

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchung der Löschverfahren und
Löschmittel zur Bekämpfung von Brän-
den gefährlicher Güter
(Fortsetzung des Forschungsberichtes
Nr. 81)

86

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

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

Forschungsbericht Nr. 86

**Untersuchung der Löschverfahren
und Löschmittel zur Bekämpfung
von Bränden gefährlicher Güter
(Fortsetzung des Forschungsberichtes Nr. 81)**

von
Dipl.-Ing. C. Axel Föhl
und
Peter Basmer

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1993

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	VERSUCHSAUFBAU	8
3.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	13
3.1	Unbehandeltes Fichtenholz	13
3.2	Polyvinylchlorid-Hartschaum (PVC)	16
3.3	Xylol	19
3.4	Polyethylen (PE)	21
3.5	Polyoxymethylen (POM)	22
3.6	Polystyrol (PS)	24
3.7	Polycarbonat (PC)	25
3.8	Hart-Polyvinylchlorid (PVC)	26
4.	VERSUCHSERGEBNISSE	28
4.1	Unbehandeltes Fichtenholz	28
4.2	PVC-Hartschaum	29
4.3	Xylol	30
4.4	Polyethylen	30
4.5	Polyoxymethylen	31
4.6	Polystyrol	31
4.7	Polycarbonat	32
4.8	Hart-PVC	33
5.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	34
6.	LITERATURVERZEICHNIS	38
7.	BILDER UND TABELLEN	42

1. EINLEITUNG

Die durch den Brand am 1. November 1986 im Lagerhaus MuttENZ der Sandoz AG verursachte Verschmutzung des Rheins war Anlaß, die Wirkungsweise der Löschmittel erneut zu überdenken, die bislang in erster Linie nach ihrer auf den drei Effekten Kühlen, Ersticken, Inhibieren beruhenden Löschwirkung beurteilt wurden.

Wegen seiner guten Löschwirkung einerseits und wegen seiner hohen Verfügbarkeit und seiner relativ einfachen Handhabung andererseits stellt Wasser das weitaus am häufigsten verwendete Löschmittel dar. Doch hat die durch jenen Brand ausgelöste Umweltkatastrophe einmal mehr verdeutlicht, daß Wasser zum Löschen von Bränden von Chemikalien und anderen gefährlichen Stoffen nicht länger unbedenklich eingesetzt werden darf, wenn erhebliche Sekundärschäden zu befürchten sind, weil sich diese Chemikalien und/oder ihre Reaktionsprodukte im Löschwasser lösen und mit diesem dann im Erdreich versickern und das Grundwasser verderben oder Oberflächengewässer verseuchen, weil sie direkt vom Löschwasser in Fluß oder See gespült werden. Die Gefahr solcher Umweltschädigungen besteht schon beim Ausschwemmen von geringen Mengen handelsüblicher Materialien. So wurde die Rheinverseuchung, die der Sandoz-Brand zur Folge hatte, von nur 2 % der dort gelagerten Agrochemikalien verursacht [1].

Bei der Bewertung eines Löschverfahrens ist also nicht nur die Löschwirkung des eingesetzten Löschmittels und die Gesundheits- und Brandgefährlichkeit der Stoffe im Brandherd zu berücksichtigen, sondern – wenn sie nicht eingedämmt werden können – auch das Umweltgefährdungspotential sowohl der brennenden Stoffe selbst als auch ihrer Reaktionsprodukte mit dem Löschmittel.

Mit dem Löschmittel Wasser reagieren verschiedene brennbare und auch nicht brennbare Stoffe heftig bis explosiv unter Freisetzung von großen Wärmemengen, von brandförderndem Sauerstoff, von brennbaren oder toxischen, wasserlöslichen oder flüchtigen Reaktionsprodukten, möglicherweise solchen, die die Brand- und Vergiftungsgefahr an entfernte, tiefliegende Orte tragen können. Andere Stoffe zersetzen sich bei höheren

Temperaturen oder gehen neue Verbindungen ein, und ihre Zersetzungs- oder Reaktionsprodukte verhalten sich wie eben beschrieben.

Seit Jahren existieren Nachschlagewerke, in denen gefährliche Chemikalien und ihre Eigenschaften aufgelistet werden. 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. Die Durchsicht der einschlägigen Handbücher [2...18] zeigt, daß bei einigen 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 Löschanlagen bisher weitgehend fehlen.

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

- Der Umweltminister forderte von der chemischen Industrie rückhaltlose Information der Öffentlichkeit und den weiteren Ausbau ihres hohen Sicherheitsstandards [19];
- die Firma Sandoz begann, ihre Produktions- und Lagerstätten mit ortsfesten Löschanlagen und mit Löschwasserrückhaltebecken auszurüsten [20];
- der Verband der Chemischen Industrie (VCI) veranstaltete ein Symposium über Brände und ihre Vermeidung [21];
- die Verleger und Software-Hersteller produzierten eine Flut von Gefahrstoffhand- und -taschenbücher, elektronischen Diagnosesystemen und -dateien [22...24], die natürlich die Widersprüche in den etablierten Nachschlagewerken [9...18] weiter verbreiten und
- die Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FfB) erhielt den Auftrag, diesen Widersprüchen nachzuspüren.

Bei den Chemikalien, die im Brandfall ein besonderes Gefahrenpotential entfalten, ist zu unterscheiden, ob sie stationär (Produktion, Handel, Lager, Verarbeitung) oder beweglich (Gefahrgut-Transporte) auftreten. Für beide Fälle sind unterschiedliche Vorsorge-maßnahmen entwickelt worden.

Für die Gefahrgüter auf See, Schiene und Straße existieren seit 1973 Kennzeichnungssysteme, die weitgehend übereinstimmen und nahezu im gesamten europäischen Raum gelten [4, 5, 25]: Deutlich sichtbare Kennziffern signalisieren, zu welcher Gefahrenklasse die Ladung gehört. Mit ihrer Hilfe können die Einsatzkräfte dann 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 [26...28].

Das Gefahrenpotential ortsfester Gefahrstoffagglomerationen in Industrie und Handel stand im Mittelpunkt des VCI-Symposiums [21], 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 [29, 30], indem beispielsweise

- das auch nach Minimierung der Löschwassermenge noch anfallende Restwasser in geeigneten Rückhaltesystemen aufgefangen wird [30...33],
- die Pläne für die Alarmierung der Feuerwehr optimiert werden [34...36], möglicherweise in der Art, daß mit Hilfe eines Gefahrstoffkatasters [37] die Einsatzkräfte schon mit dem Einlaufen des Alarms darüber informiert werden, welchen Gefahrstoffen sie im Brandherd konfrontiert sein werden und dadurch, daß
- grundsätzlich untersucht werden muß, welche Stoffe im Brandfalle gebildet werden können und wie ihre Gefährlichkeit für Mensch und Umwelt einzuschätzen ist [29].

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 zusammenfassend: "Wir sollten mehr darüber wissen, welche Art der Brandbekämpfung jeweils den größten Erfolg verspricht" [29].

Der Forschungsauftrag "Untersuchung der Löschverfahren und Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden gefährlicher Güter" verfolgt das Ziel,

1. an Hand von Brandversuchen zu ermitteln, welche feuerwehrelevanten 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 hierüber kann von ausschlaggebender Wichtigkeit für die Effizienz der Brandbekämpfung und für den Schutz von Mensch und Umwelt sein. Für die Stoffe, für die Wasser als Löschmittel weniger geeignet bis gefährlich ist, ist also zu untersuchen, welche anderen Mittel zum Löschen in Frage kommen. Kriterien für die Anwendbarkeit eines Alternativ-Löschmittels müssen seine Wirksamkeit beim Eindämmen des Brandes und die Umweltverträglichkeit möglicher Reaktionsprodukte von Brandgut und Löschmittel sein.

Im ersten Bericht über diesen Forschungsauftrag [38] wurde begonnen - ausgehend von den im Anhang II der 12. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [39] genannten Chemikalien - die Stoffe aufzulisten, die nach Angaben in der einschlägigen Literatur nicht mit Wasser gelöscht werden dürfen. In einer synoptischen Darstellung wurden die sechs wichtigsten Kennzeichnungssysteme auf diese Stoffe angewandt. Es stehen jeweils

- die UN-Gefahrenklasse [2],
- der Code der National Fire Protection Association [3],
- der Hazchem-Code der Londoner Feuerwehr [7],

- die Arbeitsplatzkennzeichnung nach den berufsgenossenschaftlichen Unfallverhütungsvorschriften [8],
- die Kemler-Zahl [4, 5] (in Deutschland offiziell: Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr) und
- die Risiko- und Sicherheitssätze der Gefahrstoffverordnung [6]

nebeneinander. Wo sich Widersprüche ergeben (z. B. W im Gefahrendiamant bei Hommel [10] jedoch kein X in der Kemler-Zahl), wird die in der Forschungsstelle für Brandschutztechnik, im Engler-Bunte-Institut und in der Fachbibliothek Chemie der Universität Karlsruhe vorhandene Fachliteratur zu Rate gezogen. Mit ihrer Hilfe wird geprüft, welche anderen Löschmittel empfohlen werden können. Im folgenden Forschungsbericht [40] wurde diese Zusammenstellung fortgesetzt. Sie bedarf weiterhin der Fortschreibung und Vervollständigung.

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. Zur Analyse der bei Leckagen und bei Bränden gefährlicher Güter entstehenden Zersetzungs- und Verbrennungsprodukte wurde in der Fachliteratur eine moderne Gerätekombination aus Gaschromatograph (GC) und Massenspektrometer (MS) besprochen und als ideales Analysegerät für die Feuerwehr dargestellt [41]. Im Rahmen des Forschungsauftrages Nr. 129 (4/89) wurde ein solches Gerät in der Forschungsstelle für Brandschutztechnik aufgestellt um - neben der Fortführung der Literaturstudie - zu prüfen, ob es der zitierten Beschreibung entspricht und die dort geweckten Erwartungen erfüllt. Da die Feuerwehren in zunehmendem Maße auf analytische Methoden zur Bestimmung der bei Bränden mit gefährlichen Gütern auftretenden Stoffe und Stoffgemische zurückgreifen müssen, erwarten sie, daß die Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten eines derartigen Analysegerätes für den Einsatzfall von großer Bedeutung sein wird.

Im Forschungsbericht Nr. 81 [42] wurde die Funktion des Meßgerätes und sein Einsatz bei der Auswertung verschiedener Brandversuche beschrieben, die zum Teil im Labor, zum Teil in der Brandversuchshalle durchgeführt wurden. Der für die Gewinnung

brauchbarer Analyseergebnisse notwendige Zeitaufwand wurde untersucht und in die Bewertung der Einsatzreife dieses Analyseverfahrens einbezogen. Die Identifizierung der einzelnen Substanzen im Rauchgas erfolgt an Hand ihrer Retentionszeiten im Gaschromatographen (zwischen 3 Minuten und 20 Minuten) und durch den Vergleich ihrer Massenspektren mit bekannten Werten in einer elektronischen Bibliothek, die – möglicherweise durch diese Messungen – zu erweitern und auf gefährliche Verbrennungsprodukte zu spezialisieren ist.

Die GC/MS-Analyse mit Hilfe des Ion Trap Detectors™, ist ein hochsensibles Verfahren zum Nachweis organischer und anorganischer gasförmiger Substanzen. Die Fähigkeit, selbst bei Substanzmengen im pg-Bereich durch Ansammlung und Speicherung der ionisierten Moleküle und Molekülfragmente noch vollständige und aussagefähige Massenspektren zu liefern, ermöglicht es, auch Verbindungen aufzuspüren und zu identifizieren, die von vorne herein gar nicht zu erwarten sind. Bei jenen Komponenten des Gasgemisches, die ein hochcharakteristisches Massenspektrum liefern, ist häufig eine sichere Identifizierung möglich, indem innerhalb weniger Sekunden nach der gaschromatographischen Trennung der Gemischkomponenten ein Vergleich zwischen den gemessenen Massenspektren und den über 42.000 Referenzspektren der Massenspektren-Bibliothek des National Institute for Standards and Technology (NIST) in Washington, D.C. [43] durchgeführt werden kann. Als Ergebnisse der GC/MS-Analysen werden die von den Gasgemischen aufgenommenen Chromatogramme und die Zusammenstellungen der Einzelstoffe wiedergegeben, die mit Hilfe dieser MS-Bibliothek erstellt wurden.

Diese Arbeit hat auch zum Ziel, die in den bislang vorhandenen Bibliotheken enthaltenen Mängel zu eliminieren und eine Sammlung von Massenspektren zu erstellen, die auf die Bedürfnisse der Feuerwehr zugeschnitten wird, indem sie die Analyse von schwerflüchtigen Rauchgasbestandteilen wie beispielsweise Dioxin [44, 45] zurückstellt und sich stattdessen auf Substanzen konzentriert, die für die Einsatzkräfte eine besondere Gefährdung darstellen: Benzo[a]pyren, Acrolein, Phosgen, Chlor, Schwefeldioxid, Fluorwasserstoff, Benzol, Chlorwasserstoff, Stickstoffdioxid, Blausäure, Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Kohlenmonoxid, Toluol,... Mit einer solchermaßen aktualisierten Referenzbibliothek

könnte das Analysesystem in die Lage versetzt werden, in kurzer Zeit verlässliche Ergebnisse zu liefern – ebenso wie der bei der Bundeswehr eingesetzte Spürpanzer "Fuchs", der statt auf Gefahrstoffe in Rauchgasen auf chemische Kampfstoffe spezialisiert ist [46].

Wenn darüberhinaus die Handhabung des Analysegerät ähnlich wie im Kampfstoffspürpanzer automatisiert wird, könnte es sicherlich auch im Feuerwehreinsatz wertvolle Dienste leisten, weil es beispielsweise wegen seiner außerordentlich hohen Empfindlichkeit in der Lage wäre, auf den bevorstehenden Bruch eines Gefahrstoffbehälters schon aufmerksam zu machen, wenn durch Risse erste Spuren des Inhalts ins Freie treten. Die Empfindlichkeit des Meßgerätes kann durch Anreicherung auf Adsorptionsröhrchen und anschließende thermische Desorption so weit gesteigert werden, daß es möglich wird, die Messung aus sicherer Distanz durchzuführen, ohne Personen zu gefährden. Zusammen mit der Mobilität, die sich durch den Einbau des Gerätes in ein eigenes Fahrzeug erzielen läßt, kann so kostbare Zeit gewonnen werden, die sonst für den Transport der Probe vom Entnahmeort zum Analysegerät aufgewendet werden müßte.

Nach der Auswertung der Fachliteratur ist vorgesehen, die chemischen Reaktionen in Gefahrgutbränden beim Löschen mit Wasser beziehungsweise mit einem Alternativ-Löschmittel zu untersuchen. Wobei die Untersuchung von jenen Gefahrstoffen aus der Störfallverordnung, bei denen zu befürchten steht, daß sie bei Verbrennungs- und Löschversuchen die Brandversuchshalle und die Rauchgasreinigungsanlage in unzulässigem Maße kontaminieren, bis zur Einrichtung eines speziellen Gefahrstoff-Labors zurückgestellt wird. Zuerst kommen einige exemplarische Stoffe aus der 1000-Jahres-tonnen-Liste des Verbandes der Chemischen Industrie [47] zum Einsatz, um sie mit unterschiedlichen Luftzahlen (Schwelbrand, stöchiometrische Verbrennung, Verbrennung mit Luftüberschuß) zu verbrennen und zu löschen. Der Schwerpunkt des Forschungsauftrages wird später bei der Untersuchung von Stoffen liegen (z.B. Pflanzenschutzmittel), die in großen Mengen transportiert und gelagert werden und die die Praxis des Feuerwehralltags bestimmen. Sie sollen ebenfalls mit unterschiedlichen Luftverhältnissen verbrannt und mit unterschiedlichen Löschmitteln gelöscht werden, um aus der Analyse

der Reaktionsprodukte die Auswirkungen eines realen Einsatzes auf die Einsatzkräfte und Umwelt abschätzen zu können.

Ein Versuchsstand wird vorgestellt, in dem Probenmengen im kg-Bereich verbrannt und gelöscht und die Verbrennungs- und die Reaktionsprodukte mit dem Löschmittel analysiert werden können. – Da ein wesentlicher Teil des Gefahrenpotentials der gefährlichen Stoffe darin besteht, daß sie, wenn im Brandfall Wasser als Löschmittel verwendet wird, die Gewässer in der Umgebung kontaminieren können, wird bei diesen Versuchen das anfallende Löschwasser aufgefangen, um es einer pH-Wert-Messung und einer Voll-Analyse durch ein Fachinstitut (möglicherweise der Bereich Wasserchemie des Engler-Bunte-Institutes der Universität Karlsruhe) zu unterziehen. Es soll untersucht werden, welchen zeitlichen Aufwand eine solche Analyse des Löschwassers erfordert, und wie aussagekräftig im Vergleich zur Voll-Analyse die Messung lediglich des pH-Wertes ist.

2. VERSUCHSAUFBAU

Die ersten Verbrennungs- und Analyse-Versuche im Rahmen des vorangegangenen Forschungsauftrages [42] wurden teils im Labormaßstab (Tiegel), teils im Realmaßstab (Standard-Versuchsstand [48] in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik) durchgeführt. Sie dienten der Untersuchung der Einsatzmöglichkeit des GC/MS-Gerätes bei der Analyse von Rauchgasen. Daran anschließend sollen nun die Reaktionsprodukte bei unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen und beim Löschen analysiert werden.

Schon auf dem Frankfurter VCI-Symposium [21] war die Notwendigkeit von Rauchgasanalysen betont worden und auf eine vom Verband selbst entwickelte Apparatur hingewiesen worden, mit der Substanzen unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen bezüglich Temperatur, Sauerstoffangebot und Verweilzeit verbrannt und die ent-

stehenden Brandgase analytisch erfaßt werden können. Die Variation der Verbrennungsbedingungen erlaubt es, ein Gesamtbild der bei einem realen Brand möglicherweise entstehenden Stoffe zu erhalten [49]. Diese Verbrennungsapparatur war unter besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse für die analytische Probenahme konzipiert worden. Vergleichende Analysen hatten zu gut übereinstimmenden Ergebnissen geführt. Die Dimensionen dieses Gerätes prädestinieren es für die Feinanalyse im Labor, um unter exakt regulierbaren Randbedingungen Probenmengen im mg-Bereich zu untersuchen.

Um die Verbrennungs- und Löschvorgänge auch in einem größeren Maßstab, mit Substanzmengen im kg-Bereich, reproduzierbar gestalten zu können, wurde in der Werkstatt der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ein Versuchsstand (Bild 1) entwickelt, der in der Größenordnung zwischen den beiden bislang hier verwendeten Versuchsanordnungen anzusiedeln ist:

Ein Stahlprofilgerüst, das mit einem Gabelstapler transportiert werden kann, trägt einen allseits umschlossenen Verbrennungsraum von etwa 1 m^3 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, die an dem Rost haften, ohne Schwierigkeiten entfernen zu können. Dies vereinfacht nicht nur die nach jedem Versuch erforderliche Reinigung des Versuchsstandes, weil die Rauchgasanalysen sonst verfälscht würden, es erleichtert auch das Wägen des nach dem Löschen verbleibenden Restes der Brandlast.

Unter dem Gitterrost befindet sich ein Schubkasten, um die Asche und/oder die Brandlastbruchstücke/tropfen, die durch den Rost fallen, aufzufangen. Das zum Löschen verwendete Wasser wird ebenfalls in diesem Kasten gesammelt, damit es analysiert und einer kontrollierten Entsorgung zugeführt werden kann. Seine Oberkante trägt eine Dichtung aus 8 mm starkem Moosgummi, welches den hier herrschenden Temperaturen standhält. Mit vier Stellschrauben kann sie gegen den den Rost umgebenden Flansch gepreßt werden, um den Versuchsraum gegen die Umgebung abzuschotten.

In der Schubkastenmitte 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. Die Luftversorgung besteht aus einer Rohrleitung mit der Nennweite 130 mm, in der, wie in Bild 2 skizziert, ein passender Lüfter und nach dem Rohrkrümmer eine Drosselklappe installiert sind. Bei vollkommen geöffneter Drosselklappe fördert der Rohrlüfter in dieser Anordnung einen Maximalvolumenstrom von $163 \text{ m}^3/\text{h}$. Über den Winkel α der Klappenstellung läßt sich der Volumenstrom bis auf etwa 12 % des Maximalwertes reduzieren.

Bild 3 zeigt die Abhängigkeit des Luftvolumenstromes von der Stellung der Drosselklappe. Mit einem PRANDTL-Rohr wurde der Staudruck Δp im Luftstrom

$$\Delta p = p_{ges} - p_{stat} = p_{dyn} \quad (1)$$

gemessen und mit Hilfe der BERNOULLI-Gleichung (2) für eine stationäre, inkompressible Horizontalströmung

$$p_{stat} + \frac{1}{2} \rho v^2 = const. \quad (2)$$

daraus die Geschwindigkeit v des Luftstromes und über den Strömungsquerschnitt F der Volumenstrom \dot{V} berechnet:

$$\dot{V} = F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

Die Meßstelle für den Staudruck befand sich in ausreichender Entfernung vom Strömungseinlauf und in einem Abstand r_M von der Strömungsmittelachse, an dem ein der Durchschnittsgeschwindigkeit entsprechender Wert gemessen werden kann [50]. Geringe Auslenkungen der Drosselklappe aus der Strömungsrichtung beeinflussen den Luftvolumenstrom noch nicht. Etwa ab $\alpha \geq 20^\circ$ zeigt die Volumenstrom/Klappenstellungsfunktion einen hyperbolischen Verlauf, der durch Gleichung (4) angenähert werden kann:

$$\dot{V} = 1090 \cdot \alpha^{-0,2} - 440 \quad [m^3/h] \quad (4)$$

Die entsprechende Kurve ist in Bild 3 gestrichelt eingezeichnet.

Der Versuchsraum selbst besteht aus einem aus Stahlprofilen geschweißten Rahmen, in den 1 m² große Blechtafeln eingietet wurden. Die Fugen zwischen den Blechtafeln und den Rahmenprofilen wurden von außen mit Silicondichtungsmasse ausgefüllt. Die Bleche sind zur Erhöhung der Steifigkeit mit Sicken versehen. In die Vorderwand ist eine 50 cm · 50 cm große Öffnung eingeschnitten, die mit einem bis 700 °C wärmebeständigen Fenster aus Neoceram verschlossen werden kann. Das Blech ist an dieser Stelle durch einen Rahmen verstärkt. Die Dichtung zwischen diesem Rahmen und dem Fensterrahmen besteht aus einem 5 cm breiten Streifen Mineralwolle. Unterhalb des Fensters befindet sich 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 die rechte Seitenwand eine Beleuchtung eingelassen. Unterhalb dieser Beleuchtung befindet sich auf halber Höhe der Durchlaß für das Löschrohr, welches an seinem vorderen Ende eine Vollkegeldüse mit 90°-Sprühkegel und einem Bohrungsdurchmesser von 2,85 mm trägt. Diese Düse gestattet bei einem Wasserdruck von 2 bar einen Volumenstrom von 6,3 l Wasser pro Minute. Am Anschluß des Wasserzulaufs befindet sich ein Absperrhahn und eine Wasseruhr, um die eingesetzte Löschwassermenge zu bestimmen. In der gegenüberliegenden Seitenwand sind Durchführungen für die Rauchgasentnahme angebracht, eine in der Wandmitte (Probenahmestelle 2) und je eine 20 cm darunter (Probenahmestelle 1) und 20 cm darüber (Probenahmestelle 3). Die nicht benutzten Probenahmestellen können mit Überwurfmutter verschlossen werden. Nach oben ist der Versuchsraum durch eine Haube mit trapezförmigem Querschnitt 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 Gasanalysatoren installiert (Probenahmestelle 4).

Die kontinuierliche Rauchgasanalyse besteht aus der Meßgas-Aufbereitungskette, den Meßgeräten und dem Rechner zur Speicherung und Auswertung der Meßwerte. Zur

Meßgas-Aufbereitungskette (Bild 4 [51]) zählen die Entnahmesonde, ein Filter, das den Ruß und die Feuchtigkeit aus dem Gas entfernt, die Leitung zum Meßgeräteschrank, ein Gaskühler mit automatischem Kondensat-Ablauf, eine Membranpumpe zur Förderung des Meßgases, ein weiteres Filter und ein Strömungsmesser mit Nadelventil, mit dem der Gasvolumenstrom durch die Meßgeräte eingestellt wird. Um die Analysengeräte eichen zu können, befindet sich vor der Pumpe ein Mehrwege-Hahn, mit dem die entsprechenden Eichgase aufgeschaltet werden können.

Für die Messung des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas wird ein Magnos-Gerät der Firma Hartmann & Braun AG verwendet, der Kohlenmonoxid- und der -dioxidgehalt werden mit einem 2-Kanal-Binos-Gerät der Firma Leybold-Heraeus GmbH gemessen.

- Der MAGNOS 7 G ist ein kontinuierlich arbeitendes Meßgerät, das wegen seiner durch Glaskapillaren gegen Korrosion geschützten Heiz- und Meßdrähte besonders geeignet ist, den Sauerstoffanteil in Verbrennungsabgasen zu bestimmen. Sein Meßprinzip basiert auf dem paramagnetischen Verhalten des Sauerstoffs und auf der Temperaturabhängigkeit seiner molaren Suszeptibilität [51]. Der Gesamtbereich von 0 % bis 100 % O₂ wird erfaßt, er kann in bis zu drei Meßbereiche unterteilt werden.
- Der BINOS I ist ein hochselektives, nicht dispersives Infrarot-Photometer zur kontinuierlichen quantitativen Bestimmung von Gaskomponenten, die Absorptionsbanden im kurz- bis mittelwelligen Infrarotbereich besitzen [52]. Die Meßbereiche sind bei CO auf maximal 2 % und bei CO₂ auf maximal 20 % eingestellt.

Die Meßwerte dieser beiden Instrumente und die des Thermoelements im Abgasstrom passieren jeweils Analog/Digital-Wandler, bevor sie der Datenerfassung und -auswertung zugeleitet werden.

Der Versuchsaufbau sieht üblicherweise eine quadratische Zündwanne (30 cm · 30 cm, 3 cm hoch) vor, die in der Mitte des Versuchsraumes auf den herausnehmbaren Teil des Gitterrostes plaziert wird. Auf drei parallel angeordneten Vierkantprofilen (St37, 30 mm · 30 mm · 1,5 mm, 26 cm lang) wird in dieser Wanne dann die eigentliche Brandlast

aufgeschichtet – in Krippenform mit 5 bzw. 6 Stäben des zu untersuchenden Materials (Querschnitt: 2 cm · 2 cm, Länge: 26 cm) parallel und äquidistant in jeder Lage, 6 bis 10 Lagen übereinander, wobei die Orientierung der Stäbe von Lage zu Lage jeweils um 90° versetzt wird. Wenn die Materialstärke der Probe zu gering ist, werden Leisten geschnitten und aufeinandergelegt, um diesen Maßen nahezukommen.

Die erste Reihe von Brand- und Löschversuchen in dem neuen Versuchsstand wurde mit dem Maximalvolumenstrom bei vollständig geöffneter Drosselklappe in der Luftversorgung durchgeführt, so daß bei fast allen Versuchen überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen herrschten. Die Brandgasproben wurden auf Mehrbett-Adsorptionsröhrchen, Typ Supelco Carbotrap™ 400 gezogen, die sowohl leicht- als auch schwerflüchtige Substanzen adsorbieren, bei 300 °C thermisch desorbiert, in einer Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (stationäre Phase OV-1, Filmstärke $\delta = 0,4 \mu\text{m}$, Länge $\ell = 50 \text{ m}$, Innendurchmesser $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$) getrennt, im Massendetektor ionisiert und analysiert und mit Hilfe der Massenspektren-Bibliothek des National Institute for Standards and Technology (NIST) [43] identifiziert.

