschaum zusammen mit unbehandeltem Fichtenholz wurden gleichzeitig mehrere Rauchgasproben entnommen und sowohl an der FFB als auch an der TUHH untersucht. Lediglich bei einem Bruchteil (25 % beziehungsweise 50 %, je nach Bezug) der detektierten Substanzen stimmen sie überein. Darüber hinaus hätte sich im Brandrauch des Holzes nach einer Untersuchung, die mit der Analyseapparatur des VCI durchgeführt worden ist [80], auch noch Biphenylen und Phenanthren finden lassen müssen, Stoffe, die sowohl an der TUHH als auch an der FFB bei anderer Gelegenheit detektiert wurden, hier jedoch nicht. Umgekehrt wurden in der VCI-

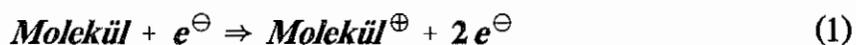
Analyse gerade jene Stoffe (Benzol, Toluol, Xylol und Styrol), bei denen die Ergebnisse der TUHH und die der FFB übereinstimmen, nicht gefunden. – In einer gemeinsamen Versuchsreihe der FFB und der TUHH sollten diese Differenzen aufgeklärt werden.

2. GC/MS-MESZTECHNIK

2.1 Physikalische Grundlagen

Die Massenspektrometrie fußt auf der Massenabhängigkeit der Flugbahn eines elektrisch geladenen Teilchens in einem elektrischen oder magnetischen Feld. Grundsätzlich besteht deshalb ein Massenspektrometer aus folgenden drei Teilen: einer Einrichtung zur Erzeugung der Ladungsträger (Ionenquelle), einer Einrichtung zum Trennen der Ladungsträger (Analysator) und einer Einrichtung zum Auffangen der Ladungsträger (Registrator). Leistungsfähige MS-Analysegeräte basieren auf der Koppelung mit anderen Meßverfahren. An erster Stelle ist hier die Verbindung mit der Gaschromatographie zu nennen [81].

Die Moleküle der zu analysierenden Gasproben werden im Hochvakuum durch Beschuß mit Elektronen, die von einem Heizdraht emittiert werden, ionisiert:



Das Energieniveau dieser Elektronen (etwa 70 eV) liegt deutlich über der Ionisationsenergie der meisten organischen Verbindungen, weshalb sich an die Bildung des Molekül-Ions ein Zerfallsprozeß anschließt, der ein für jede chemische Verbindung charakteristisches Spektrum verschieden schwerer Bruchstücken produziert, das gerne als "Fingerabdruck" dieser Substanz apostrophiert wird. Die Mechanismen dieser Fragmentbildung in der Ionenquelle des Massenspektrometers wurden an Molekülen von vielen organischen Verbindungen untersucht. Es konnten Regeln

entwickelt werden, die es erlauben, auch Massenspektren komplexer Verbindungen zu interpretieren. Wegen der hohen Meßgenauigkeit (im ppm-Bereich) können mit diesem Verfahren und mit Hilfe von Tabellen, in denen die Massendefekte der am Molekül- und am Fragment-Ion beteiligten Atome und ihre Stöchiometrie verzeichnet sind, die Bruttoformeln chemischer Verbindungen ermittelt werden [81].

Das klassische Massenspektrometer nutzt die Querschleunigung, die ein elektrisch geladenes Teilchen erfährt, das ohne diese Beeinflussung in gleichförmiger Bewegung verharren würde, wenn es auf seiner Flugbahn ein magnetisches oder elektrisches Feld durchläuft. Die Ablenkung von der eigentlich geradlinigen Bahn verhält sich proportional zur Ladung des Teilchens und umgekehrt proportional zu seiner Masse. Nach dem Durchlaufen des ablenkenden Feldes müssen alle Teilchen mit gleicher spezifischer Ladung (= Verhältnis von Teilchen-Ladung zu Teilchen-Masse) im Auffänger in einem Punkt gebündelt werden, weil erst dadurch die für die hohe Meßgenauigkeit erforderliche Intensität gewonnen wird. Durch die Kombination und durch einen entsprechenden Verlauf von elektrischen und magnetischen Feldern lassen sich sowohl diejenigen Teilchen fokussieren, deren Geschwindigkeiten sich am Feldeingang dem Betrage nach, als auch jene, bei denen sie sich der Richtung nach unterscheiden.

In anderen massenspezifischen Detektoren wird die Möglichkeit genutzt, Ionen in Potentialmulden von geeignet geformten elektrischen Feldern hin- und herschwingen zu lassen und sie entweder in diesem Feld gefangen zu halten oder gezielt auszulernen. Das erstere kennzeichnet die Massenselektion nach dem Stabilitäts-, das zweite die nach dem Instabilitätsmodus [82].

Auf dem Stabilitätsmodus beruht beispielsweise die Funktion des Quadrupol-Massenspektrometers: Zwischen vier kreisförmig angeordneten Stabelektroden (siehe Bild 5 [83, 84]) wird ein Quadrupolfeld erzeugt, in welchem einem statischen elektrischen Feld ein hochfrequentes Wechselfeld überlagert wird. Die zu trennen-

den Teilchen werden als feiner Ionenstrahl in die Längsachse dieses Feldes eingeschossen. Angeregt durch das hochfrequente Wechselfeld vollführen die Ionen auf ihrem Weg durch das System Schwingungen senkrecht zur Längsachse. Die Form dieser Schwingungen hängt von der Ionenmasse ab.

Wird die Größe der das Feld beschreibenden Parameter Gleichspannung U [V], Wechselspannung V [V], Frequenz ω [Hz], Radius des Quadrupolfeldes r_0 [m], Elementarladung e_0 ($= 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{C}$) und Zeit t [sec] vorgegebenen, dann können nur Ionen der Masse

$$m = 2,83 \cdot \frac{e_0}{(\omega r_0)^2} \cdot (U + V \cdot \cos \omega t) \quad (2)$$

dieses Feld passieren und den Auffänger erreichen, weil ihre Amplitude kleiner bleibt als der Feldradius, während die Amplituden der anderen Ionen so rasch anwachsen, daß sie das Feld verlassen und beim Auftreffen auf die geerdete Umgebung neutralisiert werden [84]. Der zwischen den Feldspannungen und der Ionenmasse bestehende lineare Zusammenhang kann zur Bestimmung des Massenspektrums genutzt werden. Werden die Gleich- und die Wechselspannung in kurzfristiger Wiederholung rampenförmig verändert ("Scanphase"), so ist es möglich, das Massenspektrum mehrfach zu durchfahren und es als kontinuierliches Bild auf dem Monitor eines Datenverarbeitungssystems wiederzugeben.

Die Bewegung der Ionen im Quadrupolfeld setzt sich aus einer Komponente in Richtung der Längsachse des Elektrodenbündels (z-Achse) und aus zwei hierzu senkrechten Komponenten (x-y-Ebene) zusammen. Die x- und y-Komponenten genügen der MATHIEUSchen Differentialgleichung, deren Koeffizienten sich aus den Feldparametern errechnen [83, 84]. Sie enthalten im Nenner die das Feld erregenden Spannungen und im Zähler die Ionenmasse. Werden diese Koeffizienten in zwei Faktoren zerlegt, deren einer die Wechselspannung und der andere die Gleichspannung und die Ionenmasse enthält, so läßt sich mit diesen Faktoren ein

Diagramm (Bild 6 [84]) entwerfen, mit dessen Hilfe die Funktion des Quadrupol-Massendetektors veranschaulicht werden kann: Der durch die Schraffur hervorgehobene stabile Bereich umfaßt Masse/Spannungen-Kombinationen, die die Ionen während ihrer Schwingungen im Feld halten, wogegen der restliche Bereich Koeffizienten enthält, die die Ionen aus dem Feld treiben.

Die Gleich- und die Wechselspannung werden im stabförmigen Quadrupol-Massendetektor während der Scanphase in einem festen Verhältnis zueinander gehalten, so daß sich das Feld der möglichen Masse/Spannungen-Kombinationen auf eine Ursprungsgerade, die Betriebsgerade, reduziert. Dieses feste Verhältnis von Gleich- zu Wechselspannung wird nun so eingestellt, daß diese Gerade eben die Spitze des schraffierten Bereiches schneidet. Dann stellt diejenige Masse/Spannungen-Kombination, die auf diesem Geradenabschnitt liegt, die einzige stabile Lösung dar. Das heißt, bei diesen Spannungen können, auf Grund ihrer Anfangsbeschleunigung, nur jene Teilchen das Feld passieren, deren Masse der Gleichung (2) genügt, alle anderen liegen im instabilen Bereich und werden aus dem Feld eliminiert, bevor sie den Auffänger erreichen. Durch Variation der Spannungsamplituden läßt sich mit der Spitze des stabilen Bereiches die Betriebsgerade abtasten ("scannen"). Das hat zur Folge, daß nacheinander alle Ionenmassen einmal im stabilen Bereich liegen und den Auffänger erreichen können.

Stellt man sich einen solchen Quadrupol-Massendetektor kreisförmig gebogen vor und verringert in Gedanken den Radius vom Mittelpunkt dieses Kreises bis zur Längsachse zwischen den vier Elektroden auf Null, so erhält man ein elektrisches Feld mit rotationssymmetrischer Geometrie, eine PAUL-Falle (siehe Bild 7 [81, 84...86]), mit der elektrisch geladene Teilchen eingeschlossen werden können, ohne daß sie durch Wandkontakt neutralisiert werden und verloren gehen. Die Gleichspannung zwischen den auf gleichem Potential liegenden Polkappen und der Ringelektrode stabilisiert die Teilchen in vertikaler Richtung. Die zusätzliche hochfrequente Wechselspannung verhindert, daß sie die Falle in horizontaler Richtung

verlassen. Die Speicher- und die Selektionsfunktion einer solchen Ionenfalle beruhen wie beim linearen Quadrupol auf dem Zusammenhang zwischen der massenabhängigen Schwingungsform der eingeschlossenen Ionen und der Amplitude der gekoppelten Spannungen.

Im Unterschied zur PAUL-Falle, in der (wie beim Stabquadrupol) nach dem Stabilitätsprinzip bei einer bestimmten Spannungsamplitude nur die Teilchen mit der entsprechenden spezifischen Ladung verbleiben, während alle anderen eliminiert werden, arbeitet der geometrisch gleich gestaltete Quistor oder Ion Trap Detector™ nach dem Instabilitätsprinzip [82, 87]. Sein Quadrupolfeld enthält keinen Gleichspannungsanteil. Die Betriebsgerade in Bild 6 fällt also mit der Abszisse zusammen und deshalb ergeben sich bei geringer Spannung vor Beginn der Scanphase für alle Ionenmassen Bewegungsgleichungs-Koeffizienten, die im stabilen Bereich liegen: Alle Ionen werden im Inneren der Ion Trap™ gespeichert ("getrappt"). Wird die Spannungsamplitude gesteigert, so treten die Ionen nach und nach in den instabilen Bereich über, zuerst die mit geringem, dann die mit höherem Masse/Ladungs-Verhältnis, das heißt, sie werden gezielt aus der Ion Trap™ ausgelenkt. Beim Durchfahren des Massenspektrums werden die Teilchen oder Teilchenfragmente, die dasselbe Masse/Ladungs-Verhältnis haben, vom Registrator aufgefangen, in welchem sie einen ihrer Anzahl direkt proportionalen elektrischen Strom verursachen.

In dem rotationssymmetrischen Raum zwischen den drei Hyperboloid-Elektroden findet nach der Ionisierung auch die Massenanalyse statt, denn die Ion Trap™ unterscheidet sich vom stabförmigen Quadrupol nicht nur durch den Betriebsmodus (Instabilitäts- statt Stabilitätsprinzip), sondern auch dadurch, daß im Stabquadrupol die Ionisierung und die Massenanalyse zwar örtlich getrennt aber kontinuierlich und praktisch gleichzeitig stattfinden, wogegen sie in der Ion Trap™ in demselben Raum und deshalb alternierend erfolgen [88].

Die zu ermittelnden Massenspektren sollen dazu dienen, eine Substanz an Hand ihres charakteristischen Spektrums von Molekül- und Molekülfragment-Ionenmassen ("Fingerabdruck") zu erkennen. Da das Spektrum der Teilmassen nur für Einzelstoffe, nicht aber für Stoffgemische charakteristisch ist, müssen Stoffgemische, bevor ihre Komponenten im Massenspektrometer identifiziert werden können, aufgetrennt werden. Hierzu dient der dem Massenspektrometer vorgeschaltete Gaschromatograph.

Seine Funktion beruht darauf, daß die einzelnen Komponenten eines von einem Trägergas (mobile Phase) transportierten Gasgemisches, das eine mit einer stationären Phase ausgekleidete Kapillare durchströmt, in dieser eine unterschiedlich lange Retention erfahren. Die Dauer dieser Retention ist von der Geometrie der Kapillare und von den NERNSTschen Verteilungskoeffizienten abhängig, welche die individuelle Löslichkeit der einzelnen Komponenten in der mobilen und in der stationären Phase zueinander ins Verhältnis setzen. Wegen des Einflusses der Temperatur auf die Größe dieser Koeffizienten ist die Retentionszeit temperaturabhängig [81, 89]. Wenn die Kapillar-Trennsäule lang genug ist und wenn die Differenz zwischen den Verteilungskoeffizienten groß genug ist, erreichen die Komponenten das Säulenende nacheinander, wo sie von einem Detektor als Peak angezeigt werden. Unter der Voraussetzung konstanter thermodynamischer Analysebedingungen können die ermittelten Retentionszeiten zur Stoffidentifikation herangezogen werden.

Die Auswahl der Trennsäule, das heißt ihrer Abmessungen und insbesondere ihrer Auskleidung, hängt davon ab, für welchen Einsatz sie vorgesehen ist. Je nach Siedebereich und Polarität der zu trennenden Komponenten werden andere Substanzen für die stationäre Phase gewählt. Die Polarität einer chemischen Verbindung wird von der Bindungsart im Molekül bestimmt. Polare Verbindungen enthalten entweder ein elektrisches Dipolmoment, eine Ionenbindung oder – bei heteronuklearen Molekülen – eine Elektronenpaarbindung, bei welcher die Ver-

teilung des Energieniveaus der Bindungselektronen nicht der geometrischen Symmetrie zwischen den Atomen entspricht [81].

2.2 Der Ion Trap Detector™

Das an der FFB verwendete GC/MS-Analysegerät besteht aus dem Gaschromatographen Modell GC 8500 der Firma PERKIN-ELMER, Überlingen/Bodensee [90] und einem früher von demselben Hersteller vertriebenen Massenspektrometer, baugleich mit dem Modell ITD 800 der Firma FINNIGAN MAT, Bremen [91, 92]. Bild 8 zeigt den Aufbau des GC/MS-Arbeitsplatzes [90, 91].

Da die zu untersuchenden gasförmigen Verbrennungsprodukte aus verschiedenen Bränden stammen und von unterschiedlichster Zusammensetzung und Konzentration, Polarität und Flüchtigkeit sein können, wurde zu ihrer Trennung im Gaschromatographen eine nahezu universell einsetzbare fused-silica-Kapillare gewählt.

Nach der Eingabe und Trennung des Probengemisches im GC strömt das Eluat durch die Einlaßleitung in den Massendetektor. Die Einlaßleitung (siehe Bild 9 [91]) enthält den unter Atmosphärendruck stehenden offenen Anschluß (open-split-interface) der GC-Kapillare an das Massenspektrometer und einen Durchflußbegrenzer (restrictor). Das Interface verbindet die unter Überdruck stehende GC-Kapillare mit der evakuierten Ionenfalle. Der offene Übergang wird durch eine Heliumspülung vor dem Zutritt von Außenluft geschützt. In Verbindung mit dem Restrictor regelt er den Eintrittsstrom ($\approx 1 \text{ cm}^3/\text{min}$) in die Ionenfalle dadurch, daß überschüssiges GC-Eluat mit dem Spülgas abgeblasen, ein Mangel jedoch durch das Spülgas ausgeglichen wird. Der Atmosphärendruck im offenen Interface hat zur Folge, daß die Retentionszeiten in der Trennsäule nicht wie bei einem geschlossenen Interface vom Unterdruck am Kapillarenende beeinflußt werden, sondern vergleichbar

bleiben mit jenen, die in herkömmlicher GC-Technik ermittelt wurden. Der Restrictor besteht aus einer thermostatisierten fused-silica-Kapillare ($l = 1200$ mm, $\varnothing_i = 0,15$ mm), deren Innenfläche mit einer stationären Phase (DB-5) ausgekleidet ist, die die Adsorption des Eluates verhindert. Die Kenngrößen des Strömungsfeldes (Länge, Durchmesser, Druckdifferenz, Temperatur) in dieser Kapillare bestimmen den Eintrittsstrom in den Massendetektor. Dieser besteht hier aus einer nach dem Instabilitätsprinzip arbeitenden Ionenfalle (Ion Trap™) einschließlich einer Ionenquelle und einem Sekundärelektronen-Vervielfacher.

Im Ion-Trap™-Massendetektor können die Probenmoleküle von Elektronen ionisiert werden, die von einer beheizten Kathode in der oberen Polkappe emittiert werden. Mit einer Linse werden sie gebündelt und von einer rohrförmigen Gatterelektrode mit elektrisch positivem Potential in den Innenraum der Ion Trap™ beschleunigt. Wenn keine Ionisierung erforderlich ist, liegt an dieser Elektrode ein negatives Potential, um das Passieren der Elektronen zu verhindern. Durch dynamische Optimierung der Ionisierungszeit (automatic gain control) wird die Empfindlichkeit der Ion Trap™ wesentlich gesteigert, weil sich die Ionisierungsdauer der sich ändernden Probenkonzentration anpaßt, damit jeweils das Optimum des Speicherungsvermögens der Ion Trap™ genutzt wird. Auch bei geringsten Substanzmengen kann die Ionisierung so weit verlängert werden, bis genügend Ionen zur Detektion des Massenspektrums vorhanden sind. Auf diese Weise wird die Aufnahme vollständiger Massenspektren bis in den unteren pg-Bereich möglich [92, 93].

Eine weitere Möglichkeit, die Empfindlichkeit des Gerätes zu steigern, besteht darin, die in den Rauchgasen zu untersuchenden Substanzen auf Trägermaterialien (Adsorbentien) anzureichern. Die Auswahl geeigneter Materialien hängt von den zu messenden Substanzen ab, die sich in unterschiedlichem Maße nach dem Desorbieren wiederfinden lassen. Sowohl an der FFB als auch an der TUHH soll geprüft werden, welche Adsorbentien bei den für die Feuerwehr interessanten Substanzen die besten Wiederfindungsraten besitzen [78].

Zwischen den beiden Polkappen und der Ringelektrode der Ion Trap™ besteht ein dynamisches elektrisches Feld, bei dem nicht nur die Polarität der Spannung oszilliert (1,1 MHz), sondern bei dem auch die Amplitude variiert werden kann (0 V bis 7500 V). Zum Zeitpunkt der Ionisation weist dieses Feld eine geringe Spannung auf, die alle Ionen mit einem Masse/Ladungs-Verhältnis von 10 oder größer in der Ion Trap™ gefangen hält [91]. Während der Analyse wird die Spannung rampenförmig gesteigert (Scanphase), die axiale Schwingungsamplitude der Ionen vergrößert sich extrem schnell, und jene Ionen deren Masse/Ladungs-Verhältnis mit dieser Amplitude korreliert, verlassen die Potentialmulde im Inneren der Ion Trap™ – die eine Hälfte in Richtung der oberen Polkappe, wo sie wegen deren Erdung neutralisiert wird, die andere Hälfte durch die Aussparungen in der unteren Polkappe in den Elektronenvervielfacher des Registrators. Wann die Ionen von der zunehmenden Spannungsamplitude zum Verlassen der Ion Trap™ angeregt werden, hängt von ihrer spezifischen Ladung ab. Die notwendige Spannung steht zu dieser in umgekehrt proportionalem Verhältnis.

2.3 Das EM 640

Das an der TUHH eingesetzte Massenspektrometer EM 640 (Bild 10 [78, 94]), eine Weiterentwicklung des Modells MM-1® [95, 96] der Firma BRUKER-FRANZEN-Analytik in Bremen ist ein für den mobilen Einsatz entwickeltes und deshalb sehr platzsparend konstruiertes Gerät mit den Außenmaßen: 45 cm · 35 cm · 75 cm. Es enthält eine Ionenquelle von 70 eV und ein Stabquadrupol (Bild 5), mit dem Molekülbruchstücke in der Größe von 1 bis 640 atomaren Masseneinheiten detektiert werden können. Über eine Schnelkupplung lassen sich für die Probenaufgabe verschiedene Peripheriemodule anschließen, um es den unterschiedlichen Einsatzbedürfnissen anzupassen: eine beheizte Sonde zur Prüfung von Böden und Ober-

flächen, eine Wassersonde, ein Direkteinlaß oder ein GC zur Untersuchung von gasförmigen Proben.

Die Steuerung des Massenspektrometers und der Peripherie übernimmt ein Industrierechner mit einem 80486-Prozessor, 16 MByte Arbeitsspeicher und einer Festplatte von 200 MByte. Als Betriebssystem dient OS/2®, Windows®-unterstützt. Spezielle Steuerungsprogramme (BRUKER-MACS und -Analysis) ermöglichen einen weitgehend automatisierten Betrieb des Gerätes und eine rasche Auswertung der Meßergebnisse. Zur Identifizierung der in den Proben detektierten Substanzen werden, hierarchisch gestaffelt, mehrere Massenspektrenbibliotheken herangezogen: Feuerwehr-Bibliothek (230 Stoffe), MM-1®-Bibliothek (1000 Stoffe), NIST-Bibliothek (80.000 Stoffe). Die in der Gefahrstoffschnellauskunft (GSA) des Umweltbundesamtes (UBA) enthaltenen R- und S-Sätze der Gefahrstoff-Verordnung [20... 22] können auf dem Monitor miteingeblendet werden.

Der Gaschromatograph des EM 640 enthält, um die für ein Analyse erforderliche Zeit möglichst zu minimieren, nur eine sehr kurze Trennsäule. Als mobile Phase dient gefilterte Umgebungsluft. Die Druckdifferenz über die Säulenlänge beträgt 200 hPa, am Ende der Trennsäule vor der beheizten, semipermeablen Silikonpolymer-Membran am MS-Einlaß herrscht mit 930 hPa nahezu Atmosphärendruck.

3. VERSUCHSAUFBAU

3.1 Versuchsstand

Schon auf dem Frankfurter VCI-Symposium [42] war die Notwendigkeit von Rauchgasanalysen betont worden und auf die erwähnte, vom Verband entwickelte Apparatur [80] hingewiesen worden, mit der Substanzen unter reproduzierbaren Bedingungen bezüglich Temperatur, Sauerstoffangebot und Verweilzeit verbrannt und die entstehenden Brandgase analytisch erfaßt werden können. Die Dimensionen dieses Gerätes prädestinieren es für die Feinanalyse im Labor, um Probenmengen im mg-Bereich zu untersuchen.

Die ersten Rauchgasanalyse-Versuche im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages wurden teils im Labormaßstab, das heißt im Tiegel, teils im Realmaßstab auf dem ISO-Standard-Versuchsstand [97] in der Brandversuchshalle der FFB durchgeführt und dienten der Einarbeitung in die GC/MS- Analysetechnik [98]. Um die Verbrennungs- und Löschvorgänge auch in einem größeren Maßstab "reproduzierbar" gestalten zu können, wurde ein Versuchsstand entwickelt, in dem Substanzmengen im kg-Bereich unter unterschiedlichen Bedingungen verbrannt, gelöscht und ihre Reaktionsprodukte analysiert werden können: Bild 11.

Ein Stahlprofilgerüst trägt einen allseits umschlossenen Verbrennungsraum von etwa 1 m³ Rauminhalt. Seine Grundfläche besteht aus einem Gitterrost, der während der Versuchsdurchführung die Brandlast und gegebenenfalls eine Zündwanne aufnimmt. Die Mitte dieses Gitterrostes kann ausgetauscht werden, um Brandrückstände zu entfernen und um das Wägen des nach dem Löschen verbleibenden Restes der Brandlast zu erleichtern. Unter dem Gitterrost befindet sich ein Schubkasten, um Asche und Brandlastbruchstücke aufzufangen. Das zum Löschen verwendete Wasser wird ebenfalls in diesem Schubkasten gesammelt, damit es analysiert und einer kontrollierten Entsorgung zugeführt werden kann. Seine Oberkante ist mit einer Dichtung versehen. Mit vier Stellschrauben kann sie gegen den Rost umgeben-

den Flansch gepreßt werden, um den Versuchsraum gegen die Umgebung abzuschotten.

In der Mitte des Schubkastens mündet der Stutzen der Luftversorgung. Seine Mündung ist mit einem Prallblech abgedeckt, um die zuströmende Luft über den gesamten Querschnitt des Feuerungsraumes zu verteilen und um zu verhindern, daß Löschwasser und Brandrückstände in den Stutzen fallen. In der Rohrleitung der Luftversorgung sind ein Gebläse und eine Drosselklappe installiert. Über den Drosselklappenwinkel läßt sich der Luftvolumenstrom und somit die Luftzahl im Verbrennungsraum kontinuierlich zwischen unter- und überstöchiometrisch einstellen.

In der Vorderseite des Versuchsraumes befindet sich ein wärmebeständiges Fenster und darunter ein verschließbarer Durchlaß für eine Zündfackel, damit das Entzünden der Brandlast zu Versuchsbeginn nicht durch das mit acht Schrauben zu schließende Fenster erfolgen muß. Zur Erleichterung des Versuchsaufbaus ist in der rechten Seitenwand eine Beleuchtung vorgesehen. Unterhalb dieser Beleuchtung befindet sich auf halber Höhe der Durchlaß für das Löschrohr, welches an seinem vorderen Ende eine Vollkegeldüse mit 90°-Sprühkegel trägt. Zum Anschluß des Wasserzulaufs gehören ein Absperrhahn und eine Wasseruhr, mit welcher die eingesetzte Löschwassermenge bestimmt werden kann. Auf der gegenüberliegenden Seite sind Durchführungen für die Rauchgasentnahme angebracht, eine in der Wandmitte und je eine 20 cm darunter und darüber. Die nicht benutzten Meßstellen können mit Überwurfmutter verschlossen werden. Nach oben ist der Versuchsraum durch eine Haube abgeschlossen, die die Rauchgase über einen Kamin in den Abzug der Rauchgasreinigungsanlage leitet. In diesem Kamin sind die Sonden für die fortlaufende Messung der Temperatur und für die ebenfalls kontinuierliche, automatische Analyse der Rauchgase auf Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Sauerstoff durch Gasanalytoren installiert.

Der Versuchsaufbau sieht üblicherweise eine Zündwanne vor, die in der Mitte des Versuchsraumes auf den herausnehmbaren Teil des Gitterrostes gestellt wird. In dieser Wanne wird dann in Krippenform die eigentliche Brandlast aufgeschichtet.

Die erste Reihe von Brand- und Löschversuchen diente der Erprobung des Versuchsstandes. Alle Versuche wurden mit dem Maximalvolumenstrom bei vollständig geöffneter Drosselklappe ($\alpha = 0^\circ$) in der Luftversorgung durchgeführt, so daß durchweg überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen herrschten. Es zeigte sich, daß der Versuchsstand den während der Versuchsdurchführung auftretenden Wärmebelastungen standhält. Dies gilt besonders für die verwendeten Dichtungsmaterialien. Die Anordnung und Neigung der Durchführungen für die Zündfackel, die Gasentnahmesonde und die Löscheinrichtung wurden entsprechend den Erfordernissen des Versuchsbetriebes verbessert.

Die folgenden Untersuchungen wurden bei einem Drosselklappenöffnungswinkel von $\alpha = 30^\circ$ durchgeführt. Nach der im Forschungsbericht Nr. 86 [79] wiedergegebenen Eichkurve

$$\dot{V} = 1090 \cdot \alpha^{-0,2} - 440 \quad (3)$$

wird durch diesen Winkel die Förderleistung des Gebläses von $163 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $112 \text{ m}^3/\text{h}$ reduziert.

3.2 Probenahme

Die Probenahme, von ausschlaggebender Bedeutung für das Ergebnis jeder Analyse, konnte hinsichtlich Ort, Menge und Methode verbessert werden. Die Prüfröhrchen-Handpumpe wurde durch eine elektrisch betriebene Meßgaspumpe ersetzt, um über ein T-Stück mehrere Brandgasproben von derselben oder von verschiedenen Probenahmestellen gleichzeitig und in ausreichender Menge ziehen zu können. Bei

den Vergleichsanalysen der TUHH und der FFB diene das T-Stück dazu, an der Probenahmestelle 1 parallel die Adsorptionsröhrchen beider Institute zu beladen.

Die Beschreibung der von der TUHH verwendeten Adsorptionsröhrchen (im allgemeinen Tenax®) und ihre thermische Behandlung findet sich im Abschlußbericht für das Bundesministerium für Bildung und Forschung [78]. An der FFB wurden die Brandgasproben auf Mehrbett-Adsorptionsröhrchen, Typ Supelco Carbotrap™-400 gezogen. Nach der thermischen Desorption wurden sie in einer temperaturgeregelten Dünnschicht-Quarzkapillarsäule getrennt, bei der Helium mit einem Vor- druck von 1400 hPa als mobile Phase diene. Im Massendetektor wurden sie ioni- siert und analysiert und mit Hilfe der Massenspektren-Bibliothek des National Institute for Standards and Technology (NIST) [99] identifiziert.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1 Polyethylen (PE)



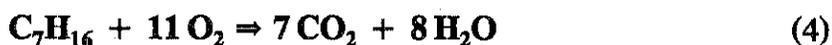
Polyethylen ist ein hochmolekularer Thermoplast mit guter Chemikalienbeständig- keit und geringer Wasseraufnahme aber nur mäßiger mechanischer Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit. Unter allen Kunststoffen ist Polyethylen derjenige, von dem die größten Mengen produziert und verarbeitet werden [100]. Er dient als Rohmaterial für die Herstellung von Haushaltswaren und Spielzeug, von Rohrleitun- gen, Behältern, Dichtungen, Tiefziehteilen und anderem im chemischen Apparate- bau [101]. Für diesen Brand- und Löschversuch wurden aus einer 12 mm starken, stranggepreßten Platte Streifen von 2 cm · 26 cm geschnitten.

Die Streifen wurden in der Zündwanne auf drei parallel angeordneten Vierkantstahl- profilen (St 37, 30 mm · 30 mm · 1,5 mm, 27 cm lang) zu einer Krippe von 2,957 kg mit zehn Lagen zu je fünf Streifen aufeinandergesetzt. Zur Zündung und

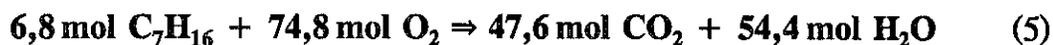
als Stützfeuer wurden 300 ml Heptan in die Zündwanne gegeben. Bei eingeschaltetem Gebläse wurde mit einer Gasfackel gezündet. Wegen seiner geringen Wärmeformbeständigkeit wurde das Probenmaterial schon nach einer Branddauer von etwa 5 Minuten – Rauchgastemperatur im Kamin etwa 430 °C – sehr weich. Die Krippe begann zu schmelzen, einzelne Polyethylen-Tropfen fielen brennend in den Löschwasserauffangkasten des Versuchsstandes. Nach 25 Minuten wurde gelöscht. Der unverbrannte Rest des Versuchsmaterials wurde getrocknet und gewogen. Als Abbrand wurden 1,319 kg ermittelt.

Nach 6, 9, 13, 16, 20 und 25½ Minuten wurden an der Probenahmestelle 1 (siehe Bild 11) jeweils 1000 ml Brandgas auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die mit den NIST-Bibliotheken [99, 102] identifizierten Substanzen sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Das Heptan-Zünd- und Stützfeuer braucht bei stöchiometrischer Verbrennung



pro Liter



74,8 mol O₂, beziehungsweise 7,974 m³ Luft im Normzustand (1013 hPa, 0 °C). Unter den Bedingungen in der Versuchshalle (gleicher Druck, 20 °C) entspricht dies einem Luftvolumen von 8,558 m³. Für 300 ml Heptan werden also 2,567 m³ Luft benötigt.

Wie in Bild 12 zu erkennen ist, brannte das Zünd- und Stützfeuer 5½ Minuten. Bei stöchiometrischer Reaktion



braucht der in dieser Zeit verbrannte Anteil des Probenmaterials – 0,28 kg PE = 19,9 mol CH₂ – 29,8 mol oder 668 l O₂, das heißt 3,183 m³ Luft im Normzustand, beziehungsweise 3,416 m³ bei 20 °C.

Unter der Annahme eines gleichmäßigen Abbrandes während dieses 5½-Minuten-Zeitraumes hätte also für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung ein Luftvolumenstrom von 65,3 m³/h gefördert werden müssen, was mit

$$\alpha = \left[\frac{1090}{\dot{V} + 440} \right]^5 \quad (7)$$

einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 47^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen würde. Tatsächlich betrug der Öffnungswinkel 30° und die Förderleistung 112 m³/h, so daß mit

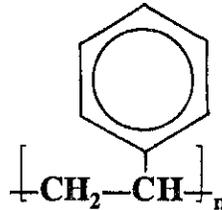
$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkt}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{112}{65,3} > 1 \quad (8)$$

deutlich überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen herrschten.

Im Unterschied zu den nachfolgend eingesetzten Versuchsmaterialien zeigte sich zu Beginn des Löschvorganges beim Polyethylen ein Effekt, der in jüngsten Untersuchungen auch bei anderen thermoplastischen Werkstoffen, insbesondere bei Polyolefinen, festgestellt worden war [103, 104]: Der Kontakt zwischen den Löschwassertropfen und der etwa 350°C heißen Oberfläche des Versuchsmaterials – Phasengrenze zwischen dem zersetzten, flüssigen und dem gasförmigen, brennenden Polyethylen – führt wegen der nahezu explosionsartigen Verdampfung zur Bildung eines Sprays aus Wasserdampf und aus der Schmelze geschleuderten Polyethylen-Tropfen, deren Verbrennung eine kurzfristige aber heftige Intensivierung des Brandgeschehens bewirkt. Nicht nur der plötzliche Anstieg der Temperaturkurve in Bild 12 entspricht diesem Phänomen – es wird auch bestätigt durch den synchron stattfindenden Anstieg der CO- und der CO₂-Konzentration und durch die Abnahme der O₂-Konzentration zu diesem Zeitpunkt. Mit einer Verzögerung von 2 Minuten setzte dann die eigentliche Löschwirkung des Wassers ein: Der Wasserdampf unterbindet die Verbrennung im Flammenbereich durch Inertisierung und Kühlung, gleichzeitig wird die Oberfläche des geschmolzenen Polyethylens unter die Zersetzungs- und Zündungstemperatur abgeschreckt.

In der anschließenden Versuchsphase verbrannten bis zum Löschen weitere 1,04 kg des Polyethylens. Zur stöchiometrischen Verbrennung wären nach Gleichung (6) 12,73 m³ Luft, beziehungsweise ein Luftvolumenstrom von 37,3 m³/h bei einem Drosselklappenöffnungswinkel von 62° erforderlich gewesen. Mit dem eingestellten Öffnungswinkel von 30° und dem Fördervolumen von 112 m³/h herrschten also auch in dieser Phase des Versuches überstöchiometrische Verbrennungsverhältnisse ($\lambda = 3$).

4.2 Polystyrol (PS)



Das Probenmaterial Polystyrol, schlagfest ist ein zäher Thermoplast mit guten dielektrischen Eigenschaften jedoch mit mäßiger Wärmeformbeständigkeit und mit begrenzter Licht- und Witterungsbeständigkeit. Nach Polyethylen und Polyvinylchlorid ist Polystyrol gemessen an der Produktions- und an der Verarbeitungsmenge der dritt wichtigste Kunststoff [100]. In der Feinwerk-, Elektro- und in der Lichttechnik dient er als Halbzeug zur Fertigung von Schildern, Haushalts- und Toiletengeräten, Spielwaren, Stapelkästen, Leuchtenabdeckungen und Gehäusen für Rundfunkempfänger, Staubsauger, Küchenmaschinen, Schreibmaschinen und für viele andere Teile wie beispielsweise Steckdosen [81, 101]. Für diesen Brand- und Löschversuch wurden aus einer 5 mm starken, extrudierten Platte Streifen von 2 cm · 26 cm geschnitten.

Je drei PS-Streifen wurden aufeinandergelegt und auf den Vierkantstahlprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 2,811 kg mit sieben Lagen und fünf Reihen aufeinandergesetzt. Zur Zündung und als Stützfeuer enthielt die Zündwanne 200 ml Heptan. Bei eingeschaltetem Gebläse wurde mit einer Gasfackel gezündet. Die PS-

Streifen brannten sehr gut, die Temperatur im Kamin erreichte bereits nach etwa 3 Minuten mehr als 600°C. Nach 16 Minuten wurde der Brand gelöscht. Der unverbrannte Rest des Versuchsmaterials wurde getrocknet und gewogen. Als Abbrand wurden 1,122 kg ermittelt.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 5, 8, 10¼ und 12½ Minuten und nach 16¾ Minuten während des Löschens jeweils 500 ml Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die mit den NIST-Bibliotheken identifizierten Substanzen sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Nach Gleichung (4) braucht das Zündfeuer zur stöchiometrischen Verbrennung von 200 ml Heptan bei 20°C 1,712 m³ Luft.

Wie in Bild 13 zu erkennen ist, brannte das Zünd- und Stützfeuer 4 Minuten. Der in dieser Zeit verbrannte Anteil des Probenmaterials - 0,28 kg PS = 2,7 mol C₈H₈ - braucht bei stöchiometrischer Reaktion



26,9 mol oder 603 l O₂, das heißt 2,873 m³ Luft im Normzustand, beziehungsweise 3,083 m³ bei 20°C.

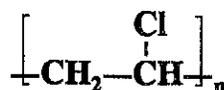
Unter der Annahme eines gleichmäßigen Abbrandes während dieses 4-Minuten-Zeitraumes hätte also für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung ein Luftvolumenstrom von 71,9 m³/h gefördert werden müssen, was nach Gleichung (7) einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 44^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen würde. Tatsächlich betrug der Öffnungswinkel 30° und die Förderleistung 112 m³/h, so daß mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{112}{71,9} > 1 \quad (10)$$

überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen herrschten.

In der anschließenden Versuchsphase bis zum Löschen verbrannten weitere 0,842 kg des Polystyrols. Zu ihrer stöchiometrischen Verbrennung wären nach Gleichung (9) 9,25 m³ Luft, beziehungsweise ein Luftvolumenstrom von 46,2 m³/h und ein Drosselklappenöffnungswinkel von 57° erforderlich gewesen. Mit dem eingestellten Öffnungswinkel von 30° und dem Fördervolumen von 112 m³/h herrschten also in dieser Phase des Versuches noch deutlicher überstöchiometrische Verbrennungsverhältnisse ($\lambda = 2,4$).

4.3 Elektrokabel mit PVC-Isolierung



Elektrokabel mit PVC-Isolierung entsprechen dem heutigen Standard sowohl bei fest verlegten Elektroinstallationen als auch bei frei liegenden Anschlußkabeln von Elektrogeräten. Für diesen Brand- und Löschversuch wurde die Qualität NYM 3 × 1,5 gewählt.

Auf einer sechslagigen Holzkrippe mit je 5 Stäben unbehandelten Fichtenholzes (2 cm · 2 cm · 26 cm, insgesamt 1,547 kg) wurden 26 cm langen Kabelstücke aufgeschichtet, ebenfalls in Krippenform: 6 Lagen mit jeweils 5 Kabelstücken. Die Kabelstücke wogen vor dem Brandversuch zusammen 1,011 kg. Unter der Krippe zwischen den Vierkantstahlprofilen in der Zündwanne dienten zwei in 165 ml Heptan getränkte Weichholzfaserstreifen (3 cm · 1,5 cm · 25 cm, 0,053 kg) als Zündhilfe.

Nach dem Zünden mit der Gasfackel wurde das Gebläse eingeschaltet und Rauchgasproben von jeweils 500 ml wurden an der Probenahmestelle 1 auf Adsorptionsröhrchen gezogen: nach 2½, 5, 6¾, 8½ und 10¾ Minuten. Nach etwa 4½ Minuten war der Großteil des Holzes verbrannt, nach weiteren 8 Minuten

verloschen auch die letzten kleinen Flammen des Stützfeuers, ohne daß gelöscht werden mußte. Die Wägung des unverbrannten Restes ergab für das Versuchsmaterial einen Abbrand von 0,374 kg und für das Holz einen Abbrand von 1,492 kg. Die mit den NIST-Bibliotheken identifizierten Substanzen sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

Nach Gleichung (4) braucht das Zündfeuer zur stöchiometrischen Verbrennung von 165 ml Heptan bei 20°C 1,412 m³ Luft.

Das Stützfeuer braucht unter der Annahme, daß luftgetrocknetes Holz zu

41 % aus Kohlenstoff, zu

5 % aus Wasserstoff, zu

36,5 % aus Sauerstoff, zu

17 % aus Wasser und zu

0,5 % aus unverbrennbaren Mineralstoffen

besteht [81, 105, 106], zur stöchiometrischen Verbrennung von 1 kg,

das heißt von $410 \text{ g C} + 50 \text{ g H}_2 + 365 \text{ g O}_2$ (11)

beziehungsweise von $34,2 \text{ mol C} + 25 \text{ mol H}_2 + 11,4 \text{ mol O}_2$ (12)

zu $34,2 \text{ mol CO}_2 + 25 \text{ mol H}_2\text{O}$ (13)

zusätzlich zu den im Holz enthaltenen 11,4 mol Sauerstoff noch

$(34,2 + 25 / 2 - 11,4 = 35,3) \text{ mol O}_2 \cong 790 \text{ l O}_2 \cong 3,76 \text{ m}^3 \text{ Luft}$ (14)

im Normzustand, bei 20°C entspricht dies einem Luftvolumen von 4,036 m³.