3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

3.1 Unbehandeltes Fichtenholz

Als Vorversuch, um die Funktionsfähigkeit der Versuchseinrichtung zu testen, wurde aus 2,56 kg Fichtenholz eine Krippe mit acht Lagen zu je sechs Stäben (2 cm · 2 cm · 26 cm) errichtet und mit zwei in 250 ml Spiritus getränkten Weichholzfaserstreifen (1 cm · 1,5 cm · 20 cm) entzündet. Derartige Holzrippen dienen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik in vielerlei Versuchen als Brandlast. Es bot sich deshalb an, sie auch hier einzusetzen um zu prüfen, ob der neue Versuchsstand den während der Versuchsdurchführung auftretenden Wärmebelastungen standhält. Dies galt besonders für die

verwendeten Dichtungsmaterialien. Darüberhinaus war zu prüfen, ob die Anordnung und Neigung der Durchführungen für die Zündfackel, die Gasentnahmesonde und die Lösch-einrichtung den Erfordernissen des Versuchsbetriebes entsprechen. Da vorgesehen war, bei späteren Versuchen mit anderen Materialien Fichtenholz für ein möglicherweise erforderliches Stützfeuer zu verwenden, diente dieser Versuch auch dazu, die Chromato-gramm-Peaks zu identifizieren, die vom Stützfeuer und nicht vom eigentlichen Test-material verursacht werden. Weil zu der Zeit, als dieser Vorversuch durchgeführt wurde, das hitzebeständige Fenster noch nicht geliefert worden war, wurde auf die Zuschaltung des Gebläses verzichtet, so daß eine Stöchiometrieabschätzung nicht angestellt werden konnte. Da der Sauerstoffbedarf des Zünd- oder Stützfeuers jedoch in späteren Stöchio-metrierechnungen berücksichtigt werden muß, soll er an dieser Stelle vorab schon ermittelt werden:

Unter der Annahme [53...55], daß luftgetrocknetes Holz zu

17 % aus Wasser,

41 % aus Kohlenstoff,

5 % aus Wasserstoff,

36,5 % aus Sauerstoff und zu

0,5 % aus unverbrennbaren Mineralstoffen

besteht, werden zur stöchiometrischen Verbrennung von 1 kg Holz,

das heißt von $410 \text{ g C} + 50 \text{ g H}_2 + 365 \text{ g O}_2$ (5)

beziehungsweise von $34,17 \text{ mol C} + 25 \text{ mol H}_2 + 11,41 \text{ mol O}_2$ (6)

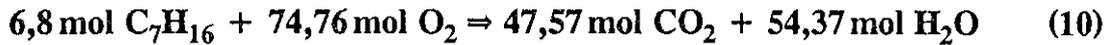
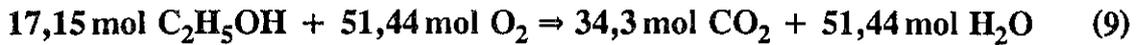
zu $34,17 \text{ mol CO}_2 + 25 \text{ mol H}_2\text{O}$ (7)

zusätzlich zu dem im Holz enthaltenen Sauerstoff noch

$$(34,17 + 25/2 - 11,41 = 35,26) \text{ mol O}_2 \approx 790 \text{ l O}_2 \approx 3,76 \text{ m}^3 \text{ Luft} \quad (8)$$

im Normzustand (0 °C, 101,3 kPa) benötigt. Unter den Bedingungen in der Versuchshalle (20 °C, gleicher Druck) entspricht dies einem Luftvolumen von 4,04 m³. – Zur stöchio-metrischen Verbrennung der weiteren für das Zünd- oder Stützfeuer verwendeten Brenn-stoffe Spiritus oder Heptan wären unter denselben Bedingungen pro Liter 5,89 m³ Luft

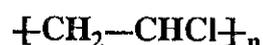
(51,44 mol O₂, Gleichung 9) beziehungsweise 8,56 m³ Luft (74,76 mol O₂, Gleichung 10) erforderlich:



Nach einer Branddauer von 9½ Minuten wurde das Feuer mit der eingebauten Lösch-einrichtung gelöscht und es zeigte sich, daß der Versuchsstand den Erfordernissen gerecht wird. Die Probenahme, von ausschlaggebender Bedeutung für das Ergebnis jeder Analyse, konnte hinsichtlich Ort, Menge und Methode verbessert werden. Die Prüf-röhrchen-Handpumpe wurde durch eine elektrisch betriebene Meßgaspume ersetzt. Es ist nun möglich, gleichzeitig an verschiedenen Probenahmestellen Brandgase in aus-reichender Menge auf Adsorptionsröhrchen zu ziehen.

Die nach 7 Minuten und nach 9½ Minuten an der Probenahmestelle 4 (siehe Bild 1) gezogenen Brandgasproben wurden mit dem GC/MS-System analysiert. Die Bilder 5a und 6a zeigen die von diesen Gasproben aufgenommenen Chromatogramme. Die Peaks der einzelnen Gemischkomponenten sind, chronologisch numeriert, über der in Echtzeit bemaßten Abszisse aufgetragen. Die Bilder 5b und 6b enthalten die Zusammenstellungen aller Substanzen, die mit der vorhandenen MS-Bibliothek identifiziert werden konnten. Die erste Spalte wiederholt die Peaknumerierung aus den Bildern 5a und 6a, die zweite enthält die für die jeweilige Substanz unter diesen Analysebedingungen charakteristische Retentionszeit, die dritte den Namen des Stoffes, dessen Bibliotheks-Massenspektrum mit dem gemessenen am besten übereinstimmt.

3.2 Polyvinylchlorid-Hartschaum (PVC)



3.2.1 Versuch 1

Das Probenmaterial PVC-Hartschaum Forex[®] 12.450 ist ein freigeschäumter, extrudierter Thermoplast mit geringem spezifischen Gewicht, guter Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit und hoher Brandresistenz. Eingesetzt wird dieses Produkt unter anderem als Isoliermaterial für Kühlräume, im Messe- und im Innenausbau und als Halbzeug zur Herstellung von Schildern und Tiefziehteilen [56]. Es wurde als 10 mm starke Platte geliefert, die zu Streifen von 2 cm · 20 cm zersägt wurde.

Weil Forex[®] 12.450 nicht in Brand gesetzt werden konnte, es verkohlte lediglich, war zur Durchführung dieses Brandversuchs ein Stützfeuer erforderlich. Verwendet wurden 1,02 kg unbehandelten Fichtenholzes in 2 cm · 2 cm · 20 cm großen Stäben, die zusammen mit 0,67 kg PVC-Stäben gleicher Größe zu einer Krippe aufgebaut wurden. Die beiden unteren Lagen bestanden jeweils aus fünf Fichtenholzstäben, die folgenden sechs Lagen enthielten abwechselnd drei PVC- und zwei Holzstäbe oder umgekehrt drei Holz- und zwei PVC-Stäbe. Bei geschlossenem Beobachtungsfenster wurden mit einer Gasfackel vier in 100 ml Spiritus getränkte Weichholzfaserstreifen (1 cm · 1,5 cm · 20 cm) gezündet, die in der untersten Lage zwischen den Fichtenholzstäben angeordnet waren.

Bei vollkommen geöffneter Drosselklappe wurde der Rohrlüfter eingeschaltet und nach einer Branddauer von 2½ Minuten an der Probenahmestelle 2 (siehe Bild 1) Rauchgas auf ein Tenax[®]-Adsorptionsröhrchen des Arbeitsbereiches Meßtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) gezogen. Im Rahmen des BMFT-Projektes "Schnellanalyse bei Chemieunfällen und Bränden mit dem mobilen GC/MS-System" sollen dort mit Hilfe einer bundesweiten Meßaktion Probenahmegeräte und Analyseverfahren praxisnah entwickelt werden [57]. Weitere Adsorptionsröhrchen der TUHH wurden nach 6 Minuten beziehungsweise nach 9 Minuten beladen, das letztere zu Beginn des Löschvorganges. Diese Sammelröhrchen wurden zur Analyse nach Hamburg an die

TUHH geschickt. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in den Bildern 7a bis 9b dargestellt.

Als Adsorbens enthalten die Sammelröhrchen der TUHH üblicherweise Tenax[®] – mit Ausnahme des Röhrchens, dessen Analyse in Bild 8 dargestellt ist. Dieses enthielt zusätzlich Aktivkohle. In einem solchen multi-trap-Röhrchen wird im Vergleich zu einem einfachen Tenax[®]-Röhrchen mehr Wasser adsorbiert, wodurch sich bei der thermischen Desorption die Injektion auf die GC-Kapillare verändert. Die Retentionszeiten werden vergrößert und die Peaks der einzelnen Substanzen erscheinen im Vergleich zu den anderen an der TUHH gefertigten Chromatogrammen mit einem Zeitversatz über der Abszisse [58].

Parallel hierzu wurden an der Probenahmestelle 1 ebenfalls nach einer Branddauer von 6 Minuten und 9 Minuten Brandgasproben auf Carbotrap[™]-400-Adsorptionsröhrchen gezogen. Nach thermischer Desorption wurden sie im GC/MS-System analysiert. Die Chromatogramme sind in den Bildern 10a und 11a die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 10b und 11b dargestellt.

Die Brandrückstände nach dem Versuch bestanden im wesentlichen aus nicht verbranntem PVC-Hartschaum – vermischt mit der Asche des Fichtenholzes. Der während des Versuches eingetretene Massenverlust an Probenmaterial konnte deshalb nur grob geschätzt werden: $\approx 70 \text{ g} \approx 1,1 \text{ mol C}_2\text{H}_3\text{Cl}$. Bei stöchiometrischer Verbrennungsreaktion



würde er einem Sauerstoffbedarf von 2,8 mol entsprechen, etwa $0,3 \text{ m}^3$ Luft unter den Bedingungen in der Versuchshalle. Das Zünd- und Stützfeuer aus 1.024 g Fichtenholz, 30 g Weichholzfaser und 100 ml Spiritus braucht nach Gleichung (8) beziehungsweise (9) weitere $4,8 \text{ m}^3$ Luft.

Der Verlauf der Sauerstoff-, der CO- und der CO₂-Konzentrationen im Rauchgas und der Temperaturverlauf an der Probenahmestelle 4 ist in Bild 12 dargestellt. Danach

können für die Branddauer etwa 8½ Minuten angesetzt werden. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätte also ein Mindestluftvolumenstrom \dot{L}_{min} von 36,5 m³/h gefördert werden müssen, was einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 63^\circ$ gegen die Strömungsmittelachse entsprechen würde. Tatsächlich war die Drosselklappe vollständig geöffnet, der Maximalvolumenstrom \dot{L}_{wirkl} wurde gefördert und die Luftzahl

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{wirkl}}{\dot{L}_{min}} = \frac{163}{36,5} > 1 \quad (12)$$

kennzeichnet eine Verbrennung mit deutlichem Luftüberangebot.

Der pH-Wert des Löschwassers wurde mit einer Glaselektrode nach DIN 19 261 gemessen. Er betrug vor dem Löschen 7,87 und danach 2,95. Zum Vergleich: Ein pH-Wert von 3,0 entspricht einer Salzsäure-Lösung von 1 mol/m³ [53].

3.2.2 Versuch 2

Versuch 2 stellt die Wiederholung von Versuch 1 mit einer etwas geringeren Probenmenge (0,52 kg PVC und 1,15 kg Holz) dar. Die vier in Spiritus getränkten Weichholzfaserstreifen unter der Krippe wurden wieder mit der Gasfackel gezündet, die Drosselklappe geöffnet und der Rohrlüfter eingeschaltet. Nach einer Branddauer von 1½ Minuten, 5 Minuten und 7¼ Minuten (Löschbeginn) wurden an der Probenahmestelle 1 Brandgase auf Carbotrap[™]-400-Adsorptionsröhrchen gezogen, thermisch desorbiert und im GC/MS-System analysiert. Die Chromatogramme sind in den Bildern 13a bis 15a, die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 13b bis 15b dargestellt.

Der verbrannte Anteil des Probenmaterials ($\approx 55 \text{ g} \approx 0,9 \text{ mol C}_2\text{H}_3\text{Cl}$) konnte auch hier nur näherungsweise bestimmt werden, weil er mit der Asche des Stützfeuers vermengt war. Bei stöchiometrischer Reaktion entsprechend Gleichung (11) würde er 2,2 mol O₂ benötigen, was unter den Bedingungen in der Versuchshalle 0,25 m³ Luft entspricht. Das

Zünd- und Stützfeuer aus 1.148 g Fichtenholz, 30 g Weichholzfaser und 100 ml Spiritus braucht nach Gleichung (8) beziehungsweise (9) weitere 5,35 m³ Luft.

Der Brand dauerte etwa 7½ Minuten. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätten also 44,8 m³/h gefördert werden müssen, was einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 57^\circ$ gegen die Strömungsmittelachse entsprechen würde. Tatsächlich war die Drosselklappe vollständig geöffnet, der Maximalvolumenstrom wurde gefördert und mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{163}{44,8} > 1 \quad (13)$$

bestand also auch in diesem Versuch ein deutliches Überangebot an Luft.

Der pH-Wert des Löschwassers betrug vor dem Löschen 7,84 und danach 2,12. Das entspricht einer Salzsäure-Lösung von etwa 7,5 mol/m³ [53].

3.3 Xylol

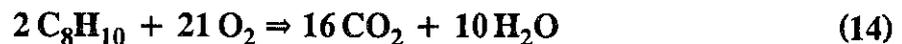


Technisches Xylol stellt ein Gemisch der drei Isomere o-Xylol, m-Xylol und p-Xylol dar, das in aller Regel nicht getrennt wird. Ein großer Teil des technischen Xylols dient in Ottokraftstoffen zur Erhöhung der Oktan-Zahl, weshalb Xylole eine gewisse Rolle als Luftverunreinigungs-komponenten spielen. Desweiteren wird Xylol als Lösungsmittel – häufig anstelle des giftigeren Benzols – für Natur- und Kunstharze, Fette, Wachse, Bitumen, Teer und bei der Herstellung von Lacken, Farben, Druckfarben, Klebstoffen, Bautenschutzmitteln, Insektiziden etc. verwendet [53].

In einer 30 cm · 30 cm · 3 cm großen Wanne wurden bei eingeschaltetem Rohrlüfter und offener Drosselklappe 630 ml der farblosen, aromatisch riechenden Flüssigkeit mit einer Gasfackel entzündet. Die Flüssigkeit brannte mit stark rußender Flamme. Nach ¼ Minute und während des Löschens mit Wasser nach 2¼ Minuten wurden an der Probenahmestelle 1 Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die Chromato-

gramme sind in den Bildern 16a und 17a, die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 16b und 17b dargestellt. Die Analysenergebnisse der an der Probenahmestelle 2 nach $\frac{1}{2}$ Minute, $1\frac{1}{4}$ Minuten und nach $2\frac{1}{4}$ Minuten für die TUHH gezogenen Proben zeigen die Bilder 18 a,b bis 20 a,b.

Der verbrannte Anteil des Probenmaterials von etwa 500 g $\approx 4,71$ mol C_8H_{10} benötigt bei stöchiometrischer Reaktion



49,45 mol O_2 , was unter den Bedingungen in der Versuchshalle $5,66$ m³ Luft entspricht.

Die Branddauer betrug etwa 2 Minuten. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätten also etwa 170 m³/h gefördert werden müssen – mehr als der Maximalvolumenstrom beträgt. Trotz vollständiger Öffnung der Drosselklappe herrschte bei diesem Versuch während der Verbrennung Luftmangel:

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{163}{170} < 1 \quad (15)$$

Der Luftmangel während der Verbrennung war am Verhalten der Flammen zu erkennen, da sie nicht aufrecht brannten wie die Flammen in den anderen Versuchen, sondern sich dem Sauerstoffstrom nach unten entgegenbogen. Die Verbrennung verlief nicht kontinuierlich, sondern quasi als Abfolge von Verpuffungen, die den Versuchsstand in Vibration versetzten.

Da Xylol in Wasser nicht löslich ist, war eine große Veränderung des pH-Wertes im Löschwasser nicht zu erwarten. Vor dem Brandversuch betrug der pH-Wert des Löschwassers 7,44, das nach dem Versuch aufgefangene Löschwasser hatte noch einen pH-Wert von 7,00.

3.4 Polyethylen (PE)



Das Probenmaterial Polyethylen Hostalen® ist ein hochmolekularer Thermoplast mit nur mäßiger mechanischer Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit, aber mit guter Chemikalienbeständigkeit und geringer Wasseraufnahme. Polyethylen ist unter allen Kunststoffen derjenige, von dem die größten Mengen produziert und verarbeitet werden [59]. Er dient als Rohmaterial für die Herstellung von Haushaltswaren und Spielzeug, von Rohrleitungen, Behältern, Dichtungen, Tiefziehteilen und anderem im chemischen Apparatebau [56]. Geliefert wurde es als 12 mm starke, stranggepreßte Platte, die zu Streifen von 2 cm · 26 cm zersägt wurde.

Die Streifen wurden in der Zündwanne auf drei parallel angeordneten Vierkantprofilen (St37, 30 mm · 30 mm · 1,5 mm, 26 cm lang) zu einer Krippe von 2,98 kg mit zehn Lagen zu je fünf Streifen aufeinandergesetzt. Wegen der schlechten Erfahrungen bei der Wägung der Brandrückstände wurde zur Zündung und als Stützfeuer kein Holz mehr verwendet, statt dessen wurden 500 ml Heptan in die Zündwanne gegeben. Bei eingeschaltetem Gebläse und geöffneter Drosselklappe wurde mit einer Gasfackel gezündet. Wegen seiner geringen Wärmeformbeständigkeit wurde das Probenmaterial schon nach einer Branddauer von etwa 5 Minuten sehr weich und die Krippe begann sich zu neigen, nach weiteren 4 Minuten kippte sie, brennendes Polyethylen tropfte in den Löschwasserauffangkasten des Versuchsstandes. Nach 9 Minuten wurde gelöscht. Das durch den Rost getropfte Polyethylen brannte noch etwa 5 Minuten weiter, da es mit der eingebauten Löscheinrichtung nicht direkt erreicht werden konnte.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 5½ Minuten und 9 Minuten, Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die Chromatogramme sind in den Bildern 21a und 22a, die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 21b und 22b dargestellt. Die Analysenergebnisse der für die TUHH nach 9¼ Minuten an der Probenahmestelle 2 gezogenen Probe zeigt Bild 23a,b.

Der verbrannte Anteil des Probenmaterials, etwa 1500 g \approx 107 mol CH₂, benötigt bei stöchiometrischer Reaktion



160 mol O₂, was unter den Bedingungen in der Versuchshalle 18,4 m³ Luft entspricht. Das Zünd- und Stützfeuer aus 500 ml Heptan braucht nach Gleichung (10) weitere 4,3 m³ Luft.

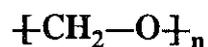
Der Brand dauerte etwa 9 Minuten. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätten also 151 m³/h gefördert werden müssen, was einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 21^\circ$ gegen die Mittelachse entsprechen würde, also nach Bild 3 dem nahezu unge-drosselten Maximalvolumenstrom, der bei vollständig geöffneter Drosselklappe tatsächlich gefördert wurde, so daß mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{163}{151} > 1 \quad (17)$$

nur noch knapp überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen herrschten.

Der pH-Wert des Löschwassers betrug vor dem Brandversuch 8,05 und danach 7,86.

3.5 Polyoxymethylen (POM)



Das Probenmaterial Sustarin[®] 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 wie beispielsweise Reißverschlüsse [53, 56, 59]. Geliefert wurde eine 11 mm starke, stranggepreßte Platte, aus der Streifen von 2 cm · 26 cm gesägt wurden.

Die Streifen wurden auf drei parallel angeordneten Vierkantprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 4,01 kg mit zehn Lagen zu je fünf Streifen aufeinandergesetzt, die für die Zündung und das Stützfeuer 500 ml Heptan enthielt. Bei offener Drosselklappe und eingeschalteter Zuluft wurde mit einer Gasfackel gezündet. Nach einer Branddauer von etwa 6 Minuten wurden die POM-Streifen weich und schmolzen brennend zu einer formlosen Masse.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 4 ¼ Minuten und bei Löschbeginn nach 8 Minuten Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die Chromatogramme sind in den Bildern 24a und 25a, die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 24b und 25b dargestellt. Bild 26a,b zeigt die Analyse der von der TUHH untersuchten Probe, die 5 Minuten nach Versuchsbeginn an der Probenahmestelle 2 gezogen worden war.

Der verbrannte Anteil des Probenmaterials (867 g = 29 mol CH₂O) benötigt bei stöchiometrischer Reaktion



29 mol O₂, was unter den Bedingungen in der Versuchshalle 3,3 m³ Luft entspricht. Das Zünd- und Stützfeuer aus 500 ml Heptan braucht nach Gleichung (10) weitere 4,3 m³ Luft.

Die Branddauer betrug etwa 7½ Minuten. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätten also 61 m³/h gefördert werden müssen, was einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 49^\circ$ gegen die Strömungsmittelachse entsprechen würde. Tatsächlich war die Drosselklappe vollständig geöffnet, der Maximalvolumenstrom wurde gefördert und mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{163}{61} > 1 \quad (19)$$

herrschte also ein deutlicher Luftüberschuß.

Der pH-Wert des Löschwassers betrug vor dem Brandversuch 8,05 und danach 7,78.

3.6 Polystyrol (PS)



Das Probenmaterial Polystyrol-schlagfest ist ein nur begrenzt licht- und witterungsbeständiger, zäher Thermoplast mit mäßiger Wärmeformbeständigkeit, doch guten dielektrischen Eigenschaften. Nach Polyethylen und Polyvinylchlorid ist Polystyrol gemessen an der Produktions- und an der Verarbeitungsmenge der dritt wichtigste Kunststoff [59]. In der Feinwerk-, Elektro- und in der Lichttechnik dient er als Halbzeug zur Fertigung von Schildern, Haushalts- und Toilettengeräten, Spielwaren, Stapelkästen, Leuchtenabdeckungen und Gehäusen für Rundfunkempfänger, Staubsauger, Küchenmaschinen, Schreibmaschinen und für viele andere Teile wie beispielsweise Steckdosen [53, 56]. Es wurde als 5 mm starke, extrudierte Platte geliefert, die zu Streifen von 2 cm · 26 cm zersägt wurde.

Je drei PS-Streifen wurden aufeinandergelegt und auf den Vierkantprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 2,88 kg mit sieben Lagen und fünf Reihen aufeinander gesetzt. Zur Zündung und als Stützfeuer enthielt die Zündwanne 500 ml Heptan. Bei offener Drosselklappe und eingeschalteter Zuluft wurde mit einer Gasfackel gezündet. Die PS-Streifen brannten sehr gut, die Temperatur im Kamin erreichte bereits nach etwa 3½ Minuten mehr als 650 °C, weshalb nach 4¼ Minuten der Brand gelöscht wurde.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 2 Minuten und bei Löschbeginn Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die Chromatogramme sind in den Bildern 27a und 28a, die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 27b und 28b dargestellt. Die von der TUHH angefertigte Analyse einer nach 4 Minuten an der Probenahmestelle 2 gezogenen Probe ist in Bild 29a,b enthalten.

Der verbrannte Anteil des Probenmaterials (399 g = 3,8 mol C₈H₈) benötigt bei stöchiometrischer Reaktion



38,3 mol O₂, was unter den Bedingungen in der Versuchshalle 4,4 m³ Luft entspricht. Das Zünd- und Stützfeuer aus 500 ml Heptan braucht nach Gleichung (10) weitere 4,3 m³ Luft.

Der Brand dauerte etwa 4 Minuten. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätten also 130 m³/h gefördert werden müssen, was einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 26^\circ$ gegen die Strömungsmittelachse entsprechen würde. Tatsächlich war die Drosselklappe vollständig geöffnet, der Maximalvolumenstrom wurde gefördert und mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{163}{130} > 1 \quad (21)$$

herrschte Luftüberschuß.

Der pH-Wert des Löschwassers betrug vor dem Brandversuch 8,05 und danach 7,84.

3.7 Polycarbonat (PC) $\text{[-O-C}_6\text{H}_4\text{-C(CH}_3\text{)}_2\text{-C}_6\text{H}_4\text{-O-C(=O)-]}_n$

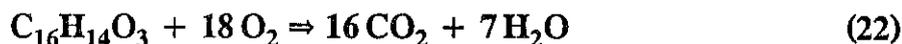
Das Probenmaterial Polycarbonat Makrolon[®] ist ein schwer entflammbarer, witterungsbeständiger und zäh-harter Thermoplast von hoher Härte, Schlagzähigkeit und Wärmeformbeständigkeit und mit guten elektrischen Isoliereigenschaften. Als klar durchsichtiges Halbzeug dient es in der Licht- und in der Elektrotechnik, in der Elektronik, im Bauwesen und im Fahrzeug- und Flugzeugbau zur Herstellung von Verglasungen, Lampen, Schildern, Schutzverkleidungen und Gehäusen von Haushalts-, Freizeit- und Bürogeräten, von Schutzhelmen, Schaltern, Steckern, Leiterplatten, CD-Informationsträgern und anderen Präzisionsteilen [53, 56, 59]. Es wurde als 8 mm starke, stranggepreßte Platte geliefert, die zu Streifen von 2 cm · 26 cm zersägt wurde.

Je zwei PC-Streifen wurden aufeinandergelegt und auf den Vierkantprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 2,97 kg mit sechs Lagen und fünf Reihen aufeinander gesetzt. Zur Zündung und als Stützfeuer dienten 500 ml Heptan. Bei offener Drossel-

klappe und eingeschalteter Zuluft wurde mit einer Gasfackel gezündet. Durch die Wärme des Stützfeuers schmolzen die PC-Streifen, brannten aber nicht. Das Stützfeuer erlosch nach etwa 5 Minuten.

An der Probenahmestelle 1 wurden nach 3¼ Minuten und nach 7 Minuten Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die Chromatogramme sind in den Bildern 30a und 31a, die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 30b und 31b dargestellt.

Der während des Versuches eingetretene Massenverlust des Probenmaterials von 11 g = 0,04 mol $C_{16}H_{14}O_3$ benötigt bei stöchiometrischer Reaktion



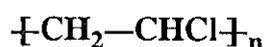
0,8 mol O_2 , was unter Versuchsbedingungen 0,1 m³ Luft entspricht. Das Zünd- und Stützfeuer aus 500 ml Heptan braucht nach Gleichung (10) weitere 4,3 m³ Luft.

Der Brand dauerte etwa 5 Minuten. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätten also 52,4 m³/h gefördert werden müssen, was einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 53^\circ$ gegen die Strömungsmittelachse entsprechen würde. Tatsächlich war die Drosselklappe vollständig geöffnet, der Maximalvolumenstrom wurde gefördert und mit

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{163}{52,4} > 1 \quad (23)$$

bestand also ein deutliches Luftüberangebot.

3.8 Hart-Polyvinylchlorid (PVC)



Das Probenmaterial Hart-Polyvinylchlorid Trovidur[®] ist ein schwer entflammbarer, zähharter Thermoplast mit guter Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit. Im Bauwesen, im Maschinen- und im chemischen und lufttechnischen Apparatebau wird Trovidur[®] zur

Herstellung von Schildern, Rohrleitungen, Gehäusen, Fensterprofilen, Tiefziehteilen und vielen anderen Artikeln verwendet [56, 59]. Es wurde eine 23 mm starke, gepreßte Platte geliefert, aus der Streifen von 2 cm · 26 cm gesägt wurden.

Die Trovidur[®]-Streifen wurden auf den Vierkantprofilen in der Zündwanne zu einer Krippe von 4,66 kg mit sechs Lagen und fünf Reihen aufeinandergesetzt. Zur Zündung und als Stützfeuer dienten 500 ml Heptan. Bei offener Drosselklappe und eingeschalteter Zuluft wurde mit einer Gasfackel gezündet. Das Stützfeuer vermochte das Trovidur[®] nicht zu entzünden, seine Flammen verloschen nach etwa 6 Minuten. An der Probenahmestelle 1 wurden nach 4 Minuten, 6¼ Minuten und nach 8 Minuten Brandgasproben auf Adsorptionsröhrchen gezogen und analysiert. Die Chromatogramme sind in den Bildern 32a bis 34a, die mit der NIST-Bibliothek identifizierten Substanzen in den Bildern 32b bis 34b dargestellt.

Der verbrannte Anteil des Probenmaterials (489 g = 7,8 mol C₂H₃Cl) benötigt bei stöchiometrischer Reaktion nach Gleichung (11) 19,56 mol O₂, was unter den Bedingungen in der Versuchshalle 2,24 m³ Luft entspricht. Das Zünd- und Stützfeuer aus 500 ml Heptan braucht nach Gleichung (10) weitere 4,3 m³ Luft.