Wenn von den 1,6 kg Holz, die bei diesem Versuch eingesetzt wurden, in der ersten Phase, während das Heptan brennt, etwa 0,5 kg verbrennen, so werden stöchiometrisch hierfür 2 m³ Luft benötigt. Und wenn für die Dauer der ersten Phase bei diesem Versuch ebenso wie bei dem ähnlich aufgebauten Versuch mit PVC-Hartschaum 1½ Minuten angenommen werden (vergleiche Bild 15), so

braucht der in dieser Zeit verbrannte Anteil des Probenmaterials - 0,125 kg PVC = 2 mol C_2H_3Cl - bei stöchiometrischer Reaktion



5 mol oder 112 l O_2 , das heißt 0,532 m³ Luft im Normzustand, beziehungsweise 0,57 m³ bei 20 °C.

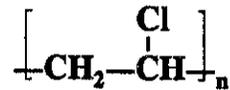
Unter der Annahme eines gleichmäßigen Abbrandes während dieses 1½-Minuten-Zeitraumes hätte also für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung ein Luftvolumenstrom von 159,6 m³/h gefördert werden müssen, was nach Gleichung (7) einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 20^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen würde. Tatsächlich betrug der Öffnungswinkel 30° und die Förderleistung 112 m³/h, so daß mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkt}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{112}{159,6} < 1 \quad (16)$$

deutlich unterstöchiometrische Verbrennungsbedingungen bestanden.

In der anschließenden Versuchsphase von etwa 3 Minuten Dauer verbrannten bis zum Verlöschen des Stützfeuers das restliche Holz (≈ 1 kg) und weitere 0,25 kg der PVC-Kabelisolierung. Zu ihrer stöchiometrischen Verbrennung wären nach den Gleichungen (14) und (15) 4 m³ und 1,14 m³ Luft, beziehungsweise ein Luftvolumenstrom von 103 m³/h und ein Drosselklappenöffnungswinkel von 33° erforderlich gewesen. Mit dem eingestellten Öffnungswinkel von 30° und dem Fördervolumen von 112 m³/h herrschten dann in dieser Phase des Versuches mit $\lambda = 1,1$ also annähernd stöchiometrische Verbrennungsverhältnisse.

4.4 Polyvinylchlorid-Hartschaum (PVC)



Das Probenmaterial aus PVC-Hartschaum ist ein formgeschäumter, extrudierter Thermoplast mit geringem spezifischen Gewicht, guter Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit und gutem Brandverhalten (Brandschutzklasse B1 - schwer entflammbar [107]). Eingesetzt wird dieses Produkt unter anderem als Isoliermaterial, im Messe- und im Innenausbau und als Halbzeug zur Herstellung von Schildern und Tiefziehteilen [101]. Für diesen Brand- und Löschversuch wurden aus einer 10 mm starken Platte Streifen von 2 cm · 26 cm geschnitten.

Weil der PVC-Hartschaum nicht in Brand gesetzt werden konnte, er verkohlte lediglich, war auch zur Durchführung dieses Brandversuches ein Stützfeuer erforderlich. Verwendet wurde wieder unbehandeltes Fichtenholz: 1,584 kg in 2 cm · 2 cm · 26 cm großen Stäben. Diese wurden zusammen mit 1,644 kg PVC-Stäben gleicher Größe zu einer 12-lagigen Krippe aufgebaut. Die Lagen enthielten abwechselnd drei PVC- und zwei Holzstäbe oder umgekehrt drei Holz- und zwei PVC-Stäbe. Mit einer Gasfackel wurden zwei in 165 ml Heptan getränkte Weichholzfaserstreifen (3 cm · 1,5 cm · 25 cm, 0,052 kg) gezündet, die unter der Krippe zwischen den Vierkantstahlprofilen in der Zündwanne angeordnet waren. Anschließend wurde das Gebläse eingeschaltet. Nach etwa 10 Minuten war der Großteil des Holzes verbrannt, nach weiteren 4 Minuten verloschen auch die letzten kleinen Flammen des Stützfeuers, ohne daß gelöscht werden mußte. Die Wägung des unverbrannten Restes ergab für das Versuchsmaterial einen Abbrand von 1,419 kg und für das Holz einen Abbrand von 1,586 kg.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach einer Branddauer von 4, 6, 9, 11½ und 14 Minuten jeweils 500 ml Rauchgas auf Adsorptionsröhrchen gezogen. Die mit den NIST-Bibliotheken identifizierten Substanzen sind in der Tabelle 5 zusammengestellt.

Nach Gleichung (4) braucht das Zündfeuer zur stöchiometrischen Verbrennung von 165 ml Heptan bei 20 °C 1,412 m³ Luft. Nach Gleichung (14) werden zur stöchiometrischen Verbrennung des während der ersten Versuchsphase verbrannten Holzes (0,24 kg) noch etwa 1 m³ Luft benötigt.

Wie in Bild 15 zu erkennen ist, dauerte diese erste Phase 1½ Minuten. Der in dieser Zeit verbrannte Anteil des Probenmaterials - 0,213 kg PVC = 3,4 mol C₂H₃Cl - braucht bei stöchiometrischer Reaktion nach Gleichung (15) 8,5 mol oder 191 l O₂, das heißt 0,91 m³ Luft im Normzustand, beziehungsweise 0,975 m³ bei 20 °C. - Der im Vergleich zu allen anderen Versuchsmaterialien hohe Anteil an Kohlenmonoxid tritt typischerweise bei der Verbrennung von PVC-Hartschaum auf und ist in dieser Größenordnung auch bei früheren Versuchen schon festgestellt worden.

Unter der Annahme eines gleichmäßigen Abbrandes während dieses 1½-Minuten-Zeitraumes hätte also für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung ein Luftvolumenstrom von 133,9 m³/h gefördert werden müssen, was nach Gleichung (7) einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 25^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen würde. Tatsächlich betrug der Öffnungswinkel 30° und die Förderleistung 112 m³/h, so daß mit

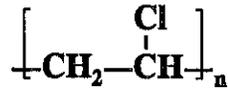
$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{112}{133,9} < 1 \quad (17)$$

unterstöchiometrische Verbrennungsbedingungen vorlagen.

In der anschließenden Versuchsphase von etwa 8½ Minuten Dauer verbrannten bis zum Verlöschen des Stützfeuers die restlichen 1,35 kg des Holzes und weitere 1,2 kg des PVC-Hartschaums. Zu ihrer stöchiometrischen Verbrennung wären nach den Gleichungen (14) und (15) 5,44 m³ und 5,52 m³ Luft, beziehungsweise ein Luftvolumenstrom von 77,4 m³/h und ein Drosselklappenöffnungswinkel von 41° erforderlich gewesen. Mit dem eingestellten Öffnungswinkel von 30° und dem

Fördervolumen von $112 \text{ m}^3/\text{h}$ herrschten also in dieser Phase des Versuches wieder überstöchiometrische Verbrennungsverhältnisse ($\lambda = 1,4$).

4.5 Hart-Polyvinylchlorid (PVC)



Das Probenmaterial Hart-Polyvinylchlorid (grau) ist ein schwer entflammbarer, zäh-harter Thermoplast mit guter Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit. Im Bauwesen, im Maschinen- und im chemischen und lufttechnischen Apparatebau wird Hart-PVC zur Herstellung von Schildern, Rohrleitungen, Gehäusen, Fensterprofilen, Tiefziehteilen und vielen anderen Artikeln verwendet [100, 101]. Für diesen Brand- und Löschversuch wurden aus einer 20 mm starken, gepreßten Platte Streifen von $2 \text{ cm} \cdot 26 \text{ cm}$ geschnitten.

Die PVC-Streifen wurden auf den Vierkantstahlprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 4,24 kg mit sechs Lagen und fünf Reihen aufeinandergesetzt. Zur Zündung und als Stützfeuer dienten 1000 ml Heptan. Das Gebläse wurde eingeschaltet und das Heptan mit einer Gasfackel entzündet. Nach 9 Minuten wurde gelöscht. Der unverbrannte Rest des Versuchsmaterials wurde getrocknet und ergab bei der Wägung noch 3,592 kg.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 2, 5 und nach 8 Minuten 1000 ml Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die mit der NIST-Bibliothek [99] identifizierten Substanzen sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Nach Gleichung (4) braucht das Zünd- und Stützfeuer zur stöchiometrischen Verbrennung von 1000 ml Heptan bei 20°C $8,558 \text{ m}^3$ Luft.

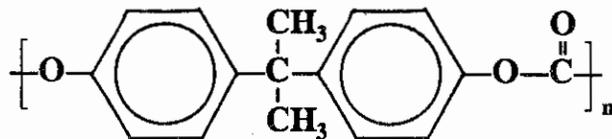
Wie in Bild 16 zu erkennen ist, brannte das Zünd- und Stützfeuer während der gesamten Versuchsdauer von 9 Minuten. Der in dieser Zeit verbrannte Anteil des Probenmaterials - 0,648 kg PVC = 10,4 mol C₂H₃Cl - braucht bei stöchiometrischer Reaktion nach Gleichung (15) 25,9 mol oder 581 l O₂, das heißt 2,765 m³ Luft im Normzustand, beziehungsweise 2,967 m³ bei 20 °C.

Unter der Annahme eines während dieses Zeitraumes gleichmäßigen Abbrandes hätte also für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung bei diesem Brandversuch ein Luftvolumenstrom von 76,8 m³/h gefördert werden müssen, was nach Gleichung (7) einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 42^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen würde. Tatsächlich betrug der Öffnungswinkel 30° und die Förderleistung 112 m³/h, so daß mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{112}{76,8} > 1 \quad (18)$$

deutlich überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen bestanden.

4.6 Polycarbonat (PC)



Polycarbonat ist ein schwer entflammbarer, witterungsbeständiger und zäh-harter Thermoplast von hoher Härte, Schlagzähigkeit und Wärmeformbeständigkeit und mit guten elektrischen Isoliereigenschaften. Als klar durchsichtiges Halbzeug dient es in der Licht- und in der Elektrotechnik, in der Elektronik, im Bauwesen, im Fahrzeug- und im Flugzeugbau, in der Haushalts-, Freizeit-, Phono- und in der Bürogeräteindustrie zur Herstellung von Verglasungen, Lampen, Schildern, Schutzhelmen, Schutzverkleidungen und Gehäusen ebenso wie zur Herstellung von Schaltern, Steckern, Leiterplatten, CD-Informationsträgern und anderen Präzisionsteilen

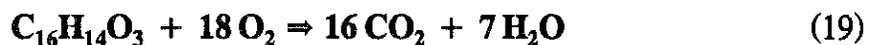
[81, 100, 101]. Für diesen Brand- und Löschversuch wurden aus einer 8 mm starken, stranggepreßten Platte Streifen von 2 cm · 26 cm geschnitten.

Je zwei PC-Streifen wurden aufeinandergelegt und auf den Vierkantstahlprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 2,938 kg mit sechs Lagen und fünf Reihen aufeinandergesetzt. Zur Zündung und als Stützfeuer dienten 1000 ml Heptan. Bei eingeschaltetem Gebläse wurde mit einer Gasfackel gezündet. Durch die Wärme des Stützfeuers schmolzen zwar die PC-Streifen, wurden aber nicht in Brand gesetzt. Löschen war also nicht erforderlich. Das Stützfeuer erlosch nach etwa 7½ Minuten. Die Wägung des unverbrannten Restes des Versuchsmaterials ergab noch 2,902 kg.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 4, 8 und 10 Minuten 1000 ml Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen sind in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Nach Gleichung (4) braucht das Zündfeuer zur stöchiometrischen Verbrennung von 1000 ml Heptan bei 20 °C 8,558 m³ Luft.

Wie Bild 17 zu entnehmen ist, brannte das Zünd- und Stützfeuer 7½ Minuten. Der in dieser Zeit zu verzeichnende Massenverlust des Probenmaterials - 0,036 kg PC = 0,1 mol C₁₆H₁₄O₃ - braucht bei stöchiometrischer Reaktion



2,5 mol oder 57 l O₂, das heißt 0,272 m³ Luft im Normzustand, beziehungsweise 0,292 m³ bei 20 °C.

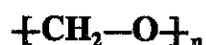
Unter der Annahme eines gleichmäßigen Abbrandes während dieses 7½-Minuten-Zeitraumes hätte also für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung ein Luftvolumenstrom von 70,8 m³/h gefördert werden müssen, was nach Gleichung (7) einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 44^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen

würde. Tatsächlich betrug der Öffnungswinkel 30° und die Förderleistung $112 \text{ m}^3/\text{h}$, so daß mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{112}{70,8} > 1 \quad (20)$$

deutlich überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen existierten.

4.7 Polyoxymethylen (POM)



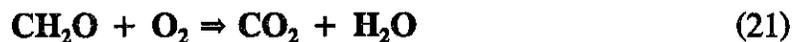
Das Probenmaterial ist ein Polyoxymethylen-Thermoplast (bekannt auch als Polyacetal) mit hoher mechanischer und Wärme-Standfestigkeit, hoher Zähigkeit, günstigem Gleit- und Verschleißverhalten, geringer Wasseraufnahme und guten dielektrischen Eigenschaften. Hauptsächlich im Maschinen- und Anlagenbau, im Automobilbau und bei der Herstellung von Haus- und Bürogeräten dient es als Rohstoff für Zahn- und Laufräder, für Gleitbahnen und -lager, für elektrotechnische Teile, Gehäuse, Bolzen, Schrauben, für Präzisionsteile von Kupplungen, Ventilen, Pumpen und vieles andere, beispielsweise auch für Reißverschlüsse [81, 100, 101]. Für diesen Brand- und Löschversuch wurden aus einer 10 mm starken, stranggepreßten Platte Streifen von $2 \text{ cm} \cdot 26 \text{ cm}$ geschnitten.

Die Streifen wurden auf drei parallel angeordneten Vierkantstahlprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 4,025 kg mit zehn Lagen zu je fünf Streifen aufeinandergesetzt, die für die Zündung und als Stützfeuer 500 ml Heptan enthielt. Das Gebläse wurde eingeschaltet und das Heptan mit einer Gasfackel entzündet. Nach einer Branddauer von etwa 6 Minuten wurden im Kamin 700°C gemessen, die POM-Streifen wurden weich und schmolzen brennend zu einer formlosen Masse. Nach 10 Minuten wurde gelöscht. Der unverbrannte Rest des Versuchsmaterials wurde getrocknet und gewogen. Als Abbrand wurden 0,623 kg ermittelt.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 6 und 8 Minuten und bei Löschbeginn 500 ml Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen sind in der Tabelle 8 zusammengestellt.

Nach Gleichung (4) braucht das Zündfeuer zur stöchiometrischen Verbrennung von 500 ml Heptan bei 20°C 4,28 m³ Luft.

Wie Bild 18 zeigt, brannte das Zünd- und Stützfeuer 6 Minuten. Der in dieser Zeit verbrannte Anteil des Probenmaterials - 0,374 kg POM = 12,4 mol CH₂O - braucht zur stöchiometrischen Reaktion



12,4 mol oder 279 l O₂, das heißt 1,328 m³ Luft im Normzustand, beziehungsweise 1,425 m³ bei 20°C.

Unter der Annahme eines gleichmäßigen Abbrandes während dieses 6-Minuten-Zeitraumes hätte also für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung ein Luftvolumenstrom von 57 m³/h gefördert werden müssen, was nach Gleichung (7) einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 51^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen würde. Tatsächlich betrug der Öffnungswinkel 30° und die Förderleistung 112 m³/h, so daß mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{112}{57} > 1 \quad (22)$$

deutlich überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen herrschten.

In der anschließenden Versuchsphase verbrannten bis zum Löschen weitere 0,25 kg des Polyoxymethylens. Zu ihrer stöchiometrischen Verbrennung wären nach Gleichung (21) 0,95 m³ Luft, beziehungsweise ein Luftvolumenstrom von 14,3 m³/h und ein Drosselklappenöffnungswinkel von 80° erforderlich gewesen. Mit dem

eingestellten Öffnungswinkel von 30° und dem Fördervolumen von $112\text{ m}^3/\text{h}$ herrschten also in dieser Phase des Versuches noch deutlicher überstöchiometrische Verbrennungsverhältnisse ($\lambda = 7,9$).

5. VERSUCHSERGEBNISSE

Für alle Ergebnisse der gemeinsam von der FFB und von der TUHH durchgeführten Rauchgasanalysen gilt, daß die an der FFB verwendete Gerätekombination eher als das Gerät der TUHH leichtsiedende, früh eluierende Komponenten erkennt. Dagegen ist jenes in der Lage, einige hochsiedende, erst nach dem Naphthalin eluierende Substanzen zu detektieren, die in den Analysen der FFB im allgemeinen nicht mehr genannt werden. Diese Unterschiede beruhen zum einen darauf, daß die Gaschromatographen in den beiden Analysegeräten mit unterschiedlichen Trennsäulen ausgerüstet waren, und zum anderen darauf, daß die Desorptionsverfahren in den beiden Geräten nicht übereinstimmen.

Der mit der Ion Trap™ kombinierte Gaschromatograph GC 8500 enthält eine 50 m lange Kapillare mit einem Innendurchmesser von $250\ \mu\text{m}$ und mit einer $0,3\ \mu\text{m}$ starken Beschichtung aus Dimethyl-Polysiloxan (DMS). Diese Beschichtung eignet sich für die Trennung unpolarer bis schwach polarer Substanzklassen wie Acetate, Aldehyde, Alkaloide, Alkane, Alkohole, Amide, Amine, Barbiturate, Ester, Ether, Glykole, halogenierte Verbindungen, Heterocyclen, Ketone, aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe (Teerprodukte), Nitrile, Nitroverbindungen, Phenole, Schwefelverbindungen, Stereoiden, Triglyceride und Zucker [98, 108...113]. Bei relativ kurzer Analysezeit und mit konstanter Reproduzierbarkeit erzielt diese Kapillare auch noch bei schwierigen Trennproblemen eine ausgezeichnete Trennleistung. Die Retentionszeiten liegen zwischen 3 Minuten für Luft und 25 Minuten für Phenyl-Naphthalin.

Der Gaschromatograph im EM 640 arbeitete während dieser Versuche mit einer nur 3,5 m langen Kapillare mit einem Innendurchmesser von 320 μm und mit 1 μm Phenylmethyl/Vinyl/Methyl-Polysiloxan (DB-5) als stationärer Phase, die ebenso wie DMS für die Trennung unpolarer bis schwach polarer Substanzen geeignet ist. Eine wegen der geringen Länge dieser Kapillare weniger scharfe Trennung der Peaks im Chromatogramm der nacheinander eluierenden Komponenten – im Extremfall sogar eine Überlappung zweier Peaks – wird in Kauf genommen, weil es dem Gerätehersteller inzwischen gelungen ist, einen Auswertungsalgorithmus zu entwickeln, mit dessen Hilfe es möglich ist, solche Überlappungen mathematisch derart zu trennen, daß das Massenspektrometer in die Lage versetzt wird, die beiden dem Augenschein nach gleichzeitig eluierenden Substanzen zu erkennen, wenn wenigstens ein minimaler Laufzeitunterschied zwischen ihnen besteht [78]. Die Retentionszeiten im EM 640 betragen nur etwa ein Viertel der Werte, die mit dem GC 8500 ermittelt wurden.

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Analyseverfahren besteht in der Art der Probenaufbereitung und in den Temperaturprogrammen zur GC-Steuerung. An der TUHH wird als Adsorbens in den Probenahmeröhrchen vorzugsweise Tenax[®] verwendet. Die in den Röhrchen gesammelten Rauchgasinhaltsstoffe werden bei 240 °C desorbiert und auf die GC-Säule injiziert, deren Temperaturprogramm zu Beginn eine Phase von 15 sec Dauer mit einer konstanten Temperatur von 38 °C vorsieht, die dann mit einer Steigerungsrate von 35 °C/min bis auf 260 °C erhöht und dort für 25 sec gehalten wird.

Diese im Vergleich zum Gaschromatographen der FFB höhere Endtemperatur erlaubt es dem EM 640, einige hochsiedende Ringkohlenwasserstoffe zu erkennen, die von der Ion Trap[™] nur dann detektiert werden, wenn der wegen der niedrigeren Säulentemperatur geringe Dampfdruck dadurch ausgeglichen wird, daß die Substanz in besonders hoher Konzentration in der Probe enthalten ist. Anstatt der Anreicherung auf Adsorptionsmaterialien wäre die Festphasenextraktion das angemessene

Verfahren, um Proben von hochsiedenden, partikelgebundenen Verbindungen aufzubereiten [114].

Die an der FFB eingesetzten Probenahmeröhrchen enthalten die folgenden Adsorbentien: 125 mg Carbotrap B, 150 mg Carbotrap C, 150 mg Carbotrap F und 125 mg Carboxen-569, um sowohl leicht- als auch schwerflüchtige Substanzen zu adsorbieren. Bei 350 °C werden sie thermisch desorbiert. Das aus Kostengründen einfache Desorptionsverfahren ist mit jenem im EM 640 nicht zu vergleichen. Der zur Zeit noch nicht quantifizierbare Anteil (split) der ursprünglich gezogenen Probe, der letztlich auf die GC-Säule gelangt, dürfte besonders bei Stoffen, die nur in geringer Konzentration auftreten, eine Ursache für die Differenzen zwischen den beiden Analysegeräten sein. Das Temperaturprogramm des Gaschromatographen sieht zu Beginn für 4 min eine Phase konstanter Temperatur von 50 °C vor, die dann mit einer Steigerungsrate von 15 °C/min bis auf 220 °C erhöht und dort für 15 min gehalten wird.

Ebenso wie die Auswahl einer geeigneten Trennsäule davon abhängt, welche Gemische getrennt werden sollen (leicht-, schwerflüchtige Substanzen; polare, unpolare; wenige, viele Komponenten im Gemisch; sehr verschiedene, eher ähnliche Stoffe;...), stellt auch die Wahl des richtigen Adsorbens ein Optimierungsproblem dar, dessen Lösung davon abhängt, auf welche Stoffe bei der Analyse das Augenmerk gelegt wird. An der FFB wird gegenwärtig untersucht, welche Adsorptionsmaterialien beispielsweise bei der Analyse von Gasen, die während eines Brandes von Pflanzenschutzmitteln entstehen können, die besten Wiederfindungsraten aufweisen. Ähnliche Untersuchungen waren auch Bestandteil des von der TUHH bearbeiteten Forschungsauftrages des Bundesministeriums für Forschung und Technologie [78] und deshalb wurden auch während der beschriebenen Versuche Adsorbens-Variationen durchgeführt.

5.1 Polyethylen (PE)

Die erste Phase dieses Brandversuches, in der im wesentlichen das Heptan brannte, dauerte 5½ Minuten. Die zweite Phase bis zum Löschen, in der nur noch das Polyethylen brannte, dauerte weitere 19½ Minuten. Alle Rauchgasproben wurden in der zweiten Versuchsphase gezogen, die letzte während des Löschens. Dennoch wurde in allen Proben (Ausnahme: Probe 5 nach 20 Minuten) Heptan detektiert. Hexen, Benzol, Toluol, Octen, Octan, Ethyl- und Ethinyl-Benzol, Styrol, Benzaldehyd, Isocyano-Benzol, Inden, Naphthalin und Acenaphthylen wurden ebenfalls in allen (oder fast allen) Proben gefunden. Auffällig ist die hohe Zahl von Alkanen und Alkenen, die im Rauchgas von Polyethylen nachgewiesen wurden – die vollständigen Reihen vom Hexan bis zum Octadecan beziehungsweise vom Penten bis zum Heptadecen – und daß die Analyse der TUHH hiervon mehr als viermal so viel nennt wie die der FFB. Dagegen enthält die Analyse der FFB 6 Ketone und Aldehyde, die vom EM 640 nicht genannt werden. Höhersiedende Ringkohlenwasserstoffe, die nach dem Naphthalin eluieren, wurden fast ausschließlich vom EM 640 detektiert, obwohl etwa die Hälfte dieser Substanzen in früheren Analysen auch von der Ion Trap™ gefunden worden waren.

Mit zunehmender Versuchszeit, mit fallender Verbrennungstemperatur und mit steigender Sauerstoffkonzentration nahm die Zahl der im Rauchgas enthaltenen Substanzen ab. Erst während des Löschens stieg sie noch einmal an. An der Zahl der Peaks in den GC 8500-Chromatogrammen (siehe nachfolgende Zusammenstellung, Zeile 4: 69...11...41) wird dieser Zusammenhang deutlicher als bei den EM 640-Chromatogrammen, weil die geringe Länge der Trennsäule des EM 640 die Zeitachse seiner Chromatogramme so stark komprimiert, daß es wegen der dadurch bedingten Peak-Überlappungen häufig nicht möglich ist, die Zahl der Peaks nur dem Augenschein nach zu bestimmen. Auch die Summe der von den beiden Geräten identifizierten Stoffe (Zeile 5: 49...11...30) und die Zahl der Übereinstimmungen (Zeile 6: 13...0...11) entsprechen dem oben genannten Zusammenhang. Im

Gegensatz zu den detektierten aliphatisch-aromatischen (Zeile 7: 19...4...10) und den rein aromatischen (Zeile 9: 4...2...3) Kohlenwasserstoffverbindungen, deren Zahl sich von Probe zu Probe ebenfalls nach diesem Muster entwickelt, nimmt die Zahl der Kettenkohlenwasserstoffe bis zur dritten Probenahme zu. Erst ab der vierten fällt sie und steigt während des Löschens noch einmal an.

1	Probenahmezeitpunkt [min]	6	9	13	16	20	25½
2	Rauchgastemperatur [°C]	400	250	260	230	205	300
3	Sauerstoffkonzentration [%]	15	17,5	17	17,5	18	15
4	Peaks im Chromatogramm des GC 8500	69	44	46	32	11	41
5	Summe der von Ion Trap™ und EM 640 zusammen detektierten Stoffe	49	47	48	33	11	30
6	gemeinsam detektierte Stoffe	13	11	8	7	0	11
7	aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe	19	18	12	8	4	10
8	Ketten-Kohlenwasserstoffe	16	18	26	11	2	11
9	aromatische Kohlenwasserstoffe	4	5	5	5	2	3

Im Vergleich zu später genommenen Proben enthält die erste, nach 6 Minuten gezogene, einige niedere Alkene und Cycloalkene bevor das Hexen erscheint. Allerdings finden sich diese, sowie auch einige später eluierende Alkene und Cycloalkene, nur in der Analyse der FFB. Von den 69 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek [99] 37 identifiziert werden. Die meisten (19 von 49) der detektierten Verbindungen sind solche, die aus aromatischen und aliphatischen Anteilen aufgebaut sind. Die Gruppe der Kettenkohlenwasserstoffe ist mit 16 die zweitgrößte. Zu den Gruppen der rein aromatischen und der rein aliphatischen Ringkohlenwasserstoffe gehören jeweils 4 Verbindungen. Die Zuordnung aller im Rauchgas von Polyethylen gefundenen Substanzen zu 13 hier in Frage kommenden chemischen Oberbegriffen ist Inhalt von Tabelle 9. – Das Chromatogramm des EM 640 enthält 28 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek [102] 25 erkannt wurden. Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, finden sich 13 Substanzen sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich der beiden GC/MS-Geräte zwischen

C₆ und C₁₀ (im Chromatogramm: Benzol bis Naphthalin) entspricht dies einer Übereinstimmung von 32 %.

Um Wiederholungen zu vermeiden, werden die Summen- und die Strukturformeln aller der im Rahmen dieses Forschungsauftrages mit der GC/MS-Analyse identifizierten Verbindungen gemeinsam in Tabelle 10 aufgeführt. Die Reihenfolge der Stoffe in dieser Tabelle (wie auch in den Tabellen 2...8) orientiert sich, um Vergleiche mit früheren Analysen [79, 98] zu ermöglichen, wieder an der in Spalte 1 genannten relativen Retentionszeit. Die relative Retentionszeit setzt die individuelle Retentionsdauer der einzelnen Substanzen in der Trennsäule des Gaschromatographen ins Verhältnis zu jener von Benzol, multipliziert mit 100. Da die Retentionszeit bei gleichen gaschromatographischen Randbedingungen (Säulengeometrie, Säulenauskleidung, Temperaturprogramm,...) im wesentlichen vom Siedepunkt des Eluates bestimmt wird, wurden Substanzen, die vom GC 8500 nicht detektiert wurden, nach ihrem Siedepunkt eingeordnet. In diesen Fällen enthält dann die Spalte 1 dieses Kriterium anstatt der relativen Retentionszeit.

Die zweite, nach 9 Minuten gezogene Probe (siehe Tabelle 2 und die Zusammenstellung auf Seite 42) enthält eine nach Art und Zahl ganz ähnliche Zusammensetzung: Kettenkohlenwasserstoffe, aromatische und aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe. Von den Alicyclen tritt nur noch Cyclopentenon auf. Die Gruppe der reinen Aromaten umfaßt 5 Verbindungen. Von den 44 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 19 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 40 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 39 erkannt wurden. 11 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 35 %.

Die dritte, nach 13 Minuten gezogene Probe ist ähnlich zusammengesetzt wie die beiden vorherigen. Alicyclische Verbindungen wurden - auch bei den folgenden

Proben – nicht mehr detektiert. Von den aromatisch-aliphatischen Verbindungen finden sich nur noch 12. Die größte Gruppe ist mit 26 Verbindungen nun die der Kettenkohlenwasserstoffe. Statt des in den ersten Proben gefundenen Xanthen erscheinen in der Gruppe der Heterocyclen zwei Furan-Verbindungen. Von den 46 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 14 identifiziert werden. Das Chromatogramm des dem Massenspektrometer im EM 640 vorgeschalteten Gaschromatographen enthält 37 Peaks. Mit Hilfe der neueren Version der NIST-Bibliothek [102] und zweier eigener MS-Bibliotheken wurden jedoch 42 Stoffe detektiert. Das bedeutet, daß es sich bei einigen dieser Peaks um solche handeln muß, die von nahezu gleichzeitig eluierenden Substanzen verursacht wurden, die jedoch mit dem erwähnten mathematischen Verfahren (siehe Seite 39) aufgetrennt werden konnten. 8 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 32 %.

Die vierte, nach 16 Minuten gezogene Probe enthält 4 Ketone/Aldehyde und nur noch 8 aliphatisch-aromatische Verbindungen aber 11 Kettenkohlenwasserstoffe. Von den 32 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 18 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 24 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 22 erkannt wurden. 7 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 35 %.

In der fünften, nach 20 Minuten gezogenen Probe fehlen die Kettenkohlenwasserstoffe bis auf Octan und Undecan. Sie enthält nur noch 4 aliphatisch-aromatische Verbindungen. Von den 11 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 4 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält ebenfalls 11 Peaks, wovon die neuere Version der NIST-Bibliothek 7 identifizierte. Doch findet sich bei dieser Probe keine einzige Übereinstimmung zwischen der Analyse der FFB und der der TUHH.

Die letzte, nach 25½ Minuten gezogene Probe entspricht ihrer Zusammensetzung nach etwa der nach 16 Minuten entnommenen Probe. Von den 41 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 22 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 20 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 19 erkannt wurden. 11 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 48 %.

5.2 Polystyrol (PS)

Die erste Phase dieses Brandversuches, in der hauptsächlich das Heptan brannte, dauerte 4 Minuten. Die zweite Phase bis zum Löschen, in der nur noch das Polystyrol brannte, dauerte weitere 12 Minuten. Alle Rauchgasproben wurden in der zweiten Versuchsphase gezogen, die letzte unmittelbar nach dem Löschen. Heptan wurde nur in der ersten Probe und nur von der Ion Trap™ nachgewiesen. Dagegen wurde in allen Proben Benzol, Toluol, Ethyl- und Ethinyl-Benzol, Styrol und Methyl-Styrol (Ion Trap™: α -Methyl-Styrol, EM 640: 4-Methyl-Styrol), Benzaldehyd, Indan und Inden, Naphthalin, Biphenyl, Acenaphthylen und einige höhere aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe gefunden. Darüber hinaus wurde von der an der FFB benutzten NIST-Massenspektrenbibliothek [99] durchgängig bei allen 5 Proben der Identifikationsvorschlag "Chlor-Benzol" (dreimal auch Dichlor-Benzol) mit erster Priorität angeboten, obwohl weder in den Verbrennungsprodukten von Polystyrol ($\{C_8H_8\}_n$) noch in jenen von Heptan (C_7H_{16}) Chlor enthalten ist (siehe Gleichung 4 und 9). Auch in diesem Versuch wurden die nach dem Naphthalin eluierenden aromatischen und aliphatisch-aromatischen Kohlenwasserstoffe fast ausschließlich vom EM 640 nachgewiesen, obwohl sie in früheren Versuchen auch von der Ion Trap™ gefunden worden waren.

Die Tendenz im vorangegangenen Versuch mit Polyethylen, daß die Zahl der in den Rauchgasen enthaltenen Substanzen mit zunehmender Branddauer, abnehmender Temperatur und steigendem Sauerstoffangebot abnimmt, ist in diesem Versuch nur schwach ausgeprägt. Dies zeigt sowohl die Zahl der Peaks in den GC 8500-Chromatogrammen (siehe nachfolgende Zusammenstellung, Zeile 4: 30...22) als auch die Zahl der von den beiden Geräten in den jeweiligen Chromatogrammen identifizierten Stoffe (Zeile 5: 22...17, Zeile 6: 27...24) und ebenso die Größe der wichtigsten Stoffgruppen: 25...19 aliphatisch-aromatische (Zeile 7), 4...0 kettenförmige (Zeile 8) und durchgängig 6 rein aromatische Kohlenwasserstoffe (Zeile 9).

1	Probenahmezeitpunkt [min]	5	8	10¼	12½	16¾
2	Rauchgastemperatur [°C]	360	300	290	280	270
3	Sauerstoffkonzentration [%]	13	16	16	16	20
4	Peaks im Chromatogramm des GC 8500	30	26	31	29	22
5	von der Ion Trap™ detektierte Stoffe	22	16	21	20	17
6	vom EM 640 detektierte Stoffe	27	28	23	28	24
7	aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe	25	20	24	25	19
8	Ketten-Kohlenwasserstoffe	4	2	0	2	0
9	aromatische Kohlenwasserstoffe	6	6	6	6	6

Die erste, nach 5 Minuten gezogene Probe enthält 25 aliphatisch-aromatische Verbindungen, 6 reine Aromaten und 4 Kettenkohlenwasserstoffe. Von den 30 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 22 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 31 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 27 erkannt wurden. 10 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB (Tabelle 3). Im Hauptmeßbereich der beiden GC/MS-Geräte zwischen C₆ und C₁₀ (im Chromatogramm: Benzol bis Naphthalin) entspricht dies einer Übereinstimmung von 42 %.

Die zweite, nach 8 Minuten gezogene Probe enthält hauptsächlich 20 aliphatisch-aromatische Verbindungen und dieselben 6 rein aromatischen Kohlenwasserstoffe: Benzol, Naphthalin, Biphenyl, Phenanthren, Phenyl-Naphthalin und Pyren. Von den 26 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 16 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 32 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 28 erkannt wurden. 9 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 50 %.

Die dritte, nach 10¼ Minuten gezogene Probe enthält 24 aliphatisch-aromatische Verbindungen, die 6 genannten Aromaten und keine Kettenkohlenwasserstoffe mehr. Von den 31 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 21 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 24 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 23 erkannt wurden. 11 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 45 %.

Die vierte, nach 12½ Minuten gezogene Probe umfaßt eine nahezu unveränderte Zusammensetzung. Von den 29 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 20 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält ebenfalls 29 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 28 erkannt wurden. 11 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 45 %.

Die letzte, nach 16¾ Minuten gezogene Probe enthält 19 aliphatisch-aromatische und die 6 bekannten rein aromatischen Kohlenwasserstoffe. Von den 22 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 17 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 25 Peaks,

wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 24 erkannt wurden. 8 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 37 %.

5.3 Elektrokabel mit PVC-Isolierung

Für die Dauer der ersten, unterstöchiometrischen Phase dieses Brandversuches, in der im wesentlichen das Zündfeuer aus Holz und heptangetränkten Weichholzfaserstreifen brannte, wurden 1½ Minuten angenommen. Die zweite Phase, in der hauptsächlich das Stützfeuer brannte – bei annähernd stöchiometrischen Verbrennungsbedingungen –, dauerte 3 Minuten. In dieser Zeitspanne wurde die erste Rauchgasprobe gezogen – die nächsten vier in den folgenden 7½ Minuten bis zum völligen Verlöschen der Brandlast. Dennoch wurde in allen Proben Heptan detektiert – allerdings nur im Chromatogramm des GC 8500. Benzol, Toluol, Ethyl- und Ethinyl-Benzol, Styrol, Benzaldehyd (nur von der Ion Trap™), Phenol, Inden, Naphthalin und Methyl-Naphthalin, Biphenyl, Acenaphthylen und Phenanthren wurden ebenfalls in allen Proben gefunden. Sowohl die hochsiedenden Ring-Kohlenwasserstoffverbindungen als auch eine Reihe von höheren Alkanen (von den Alkenen diesmal nur 2) wurden wieder vorzugsweise vom EM 640 gefunden – die in den ersten beiden Proben detektierten früh eluierenden Alkene und Cycloalkene, die Dichlor-Benzole und die häufig im Brandrauch von PVC anzutreffenden Ketone [115] dagegen ausschließlich von der Ion Trap™.

Auch hier ist der in dem Versuch mit Polyethylen in Erscheinung getretene Zusammenhang zwischen der Zahl der in den Rauchgasen enthaltenen Substanzen, der Branddauer, der Temperatur und dem Sauerstoffangebot nur schwach ausgeprägt. Am ehesten ist er an der Zahl der Verbindungen in der größten Stoffgruppe, den

aliphatisch-aromatischen Kohlenwasserstoffen (Zeile 5 in der nachfolgenden Zusammenstellung: 19...24...14) zu erkennen.

1	Probenahmezeitpunkt [min]	2½	5	6¾	8½	10¾
2	Rauchgastemperatur [°C]	500	630	460	280	200
3	Sauerstoffkonzentration [%]	14	7,5	12	17	19
4	Peaks im Chromatogramm des GC 8500	64	44	24	25	15
5	aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe	19	24	19	10	14

Im Vergleich zu später genommenen Proben enthält die erste, nach 2½ Minuten gezogene, eine deutlich höhere Zahl (14) an Kettenkohlenwasserstoffen, die allerdings vorzugsweise von der Ion Trap™ identifiziert wurden. Die größte Gruppe stellen auch bei diesem Versuchsmaterial wieder die aliphatisch-aromatischen Kohlenwasserstoffe mit 19 Verbindungen. Eine einzige chlorhaltige Verbindung wurde detektiert: Chlor-Phenol. Von den 64 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 29 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 27 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 24 erkannt wurden. 8 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB (Tabelle 4). Im Hauptmeßbereich der beiden GC/MS-Geräte zwischen C₆ und C₁₀ (im Chromatogramm: Benzol bis Naphthalin) entspricht dies einer Übereinstimmung von 22 %.

Die zweite, nach 5 Minuten gezogene Probe enthält nur noch 4 kettenförmige aber 24 aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe. Halogenierte Verbindungen fehlen völlig. Heterocyclische sind sechsmal vertreten. Von den 44 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 35 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 23 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 20 erkannt wurden. 11 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 28 %.

Die dritte, nach 6¼ Minuten gezogene Probe enthält 5 Heterocyclen: Furan-Aldehyd, Benzofuran, Methyl-Benzofuran, Phthalsäure-Anhydrid und Dibenzo-Furan. Neben 19 aliphatisch-aromatischen wurden 5 rein aromatische Kohlenwasserstoffe detektiert. Von den 24 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 17 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 30 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 32 erkannt wurden. Hier wie bei den beiden folgenden Proben enthalten die EM 640-Chromatogramme wieder Peaks, die zwar nicht mit dem Auge, wohl aber mit der geräte-eigenen Auswertungsroutine unterschieden werden konnten. 9 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 36 %.

Die vierte, nach 8½ Minuten gezogene Probe enthält nur noch 10 aliphatisch-aromatische Verbindungen, keine heterocyclischen aber 3 chlorierte Ringkohlenwasserstoffe. Von den 25 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek wieder 17 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 12 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 13 erkannt wurden. 6 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 32 %.

Die letzte, nach 10¼ Minuten gezogene Probe enthält wieder 14 aliphatisch-aromatische Verbindungen. Die zweitgrößte Gruppe stellen die reinen Aromaten mit 4 Verbindungen. Von den 15 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 10 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 22 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 24 erkannt wurden. 5 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 25 %.

5.4 Polyvinylchlorid-Hartschaum (PVC)

Die erste, unterstöchiometrische Phase dieses Brandversuches, in der das Zündfeuer aus Holz und heptangetränkten Weichholzfaserstreifen brannte, dauerte 1½ Minuten. Die zweite Phase, in der im wesentlichen das Stützfeuer brannte, dauerte 8½ Minuten. Die ersten drei Rauchgasproben wurden in dieser Phase gezogen, die beiden folgenden in den verbleibenden 4 Minuten bis zum völligen Verlöschen der Brandlast. Dennoch wurde in den ersten drei Proben noch Heptan detektiert – wiederum nur von der Ion Trap™. In allen Proben wurde Benzol und Chlor-Benzol, Toluol, Ethyl-Benzol, Styrol, Benzaldehyd, Inden, Naphthalin und Methyl-Naphthalin gefunden. Die nach dem Naphthalin eluierenden Kohlenwasserstoffe, obgleich bei anderer Gelegenheit auch von der Ion Trap™ detektiert, fanden sich wieder bevorzugt in der EM 640-Analyse. Dagegen wurden das Dichlor-Benzol und die m- und p-Isomere des Xylols nur in der Analyse des GC 8500-Chromatogramms genannt. Ethinyl-Benzol wurde im Gegensatz zu allen vorangegangenen Versuchen erstmals allein vom EM 640 detektiert. Die im Brandrauch von PVC häufig anzutreffenden Carbonsäuren-Derivate [115] wurden teils von der Ion Trap™ teils vom EM 640 gefunden, die Ketone und das Pentan-Aldehyd wiederum nur von der Ion Trap™.