Die Branddauer betrug etwa 6 Minuten. Für den Fall einer stöchiometrischen Verbrennung hätten also 65,4 m³/h gefördert werden müssen, was einem Drosselklappenöffnungswinkel $\alpha = 47^\circ$ gegen die Strömungsmittelachse entsprechen würde. Tatsächlich war die Drosselklappe vollständig geöffnet und wegen der Förderung des Maximalvolumenstroms bestand ein deutliches Luftüberangebot:

$$\lambda = \frac{\dot{L}_{\text{wirkl}}}{\dot{L}_{\text{min}}} = \frac{163}{65,4} > 1 \quad (24)$$

4. VERSUCHSERGEBNISSE

In den folgenden Abschnitten wird kurz besprochen, welche Stoffe in den analysierten Rauchgasproben im wesentlichen gefunden wurden. Zum leichteren Vergleich der Ergebnisse der Analysen, die im Rahmen dieses Forschungsauftrages von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FfB) und von der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) durchgeführt wurden, sind in Tabelle 1 die detektierten Bestandteile aller untersuchten Gasproben zusammengestellt. Einige Unterschiede zwischen dem an der FfB und dem an der TUHH verwendeten Gerät wurden im vorausgegangenen Forschungsbericht [42] in Abschnitt 5.2 erläutert. Zu korrigieren ist jedoch, daß zwar am Ende der GC-Kapillare des Hamburger Gerätes in der Tat Unterdruck (≈ 700 mbar) herrscht, allerdings nicht der gleiche wie in der Ionisationskammer des Massenspektrometers. Die schattierten Spalten der Tabelle enthalten die Analyseergebnisse der TUHH, die hellen Spalten die der FfB. Die Reihenfolge der in dieser Tabelle zusammengestellten Substanzen wurde wieder nach dem im Forschungsbericht Nr. 81 [42] dargestellten Verfahren bestimmt.

4.1 Unbehandeltes Fichtenholz (Bilder 5 und 6)

Bei der Untersuchung des Brandrauches von unbehandeltem Fichtenholz wurden die Ringkohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Xylol und Styrol gefunden, sowohl während des Brandes als auch beim Löschen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Analysen scheint bei den leichten Komponenten zu bestehen, die wegen der im Forschungsbericht Nr. 81 in Abschnitt 5.3 dargelegten Gründe mit der verwendeten MS-Bibliothek nicht identifiziert werden können. In der während des Löschens gezogenen Probe ist der Toluolanteil im Vergleich zu der zuvor gezogenen zurückgegangen, der Benzolanteil hat dagegen zugenommen.

Da die charakteristischen Peaks im Chromatogramm nur eine geringe Intensität aufwiesen, wurde die Probenahme für die nachfolgenden Analysen von der Probenahmestelle 4 (siehe Bild 1) zur Probenahmestelle 1 verlegt.

4.2 PVC-Hartschaum (Bilder 7 bis 15)

Zusätzlich zu den auch schon beim Holz detektierten Ringkohlenwasserstoffen ist im Brandrauch von PVC-Hartschaum auch noch Ethinyl-Benzol anzutreffen. Vor dem Benzol eluieren einige gesättigte und ungesättigte chlorierte Kettenkohlenwasserstoffe. (Nicht in den FfB-Analysen 13 und 14 und nicht in den TUHH-Analysen.) Der Alkohol und die (chlorierte) Essigsäure gehören zu den Stoffen, die im Brandrauch organischer Materialien in geringer Konzentration enthalten sein können; speziell im Brandrauch von PVC können Aldehyde und Ketone auftreten [60]. Die Mehrzahl der Peaks mit einer Retentionszeit unter 300 sec, die das Bild der PVC-Chromatogramme bestimmen, und der nach Gleichung (11) zu erwartende Chlorwasserstoff können aus den zitierten Gründen mit dem verwendeten Analysegerät nicht erkannt werden. Das von der MS-Bibliothek an der FfB häufig detektierte Ethyl-Benzol fehlt in den Analysen der TUHH – hier und auch in allen folgenden Analysen.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den während des Brandes und den während des Löschens gezogenen Proben ist nicht auszumachen, weder beim ersten, noch beim zweiten Versuch und auch nicht bei den an der TUHH analysierten Proben.

Zwei Besonderheiten sind jedoch augenfällig: Neben der Analyse 11 gibt es nur noch eine weitere, in der so wenig Substanzen detektiert wurden wie in dieser. Es fehlen sogar die sonst immer nachgewiesenen Ringkohlenwasserstoffe Xylol, Styrol, Ethyl- und Ethinyl-Benzol. Dagegen wurden in keiner weiteren Analyse so viel verschiedene Komponenten identifiziert wie in der Analyse 14. Der größte Teil dieser Stoffe stimmt überein mit denjenigen, die entstehen, wenn PVC bei 600 °C im Heliumstrom pyrolysiert

wird [59]. Einige der komplexen, teilweise heterocyclischen Ringkohlenwasserstoffe wurden auch von der TUHH detektiert.

4.3 Xylol (Bilder 16 bis 20)

In der Analyse der Verbrennungsprodukte von Xylol finden sich ungesättigte Ketten- und Ringkohlenwasserstoffe und Benzol-Derivate, von denen die meisten in der während des Löschens gezogenen Probe nicht wiedergefunden werden. Diese Probe besteht im wesentlichen wieder aus Benzol, Toluol, Xylol und Styrol. Durch eine Überhitzung der mit Teflon ausgekleideten Probenahmesonde sind die Fluor-Verbindungen zu erklären, die nach 183 sec beziehungsweise nach 414 sec eluieren. In den folgenden Verbrennungs- und Löschversuchen wurden deshalb keine teflonbeschichteten Sonden mehr eingesetzt.

Die TUHH detektiert höhere Benzol-Derivate und Inden-Verbindungen, wovon an der FfB einzig Methyl-Styrol gefunden wurde. Weil die Probenahmestelle 2, an der die Probenahme für die TUHH stattfand, 20 cm über der Probenahmestelle 1 liegt und weil bei diesem Versuch unterstöchiometrische Verbrennungsbedingungen herrschten, wurde die Sonde dort nicht überhitzt und die an der TUHH analysierte Probe enthält deshalb keine Fluor-Verbindungen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den während des Brandes und während des Löschens gezogenen Proben ist hier im Gegensatz zu den FfB-Analysen nicht festzustellen.

4.4 Polyethylen (Bilder 21 bis 23)

Die Brandgase von Polyethylen enthalten die üblichen aromatischen Ringkohlenwasserstoffe: An der TUHH werden Benzol, Toluol und Xylol detektiert, an der FfB zusätzlich Ethyl- und Ethinyl-Benzol und Styrol. Die beiden Cyclopentan-Derivate treten ebenfalls

nur in den Analysen der FfB auf. Bei der Retentionszeit von 500 sec enthalten die Chromatogramme ebenso wie unter 300 sec Peaks, für die die Karlsruher NIST-Bibliothek keine plausiblen Identifikationsvorschläge liefert. Ein signifikanter Unterschied zwischen den während des Brandes und den während des Löschens gezogenen Proben ist nicht auszumachen. Die Annahme, Polyethylen verbrenne rückstandsfrei, ohne Umweltbelastung [53], weil es nur aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen bestehe, erweist sich in einem offenen Brand als unzutreffend.

Hier wie in allen folgenden Verbrennungs- und Löschversuchen verursacht Heptan, der Brennstoff des Stützfeuers, einen dominierenden Peak im Chromatogramm.

4.5 Polyoxymethylen (Bilder 24 bis 26)

Im Gegensatz zu der während des Löschens gezogenen Probe enthält das Chromatogramm der während des Brandes von Polyoxymethylen gezogenen neben den bekannten Peaks von Benzol, Toluol, Ethyl- und Ethinyl-Benzol, Styrol und Heptan noch solche von zwei gesättigten Ringkohlenwasserstoffen und von einer Reihe nicht identifizierbarer leichtflüchtiger Substanzen. Die TUHH detektiert zusätzlich zwei ungesättigte und einige höhere aromatische Ringkohlenwasserstoffe und zwei Inden-Verbindungen. Unerklärlich erscheint das Auftreten von Chlor-Methan in den Brandgasen eines nur aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff bestehenden Werkstoffes, wenn er nicht eine Flammenschutz-ausrüstung auf der Basis einer chlororganischen Verbindung besitzt [60, 61].

4.6 Polystyrol (Bilder 27 bis 29)

Bei dem Verbrennungs- und Löschversuch mit Polystyrol tritt erstmals der Fall ein, daß in der während des Löschens gezogenen Probe mehr Substanzen detektiert werden als in

jener, die während des Brandes genommen wurde. Zusätzlich zu den üblichen Aromaten Benzol, Toluol, Ethyl-Benzol und Styrol (jedoch kein Xylol!) und zum Heptan werden von der NIST-Bibliothek noch Identifikationsvorschläge für Dimethyl-Ether, zwei gesättigte Ringkohlenwasserstoffe, Methyl-Penten, 2-Hepten und zwei Benzol-Derivate geliefert und darüberhinaus während des Löschens noch für Butadien, Acrolein, Hexantriol, einen weiteren gesättigten Ringkohlenwasserstoff und zwei weitere Benzol-Derivate. Dies ist die einzige Analyse, in der Acrolein gefunden wurde, obwohl dieses Aldehyd bei der Verbrennung organischer Substanzen in geringer Konzentration immer auftreten kann [60]. Die während des Brandes gezogene Probe weist nach einer Retentionszeit von 900 sec bis 1000 sec noch eine Reihe von nicht identifizierbaren Peaks auf, die in der während des Löschens gezogenen fehlen. In der vor dem Löschen für die TUHH gezogenen Probe wurden zwei andere gesättigte Ringkohlenwasserstoffe, andere Benzol-Derivate und Inden-Verbindungen identifiziert.

Die Werte für purity, fit und reverse fit bei der Bestimmung von 2-Hepten deuten auf gemeinsame Strukturelemente beziehungsweise enge Verwandtschaft von Proben- und Vorschlagsspektrum – nicht auf Identität [62]. Doch fällt auf, daß die entsprechenden Werte für die Identifikationsalternative "1-Hepten", der – anders als hier – in der Analyse von Hart-PVC von der MS-Bibliothek der Vorzug gegeben wird, noch wesentlich niedriger liegen.

4.7 Polycarbonat (Bilder 30 und 31)

In den Brandgasen von Polycarbonat identifizierte die NIST-Bibliothek neben den üblichen Aromaten und Heptan einen leichtflüchtigen Alkohol und einen schwerflüchtigen polycyclischen Aromaten. Die zu erwartenden Phenol-, Aldehyd- und Keton-Komponenten im Brandrauch wurden nicht gefunden [61]. Auch in dieser Analyse sind die beiden Chlor-Verbindungen vermutlich auf Additive (Gleitmittel, Trennmittel, Emulgatoren, Weichmacher, Flammschutzmittel,...) zurückzuführen [60]. Keine Erklärung findet sich

für den Fluor-Anteil in einer dieser Verbindungen, denn die teflonbeschichteten Probenahmesonden sind seit den Xylolversuchen nicht mehr verwendet worden. Bei der ersten der beiden wiedergegebenen Analysen waren lediglich die Peaks von Ethanol, Benzol und Heptan zu erkennen – weitere enthält das Chromatogramm nicht. Eine Probe während des Löschens konnte nicht entnommen werden, da das Versuchsmaterial ohne Stützfeuer nicht weiterbrannte, so daß das Löschen entfiel.

4.8 Hart-PVC (Bilder 32 bis 34)

In den Brandgasen von Hart-PVC sind die Aromaten Benzol, Toluol, Ethyl- und Ethinyl-Benzol, Xylol und Styrol wieder vollzählig vertreten ebenso wie beim PVC-Hartschaum (Bilder 7 bis 15). Analog werden auch wieder chlorierte Kettenkohlenwasserstoffe (wenn auch nicht genau die gleichen wie dort) und eine Furan-Verbindung detektiert. Zusätzlich treten ein dreifacher Alkohol, einige Benzol-Derivate und verschiedene ungesättigte Ketten- und Ringkohlenwasserstoffe auf – in der letzten Probe auch noch 1-Hepten, das von der NIST-Bibliothek vom 2-Hepten der Analyse von Polystyrol (siehe Bild 27 und Abschnitt 4.6) ebenso unterschieden wird wie das 3-Penten-1-in dieser Analyse (Bild 32) und in jener von PVC-Hartschaum (Bild 14) vom 1-Penten-3-in der des Xylols (Bild 16). Für das Auftreten einer Fluor-Verbindung findet sich auch in diesem Versuch keine Erklärung. Da das Versuchsmaterial von selbst erlosch, entfiel das Löschen und die für diesen Zeitpunkt vorgesehene Probenahme.

5. 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 [29], bekam die FfB den Auftrag, die Löschverfahren und Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden gefährlicher Güter zu untersuchen. Der Forschungsauftrag verfolgt das Ziel,

1. an Hand von Brandversuchen zu ermitteln, welche feuerwehrrelevanten Giftstoffe während eines Brandes und beim Löschen gebildet werden, und
2. den Kenntnisstand über die Wirkung der Löschmittel soweit zu erhöhen, 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.

Die durch den Sandoz-Brand und die damaligen Löschmaßnahmen ausgelöste Kontamination des Rheins hat deutlich gemacht, daß Löschmittel und -verfahren nicht nur nach ihrer Löschwirkung zu beurteilen sind, sondern auch danach, ob Sekundärschäden verursacht werden können, weil beispielsweise durch brennende Chemikalien oder ihre Reaktionsprodukte, die sich im Löschwasser lösen und mit diesem im Erdreich versickern oder die direkt vom Löschwasser in Fluß oder See gespült werden, Grund- oder Oberflächengewässer verdorben werden.

Im Anschluß an eine Literaturrecherche über Löschmittelempfehlungen für solche Stoffe, die nicht mit Wasser gelöscht werden sollen, wurde ein Versuchsstand konstruiert, in dem Substanzmengen im kg-Bereich unter reproduzierbaren Bedingungen verbrannt, gelöscht und ihre Reaktionsprodukte analysiert werden können. Zur Luftversorgung dieses Versuchsstandes gehören ein Gebläse und eine Drosselklappe, mit der sich der

Luftvolumenstrom und somit die Luftzahl im Verbrennungsraum kontinuierlich zwischen unter- und überstöchiometrisch einstellen lassen.

In einer ersten Versuchsreihe wurden die Brandgase der wichtigsten Kunststoffe analysiert. Hierzu wird ein GC/MS-Gerät eingesetzt – unter anderem auch um zu prüfen, inwieweit sich dieses Verfahren für den Einsatz bei der Feuerwehr eignet, da sie in zunehmendem Maße zur Bestimmung der bei Bränden mit gefährlichen Gütern auftretenden Substanzen auf analytische Methoden zurückgreifen muß und deshalb erwartet, daß ein derartiges Analysegerätes bei solchen Feuerwehreinsätzen von großer Bedeutung sein wird.

Die Feuerwehr benötigt ein schnelles, universal einsetzbares, leicht zu bedienendes Meßinstrument, das in der Lage ist, zuverlässig zu analysieren, ob und welche Gefahrstoffe in einem Brand enthalten sind, denn

- ob die Umgebung 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 im Brandherd ab, von ihrem eigenen Toxizitätspotential und von dem der Reaktionsprodukte, die sich während des Brandes und während des Löschens bilden können.

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 – vorausgesetzt die GC-Trennsäule ist auf die zu bestimmenden Substanzen zugeschnitten und in der MS-Biblio-

thek existieren zuverlässige Vergleichsspektren, die es beispielsweise erlauben, zuerst die Stoffe zu identifizieren, die für die Feuerwehr von besonderer Bedeutung sind [53, 59]: Benzo[a]pyren, Acrolein, Phosgen, Chlor, Schwefeldioxid, Fluorwasserstoff, Benzol, Chlorwasserstoff, Stickstoffdioxid, Blausäure, Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Kohlenmonoxid, Toluol,... 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. Die Hinweise auf gesundheitliche Gefahren müssen notgedrungen lückenhaft bleiben, solange Untersuchungen über das Zusammenwirken verschiedener Gefahrstoffe noch nicht existieren. Die Erarbeitung der Löschmittelvorschläge bleibt der Fortsetzung dieses Forschungsauftrages vorbehalten.

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 [37], erscheint nach wie vor sinnvoll, denn erst dadurch würde sie in die Lage versetzt, ihren Einsatz optimal vorbereiten und an Ort und Stelle sofort die geeignetsten Maßnahmen ergreifen zu können, ohne durch Messungen wertvolle Zeit zu verlieren.

Bei einigen Brandversuchen 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 soll diesen Differenzen auf den Grund gegangen werden.

Der Schwerpunkt bei der Fortführung dieses Forschungsauftrages wird bei der Untersuchung von Stoffen liegen (z.B. Pflanzenschutzmittel), die in großen Mengen transportiert und gelagert werden und die die Praxis des Feuerwehralltags bestimmen. Sie sollen bei unterschiedlichen Luftverhältnissen verbrannt und mit unterschiedlichen Löschmitteln gelöscht werden, um aus der Analyse der Reaktionsprodukte die Auswirkungen eines realen Einsatzes auf die Umwelt abschätzen zu können. Nach den Versuchen sollen der pH-Wert und der Schadstoffgehalt der eingesetzten Löschmittel untersucht werden um zu prüfen, inwieweit diese Werte mit jenen in der Brandgasanalyse korrelieren. – Die Untersuchung von Gefahrstoffen, bei denen zu befürchten steht, daß sie bei Verbrennungs- und Löschversuchen die Brandversuchshalle und die Rauchgasreinigungsanlage in unzulässigem Maße kontaminieren, wird bis zur Einrichtung eines speziellen Gefahrstoff-Labors zurückgestellt.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kettrup, Antonius:
Ökologische Auswirkungen im Brandfall auf die Gewässer,
Vortrag Nr. 7 in [21]
- [2] 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), 8th Ed.,
in Kapitel 2: List of Dangerous Goods most commonly carried,
New York 1993 (K.O.Storck-Vlg., Hamburg)
- [3] National Fire Protection Association (NFPA):
Fire Protection Guide on Hazardous Materials, 6th Ed.,
Boston (Massachusetts) 1975,
jetzt unter Code-Nr. 49, 325M, 491M, 704
enthalten in:
National Fire Codes,
Quincy (Massachusetts) 1990/91
- [4] United Nations - Group of Experts on the Transport of Dangerous Goods of the Economic Commission for Europe (ECE):
Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par route (ADR), Genf 1957ff
- [5] Comité International des Transports ferroviaires - Commission d'Experts de l'Office Central des Transports Internationaux (OCTI):
Convention relative aux Transports Ferroviaires (COTIF), Anlage: Convention Internationale concernant le transport des Marchandises par chemin de fer (CIM), Anhang B: Règlement International concernant le transport des marchandises Dangereuses par chemin de fer (RID), Bern 1980ff
(Bundesbahndirektion Hannover)
- [6] Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung et al.:
Verordnung über gefährliche Stoffe, einschließlich Anhänge I-VI (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV, früher: Arbeitsstoffverordnung - ArbStoffV),
BGBl.I S.1470, Bonn, 26.8.1986,
1. Änderung: BGBl.I S.2721, 16.12.87,
2. Änderung: BGBl.I S.2235, 12.12.89,
3. Änderung: BGBl.I S. 493, 14. 3.90,
4. Änderung: BGBl.I S. 790, 23. 4.90,
5. Änderung: BGBl.I S.1218, 5. 6.91
- [7] Joint Committee on Fire Brigade Operations, Home Office - Fire Department und National Chemical Emergency Centre:
Emergency Action Codes and Supplementary Information for dealing with Incidents Involving Dangerous Substances Conveyed in Bulk by Road or Rail - Hazchem List N^o 8,
London, Harwell 1993
- [8] Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie:
Unfallverhütungsvorschriften,
Vlg.Chemie, Weinheim 1964ff
- [9] Graf, Werner; Peter Eulenburg und Dietrich Webner:
Merkblätter gefährlicher Stoffe,
Kohlhammer-Vlg., Stuttgart 1970...79
- [10] Hommel, Günter et al.:
Handbuch der gefährlichen Güter, 5. Aufl.,
Springer-Vlg., Berlin, New York,... 1993
- [11] Kühn, Robert und Karl Birett:
Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe,
10. Aufl.,
ecommed-vlg., Landsberg/Lech 1993
- [12] Kühn, Robert und Karl Birett:
Gefahrgut-Schlüssel, 14. Aufl.,
ecommed-vlg., Landsberg 1991

- [13] Kühn, Robert und Karl Birett:
Gefahrgut-Merkblätter, 5. Ausg.,
(1300 Einzel- und Gruppen-Unfallmerkblätter
für den Straßenverkehr z.T. ehemals amtliche
vom BMV und vom VCI),
ecommed-vlg., Landsberg 1991
- [14] Lenga, Robert E.:
The Sigma-Aldrich Library of
Chemical Safety Data, 2nd Ed.,
Sigma-Aldrich Corporation,
Milwaukee (Wisconsin) 1988
- [15] Royal Society of Chemistry:
Chemical Safety Data Sheets,
Cambridge 1989...93
- [16] Steinleitner, Hans-Dieter et al.:
Brandschutz- und sicherheitstechnische Kenn-
werte gefährlicher Stoffe (früher: Tabellen-
buch brennbarer und gefährlicher Stoffe),
Staatsvlg. d. DDR, Berlin 1988
- [17] Welzbacher, Ulrich:
Neue Datenblätter für gefährliche Arbeits-
stoffe nach der Gefahrstoffverordnung,
WEKA-Fachvlg., Augsburg 1993
- [18] Dutch Chemical Industry Association et al.:
Chemical Safety Sheets - working safely with
hazardous chemicals (früher: Handling Che-
micals safely),
Samson Chemical Publishers, Dordrecht 1991
- [19] Janik, Detlev (ja):
Töpfer für ausführliche
Information über Risiken,
Frankfurter Allgemeine (FAZ) 39, Nr. 122,
27.5.1987
- [20] Brauner, Christian:
Umdenken bei Sandoz,
Die Rheinpfalz 43, Nr. 122, 27.5.1987
- [21] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
Chemie und Umwelt -
Brände und ihre Vermeidung,
VCI-Symposium am 26.5.1987 in der Indu-
strie- und Handelskammer Frankfurt/Main
- [22] Heins, Uwe (uh):
Gefahrgut-Datenbanken,
Gefährliche Ladung 32 (1987), Heft 12,
Seite 561...565
- [23] Heins, Uwe (uh):
Informations-Management,
Gefährliche Ladung 38 (1993), Heft 6,
Seite 286...304
- [24] Wittmer, Stefan:
Gefahrstoff-Software im Vergleich,
Unabhängige Brandschutzzeitschrift (UB) 42
(1992), Heft 10, Seite 15...18
- [25] United Nations - International Maritime
Organization (IMO) - Maritime Safety Com-
mittee (MSC):
International Maritime Dangerous Goods
Code (IMDG),
London 1984 (K.O.Storck-Vlg., Hamburg)
- [26] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
Chemie im Dialog - TUIS,
Frankfurt/Main 1992
- [27] Lambrecht, Volker:
ICE - International Chemical Environment,
Europäisches Hilfeleistungssystem für Trans-
portunfälle mit Chemieprodukten des euro-
päischen Chemieverbandes,
Vortrag Nr. 1 in [28]
- [28] Vereinigung zur Förderung des Deutschen
Brandschutzes e.V. (vfdb):
Jahresfachtagung vom 24. bis 26. Mai 1993
im Kongreßzentrum Messe in München
- [29] Meerkamp van Embden, Ian C.:
Einführung,
Vortrag Nr. 1 in [21]
- [30] Günther, Kuno Peter:
Brandschutzmaßnahmen und Vorsorge aus
Sicht der Öffentlichen Feuerwehr,
Vortrag Nr. 11 in [21]

- [31] Nimptsch, Peter:
Brandschutz in Chemielägern,
Vortrag Nr. 9 in [21]
- [32] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
VCI-Maßnahmenkatalog im Hinblick auf den
Lagerbrand bei Sandoz,
Frankfurt/Main 1986
- [33] Verband der Chemischen Industrie e.V.:
Brandschutzkonzept für Chemikalienlager im
Hinblick auf den Schutz der Gewässer,
Frankfurt/Main 1987
- [34] Fathmann, Heinrich:
Zusammenarbeit der mittelständischen Indu-
strie mit den zuständigen öffentlichen Hilfs-
kräften,
Vortrag Nr. 16 in [21]
- [35] Mingenbach, Hans:
Gefahrenabwehrpläne,
Vortragsentwurf für [21]
- [36] Thamm, Rüdiger:
Meldesysteme,
Vortrag Nr. 17 in [21]
- [37] Albracht, Gerd et al.:
Die hessische zentrale Gefahrstoffdatenbank,
Hessisches Ministerium für Wirtschaft und
Technik, Wiesbaden 1987
- [38] Föhl, C. Axel:
Untersuchung der Löschverfahren und Lösch-
mittel zur Bekämpfung von Bränden gefähr-
licher Güter,
Forschungsbericht Nr. 69 der Arbeitsgemein-
schaft der Innenministerien der Bundesländer,
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehr-
angelegenheiten", Karlsruhe 1989
- [39] Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit:
Neufassung der zwölften Verordnung zur
Durchführung des Bundes-Immissionsschutz-
gesetzes (Störfall-Verordnung),
BGBl.I S.608, Bonn, 19.5.1988
- [40] Föhl, C. Axel und Peter Basmer:
Untersuchung der Löschverfahren und Lösch-
mittel zur Bekämpfung von Bränden gefähr-
licher Güter (Fortsetzung des Forschungs-
berichtes Nr. 69),
Forschungsbericht Nr. 73 der Arbeitsgemein-
schaft der Innenministerien der Bundesländer,
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehr-
angelegenheiten", Karlsruhe 1990
- [41] Habermaier, Frank:
Gibt es doch das Universal-Analysengerät?,
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung **40**
(1986), Heft 7, Seite 278...281
- [42] Föhl, C. Axel und Peter Basmer:
Untersuchung der Löschverfahren und Lösch-
mittel zur Bekämpfung von Bränden gefähr-
licher Güter: GC/MS-Rauchgasanalyse,
Forschungsbericht Nr. 81 der Arbeitsgemein-
schaft der Innenministerien der Bundesländer,
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehr-
angelegenheiten", Karlsruhe 1992
- [43] National Institute for Standards and Techno-
logy (NIST) und US Environmental Protec-
tion Agency (EPA):
Mass Spectra Database, PC-Version 3.0,
Gaithersburg, Maryland 1990
- [44] Föhl, C. Axel:
Untersuchung der Löschverfahren und Lösch-
mittel zur Bekämpfung von Bränden gefähr-
licher Güter: Entstehung von Dioxinen und
Furanen im Brandfall und erforderliche Ab-
wehrmaßnahmen,
Forschungsbericht Nr. 77 der Arbeitsgemein-
schaft der Innenministerien der Bundesländer,
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehr-
angelegenheiten", Karlsruhe 1991
- [45] Trampisch, Hans Joachim et al.:
Umweltmedizinische Untersuchung bei Feuer-
wehrleuten - Studie über Dioxine, Furane
und andere organische Chlorverbindungen im
Blut von Feuerwehrleuten,
Ministerium für Arbeit, Gesundheit und
Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen,
Düsseldorf 1992

- [46] 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
- [47] Bundesgesundheitsamt (BGA):
4500 Sicherheitsdatenblätter der 1000-Jahres-tonnen-Liste des VCI
- [48] International Organization
for Standardization:
Draft International Standard ISO/DIS 9705,
Fire tests - full scale room test for surface
products,
Genf, 12.12.1990
- [49] Merz, W. et al.:
Ein Verfahren zur Erzeugung und analy-
tischen Charakterisierung von Brandgasen,
Fresenius' Zeitschrift für Analytische Chemie
325 (1986), Seite 449...460
- [50] Hengstenberg, Josef; Berthold Sturm und
Otto Winkler:
Messen, Steuern und Regeln in der Chemi-
schen Technik, 3. Aufl., Band I,
Springer-Vlg., Berlin... 1980
- [51] Hartmann & Braun AG:
Geräte für die Prozeßanalyse,
Katalog 05/00-2 und
Gebrauchsanweisung Nr. 42/21-22-2,
Frankfurt/Main 1992
- [52] Leybold-Heraeus GmbH:
Betriebsanleitung für den Infrarot-
Gasanalysator BINOS I,
Hanau 1978
- [53] Neumüller, Otto-Albrecht:
Römpps Chemie-Lexikon, 8. Aufl.,
Franckh'sche Vlgdrlg., Stuttgart 1979...88
und Falbe, Jürgen und Manfred Regitz:
Römpp Chemie-Lexikon, 9. Aufl.,
Thieme-Vlg., Stuttgart 1989ff
- [54] Günther, Rudolf:
Verbrennung und Feuerungen,
Springer-Vlg., Berlin... 1974
- [55] Beitz, Wolfgang und Karl-Heinz Küttner:
Dubbel - Taschenbuch für den Maschinen-
bau, 17. Aufl.,
Springer-Vlg., Berlin... 1990
- [56] Cadillac Plastic GmbH:
Kunststoffhalbzeuge-Übersicht,
Lieferprogramm 15/1091 WD-TOP,
Viernheim 1991
- [57] Matz, Gerhard und Alexander Harder:
Untersuchung von Rauchgasproben im Rah-
men des BMFT-Projektes "Schnellanalyse bei
Chemieunfällen und Bränden mit dem mobi-
len GC/MS-System" am Arbeitsbereich Meß-
technik der Technischen Universität Ham-
burg-Harburg (TUHH), Hamburg 1992
- [58] Harder, Alexander (Arbeitsbereich Meßtech-
nik der Technischen Universität Hamburg-
Harburg, TUHH):
persönliche Mitteilung, 22.12.1993
- [59] Pál, Gizella und Hugó Macskásy:
Plastics - their behavior in fires,
Studies in Polymer Science 6,
Elsevier Science Publ., Amsterdam,... 1991
- [60] Roth, Lutz und Ursula Weller:
Chemie-Brände - Brandtabellen, Fallbei-
spiele, Risiken und Vorsorgemaßnahmen,
ecomed-vlg., Landsberg, München,... 1990
- [61] Troitzsch, Jürgen et al.:
Brandverhalten von Kunststoffen - Grund-
lagen, Vorschriften, Prüfverfahren,
Hanser-Vlg., München, Wien 1982
- [62] Finnigan MAT GmbH:
Modell ITD 800 - Bedienungshandbuch,
Bremen 1986