Abgesehen von der nach 4 Minuten bei einer Rauchgastemperatur von etwa 170 °C gezogenen Probe, die die höchste Zahl von detektierten und von identifizierten Substanzen aufweist, bestätigten die Proben von brennendem PVC-Hartschaum, daß die Zahl der in den Rauchgasen enthaltenen Substanzen mit zunehmender Branddauer, abnehmender Temperatur und steigendem Sauerstoffangebot abnimmt – hier eher an der Zahl der Peaks in den EM 640-Chromatogrammen (siehe nachfolgende Zusammenstellung, Zeile 4: 9...35...32) zu erkennen und an der Zahl der von den beiden Geräten identifizierten Stoffe (Zeile 5: 27...42...35), gültig auch für die Größe der wichtigsten Stoffgruppe, die aliphatisch-aromatischen Kohlenwasserstoffe (Zeile 6: 18...26...19).

1	Probenahmezeitpunkt [min]	4	6	9	11½	14
2	Rauchgastemperatur [°C]	170	220	310	280	200
3	Sauerstoffkonzentration [%]	18	17	14	16	18
4	Peaks im Chromatogramm des EM 640	28	9	35	31	32
5	Summe der von Ion Trap™ und EM 640 zusammen detektierten Stoffe	44	27	42	38	35
6	aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe	25	18	26	19	19

Die Gruppe der aliphatisch-aromatischen Kohlenwasserstoffe ist mit 25 identifizierten Verbindungen die größte in der ersten, nach 4 Minuten gezogenen Probe. Die zweitgrößte besteht aus Benzol, Naphthalin, Biphenyl und Phenanthren. Chlor-Anteile finden sich lediglich in Chlor-Fluor-Methan, Chlor- und Dichlor-Benzol. Von den 44 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 34 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 28 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 19 erkannt wurden. 9 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB (Tabelle 5). Im Hauptmeßbereich der beiden GC/MS-Geräte zwischen C₆ und C₁₀ (im Chromatogramm: Benzol bis Naphthalin) entspricht dies einer Übereinstimmung von 20 %.

Die zweite, nach 6 Minuten gezogene Probe war vermutlich von ähnlicher Zusammensetzung wie die erste. Da jedoch die Analyse mit dem EM 640 wegen eines Gerätefehlers nach 3½ Minuten abgebrochen werden mußte, fehlen einige höher-siedende Aromaten und aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe, die in den anderen Rauchgasproben von PVC-Hartschaum gefunden wurden. Von den 37 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 25 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 9 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 8 erkannt wurden. 6 Substanzen finden sich trotz der verkürzten EM 640-Analysezeit sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. In dem Bereich der Chromato-

gramme, der von beiden Geräten ausgewertet wurde, entspricht dies einer Übereinstimmung von 46 %.

Die dritte, nach 9 Minuten gezogene Probe zeigt eine der ersten vergleichbare Zusammensetzung: 26 aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe, 3 reine Aromaten, 3 chlorierte und 3 heterocyclische Verbindungen. Von den 34 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 24 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 35 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 30 erkannt wurden. 12 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 40 %.

Die vierte, nach 11½ Minuten gezogene Probe enthält 19 aliphatisch-aromatische Verbindungen, 4 chlorierte und 4 heterocyclische. Von den 27 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 21 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 31 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 28 erkannt wurden. 11 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 48 %.

Die letzte, nach 14 Minuten gezogene Probe enthält ebenfalls 19 aliphatisch-aromatische Verbindungen, 3 heterocyclische und 5 chlorierte, darunter 4 Ringkohlenwasserstoffe. Von den 26 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 18 identifiziert werden. Das Chromatogramm des EM 640 enthält 32 Peaks, wovon mit der neueren Version der NIST-Bibliothek 25 erkannt wurden. 8 Substanzen finden sich sowohl in der Analyse der TUHH als auch in der der FFB. Im Hauptmeßbereich entspricht dies einer Übereinstimmung von 33 %.

5.5 Hart-Polyvinylchlorid (PVC)

Der Brandversuch mit Hart-Polyvinylchlorid (grau) umfaßte vom Zünden des Heptans bis zum Löschen nur eine Phase von 9 Minuten Dauer. Die drei Rauchgasproben wurden verteilt über diesen Zeitraum gezogen, als die kontinuierlich gemessenen Werte der Abgastemperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxid-Konzentration an der Probenahmestelle 4 relativ konstante Werte angenommen hatten. In allen Proben wurde Heptan detektiert. Ebenfalls in allen Proben wurde Hexen, Benzol, Toluol, Diaceton, Ethyl- und Ethinyl- und Chlor-Benzol, m- und p-Dichlor-Benzol, Heptanon, o-Xylol, Styrol und Chlor-Styrol, Benzaldehyd, Inden und Naphthalin gefunden (Tabelle 6).

Ebenso wie bei den Verbrennungsversuchen mit PVC-isolierten Elektrokabeln und mit PVC-Hartschaum fanden sich auch in den Rauchgasen von Hart-PVC nur wenige chlorhaltige Kettenkohlenwasserstoffe. Anders bei den chlorierten Ringkohlenwasserstoffen: Deren Vorkommen war bei Hart-PVC etwa viermal so hoch wie bei den beiden anderen PVC-Werkstoffen. – In der letzten, kurz vor dem Löschen entnommenen Probe wurden deutlich weniger Stoffe gefunden als in den beiden zuvor gezogenen Proben. Dies widerspricht dem bislang konstatierten Zusammenhang zwischen der Zahl der in den Rauchgasen enthaltenen Substanzen, der Branddauer, der Temperatur und dem Sauerstoffangebot.

1	Probenahmezeitpunkt [min]	2	5	8
2	Rauchgastemperatur [°C]	270	310	320
3	Sauerstoffkonzentration [%]	17	15	15
4	Peaks im Chromatogramm des GC 8500	62	78	45
5	von der Ion Trap™ detektierte Stoffe	47	57	28
6	aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe	24	22	8
7	Ketten-Kohlenwasserstoffe	11	12	4

Die erste, nach 2 Minuten gezogene Probe enthält 24 aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe, 11 Kettenkohlenwasserstoffe und 5 chlorierte Ringkohlenwasserstoffverbindungen. Von den 62 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek [99] 47 identifiziert werden. – Die zweite, nach 5 Minuten gezogene Probe enthält 22 aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe, 12 Kettenkohlenwasserstoffe und 13 chlorierte Ringkohlenwasserstoffverbindungen. Von den 78 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 57 identifiziert werden. – Die letzte, nach 8 Minuten gezogene Probe enthält nur noch 8 aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe, 4 Kettenkohlenwasserstoffe und 9 chlorierte Ringkohlenwasserstoffverbindungen. Von den 45 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 28 identifiziert werden.

5.6 Polycarbonat (PC)

Der Brandversuch mit Polycarbonat umfaßte vom Zünden des Heptanstützfeuers bis zu seinem Verlöschen nur eine Phase von 7½ Minuten Dauer. In dieser Zeitspanne wurde die erste Probe gezogen, die beiden weiteren ½ und 2½ Minuten nach dem Verlöschen. Dennoch wurde in allen Proben Heptan nachgewiesen. Benzol, Chlor- und Dichlor-Benzol, Toluol, Ethyl- und Ethinyl-Benzol, Styrol, Benzaldehyd und Naphthalin wurden ebenfalls in allen Proben gefunden. Die im Brandrauch von Polycarbonat zu erwartenden Phenol-, Keton- und Aldehyd-Komponenten [116] konnten nur vereinzelt nachgewiesen werden (Tabelle 7).

Das Chromatogramm der Probe, die zuletzt entnommen wurde, als die Temperatur abgesunken und der Sauerstoffgehalt schon wieder stark angestiegen war, verzeichnet die meisten Peaks. Auch dies widerspricht dem bislang angenommenen Zu-

sammenhang zwischen der Zahl der in den Rauchgasen enthaltenen Substanzen, der Branddauer, der Temperatur und dem Sauerstoffangebot.

1	Probenahmezeitpunkt [min]	4	8	10
2	Rauchgastemperatur [°C]	320	530	230
3	Sauerstoffkonzentration [%]	16	5	18
4	Peaks im Chromatogramm des GC 8500	38	41	48
5	von der Ion Trap™ detektierte Stoffe	22	15	21
6	aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe	12	6	11

Die erste, nach 4 Minuten gezogene Probe enthält 12 aliphatisch-aromatische und 3 Kettenkohlenwasserstoffe. Von den 38 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 22 identifiziert werden. – Die zweite, nach 8 Minuten gezogene Probe enthält ebenfalls 3 Ketten- aber nur 6 aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen. Von den 41 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 15 identifiziert werden. – Die letzte, nach 10 Minuten gezogene Probe enthält wieder 11 aliphatisch-aromatische Verbindungen und 3 reine Aromaten. Von den 48 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 21 identifiziert werden.

5.7 Polyoxymethylen (POM)

Die erste Phase dieses Brandversuches, in der im wesentlichen das Heptan brannte, dauerte 6 Minuten. Die zweite Phase, in der nur noch das Polyoxymethylen brannte, dauerte weitere 4 Minuten. In dieser Phase wurden zwei Rauchgasproben gezogen, die dritte während des Löschens. Dennoch enthielten alle Proben Heptan. Benzol und Chlor-Benzol, Styrol und Benzaldehyd wurden ebenfalls in allen Proben gefunden (Tabelle 8).

Verglichen mit den anderen Verbrennungsversuchen wurden in den Rauchgasen von Polyoxymethylen die wenigsten Stoffe detektiert. Das gilt sowohl für die mit Hilfe der NIST-Bibliothek identifizierten wie für die nicht identifizierten Stoffe. – Anders als bei Polycarbonat enthielt die beim Temperaturmaximum gezogene Probe wieder die meisten Substanzen, was dem bei anderen Versuchsmaterialien in Erscheinung getretenen Zusammenhang zwischen der Zahl der in den Rauchgasen enthaltenen Substanzen, der Branddauer, der Temperatur und dem Sauerstoffangebot entspricht.

1	Probenahmezeitpunkt [min]	6	8	10
2	Rauchgastemperatur [°C]	680	320	280
3	Sauerstoffkonzentration [%]	6	17	17,5
4	Peaks im Chromatogramm des GC 8500	33	18	17
5	von der Ion Trap™ detektierte Stoffe	15	8	8
6	aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe	6	2	2

Die erste, nach 6 Minuten gezogene Probe besteht im wesentlichen aus 6 aliphatisch-aromatischen Kohlenwasserstoffen. Von den 33 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek 15 identifiziert werden. – In der zweiten, nach 8 Minuten gezogene Probe konnten von den 18 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek lediglich 8 Substanzen identifiziert werden, darunter 2 Ketten-, 2 halogenierte und 2 aliphatisch-aromatische Kohlenwasserstoffe. – Die letzte, nach 10 Minuten gezogene Probe enthält neben 2 aliphatisch-aromatischen Verbindungen 3 Aldehyde: Pentanal, Hexanal und Heptanal. Von den 17 Peaks im Chromatogramm des GC 8500 konnten mit Hilfe der NIST-Massenspektrenbibliothek wieder nur 8 identifiziert werden.

6. BEWERTUNG DER UNTERSUCHUNGEN

6.1 Bewertung des Meßverfahrens

Die Einsatzmöglichkeiten der GC/MS-Analyse bei der Feuerwehr abzuschätzen, war ein Teilaspekt des diesem Bericht zugrundeliegenden Forschungsauftrages, das heißt, es sollte untersucht werden, welche spezifischen Fähigkeiten solche Analysegeräte besitzen und inwieweit sie den Anforderungen der Feuerwehr an ein "ideales Analysegerät" [67] entsprechen. Die Feuerwehr wünscht sich ein schnell und zuverlässig arbeitendes, universell einsetzbares, leicht zu bedienendes und möglichst auch noch kostengünstiges Meßinstrument, um zu analysieren, ob ein Brand Gefahrstoffe enthält, um die von diesen ausgehenden Gefahren zu bewerten und um Schlußfolgerungen ziehen beziehungsweise Anordnungen treffen zu können

- für sinnvolle Einsatzmaßnahmen, beispielsweise zur Wahl des Löschmittels,
- über Schutzvorkehrungen für die Einsatzkräfte und die Bevölkerung in der Umgebung,
- gegen mögliche Boden- oder Gewässer-Kontaminationen und
- für spätere Sanierungsmaßnahmen.

Die zur Durchführung einer Analyse erforderliche Zeit stellt ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Feuerwehrauglichkeit dieses Systems dar. Vorausgesetzt, das Gerät ist betriebsbereit, dauert eine Analyse mit der Ion Trap™ und dem Gaschromatographen GC 8500 15 bis 20 Minuten, beim EM 640 mit der beschriebenen Trennsäule jedoch nur 6 bis 10 Minuten. Diese Schnelligkeit ist einer der wichtigsten Vorzüge des mobilen, eben für den Einsatz "vor Ort" konzipierten Gerätes – eine Disziplin, in der ein Laborgerät nicht konkurrieren wird. Neben der Betriebsbereitschaft muß allerdings auch vorausgesetzt werden, daß das Bedienungspersonal nicht nur an dem Gerät eingearbeitet ist, sondern daß es schon eine gewisse Routine erworben hat. Nur dann können die Angaben der Werksfeuerwehr der BASF, Ludwigshafen über den Zeitaufwand für eine GC/MS-Analyse [117] als überholt

angesehen werden. – Die Mobilität, das heißt, der Einbau des Gerätes in ein eigenes Fahrzeug spart kostbare Zeit, die sonst für den Transport der Probe vom Entnahmeort zum Analysegerät aufgewendet werden müßte.

Ein weiterer Vorzug der GC/MS-Analyse ist in ihrer außerordentlich hohen Empfindlichkeit zu sehen, die durch Anreicherung auf Adsorptionsröhrchen und anschließende thermische Desorption noch gesteigert werden konnte, so daß Messungen aus sicherer Distanz durchgeführt werden können, ohne Personen zu gefährden. Diese Empfindlichkeit stellt sicherlich auch im Feuerwehreinsatz eine wertvolle Hilfe dar, weil das Gerät beispielsweise in der Lage wäre, auf den bevorstehenden Bruch eines Gefahrstoffbehälters aufmerksam zu machen, wenn er sich durch Risse ankündigt, durch die erste Spuren des Inhalts ins Freie treten.

Im Laborbetrieb eröffnete die GC/MS-Analyse meßtechnische Dimensionen, die unter anderem bei der Feuerwehr Wünsche weckten [67, 118], deren Erfüllung erst jetzt möglich zu werden scheint. So stellte die grundsätzliche Möglichkeit, eine Vielzahl von Stoffen identifizieren zu können, bislang eher einen Nach- als einen Vorteil dar, denn in der hohen Zahl von Vergleichsspektren (beispielsweise in der NIST-Bibliothek 42.000...80.000 je nach Auflage [99, 102]) sind zwangsläufig viele Ähnlichkeiten enthalten, die das System dazu veranlassen, anstatt eines Identifizierungsvorschlages eine ganze Reihe anzubieten, in der der Name des richtigen Stoffes nicht immer an erster Stelle genannt wird.

Einige dieser Bibliotheksspektren sind teilweise schon recht alt und entsprechend ungenau, im Einzelfalle sogar falsch [84], wenn sie als Vergleichsgrundlage für die mit modernen Massendetektoren ermittelten Spektren dienen sollen, weil sie mit Massenspektrometern mit anderen Ionisationsenergien und mit anderen Funktionsprinzipien für die Analyse und die Registrierung der Fragment-Ionen erstellt wurden. Im Idealfall sollten die Referenzspektren mit dem Gerät ermittelt worden sein, mit dem auch die Analysen durchgeführt werden [118]. Trotz der großen Zahl von

Einträgen erweisen sich die Bibliotheken noch als so lückenhaft, daß oftmals ein Stoff deshalb nicht erkannt werden kann, weil sein Spektrum in der Bibliothek fehlt.

Das Gerät versucht dann den Vergleich mit einem ähnlichen Spektrum [119], genau so wie ein chemischer Laie versucht sein könnte, beim Nachschlagen in einem Gefahrgut-Handbuch, in welchem er den von ihm gesuchten Stoff nicht findet, sich an den Eigenschaften eines anderen, mit ähnlich klingendem Namen zu orientieren. Doch nur eine Fachkraft mit einer spezifischen Ausbildung kann beurteilen, wo diese Vorgehensweise zulässig, oder wo sie im Gegenteil gefährlich ist.

Als Mangel des Meßverfahrens – verglichen mit den "Ideal"-Vorstellungen – muß auch gewertet werden, daß es nicht universell eingesetzt werden kann, denn das Ergebnis der gaschromatographischen Trennung hängt davon ab, wie gut die Säule angepaßt werden kann, das heißt, wie zutreffend die Zusammensetzung der Probe im voraus eingeschätzt werden kann. Diese notwendige Optimierung des Trenneffektes schließt aber aus, mit ein und demselben Gerät ohne Austausch der Trennsäule (Kapillare) eine globale Analyse einer unbekanntes Gasmischung zu erstellen. Sollen auch Komponenten geringer Konzentration gemessen werden und sollen deshalb zu Anreicherung Probenahmeröhrchen mit Adsorbentien eingesetzt werden, so gilt für die Auswahl dieser Adsorptionsmaterialien das gleiche wie für die Wahl der Säule.

Leichtflüchtige Substanzen, besonders solche, die die GC-Kapillare noch schneller als Luft passieren, können wegen der augenblicklichen GC-Auslegung (Trennsäule, Vordruck und Temperaturprogramm) mit keinem der beiden hier besprochenen Geräte bestimmt werden. Erstens sind die verwendeten Breitband-Trennsäulen hierfür ungeeignet, weil sie diese Stoffe nicht zu trennen vermögen, und zweitens enthalten zwar die NIST-Bibliotheken auch einige Spektren von Stoffen, deren Molekulargewicht kleiner ist als 50, doch werden sie zur Stoffidentifikation nicht

herangezogen, weil sich der Vergleich eines gemessenen mit einem gespeicherten Spektrum vorzugsweise auf die schwereren Molekülfragment-Ionen stützt, wogegen die leichten Fragmente, wie zum Beispiel Methyl-Radikale, nicht als kennzeichnend für den durch die Ionisierung verursachten Zerfall eines bestimmten Moleküls angesehen werden können, da sie fast immer auftreten. Ein weiterer Grund, auf die Identifizierung leichtflüchtiger Substanzen (in Klammern: Molekulargewichte; Siedepunkte) wie Wasserdampf (18; 100 °C), Stickstoff (28; -196 °C), Sauerstoff (32; -183 °C), Argon (40; -186 °C), Kohlenstoff- und Stickstoffoxide (28...46; -191,5 °C...21,2 °C) zu verzichten, liegt darin, daß diese Luftbestandteile und Verbrennungsprodukte in jeder Probe enthalten sind und praktisch während der gesamten Analyse im Massendetektor anzutreffen sind. Zusammen mit den Komponentenresten aus anderen abklingenden oder anschwellenden Peaks und mit gelösten Verschmutzungen der stationären Phase bilden sie das Grundrauschen im Massendetektor.

Während auf den Nachweis der meisten leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe in Brandgasen verzichtet werden kann, da sie in der nach einer Verbrennung gezogenen Gasprobe keine Rolle mehr spielen dürften, ist die fehlende Detektionsmöglichkeit wegen des geringen Molekulargewichtes von Fluor- oder Chlorwasserstoff, Kohlenmonoxid, Formaldehyd und Blausäure als gravierender Mangel des Systems zu werten, denn diese Stoffe sind häufig und in nicht geringer Konzentration in den Rauchgasen von realen Bränden enthalten. So wurden beispielsweise in den Brandgasen von Baumwolle, Polystyrol-Hartschaum und Polyurethan-Weichschaum durch Parallelmessungen mit Gasprüfröhrchen HCN-Konzentrationen von mehr als 50 ppm nachgewiesen. Das entspricht dem 10-fachen Feuerwehr-Einsatztoleranzwert (siehe Seite 67), bei dessen Überschreiten besondere Schutzmaßnahmen erforderlich werden [120...122]. – Sowohl für die Trennung von niedrigsiedenden als auch für die Trennung von hochsiedenden Gemischkomponenten können die Gaschromatographen mit Spezial-Kapillaren ausgerüstet werden. Mit sogenannten maßgeschneiderten Kapillaren können beispielsweise Brandgase auf hochsiedende

polyaromatische Kohlenwasserstoffe ($\geq C_{10}$) oder auf schwerflüchtigen Rauchgasbestandteilen wie Dioxine und Furane [123...125] analysiert werden.

Die vorgestellten Analysen sind nur qualitativ, nicht quantitativ durchgeführt worden. Die Quantifizierung der einzelnen Gemischkomponenten über die Integration ihrer Peaks im Chromatogramm würde voraussetzen, daß die Identifikationsbibliothek neben dem exakten Massenspektrum auch entsprechende, aus Standardproben abgeleitete Bezugswerte enthielte, die vom Analytiker für jede zu quantifizierende Gemischkomponente mit Hilfe von Kalibriersubstanzen zuvor ermittelt werden müssen.

Diese Beispiele verdeutlichen: Zur Bedienung des GC/MS und ganz besonders zur Auswertung der Meßergebnisse wird fachlich hochqualifiziertes Personal benötigt [75, 117, 119], das zur Einarbeitung eine entsprechende Zeit braucht, denn der Anfänger ist bei der Strukturermittlung organischer Verbindungen mit erheblichen Problemen konfrontiert, die ein intensives Studium der Fachliteratur erfordern [126 ...129]. Die von den Geräteherstellern angebotenen mehrwöchigen Einführungskurse setzen eine meßtechnische Ausbildung am Gaschromatographen und die Beherrschung eines Disketten-Betriebssystems für die elektronische Datenverarbeitung voraus. Um eine gewisse Sicherheit zu erwerben, wird der kontinuierliche Umgang mit dem Gerät empfohlen [117, 118, 120], denn nur ein versierter Analytiker kann den tatsächlichen Realitätsbezug einer aus den verwendeten MS-Bibliotheken abgeleiteten Identifikation beurteilen und die konkrete Frage beantworten, welche Substanzen das Rauchgas enthalten kann, wenn ein bestimmter Stoff verbrannt wird, beziehungsweise, wie die detektierten Substanzen in den Rauch hineingekommen sein können.

6.2 Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse der GC/MS-Analysen wurden zuerst an Hand der aufgenommenen Chromatogramme dokumentiert. Anschließend wurden die Identifikationsvorschläge der verwendeten MS-Bibliotheken für die Einzelstoffe zusammengestellt. Die verschiedenen Brandgasgemische ließen sich mit beiden GC/MS-Systemen in ausreichendem Maße trennen. Dort, wo die Massenspektren einzelner Komponenten des Gasgemisches hochcharakteristisch sind, war oft innerhalb weniger Sekunden eine sichere Identifizierung der Verbindungen möglich, indem ein Vergleich zwischen dem gemessenen Massenspektrum und den Referenzspektren durchgeführt wurde. In den Fällen, in denen das Massenspektrum weniger charakteristisch ausfiel, möglicherweise weil es sich nicht deutlich genug vom Untergrund abhob, mußte aus den von der Bibliothek präsentierten Vorschlägen der plausibelste ausgewählt werden. Die Hauptbestandteile (mit Molekulargewichten über 50) im Chromatogrammbereich zwischen dem Benzol und dem Naphthalin konnten auf diese Weise bestimmt werden. Doch lagen einerseits zwischen diesen identifizierten Peaks immer wieder solche, die sich mit den verwendeten MS-Bibliotheken nicht bestimmen ließen, und andererseits differierten die Interpretationen der FFB und die der TUHH in einem Maße, das die Frage provozierte, ob dem zu beurteilenden Meßverfahren nicht die Serienreife fehle, die man von einem für Feuerwehreinsätze geeigneten Instrument erwarten muß.

Die Differenzen zwischen den beiden Analysen kommen häufig durch die verschiedene Interpretation von Isomeren zum Ausdruck. So wird beispielsweise C_6H_5-CN vom EM 640 als Cyano-Benzol bezeichnet, wogegen die Analyse der Ion Trap™ Iso-cyano-Benzol liefert, das mit dem erstgenannten immer gemeinsam auftritt, im Verhältnis zu diesem aber in einem verschwindend geringen Anteil. Die Unsinnigkeit dieses Bibliotheksvorschlages kann bei einer Laboranalyse, die ohne Zeitdruck durchgeführt wird und bei deren Auswertung Fachkenntnisse und -literatur herangezogen werden können, erkannt werden. Beim Feuerwehreinsatz müßte jedoch sichergestellt werden können, daß solche Verwechslungen nicht vorkommen, denn

im allgemeinen sind sowohl die Unterschiede zwischen den physikalischen Eigenschaften als auch jene zwischen den toxischen Gefahrenpotentialen von Isomeren nicht zu vernachlässigen [81]. Ähnliche Unterschiede bei der Identifikation von Isomeren in gemeinsam durchgeführten Analysen enthält die folgende Zusammenstellung.

Ion Trap™	Σ-Formel	EM 640
Isocyano-Benzol	$C_7 \cdot H_5 \cdot N$	Cyano-Benzol
Isocyano-Toluol	$C_8 \cdot H_7 \cdot N$	Cyano-Toluol
Phenyl-Ethanal	$C_8 \cdot H_8 \cdot O$	Phenyl-Ethanon
Ethyl-Benzol	$C_8 \cdot H_{10}$	Xylol
7-Methyl-Benzofuran	$C_9 \cdot H_8 \cdot O$	2-Methyl-Benzofuran
2-Propenyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{10}$	4-Methyl-Styrol
1,2,3-Trimethyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{12}$	1,3,5-Trimethyl-Benzol

Diese Differenzen können durch Abweichungen zwischen den Referenzspektren in den verschiedenen NIST-Bibliotheken verursacht werden oder durch die unterschiedliche physikalische Funktion der beiden Massenspektrometer. Das im EM 640 zur Trennung der ionisierten Moleküle und Molekülfragmente eingesetzte Stabquadrupol-Massenspektrometer (Bild 5) beruht auf dem Stabilitätsmodus, bei dem bei einer bestimmten Spannung nur die Teilchen mit dem entsprechenden Masse/Ladungsverhältnis im Feld gehalten werden, beziehungsweise dieses in Längsrichtung passieren können – alle anderen werden vor dem Erreichen des Auffängers ausgelenkt. Die Ionisierung und die stofftypische Fragmentierung ("Fingerabdruck") finden praktisch gleichzeitig mit der Analyse, aber räumlich von dieser getrennt statt. Bei der Ionenfalle (Bild 9) im Massenspektrometer der FFB wechseln Ionisationsphase und Analyse miteinander ab, weil sie im selben Raum stattfinden. Prinzipiell erreicht dieses System zwar eine höhere Empfindlichkeit, weil es in der Lage ist, niedrige Konzentrationen in der Ionisationskammer anzureichern, doch können während der Ionisation – und wegen des Instabilitätsprinzips bis zum Zeitpunkt der spannungsabhängigen

Auslenkung aus der Ion Trap™ – auch Stöße zwischen den ionisierten Teilchen stattfinden, wodurch das Massenspektrogramm verändert werden kann.

Wesentlich wichtiger als dieser so grundsätzlich erscheinende Unterschied – bei der Verdünnung der Teilchen in der Ion Trap™ sind interaktive Kontakte nicht sehr wahrscheinlich – ist die mangelhafte Übereinstimmung der Desorptionsverfahren. Der Anteil der Probe, der nach der Anreicherung im Probenahmeröhrchen und der anschließenden Thermodesorption letztlich zur Analyse in der Ion Trap™ zur Verfügung steht, konnte noch nicht bestimmt werden. Bei geringen Konzentrationen, und dies betrifft praktisch alle hochsiedenden Komponenten, führt das dazu, daß die Peaks dieser Substanzen vom Grundrauschen verdeckt werden. Wird das Vorhandensein, obwohl nach dem Chromatogramm anfänglich nicht zu erkennen, einer solchen Substanz vermutet (weil sie in der Parallelanalyse auftaucht), so kann sie häufig durch gezieltes Suchen nach dem dann bekannten Spektrum auch hier nachgewiesen werden.

Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Grund für die Analysenunterschiede liegt natürlich in der Wahl der Trennsäulen für die Gaschromatographen: Das EM 640, auf schnelle Vor-Ort-Analyse ausgelegt, verzichtet auf die Messung früh eluierender, leichtflüchtiger Rauchgaskomponenten und definiert als Hauptmeßbereich im Chromatogramm die nach dem Benzol eluierenden Bestandteile. Der mit der Ion Trap™ kombinierte Gaschromatograph GC 8500 enthält eine Säule, mit der sich unter konstanten thermodynamischen Bedingungen die Retentionszeiten mit so hoher Genauigkeit reproduzieren lassen, daß sie als redundantes, zweites Merkmal neben dem Massenspektrum zur Stoffidentifikation herangezogen werden können.

Auch die Variationen der Adsorptionsmaterialien in den Probenahmeröhrchen für das EM 640, die im Rahmen ihres eigenen Forschungsauftrages [78] während der gemeinsam durchgeführten Vergleichsmessungen von der TUHH vorgenommenen wurden, tragen mit dazu bei, daß die Meßergebnisse der beiden Geräte nur bedingt verglichen werden können.

Ausschlaggebend für die im Vergleich zur Ion Trap™ so hoch erscheinende Identifikationsrate des EM 640 sind die in diesem Gerät hierarchisch gestaffelten Massenspektren-Bibliotheken – nicht die neuere, umfangreichere Version der NIST-Bibliothek. Beim Analysieren von Brandrauch sucht das EM 640 zuerst in einer relativ kleinen, mit hoher Priorität ausgestatteten Bibliothek, die nur Massenspektren enthält, die von Fachleuten speziell hierfür ausgewählt wurden, weil sie bei Bränden häufig anzutreffen sind. Da diese Massenspektren mit dem EM 640 selbst ermittelt wurden, haben sie einen hohen Identifikationswert und steigern die Zuverlässigkeit der Analyse ganz erheblich. Eine zweite, etwas umfangreichere Spektrensammlung, die nicht nur auf Rauchgase zugeschnitten ist, folgt auf dem zweiten Rang. Ihre Massenspektren wurden mit dem Vorgängermodell des EM 640, dem MM-1®, aufgenommen. Da beide Geräte nach demselben physikalischen Prinzip arbeiten, lassen sich ihre Ergebnisse gut vergleichen. Erst wenn das EM 640 in diesen beiden Bibliotheken nicht fündig wird, sucht es in der NIST-Bibliothek und stellt dann seine Bedienungsmannschaft ebenfalls vor das Problem, mit dem eigenen Fachwissen entscheiden zu müssen, welcher von den angebotenen Identifikationsvorschlägen realistischere in Frage kommt.

Trotz aller oben genannten Unterschiede zwischen den beiden Analysegeräten decken sich ihre Meßergebnisse bei den im Chromatogrammbereich zwischen Benzol und Naphthalin detektierten Substanzen etwa zu 33 %.

6.3 Verbesserung des Meßverfahrens

Die Arbeiten an der TUHH hatten auch zum Ziel [74, 75], eine Sammlung von Massenspektren zu erstellen, die die in den bislang vorhandenen Bibliotheken enthaltenen Mängel eliminieren soll, und die auf die Bedürfnisse der Feuerwehr zugeschnitten werden soll, indem sie sich auf Substanzen konzentriert, die in Rauchgasen enthalten sein können und/oder die für die Einsatzkräfte und die Umgebung eine

besondere Gefährdung darstellen. Durch einen groß angelegten Feldversuch, an dem mehrere Feuerwehren und Forschungseinrichtungen beteiligt waren, wurden die Massenspektren zusammengetragen, unter denen das EM 640 im Feuerwehreinsatz vorrangig sucht [74]. Dieses Verfahren stellt, verglichen mit dem Identifizierungsverfahren des an der FFB eingesetzten Laborgerätes, eine deutliche Verbesserung dar, fußt letztlich aber immer noch auf der Vorstellung, mit solch einem leistungsfähigen Gerät den ganzen "Heuhaufen" von 80.000 NIST-Substanzen detektieren zu können.

Die Orientierung an der GC/MS-Meßphilosophie, wie sie bei der Bundeswehr im Spürpanzer "Fuchs" angewendet wird, wäre auch für die Feuerwehr die entscheidende Verbesserung des Systems: Dort dient das Meßverfahren dazu, das Gelände nach chemischen Kampfstoffen abzusuchen, deren Zusammensetzung bekannt und deren Zahl begrenzt ist. Das Gerät meldet nur, ob einer dieser Stoffe vorhanden ist, alle anderen ignoriert es. Entsprechend müßte ein Spürgerät für die Feuerwehr auf die Substanzen spezialisiert werden, die als die gefährlichsten für die Einsatzkräfte und für die Umgebung gelten: Nach diesen "Nadeln" müßte es suchen und den "Heuhaufen" der darüber hinaus noch vorhandenen Stoffe ignorieren. Tabelle 11 enthält aus der Zusammenstellung von Gefahrstoffen, deren toxisches Potential im Auftrag des Referates 10 (Umweltschutz) der Vereinigung zu Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) jüngst bewertet wurde, die Stoffe mit den geringsten Feuerwehreinsatztoleranzwerten (ETW) [130]. Der ETW ist ein an den MAK-Wert⁹⁾ angelehnter Expositionsgrenzwert, unterhalb dessen für die Einsatzkräfte und für die Bevölkerung in der Umgebung keine Gesundheitsgefahren bestehen. Im Unterschied zum MAK- geht der Einsatztoleranzwert von einer nur 4-stündigen Exposition aus. Die Spalten 5 und 6 in der Tabelle 11 machen deutlich, daß zu den gefährlichsten feuerwehr-relevanten "Nadeln" auch einige leichtflüchtige Substanzen gehören, die wegen ihres geringen Molekulargewichtes in den besprochenen GC/MS-Analysegeräten nicht detektiert wurden.

⁹⁾ maximale Arbeitsplatz-Konzentration [131]

Mit einer solchermaßen spezialisierten Referenzbibliothek könnte das Analysesystem in die Lage versetzt werden, bei der Feuerwehr in ebenso kurzer Zeit verlässliche Ergebnisse zu liefern wie im Spürpanzer "Fuchs". Und nicht nur der Brandrauchanalytiker wäre dann in der Lage, für den GC die richtige Trennsäule und für die Probenahmeröhrchen das richtige Adsorbens zu wählen, sondern der Hersteller könnte veranlaßt werden, das Gerät direkt mit dieser Ausrüstung zu liefern und in diese Software auch gleich die erforderlichen Quantifizierungsparameter für die Feuerwehrstoffe einzubinden.

Bei der Verbesserung und Vervollständigung der speziell für den Feuerwehreinsatz zugeschnittenen Gefahrstoffdateien sollten in Zukunft auch Hinweise auf Gesundheitsgefahren und auf Lösch- und Schutzmaßnahmen aufgenommen werden, die automatisch aufgerufen werden, wenn ein Gefahrstoff identifiziert wird. - Notgedrungen müssen die Hinweise auf gesundheitliche Gefahren zur Zeit noch lückenhaft bleiben, bis weitergehende Untersuchungen über die Bewertung des Gefahrenpotentials einzelner Gefahrstoffe und über das Zusammenwirken ("kritische Toxizität") verschiedener Gefahrstoffe vorliegen [77, 120, 132]. Die Erarbeitung der Löschmittelvorschläge bleibt der Fortsetzung dieses Forschungsauftrages vorbehalten. - Ein solchermaßen optimiertes und wie im Kampfstoffspürpanzer automatisiertes Analysegerät (die sicherlich nicht ganz einfache Handhabung des mathematischen Peaktrennungsverfahrens könnte dann entfallen) würde bestimmt auch im Feuerwehreinsatz wertvolle Dienste leisten.

Da auch das sensibelste Meßgerät nur Gefahrstoffe detektieren kann, die - wenn auch in Spuren - schon freigesetzt sind, und nicht auf die Gefahr hinweisen kann, die mit der möglichen Freisetzung anderer verbunden ist, deren Behälter noch intakt sind, behält die sorgfältige und deutlich sichtbare Kennzeichnung von Gefahrstofflagern und -transporten weiterhin eine hohe Priorität. Auch die Anregung des hessischen Ministeriums für Wirtschaft und Technik, für die Feuerwehr ein Gefahrstoffkataster zu erstellen [61], erscheint nach wie vor sinnvoll, denn erst dadurch würde sie in die

Lage versetzt, ihren Einsatz optimal vorzubereiten und an Ort und Stelle sofort die geeignetsten Maßnahmen ergreifen zu können, ohne durch Messungen wertvolle Zeit zu verlieren.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit Ausnahme der drei Alkalimetalle Lithium, Natrium und Kalium stimmen die Löschmittelempfehlungen, die die verschiedenen Gefahrgut-Handbücher und die internationalen oder berufsständischen Unfallverhütungs- und Vorsorgevorschriften enthalten, bei keinem Stoff überein. Da die Effizienz der Brandbekämpfung nicht davon abhängen darf, aus welchem Handbuch der Einsatzleiter seine Information bezieht, und weil grundsätzlich das Wissen darüber, welche Art der Brandbekämpfung jeweils den größten Erfolg verspricht, zu verbessern ist, bekam die Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) den Auftrag, an Hand von Verbrennungs- und Löschexperimenten zu untersuchen, welches Mittel und welches Verfahren zum Löschen von Bränden gefährlicher Güter eindeutig gut, welches weniger gut, welches nicht geeignet oder welches gar gefährlich ist.

Die Feuerwehr greift in zunehmendem Maße auf analytische Methoden zur Bestimmung der bei ihren Einsätzen auftretenden gefährlichen Stoffe und Stoffgemische zurück. Die FFB untersucht deshalb die Methodik und die Einsatzreife einer modernen Gerätekombination aus Gaschromatograph (GC) und Massenspektrometer (MS), um nach der Analyse der Reaktionsprodukte die Auswirkungen eines realen Einsatzes auf die Umwelt abschätzen zu können. Die Anwendungsmöglichkeiten dieses Analyseverfahrens können für die Feuerwehren von großer Bedeutung sein, beispielsweise um zu entscheiden, ob die Bevölkerung aus der Umgebung evakuiert werden muß, welches Löschmittel und -verfahren angewendet werden kann und ob der Brandherd eingedeicht werden soll.

Die durch den SANDOZ-Brand und die damaligen Löschmaßnahmen ausgelöste Kontamination des Rheins hat deutlich gemacht, daß gerade letzteres nicht zu vernachlässigen ist und daß Löschmittel und -verfahren nicht nur nach ihrer Löschwirkung zu beurteilen sind, sondern auch danach, ob durch wasserlösliche Chemikalien derartige Sekundärschäden verursacht werden können.

In einer ersten Versuchsreihe wurden die Brandgase der wichtigsten Kunststoffe analysiert. Bei einigen Brand- und Löschversuchen wurden Parallelproben gezogen, um sie an der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) mit dem Analysegerät eines anderen Herstellers untersuchen zu lassen. Mit beiden GC/MS-Systemen ließen sich die verschiedenen Brandgasgemische in ausreichendem Maße trennen. Die Hauptbestandteile mit Molekulargewichten über 50 konnten bestimmt werden, doch lagen einerseits zwischen den identifizierten Peaks immer wieder solche, die sich mit den verwendeten MS-Bibliotheken nicht bestimmen ließen, und andererseits differierten die Interpretationen der FFB und der TUHH erheblich.

In einer gemeinsamen Versuchsreihe konnte diesen Differenzen auf den Grund gegangen werden: Unterschiede sowohl in der physikalischen Funktion der Massenspektrometer, als auch zwischen den verwendeten Trennsäulen und Probenahmeröhrchen und unterschiedliche Desorptionsverfahren. Letzteres stellt für Substanzen, die in geringen Konzentrationen vorliegen, das ausschlaggebende Kriterium dar und erklärt, weshalb viele der in einzelnen Analysen nur von der Ion Trap™ oder nur vom EM 640 detektierten Substanzen bei anderen Proben vom jeweils anderen Gerät auch gefunden wurden. Trotz dieser Geräteunterschiede wurde im Hauptmeßbereich eine Übereinstimmung von 33 % erzielt.

Nach einer kurzen Einführung in die Funktion der Analysegeräte wird der Versuchsstand vorgestellt, in dem – unter reproduzierbaren Bedingungen – die Versuche mit Probenmengen im kg-Bereich durchgeführt wurden, die verschiedenen Brandversuche werden besprochen und ihre Ergebnisse in tabellarischer Form dargestellt. Eine Zusammenstellung aller bislang mit der GC/MS-Analyse bei Brand- und Löschversuchen gefundenen Substanzen ist angefügt.

Die Feuerwehr benötigt ein schnelles, universell einsetzbares, leicht zu bedienendes Meßinstrument, das in der Lage ist, zuverlässig zu analysieren, ob und welche Gefahrstoffe in einem Brand enthalten sind. Die GC/MS-Analyse besticht durch ihre außerordentlich hohe Empfindlichkeit, die beeindruckende Geschwindigkeit, mit der moderne Geräte inzwischen arbeiten und die Möglichkeit, eine Vielzahl von Stoffen erkennen zu können. Darüber hinaus kann das Gerät der TUHH wegen seiner geringen Abmessungen mobil bei Vor-Ort-Analysen eingesetzt werden. Zwar stellt die GC/MS-Analyse kein "Universal"-Meßverfahren dar, denn die Trennsäule des Gaschromatographen und die Adsorbentien in den (falls erforderlich) Probenahmeröhrchen müssen auf die zu bestimmenden Substanzen zugeschnitten sein, doch könnte andererseits gerade dadurch das Gerät für den Feuerwehreinsatz spezialisiert werden.

Als Nachteil muß gewertet werden, daß einige gefährliche feuerwehr-relevante Stoffe mit geringem Molekulargewicht und niedrigem Siedepunkt wie beispielsweise Kohlenmonoxid, Blausäure, Chlorwasserstoff,... gegenwärtig nicht detektiert werden können, weil weder die Ausstattung des GC noch der Spektrenvorrat der Bibliothek dafür ausgelegt ist. Deshalb kann, auch wenn mit Recht einige Vorbehalte gegen ihre Aussagekraft ins Feld geführt werden können [119], auf Gasprüföhrchen nicht verzichtet werden, solange die GC/MS-Analyse ihren Hauptmeßbereich bei Substanzen sieht, die nach dem Benzol eluieren. Ebenfalls problematisch ist das Quantifizieren, solange das Gerät noch nicht auf wenige, wichtigste Feuerwehrstoffe spezialisiert ist. Und als Nachteil muß auch der Bedarf an hoch qualifiziertem Personal bezeichnet werden.

Eine wesentliche Verbesserung des Verfahrens stellt zweifellos die Ausstattung des EM 640 mit hierarchisch gestaffelten, selbst gemessenen MS-Bibliotheken dar. Die in der vfdB-Richtlinie 10/01 bewerteten Stoffe müßten allerdings mit erster, wenn nicht gar ausschließlicher Priorität hierin enthalten sein. Dies und eine weitere Automatisierung wie im Bundeswehrspürpanzer "Fuchs" könnte die Zuverlässigkeit des Verfahrens deutlich steigern. Die Meßphilosophie müßte sich von der Vorstellung abwenden, eine Vielzahl von Stoffen identifizieren zu wollen (Heuhaufen) und sich statt dessen darauf konzentrieren, die wichtigsten zu messen (Nadel). Bei der Verbesserung

und Vervollständigung der speziell für den Feuerwehreinsatz vorgesehenen Gefahrstoffdateien sollten Hinweise auf Gesundheitsgefahren und auf Lösch- und Schutzmaßnahmen mitaufgenommen werden, die automatisch aufgerufen werden, wenn ein Gefahrstoff identifiziert wird.

Wenn das Verfahren zur Untersuchung eines umfangreichen Substanzenspektrums verwendet werden soll, ist ein zweites, redundantes Identifikationsmerkmal (beispielsweise eine exakte Retentionszeit) erforderlich.

Bei einigen der durchgeführten Brandversuche konnte als Zusammenhang zwischen der Branddauer, der Verbrennungstemperatur und der Sauerstoffkonzentration während der Verbrennung einerseits und der Zahl der in den Rauchgasen enthaltenen Substanzen andererseits festgestellt werden, daß mit fortschreitender Branddauer, fallender Temperatur und wieder steigender Sauerstoffkonzentration die Zahl der Rauchgaskomponenten abnimmt. Dies entspricht den Erfahrungen in anderen Untersuchungen und wird näherungsweise auch durch den Vergleich mit früheren Messungen bestätigt [79, 132]. Von den für die Feuerwehr wichtigen Brandrauchbestandteilen mit den niedrigsten Einsatztoleranzwerten (ETW) wurden, wie auch in anderen Untersuchungen festgestellt wurde [125], Benzol (ETW: 20 ppm), Styrol (40 ppm) und Toluol (100 ppm) fast immer gefunden – in einigen Proben auch Chlor-Benzol (100 ppm), Tetrachlor-Ethen (100 ppm) und Aldehyde (1 ppm).

Das Forschungsthema wird fortgesetzt mit der Untersuchung verschiedener Adsorptionsmaterialien für die Probenahme und Anreicherung von Rauchgaskomponenten bei Bränden von Pflanzenschutzmitteln. Im Anschluß daran werden in Brand- und Löschversuchen die Unterschiede zwischen den Löschmittelangaben in der Kemler-Zahl und im Hazchem-Code bei den Stoffen untersucht, die die Arbeitsgruppe ERIC des Europäischen Chemieverbandes in einer besonderen Liste zusammengestellt hat. Die Untersuchung von Gefahrstoffen, bei denen zu befürchten steht, daß sie bei Verbrennungs- und Löschversuchen die Brandversuchshalle und/oder die Rauchgasreinigungsanlage in unzulässigem Maße kontaminieren, wird bis zur Einrichtung eines speziellen Gefahrstoff-Labors zurückgestellt.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kettrup, Antonius:
Ökologische Auswirkungen
im Brandfall auf die Gewässer,
Vortrag Nr. 7 in [42]
- [2] Hommel, Günter et al.:
Handbuch der gefährlichen Güter,
8. Aufl.,
Springer-Vlg., Berlin, New York,... 1996
- [3] Kühn, Robert und Karl Birett:
Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe,
10. Aufl.,
ecommed-vlg., Landsberg, München 1995
- [4] United Nations - Committee of Experts on
the Transport of Dangerous Goods of the
Economic and Social Council (ECOSOC):
Recommendations on the Transport of
Dangerous Goods (orange book = UN-
Empfehlungen für die Klassifizierung und
Kennzeichnung gefährlicher Güter), 9th
Ed., in Kapitel 2: List of Dangerous
Goods most commonly carried,
New York 1995 (K.O.Storck-Vlg., Ham-
burg)
- [5] United Nations - International Maritime
Organization (IMO) - Maritime Safety
Committee (MSC):
International Maritime Dangerous Goods
Code (IMDG),
London 1984 (K.O.Storck-Vlg., Hamburg)
- [6] Bundesminister für Verkehr:
Verordnung über die Beförderung gefähr-
licher Güter mit Seeschiffen einschließlich
Anlagen A (= IMDG-Code) und B (Ge-
fahrgutverordnung See - GGVSee),
BGBl.I, Seite 1017, Bonn, 5.7.1978,
Änderung: BGBl.I, Seite 1113, 27.7.82,
Änderung: BGBl.I, Seite 961, 27.6.86,
Änderung: BGBl.I, Seite 2863, 21.12.87
(K.O.Storck-Vlg., Hamburg)
- [7] Bundesminister für Verkehr und United
Nations - International Maritime Organiza-
tion (IMO) - Maritime Safety Committee
(MSC):
Richtlinie Maritim (RM 002) über Unfall-
maßnahmen für Schiffe, die gefährliche
Güter befördern (Emergency Procedures
for Ships carrying Dangerous Goods) -
Gruppenunfallmerkblätter (Group Emer-
gency Schedules - EmS),
Bundesanzeiger, Bonn, 23.5.1987,
(K.O.Storck-Vlg., Hamburg)
- [8] United Nations - Group of Experts on the
Transport of Dangerous Goods of the Eco-
nomic Commission for Europe (ECE):
Accord européen relatif au transport inter-
national des marchandises Dangereuses par
route (ADR),
Genf, 30.9.1957
- [9] Bundesminister für Verkehr:
Verordnung über die innerstaatliche und
grenzüberschreitende Beförderung gefähr-
licher Güter auf Straßen einschließlich An-
lagen A und B und Anhänge (insbesonde-
re: B.5 und B.8) (Gefahrgutverordnung
Straße - GGVS),
BGBl.I, Seite 1550, Bonn, 22.7.1985,
Änderung: BGBl.I, Seite 2858, 21.12.87
- [10] Comité International des Transports
ferroviaires - Commission d'Experts de
l'Office Central des Transports Inter-
nationaux (OCTI):
Convention relative aux Transports Ferro-
viaires (COTIF), Anlage: Convention In-
ternationale concernant le transport des
Marchandises par chemin de fer (CIM),
Anhang B: Règlement International con-
cernant le transport des marchandises Dan-
gereuses par chemin de fer (RID),
Bern, 9.5.1980ff
(Bundesbahndirektion Hannover)

- [11] Bundesminister für Verkehr:
Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter mit der Eisenbahn einschließlich Anlagen (Gefahrgutverordnung Eisenbahn - GGVE),
BGBl.I, Seite 1560, Bonn, 22.7.1985,
Änderung: BGBl.I, Seite 210, 8.3.1995
- [12] Deutsche Bundesbahn:
Anhang II zur Betriebsunfallvorschrift - Bestimmungen über sicherheitstechnische Maßnahmen nach Freiwerden gefährlicher Stoffe (DS 423/II), daraus Anlage 7: Unfallmerkblätter lt. § 12 GGVE,
Bundesbahn-Zentralamt, Minden (Westfalen) 1987
- [13] Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR):
Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par voie de Navigation interieure (Rhin) - ADNR, Straßburg, 1.4.1970
- [14] Bundesminister für Verkehr:
Verordnung zur Einführung der Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf dem Rhein (ADNR) und über die Ausdehnung dieser Verordnung auf die übrigen Bundeswasserstraßen einschließlich Anlagen A und B, 1 und 2,
BGBl.I, Seite 1851, Bonn, 23.11.1971,
Änderung: BGBl.I, Seite 3477, 16.12.76,
: BGBl.I, Seite 1119, 30.6.77,
:
Änderung: BGBl.I, Seite 367, 24.3.83
- [15] Arbeitsgemeinschaft Rheinschifffahrt und Verband der chemischen Industrie (VCI):
Schriftliche Weisungen nach Rn 10185 ADNR, Anhang 3 (ADNR-Unfallmerkblätter),
Binnenschifffahrtsvlg., Duisburg 1980...86
- [16] Department of Transportation (DOT) - Research and Special Programs Administration - Materials Transportation Bureau:
Emergency Response Guidebook - Guidebook for Hazardous Materials Incidents (DOT P 5800.4),
Washington (DC) 1987
- [17] National Fire Protection Association (NFPA):
Fire Protection Guide on Hazardous Materials, 6th Ed.,
Boston (Massachusetts) 1975,
jetzt unter Code-Nr. 49, 325M, 491M und 704 enthalten in: National Fire Codes, Quincy (Massachusetts) 1994
- [18] Home Office - Fire and Emergency Planning Department - Joint Committee on Fire Brigade Operations and National Chemical Emergency Centre:
Hazchem List N^o 8 - Emergency Action Codes and Supplementary Information for Dealing with Incidents Involving Dangerous Substances Conveyed in Bulk by Road or Rail,
London, Harwell 1993
- [19] Anonym:
Règlement d'Instruction et de Manceuvre des Sapeurs-Pompiers Communaux, 4.Éd.,
France Sélection, Paris 1978
- [20] Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung et al.:
Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoff-Verordnung - GefStoffV, früher: Arbeitsstoff-Verordnung - ArbStoffV),
BGBl.I, Seite 1782, Bonn, 26.10.1993,
Änderung: BGBl.I, Seite 1870, 10.11.93,
Änderung: BGBl.I, Seite 1422, 24.6.94,
Änderung: BGBl.I, Seite 1689, 25.7.94,
Änderung: BGBl.I, Seite 2557, 19.9.94
und Bekanntmachung (vom 11.5.94) der Liste der gefährlichen Stoffe und Zubereitungen nach § 4a der GefStoffV (= Anhang I der EG-Richtlinie 67/548 in der Fassung der EG-Richtlinie 93/101 vom 11. Nov. 93: 20. Änderung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe),
Bundesanzeiger 46 (1994), Nr. 113,
Seite 6439...6444
(Bundesanstalt für Arbeitsschutz Dortmund RW 14 und 23, Wirtschafts-Vlg. Bremerhaven 1995)

- [21] Nöthlich, Matthias et al.:
Gefährstoffe (früher: Chemikaliengesetz,
davor: Arbeitsstoffverordnung), Kommen-
tar zu Chemikaliengesetz und Gefahrstoff-
verordnung,
E.Schmidt-Vlg., Berlin 1981..95
- [22] Welzbacher, Ulrich et al.:
Neue Datenblätter für gefährliche Arbeits-
stoffe nach der Gefahrstoffverordnung,
WEKA-Fachvlg., Augsburg 1995
- [23] Bundesgesundheitsamt (BGA):
4500 Sicherheitsdatenblätter der
1000-Jahrestonnen-Liste des VCI
- [24] Hauptverband der gewerblichen
Berufsgenossenschaften:
Unfallverhütungsvorschriften,
Heymanns Vlg., Köln 1977ff
- [25] Berufsgenossenschaft
der chemischen Industrie:
Unfallverhütungsvorschriften,
Vlg. Chemie, Weinheim, New York,... 1964
- [26] Schweizerischer Feuerwehrverband (SFV)
und schweizerische Gesellschaft für che-
mische Industrie (SGCI):
Einsatzakten für Chemieereignisse und
Strahlenschutz, 4. Aufl.,
Bern, Zürich 1993
- [27] Dutch Chemical Industry
Association et al.:
Chemical Safety Sheets - working safely
with hazardous chemicals (früher: Hand-
ling Chemicals safely),
Samson Chemical Publ., Dordrecht 1991
und Niederländischer Verband der Sicherheits-
kräfte et al.:
ChemCards - Internationale Sicherheits-
datenblätter für gefährliche Stoffe,
ecomед-vlg., Landsberg, München 1996
- [28] Steinleitner, Hans-Dieter et al.:
Brandschutz- und sicherheitstechnische
Kennwerte gefährlicher Stoffe (früher: Ta-
bellenbuch brennbarer und gefährlicher
Stoffe),
Staatsvlg. d. DDR, Berlin 1988
- [29] Lenga, Robert E.:
The Sigma-Aldrich Library
of Chemical Safety Data, 2nd Ed.,
Sigma-Aldrich Corporation,
Milwaukee (Wisconsin) 1988
- [30] Royal Society of Chemistry:
Chemical Safety Data Sheets,
Cambridge 1989...93
- [31] Sax, Newton Irving et al.:
Dangerous Properties
of Industrial Materials, 6th Ed.,
Van Nostrand Reinhold, New York 1984
- [32] Weiss, G.:
Hazardous Chemicals Data Book, 2nd Ed.,
Noyes Data Corporation, Park Ridge (New
Jersey) 1986
- [33] Nübler, Hans-Dieter:
Gefahrgut-Ersteinsatz - Handbuch
für Gefahrgut-Transport-Unfälle,
K.O.Storck-Vlg., Hamburg 1988
- [34] Graf, Werner; Peter Eulenburg
und Dietrich Webner:
Merkblätter gefährlicher Stoffe,
Kohlhammer-Vlg., Stuttgart 1970...79
- [35] Kühn, Robert und Karl Birett:
Gefahrgut-Merkblätter, 5. Ausg.,
(1300 Einzel- und Gruppen-Unfallmerk-
blätter für den Straßenverkehr z.T. ehe-
mals amtliche vom BMV und vom VCI),
ecomед-vlg., Landsberg, München 1994
- [36] Kühn, Robert und Karl Birett:
Gefahrgut-Schlüssel, 15. Ausg.,
ecomед-vlg., Landsberg, München 1994
- [37] Sorbe, Günter:
Sicherheitstechnische Kenndaten -
Gefahrenindex chemischer Stoffe,
ecomед-vlg., Landsberg, München 1993
- [38] Auergesellschaft mbH:
Auer Technikum, Ausg. 12,
Berlin 1988

- [39] Anonym:
six - Schnellinformation Gefahrgut -
Handbuch umweltgefährdender Stoffe,
Medienvlg., Karlsruhe 1988
- [40] Janik, Detlev (ja):
Töpfer für ausführliche
Information über Risiken,
Frankfurter Allgemeine Zeitung 39,
Nr. 122, 27.5.1987
- [41] Brauner, Christian:
Umdenken bei Sandoz,
Die Rheinpfalz 43, Nr. 122, 27.5.1987
- [42] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
Chemie und Umwelt -
Brände und ihre Vermeidung,
VCI-Symposium am 26. Mai in der
Industrie- und Handelskammer,
Frankfurt/Main 1987
- [43] Heins, Uwe (uh):
Gefahrgut-Datenbanken,
Gefährliche Ladung 32 (1987), Heft 12,
Seite 561...565
- [44] Wittmer, Stefan:
Gefahrstoff-Software im Vergleich,
Unabhängige Brandschutzzeitschrift (UB)
42 (1992), Heft 10, Seite 15...18
- [45] Heins, Uwe (uh):
Informations-Management,
Gefährliche Ladung 38 (1993), Heft 6,
Seite 286...304
- [46] Heins, Uwe (uh):
Informationsmanagement
und Gefahrgutdatenbanken,
Gefährliche Ladung 39 (1994),
Service-Beilage zu Heft 6, Seite 3...13
- [47] Boenisch, Joachim und Andreas Schütt:
Gefahrstoff-/Umwelt-Datenbanken,
Gefährliche Ladung 39 (1994),
Service-Beilage zu Heft 6, Seite 14...20
- [48] Pölzl, Alfred:
Neues Gefahrstoffprogramm Multi-Dat
- besonders bedienungsfreundlich,
Blaulicht 44 (1995), Heft 9, Seite 28...29
- [49] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
Chemie im Dialog - TUIS,
Frankfurt/Main 1992
- [50] Lambrecht, Volker:
ICE - International Chemical Environ-
ment, Europäisches Hilfeleistungssystem
für Transportunfälle mit Chemieprodukten
des europäischen Chemieverbandes,
Vortrag Nr. 1 in [51]
- [51] Vereinigung zur Förderung des Deutschen
Brandschutzes e.V. (vfdB):
Jahresfachtagung vom 24. bis 26. Mai im
Kongreßzentrum Messe, München 1993
- [52] Fiedler, Siegfried:
TUIS - ICE - ERIC-Card,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung
49 (1995), Heft 1, Seite 23...26
- [53] Meerkamp van Embden, Ian C.:
Einführung,
Vortrag Nr. 1 in [42]
- [54] Günther, Kuno Peter:
Brandschutzmaßnahmen und Vorsorge
aus Sicht der Öffentlichen Feuerwehr,
Vortrag Nr. 11 in [42]
- [55] Nimptsch, Peter:
Brandschutz in Chemielagern,
Vortrag Nr. 9 in [42]
- [56] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
VCI-Maßnahmenkatalog im Hinblick
auf den Lagerbrand bei Sandoz,
Frankfurt/Main 1986
- [57] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
Brandschutzkonzept für Chemikalienlager
im Hinblick auf den Schutz der Gewässer,
Frankfurt/Main 1987
- [58] Fathmann, Heinrich:
Zusammenarbeit der mittelständischen In-
dustrie mit den zuständigen öffentlichen
Hilfskräften,
Vortrag Nr. 16 in [42]

- [59] Mingenbach, Hans:
Gefahrenabwehrpläne,
Vortragsentwurf für [42]
- [60] Thamm, Rüdiger:
Meldesysteme,
Vortrag Nr. 17 in [42]
- [61] Albracht, Gerd et al.:
Die hessische zentrale
Gefährstoffdatenbank,
Hessisches Ministerium für Wirtschaft
und Technik, Wiesbaden 1987
- [62] Föhl, C. Axel:
Untersuchung der Löschverfahren und
Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden
gefährlicher Güter,
Forschungsbericht Nr. 69 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer - Arbeitskreis V - Unter-
ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten",
Karlsruhe 1989
- [63] Föhl, C. Axel und Peter Basmer:
Untersuchung der Löschverfahren und
Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden
gefährlicher Güter,
Forschungsbericht Nr. 73 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer - Arbeitskreis V - Unter-
ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten",
Karlsruhe 1990
- [64] Bundesminister für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit:
Neufassung der zwölften Verordnung zur
Durchführung des Bundes-Immissions-
schutzgesetzes (Störfall-Verordnung),
BGBl.I, Seite 608, Bonn, 19.5.1988
- [65] Wefers, Heinrich und Ludwig Reimers:
Die neue Störfallverordnung,
WEKA-Fachvlg., Augsburg 1995
- [66] American Chemical Society:
Chemical Abstracts Service -
Registry Number Handbook,
Vlg. Chemie, Weinheim, New York,... 1974
- [67] Habermaier, Frank:
Gibt es doch das
Universal-Analysengerät?,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung
40 (1986), Heft 7, Seite 278...281
- [68] Rösner, D.:
Untersuchungen über die Verwendbarkeit
des Spürpanzers "Fuchs" der Bundeswehr,
vfdB-Zeitschrift, Forschung und Technik
im Brandschutz 40 (1991), Heft 4,
Seite 174...175
- [69] Eisinger, Adolf et al.:
Gefährstoffkonzept Rheinland-Pfalz,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung
49 (1995), Heft 1, Seite 12...20
- [70] Rechenbach, Peer:
Bedarf einer Vor-Ort-Analytik
an Feuerwehreinsatzstellen,
Vortrag Nr. 4 in [71]
- [71] Vereinigung zur Förderung des Deutschen
Brandschutzes e.V. (vfdB):
Jahresfachtagung vom 11. bis 15. Juni
im Gesellschaftshaus am Zoo,
Frankfurt/Main 1995
- [72] Mentfewitz, Joachim:
Einsatz eines mobilen Massenspektro-
metersystems (MM-1) bei Bränden und
Chemieunfällen - Erfahrungen aus der
Praxis,
Vortrag Nr. 6 in [71]
- [73] Basmer, Peter:
Erfahrungen aus Brandrauchanalysen
mit einem GC/MS-System,
Vortrag Nr. 7 in [71]
- [74] Matz, Gerhard und Alexander Harder:
Untersuchung von Rauchgasproben im
Rahmen des BMFT-Projektes "Schnell-
analyse bei Chemieunfällen und Bränden
mit dem mobilen GC/MS-System" am Ar-
beitsbereich Meßtechnik der Technischen
Universität Hamburg-Harburg (TUHH),
Hamburg 1992

- [75] Matz, Gerhard:
Schnelle GC/MS-Analyse bei
Chemieunfällen und Bränden,
Notfallvorsorge und Zivile Verteidigung
23 (1992), Heft 4, Seite 48...50
- [76] Matz, Gerhard et al.:
Mobiles Massenspektrometer
im Feuerwehreinsatz,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung
49 (1995), Heft 1, Seite 41...48
- [77] Matz, Gerhard:
Möglichkeiten und Grenzen eines mobilen
Massenspektrometers für die Vor-Ort-Ana-
lytik,
Vortrag Nr. 5 in [71]
- [78] Matz, Gerhard et al.:
Schnellanalyse bei Chemieunfällen und
Bränden mit mobilem GC/MS-System,
Abschlußbericht BMBF 01 VQ 9109/3,
Technische Universität Hamburg-Harburg
(TUHH), Arbeitsbereich Meßtechnik,
Hamburg 1995
- [79] Föhl, C. Axel und Peter Basmer:
Untersuchung der Löschverfahren und
Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden
gefährlicher Güter (Fortsetzung des For-
schungsberichtes Nr. 81),
Forschungsbericht Nr. 86 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer - Arbeitskreis V - Unter-
ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten",
Karlsruhe 1993
- [80] Merz, W. et al.:
Ein Verfahren zur Erzeugung und analyti-
schen Charakterisierung von Brandgasen,
Fresenius' Zeitschrift für Analytische Che-
mie 325 (1986), Seite 449...460
- [81] Neumüller, Otto-Albrecht:
RÖMPPS Chemie-Lexikon, 8. Aufl.,
Franckh'sche Vlgd., Stuttgart 1979...88
und Falbe, Jürgen und Manfred Regitz:
RÖMPP Chemie-Lexikon, 9. Aufl.,
Thieme-Vlg., Stuttgart 1989...93
- [82] Brodbelt, Jennifer und R. Graham Cooks:
Ion Trap Tandem Mass Spectrometry,
Spectra - a Finnigan MAT Publication 11
(1988), Heft 2, Seite 30...40
- [83] Brunnée, C. und H. Voshage:
Massenspektrometrie,
Thiemig-Vlg., München 1964
- [84] Axel Semrau GmbH & Co:
Interpretation von Massenspektren,
Sprockhövel (Westfalen) 1989
- [85] Paul, Wolfgang:
Elektromagnetische Käfige für
geladene und neutrale Teilchen,
Physikalische Blätter 46 (1990), Heft 7,
Seite 227...236
- [86] Fischer, E.:
Die dreidimensionale Stabilisierung von
Ladungsträgern in einem Vierpolfeld,
Zeitschrift für Physik 156 (1959), Heft 1,
Seite 1...26
- [87] Paul, Wolfgang und Helmut Steinwedel:
Ein neues Massenspektrometer
ohne Magnetfeld,
Zeitschrift für Naturforschung (Teil A) 8a
(1953), Heft 7, Seite 448...450
- [88] Schubert, Ralf:
Ion Trapping - eine neue Technik
massenselektiver Detektion,
GIT Fachzeitschrift für das Laboratorium
29 (1985), Heft 11, Seite 1175...1177
- [89] Kortüm, Gustav:
Einführung in die chemische
Thermodynamik, 5. Aufl.,
Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1966
- [90] Perkin-Elmer & Co GmbH:
Gaschromatograph Serie 8500
- Gerätehandbuch,
Überlingen/Bodensee 1988
- [91] Finnigen MAT GmbH:
Bedienungshandbuch für den
Ion Trap Detektor ITD 800,
Bremen 1986

- [92] Finnigan MAT GmbH:
Ion Trap Detector - Systembeschreibung,
Bremen 1988
- [93] Bruns-Weller, Elke und Ulrich Tillmanns:
Massenspektrometrische
Detektion in der GC,
GIT Fachzeitschrift für das Laboratorium
33 (1989), Heft 11, Seite 1159...1167
- [94] Anonym:
Mobiles Massenspektrometer EM 640,
Systembeschreibung, Firmenbroschüre
der Bruker-Franzen Analytik GmbH,
Bremen 1995
- [95] Loudon, Alexander G. et al.:
Das mobile Massenspektrometer MM-1
im Umwelt- und Katastrophenschutz,
Firmenbroschüre der Bruker-Franzen
Analytik GmbH, Bremen 1990
- [96] Matz, Gerhard und Wolfgang Schröder:
Boden-Schnellanalytik - die Erkundung
von Altlasten im Feld mit GC/MS-System,
LP-Spezial "Chromatographie Spektrosko-
pie" - Sonderheft der LaborPraxis 1990,
Seite 78...81
- [97] International Organization
for Standardization:
Fire tests - full scale room test for surface
products (Draft International Standard ISO/
DIS 9705),
Genf, 12.12.1990
- [98] Föhl, C. Axel und Peter Basmer:
Untersuchung der Löschverfahren und
Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden
gefährlicher Güter - GC/MS-Rauchgas-
analyse,
Forschungsbericht Nr. 81 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer - Arbeitskreis V - Unter-
ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten",
Karlsruhe 1992
- [99] National Institute for Standards and Tech-
nology (NIST) und US Environmental Pro-
tection Agency (EPA):
Mass Spectra Database, PC-Version 3.0,
Gaithersburg (Maryland) 1990
- [100] Pál, Gizella und Hugó Macskásy:
Plastics - their behavior in fires,
Studies in Polymer Science 6,
Elsevier Science Publ.,
Amsterdam,... 1991
- [101] Cadillac Plastic GmbH:
Kunststoffhalbzeuge - Übersicht,
Lieferprogramm 15/1091 WD-TOP,
Viernheim 1991
- [102] National Institute for Standards and Tech-
nology (NIST) und US Environmental Pro-
tection Agency (EPA):
Mass Spectra Library,
PC-Version 4,5 für Windows®,
Gaithersburg (Maryland) 1995
- [103] Pleß, Georg und Ursula Seliger:
Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei
Thermoplasten, Teil 1: Beurteilung der
Phasengrenzfläche und Löschversuche an
ebenen Flächen,
Forschungsbericht Nr. 90 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer - Arbeitskreis V - Unter-
ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten",
Heyrothsberge 1994
- [104] Pleß, Georg und Ursula Seliger:
Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei
Thermoplasten, Teil 2: Bewertung der
Löschwirkung bei unterschiedlichen Ther-
moplasten an ebenen Flächen und geome-
trischen Körpern,
Forschungsbericht Nr. 92 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer - Arbeitskreis V - Unter-
ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten",
Heyrothsberge 1994
- [105] Günther, Rudolf:
Verbrennung und Feuerungen,
Springer-Vlg., Berlin, New York,... 1974
- [106] Beitz, Wolfgang und Karl-Heinz Küttner:
Dubbel - Taschenbuch für
den Maschinenbau, 17. Aufl.,
Springer-Vlg., Berlin, New York,... 1990

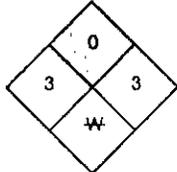
- [107] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.
- Normenausschuß Bauwesen:
Brandverhalten von Baustoffen
und Bauteilen (DIN 4102),
Beuth-Vlg., Berlin 1981
- [108] Jentzsch, Dietrich:
Gas-Chromatographie - Grundlagen,
Anwendung, Methoden, 3. Aufl.,
Chemie-Monographien Band 2,
Franckh'sche Vlgdgl., Stuttgart 1975
- [109] Perkin-Elmer & Co GmbH:
Gas-Chromatographie - Kapillarsäulen,
Kataloge 2615 und 2473,
Überlingen/Bodensee 1989
- [110] Chrompack GmbH:
Generalkatalog,
Frankfurt/Main 1992
- [111] Analyt GmbH:
Chromatographie-Handbuch,
Müllheim/Baden 1991
- [112] ASS-CHEM GmbH:
Essentials of Gas Chromatography,
Bad Homburg 1991
- [113] Hewlett-Packard Co.:
Analytical Supplies Catalog and Chromato-
graphy Reference Guide,
Palo Alto (California) 1988
- [114] Hein, Hubert und Wolfgang Kunze:
Umweltanalytik mit
Spektrometrie und Chromatographie,
Vlg. Chemie, Weinheim, New York,... 1994
- [115] Roth, Lutz und Ursula Weller:
Chemie-Brände - Brandtabellen, Fallbei-
spiele, Risiken und Vorsorgemaßnahmen,
ecomede-vlg., Landsberg, München 1990
- [116] Troitzsch, Jürgen et al.:
Brandverhalten von Kunststoffen -
Grundlagen, Vorschriften, Prüfverfahren,
Hanser-Vlg., München, Wien 1982
- [117] Lambrecht, Volker:
Erfahrungen mit einem Meßkonzept,
vfdb-Zeitschrift, Forschung und Technik
im Brandschutz 40 (1991), Heft 4,
Seite 176...178
- [118] König, Mario:
Alternative Methoden
zur Gefahrstoffanalytik,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung
45 (1991), Heft 6, Seite 303...306
- [119] Brunn, Wolfgang:
Das Messen von Schadstoffkonzentrationen
im Feuerwehreinsatz - Möglichkeiten und
Grenzen,
Vortrag Nr. 13 in [71]
- [120] Trepesch, Dieter:
Probleme der Bewertung von Meß-
ergebnissen aus der Sicht der Feuerwehr,
vfdb-Zeitschrift, Forschung und Technik
im Brandschutz 40 (1991), Heft 4,
Seite 187...189
- [121] Vereinigung zur Förderung des Deutschen
Brandschutzes e.V. (vfdb), Technisch-Wis-
senschaftlicher Beirat, Referat 10:
Entwurf der vfdb-Richtlinie 10/01 zur
Messung und Bewertung von Schadstoff-
konzentrationen im Feuerwehreinsatz,
München 1992
- [122] Rodewald, Gisbert:
Bewerten von Schadstoffkonzentrationen
im Feuerwehreinsatz - Das Für und Wider
zur vfdb-Richtlinie 10/01-Entwurf,
Vortrag Nr. 14 in [71]
- [123] Föhl, C. Axel:
Untersuchung der Löschverfahren und
Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden
gefährlicher Güter - Entstehung von
Dioxinen und Furanen im Brandfall und
erforderliche Abwehrmaßnahmen,
Forschungsbericht Nr. 77 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer - Arbeitskreis V - Unter-
ausschuß "Feuerwehrangelegenheiten",
Karlsruhe 1991

- [124] Trampisch, Hans Joachim et al.:
Umweltmedizinische Untersuchung bei
Feuerwehrleuten - Studie über Dioxine,
Furane und andere organische Chlorver-
bindungen im Blut von Feuerwehrleuten,
Ministerium für Arbeit, Gesundheit und
Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen,
Düsseldorf 1992
- [125] Pleß, Georg:
Schadgase bei Bränden - Vorstellung des
Entwurfes einer Richtlinie,
Vortrag Nr. 12 in [71]
- [126] Budzikiewicz, Herbert:
Massenspektrometrie - eine Einführung,
2. Aufl., Taschentext Nr. 5,
Vlg. Chemie, Weinheim, New York,... 1980
- [127] Spittler, Gerhard und Margot Spittler:
Massenspektrensammlung von Lösungsmit-
teln, Verunreinigungen, Säulenbelegungs-
materialien und einfachen aliphatischen
Verbindungen,
Springer-Vlg., Wien, New York,... 1973
- [128] Kolb, B.:
Gaschromatographie - Einführung,
Audiovisuelles Lehrprogramm der
Technischen Schule des Bodenseewerkes,
Perkin-Elmer & Co GmbH, Überlingen
1975
- [129] Metzner, Klaus:
Gaschromatographische Spurenanalyse,
Akademische Vlg.ges., Leipzig 1977
- [130] Buff, Klaus:
Die toxikologische Bewertung von Schad-
stoffkonzentrationen bei großräumigen
Freisetzungen,
Vortrag Nr. 11 in [71]
- [131] Deutsche Forschungsgemeinschaft - Se-
natskommission zur Prüfung gesundheits-
schädlicher Arbeitsstoffe, Mitteilung 31:
MAK- und BAT-Werte-Liste 1995,
Vlg. Chemie, Weinheim, New York,... 1995
- [132] Steinbach, Klaus:
Grundlegende Aussagen über relevante
Verbrennungsprodukte bei Schadenfeuern
und die akute Toxizität der Rauchgase,
Vortrag Nr. 10 in [71]

9. BILDER UND TABELLEN

Bild	1: Die Anweisungen zur Feuerbekämpfung im "Handbuch der gefährlichen Güter" [2] für Chromschwefelsäure	84
Bild	2: Die Hinweise zum Brandfall für Chromschwefelsäure in den "Merkblättern Gefährliche Arbeitsstoffe" [3]	85
Bild	3: Das Ergebnis einer mit dem Ion Trap Detector™ durchgeführten Analyse der Brandgase von PVC-Hartschaum nach 6 Minuten Branddauer [79, 99]	86
Bild	4: Das Ergebnis einer mit dem MM-1® durchgeführten Analyse der Brandgase von PVC-Hartschaum nach 6 Minuten Branddauer [79, 102]	88
Bild	5: Prinzipskizze eines Stabquadrupol-Massenspektrometers [83, 84]	90
Bild	6: Das Stabilitätsdiagramm für die Koeffizienten der Bewegungsgleichung der Ionen im Quadrupolfeld [84]	91
Bild	7: Die Elektroden-Anordnung bei einer PAUL-Falle [81, 84...86]	92
Bild	8: Der GC/MS-Arbeitsplatz [90, 91]	93
Bild	9: Der Anschluß des Massenspektrometers an den Gaschromatographen über die open-split-Einlaßleitung [91]	94
Bild	10: Prinzipskizze der an der TUHH weiterentwickelten GC/MS-Apparatur EM 640 [78, 94]	95
Bild	11: Der Versuchsstand für Verbrennungs- und Löscheversuche mit Probenmengen im kg-Bereich	96
Bild	12: Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit Polyethylen	97
Bild	13: Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit Polystyrol	98
Bild	14: Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit PVC-Kabel	99
Bild	15: Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit PVC-Hartschaum	100

Bild	16: Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit Hart-PVC (grau)	101
Bild	17: Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit Polycarbonat	102
Bild	18: Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit Polyoxymethylen	103
Tabelle	1: Die Stoffe, die in allen zitierten Gefahrstoffzusammenstellungen [2...4, 8...12, 17, 18, 20...22] enthalten sind und die zumindest nach einer davon nicht mit Wasser gelöscht werden dürfen	104
Tabelle	2: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polyethylen detektierten Substanzen	105
Tabelle	3: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polystyrol detektierten Substanzen	109
Tabelle	4: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Elektrokabeln detektierten Substanzen	111
Tabelle	5: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Hartschaum detektierten Substanzen	114
Tabelle	6: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliothek für die im Rauchgas von Hart-PVC (grau) detektierten Substanzen	117
Tabelle	7: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliothek für die im Rauchgas von Polycarbonat detektierten Substanzen	120
Tabelle	8: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliothek für die im Rauchgas von Polyoxymethylen detektierten Substanzen	122
Tabelle	9: Zuordnung der Substanzen, die mit Hilfe der GC/MS-Analyse in den Rauchgasen von Polyethylen, Polystyrol, PVC-Elektrokabeln, PVC-Hartschaum, Hart-PVC (grau), Polycarbonat und von Polyoxymethylen detektiert wurden, zu verschiedenen Stoffgruppen	123
Tabelle	10: Zusammenstellung aller Substanzen, die mit Hilfe der GC/MS-Analyse in den Rauchgasen von Polyethylen, Polystyrol, PVC-isolierten Elektrokabeln, PVC-Hartschaum, Hart-PVC (grau), Polycarbonat und von Polyoxymethylen detektiert wurden, geordnet nach der Retentionsdauer in der Trennsäule beziehungsweise nach dem Siedepunkt	124
Tabelle	11: Zusammenstellung der gefährlichsten Substanzen, die in Brandgasen enthalten sein können oder die bei Störfällen freigesetzt werden können – geordnet nach dem Feuerwehr-Einsatztoleranzwert (ETW) [130]	165

Formel: $H_2SO_4 + CrO_3$		Summen- formel:	U.N.-Nr. 2240	Merkblatt 997
Stoffname				Gefahren- Diamant 
<i>Deutsch</i> Chromschwefelsäure* Dichromatschwefelsäure	<i>Englisch</i> Chromosulphuric acid	<i>Französisch</i> Acide sulfochromique Mélange sulfochromique		
* Die handelsübliche Lösung besteht üblicherweise aus 20 g Chromtrioxid beziehungsweise 50 g Natrium- oder Kaliumdichromat in 1 l konzentrierter Schwefelsäure.				
Technische Daten		Feuerbekämpfungsdaten		Hazchem-Code: 4 W
Siedepunkt	ca. 340 °C **	Flammpunkt	} nicht brennbar, } aber sehr } reaktionsfähig	
Dampfdruck in mbar		Zündfähiges Gemisch, Vol.-%		
Dampfdichteverhältnis, Luft = 1		Zündtemperatur		
Schmelzpunkt			** Unter Abgabe von Schwefeltrioxid	
Mischbarkeit mit Wasser	vollständig (reagiert) ***		*** Reagiert heftig unter Entwicklung von viel Hitze.	
Spez. Gewicht, Wasser = 1	1,85			
Molare Masse	724,42			
Transport- und Gefahrenklasse		CAS Nr. 14489-25-9		
IMDG-Code (D-GGVSee): Kl. 8		D Gefahrstoff V:		
Page: 8146; EmS: 8-06; MFAG: 700		EG-Richtl.:		
RID (D-GGVE): Kl. 8 Rn 801 Ziff. 1 a		D Land (VbF):		
ADR (D-GGVS): Kl. 8 Rn 2801 Ziff. 1 a		GB Blue Book: Corrosives & IMDG-Code E 8146		
ADNR: Kl. 8 Rn 6801 Ziff. 1 a		USA CFR 49: § 172.101 Cor. M		
		ICAO/IATA-DGR: Kl. 8 UN-Nr. 2240		

Erscheinungsbild: Dunkel- bis rotbraune, ölige Flüssigkeit; meistens geruchlos.

Verhalten bei Freiwerden und Vermischen mit Luft: Stark ätzende, nicht brennbare, aber sehr reaktionsfähige Flüssigkeit. Bei starker Erhitzung (z. B. durch Umgebungsbrände oder heiße Oberflächen) erfolgt Zersetzung unter Bildung sehr giftiger Schwefeloxide. Bei Kontakt mit Feuchtigkeit, Wasserdampf oder Wasser erfolgt heftige Reaktion unter stürmischer Hitzeentwicklung. Chromschwefelsäure ist ein starkes Oxidationsmittel. Bei Kontakt mit organischen Stoffen, wie z. B. Holz, Baumwolle, Papier, Sägemehl oder Stroh, erfolgt sehr heftige Reaktion unter starker Erhitzung, die zu Brand führen kann.

Verhalten bei Freiwerden und Vermischen mit Wasser: Bei Kontakt oder Mischung mit Wasser erfolgt sehr heftige Reaktion unter stürmischer Hitzeentwicklung. Es bilden sich auch bei großer Verdünnung noch ätzende Gemische mit Wasser. Durch die starke Hitzeentwicklung können sich über der Wasseroberfläche Dämpfe oder Nebel bilden.

...

Bekämpfung der Unfallfolgen:

Feuer: Stoff brennt selbst nicht. Bei Bekämpfung von Umgebungsbränden die Substanz möglichst vor Feuchtigkeit oder Wasser schützen und Trockenlöschpulver einsetzen. Ist Naßlöschung unumgänglich, auf Wirkung der heftigen Reaktion und der dabei entstehenden Säurenebel achten. Die Nebel sollten mit Sprühwasser niedergeschlagen werden. Achtung, es entstehen ätzende Gemische im Löschwasser. Behälter mit Sprühwasser kühlen und nach Möglichkeit aus der Gefahrenzone ziehen. Es darf jedoch kein Wasser in die Behälter gelangen.

...