7. BILDER UND TABELLEN

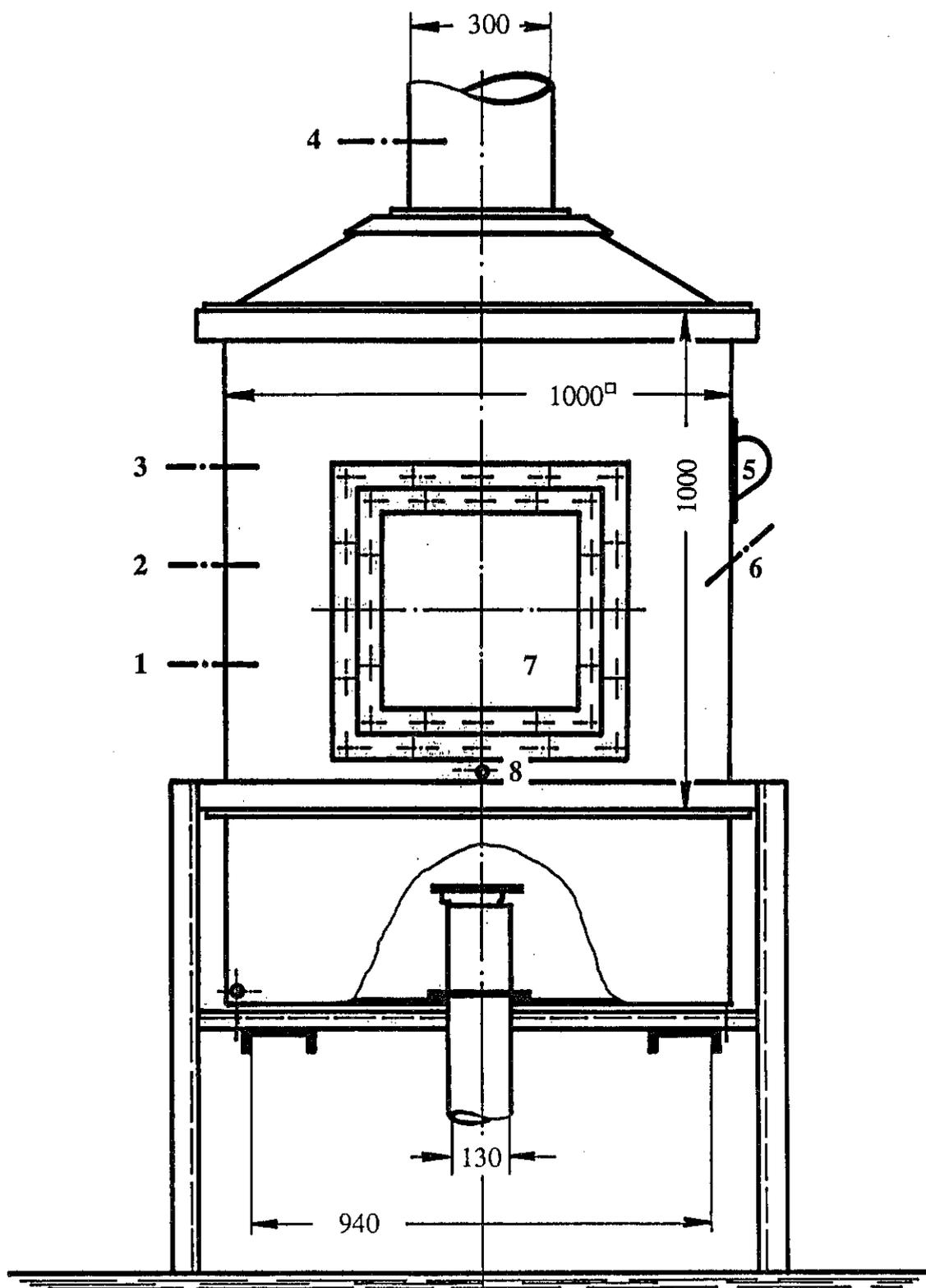


Bild 1: Versuchsstand für Verbrennungs- und Löschversuche mit Probenmengen im kg-Bereich: 1...4 Probenahmestellen, 5 = Beleuchtung, 6 = Durchlaß für Löschrohr, 7 = wärmebeständiges Fenster, 8 = Durchlaß für Zündfackel

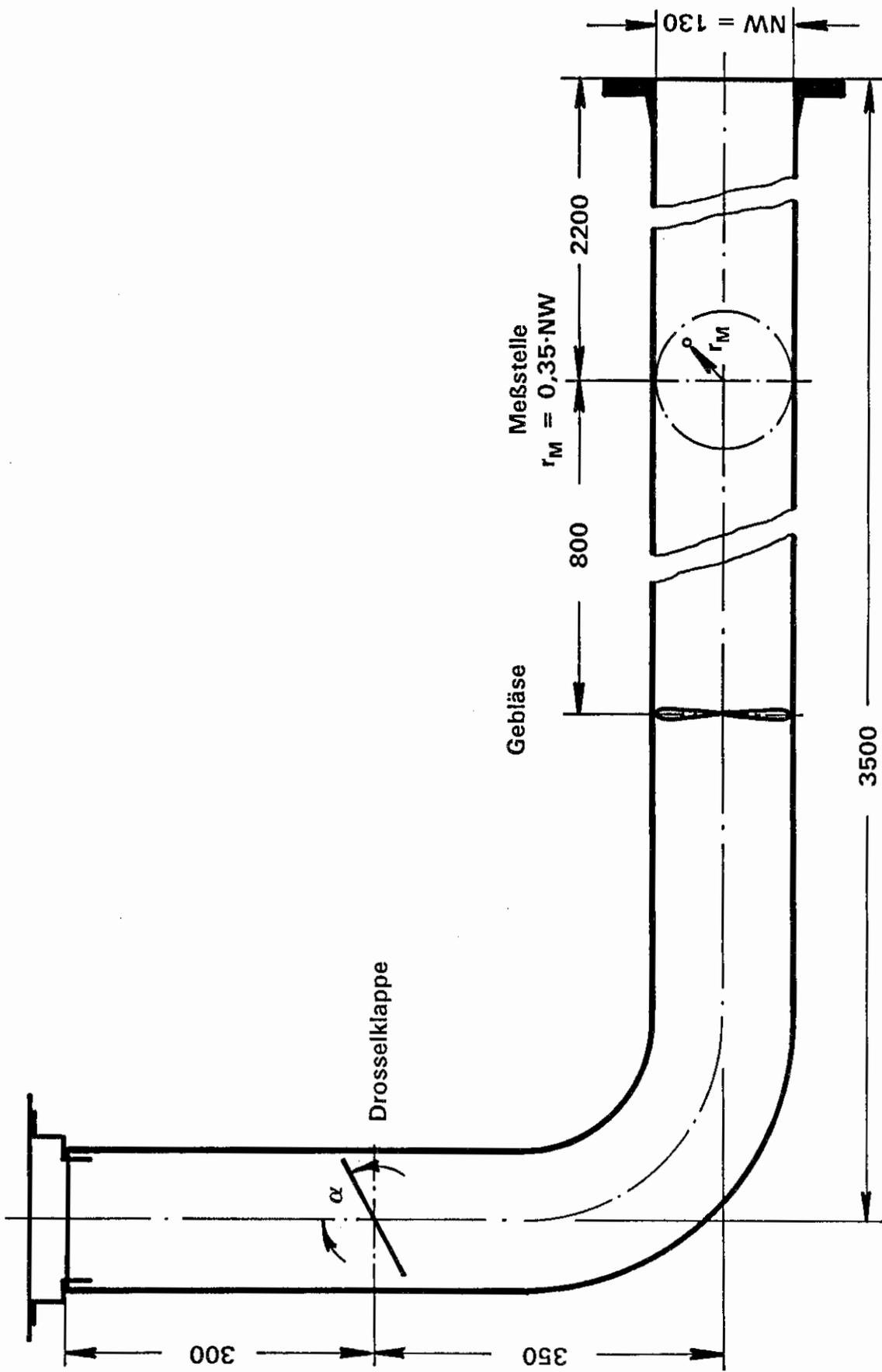


Bild 2: Die Positionen von Gebläse, Drosselklappe und Volumenstrom-Meßstelle in der Luftversorgung des Versuchstandes [50]

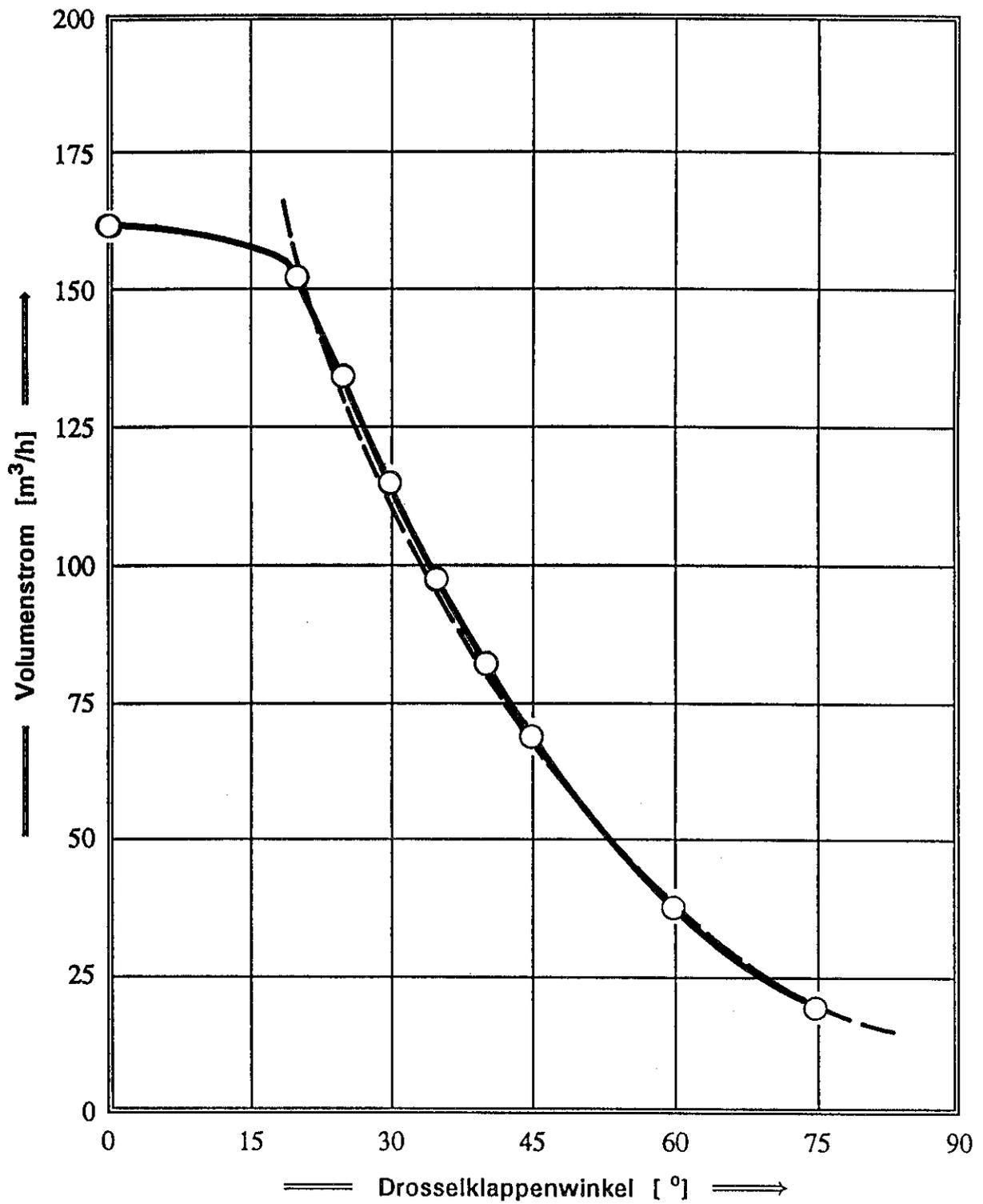
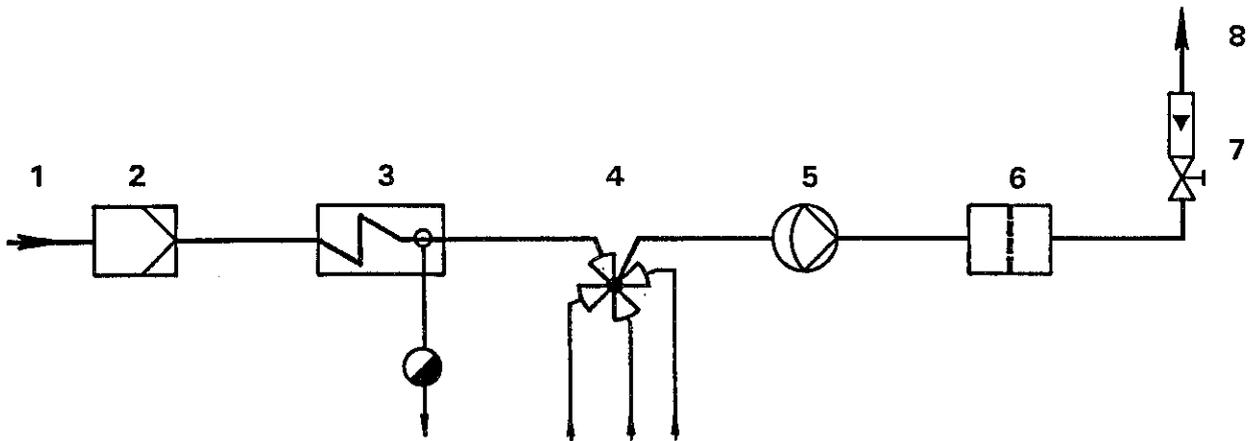


Bild 3: Der Luftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Stellung der Drosselklappe: gemessene Werte (O) und Interpolationskurve (— — —)



- 1 Entnahmesonde
- 2 Ruß- und Feuchtigkeitsfilter
- 3 Meßgaskühler mit Kondensat-Ablauf
- 4 Mehrwege-Hahn für Eichgas-Aufschaltung
- 5 Membranpumpe
- 6 Membranfilter
- 7 Strömungsmesser mit Nadelventil
- 8 zur CO-, CO₂- und O₂-Gasanalyse

Bild 4: Die Meßgas-Aufbereitungskette für die kontinuierliche Gasanalyse [51]

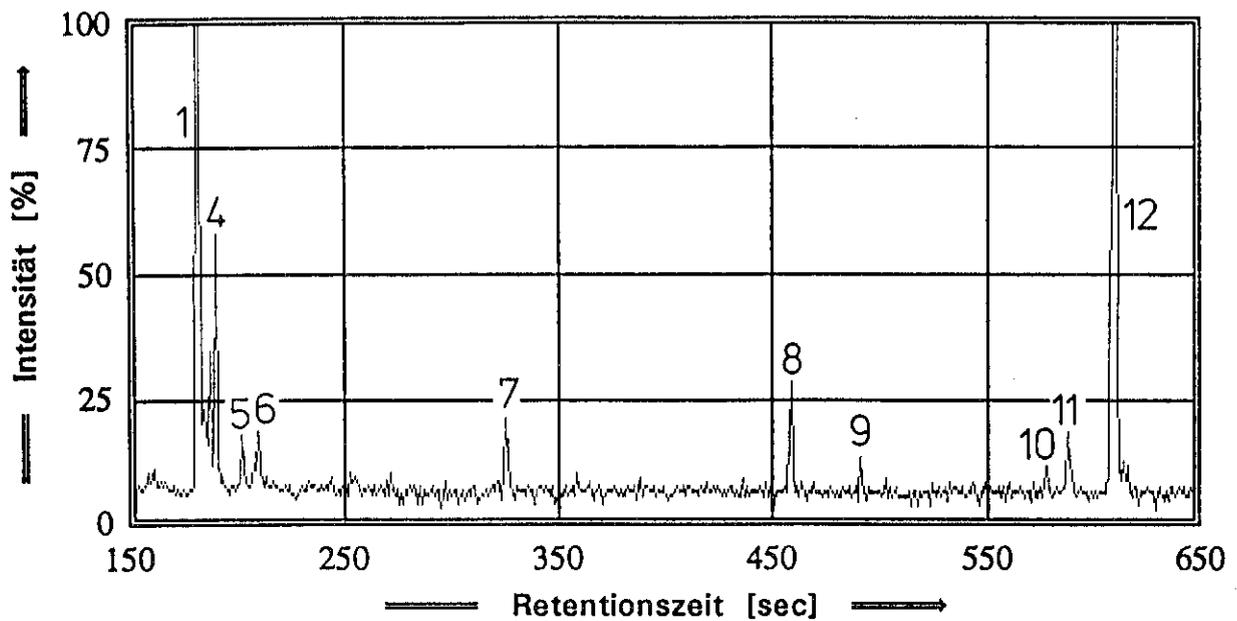


Bild 5a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von unbehandeltem Fichtenholz nach 7 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	}
6	212	
7	329	C_6H_6 Benzol
8	461	C_7H_8 Toluol
9	494	?
10	581	C_8H_{10} Ethyl-Benzol
11	591	C_8H_{10} p/m-Xylol
12	612	C_8H_8 Styrol

Bild 5b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

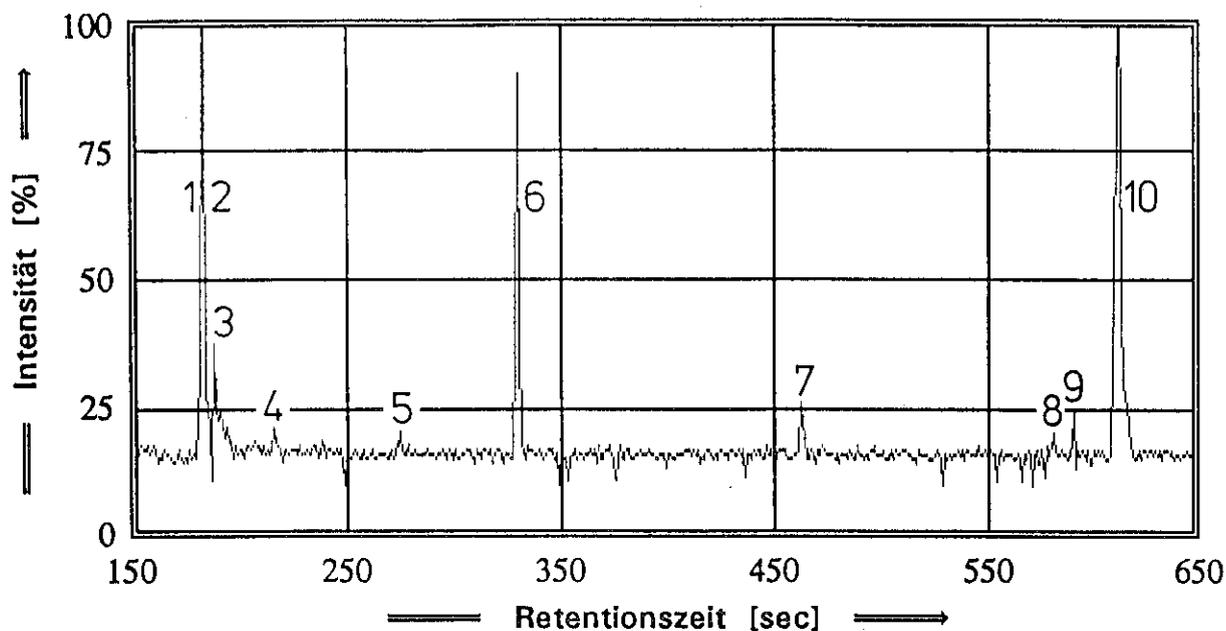


Bild 6a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von unbehandeltem Fichtenholz während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C/min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	}
2	183	
3	183	}
4	276	
5	276	}
6	330	
7	461	C_7H_8 Toluol
8	582	?
9	592	C_8H_{10} p/m-Xylol
10	613	C_8H_8 Styrol

Bild 6b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

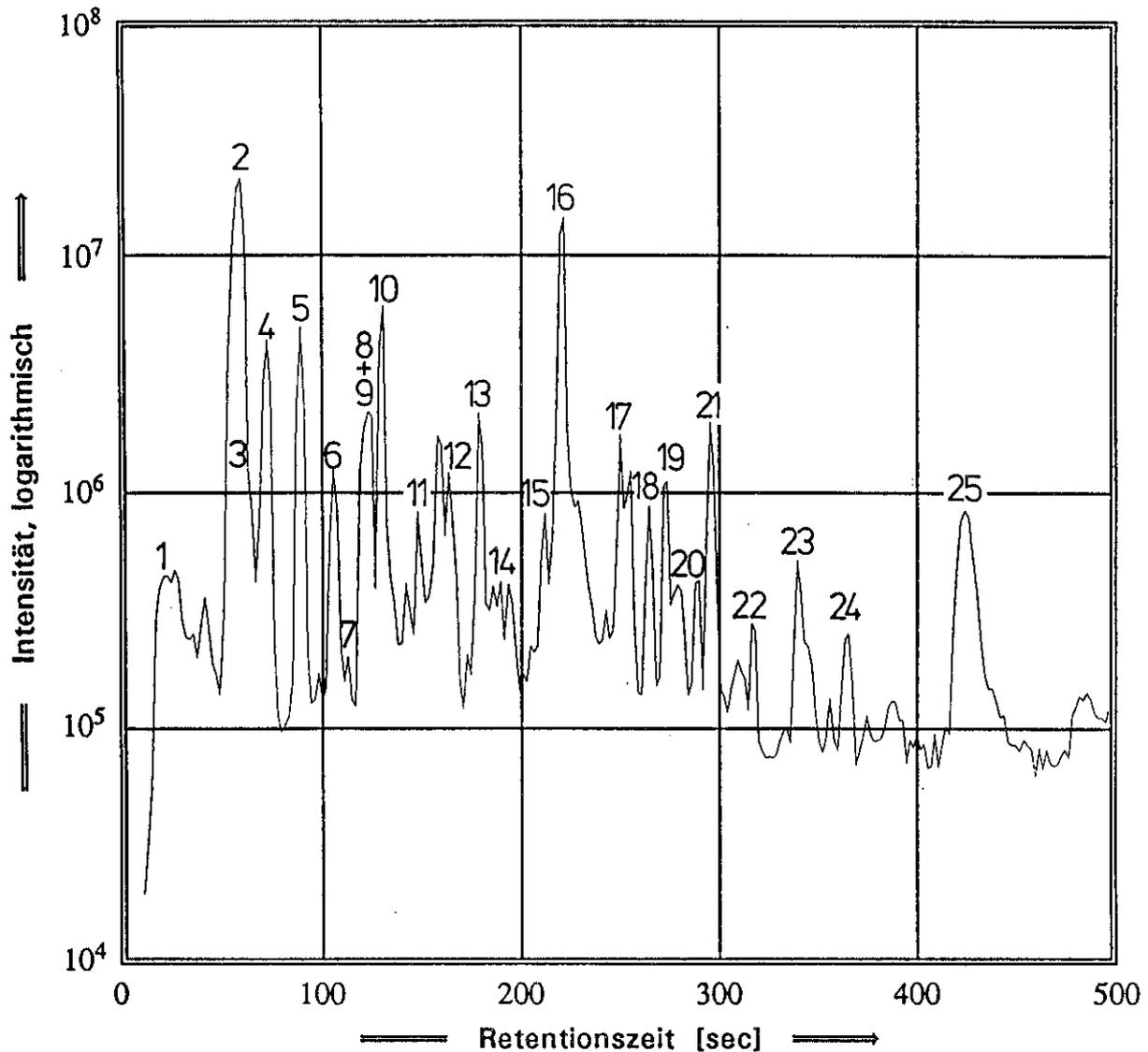


Bild 7a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum nach 2½ Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $l = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	19	C ₂ H ₆ O	Ethanol
2	56	C ₆ H ₆	Benzol
3	60	C ₅ H ₁₂ O ₂	Diethoxy-Methan
4	69	C ₄ H ₈ O ₂	Propansäure-Methylester
5	85	C ₇ H ₈	Toluol
6	101	C ₅ H ₄ O ₂	Furaldehyd
7	108	C ₆ H ₅ Cl	Chlor-Benzol
8	118	C ₈ H ₁₀	Xylol
9	118	C ₈ H ₆	Ethynyl-Benzol
10	125	C ₈ H ₈	Styrol
11	142	C ₇ H ₆ O	Benzaldehyd
12	158	C ₈ H ₆ O	Benzo-Furan
13	173	C ₉ H ₈	Inden
14	181	C ₇ H ₈ O	Methyl-Phenol
15	206	C ₆ H ₅ ClO	Chlor-Phenol
16	215	C ₁₀ H ₈	Naphthalin
17	250	C ₁₁ H ₁₀	Methyl-Naphthalin
18	259	C ₉ H ₈ Cl ₂	Dichlor-Propenyl-Benzol
19	268	?	PAK (Molekulargewicht 154)
20	284	?	PAK (Molekulargewicht 154)
21	291	?	PAK (Molekulargewicht 152)
22	314	C ₁₂ H ₈ O	Dibenzo-Furan
23	336	?	PAK (Molekulargewicht 166)
24	363	C ₁₅ H ₁₆	Diphenyl-Propan
25	424	?	PAK (Molekulargewicht 178)

Bild 7b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

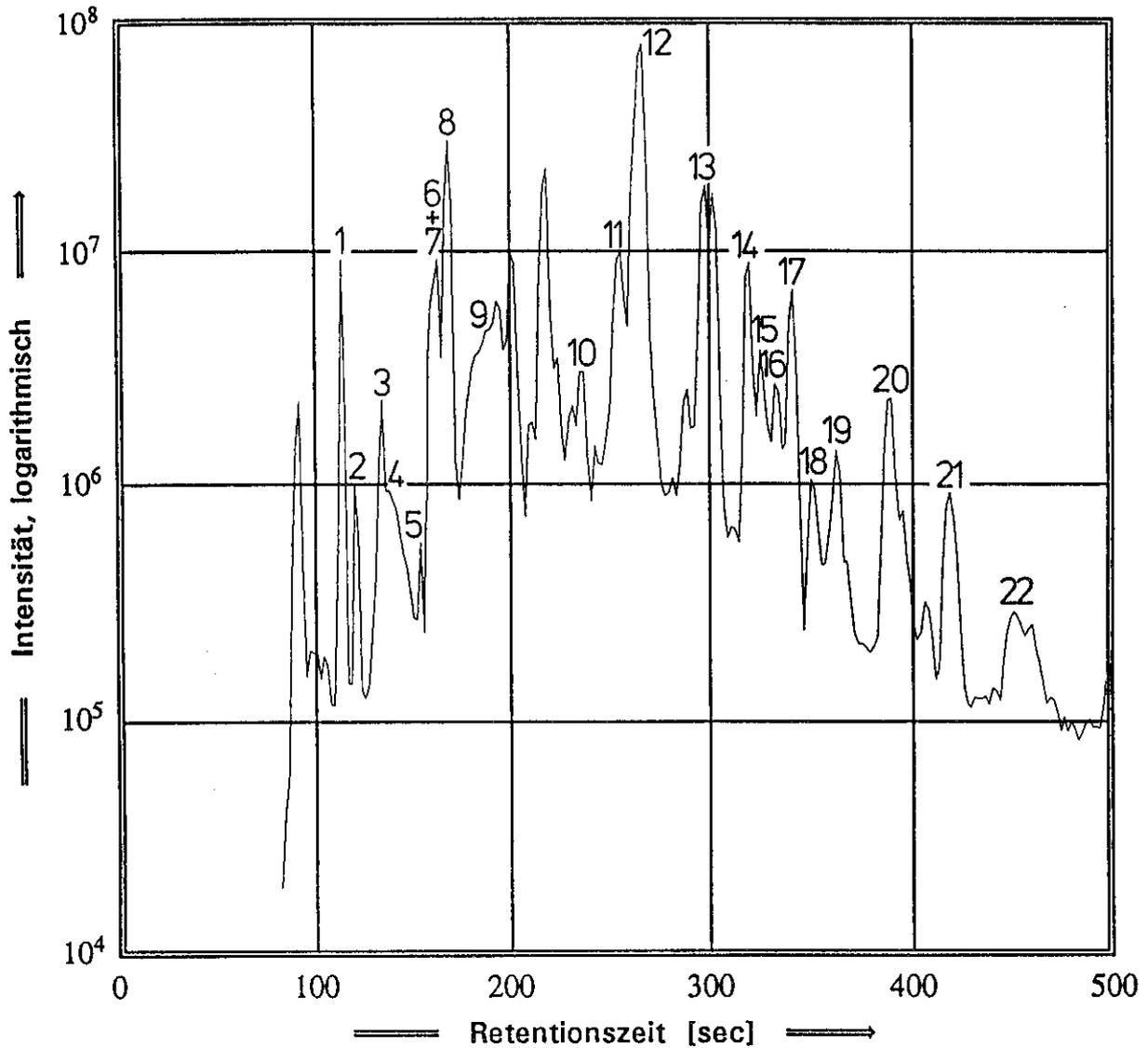


Bild 8a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum nach 6 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $l = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- 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 8b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

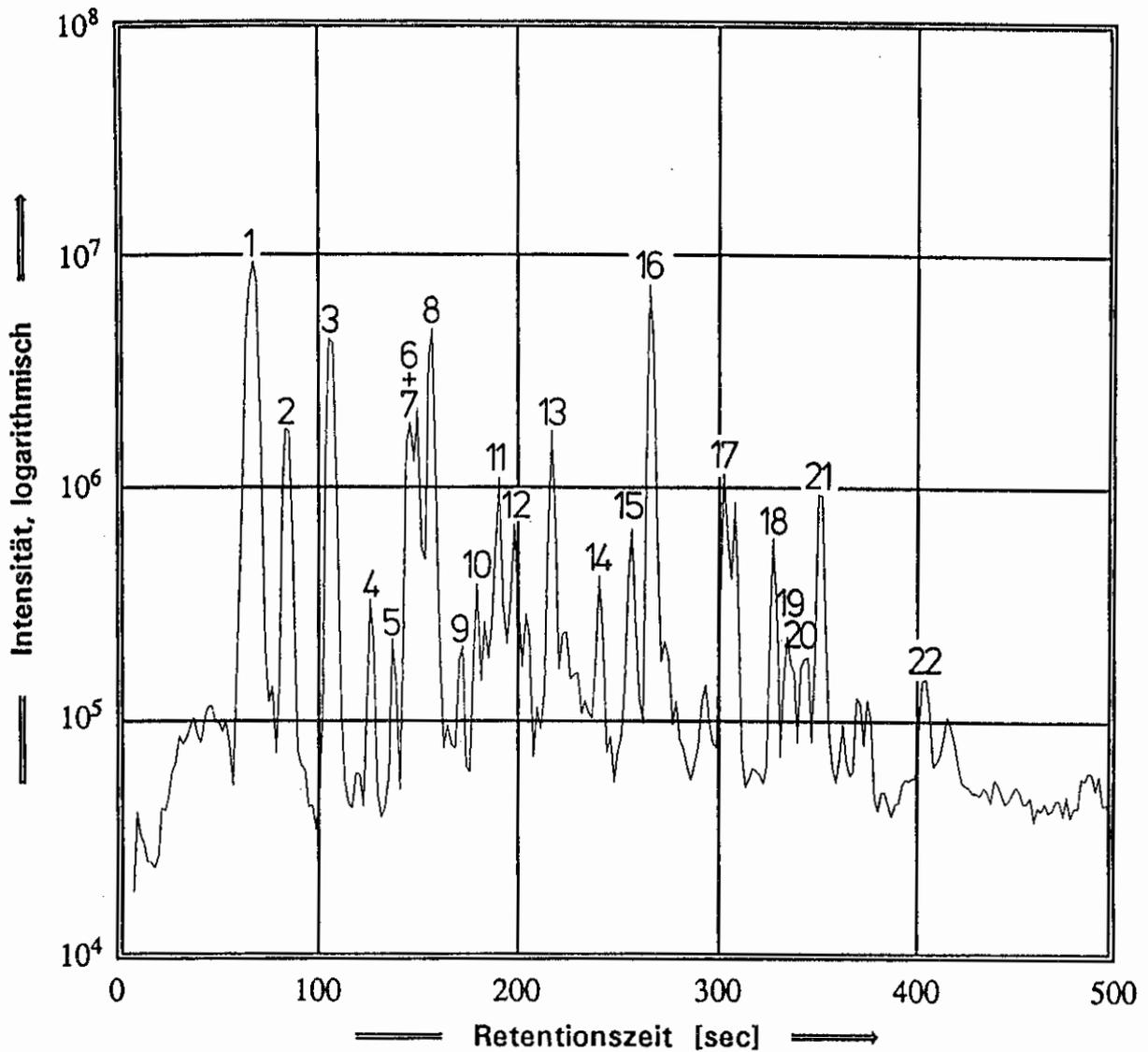


Bild 9a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $l = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	67	C_6H_6 Benzol
2	82	$C_4H_8O_2$ Propansäure-Methylester
3	104	C_7H_8 Toluol
4	124	$C_5H_4O_2$ Furaldehyd
5	135	C_6H_5Cl Chlor-Benzol
6	144	C_8H_{10} Xylol
7	144	C_8H_6 Ethinyl-Benzol
8	155	C_8H_8 Styrol
9	170	C_9H_{12} Propyl-Benzol
10	177	C_7H_6O Benzaldehyd
11	188	C_6H_6O Phenol
12	196	C_8H_6O Benzo-Furan
13	214	C_9H_8 Inden
14	237	C_9H_8O Methyl-Benzo-Furan
15	253	C_6H_5ClO Chlor-Phenol
16	262	$C_{10}H_8$ Naphthalin
17	304	$C_{11}H_{10}$ Methyl-Naphthalin
18	325	? PAK (Molekulargewicht 154)
19	331	$C_{12}H_{12}$ Ethyl-Naphthalin
20	341	$C_{12}H_{12}$ Dimethyl-Naphthalin
21	349	? PAK (Molekulargewicht 152)
22	402	? PAK (Molekulargewicht 166)

Bild 9b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

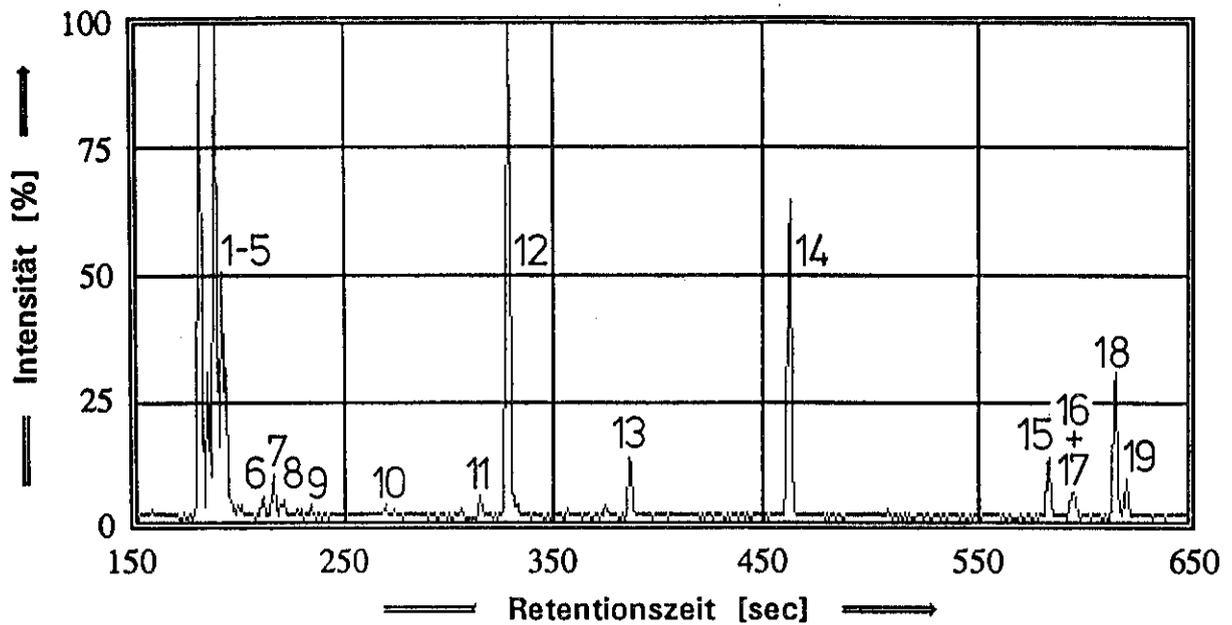


Bild 10a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum nach 6 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (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 10b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

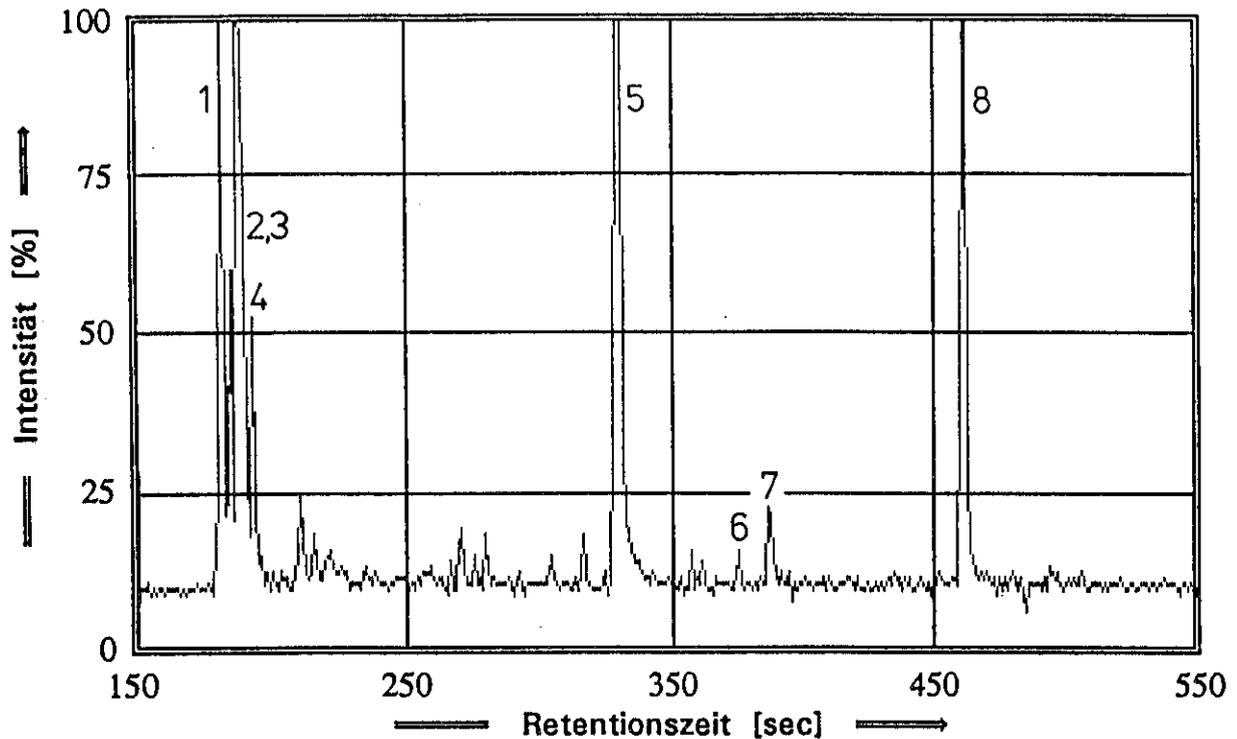


Bild 11a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C/min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	182	$\text{C}_4\text{H}_9\text{ClO}$ 2-Chlor-1-Methoxy-Propan
2	186	?
3	187	$\text{C}_2\text{H}_3\text{ClO}_2$ Chlor-Essigsäure
4	194	?
5	329	C_6H_6 Benzol
6	375	?
7	386	?
8	460	C_7H_8 Toluol

Bild 11b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

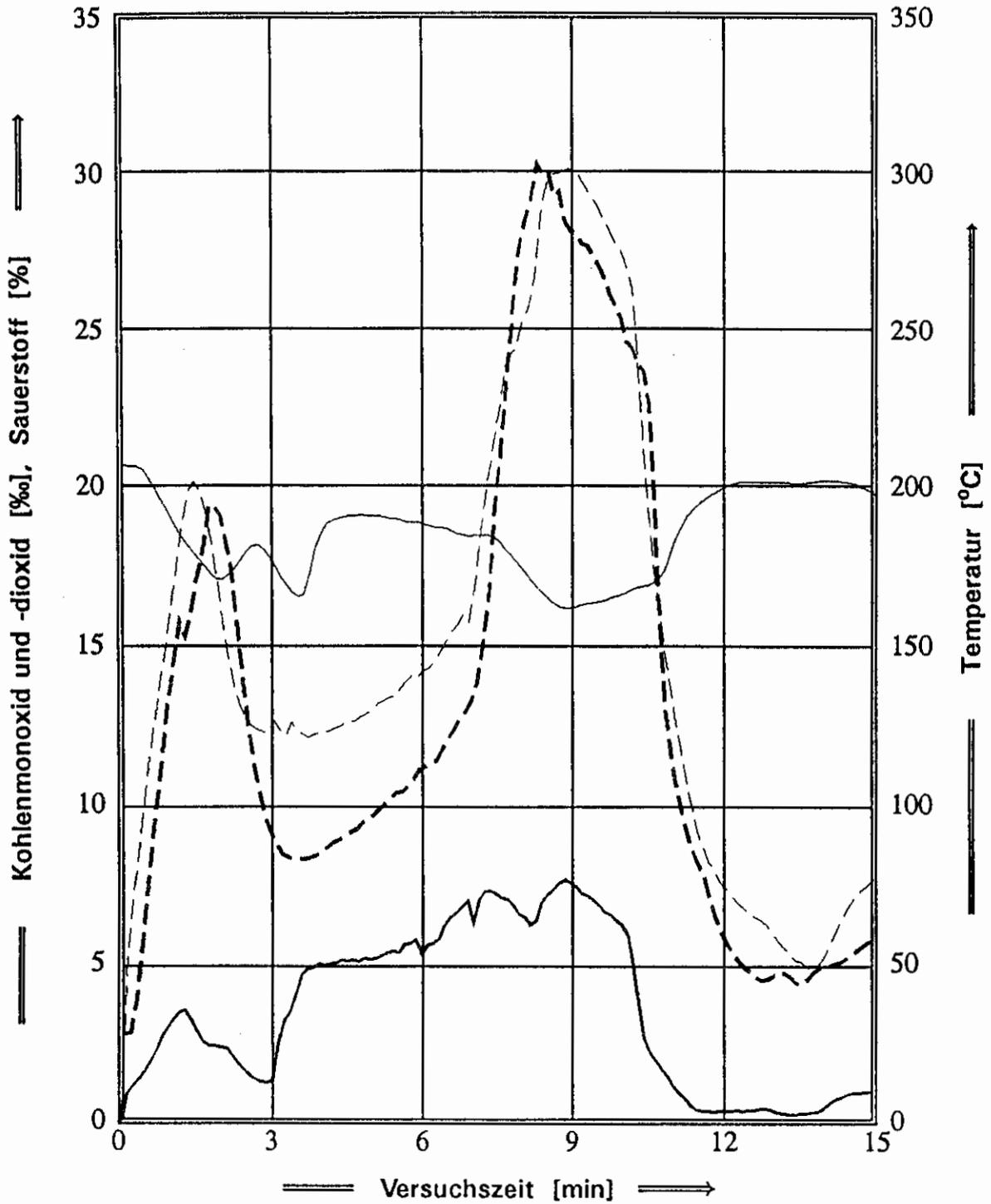


Bild 12: Der zeitliche Verlauf der (---) Temperatur und der (—) Kohlenmonoxid-, (- - -) Kohlendioxid- und (—) Sauerstoffkonzentrationen an der Probenahmestelle 4 beim Brandversuch mit PVC-Hartschaum

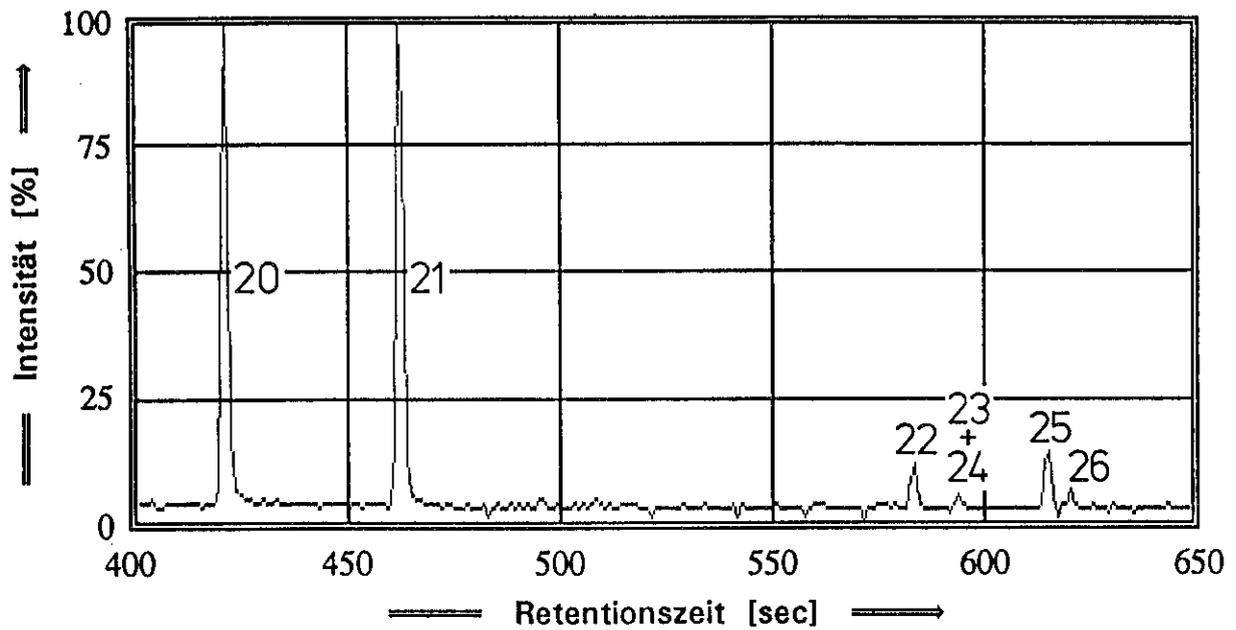
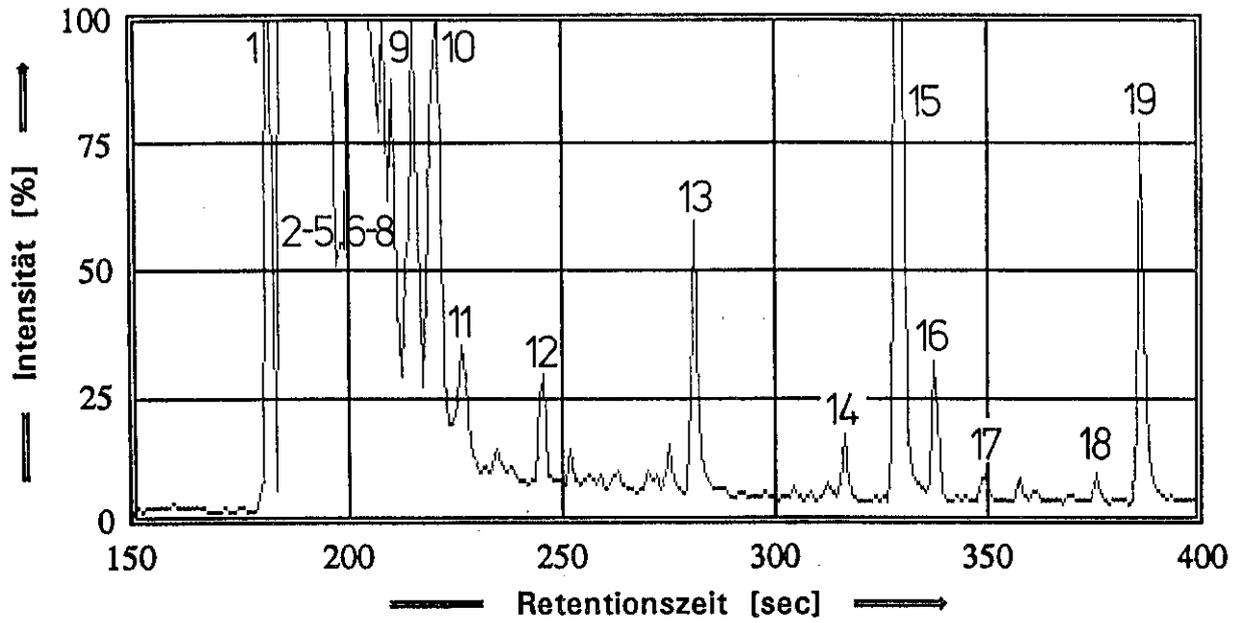


Bild 13a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum nach 1½ Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $\ell = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 220 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	} ?
⋮	⋮	
14	317	} ?
15	330	
16	338	} ?
⋮	⋮	
20	421	} ?
21	461	
22	582	C ₇ H ₈ Toluol
23	591	C ₈ H ₁₀ Ethyl-Benzol
24	593	C ₈ H ₁₀ p/m-Xylol
25	613	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol
26	618	C ₈ H ₈ Styrol
		C ₈ H ₁₀ o-Xylol

Bild 13b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

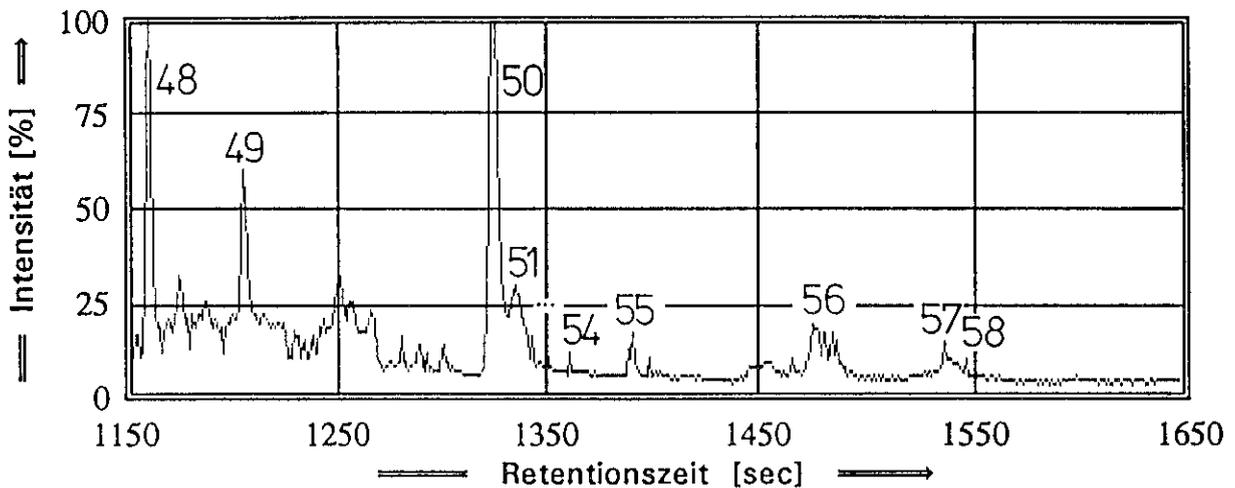
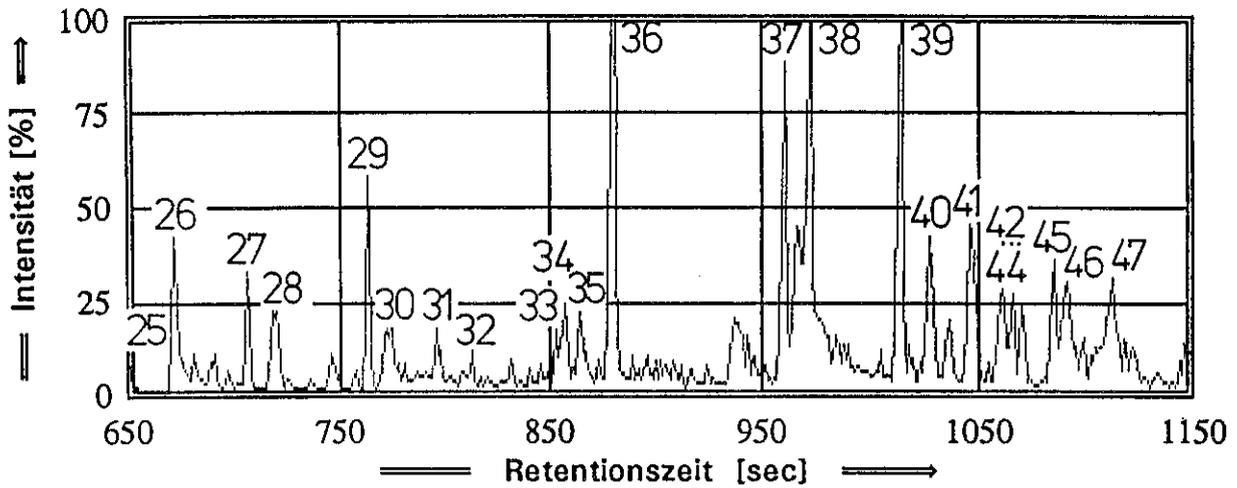
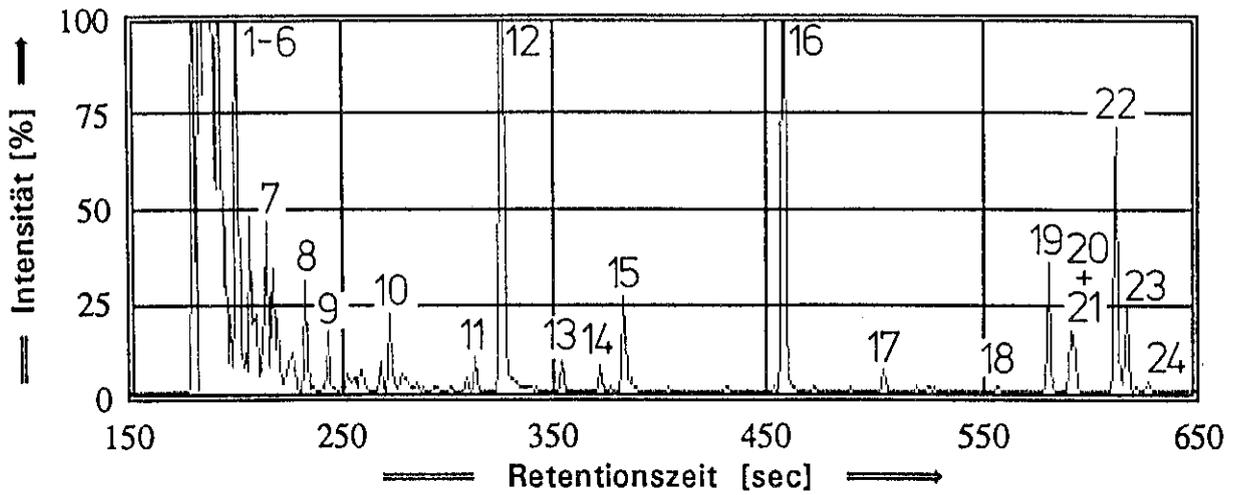


Bild 14a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum nach 5 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	}
∴	∴	
7	217	}
8	235	
9	246	
		?
10	275	C ₅ H ₆ O 2-Methyl-Furan
11	316	
		?
12	327	C ₆ H ₆ Benzol
13	357	}
∴	∴	
15	386	
16	460	C ₇ H ₈ Toluol
17	506	
		?
18	557	C ₆ H ₅ Cl Chlor-Benzol
19	581	C ₈ H ₁₀ Ethyl-Benzol
20	590	C ₈ H ₁₀ p/m-Xylol
21	593	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol
22	612	C ₈ H ₈ Styrol
23	617	C ₈ H ₁₀ o-Xylol
24	627	
		?
25	653	C ₉ H ₁₂ Isopropyl-Benzol
26	672	C ₇ H ₆ O Benzaldehyd
27	708	
		?
28	718	C ₈ H ₆ O Benzo-Furan
29	765	C ₉ H ₈ 4-Ethinyl-Toluol
30	777	C ₈ H ₈ O 2-Methyl-Benzaldehyd
31	798	
		?