Bild 1: Die Anweisungen zur Feuerbekämpfung im "Handbuch der gefährlichen Güter" [2] für Chromschwefelsäure

<p>Gefahrenbereich</p> 	<p>Chromschwefelsäure Dichromatschwefelsäure Lösung von üblicherweise 50g Natrium- oder Kaliumdichromat (bzw. 20g Chromtrioxid) in 1 Liter konz. Schwefelsäure</p>	<p>2240</p>
<p>Arbeitsplatz</p> 	<p>Dunkel-rotbraune, ölige, stark ätzende, mit Wasser mischbare Flüssigkeit, sehr giftig, energisches Oxidationsmittel. Kann mit leicht entzündlichen Stoffen heftig reagieren und diese entzünden. Reizung bzw. Verätzung der Haut, Augen und Atemwege. Verursacht auf der Haut tiefgehende, schlecht heilende Wunden. Lungenschäden durch Einatmen von Nebeln möglich. Bei den zur Herstellung verwendeten Alkalichromaten besteht Verdacht auf krebserregende Wirkung.</p>	 <p>* nicht nach VO</p>

A. Hinweise zur Sicherheit

1. Sehr gute Raumentlüftung, säurebeständigen Fußboden (kein Holz) mit Bodenabfluß und Waschgelegenheit vorsehen. Auf größte Sauberkeit im Raum achten.
2. Augenspülflasche oder Augenbrause sichtbar im Arbeitsraum bereitstellen. Beim Umgang mit größeren Mengen Notbrause und Feuerlöscher der angepaßten Brandklasse vorsehen. Standorte mit Hinweisschildern kennzeichnen.
3. Im Betrieb geschlossene oder abgedeckte Apparate verwenden. Gefäße nicht offen stehen lassen. Nebel an der Entstehungsstelle absaugen, nicht einatmen! Keine großen Vorräte halten. Verschlüsse vorsichtig öffnen, dabei Gebinde stets aufrecht halten. Wegen der Gefährlichkeit prüfen, ob Ersatz durch neuzeitliche Reinigungsmittel möglich ist.
4. Säurefeste Hilfsgeräte einsetzen. Beim Verdünnen Chromschwefelsäure unter Rühren und Kühlen langsam in Wasser einlaufen lassen, niemals umgekehrt, stürmische Wärmeentwicklung. Als Filtermaterial nur Glaswolle, Sinterglas, Keramik oder Teflon-Filter benutzen, kein Filterpapier!
5. Chromschwefelsäure reagiert heftig mit verschiedenen Leichtmetallegerungen manchmal explosionsartig mit organischen Stoffen wie Papier, Textilien, Holz. Bei Einwirkung von Salzsäure entsteht Chromylchlorid. Kontakt mit brennbaren Lösemitteln vermeiden, sofortige Entzündung möglich. Reinaluminium wird von konzentrierter Chromschwefelsäure nicht angegriffen.

...

B. Hinweise zum Brand- und Schadensfall

1. Löschmaßnahmen auf Umgebung abstimmen. Stoff selbst brennt nicht, Brandbekämpfung aus großer Entfernung mit viel Wasser im Sprühstrahl, zum Abdecken und Aufsaugen ausgelaufener Flüssigkeit evtl. Sand benutzen. Auf ätzende und giftige Dämpfe und Nebel achten. Kontakt mit organischen Stoffen sowie das Eindringen in Gewässer und Kanalisation unbedingt verhindern. Säurebeständige Hilfsgeräte verwenden.
2. Umluftunabhängiges Atemschutzgerät und dichtschießenden Chemie-Schutzanzug anlegen.
3. Wassergefährdender Stoff (nach Wasserhaushaltsgesetz).
4. Nach GGVS ist beim Straßentransport größerer Mengen eine Fahrzeugkennzeichnung durch orangefarbene Warntafeln und das Mitführen von Unfallmerkblättern vorgeschrieben.

...

Bild 2: Die Hinweise zum Brandfall für Chromschwefelsäure in den "Merkblättern Gefährliche Arbeitsstoffe" [3]

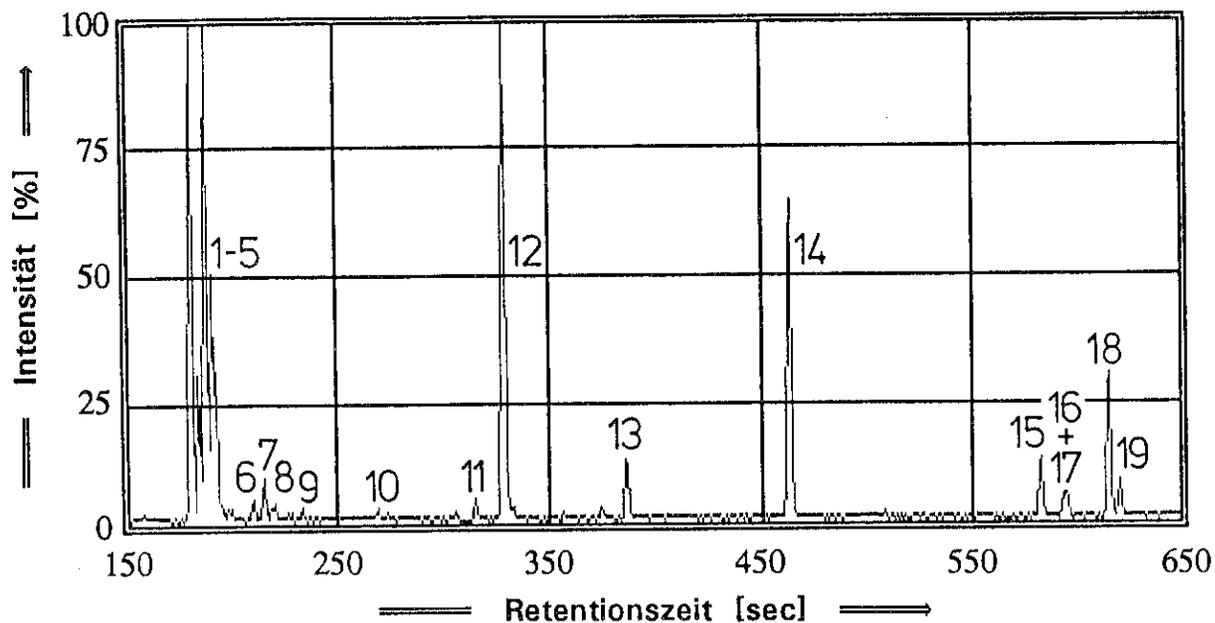


Bild 3a: Das mit dem Ion Trap Detector™ gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum nach 6 Minuten Branddauer [79]

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Quarzkapillarsäule, Länge $l = 50$ m, Innendurchmesser $\varnothing_i = 0,25$ mm, Dünnschicht OV-1, Stärke $\delta = 0,4$ μm ,
- Trägergas: Helium mit 1400 hPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) – 15 °C/min – 220 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	?
2	186	?
3	190	CH ₃ Cl Chlor-Methan
4	193	C ₂ H ₃ Cl Chlor-Ethen
5	195	}
⋮	⋮	
9	235	
10	275	C ₅ H ₆ O 2-Methyl-Furan
11	316	?
12	329	C ₆ H ₆ Benzol
13	386	?
14	461	C ₇ H ₈ Toluol
15	581	C ₈ H ₁₀ Ethyl-Benzol
16	590	C ₈ H ₁₀ p/m-Xylol
17	593	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol
18	612	C ₈ H ₈ Styrol
19	617	C ₈ H ₁₀ o-Xylol

Bild 3b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek [99] für die Peaks des Chromatogramms in Bild 3a

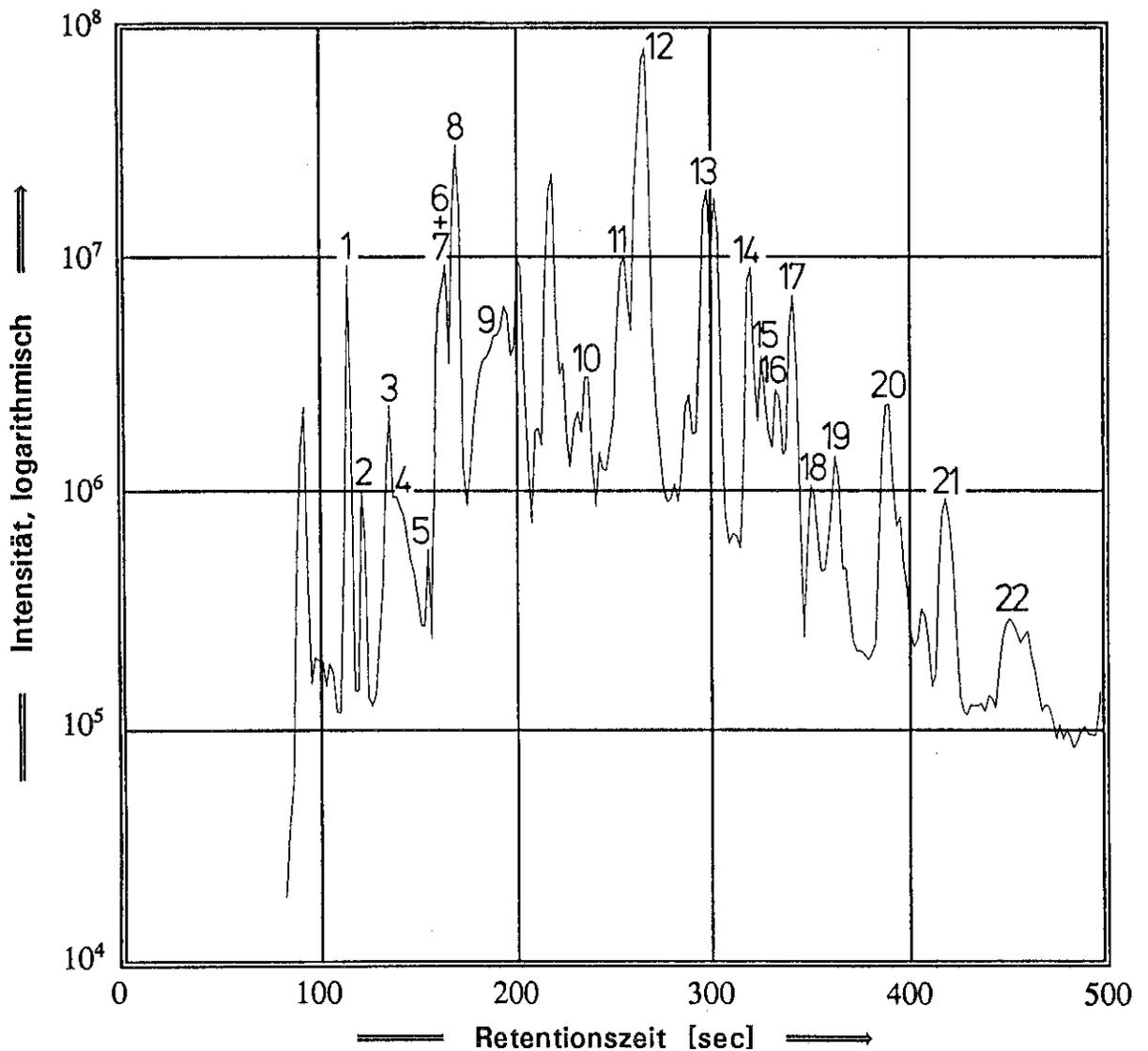


Bild 4a: Das mit dem MM-1[®] gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum nach 6 Minuten Branddauer [79]

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Quarzkapillarsäule, Länge $l = 5$ m, Innendurchmesser $\varnothing_i = 0,32$ mm, Dickfilm DB-1, Stärke $\delta = 5$ μ m,
- Trägergas: Luft, Druckdifferenz über Säulenlänge ≈ 700 hPa,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	111	C_6H_6 Benzol
2	119	$C_4H_8O_2$ Propansäure-Methylester
3	133	C_7H_8 Toluol
4	137	$C_5H_4O_2$ Furaldehyd
5	153	C_6H_5Cl Chlor-Benzol
6	163	C_8H_{10} Xylol
7	163	C_8H_6 Ethinyl-Benzol
8	168	C_8H_8 Styrol
9	188	C_6H_6O Phenol
10	235	C_9H_8O Methyl-Benzo-Furan
11	255	C_6H_5ClO Chlor-Phenol
12	266	$C_{10}H_8$ Naphthalin
13	300	$C_{11}H_{10}$ Methyl-Naphthalin
14	318	? PAK (Molekulargewicht 154)
15	324	$C_{12}H_{12}$ Ethyl-Naphthalin
16	331	$C_{12}H_{12}$ Dimethyl-Naphthalin
17	339	? PAK (Molekulargewicht 152)
18	348	$C_{13}H_{12}$ Propenyl-Naphthalin
19	361	$C_{12}H_8O$ Dibenzo-Furan
20	386	? PAK (Molekulargewicht 166)
21	418	$C_{15}H_{16}$ Diphenyl-Propan
22	451	$C_{14}H_{12}$ Methyl-Fluoren

Bild 4b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek [102] für die Peaks des Chromatogramms in Bild 4a

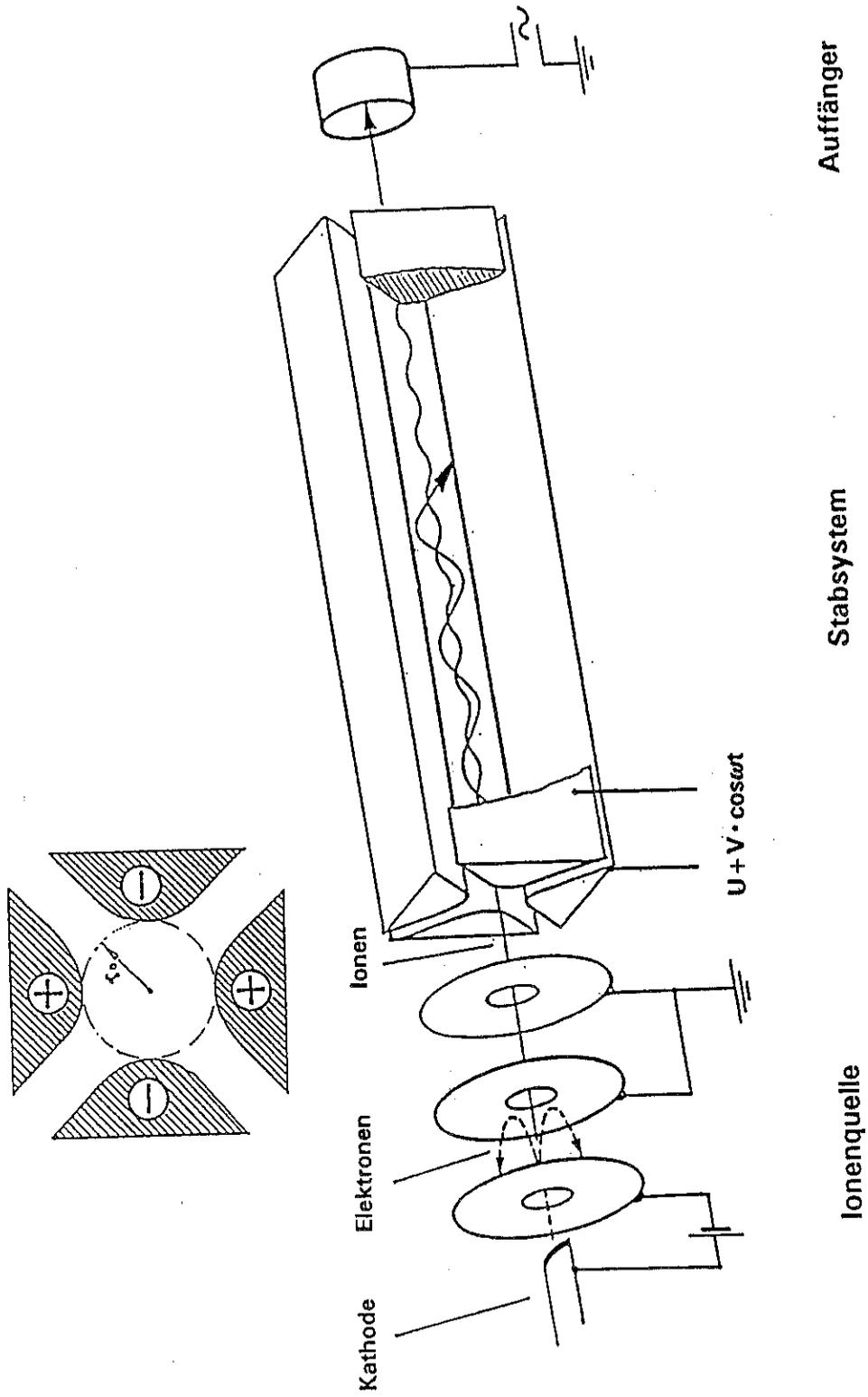


Bild 5: Prinzipskizze eines Stabquadrupol-Massenspektrometers [83, 84]

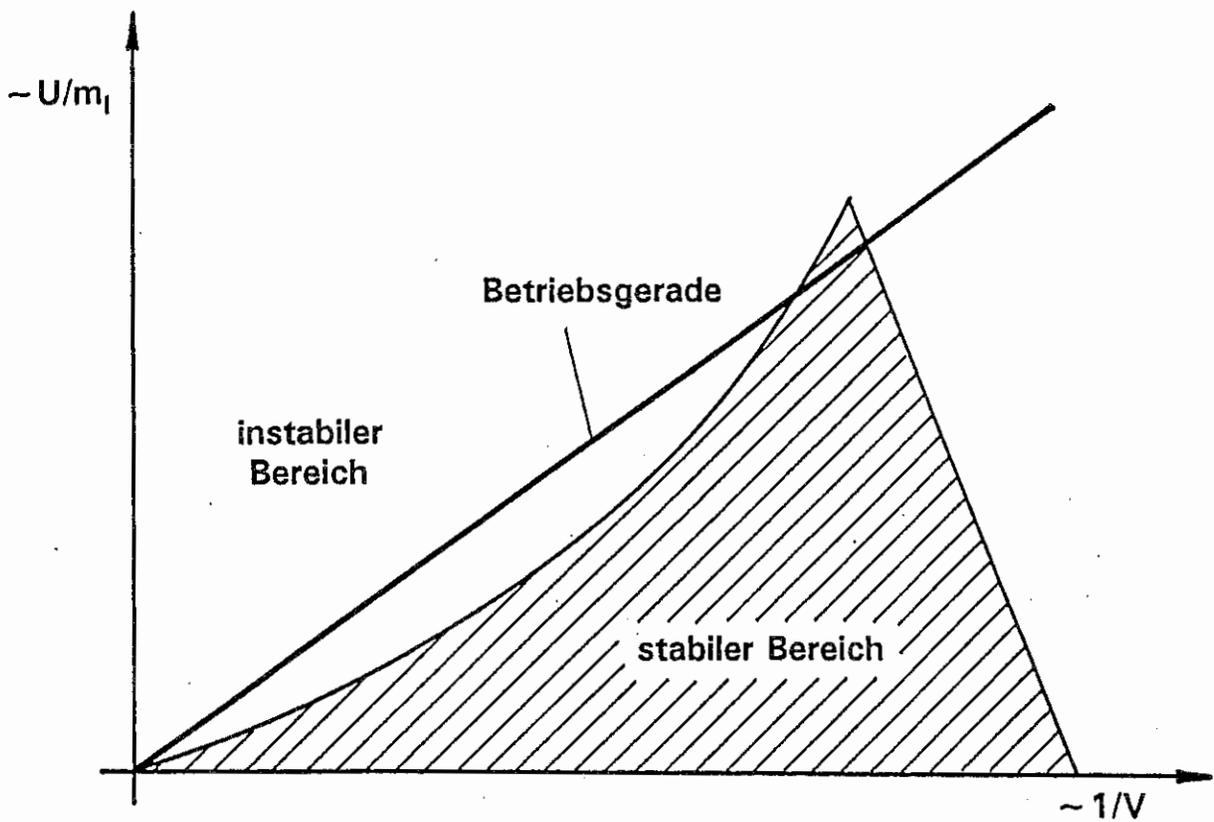


Bild 6: Das Stabilitätsdiagramm für die Koeffizienten der Bewegungsgleichung der Ionen im Quadrupolfeld [84]

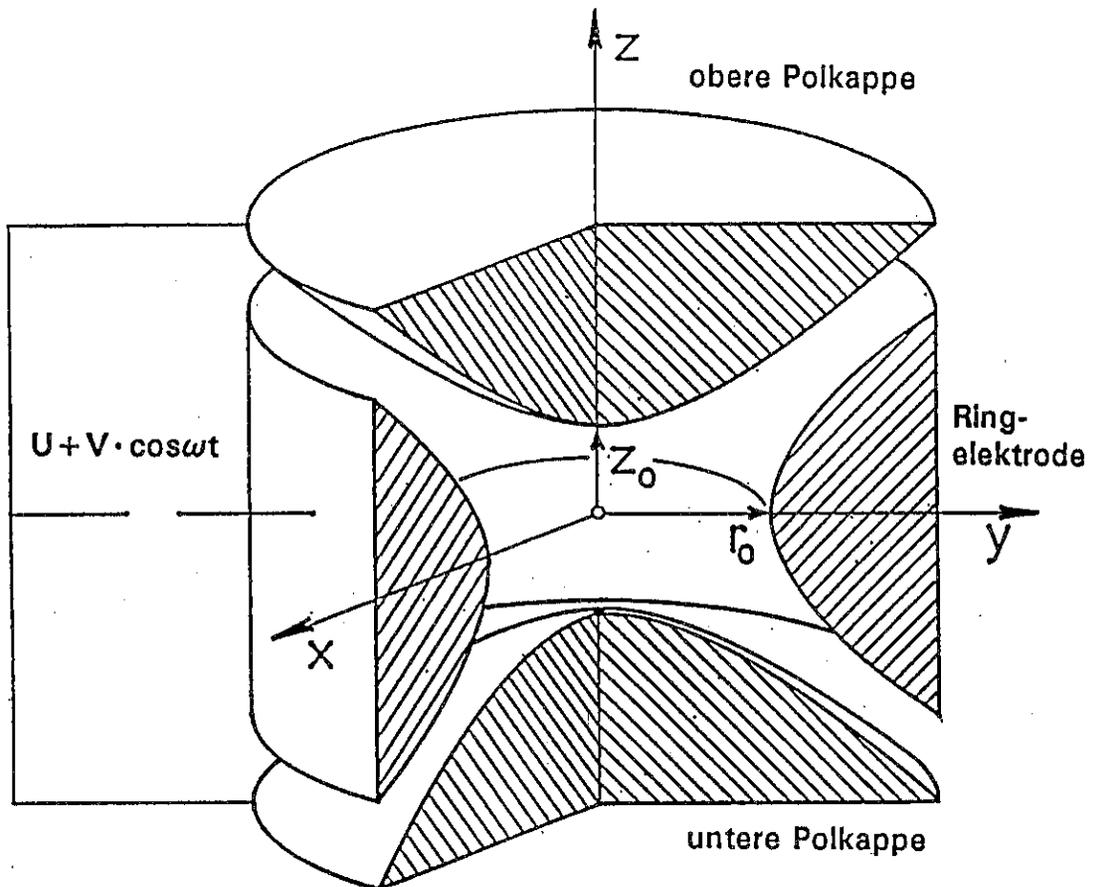


Bild 7: Die Elektroden-Anordnung bei einer PAUL-Falle [81, 84...86]

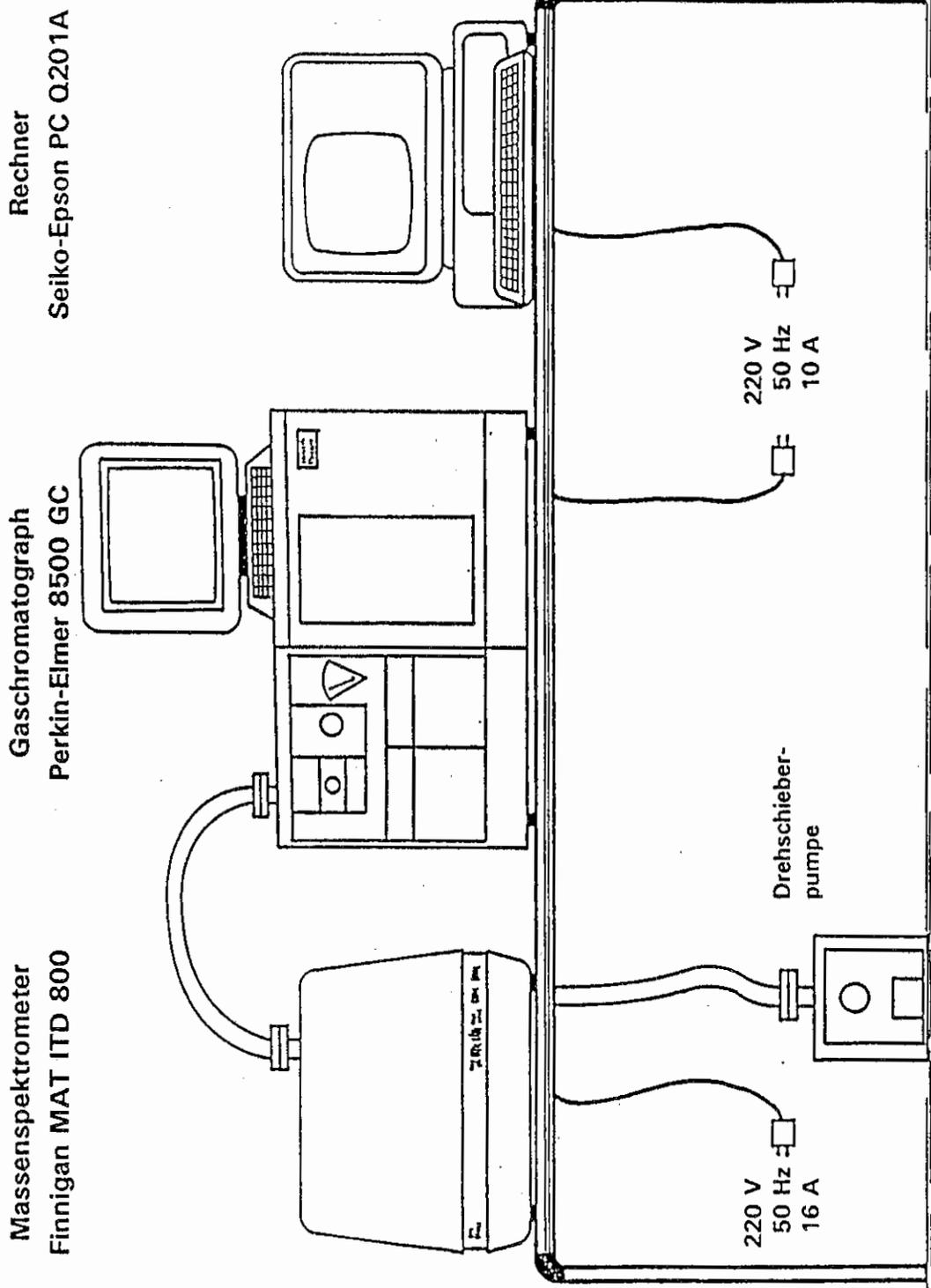


Bild 8: Der GC/MS-Arbeitsplatz [90, 91]

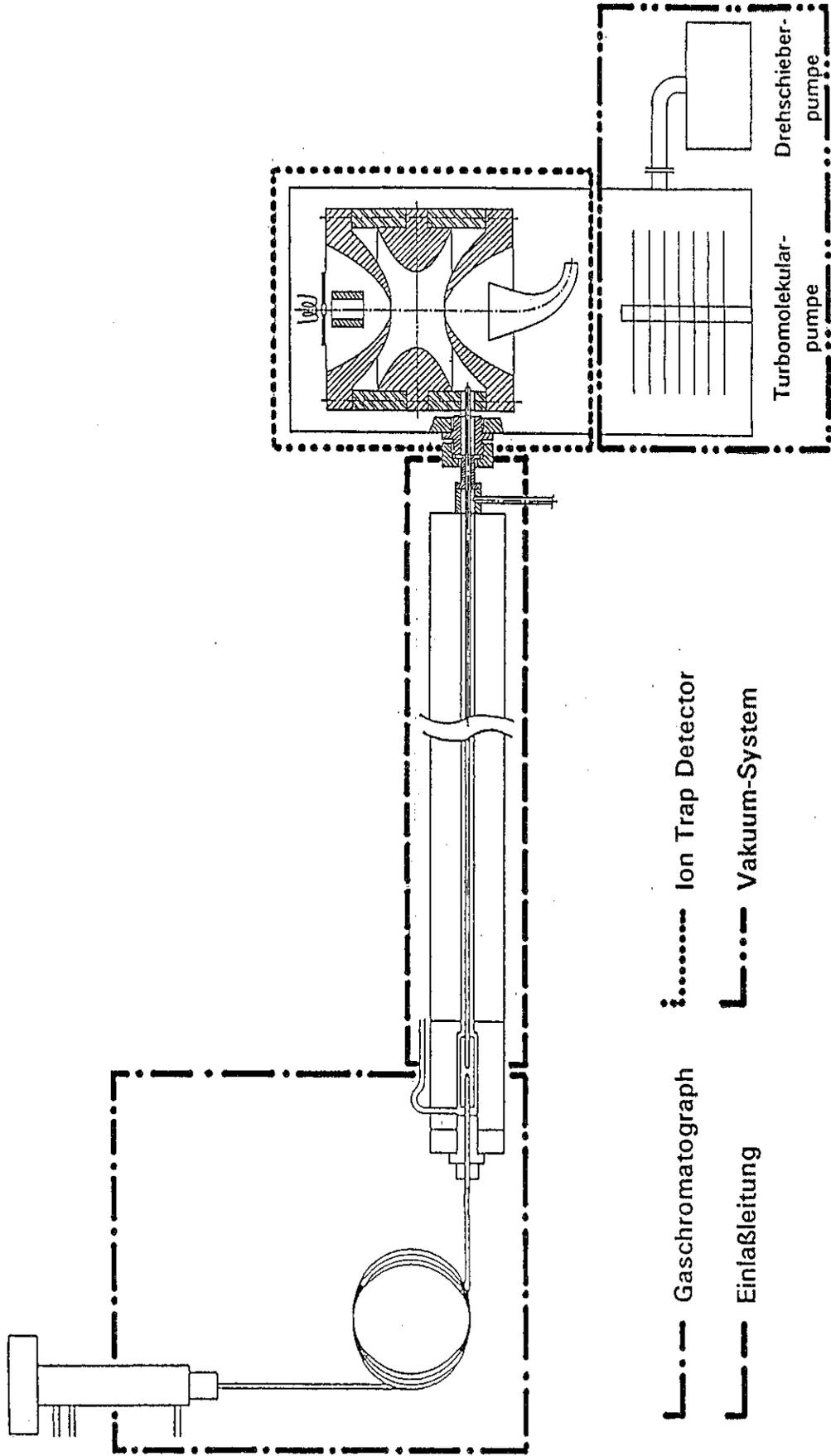
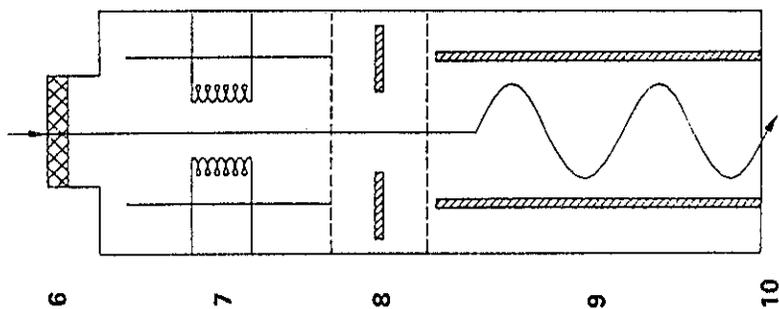


Bild 9: Der Anschluß des Massenspektrometers an den Gaschromatographen über die open-split-Einlaßleitung [91]



- 1: Injektor/Desorber
- 2: Gasversorgung
- 3: GC-Trennsäule
- 4: elektronische Steuerung
- 5: Massenspektrometer
- 6: Einlaßmembran
- 7: Ionenquelle
- 8: elektrische Linse
- 9: Stabquadrupol
- 10: zum Elektronenvervielfacher

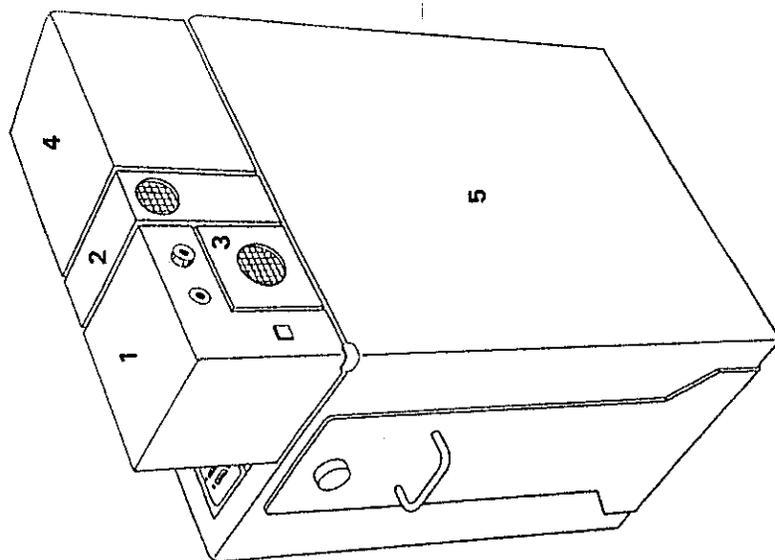


Bild 10: Prinzipskizze der an der TUHH weiterentwickelten mobilen GC/MS-Apparatur EM 640 [78, 94]

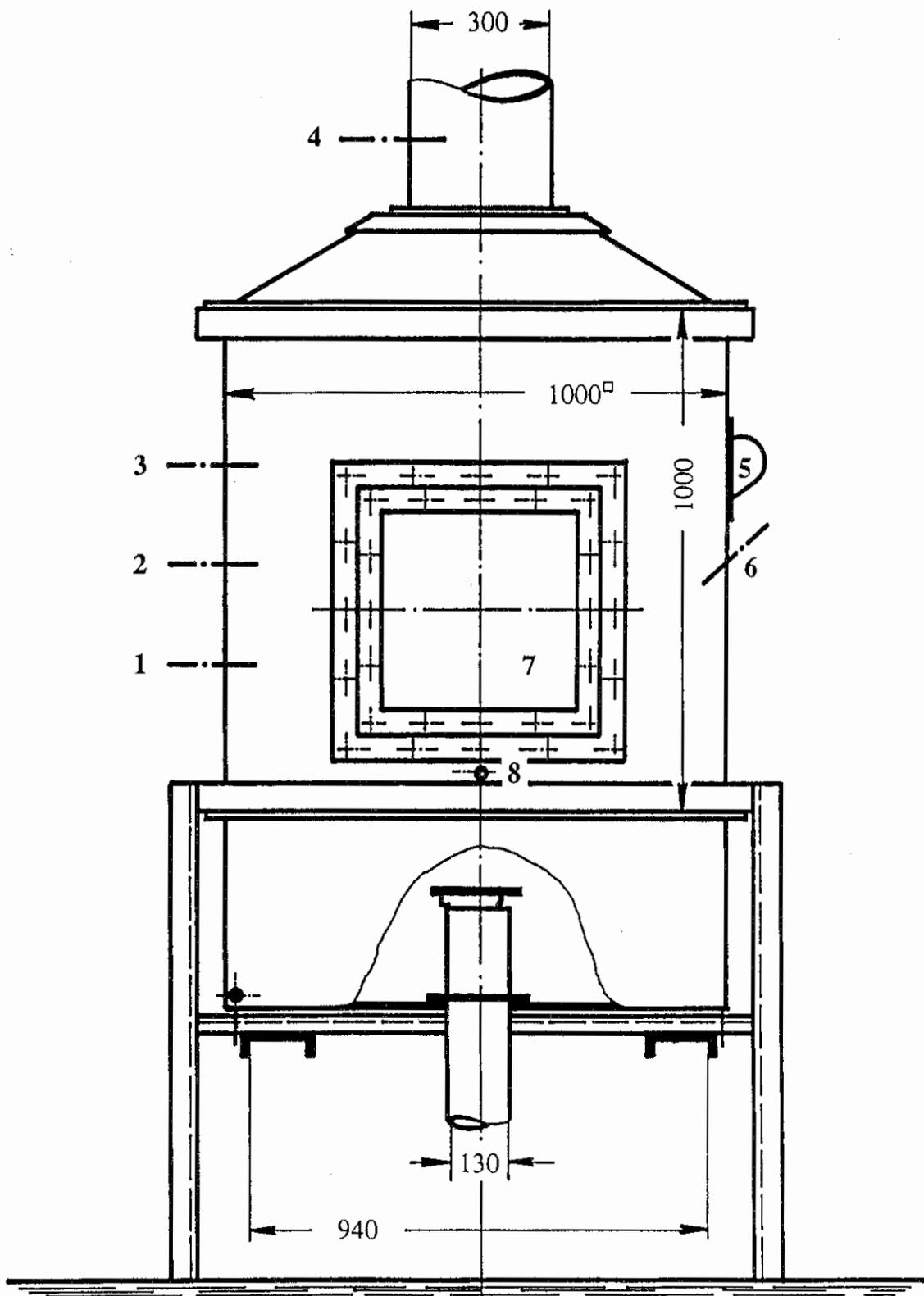


Bild 11: Der Versuchsstand für Verbrennungs- und Löschversuche mit Probenmengen im kg-Bereich: 1...4 = Probenahmestellen, 5 = Beleuchtung, 6 = Durchlaß für Löschrohr, 7 = wärmebeständiges Fenster, 8 = Durchlaß für Zündfackel

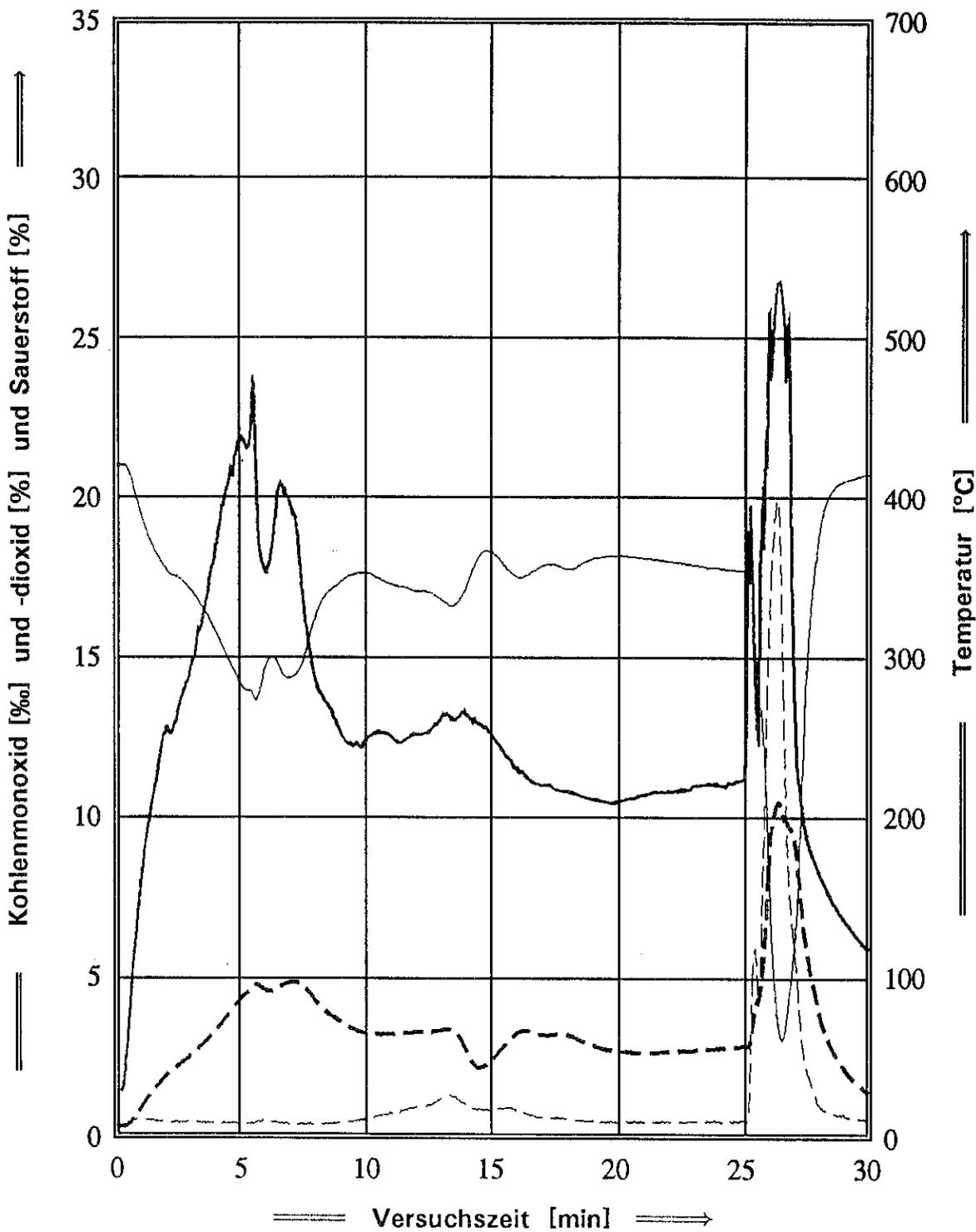


Bild 12: Der zeitliche Verlauf der
Temperatur und der
Sauerstoff-, der
Kohlendioxid- und der
Kohlenmonoxidkonzentration
an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit
Polyethylen

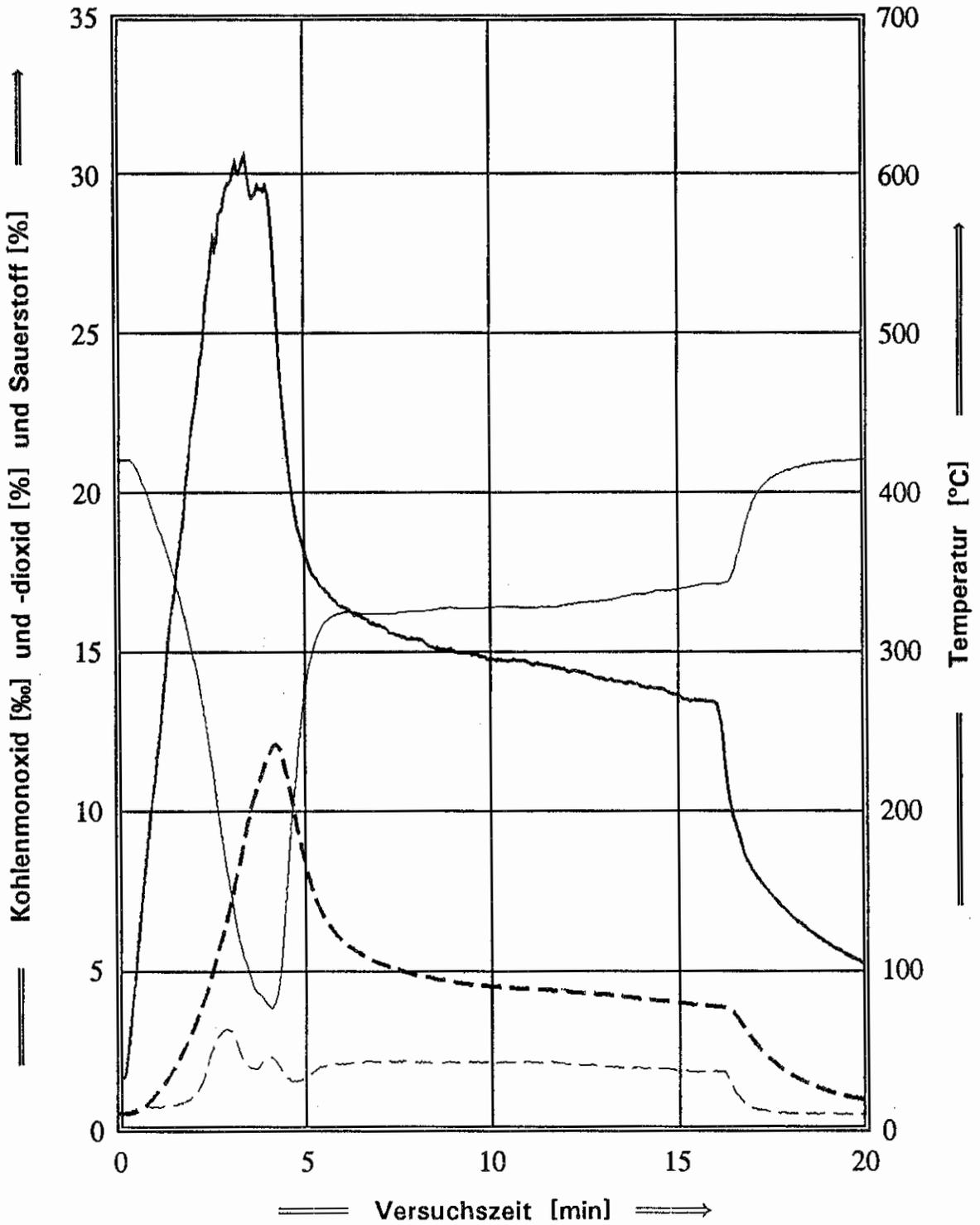


Bild 13: Der zeitliche Verlauf der
Temperatur und der Sauerstoff-, der Kohlendioxid- und der Kohlenmonoxidkonzentration an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit Polystyrol

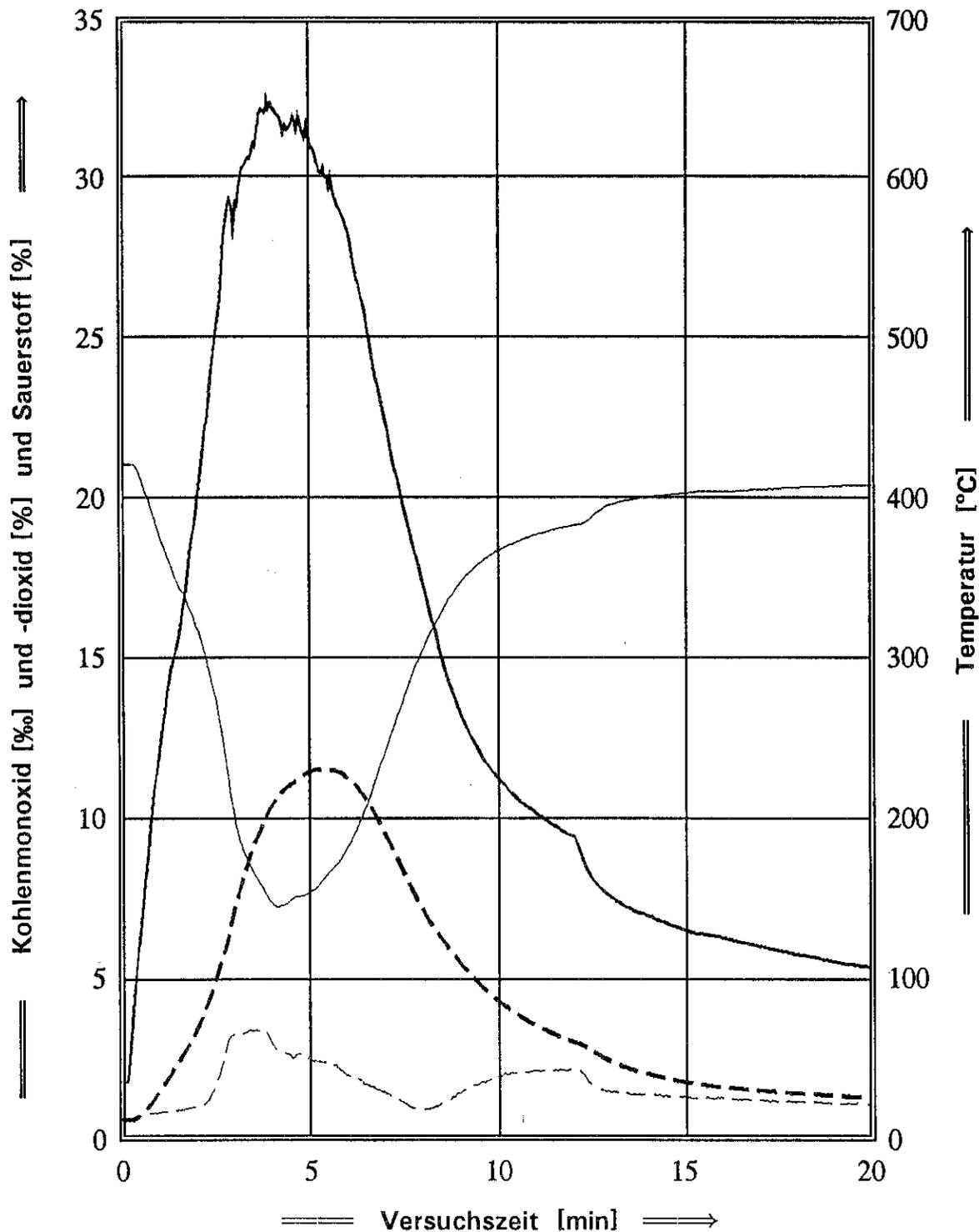


Bild 14: Der zeitliche Verlauf der

- Temperatur und der
 - Sauerstoff-, der
 - - - - - Kohlendioxid- und der
 - · - · - Kohlenmonoxidkonzentration
- an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit PVC-isolierten Elektrokabeln

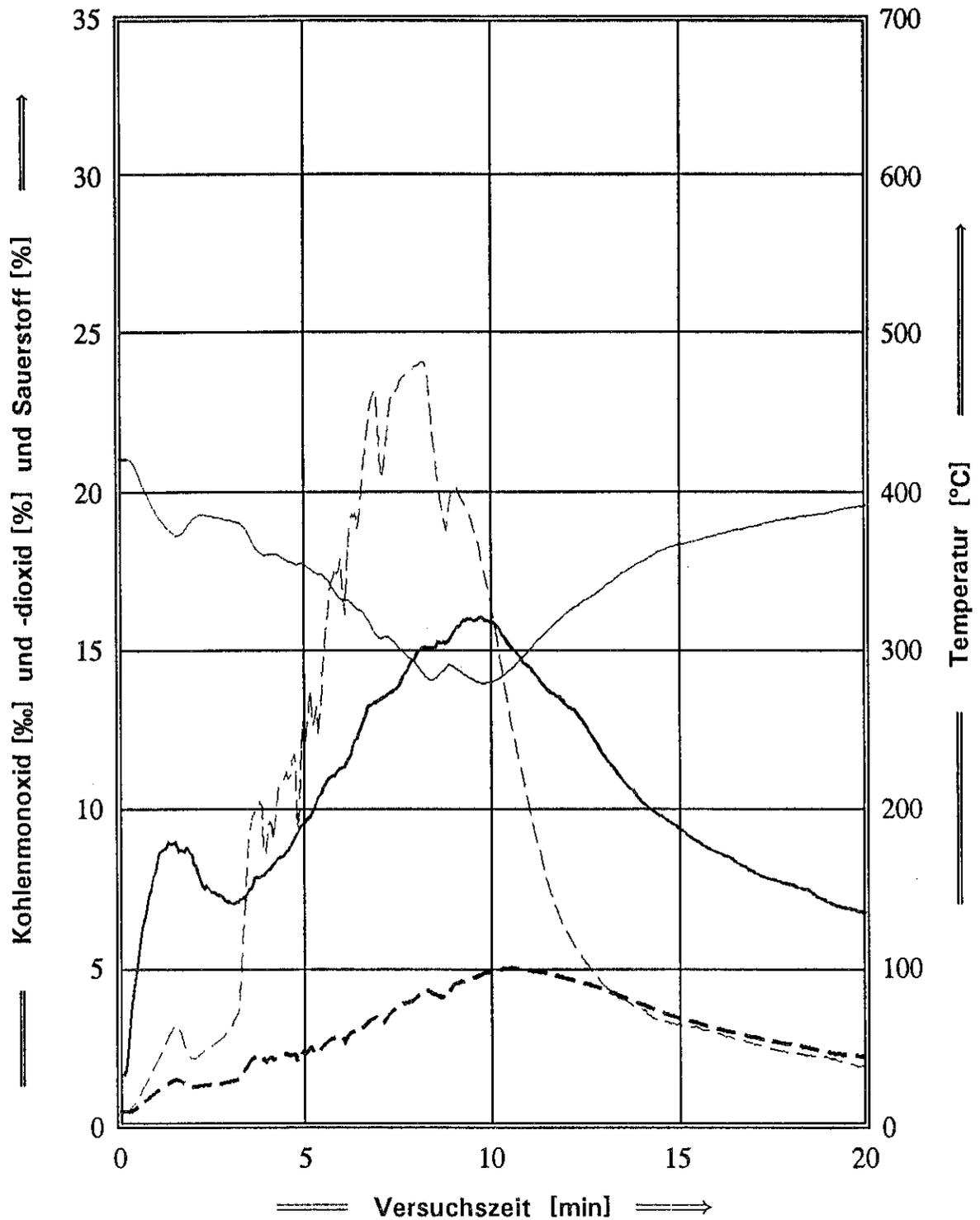


Bild 15: Der zeitliche Verlauf der
————— Temperatur und der
————— Sauerstoff-, der
- - - - - Kohlendioxid- und der
- · - · - Kohlenmonoxidkonzentration
an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit
PVC-Hartschaum

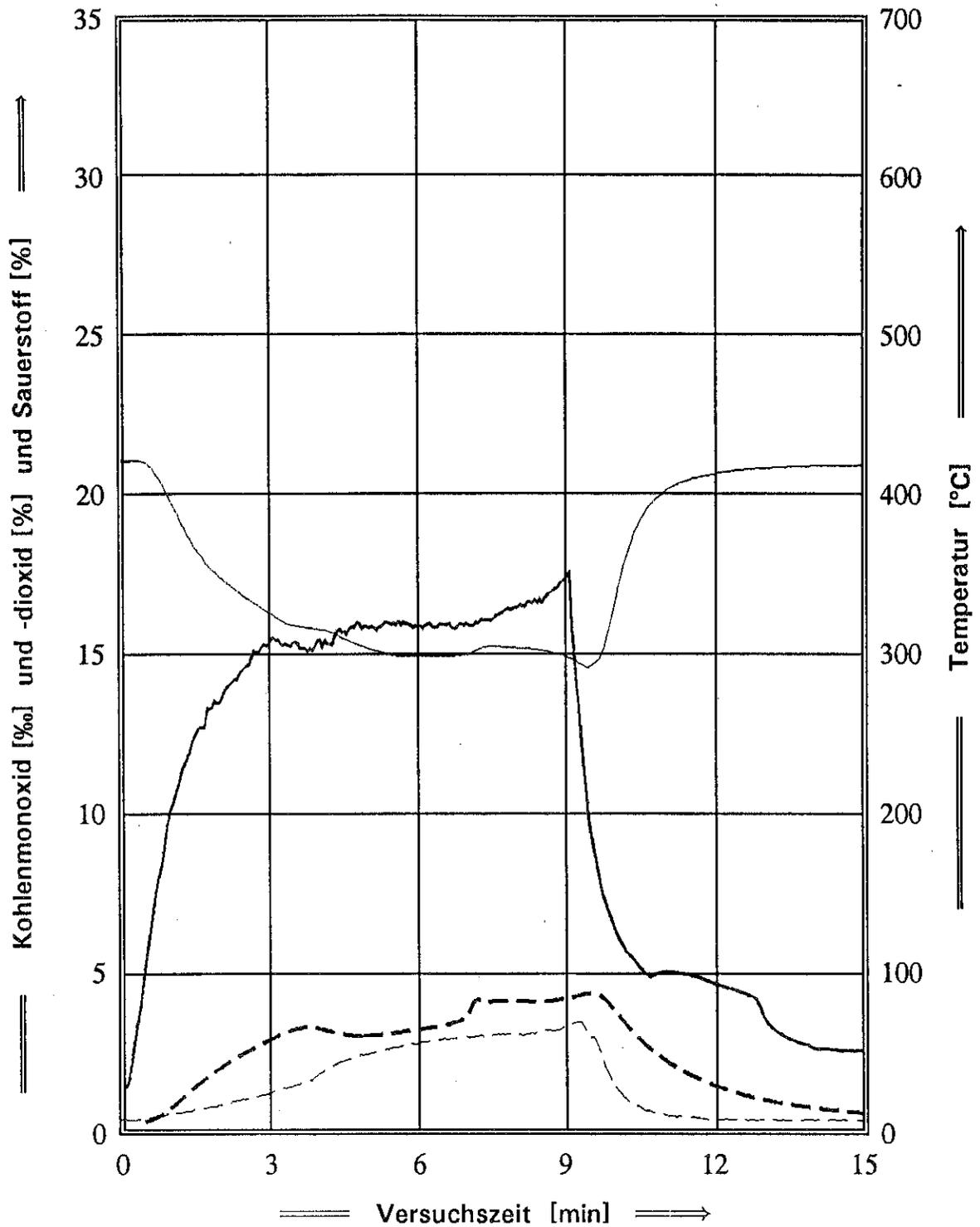


Bild 16: Der zeitliche Verlauf der

- Temperatur und der
 - Sauerstoff-, der
 - - - - - Kohlendioxid- und der
 - - - - - Kohlenmonoxidkonzentration
- an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit Hart-PVC (grau)

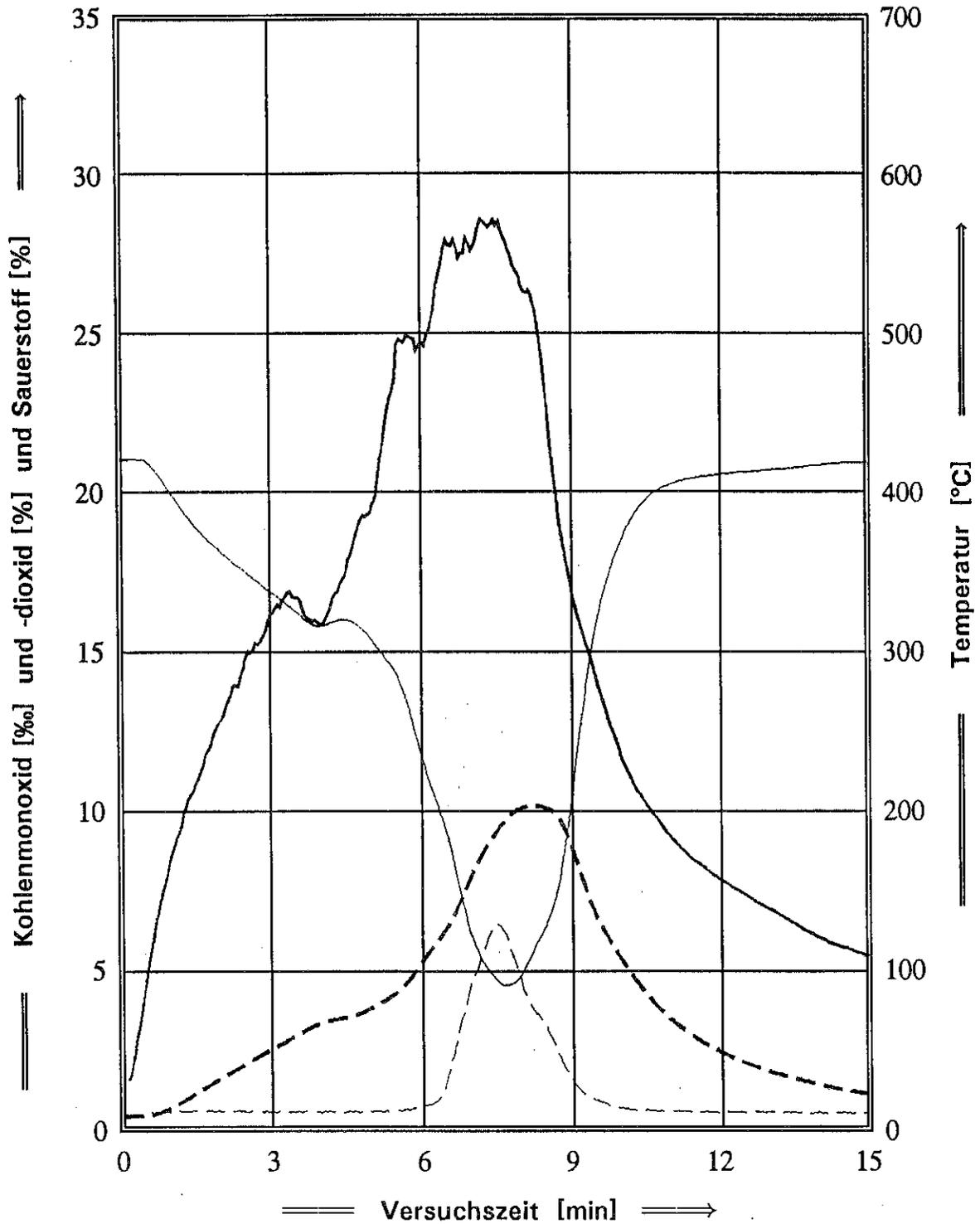


Bild 17: Der zeitliche Verlauf der
————— Temperatur und der
————— Sauerstoff-, der
- - - - - Kohlendioxid- und der
· · · · · Kohlenmonoxidkonzentration
an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit
Polycarbonat

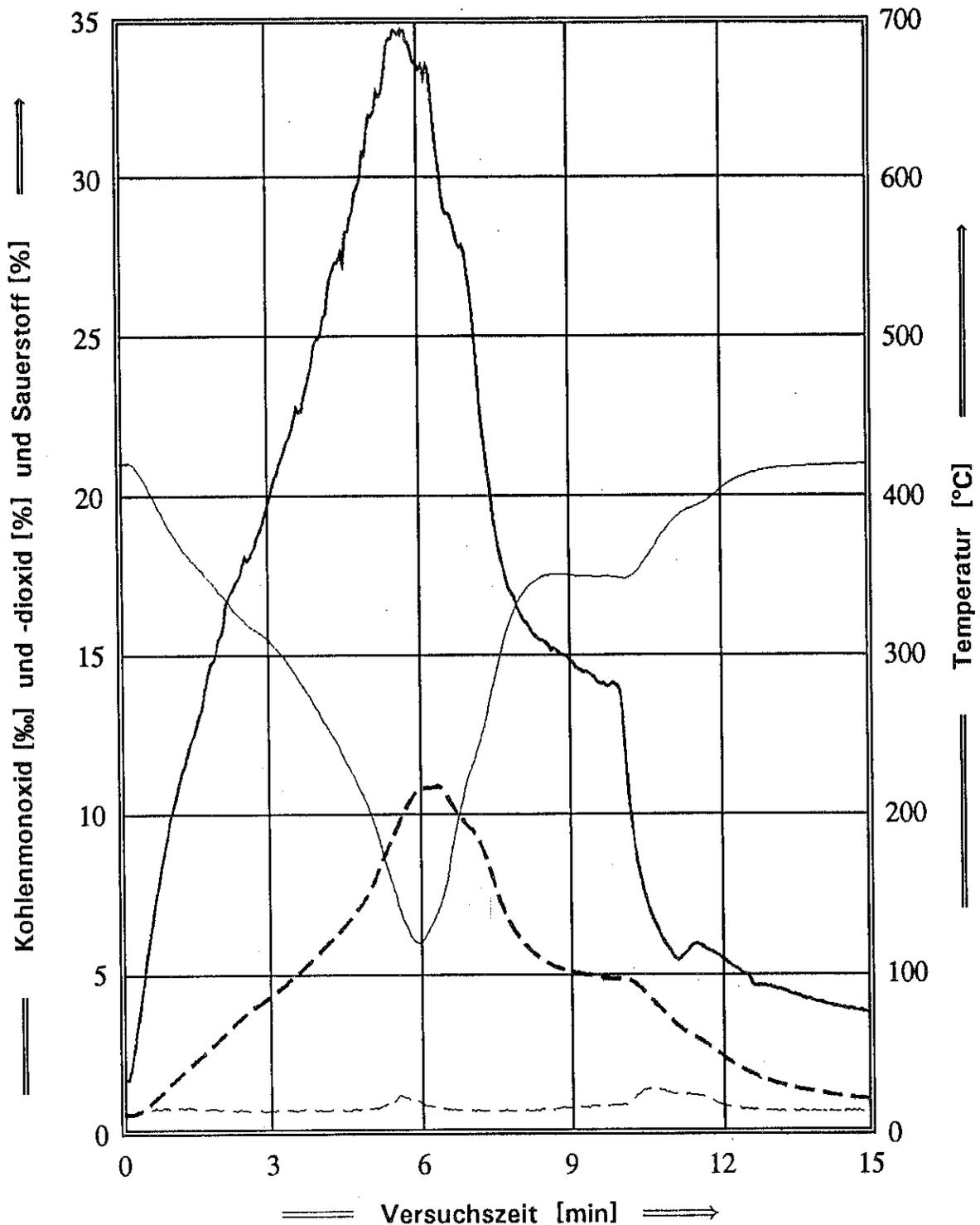


Bild 18: Der zeitliche Verlauf der
————— Temperatur und der
————— Sauerstoff-, der
- - - - - Kohlendioxid- und der
- - - - - Kohlenmonoxidkonzentration
an der Probenahmestelle 4 bei dem Brandversuch mit
Polyoxymethylen

Tabelle 1: Stoffe, die in allen zitierten Gefahrstoffzusammenstellungen [2...4, 8...12, 17, 18, 20...22] enthalten sind und die zumindest nach einer davon nicht mit Wasser gelöscht werden dürfen

Stoffname	Summenformel	CARN	UN-Nr.	UN-Gefkl.	Hommel	NFPA-Diamant	Hazchem-Code	Kühnbirett	VBG 125	Kemler-Zahl	GEW	GefStoffV R + S
Acetyl-Chlorid	C_2H_3ClO	75-36-5	1717	3+8	213	332 W	4 WE	A 7		X 338	A 34	11 14 34
Aluminium-Chlorid	$AlCl_3$	7.446-70-0	1726	8	225	302 W	4 X	A 48	⓪	80	—	34
Benzoyl-Chlorid	C_7H_5ClO	98-88-4	1736	8	40	322 W	2 X	B 14		80	B 19	34
Bor-Tribromid	BBr_3	10.294-33-4	2692	8	933	201 W	4 WE	B 28		X 88	—	14 ... 35
Chlor-Sulfonsäure	ClH_2O_3S	7.790-94-5	1754	8	247	302 W	4 WE	C 24	⓪	88	C 22	14 35 37
Dischwefel-Dichlorid	Cl_2S_2	10.025-67-9	1828	8	324	211 W	4 XE	S 8		X 88	—	14 34 37
Fluor	F_2	7.782-41-4	1045	2.3	94	403 W	2 PE	F 6		(268)	—	7 26 35
Kalium	K	7.440-09-7	2257	4.3	304	312 W	4 W	K 1	⓪	X 423	K 7	14 15 34 8 43 45
Lithium	Li	7.439-93-2	1415	4.3	279	313 W	4 W	L 9	⓪	X 423	L 2	14 15 34 8 43 45
Natrium	Na	7.440-23-5	1428	4.3	316	312 W	4 W	N 2	⓪	X 423	N 9	14 15 34 8 43 45
Nickel-Tetracarbonyl	C_4NiO_4	13.463-39-3	1259	6.1+3	434	433	4 WE	N 20		663	—	11 ... 61
Oleum = konz. Schwefelsäure + x % Schw. trioxid	$H_2O_4S + O_3S$	8.014-95-7	1831	8+6.1	174	302 W	4 WE	O 7	⓪	X 886	S 5	14 35 37 26 30 45
Phosphor, gelb/weiß, Tetra~	P_4	12.185-10-3	1381	4.2+6.1	99	333 W	2 WE	P 17		46	P 23	17 ... 35
Phosphor, rot/viol., amorph	P	7.723-14-0	1338	4.1	969	211	2 WE	P 18		40	—	11 16 7 43
Phosphor-Pentachlorid	Cl_5P	10.026-13-8	1806	8	652	202 W	4 WE	P 20		80	—	34 37
Phosphor-Trichlorid	Cl_3P	7.719-12-2	1809	8+6.1	162	302 W	4 WE	P 25		886	P 21	34 37
Silicium-Tetrachlorid	Cl_4Si	10.026-04-7	1818	8	187	301 W	4 WE	S 20	⓪	80	T 10	14 ... 38
Sulfuryl-Chlorid	Cl_2O_2S	7.791-25-5	1834	8	270	302 W	4 WE	S 27		X 88	S 16	14 34 37
Thionyl-Chlorid	Cl_2OS	7.719-09-7	1836	8	330	202 W	4 WE	T 11	⓪	X 88	T 18	14 34 37
Titan-Tetrachlorid	Cl_4Ti	7.550-45-0	1838	8	327	301	4 WE	T 50	⓪	80	—	14 ... 37

Tabelle 2: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polyethylen detektierten Substanzen

IT Substanzen, die nur von der Ion Trap™ detektiert wurden

EM Substanzen, die nur vom EM 640 detektiert wurden

✓ Substanzen, die von beiden Geräten detektiert wurden

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]					
		6	9	13	16	20	25½
1.191-96-4	Ethyl-Cyclopropan	IT					
109-67-1	1-Penten	IT	EM		EM		
504-60-9	1,3-Pentadien	IT					
591-93-5	1,4-Pentadien	IT					
542-92-7	1,3-Cyclopentadien	✓					
142-29-0	Cyclopenten	IT					
592-42-7	1,5-Hexadien	IT					
592-45-0	1,4-Hexadien	IT					
2.415-72-7	Propyl-Cyclopropan				IT		
592-41-6	1-Hexen	✓	EM	EM	EM		✓
534-22-5	2-Methyl-Furan			EM			
110-54-3	Hexan			EM			
594-56-9	2,3,3-Trimethyl-1-Buten						IT
628-41-1	1,4-Cyclohexadien	IT					
96-39-9	1-Methyl-1,3-Cyclopentadien	IT					
71-43-2	Benzol	✓	✓	✓	✓	EM	✓
821-08-9	1,5-Hexadien-3-in	IT					
110-62-3	Pentanal				IT		IT
3.524-73-0	5-Methyl-1-Hexen	IT					
592-76-7	1-Hepten		EM	✓			✓
930-57-4	Butyl-Cyclopropan				IT		
142-82-5	Heptan	✓	✓	IT	✓		IT
108-88-3	Toluol	✓	✓	✓	✓	EM	✓
591-78-6	2-Hexanon				IT		
66-25-1	Hexanal				IT		
930-56-3	1-(2-Methyl-Cyclopropyl)-Ethanon		IT			IT	
59.242-27-2	2,5-Dihydro-2,5-Dimethyl-Furan			IT			

Tabelle 2: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polyethylen detektierten Substanzen

— Fortsetzung —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]					
		6	9	13	16	20	25½
141-79-7	4-Methyl-3-Penten-2-on		IT				
111-66-0	1-Octen	✓	✓	EM	✓		✓
111-65-9	Octan	EM	EM	✓		EM	IT
930-30-3	2-Cyclopenten-1-on		IT				
123-42-2	Diaceton; 4-Hydroxy-4-Methyl-2-Pentanon		IT			IT	IT
1.871-52-9	1,3,5-Cyclooctatrien	IT					
1.453-25-4	1-Methyl-Cyclohepten	IT					
108-90-7	Chlor-Benzol	IT			IT		
100-41-4	Ethyl-Benzol	✓	EM	EM		EM	✓
16.106-59-5	4,5-Dimethyl-1-Hexen				IT		
—	Nonen			EM	EM		
536-74-3	Ethynyl-Benzol	✓	EM	EM	EM		✓
100-42-5	Styrol	✓	✓	✓	✓		✓
111-71-7	Heptanal				IT		
95-47-6	o-Xylol	IT					
111-84-2	Nonan		EM	EM			EM
5.026-76-6	6-Methyl-1-Hepten		IT	IT	IT		IT
300-57-2	2-Propenyl-Benzol; Allyl-Benzol	IT					
637-50-3	1-Propenyl-Benzol; β -Methyl-Styrol	IT					
100-52-7	Benzaldehyd	IT	✓	✓	✓	IT	✓
—	Decen	EM	EM	EM	EM		
124-18-5	Decan	EM		EM			
931-54-4	Isocyano-Benzol		IT	IT	IT	IT	IT
100-47-0	Cyano-Benzol; Benzonitril	EM					
108-95-2	Phenol		✓	IT			IT
611-14-3	2-Ethyl-Toluol	IT					
271-89-6	Benzo[b]furan						✓
106-46-7	p-Dichlor-Benzol			IT	IT		IT
821-95-4	1-Undecen	EM	EM	EM			

Tabelle 2: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polyethylen detektierten Substanzen

— Fortsetzung —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]					
		6	9	13	16	20	25½
95-13-6	1H-Inden	✓	✓	✓		EM	IT
122-78-1	α-Toluol-Aldehyd; Phenyl-Ethanal	IT					
1.120-21-4	Undecan		EM	EM		EM	
104-87-0	p-Toluol-Aldehyd						IT
767-59-9	1-Methyl-1H-Inden	IT	EM				
56.114-69-3	2,5-bis[(Trimethyl-Silyl)-Oxy]-Benzaldehyd		IT				
15.677-15-3	1,1a,6,6a-Tetrahydro-Cyclopropen[a]inden	IT					
2.288-18-8	(1-Methylen-2-Propenyl)-Benzol	IT					
7.206-15-7	<i>trans</i> -4-Dodecen			EM			
112-40-3	Dodecan		EM	EM			
91-20-3	Naphthalin	✓	✓	✓	✓	EM	✓
2.437-56-1	1-Tridecen			EM	EM		
629-50-5	Tridecan			EM	EM		EM
90-12-0	1-Methyl-Naphthalin	EM	EM	EM			EM
2.471-83-2	1-Ethyliden-1H-Inden	IT	IT				
—	Tetradecen			EM			EM
629-59-4	Tetradecan	EM	EM	EM			
92-52-4	Biphenyl	✓	✓	EM			EM
1.127-76-0	1-Ethyl-Naphthalin		EM				
13.360-61-7	1-Pentadecen			EM	EM		EM
629-62-9	Pentadecan	EM	EM	EM			
629-73-2	1-Hexadecen		EM	EM			
827-54-3	2-Ethenyl-Naphthalin		EM				EM
208-96-8	Acenaphthylen	✓	✓	EM	EM		EM
544-76-3	Hexadecan		EM	EM			
86-73-7	Fluoren	EM	EM	EM	EM		
629-78-7	Heptadecan			EM			
92-83-1	Xanthen; Dibenzo-γ-Pyran	EM	EM				
—	Heptadecen		EM	EM			

Tabelle 2: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polyethylen detektierten Substanzen
— Schluß —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]					
		6	9	13	16	20	25½
588-59-0	<i>trans</i> -Stilben; 1,2-Diphenyl-Ethylen		EM	EM	EM		
593-45-3	Octadecan			EM			
1.430-97-3	9-Methyl-Fluoren	EM	EM				
85-01-8	Phenanthren		EM	EM	EM		
621-94-2	2-Phenyl-Naphthalin	EM	EM	EM	EM		
610-48-0	1-Methyl-Anthracen		EM	EM	EM		
203-64-5	4,5-Methylen-Phenanthren		EM				
6.628-98-4	4,5-Dihydro-Pyren			EM			
129-00-0	Pyren				EM		

Tabelle 3: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polystyrol detektierten Substanzen

IT Substanzen, die nur von der Ion Trap™ detektiert wurden

EM Substanzen, die nur vom EM 640 detektiert wurden

✓ Substanzen, die von beiden Geräten detektiert wurden

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		5	8	10¼	12½	16¾
542-92-7	1,3-Cyclopentadien		EM	EM		
592-41-6	1-Hexen	EM				
594-56-9	2,3,3-Trimethyl-1-Buten		IT		IT	
592-57-4	1,3-Cyclohexadien					EM
71-43-2	Benzol	✓	✓	✓	✓	✓
930-57-4	Butyl-Cyclopropan	IT				
142-82-5	Heptan	IT				
108-88-3	Toluol	✓	✓	✓	✓	✓
66-25-1	Hexanal	IT				
930-56-3	1-(2-Methyl-Cyclopropyl)-Ethanon			IT		IT
111-66-0	1-Octen	✓				
5.259-71-2	1,5-Cyclooctadien					IT
108-90-7	Chlor-Benzol	IT	IT	IT	IT	IT
100-41-4	Ethyl-Benzol	✓	✓	✓	✓	✓
536-74-3	Ethynyl-Benzol	✓	✓	✓	✓	IT
100-42-5	Styrol	✓	✓	✓	✓	✓
98-82-8	Cumol; Isopropyl-Benzol					IT
300-57-2	2-Propenyl-Benzol; Allyl-Benzol	IT		IT	IT	
622-97-9	4-Methyl-Styrol	EM	EM	EM	EM	EM
98-01-1	Furfural; 2-Furan-Aldehyd					IT
100-52-7	Benzaldehyd	✓	✓	✓	✓	✓
931-54-4	Isocyano-Benzol		IT		IT	
622-32-2	Benzaldehyd-Oxim	IT				
108-95-2	Phenol	EM	EM	EM	EM	
98-83-9	Isopropenyl-Benzol; α-Methyl-Styrol	IT	IT	IT	IT	IT
611-15-4	2-Methyl-Styrol	IT	IT	IT		
271-89-6	Benzo[b]furan		✓		EM	IT

Tabelle 3: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polystyrol detektierten Substanzen

— Schluß —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		5	8	10¼	12½	16¼
541-73-1	m-Dichlor-Benzol		IT			
106-46-7	p-Dichlor-Benzol		IT			IT
496-11-7	Indan; 2,3-Dihydro-Inden	✓	EM	✓	✓	EM
95-13-6	1H-Inden	✓	✓	✓	✓	✓
1.321-74-0	Vinyl-Styrol; Diethenyl-Benzol			IT	IT	
98-86-2	Aceto-Phenon; Phenyl-Ethanon					EM
108-57-6	1,3-Diethenyl-Benzol	IT		IT	IT	
767-59-9	1-Methyl-1H-Inden	IT		IT	IT	
15.677-15-3	1,1a,6,6a-Tetrahydro-Cyclopropen[a]inden	IT		IT	IT	
2.288-18-8	(1-Methylen-2-Propenyl)-Benzol	IT				
91-20-3	Naphthalin	✓	✓	✓	✓	✓
90-12-0	1-Methyl-Naphthalin	EM	EM	✓	✓	EM
92-52-4	Biphenyl	EM	EM	✓	✓	✓
1.127-76-0	1-Ethyl-Naphthalin			EM		
101-81-5	Diphenyl-Methan		EM	EM	EM	
827-54-3	2-Ethenyl-Naphthalin			IT		
208-96-8	Acenaphthylen	EM	EM	EM	EM	EM
83-32-9	Acenaphten	EM	EM		EM	
132-64-9	Dibenzo-Furan	EM	EM		EM	EM
86-73-7	Fluoren	EM	EM	EM	EM	EM
1.081-75-0	1,3-Diphenyl-Propan				EM	EM
588-59-0	<i>trans</i> -Stilben; 1,2-Diphenyl-Ethylen	EM	EM	EM	EM	EM
486-25-9	9-Fluorenon	EM	EM		EM	EM
593-45-3	Octadecan	EM	EM		EM	
1.430-97-3	9-Methyl-Fluoren	EM	EM		EM	EM
85-01-8	Phenanthren	EM	EM	EM	EM	EM
621-94-2	2-Phenyl-Naphthalin	EM	EM	EM	EM	EM
610-48-0	1-Methyl-Anthracen	EM	EM	EM	EM	EM
129-00-0	Pyren	EM	EM	EM	EM	EM

Tabelle 4: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Elektrokabeln detektierten Substanzen

IT Substanzen, die nur von der Ion Trap™ detektiert wurden

EM Substanzen, die nur vom EM 640 detektiert wurden

✓ Substanzen, die von beiden Geräten detektiert wurden

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		2½	5	6¼	8½	10¼
109-67-1	1-Penten	IT				
646-05-9	1-Penten-3-in	IT				
542-92-7	1,3-Cyclopentadien		IT			
142-29-0	Cyclopenten	IT	IT			
592-45-0	1,4-Hexadien	IT				
592-41-6	1-Hexen	IT	IT			
534-22-5	2-Methyl-Furan	IT	IT			
760-21-4	2-Ethyl-1-Buten; 3-Methylen-Pentan	IT				
71-43-2	Benzol	✓	✓	✓	✓	✓
3.524-73-0	5-Methyl-1-Hexen	IT				
142-82-5	Heptan	IT	IT	IT	IT	IT
108-87-2	Methyl-Cyclohexan	EM		EM	EM	
108-88-3	Toluol	✓	✓	✓	✓	EM
763-93-9	3-Hexen-2-on		IT	IT		
141-79-7	4-Methyl-3-Penten-2-on	IT				
7.642-15-1	cis-4-Octen	IT				
930-27-8	3-Methyl-Furan		IT			
120-92-3	Cyclopentanon					EM
930-30-3	2-Cyclopenten-1-on				IT	EM
123-42-2	Diaceton; 4-Hydroxy-4-Methyl-2-Pentanon	IT	IT	IT		IT
108-90-7	Chlor-Benzol			EM	IT	
100-41-4	Ethyl-Benzol	✓	✓	EM	IT	EM
—	m-, p-Xylol	IT	IT			
—	Nonen	EM				
536-74-3	Ethinyl-Benzol	EM	✓	✓	✓	EM
100-42-5	Styrol	✓	✓	✓	✓	✓
95-47-6	o-Xylol	IT	IT		IT	EM

Tabelle 4: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Elektrokabeln detektierten Substanzen

— Fortsetzung —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		2½	5	6¼	8½	10¼
111-84-2	Nonan	EM				
5.026-76-6	6-Methyl-1-Hepten	IT				
300-57-2	2-Propenyl-Benzol; Allyl-Benzol	IT	IT			
98-01-1	Furfural; 2-Furan-Aldehyd			EM		EM
100-52-7	Benzaldehyd		IT	IT	IT	IT
103-65-1	Propyl-Benzol; 1-Phenyl-Propan	EM	EM	EM		
931-54-4	Isocyano-Benzol				IT	
108-95-2	Phenol	EM	✓	✓	✓	✓
526-73-8	1,2,3-Trimethyl-Benzol	IT				
98-83-9	Isopropenyl-Benzol; α-Methyl-Styrol		IT			EM
95-57-8	2-Chlor-Phenol	EM				
271-89-6	Benzo[b]furan		IT	✓		
541-73-1	m-Dichlor-Benzol				IT	
106-46-7	p-Dichlor-Benzol			IT	IT	IT
95-48-7	o-Cresol; 2-Methyl-Phenol		IT	IT		EM
496-11-7	Indan; 2,3-Dihydro-Inden	IT				IT
95-13-6	1H-Inden	✓	✓	✓	IT	✓
579-07-7	1-Phenyl-1,2-Propandion		IT	IT	IT	
98-86-2	Aceto-Phenon; Phenyl-Ethanon			EM		
100-51-6	Benzol-Methanol		IT			
2.039-93-2	1-Methylen-Propyl-Benzol		IT			
13.610-02-1	(2-Propinyloxy)-Benzol	IT	IT			
17.059-52-8	7-Methyl-Benzo[b]furan		IT			
4.265-25-2	2-Methyl-Benzo[b]furan			EM		
767-59-9	1-Methyl-1H-Inden		IT	✓		
29.817-09-2	(Methylen-Cyclopropyl)-Benzol	IT				
15.677-15-3	1,1a,6,6a-Tetrahydro-Cyclopropen[a]inden		IT	IT		
2.288-18-8	(1-Methylen-2-Propenyl)-Benzol		IT			
7.206-15-7	<i>trans</i> -4-Dodecen	EM	EM	EM	EM	EM

Tabelle 4: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Elektrokabeln detektierten Substanzen