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorigen Seite

32	815	C_9H_8O	3-Phenyl-Acrolein
33	854	$C_{10}H_{10}$	3-Methyl-Inden
34	858	$C_{10}H_{10}$	(1-Methylen-2-Propenyl)-Benzol
35	865		?
36	880	$C_{10}H_8$	Naphthalin
37	960	$C_{11}H_{10}$	2-Methyl-Naphthalin
38	972	$C_{11}H_{10}$	1,4-Dihydro-1,4-Methano-Naphthalin
39	1014	$C_{12}H_{10}$	2-Ethenyl-Naphthalin
40	1028		?
41	1045		?
42	1061	$C_{12}H_{12}$	1,2-Dimethyl-Naphthalin
43	1065	$C_{12}H_8$	Acenaphthylen
44	1070	$C_{12}H_{12}$	1,8-Dimethyl-Naphthalin
45	1084	$C_{13}H_{12}$	1-(2-Propenyl)-Naphthalin
46	1090		?
47	1112	$C_{12}H_8O$	1-Phenyl-2,4-Hexadiin-1-on
48	1159	$C_{13}H_{10}$	Fluoren
49	1203	$C_{15}H_{16}$	1,3-Diphenyl-Propan
50	1321	$C_{14}H_{10}$	Phenanthren
51	1334	}	?
⋮	⋮		
54	1358		
55	1389	$C_{16}H_{12}$	1,4-Dihydro-1,4-Etheno-Anthracen
56	1481	$C_{15}H_{12}$	2-Phenyl-Inden
57	1532	$C_{16}H_{12}$	1-Phenyl-Naphthalin
58	1542		?

Bild 14b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

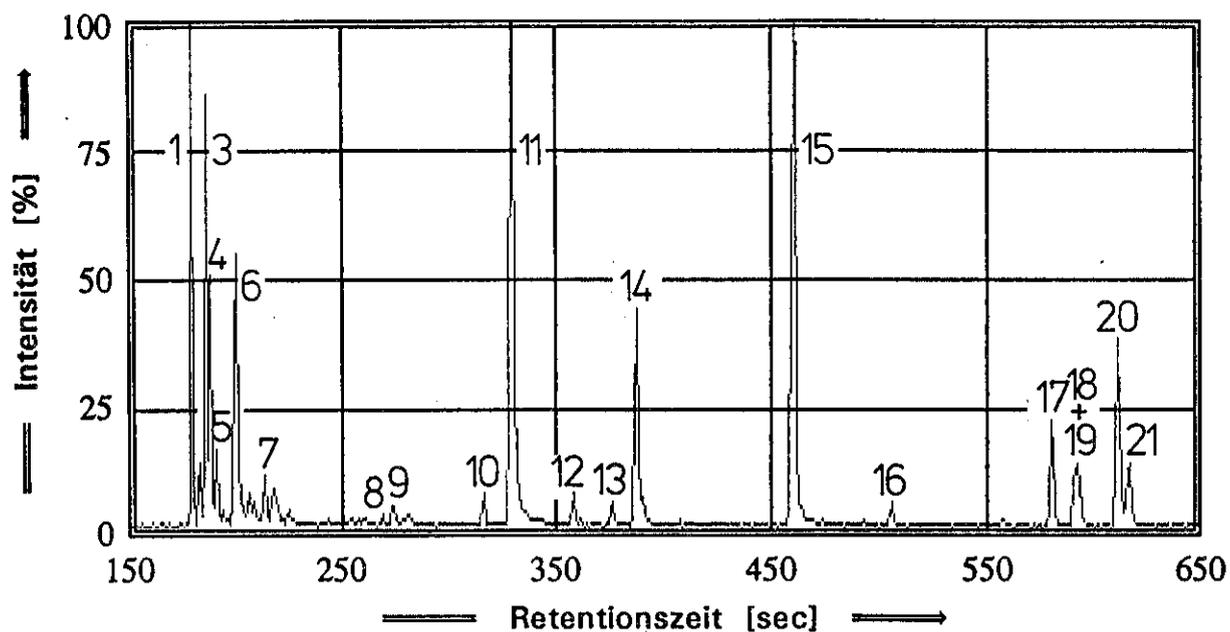


Bild 15a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von PVC-Hartschaum während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $\ell = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 220 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	?
2	187	?
3	190	CH ₃ Cl Chlor-Methan
4	192	?
5	195	?
6	204	C ₄ H ₁₀ O ₂ 1-Methoxy-2-Propanol
7	217	?
8	271	?
9	276	C ₅ H ₆ O 2-Methyl-Furan
10	317	?
11	329	C ₆ H ₆ Benzol
12	358	}
13	371	
14	387	
15	461	C ₇ H ₈ Toluol
16	507	?
17	581	C ₈ H ₁₀ Ethyl-Benzol
18	591	C ₈ H ₁₀ p/m-Xylol
19	593	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol
20	612	C ₈ H ₈ Styrol
21	618	C ₈ H ₁₀ o-Xylol

Bild 15b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

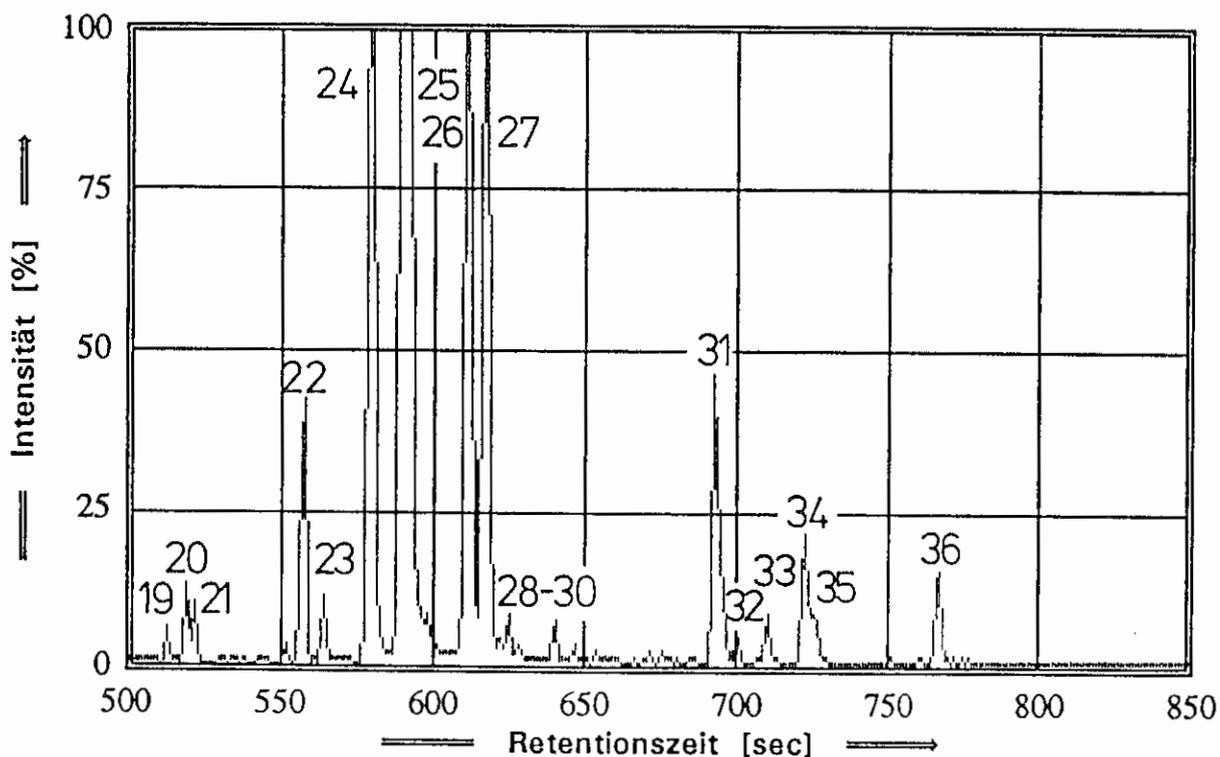
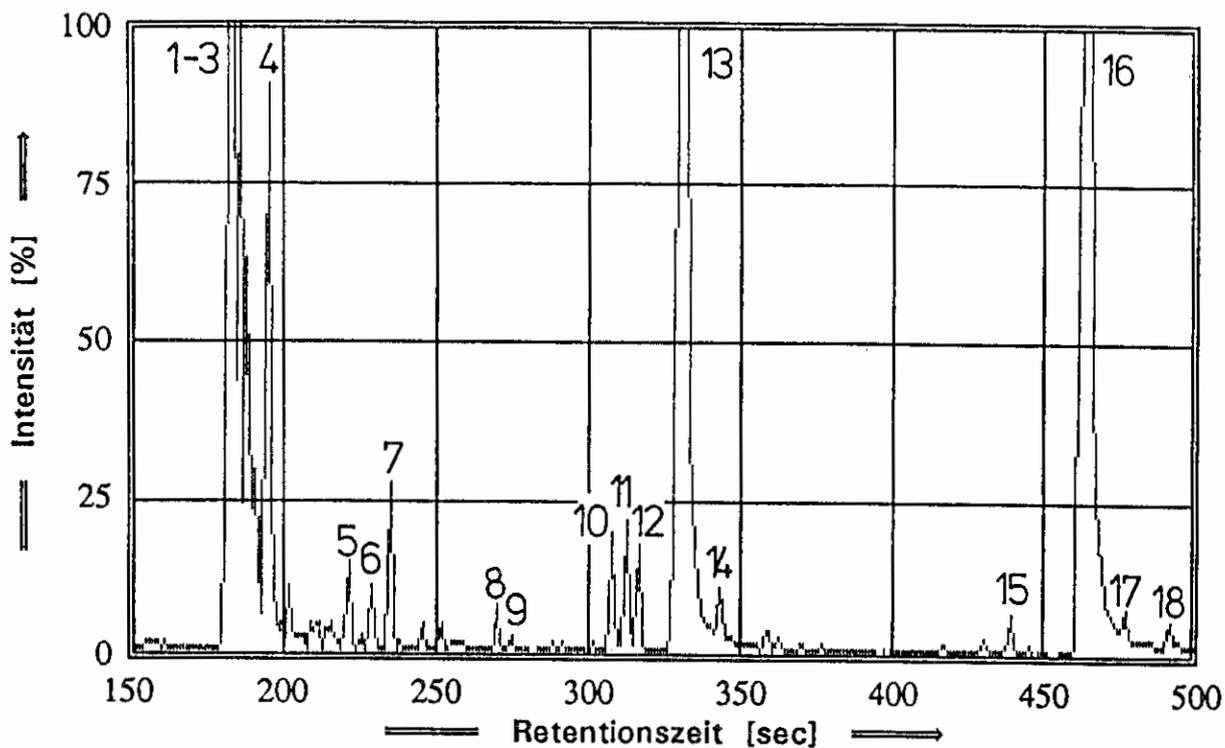


Bild 16a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Xylol nach ¼ Minute Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) – 15 °C/min – 220 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	183	C_3F_6	Hexafluor-Propen
2	187		?
3	192		?
4	196	C_4H_4	1-Buten-3-in
5	223	C_5H_8	3-Methyl-1-Butin
6	230		?
7	236	C_5H_6	1-Penten-3-in
8	271		?
9	276	C_5H_6O	2-Methyl-Furan
10	308	C_6H_6	1,5-Hexadien-3-in
11	313	C_6H_8	1-Methyl-1,3-Cyclopentadien
12	317	C_6H_8	1,4-Cyclohexadien
13	330	C_6H_6	Benzol
14	343	C_6H_8	1,3-Cyclohexadien
15	438	C_7H_{12}	1-Methyl-2-Methylen-Cyclopentan
16	462	C_7H_8	Toluol
17	476		?
18	490		?

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorigen Seite

19	516	C_8H_{16}	1,3-Dimethyl-Cyclohexan
20	522		?
21	525		?
22	560	C_8H_{16}	Ethyl-Cyclohexan
23	567	$C_{10}H_{20}$	1-Ethyl-2,4-Dimethyl-Cyclohexan
24	583	C_8H_{10}	Ethyl-Benzol
25	593	C_8H_{10}	p/m-Xylol
26	613	C_8H_8	Styrol
27	618	C_8H_{10}	o-Xylol
28	625	}	?
⋮	⋮		
30	647		
31	692	C_9H_{12}	2-Ethyl-Toluol
32	700	C_9H_{12}	2,4-Dimethyl-2,3-Heptadien-5-in
33	710	C_9H_{12}	1,2,3-Trimethyl-Benzol
34	722	C_9H_{10}	2-Propenyl-Benzol
35	725	C_9H_{10}	2-Methyl-Styrol
36	767	C_9H_8	1-Propinyl-Benzol

Bild 16b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

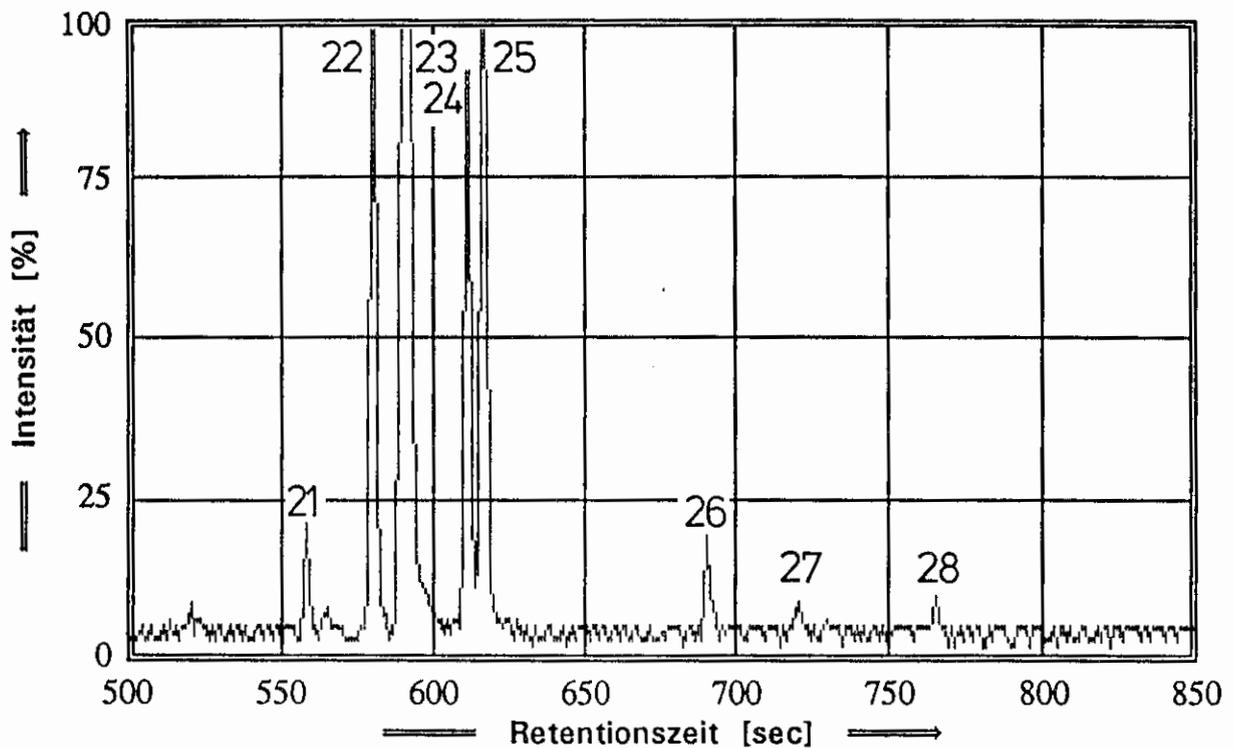
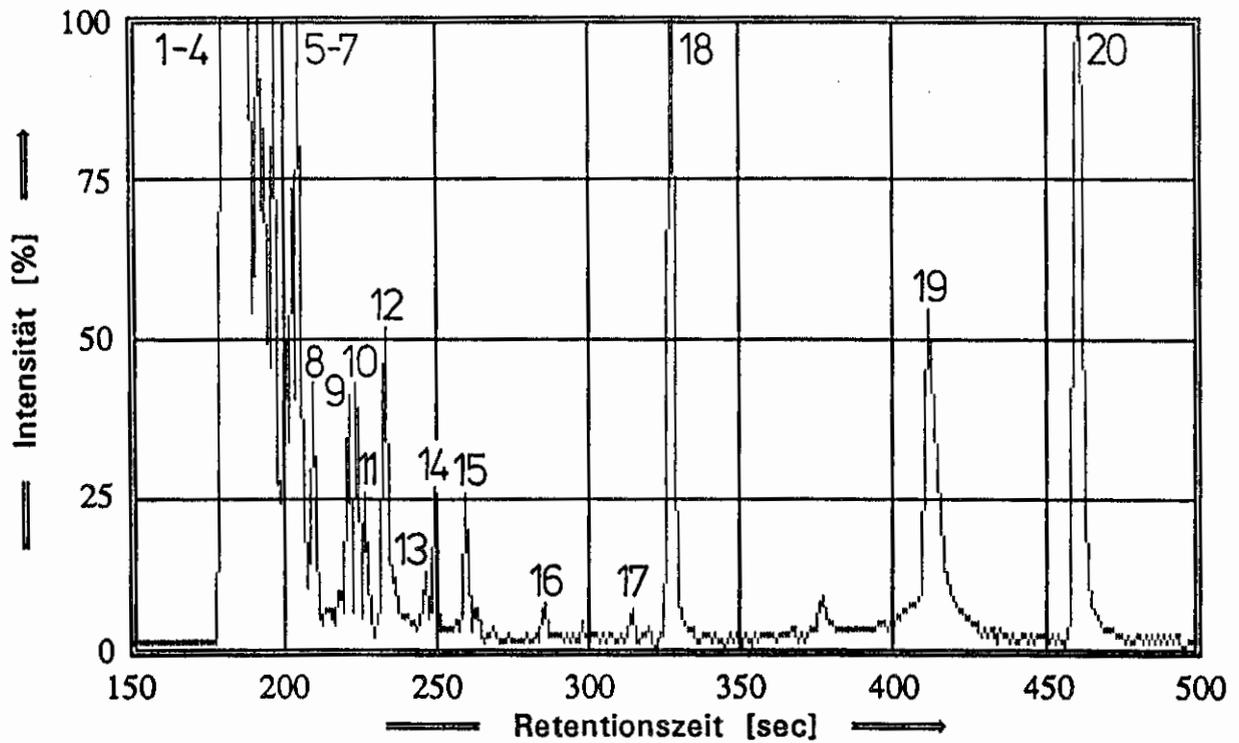


Bild 17a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Xylol während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	192	} ?
⋮	⋮	
17	318	
18	331	C_6H_6 Benzol
19	414	C_3F_6O Hexafluor-2-Propanon
20	462	C_7H_8 Toluol
21	561	C_8H_{16} Ethyl-Cyclohexan
22	583	C_8H_{10} Ethyl-Benzol
23	593	C_8H_{10} p/m-Xylol
24	613	C_8H_8 Styrol
25	619	C_8H_{10} o-Xylol
26	693	C_9H_{12} 2-Ethyl-Toluol
27	723	?
28	767	C_9H_8 1-Propinyl-Benzol

Bild 17b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

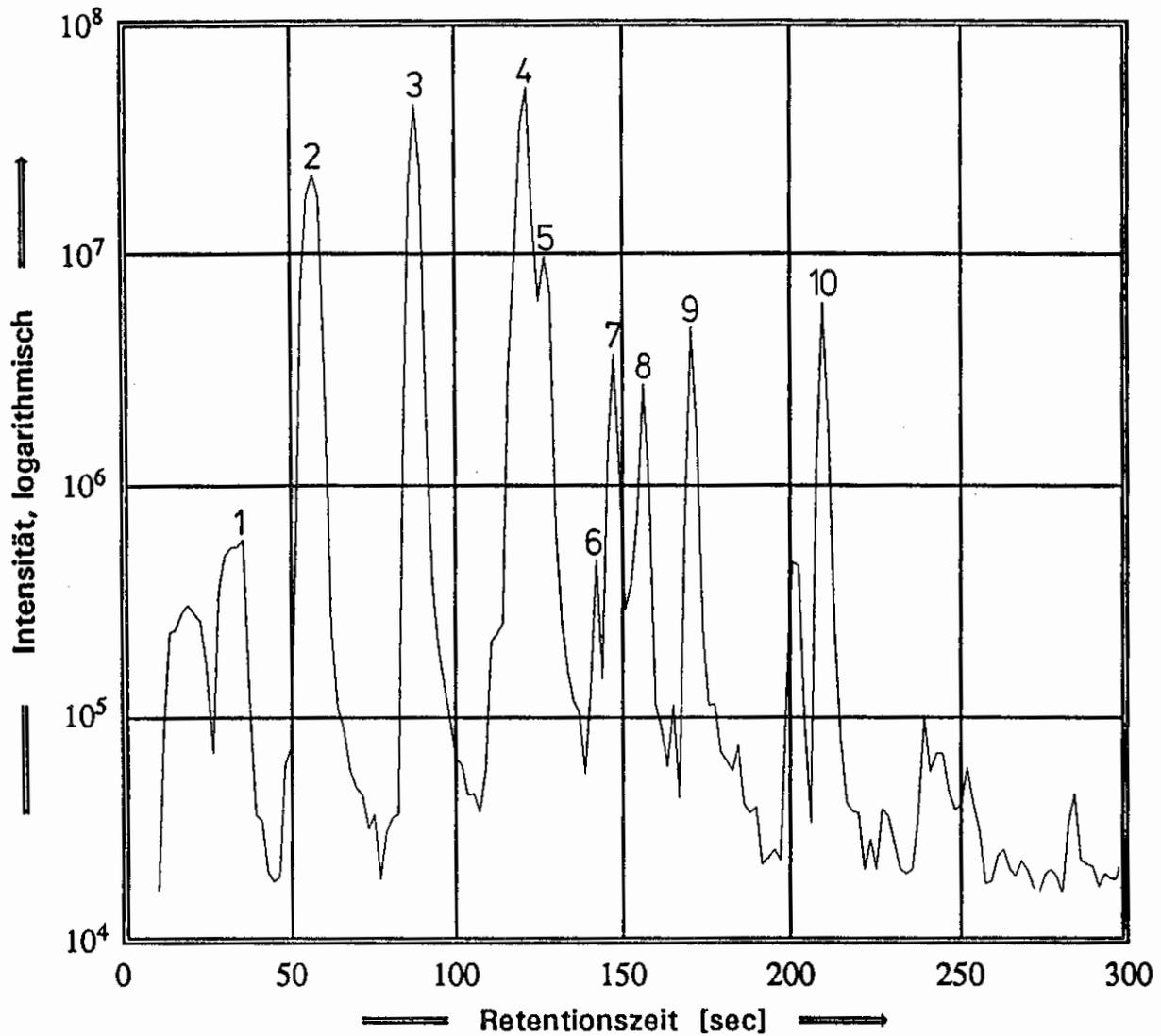


Bild 18a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Xylol nach ½ Minute Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $l = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	35	C_5H_6 Cyclopentadien
2	56	C_6H_6 Benzol
3	87	C_7H_8 Toluol
4	123	C_8H_{10} Xylol
5	127	C_8H_8 Styrol
6	143	C_7H_6O Benzaldehyd
7	148	C_9H_{12} Propyl-Benzol
8	157	C_9H_{10} Methyl-Styrol
9	172	C_9H_8 Inden
10	211	$C_{10}H_8$ Naphthalin

Bild 18b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

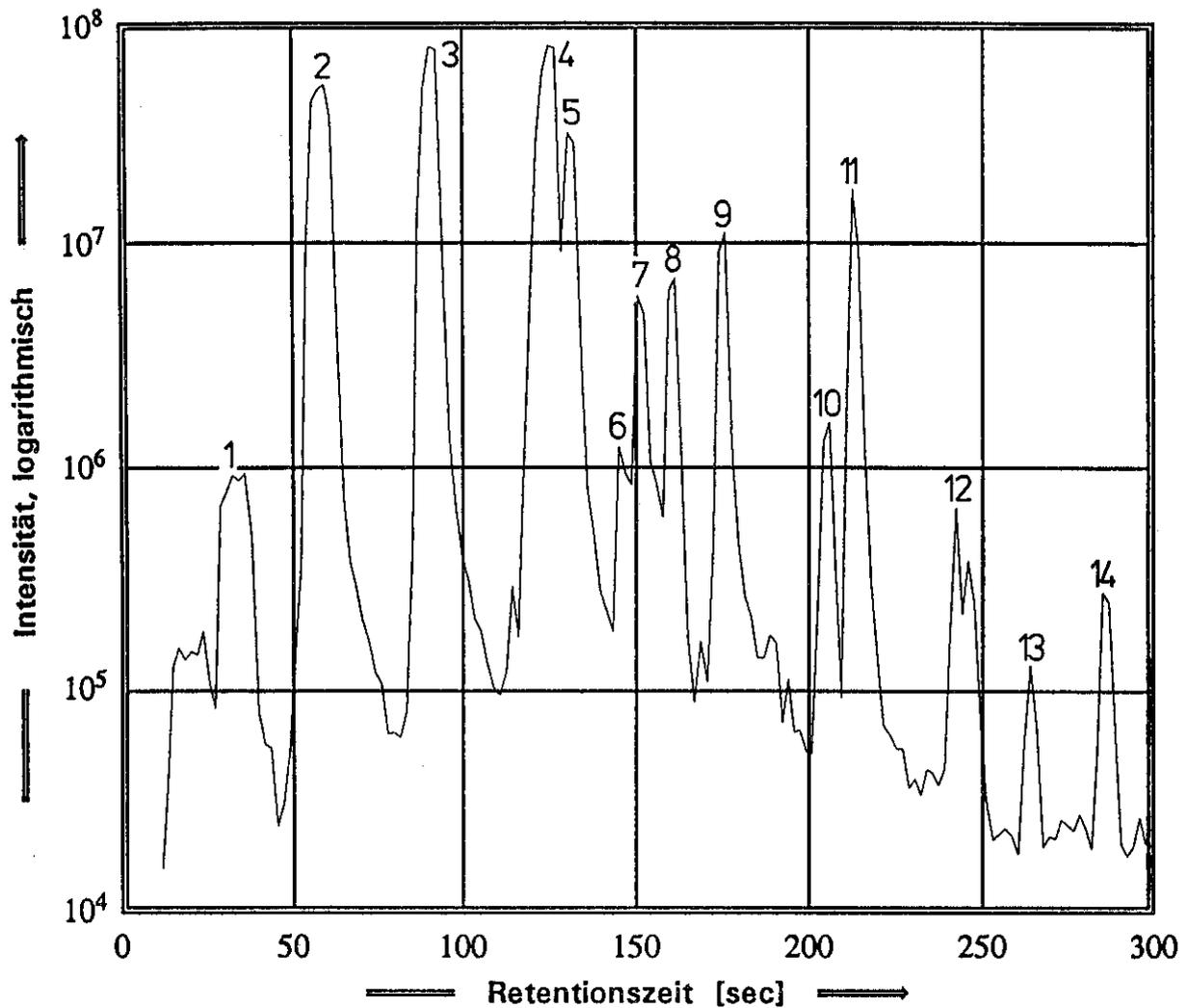


Bild 19a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Xylol nach 1¼ Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $l = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	32	C_5H_6	Cyclopentadien
2	59	C_6H_6	Benzol
3	89	C_7H_8	Toluol
4	124	C_8H_{10}	Xylol
5	129	C_8H_8	Styrol
6	144	C_7H_6O	Benzaldehyd
7	149	C_9H_{12}	Propyl-Benzol
8	160	C_9H_{10}	Methyl-Styrol
9	174	C_9H_8	Inden
10	205	$C_{10}H_{10}$	Methyl-Inden
11	213	$C_{10}H_8$	Naphthalin
12	247	$C_{11}H_{10}$	Methyl-Naphthalin
13	265	?	PAK (Molekulargewicht 154)
14	287	?	PAK (Molekulargewicht 152)