— Schluß —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		2½	5	6¼	8½	10¼
91-20-3	Naphthalin	✓	✓	✓	✓	✓
95-65-8	3,4-Dimethyl-Phenol					EM
90-12-0	1-Methyl-Naphthalin	✓	✓	EM	EM	EM
2.471-83-2	1-Ethyliden-1H-Inden	IT	IT			
629-59-4	Tetradecan				EM	
92-52-4	Biphenyl	✓	✓	EM	EM	EM
1.127-76-0	1-Ethyl-Naphthalin			EM		
581-40-8	2,3-Dimethyl-Naphthalin			EM		EM
629-62-9	Pentadecan	EM	EM	EM		
827-54-3	2-Ethenyl-Naphthalin					EM
208-96-8	Acenaphthylen	EM	✓	EM	EM	EM
85-44-9	Phthalsäure-Anhydrid	EM	EM	EM		
132-64-9	Dibenzo-Furan		EM	EM		EM
86-73-7	Fluoren	EM	EM	EM		EM
629-78-7	Heptadecan	EM				
119-61-9	Benzo-Phenon; Diphenyl-Keton			EM		
588-59-0	<i>trans</i> -Stilben; 1,2-Diphenyl-Ethylen	EM	EM			
593-45-3	Octadecan			EM		
1.430-97-3	9-Methyl-Fluoren	EM	EM	EM		
85-01-8	Phenanthren	EM	EM	EM	EM	EM
621-94-2	2-Phenyl-Naphthalin			EM		
610-48-0	1-Methyl-Anthracen			EM		

Tabelle 5: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Hartschaum detektierten Substanzen

IT Substanzen, die nur von der Ion Trap™ detektiert wurden

EM Substanzen, die nur vom EM 640 detektiert wurden

✓ Substanzen, die von beiden Geräten detektiert wurden

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		4	6	9	11½	14
74-87-3	Chlor-Methan			EM	EM	
79-04-9	Chlor-Acetyl-Chlorid				IT	IT
593-70-4	Chlor-Fluor-Methan	IT				
75-91-2	<i>tert.</i> -Butyl-Hydro-Peroxid				IT	
79-20-9	Essigsäure-Methylester				IT	
71-43-2	Benzol	✓	✓	✓	✓	✓
110-62-3	Pentanal					IT
930-57-4	Butyl-Cyclopropan	IT				
80-62-6	2-Methyl-Acrylsäure-Methylester	EM	EM	✓	EM	EM
142-82-5	Heptan	IT	IT	IT		
108-88-3	Toluol	✓	✓	✓	✓	✓
623-43-8	<i>trans</i> -Crotonsäure-Methylester	IT	IT			
930-56-3	1-(2-Methyl-Cyclopropyl)-Ethanon			IT		IT
763-93-9	3-Hexen-2-on	IT	IT		IT	
111-66-0	1-Octen	IT				
4.283-80-1	2-Brom-2-Methyl-Pentan	IT				
120-92-3	Cyclopentanon			EM	EM	
123-42-2	Diaceton; 4-Hydroxy-4-Methyl-2-Pentanon	IT	IT	IT	IT	IT
108-90-7	Chlor-Benzol	✓	✓	✓	✓	✓
100-41-4	Ethyl-Benzol	✓	✓	✓	✓	✓
—	m-, p-Xylol	IT	IT	IT	IT	IT
536-74-3	Ethinyl-Benzol	EM	EM	EM	EM	EM
100-42-5	Styrol	✓	✓	✓	✓	✓
95-47-6	o-Xylol	IT	✓	✓	IT	IT
1.192-62-7	2-Acetyl-Furan; 1-(2-Furanyl)-Ethanon				EM	
98-82-8	Cumol; Isopropyl-Benzol	IT	IT			
300-57-2	2-Propenyl-Benzol; Allyl-Benzol	IT	IT	IT		

Tabelle 5: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Hartschaum detektierten Substanzen

— Fortsetzung —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		4	6	9	11½	14
637-50-3	1-Propenyl-Benzol; β -Methyl-Styrol	IT				
98-01-1	Furfural; 2-Furan-Aldehyd	IT		✓	✓	EM
100-52-7	Benzaldehyd	IT	IT	✓	✓	✓
103-65-1	Propyl-Benzol; 1-Phenyl-Propan					EM
622-96-8	4-Ethyl-Toluol	IT	IT	IT		
622-32-2	Benzaldehyd-Oxim				IT	IT
100-47-0	Cyano-Benzol; Benzonitril			EM		
108-95-2	Phenol	EM		EM	✓	EM
108-67-8	Mesitylen; 1,3,5-Trimethyl-Benzol			EM		EM
526-73-8	1,2,3-Trimethyl-Benzol	IT	IT	IT		
611-14-3	2-Ethyl-Toluol	IT	IT	IT		
271-89-6	Benzo[b]furan	EM		✓	✓	IT
541-73-1	m-Dichlor-Benzol					IT
106-46-7	p-Dichlor-Benzol	IT	IT	IT	IT	IT
873-49-4	Cyclopropyl-Benzol	IT	IT	IT		
496-11-7	Indan; 2,3-Dihydro-Inden	IT	IT			
95-13-6	1H-Inden	✓	IT	✓	✓	✓
579-07-7	1-Phenyl-1,2-Propandion				IT	
122-78-1	α -Toluol-Aldehyd; Phenyl-Ethanal	IT	IT	IT		
98-86-2	Aceto-Phenon; Phenyl-Ethanon	EM		EM	EM	EM
104-55-2	3-Phenyl-Acrolein			IT		
29.817-09-2	(Methylen-Cyclopropyl)-Benzol	IT				
2.288-18-8	(1-Methylen-2-Propenyl)-Benzol	IT				
91-20-3	Naphthalin	✓	IT	✓	✓	✓
629-50-5	Tridecan	EM				
90-12-0	1-Methyl-Naphthalin	✓	IT	EM	EM	EM
2.471-83-2	1-Ethyliden-1H-Inden	IT	IT			
90-13-1	auch 25.586-43-0: 1-Chlor-Naphthalin					EM
92-52-4	Biphenyl	✓		EM		EM

Tabelle 5: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von PVC-Hartschaum detektierten Substanzen
— Schluß —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]				
		4	6	9	11½	14
101-81-5	Diphenyl-Methan			EM	EM	EM
581-40-8	2,3-Dimethyl-Naphthalin			EM	EM	EM
3.031-08-1	1,3,6-Trimethyl-Naphthalin	EM		EM		
827-54-3	2-Ethenyl-Naphthalin					EM
208-96-8	Acenaphthylen				EM	EM
132-64-9	Dibenzo-Furan			EM	EM	EM
86-73-7	Fluoren	EM		EM	EM	EM
1.081-75-0	1,3-Diphenyl-Propan	EM		EM	EM	EM
66-99-9	2-Naphthalin-Aldehyd			EM		
613-46-7	2-Naphthalin-Carbonitril				EM	
588-59-0	<i>trans</i> -Stilben; 1,2-Diphenyl-Ethylen				EM	
486-25-9	9-Fluorenon			EM	EM	
1.430-97-3	9-Methyl-Fluoren			EM		
85-01-8	Phenanthren	EM			EM	

Tabelle 6: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliothek für die im Rauchgas von Hart-PVC (grau) detektierten Substanzen

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]		
		2	5	8
287-92-3	Cyclopentan	IT	IT	
109-68-2	2-Penten		IT	
591-93-5	1,4-Pentadien	IT	IT	
646-05-9	1-Penten-3-in	IT		
142-29-0	Cyclopenten	IT	IT	
592-42-7	1,5-Hexadien	IT		
693-02-7	1-Hexin		IT	
592-45-0	1,4-Hexadien	IT		
592-41-6	1-Hexen	IT	IT	IT
13.269-52-8	<i>trans</i> -3-Hexen	IT	IT	
7.642-09-3	<i>cis</i> -3-Hexen	IT	IT	
594-56-9	2,3,3-Trimethyl-1-Buten			IT
71-43-2	Benzol	IT	IT	IT
3.524-73-0	5-Methyl-1-Hexen	IT	IT	
930-57-4	Butyl-Cyclopropan			IT
142-82-5	Heptan	IT	IT	IT
2.454-31-1	3,4-Heptadien	IT	IT	
108-88-3	Toluol	IT	IT	IT
763-93-9	3-Hexen-2-on		IT	
111-66-0	1-Octen		IT	
127-18-4	Tetrachlor-Ethen		IT	IT
123-42-2	Diaceton; 4-Hydroxy-4-Methyl-2-Pentanon	IT	IT	IT
108-90-7	Chlor-Benzol	IT	IT	IT
100-41-4	Ethyl-Benzol	IT	IT	IT
16.106-59-5	4,5-Dimethyl-1-Hexen	IT	IT	IT
—	m-, p-Xylol		IT	
536-74-3	Ethynyl-Benzol	IT	IT	IT
110-43-0	2-Heptanon	IT	IT	IT
100-42-5	Styrol	IT	IT	IT

Tabelle 6: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Hart-PVC (grau) detektierten Substanzen

— Fortsetzung —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]		
		2	5	8
95-47-6	o-Xylol	IT	IT	IT
300-57-2	2-Propenyl-Benzol; Allyl-Benzol	IT	IT	
637-50-3	1-Propenyl-Benzol; β -Methyl-Styrol	IT	IT	
100-52-7	Benzaldehyd	IT	IT	IT
108-41-8	3-Chlor-Toluol	IT	IT	
622-96-8	4-Ethyl-Toluol	IT	IT	
931-54-4	Isocyano-Benzol			IT
41.898-89-9	2,4-Dimethyl-2,3-Heptadien-5-in		IT	
526-73-8	1,2,3-Trimethyl-Benzol	IT	IT	
673-32-5	1-Phenyl-1-Propin	IT		
611-14-3	2-Ethyl-Toluol	IT	IT	
95-57-8	2-Chlor-Phenol		IT	IT
271-89-6	Benzo[b]furan		IT	IT
541-73-1	m-Dichlor-Benzol	IT	IT	IT
106-46-7	p-Dichlor-Benzol	IT	IT	IT
873-49-4	Cyclopropyl-Benzol	IT	IT	
496-11-7	Indan; 2,3-Dihydro-Inden	IT	IT	
95-13-6	1H-Inden	IT	IT	IT
579-07-7	1-Phenyl-1,2-Propandion			IT
122-78-1	α -Toluol-Aldehyd; Phenyl-Ethanal	IT	IT	
622-25-3	β -Chlor-Styrol	IT	IT	IT
108-57-6	1,3-Diethenyl-Benzol	IT		
618-34-8	α -Chlor-Styrol		IT	IT
2.471-84-3	1-Methylen-1H-Inden	IT	IT	
108-70-3	1,3,5-Trichlor-Benzol		IT	
767-59-9	1-Methyl-1H-Inden	IT		
15.677-15-3	1,1a,6,6a-Tetrahydro-Cyclopropen[a]inden	IT	IT	
2.288-18-8	(1-Methylen-2-Propenyl)-Benzol	IT	IT	
120-82-1	1,2,4-Trichlor-Benzol		IT	IT

Tabelle 6: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Hart-PVC (grau) detektierten Substanzen
— Schluß —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]		
		2	5	8
91-20-3	Naphthalin	IT	IT	IT
87-61-6	1,2,3-Trichlor-Benzol		IT	IT
90-12-0	1-Methyl-Naphthalin	IT	IT	
2.471-83-2	1-Ethyliden-1H-Inden	IT	IT	
634-90-2	1,2,3,5-Tetrachlor-Benzol		IT	
90-13-1	auch 25.586-43-0: 1-Chlor-Naphthalin		IT	
634-66-2	1,2,3,4-Tetrachlor-Benzol		IT	
259-79-0	Biphenylen	IT	IT	
92-52-4	Biphenyl	IT	IT	

Tabelle 7: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliothek für die im Rauchgas von Polycarbonat detektierten Substanzen

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]		
		4	8	10
592-41-6	1-Hexen	IT		
594-56-9	2,3,3-Trimethyl-1-Buten	IT	IT	
71-43-2	Benzol	IT	IT	IT
110-62-3	Pentanal		IT	
930-57-4	Butyl-Cyclopropan	IT		
142-82-5	Heptan	IT	IT	IT
108-87-2	Methyl-Cyclohexan			IT
108-88-3	Toluol	IT	IT	IT
2.213-23-2	2,4-Dimethyl-Heptan		IT	
123-42-2	Diaceton; 4-Hydroxy-4-Methyl-2-Pentanon	IT		IT
108-90-7	Chlor-Benzol	IT	IT	IT
100-41-4	Ethyl-Benzol	IT	IT	IT
—	m-, p-Xylol			IT
536-74-3	Ethynyl-Benzol	IT	IT	IT
100-42-5	Styrol	IT	IT	IT
95-47-6	o-Xylol	IT		IT
300-57-2	2-Propenyl-Benzol; Allyl-Benzol	IT		
100-52-7	Benzaldehyd	IT	IT	IT
622-96-8	4-Ethyl-Toluol	IT		
622-32-2	Benzaldehyd-Oxim		IT	
100-47-0	Cyano-Benzol; Benzonitril	IT		
108-95-2	Phenol			IT
98-83-9	Isopropenyl-Benzol; α -Methyl-Styrol	IT		
271-89-6	Benzo[b]furan		IT	IT
106-46-7	p-Dichlor-Benzol	IT	IT	IT
496-11-7	Indan; 2,3-Dihydro-Inden	IT		
95-13-6	1H-Inden	IT		IT
579-07-7	1-Phenyl-1,2-Propandion			IT
122-78-1	α -Toluol-Aldehyd; Phenyl-Ethanal	IT		

Tabelle 7: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliotheken für die im Rauchgas von Polycarbonat detektierten Substanzen

— Schluß —

CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]		
		4	8	10
91-20-3	Naphthalin	IT	IT	IT
90-12-0	1-Methyl-Naphthalin			IT
2.471-83-2	1-Ethyliden-1H-Inden			IT
92-52-4	Biphenyl			IT

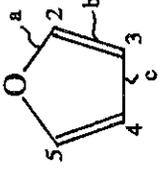
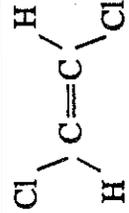
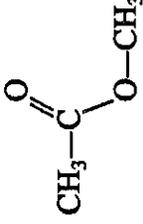
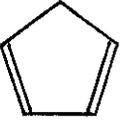
Tabelle 8: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Massenspektrenbibliothek für die im Rauchgas von Polyoxymethylen detektierten Substanzen

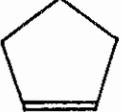
CARN	Substanz	Probenahmezeitpunkt [min]		
		6	8	10
594-56-9	2,3,3-Trimethyl-1-Buten		IT	
71-43-2	Benzol	IT	IT	IT
110-62-3	Pentanal			IT
78-87-5	1,2-Dichlor-Propan	IT		
142-82-5	Heptan	IT	IT	IT
108-88-3	Toluol	IT		
66-25-1	Hexanal	IT		IT
123-42-2	Diaceton; 4-Hydroxy-4-Methyl-2-Pentanon		IT	
108-90-7	Chlor-Benzol	IT	IT	IT
100-41-4	Ethyl-Benzol	IT		
—	m-, p-Xylol	IT		
100-42-5	Styrol	IT	IT	IT
111-71-7	Heptanal			IT
95-47-6	o-Xylol	IT		
98-01-1	Furfural; 2-Furan-Aldehyd	IT		
100-52-7	Benzaldehyd	IT	IT	IT
931-54-4	Isocyano-Benzol	IT		
106-46-7	p-Dichlor-Benzol	IT	IT	
91-20-3	Naphthalin	IT		



Tabelle 10: Zusammenstellung aller Substanzen, die mit Hilfe der GC/MS-Analyse in den Rauchgasen von Polyethylen, Polystyrol, PVC-isolierten Elektrokabeln, PVC-Hartschaum, Hart-PVC (grau), Polycarbonat und von Polyoxymethylen detektiert wurden, geordnet nach der Retentionsdauer in der Trennsäule beziehungsweise nach dem Siedepunkt

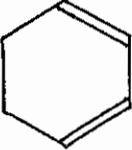
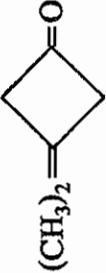
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
1	59	74-87-3	Chlor-Methan	C·H ₃ ·Cl	Cl-CH ₃
2	60	124-40-3	Dimethylamin	C ₂ ·H ₇ ·N	(CH ₃) ₂ ≡NH
3	62	75-71-8	Dichlor-Difluor-Methan	C·Cl ₂ ·F ₂	Cl ₂ =C=F ₂
4	63	79-04-9	Chlor-Acetyl-Chlorid	C ₂ ·H ₂ ·Cl ₂ ·O	
5	64	593-70-4	Chlor-Fluor-Methan	C·H ₂ ·Cl·F	Cl-CH ₂ -F
6	65	107-01-7	2-Buten	C ₄ ·H ₈	CH ₃ -CH=CH-CH ₃
7	66	74-93-1	Methanthiol	C·H ₄ ·S	CH ₃ -S-H
8	66	74-83-9	Brom-Methan	C·H ₃ ·Br	Br-CH ₃
9	70	75-91-2	tert.-Butyl-Hydro-Peroxid	C ₄ ·H ₁₀ ·O ₂	(CH ₃) ₃ ≡C-O-OH
10	70	67-64-1	Aceton; 2-Propanon	C ₃ ·H ₆ ·O	
11	71	1.191-96-4	Ethyl-Cyclopropan	C ₅ ·H ₁₀	
12	72	109-67-1	1-Penten	C ₅ ·H ₁₀	CH ₂ =CH-C ₃ H ₇
13	72	287-92-3	Cyclopentan	C ₅ ·H ₁₀	

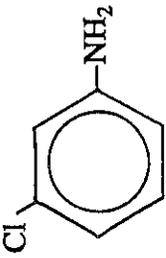
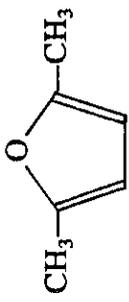
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
14	72	110-00-9	Furan	$C_4 \cdot H_4 \cdot O$	
15	73	156-60-5	<i>trans</i> -1,2-Dichlor-Ethen	$C_2 \cdot H_2 \cdot Cl_2$	
16	73	109-68-2	2-Penten	$C_5 \cdot H_{10}$	$CH_3-CH=CH-C_2H_5$
17	73	504-60-9	1,3-Pentadien	$C_5 \cdot H_8$	$CH_3-CH=CH-CH=CH_2$
18	73	75-09-2	Dichlor-Methan	$C \cdot H_2 \cdot Cl_2$	$Cl_2=CH_2$
19	74	79-20-9	Essigsäure-Methylester	$C_3 \cdot H_6 \cdot O_2$	
20	75	591-93-5	1,4-Pentadien	$C_5 \cdot H_8$	$CH_2=CH-CH_2-CH=CH_2$
21	77	75-15-0	Schwefelkohlenstoff; Kohlenstoffdisulfid	$C \cdot S_2$	$S=C=S$
22	77	646-05-9	1-Penten-3-in	$C_5 \cdot H_6$	$CH_2=CH-C \equiv C-CH_3$
23	77	542-92-7	1,3-Cyclopentadien	$C_5 \cdot H_6$	

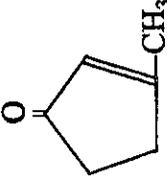
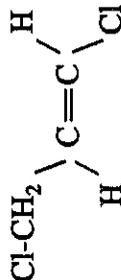
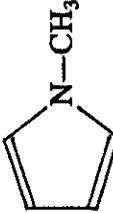
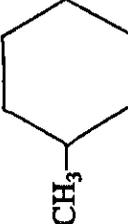
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
24	77	78-84-2	2-Methyl-Propanal	$C_4 \cdot H_8 \cdot O$	$(CH_3)_2 = CH - C \begin{matrix} O \\ // \\ H \end{matrix}$
25	79	75-35-4	1,1-Dichlor-Ethen	$C_2 \cdot H_2 \cdot Cl_2$	$Cl_2 = C = CH_2$
26	79	78-85-3	2-Methyl-Acrolein	$C_4 \cdot H_6 \cdot O$	$CH_3 \begin{matrix} O \\ // \\ \\ CH_2 = C - C \begin{matrix} O \\ // \\ H \end{matrix} \end{matrix}$
27	80	142-29-0	Cyclopenten	$C_5 \cdot H_8$	
28	80	75-34-3	1,1-Dichlor-Ethan	$C_2 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	$CH_3 - CH = Cl_2$
29	82	19.411-65-5	O-(3-Methyl-Butyl)-Hydroxylamin	$C_5 \cdot H_{13} \cdot N \cdot O$	$(CH_3)_2 = CH - (CH_2)_2 - O - NH_2$
30	83	592-42-7	1,5-Hexadien	$C_6 \cdot H_{10}$	$CH_2 = CH - (CH_2)_2 - CH = CH_2$
31	83	693-02-7	1-Hexin	$C_6 \cdot H_{10}$	$CH \equiv C - C_4 H_9$
32	84	625-74-1	2-Methyl-1-Nitro-Propan	$C_4 \cdot H_9 \cdot N \cdot O_2$	$(CH_3)_2 = CH - CH_2 - N \begin{matrix} O \\ // \\ O^- \end{matrix}$
33	65 °C	592-45-0	1,4-Hexadien	$C_6 \cdot H_{10}$	$CH_3 - CH = CH - CH_2 - CH = CH_2$

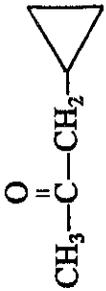
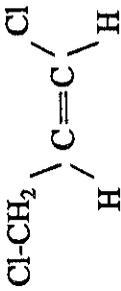
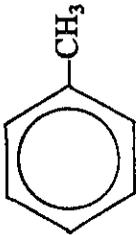
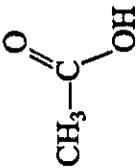
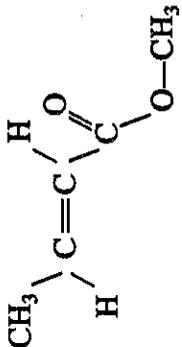
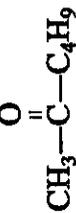
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
34	85	156-59-2	<i>cis</i> -1,2-Dichlor-Ethen	$C_2 \cdot H_2 \cdot Cl_2$	
35	85	2.415-72-7	Propyl-Cyclopropan	$C_6 \cdot H_{12}$	
36	85	110-82-7	Cyclohexan	$C_6 \cdot H_{12}$	
37	86	592-41-6	1-Hexen	$C_6 \cdot H_{12}$	$CH_2 = CH - C_4H_9$
38	86	74-97-5	Brom-Chlor-Methan	$C \cdot H_2 \cdot Br \cdot Cl$	$Br - CH_2 - Cl$
39	86	534-22-5	2-Methyl-Furan	$C_5 \cdot H_6 \cdot O$	
40	87	594-20-7	2,2-Dichlor-Propan	$C_3 \cdot H_6 \cdot Cl_2$	$(CH_3)_2 = C = Cl_2$
41	88	67-66-3	Chloroform; Trichlor-Methan	$C \cdot H \cdot Cl_3$	$Cl_3 = CH$
42	88	760-21-4	2-Ethyl-1-Buten; 3-Methylen-Pentan	$C_6 \cdot H_{12}$	$(C_2H_5)_2 = C = CH_2$
43	88	13.269-52-8	<i>trans</i> -3-Hexen	$C_6 \cdot H_{12}$	

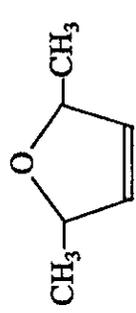
Id. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
44	91	7.642-09-3	<i>cis</i> -3-Hexen	$C_6 \cdot H_{12}$	
45	69 °C	110-54-3	Hexan	$C_6 \cdot H_{14}$	$CH_3-(CH_2)_4-CH_3$
46	93	107-06-2	1,2-Dichlor-Ethan	$C_2 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	$Cl-CH_2-CH_2-Cl$
47	95	16.327-38-1	3,3-Dimethyl-Cyclobuten	$C_6 \cdot H_{10}$	
48	95	71-55-6	1,1,1-Trichlor-Ethan	$C_2 \cdot H_3 \cdot Cl_3$	$CH_3-C \equiv Cl_3$
49	79 °C	594-56-9	2,3,3-Trimethyl-1-Buten	$C_7 \cdot H_{14}$	
50	96	628-41-1	1,4-Cyclohexadien	$C_6 \cdot H_8$	
51	96	4.372-94-5	1,1-Dimethyl-2-Methylen-Cyclopropan	$C_6 \cdot H_{10}$	
52	96	96-39-9	1-Methyl-1,3-Cyclopentadien	$C_6 \cdot H_8$	

lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
53	80 °C	592-57-4	1,3-Cyclohexadien	$C_6 \cdot H_8$	
54	97	77-76-9	2,2-Dimethoxy-Propan	$C_5 \cdot H_{12} \cdot O_2$	$(CH_3)_2 = C = (O - CH_3)_2$
55	98	563-58-6	1,1-Dichlor-1-Propen	$C_3 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	$Cl_2 = C = CH - CH_3$
56	99	1.192-33-2	3,3-Dimethyl-Cyclobutanon	$C_6 \cdot H_{10} \cdot O$	$(CH_3)_2 = C = O$ 
57	100	71-43-2	Benzol	$C_6 \cdot H_6$	
58	100	56-23-5	Tetrachlor-Methan	$C \cdot Cl_4$	$Cl_2 = C = Cl_2$
59	103	821-08-9	1,5-Hexadien-3-in	$C_6 \cdot H_6$	$CH_2 = CH - C \equiv C - CH = CH_2$
60	104	563-80-4	3-Methyl-2-Butanon	$C_5 \cdot H_{10} \cdot O$	$(CH_3)_2 = CH - C(=O) - CH_3$
61	106	110-62-3	Pentanal	$C_5 \cdot H_{10} \cdot O$	$C_4H_9 - C(=O) - H$
62	106	74-95-3	Dibrom-Methan	$C \cdot H_2 \cdot Br_2$	$Br_2 = CH_2$

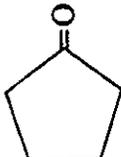
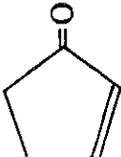
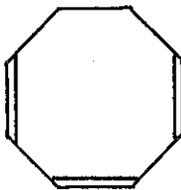
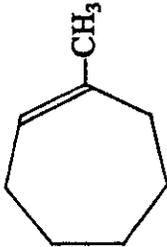
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
63	107	78-87-5	1,2-Dichlor-Propan	$C_3 \cdot H_6 \cdot Cl_2$	$Cl-CH_2-\overset{Cl}{\underset{ }{CH}}-CH_3$
64	109	75-27-4	Brom-Dichlor-Methan	$C \cdot H \cdot Br \cdot Cl_2$	$Cl_2 = CH \cdot Br$
65	109	79-01-6	Trichlor-Ethen	$C_2 \cdot H \cdot Cl_3$	$Cl-CH = C = Cl_2$
66	109	3.524-73-0	5-Methyl-1-Hexen	$C_7 \cdot H_{14}$	$CH_2 = CH - (CH_2)_2 - CH = (CH_3)_2$
67	110	592-76-7	1-Hepten	$C_7 \cdot H_{14}$	$CH_2 = CH - C_5H_{11}$
68	95,5 °C	108-42-9	3-Chlor-Anilin	$C_6 \cdot H_6 \cdot Cl \cdot N$	
69	110	930-57-4	Butyl-Cyclopropan	$C_7 \cdot H_{14}$	C_4H_9 
70	112	10.487-71-5	2-Butenoyl-Chlorid; 1-Chlor-2-Butenal	$C_4 \cdot H_5 \cdot Cl \cdot O$	$CH_3-CH = \overset{O}{\parallel} C-Cl$
71	112	80-62-6	2-Methyl-Acrylsäure-Methylester	$C_5 \cdot H_8 \cdot O_2$	$CH_2 = \overset{CH_3}{\underset{ }{C}} - \overset{O}{\parallel} C - O - CH_3$
72	112	625-86-5	2,5-Dimethyl-Furan	$C_6 \cdot H_8 \cdot O$	

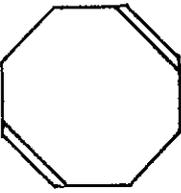
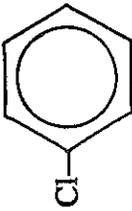
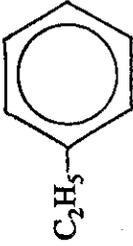
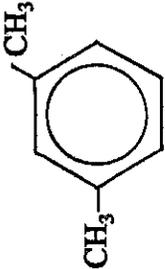
lfd. Nr.	rel. Retzeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
73	113	142-82-5	Heptan	$C_7 \cdot H_{16}$	$CH_3-(CH_2)_5-CH_3$
74	115	2.758-18-1	3-Methyl-2-Cyclopenten-1-on	$C_6 \cdot H_8 \cdot O$	
75	115	623-42-7	Buttersäure-Methylester	$C_5 \cdot H_{10} \cdot O_2$	$C_3H_7-C(=O)-O-CH_3$
76	116	556-61-6	Methyl-Isothiocyanat	$C_2 \cdot H_3 \cdot N \cdot S$	$CH_3-N=C=S$
77	118	10.061-02-6	<i>trans</i> -1,3-Dichlor-Propen	$C_3 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	
78	119	96-54-8	1-Methyl-1H-Pyrrrol	$C_5 \cdot H_7 \cdot N$	
79	120	108-10-1	4-Methyl-2-Pentanon	$C_6 \cdot H_{12} \cdot O$	$(CH_3)_2=CH-CH_2-C(=O)-CH_3$
80	121	108-87-2	Methyl-Cyclohexan	$C_7 \cdot H_{14}$	
81	122	624-92-0	Dimethyl-Disulfid	$C_2 \cdot H_6 \cdot S_2$	$CH_3-S-S-CH_3$

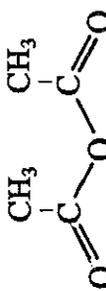
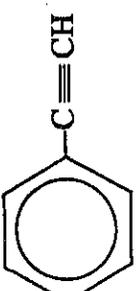
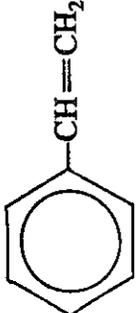
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
82	123	4.160-75-2	Cyclopropyl-Aceton	$C_6 \cdot H_{10} \cdot O$	
83	125	10.061-01-5	cis-1,3-Dichlor-Propen	$C_3 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	
84	127	79-00-5	1,1,2-Trichlor-Ethan	$C_2 \cdot H_3 \cdot Cl_3$	$Cl-CH_2-CH=Cl_2$
85	128	2.454-31-1	3,4-Heptadien	$C_7 \cdot H_{12}$	$CH_3-CH_2-CH=C=CH-CH_2-CH_3$
86	131	142-28-9	1,3-Dichlor-Propan	$C_3 \cdot H_6 \cdot Cl_2$	$Cl-CH_2-CH_2-CH_2-Cl$
87	131	108-88-3	Toluol	$C_7 \cdot H_8$	
88	117,5 °C	64-19-7	Essigsäure	$C_2 \cdot H_4 \cdot O_2$	
89	119 °C	623-43-8	trans-Crotonsäure-Methylester	$C_5 \cdot H_8 \cdot O_2$	
90	135	591-78-6	2-Hexanon	$C_6 \cdot H_{12} \cdot O$	

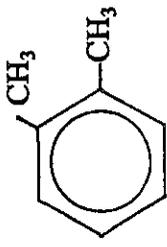
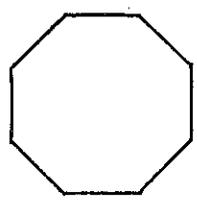
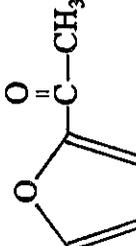
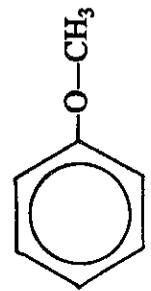
lfd. Nr.	rel. Ret. zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
91	136	124-48-1	Dibrom-Chlor-Methan	$C \cdot H \cdot Br_2 \cdot Cl$	$Br_2 = CH - Cl$
92	138	66-25-1	Hexanal	$C_6 \cdot H_{12} \cdot O$	$C_5H_{11}-C(=O)-H$
93	138	930-56-3	1-(2-Methyl-Cyclopropyl)-Ethanon	$C_6 \cdot H_{10} \cdot O$	
94	138	59.242-27-2	2,5-Dihydro-2,5-Dimethyl-Furan	$C_6 \cdot H_{10} \cdot O$	
95	138	763-93-9	3-Hexen-2-on	$C_6 \cdot H_{10} \cdot O$	$CH_3-C(=O)-CH=CH-CH_2-CH_3$
96	138	505-57-7	2-Hexenal	$C_6 \cdot H_{10} \cdot O$	$C_3H_7-CH=CH-C(=O)-H$
97	138	141-79-7	4-Methyl-3-Penten-2-on	$C_6 \cdot H_{10} \cdot O$	$(CH_3)_2=C=CH-C(=O)-CH_3$
98	139	557-91-5	1,1-Dibrom-Ethan	$C_2 \cdot H_4 \cdot Br_2$	$Br_2 = CH - CH_3$
99	141	5.497-67-6	2,2-Dimethyl-4-Pentenal	$C_7 \cdot H_{12} \cdot O$	$CH_2=CH-CH_2-C(=O)-C(CH_3)_2-H$

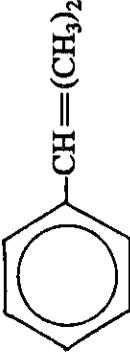
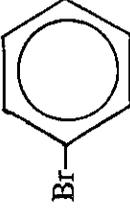
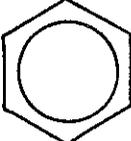
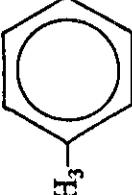
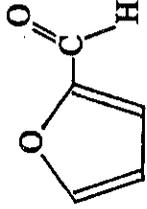
Id. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
100	123 °C	—	Dimethyl-Cyclohexan	$C_8 \cdot H_{16}$	
101	141	111-66-0	1-Octen	$C_8 \cdot H_{16}$	$CH_2 = CH - C_6H_{13}$
102	141	764-13-6	2,5-Dimethyl-2,4-Hexadien	$C_8 \cdot H_{14}$	$(CH_3)_2 = C = CH - CH = C = (CH_3)_2$
103	143	7.642-15-1	cis-4-Octen	$C_8 \cdot H_{16}$	
104	144	4.283-80-1	2-Brom-2-Methyl-Pentan	$C_6 \cdot H_{13} \cdot Br$	$(CH_3)_2 = C - Br - (CH_2)_2 - CH_3$
105	144	111-65-9	Octan	$C_8 \cdot H_{18}$	$CH_3 - (CH_2)_6 - CH_3$
106	144	2.213-23-2	2,4-Dimethyl-Heptan	$C_9 \cdot H_{20}$	$(CH_3)_2 = CH - CH_2 - \overset{CH_3}{\underset{ }{CH}} - (CH_2)_2 - CH_3$
107	145	127-18-4	Tetrachlor-Ethen	$C_2 \cdot Cl_4$	$Cl_2 = C = C = Cl_2$
108	128,5 °C	109-06-8	2-Methyl-Pyridin	$C_6 \cdot H_7 \cdot N$	
109	145	930-27-8	3-Methyl-Furan	$C_5 \cdot H_6 \cdot O$	

lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
110	130 °C	120-92-3	Cyclopentanon	$C_5 \cdot H_8 \cdot O$	
111	131 °C	556-64-9	Methyl-Thiocyanat	$C_2 \cdot H_3 \cdot N \cdot S$	$CH_3-S-C \equiv N$
112	145	930-30-3	2-Cyclopenten-1-on	$C_5 \cdot H_6 \cdot O$	
113	148	3.404-77-1	3,3-Dimethyl-1-Hexen	$C_8 \cdot H_{16}$	$(CH_3)_2$ $CH_2=CH-C-(CH_2)_2-CH_3$
114	150	123-42-2	Diaceton; 4-Hydroxy-4-Methyl-2-Pentanon	$C_6 \cdot H_{12} \cdot O_2$	$(CH_3)_2$ OH $=C-CH_2-C(=O)CH_3$
115	150	1.871-52-9	1,3,5-Cyclooctatrien	$C_8 \cdot H_{10}$	
116	151	1.453-25-4	1-Methyl-Cyclohepten	$C_8 \cdot H_{14}$	

lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
117	152	3.377-86-4	2-Brom-Hexan	$C_6 \cdot H_{13} \cdot Br$	$CH_3 - \overset{Br}{\underset{ }{CH}} - (CH_2)_3 - CH_3$
118	154	630-20-6	1,1,1,2-Tetrachlor-Ethan	$C_2 \cdot H_2 \cdot Cl_4$	$Cl - CH_2 - C \equiv Cl_3$
119	154	5.259-71-2	1,5-Cyclooctadien	$C_8 \cdot H_{12}$	
120	155	108-90-7	Chlor-Benzol	$C_6 \cdot H_5 \cdot Cl$	
121	158	13.151-04-7	5-Methyl-1-Hepten	$C_8 \cdot H_{16}$	$CH_2 = CH - (CH_2)_2 - \overset{CH_3}{\underset{ }{CH}} - CH_2 - CH_3$
122	161	100-41-4	Ethyl-Benzol	$C_8 \cdot H_{10}$	
123	162	16.106-59-5	4,5-Dimethyl-1-Hexen	$C_8 \cdot H_{16}$	$CH_2 = CH - CH_2 - \overset{CH_3}{\underset{ }{CH}} - \overset{CH_3}{\underset{ }{CH}} = (CH_3)_2$
124	162	108-38-3	m-Xylol	$C_8 \cdot H_{10}$	

Id. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
125	163	106-42-3	p-Xylol	$C_8 \cdot H_{10}$	
126	139 °C	108-24-7	Essigsäure-Anhydrid	$C_4 \cdot H_6 \cdot O_3$	
127	145 °C	—	Nonen	$C_9 \cdot H_{18}$	$CH_2 = CH - C_7H_{15}$
128	163	75-25-2	Bromoform; Tribrom-Methan	$C \cdot H \cdot Br_3$	$Br_3 \equiv CH$
129	163	536-74-3	Ethynyl-Benzol	$C_8 \cdot H_6$	
130	166	110-43-0	2-Heptanon	$C_7 \cdot H_{14} \cdot O$	$CH_3 - \overset{O}{\parallel} C - C_5H_{11}$
131	168	100-42-5	Styrol	$C_8 \cdot H_8$	
132	169	111-71-7	Heptanal	$C_7 \cdot H_{14} \cdot O$	$C_6H_{13} - \overset{O}{\parallel} C - H$
133	169	79-34-5	1,1,2,2-Tetrachlor-Ethan	$C_2 \cdot H_2 \cdot Cl_4$	$Cl_2 = CH - CH = Cl_2$

lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
134	169	95-47-6	o-Xylol	$C_8 \cdot H_{10}$	
135	151 °C	111-84-2	Nonan	$C_9 \cdot H_{20}$	$CH_3-(CH_2)_7-CH_3$
136	151 °C	292-64-8	Cyclooctan	$C_8 \cdot H_{16}$	
137	171	1.192-62-7	2-Acetyl-Furan; 1-(2-Furanyl)-Ethanon	$C_6 \cdot H_6 \cdot O_2$	
138	171	5.026-76-6	6-Methyl-1-Hepten	$C_8 \cdot H_{16}$	$CH_2=CH-(CH_2)_3-CH-(CH_3)_2$
139	171	96-18-4	1,2,3-Trichlor-Propan	$C_3 \cdot H_5 \cdot Cl_3$	$Cl-CH_2-\underset{\substack{ \\ Cl}}{CH}-CH_2-Cl$
140	175	100-66-3	Anisol; Methoxy-Benzol	$C_7 \cdot H_8 \cdot O$	
141	178	37.050-03-6	3,4-Nonadien	$C_9 \cdot H_{16}$	$C_2H_5-CH=C=CH-C_4H_9$

Id. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
142	179	98-82-8	Cumol; Isopropyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{12}$	
143	179	108-86-1	Brom-Benzol	$C_6 \cdot H_5 \cdot Br$	
144	180	6.137-06-0	4-Methyl-2-Heptanon	$C_8 \cdot H_{16} \cdot O$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3-\text{C}=\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}-(\text{CH}_2)_2-\text{CH}_3 \end{array}$
145	156,5 °C	300-57-2	2-Propenyl-Benzol; Allyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{10}$	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-$ 
146	184	637-50-3	1-Propenyl-Benzol; β -Methyl-Styrol	$C_9 \cdot H_{10}$	$\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-$ 
147	184	622-97-9	4-Methyl-Styrol	$C_9 \cdot H_{10}$	CH_3-  $-\text{CH}=\text{CH}_2$
148	162 °C	98-01-1	Furfural; 2-Furan-Aldehyd	$C_5 \cdot H_4 \cdot O_2$	