Bild 19b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

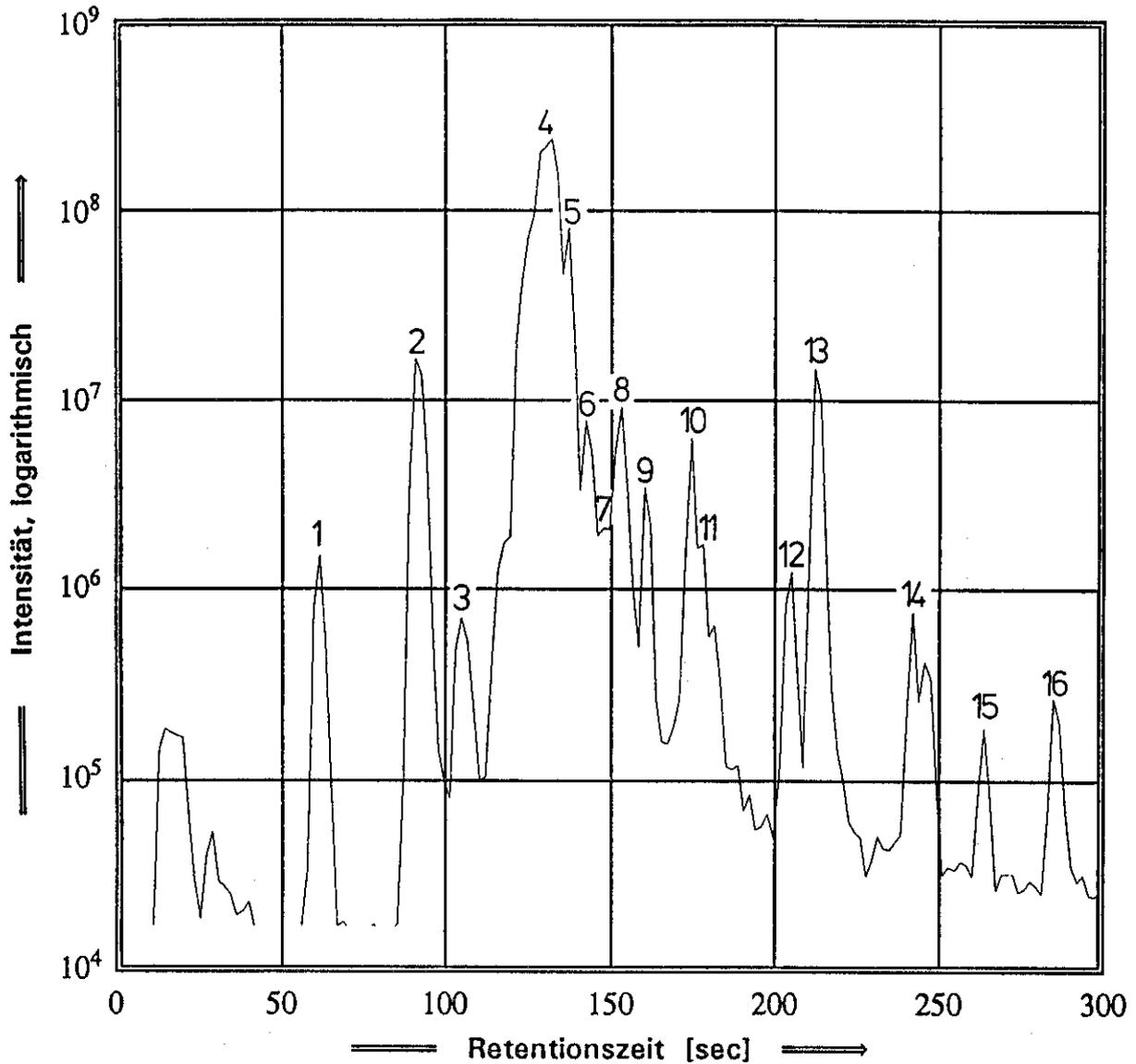


Bild 20a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Xylol während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $\ell = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	60	C_6H_6	Benzol
2	89	C_7H_8	Toluol
3	103	C_8H_{18}	Oktan
4	130	C_8H_{10}	p/m-Xylol
5	135	C_8H_{10}	o-Xylol
6	141	C_9H_{12}	Isopropyl-Benzol
7	147	C_7H_6O	Benzaldehyd
8	152	C_9H_{12}	Propyl-Benzol
9	159	C_9H_{10}	Methyl-Styrol
10	174	C_9H_8	Inden
11	181	C_8H_8O	Methyl-Benzaldehyd
12	205	$C_{10}H_{10}$	Methyl-Inden
13	212	$C_{10}H_8$	Naphthalin
14	246	$C_{11}H_{10}$	Methyl-Naphthalin
15	264	?	PAK (Molekulargewicht 154)
16	286	?	PAK (Molekulargewicht 152)

Bild 20b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

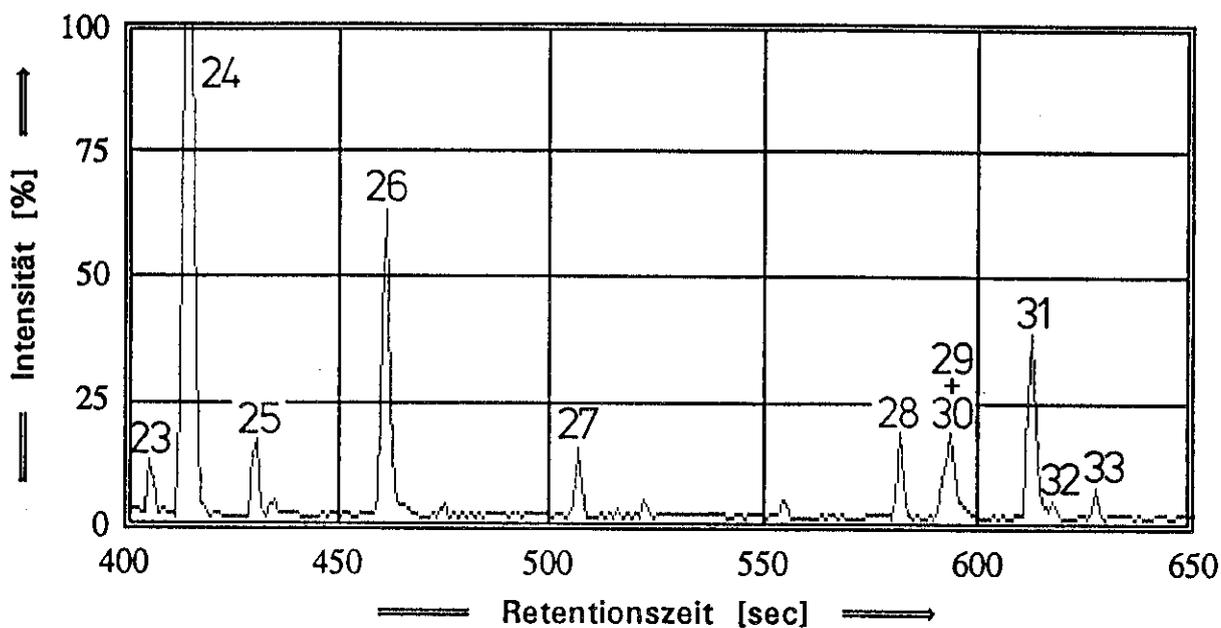
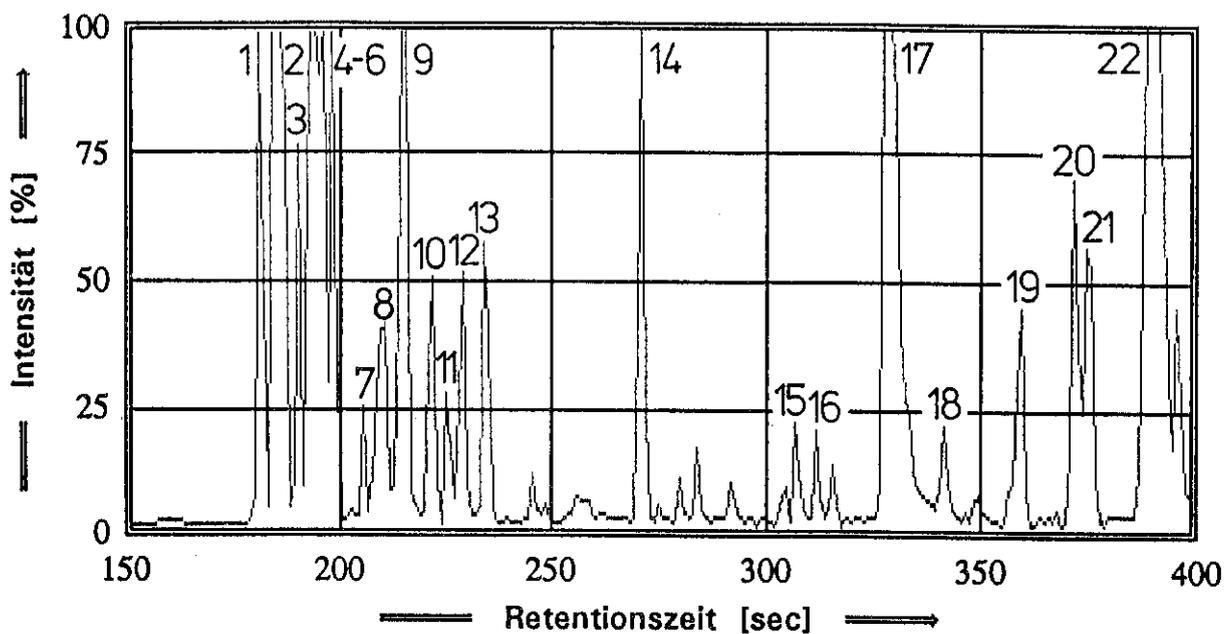


Bild 21a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polyethylen nach 5½ Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 220 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	} ?
⋮	⋮	
15	307	} ?
16	312	
17	329	C ₆ H ₈ 1-Methyl-1,3-Cyclopentadien
18	342	C ₆ H ₆ Benzol
19	360	C ₆ H ₈ 1,3-Cyclohexadien
⋮	⋮	} ?
21	375	
22	391	C ₇ H ₁₆ Heptan
23	407	?
24	415	C ₉ H ₁₈ 1-Methyl-2-Propyl-Cyclopentan
25	430	C ₁₀ H ₂₀ (3-Methyl-Butyl)-Cyclopentan
26	461	C ₇ H ₈ Toluol
27	506	?
28	581	C ₈ H ₁₀ Ethyl-Benzol
29	591	C ₈ H ₁₀ p/m-Xylol
30	593	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol
31	612	C ₈ H ₈ Styrol
32	617	C ₈ H ₁₀ o-Xylol
33	627	?

Bild 21b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

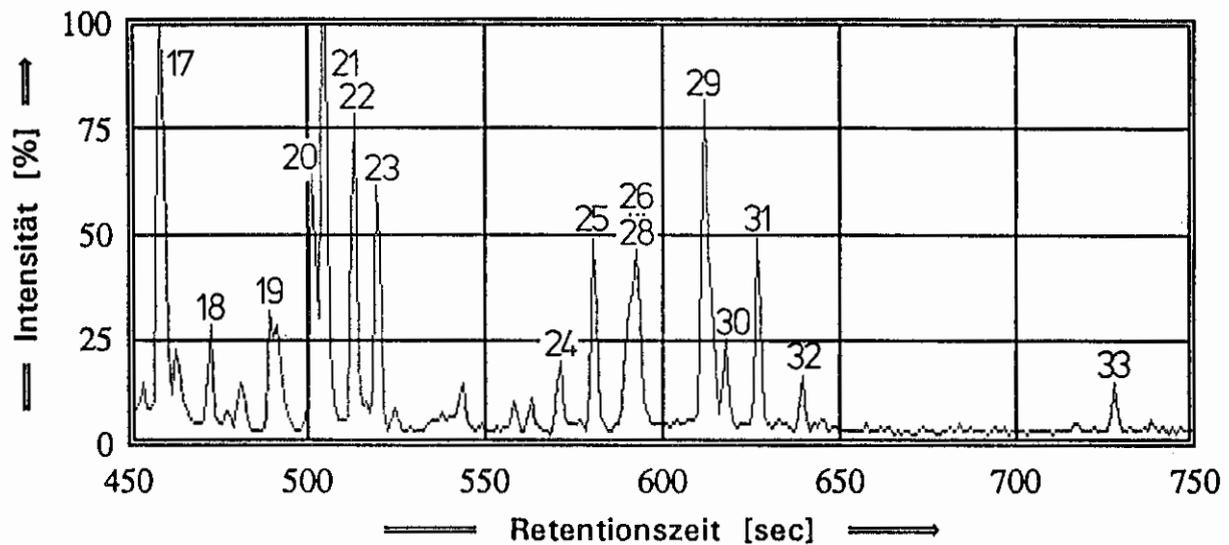
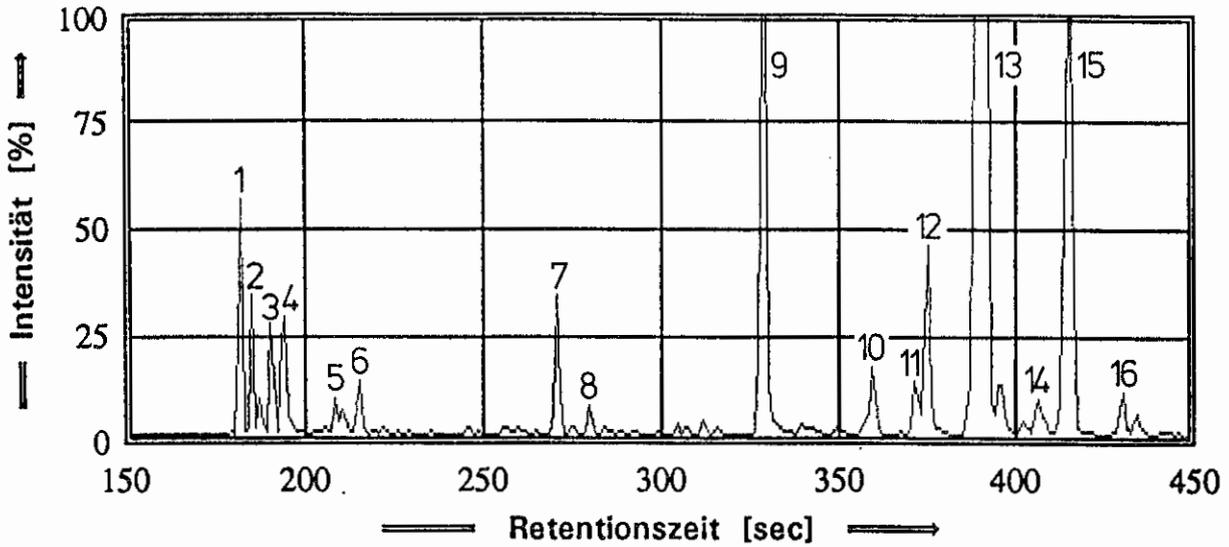


Bild 22a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polyethylen während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	} ?
∴	∴	
6	216	} ?
7	270	
8	280	C ₆ H ₁₂ Methyl-Cyclopentan
9	328	C ₆ H ₆ Benzol
10	359	} ?
∴	∴	
12	375	} ?
13	391	
14	406	C ₇ H ₁₆ Heptan
15	415	? ?
16	430	C ₉ H ₁₈ 1-Methyl-2-Propyl-Cyclopentan
17	460	C ₁₀ H ₂₀ (3-Methyl-Butyl)-Cyclopentan
18	475	C ₇ H ₈ Toluol
∴	∴	} ?
24	571	
25	580	C ₈ H ₁₀ Ethyl-Benzol
26	589	? ?
27	591	C ₈ H ₁₀ p/m-Xylol
28	593	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol
29	611	C ₈ H ₈ Styrol
30	617	C ₈ H ₁₀ o-Xylol
31	626	} ?
∴	∴	
33	727	

Bild 22b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

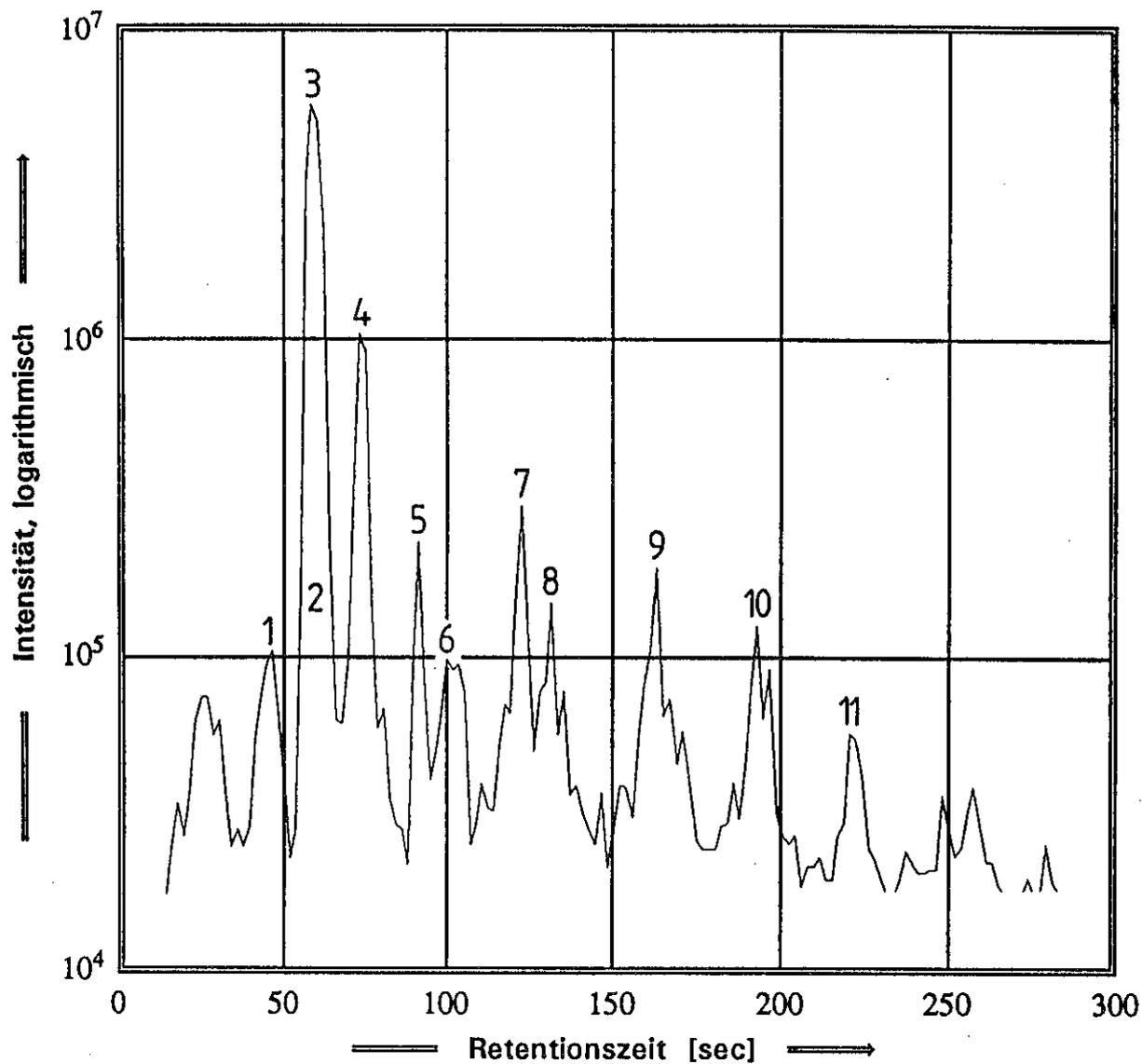


Bild 23a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polyethylen während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $l = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 sec) - $\approx 35 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $240 \text{ }^\circ\text{C}$

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	46	C_6H_{12}	Hexen
2	59	C_6H_6	Benzol
3	59	C_6D_6	Benzol
4	73	C_7H_{16}	Heptan
5	91	C_7H_8	Toluol
6	100	?	Kohlenwasserstoff
7	124	C_8H_{10}	p/m-Xylol
8	133	C_8H_{10}	o-Xylol
9	164	C_9H_{12}	Propyl-Benzol
10	194	?	Kohlenwasserstoff
11	222	?	Kohlenwasserstoff

Bild 23b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

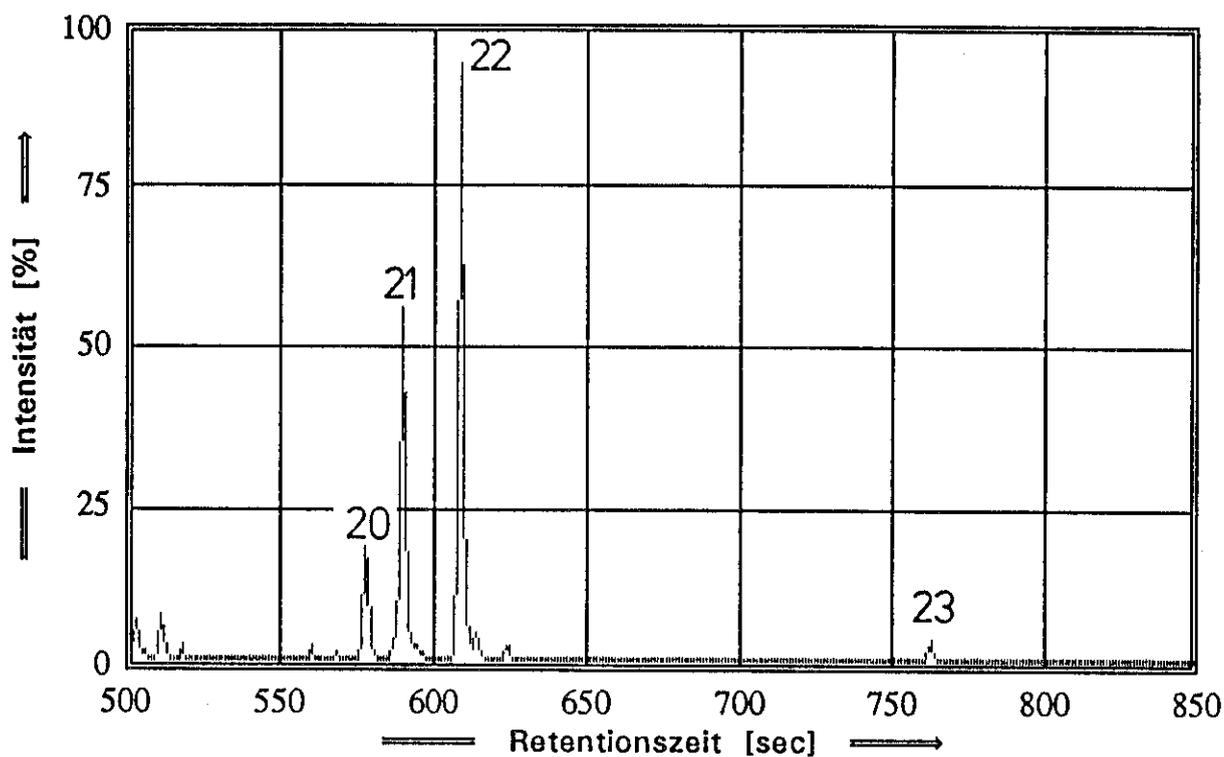
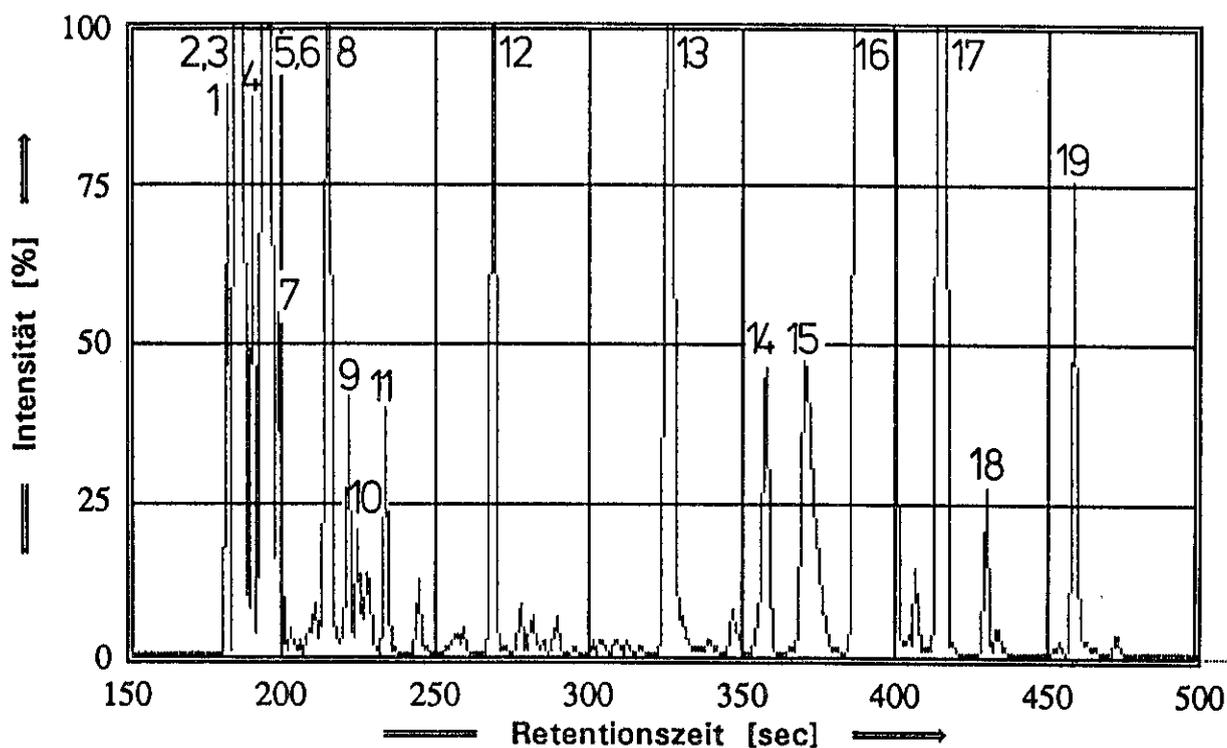


Bild 24a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polyoxymethylen nach 4¼ Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $\ell = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 220 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	183	} ?
⋮	⋮	
12	269	
13	327	C ₆ H ₆ Benzol
14	358	?
15	371	?
16	395	C ₇ H ₁₆ Heptan
17	416	C ₇ H ₁₄ Methyl-Cyclohexan
18	430	C ₁₀ H ₂₀ (3-Methyl-Butyl)-Cyclopentan
19	459	C ₇ H ₈ Toluol
20	578	C ₈ H ₁₀ Ethyl-Benzol
21	590	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol
22	609	C ₈ H ₈ Styrol
23	763	C ₉ H ₈ 1-Propinyl-Benzol

Bild 24b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

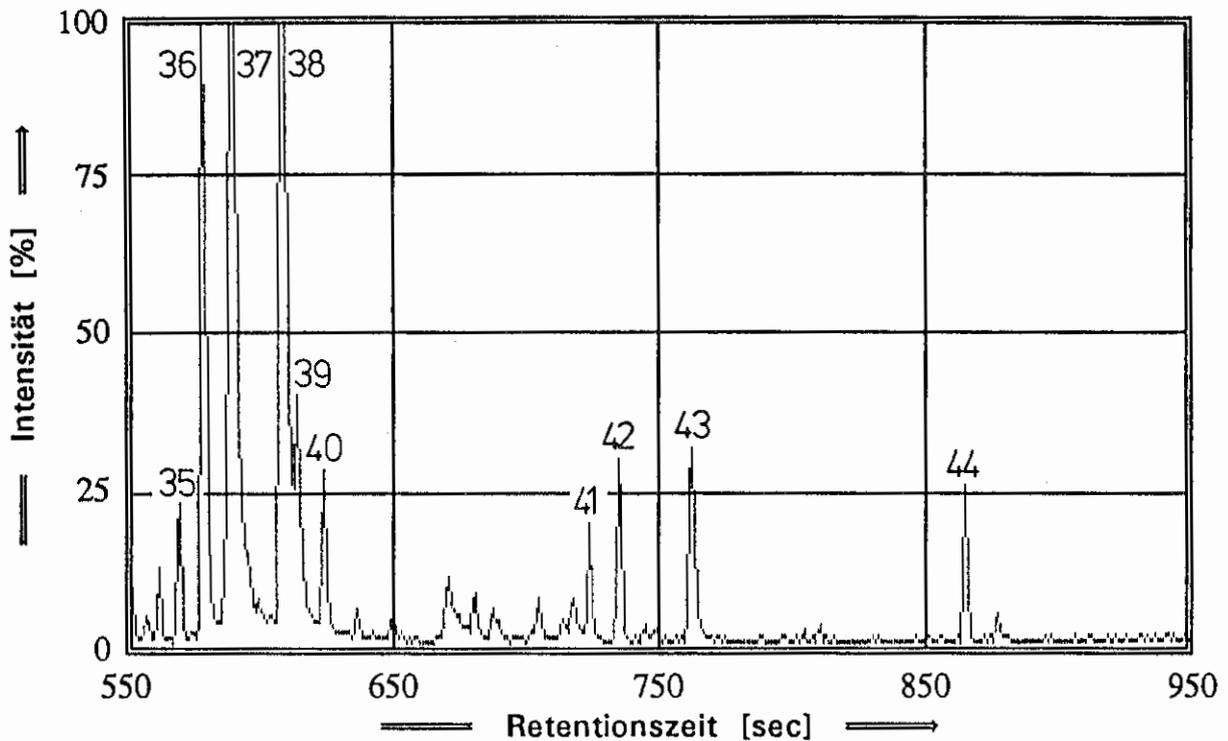
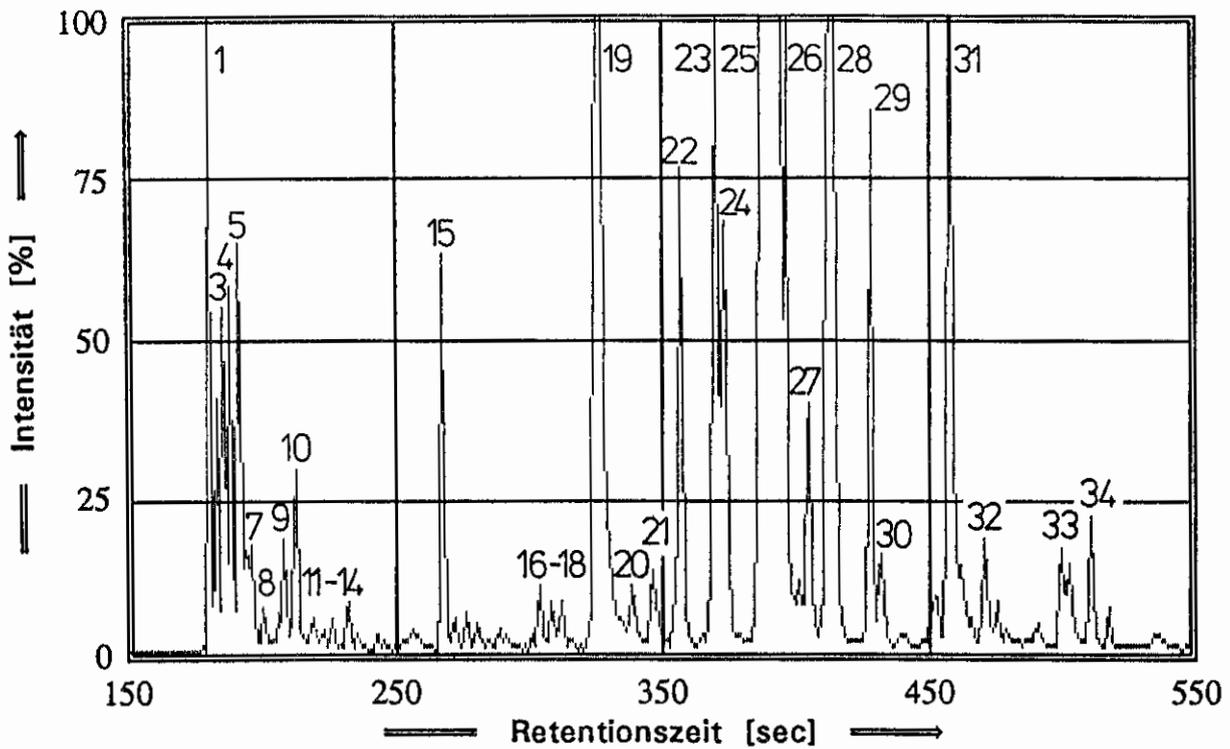


Bild 25a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polyoxymethylen während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $\ell = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $220 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	183	}	?
⋮	⋮		
18	315	}	?
19	329		
20	341	}	?
⋮	⋮		
24	375	}	?
25	395		
26	398	}	?
⋮	⋮		
30	434	}	?
31	460		
32	473	}	?
⋮	⋮		
35	570	}	?
36	579		
37	591	C ₈ H ₆ Ethinyl-Benzol	
38	610	C ₈ H ₈ Styrol	
39	615	}	?
⋮	⋮		
42	736	}	?
43	763		
44	866		?