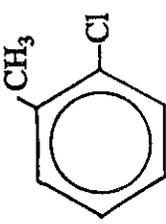
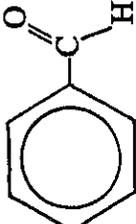
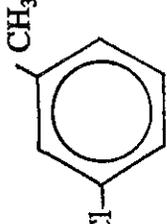
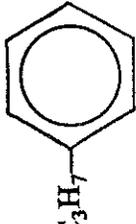
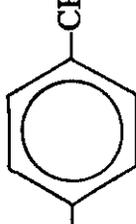
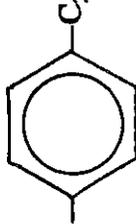
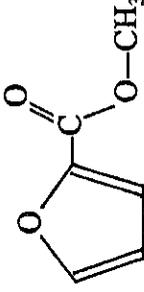
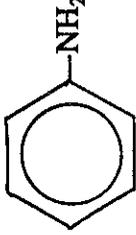
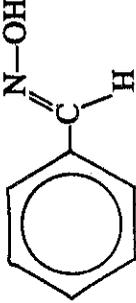
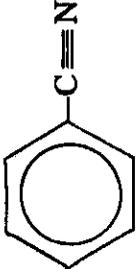
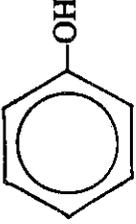
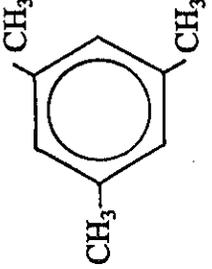
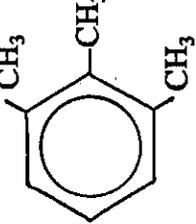
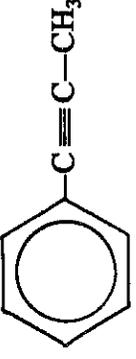
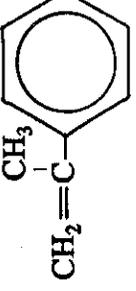
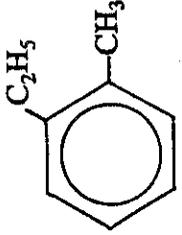
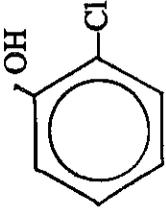
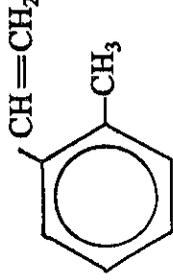
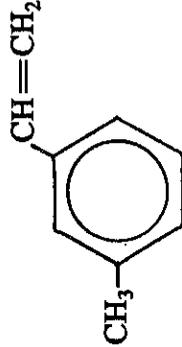
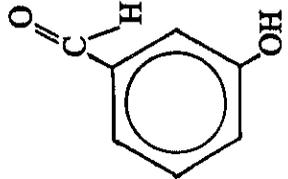
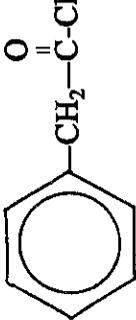
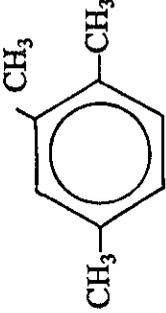
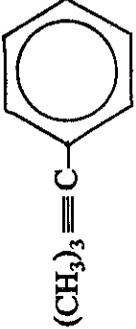
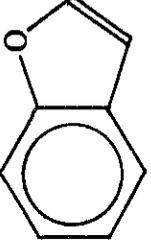
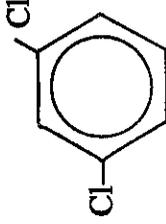
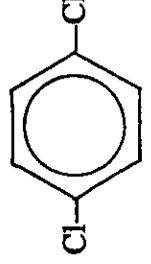
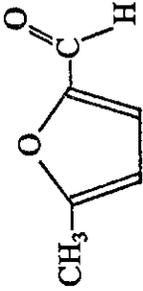
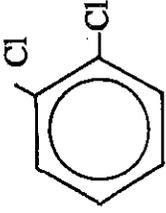
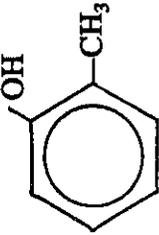
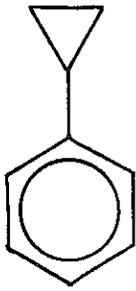
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
149	185	95-49-8	2-Chlor-Toluol	$C_7 \cdot H_7 \cdot Cl$	
150	185	100-52-7	Benzaldehyd	$C_7 \cdot H_6 \cdot O$	
151	186	108-41-8	3-Chlor-Toluol	$C_7 \cdot H_7 \cdot Cl$	
152	186	103-65-1	Propyl-Benzol; 1-Phenyl-Propan	$C_9 \cdot H_{12}$	
153	187	106-43-4	4-Chlor-Toluol	$C_7 \cdot H_7 \cdot Cl$	
154	189	622-96-8	4-Ethyl-Toluol	$C_9 \cdot H_{12}$	
155	170 °C	--	Decen	$C_{10} \cdot H_{20}$	$CH_2 = CH - C_8H_{17}$

Fig. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
156	174 °C	124-18-5	Decan	$C_{10} \cdot H_{22}$	$CH_3-(CH_2)_8-CH_3$
157	181 °C	611-13-2	2-Furancarbonsäure-Methylester	$C_6 \cdot H_6 \cdot O_3$	
158	189	931-54-4	Isocyano-Benzol	$C_7 \cdot H_5 \cdot N$	
159	189	62-53-3	Anilin	$C_6 \cdot H_7 \cdot N$	
160	189	622-32-2	Benzaldehyd-Oxim	$C_7 \cdot H_7 \cdot N \cdot O$	
161	189	41.898-89-9	2,4-Dimethyl-2,3-Heptadien-5-in	$C_9 \cdot H_{12}$	$(CH_3)_2=C=C(CH_3)-C \equiv C-CH_3$
162	189	100-47-0	Cyano-Benzol; Benzonitril	$C_7 \cdot H_5 \cdot N$	
163	190	3.658-80-8	Dimethyl-Trisulfid	$C_2 \cdot H_6 \cdot S_3$	$CH_3-S_3-CH_3$

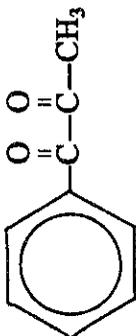
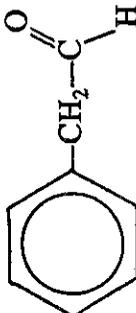
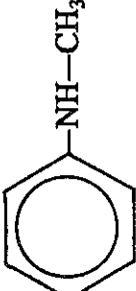
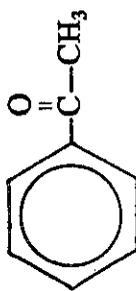
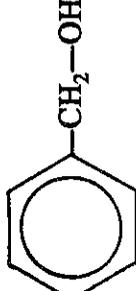
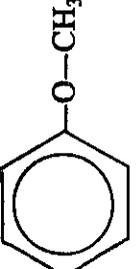
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
164	190	108-95-2	Phenol	$C_6 \cdot H_6 \cdot O$	
165	190	108-67-8	Mesitylen; 1,3,5-Trimethyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{12}$	
166	191	526-73-8	1,2,3-Trimethyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{12}$	
167	192	673-32-5	1-Phenyl-1-Propin	$C_9 \cdot H_8$	
168	193	98-83-9	Isopropenyl-Benzol; α -Methyl-Styrol	$C_9 \cdot H_{10}$	

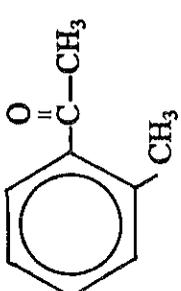
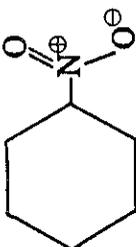
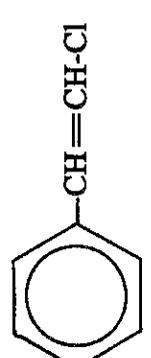
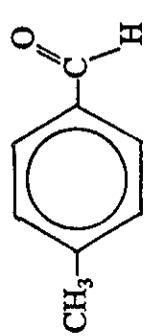
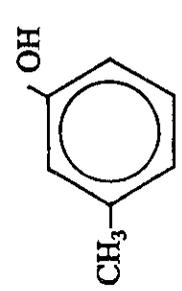
Ifd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
169	194	611-14-3	2-Ethyl-Toluol	$C_9 \cdot H_{12}$	
170	195	95-57-8	2-Chlor-Phenol	$C_6 \cdot H_5 \cdot Cl \cdot O$	
171	196	611-15-4	2-Methyl-Styrol	$C_9 \cdot H_{10}$	
172	170,5 °C	100-80-1	3-Methyl-Styrol	$C_9 \cdot H_{10}$	
173	197	100-83-4	3-Hydroxy-Benzaldehyd; m-Formyl-Phenol	$C_7 \cdot H_6 \cdot O_2$	

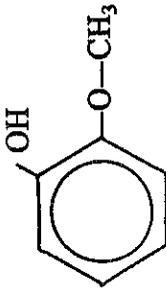
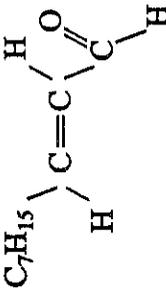
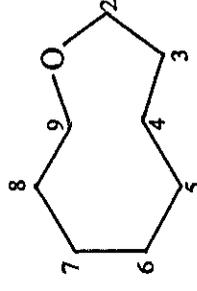
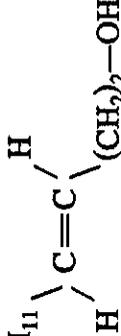
lfd. Nr.	rel. Retzeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
174	197	103-80-0	1-Chlor-2-Phenyl-Ethanon	$C_8 \cdot H_7 \cdot Cl \cdot O$	
175	197	95-63-6	1,2,4-Trimethyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{12}$	
176	197	98-06-6	<i>tert.</i> -Butyl-Benzol	$C_{10} \cdot H_{14}$	
177	197	271-89-6	Benzo[<i>b</i>]furan	$C_8 \cdot H_6 \cdot O$	
178	199	541-73-1	<i>m</i> -Dichlor-Benzol	$C_6 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	
179	200	106-46-7	<i>p</i> -Dichlor-Benzol	$C_6 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	
180	200	1.072-05-5	2,6-Dimethyl-Heptan	$C_9 \cdot H_{20}$	$(CH_3)_2 = CH - (CH_2)_3 - CH = (CH_3)_2$

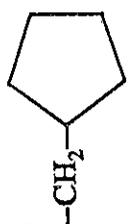
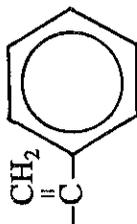
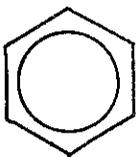
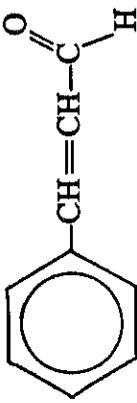
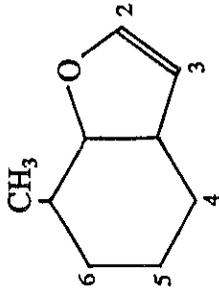
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
181	203	2.216-34-4	4-Methyl-Octan	$C_9 \cdot H_{20}$	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \\ C_3H_7-CH-C_4H_9 \end{array} $
182	187 °C	620-02-0	5-Methyl-Furfural	$C_6 \cdot H_6 \cdot O_2$	
183	192,5 °C	821-95-4	1-Undecen	$C_{11} \cdot H_{22}$	$CH_2=CH-C_9H_{19}$
184	204	921-47-1	2,3,4-Trimethyl-Hexan	$C_9 \cdot H_{20}$	$ \begin{array}{c} CH_3 \quad CH_3 \\ \quad \\ (CH_3)_2=CH-CH-CH-C_2H_5 \end{array} $
185	206	95-50-1	o-Dichlor-Benzol	$C_6 \cdot H_4 \cdot Cl_2$	
186	207	95-48-7	o-Cresol; 2-Methyl-Phenol	$C_7 \cdot H_8 \cdot O$	
187	207	873-49-4	Cyclopropyl-Benzol	$C_9 \cdot H_{10}$	

Id. Nr.	rel. Retzeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
188	208	496-11-7	Indan; 2,3-Dihydro-Inden	$C_9 \cdot H_{10}$	
189	209	766-97-2	4-Ethynyl-Toluol	$C_9 \cdot H_8$	
190	209	2.327-99-3	Propadienyl-Benzol	$C_9 \cdot H_8$	
191	211	95-13-6	1H-Inden	$C_9 \cdot H_8$	
192	195 °C	1.321-74-0	Vinyl-Styrol; Diethenyl-Benzol	$C_{10} \cdot H_{10}$	
193	211	936-59-4	3-Chlor-1-Phenyl-1-Propanon	$C_9 \cdot H_9 \cdot Cl \cdot O$	

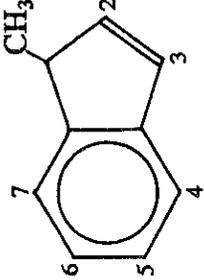
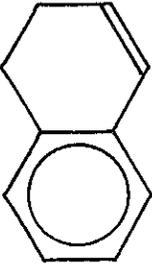
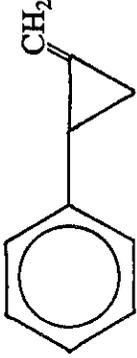
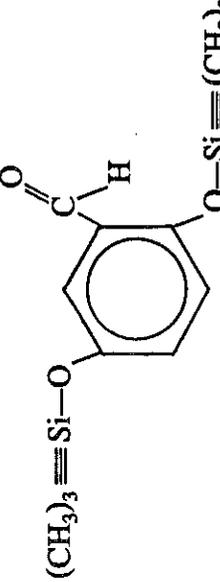
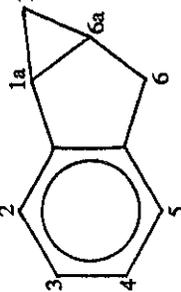
ifd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
194	211	579-07-7	1-Phenyl-1,2-Propandion	$C_9 \cdot H_8 \cdot O_2$	
195	195 °C	122-78-1	α-Toluol-Aldehyd; Phenyl-Ethanal	$C_8 \cdot H_8 \cdot O$	
196	196 °C	1.120-21-4	Undecan	$C_{11} \cdot H_{24}$	$CH_3-(CH_2)_9-CH_3$
197	211	100-61-8	N-Methyl-Anilin	$C_7 \cdot H_9 \cdot N$	
198	202 °C	98-86-2	Aceto-Phenon; Phenyl-Ethanon	$C_8 \cdot H_8 \cdot O$	
199	212	100-51-6	Benzol-Methanol	$C_7 \cdot H_8 \cdot O$	
200	212	637-69-4	4-Vinyl-Anisol; 4-Methoxy-Styrol	$C_9 \cdot H_{10} \cdot O$	$CH_2=CH-$ 

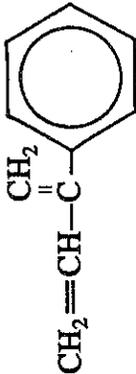
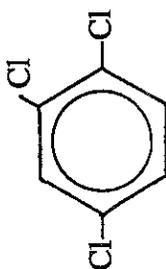
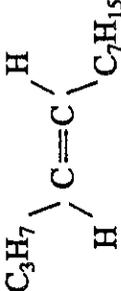
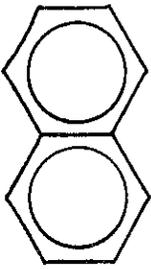
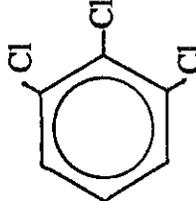
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
201	212	577-16-2	1-(2-Methyl-Phenyl)-Ethanon	$C_9 \cdot H_{10} \cdot O$	
202	205,5 °C	1.122-60-7	Nitro-Cyclohexan	$C_6 \cdot H_{11} \cdot N \cdot O_2$	
203	213	96-12-8	1,2-Dibrom-3-Chlor-Propan	$C_3 \cdot H_5 \cdot Br_2 \cdot Cl$	$Br-CH_2-\overset{Br}{\underset{ }{CH}}-CH_2-Cl$
204	214	622-25-3	β -Chlor-Styrol	$C_8 \cdot H_7 \cdot Cl$	
205	215	104-87-0	p-Toluol-Aldehyd	$C_8 \cdot H_8 \cdot O$	
206	215	108-39-4	m-Cresol; 3-Methyl-Phenol	$C_7 \cdot H_8 \cdot O$	

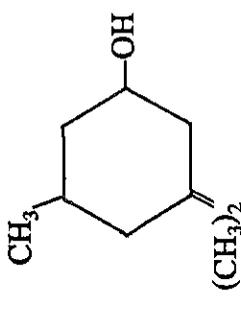
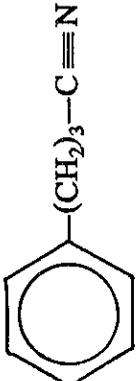
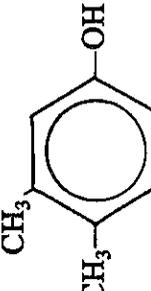
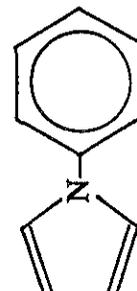
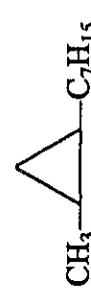
Ist. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
207	216	90-05-1	2-Methoxy-Phenol	$C_7 \cdot H_8 \cdot O_2$	
208	218	74.511-51-6	3,3-Dimethyl-1-Octen	$C_{10} \cdot H_{20}$	$CH_2 = \overset{(CH_3)_2}{\underset{ }{C}} - C - C_3H_{11}$
209	219	3.913-81-3	<i>trans</i> -2-Decenal	$C_{10} \cdot H_{18} \cdot O$	
210	219	6.573-50-8	Oxonan; Oxa-Cyclononan	$C_8 \cdot H_{16} \cdot O$	
211	219	124-19-6	Nonanal	$C_9 \cdot H_{18} \cdot O$	$C_8H_{17} - \overset{O}{\parallel} C - H$
212	219	10.339-61-4	<i>trans</i> -3-Nonene-1-ol	$C_9 \cdot H_{18} \cdot O$	

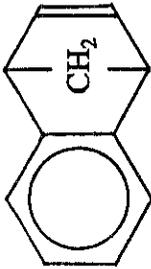
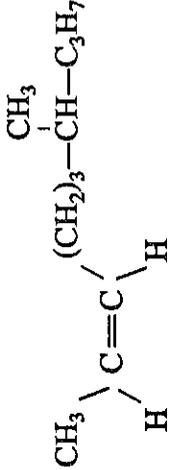
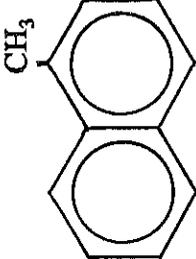
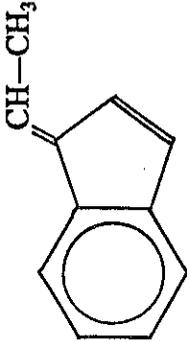
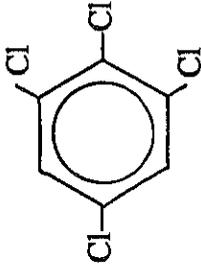
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
213	219	53.366-38-4	(2-Methyl-Butyl)-Cyclopentan	$C_{10} \cdot H_{20}$	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}_2\text{H}_5 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{Cyclopentan} \end{array} $ 
214	220	2.039-93-2	(1-Methylen-Propyl)-Benzol	$C_{10} \cdot H_{12}$	$ \begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_2\text{H}_5 - \text{C} - \text{Benzol} \end{array} $ 
215	215 °C	87-68-3	Hexachlor-1,3-Butadien	$C_4 \cdot Cl_6$	$ \begin{array}{c} \text{Cl} \quad \text{Cl} \\ \quad \\ \text{Cl}_2 = \text{C} = \text{C} = \text{C} = \text{C} = \text{Cl}_2 \end{array} $
216	222	13.610-02-1	(2-Propinyloxy)-Benzol	$C_9 \cdot H_8 \cdot O$	$ \text{CH} \equiv \text{C} - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{Benzol} $ 
217	222	104-55-2	3-Phenyl-Acrolein	$C_9 \cdot H_8 \cdot O$	
218	222	17.059-52-8	7-Methyl-Benzol[b]furan	$C_9 \cdot H_8 \cdot O$	
219	222	37.769-62-3	1-(Ethenyloxy)-2,2,4-Trimethyl-Pentan	$C_{10} \cdot H_{20} \cdot O$	$ \text{CH}_2 = \text{CH} - \text{O} - \text{CH}_2 - \overset{(\text{CH}_3)_2}{\underset{ }{\text{C}}} - \text{CH}_2 - \text{CH} = (\text{CH}_3)_2 $

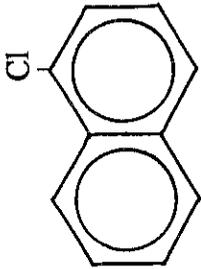
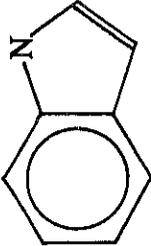
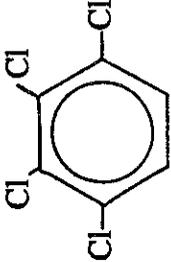
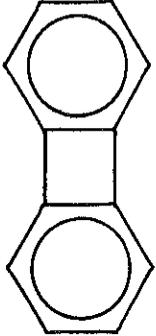
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
220	222	4.265-25-2	2-Methyl-Benzo[b]furan	$C_9 \cdot H_8 \cdot O$	
221	223	108-57-6	1,3-Diethenyl-Benzol	$C_{10} \cdot H_{10}$	
222	224	618-34-8	α -Chlor-Styrol	$C_8 \cdot H_7 \cdot Cl$	
223	228	2.471-84-3	1-Methylen-1H-Inden	$C_{10} \cdot H_8$	
224	229	108-70-3	1,3,5-Trichlor-Benzol	$C_6 \cdot H_3 \cdot Cl_3$	

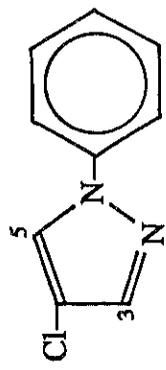
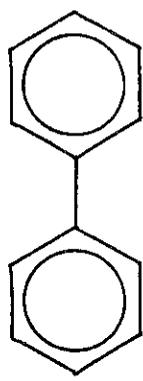
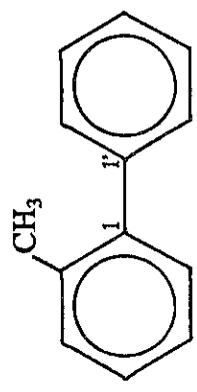
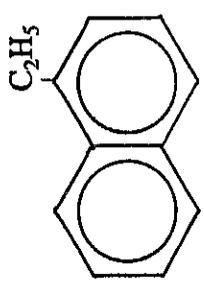
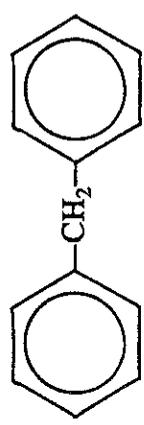
Ifd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
225	232	767-59-9	1-Methyl-1H-Inden	$C_{10} \cdot H_{10}$	
226	232	447-53-0	1,2-Dihydro-Naphthalin	$C_{10} \cdot H_{10}$	
227	233	29.817-09-2	(Methylen-Cyclopropyl)-Benzol	$C_{10} \cdot H_{10}$	
228	233	56.114-69-3	2,5-bis[(Trimethyl-Silyl)-Oxy]-Benzaldehyd	$C_{13} \cdot H_{22} \cdot O_3 \cdot Si_2$	
229	233	15.677-15-3	Cyclopropan[α]indan; 1,1a,6,6a-Tetrahydro-Cyclopropen[α]indan	$C_{10} \cdot H_{10}$	
230	234	36.839-67-5	3-Methoxy-Pentan	$C_6 \cdot H_{14} \cdot O$	$(C_2H_5)_2=CH-O-CH_3$

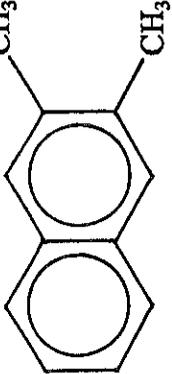
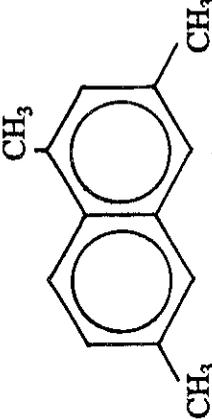
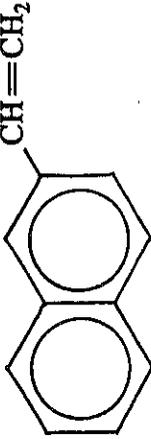
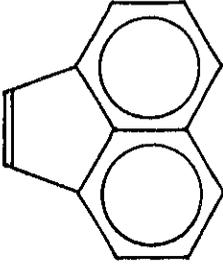
Id. Nr.	rel. Retzeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
231	236	2.288-18-8	(1-Methylen-2-Propenyl)-Benzol	$C_{10}H_{10}$	$CH_2=CH-C(=CH_2)-C_6H_5$ 
232	237	334-56-5	1-Fluor-Decan	$C_{10}H_{21}F$	$CH_3-(CH_2)_8-CH_2-F$
233	238	120-82-1	1,2,4-Trichlor-Benzol	$C_6H_3Cl_3$	
234		7.206-15-7	<i>trans</i> -4-Dodecen	$C_{12}H_{24}$	
235	216 °C	112-40-3	Dodecan	$C_{12}H_{26}$	$CH_3-(CH_2)_{10}-CH_3$
236	240	91-20-3	Naphthalin	$C_{10}H_8$	
237	244	87-61-6	1,2,3-Trichlor-Benzol	$C_6H_3Cl_3$	

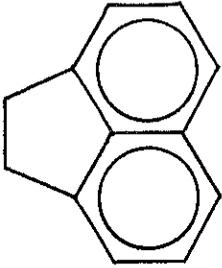
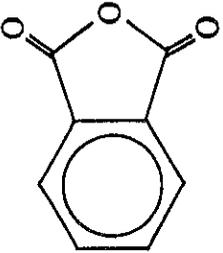
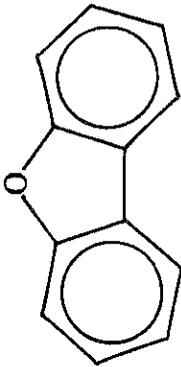
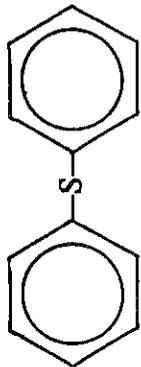
ifd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
238	245	116-02-9	3,3,5-Trimethyl-Cyclohexanol	$C_9 \cdot H_{18} \cdot O$	
239	249	2.046-18-6	4-Phenyl-Butyronitril	$C_{10} \cdot H_{11} \cdot N$	
240	227 °C	95-65-8	3,4-Dimethyl-Phenol	$C_8 \cdot H_{10} \cdot O$	
241	257	635-90-5	1-Phenyl-1H-Pyrrol	$C_{10} \cdot H_9 \cdot N$	
242	259	74.663-91-5	1-Heptyl-2-Methyl-Cyclopropan	$C_{11} \cdot H_{22}$	
243	232,5 °C	2.437-56-1	1-Tridecen	$C_{13} \cdot H_{26}$	$CH_2 = CH - C_{11}H_{23}$
244	234 °C	629-50-5	Tridecan	$C_{13} \cdot H_{28}$	$CH_3 - (CH_2)_{11} - CH_3$
245	261	17.302-23-7	4,5-Dimethyl-Nonan	$C_{11} \cdot H_{24}$	$C_3H_7 - CH - CH - C_4H_9$ CH ₃ CH ₃

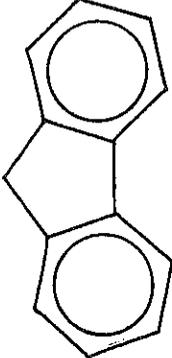
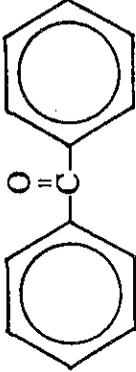
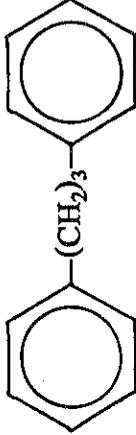
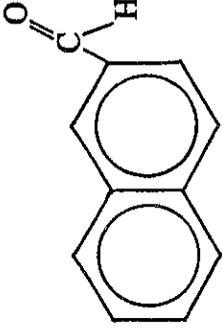
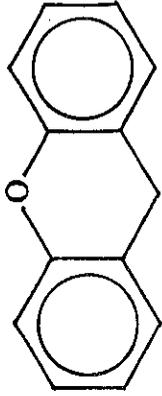
lfd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
246	262	4.453-90-1	1,4-Dihydro-1,4-Methano-Naphthalin	$C_{11} \cdot H_{10}$	
247	264	74.630-23-2	<i>cis</i> -7-Methyl-2-Decen	$C_{11} \cdot H_{22}$	
248	266	90-12-0	1-Methyl-Naphthalin	$C_{11} \cdot H_{10}$	
249	266	2.471-83-2	1-Ethyliden-1H-Inden	$C_{11} \cdot H_{10}$	
250	269	634-90-2	1,2,3,5-Tetrachlor-Benzol	$C_6 \cdot H_2 \cdot Cl_4$	

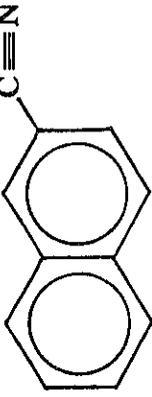
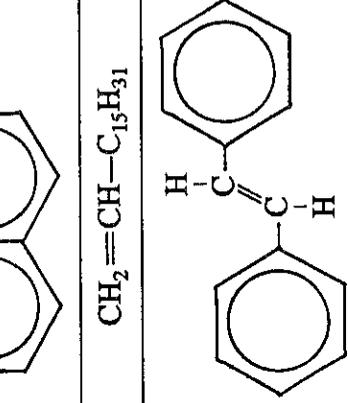
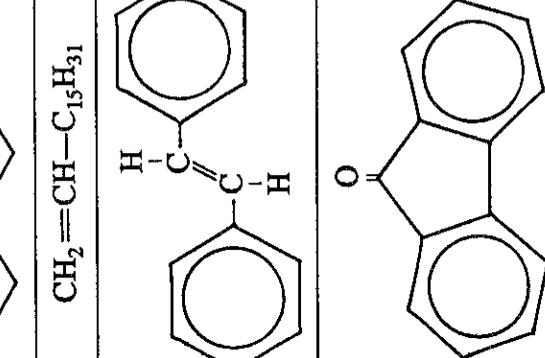
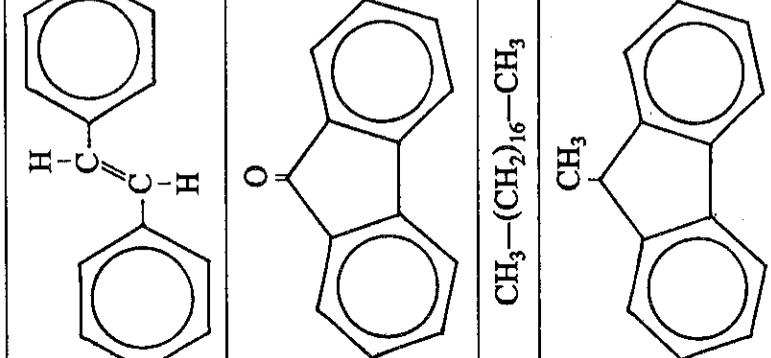
fd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
251	277	1.002-68-2	<i>trans</i> -3-Undecen	$C_{11} \cdot H_{22}$	$ \begin{array}{c} C_2H_5 \quad H \\ \diagdown \quad / \\ C=C \\ / \quad \diagdown \\ H \quad C_7H_{15} \end{array} $
252	280	25.586-43-0 auch 90-13-1	1-Chlor-Naphthalin	$C_{10} \cdot H_7 \cdot Cl$	
253	250 °C	—	Tetradecen	$C_{14} \cdot H_{28}$	$CH_2 = CH - C_{12}H_{25}$
254	253 °C	629-59-4	Tetradecan	$C_{14} \cdot H_{30}$	$CH_3 - (CH_2)_{12} - CH_3$
255	253,5 °C	120-72-9	1H-Indol; 2,3-Benzo-Pyrrol	$C_8 \cdot H_7 \cdot N$	
256	254 °C	634-66-2	1,2,3,4-Tetrachlor-Benzol	$C_6 \cdot H_2 \cdot Cl_4$	
257	294	259-79-0	Biphenylen	$C_{12} \cdot H_8$	

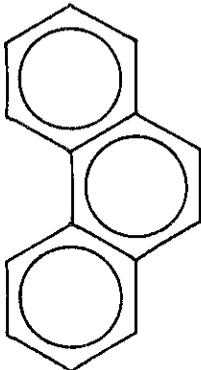
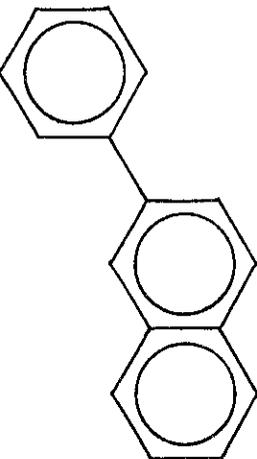
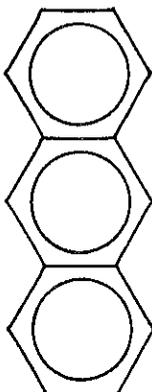
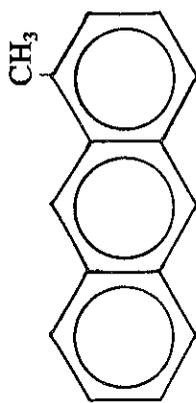
Id. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
258	298	6.831-92-1	4-Chlor-1-Phenyl-1H-Pyrazol	$C_9 \cdot H_7 \cdot Cl \cdot N_2$	
259	255 °C	92-52-4	Biphenyl	$C_{12} \cdot H_{10}$	
260	255,3 °C	643-58-3	2-Methyl-Biphenyl; 2-Phenyl-Toluol	$C_{13} \cdot H_{12}$	
261	259 °C	1.127-76-0	1-Ethyl-Naphthalin	$C_{12} \cdot H_{12}$	
262	264 °C	101-81-5	Diphenyl-Methan	$C_{13} \cdot H_{12}$	
263	268,5 °C	13.360-61-7	1-Pentadecen	$C_{15} \cdot H_{30}$	$CH_2 = CH - C_{13}H_{27}$

lfd. Nfr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
264	269 °C	581-40-8	2,3-Dimethyl-Naphthalin	$C_{12} \cdot H_{12}$	
265	270 °C	629-62-9	Pentadecan	$C_{15} \cdot H_{32}$	$CH_3-(CH_2)_{13}-CH_3$
266	274 °C	629-73-2	1-Hexadecen	$C_{16} \cdot H_{32}$	$CH_2=CH-C_{14}H_{29}$
267		3.031-08-1	1,3,6-Trimethyl-Naphthalin	$C_{13} \cdot H_{14}$	
268		827-54-3	2-Ethenyl-Naphthalin	$C_{12} \cdot H_{10}$	
269		208-96-8	Acenaphthylen	$C_{12} \cdot H_8$	

Id. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
270	279 °C	83-32-9	Acenaphthen	$C_{12} \cdot H_{10}$	
271	284 °C	85-44-9	Phthalsäure-Anhydrid	$C_8 \cdot H_4 \cdot O_3$	
272	285 °C	132-64-9	Dibenzo-Furan	$C_{12} \cdot H_8 \cdot O$	
273	287 °C	544-76-3	Hexadecan	$C_{16} \cdot H_{34}$	$CH_3-(CH_2)_{14}-CH_3$
274	296 °C	139-66-2	Thio-bis-Benzol; Diphenyl-Sulfid	$C_{12} \cdot H_{10} \cdot S$	

Igd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ-Formel	Strukturformel
275	298 °C	86-73-7	Fluoren	$C_{13} \cdot H_{10}$	
276	302 °C	629-78-7	Heptadecan	$C_{17} \cdot H_{36}$	$CH_3-(CH_2)_{15}-CH_3$
277	305 °C	119-61-9	Benzo-Phenon; Diphenyl-Keton	$C_{13} \cdot H_{10} \cdot O$	
278	1.081-75-0		1,3-Diphenyl-Propan	$C_{15} \cdot H_{16}$	
279	66-99-9		2-Naphthalin-Aldehyd	$C_{11} \cdot H_8 \cdot O$	
280	311 °C	92-83-1	Xanthen; Dibenzo-γ-Pyran	$C_{13} \cdot H_{10} \cdot O$	

Ild. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
281		613-46-7	2-Naphthalin-Carbonitril	$C_{11} \cdot H_7 \cdot N$	
282		—	Heptadecen	$C_{17} \cdot H_{34}$	$CH_2=CH-C_{15}H_{31}$
283	306 °C	588-59-0	<i>trans</i> -Stilben; 1,2-Diphenyl-Ethylen	$C_{14} \cdot H_{12}$	
284		486-25-9	9-Fluoren	$C_{13} \cdot H_8 \cdot O$	
285	317 °C	593-45-3	Octadecan	$C_{18} \cdot H_{38}$	$CH_3-(CH_2)_{16}-CH_3$
286		1.430-97-3	9-Methyl-Fluoren	$C_{14} \cdot H_{12}$	

Id. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
287	336 °C	85-01-8	Phenanthren	$C_{14} \cdot H_{10}$	
288	621-94-2	2-Phenyl-Naphthalin	$C_{16} \cdot H_{14}$		
289	120-12-7	Anthracen	$C_{14} \cdot H_{10}$		
290	610-48-0	1-Methyl-Anthracen	$C_{15} \cdot H_{12}$		

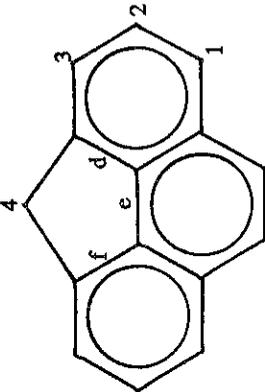
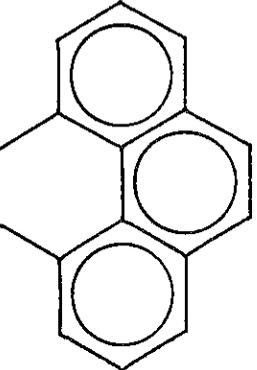
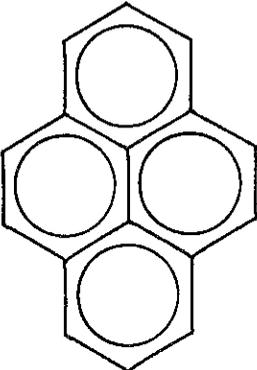
Ifd. Nr.	rel. Ret.zeit bzw. Siedepkt.	CARN	Substanz	Σ -Formel	Strukturformel
291	353 °C	203-64-5	4,5-Methylen-Phenanthren; 4H-Cyclopentan[def]phenanthren	$C_{15}H_{10}$	
292		6.628-98-4	4,5-Dihydro-Pyren	$C_{16}H_{12}$	
293	433	129-00-0	Pyren	$C_{16}H_{10}$	

Tabelle 11: Zusammenstellung der gefährlichsten Substanzen, die in Brandgasen enthalten sein können oder die bei Störfällen freigesetzt werden können – geordnet nach dem Feuerwehr-Einsatztoleranzwert (ETW) [130]

ETW [ppm]	CARN	Substanz	Σ -Formel	Molek.- gewicht	Siedepkt. [°C]
0,02	91-08-7	2,6-Diisocyanato-Toluol	$C_9 \cdot H_6 \cdot N_2 \cdot O_2$	174,15	≈ 250
0,1	75-44-5	Phosgen	$C \cdot O \cdot Cl_2$	98,92	7,60
0,2	107-02-8	Acrolein	$C_3 \cdot H_4 \cdot O$	56,06	52,00
0,3	506-77-4	Chlor-Cyan	$C \cdot Cl \cdot N$	61,48	14,00
0,5	7.803-51-2	Phosphor-Wasserstoff	$P \cdot H_3$	34,00	-87,00
1	50-00-0	Formaldehyd	$C \cdot H_2 \cdot O$	30,03	-19,00
1	302-01-2	Hydrazin	$N_2 \cdot H_4$	32,05	113,50
1	10.102-44-0	Stickstoff-Dioxid	$N \cdot O_2$	46,01	21,20
1	7.446-09-5	Schwefel-Dioxid	$S \cdot O_2$	64,06	-10,00
1	7.782-50-5	Chlor	Cl_2	70,91	-34,06
5	7.664-39-3	Fluor-Wasserstoff	$H \cdot F$	20,01	19,54
5	74-90-8	Blausäure	$H \cdot C \cdot N$	27,03	26,00
5	7.647-01-0	Chlor-Wasserstoff	$H \cdot Cl$	36,46	-85,00
10	7.783-06-4	Schwefel-Wasserstoff	$H_2 \cdot S$	34,08	-60,33
10	75-15-0	Schwefel-Kohlenstoff	$C \cdot S_2$	76,14	46,30
20	107-13-1	Acrylsäure-Nitril	$C_3 \cdot H_3 \cdot N$	53,06	77,00
20	64-19-7	Essigsäure	$C_2 \cdot H_4 \cdot O_2$	60,05	117,90
20	71-43-2	Benzol	$C_6 \cdot H_6$	78,11	80,15
25	79-00-5	1,1,2-Trichlor-Ethan	$C_2 \cdot H_3 \cdot Cl_3$	133,42	113,50
40	100-42-5	Styrol	$C_8 \cdot H_8$	104,14	145,00
50	7.664-41-7	Ammoniak	$N \cdot H_3$	17,03	-33,00
100	630-08-0	Kohlenstoff-Monoxid	$C \cdot O$	28,01	-191,50
100	75-01-4	Vinyl-Chlorid	$C_2 \cdot H_3 \cdot Cl$	62,50	-13,90
100	108-88-3	Toluol	$C_7 \cdot H_8$	92,13	111,00
100	108-90-7	Chlor-Benzol	$C_6 \cdot H_5 \cdot Cl$	112,56	132,00
100	79-01-6	Trichlor-Ethen	$C_2 \cdot H \cdot Cl_3$	131,40	87,00
100	127-18-4	Tetrachlor-Ethen	$C_2 \cdot Cl_4$	165,83	121,00