Bild 25b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

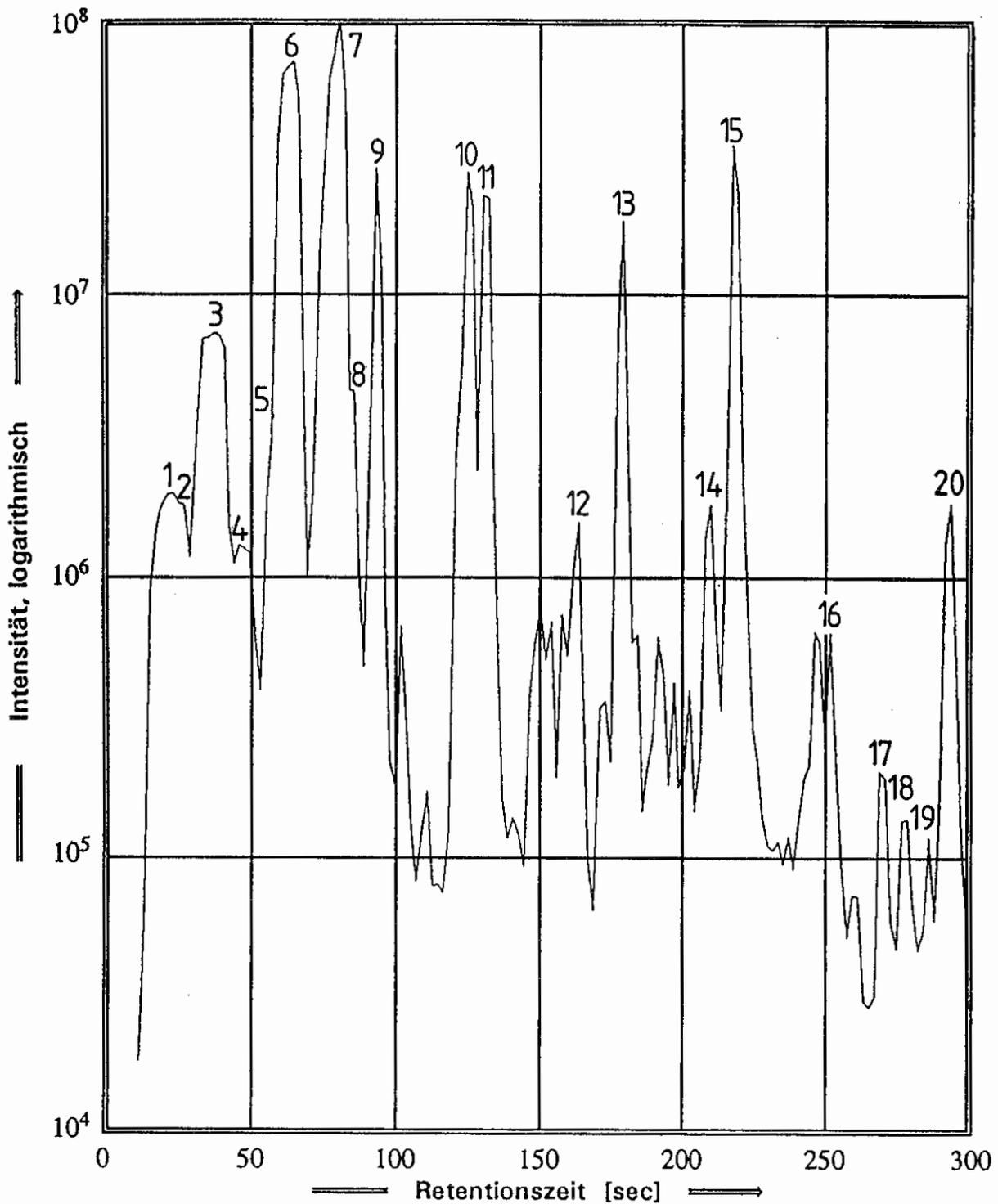


Bild 26a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polyoxymethylen nach 5 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $\ell = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	23	CH ₃ Cl	Chlor-Methan
2	26	C ₅ H ₁₀	Cyclopentan
3	37	C ₅ H ₆	Cyclopentadien
4	45	C ₆ H ₁₄ O	Hexanol
5	56	C ₆ H ₈	Cyclohexadien
6	63	C ₆ H ₆	Benzol
7	79	C ₇ H ₁₆	Heptan
8	84	C ₇ H ₁₄	Methyl-Cyclohexan
9	92	C ₇ H ₈	Toluol
10	124	C ₈ H ₆	Ethynyl-Benzol
11	130	C ₈ H ₈	Styrol
12	163	C ₉ H ₁₀	Methyl-Styrol
13	178	C ₉ H ₈	Inden
14	209	C ₁₀ H ₁₀	Methyl-Inden
15	217	C ₁₀ H ₈	Naphthalin
16	252	C ₁₁ H ₁₀	Methyl-Naphthalin
17	270	?	PAK (Molekulargewicht 154)
18	278	?	PAK (Molekulargewicht 152)
19	287	?	PAK (Molekulargewicht 154)
20	294	?	PAK (Molekulargewicht 152)

Bild 26b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

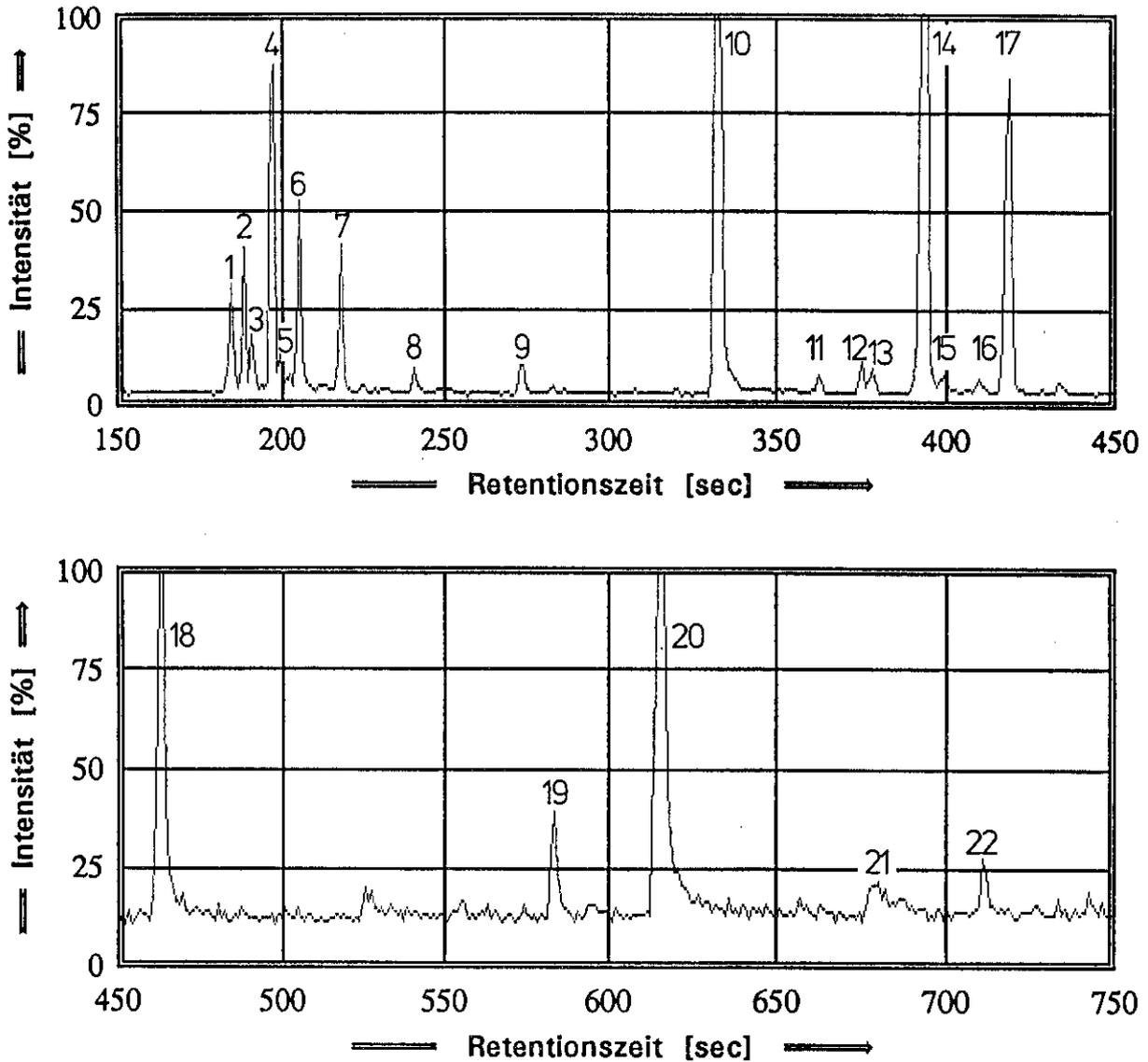


Bild 27a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polystyrol nach 2 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $\ell = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 150 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	185	C_2H_6O	Dimethyl-Ether
2	189	}	?
⋮	⋮		
6	206		
7	219	C_5H_{10}	1,1-Dimethyl-Cyclopropan
8	241		?
9	273	C_6H_{12}	2-Methyl-1-Penten
10	332	C_6H_6	Benzol
11	362	}	?
⋮	⋮		
13	378		
14	392	C_7H_{16}	Heptan
15	399		?
16	409	C_7H_{14}	2-Hepten
17	418	C_8H_{16}	1-Methyl-2-Propyl-Cyclopentan
18	463	C_7H_8	Toluol
19	584	C_8H_{10}	Ethyl-Benzol
20	615	C_8H_8	Styrol
21	678	C_7H_6O	Benzaldehyd
22	711	C_9H_{10}	Isopropenyl-Benzol

Bild 27b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

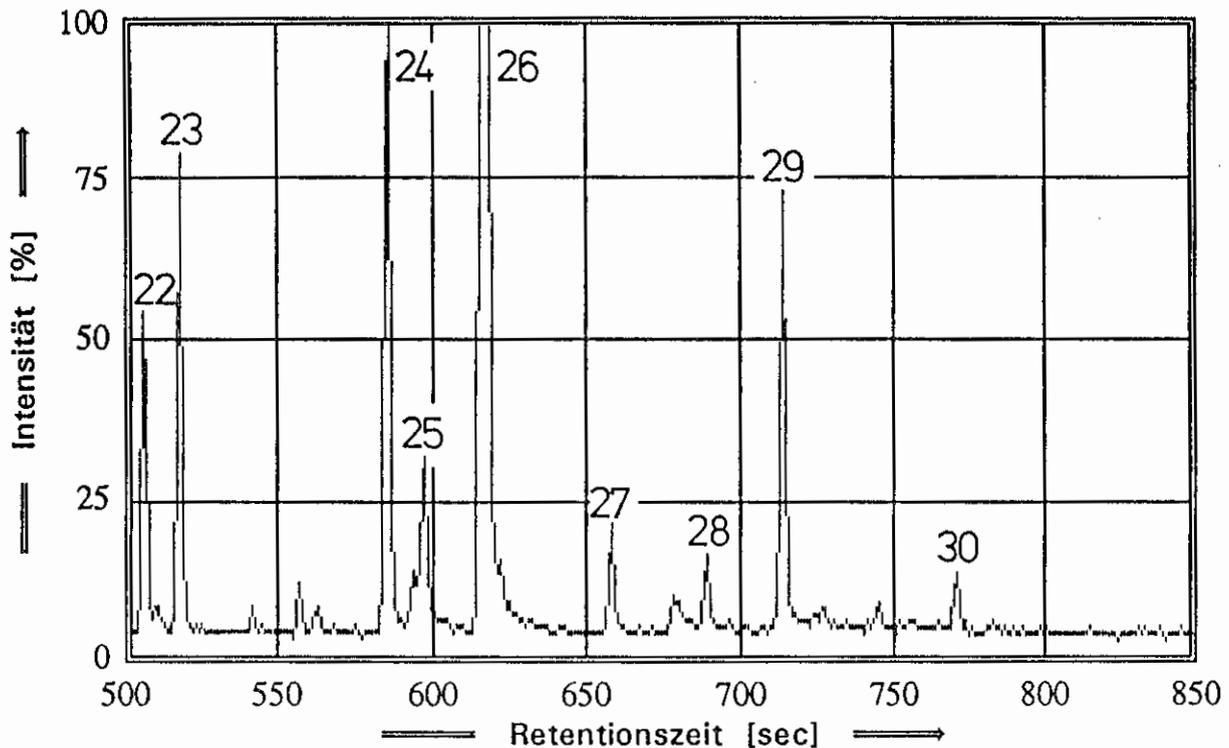
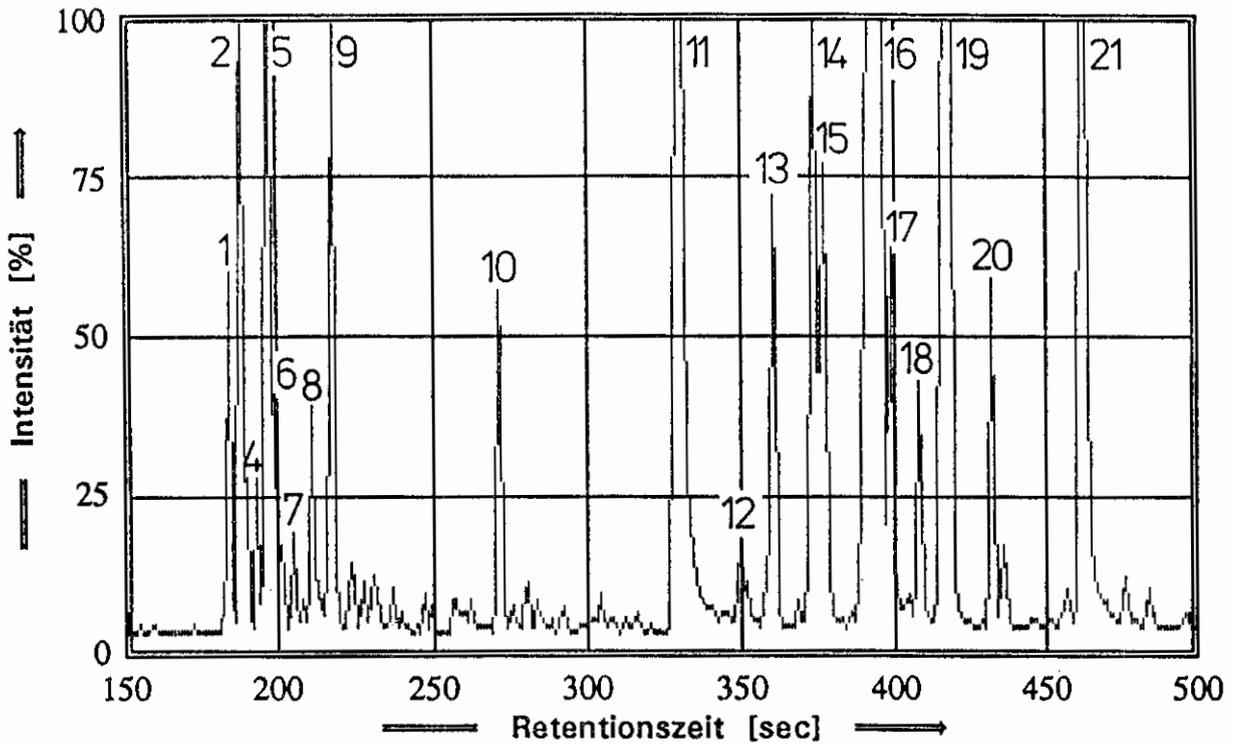


Bild 28a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polystyrol während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $\ell = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 150 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	185	C ₂ H ₆ O	Dimethyl-Ether
2	189	}	?
⋮	⋮		
4	194		
5	198	C ₄ H ₆	1,2-Butadien
6	201		?
7	206		?
8	212	C ₃ H ₄ O	Acrolein
9	219	C ₅ H ₁₀	1,1-Dimethyl-Cyclopropan
10	273	C ₆ H ₁₂	2-Methyl-1-Penten
11	332	C ₆ H ₆	Benzol
12	352	}	?
⋮	⋮		
15	378		
16	396	C ₇ H ₁₆	Heptan
17	400		?
18	409		?
19	418	C ₉ H ₁₈	1-Methyl-2-Propyl-Cyclopentan
20	433	C ₁₀ H ₂₀	(3-Methyl-Butyl)-Cyclopentan
21	463	C ₇ H ₈	Toluol
22	505		?
23	516	C ₆ H ₁₄ O ₃	1,2,6-Hexantriol
24	584	C ₈ H ₁₀	Ethyl-Benzol
25	596	C ₈ H ₆	Ethynyl-Benzol
26	614	C ₈ H ₈	Styrol
27	656	C ₉ H ₁₂	Isopropyl-Benzol
28	687	C ₉ H ₁₂	Propyl-Benzol
29	711	C ₉ H ₁₀	Isopropenyl-Benzol
30	769	C ₉ H ₈	1-Propinyl-Benzol

Bild 28b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

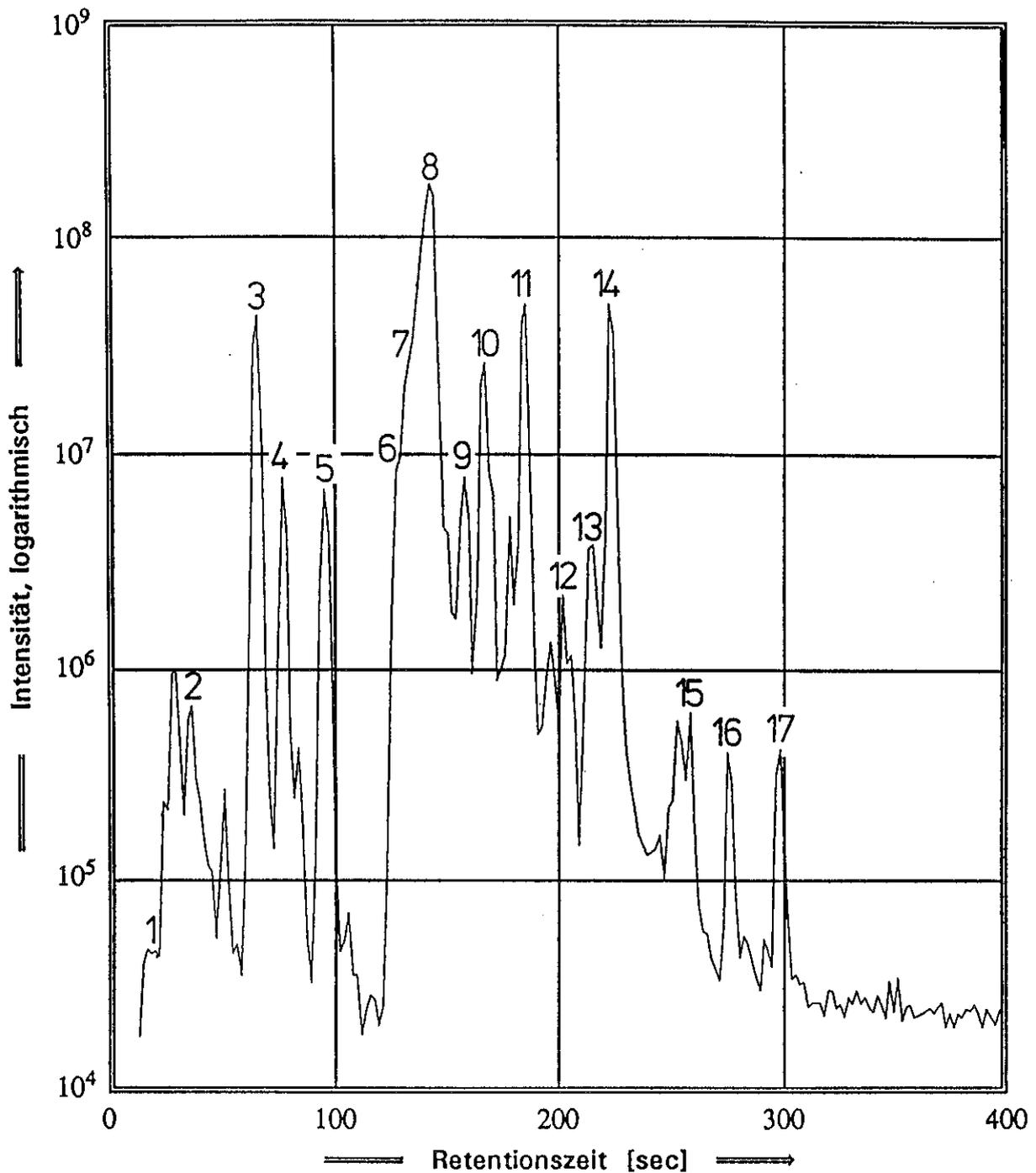


Bild 29a: Das an der TUHH gemessene Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polystyrol während des Löschens

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dickfilm-Quarzkapillarsäule (DB-1),
 $l = 5 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,32 \text{ mm}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Luft, Unterdruck am Säulenende $\approx -300 \text{ mbar}$,
- Temperaturprogramm: 30°C (15 sec) - $\approx 35^\circ\text{C}/\text{min}$ - 240°C

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	18	C_3H_6	Cyclopropan
2	34	C_5H_{10}	Cyclopentan
3	64	C_6H_6	Benzol
4	75	C_7H_{16}	Heptan
5	93	C_7H_8	Toluol
6	125	C_8H_{10}	Xylol
7	131	C_8H_6	Ethinyl-Benzol
8	140	C_8H_8	Styrol
9	154	C_9H_{12}	Propyl-Benzol
10	164	C_9H_{10}	Methyl-Styrol
11	182	C_9H_8	Inden
12	199	$C_{10}H_{10}$	Ethenyl-Styrol
13	212	$C_{10}H_{10}$	Methyl-Inden
14	220	$C_{10}H_8$	Naphthalin
15	255	$C_{11}H_{10}$	Methyl-Naphthalin
16	272	?	PAK (Molekulargewicht 154)
17	296	?	PAK (Molekulargewicht 152)

Bild 29b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

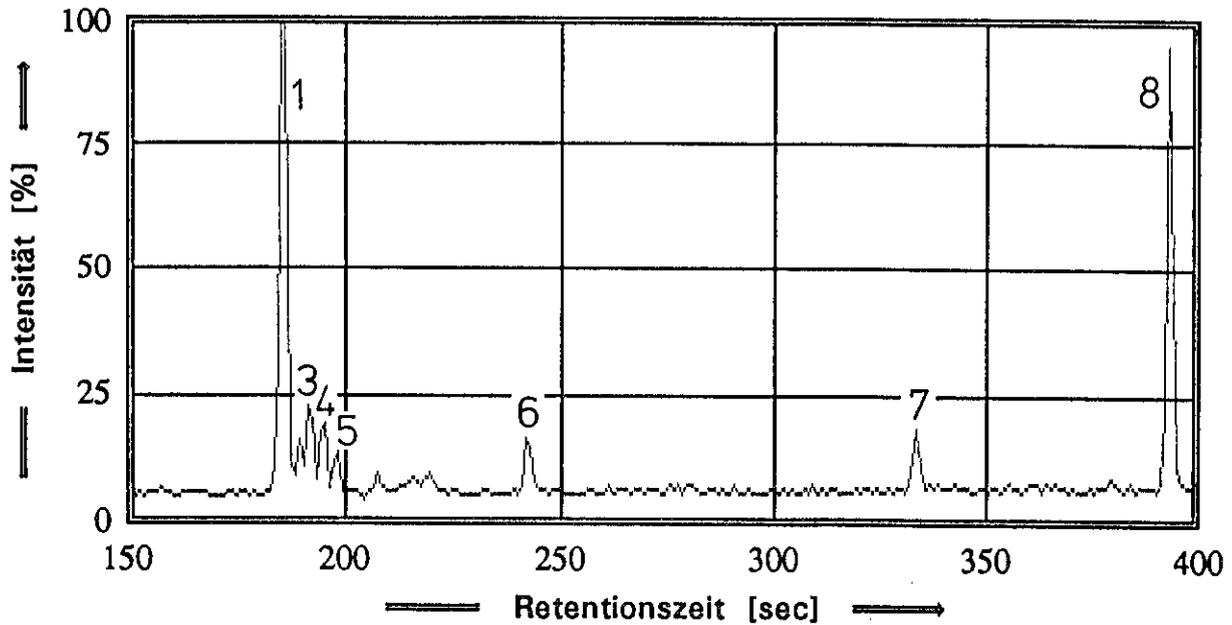


Bild 30a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polycarbonat nach 3¼ Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) – 15 °C/min – 150 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	186	C ₂ H ₆ O Ethanol
2	190	} ?
⋮	⋮	
6	242	
7	333	C ₆ H ₆ Benzol
8	393	C ₇ H ₁₆ Heptan

Bild 30b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

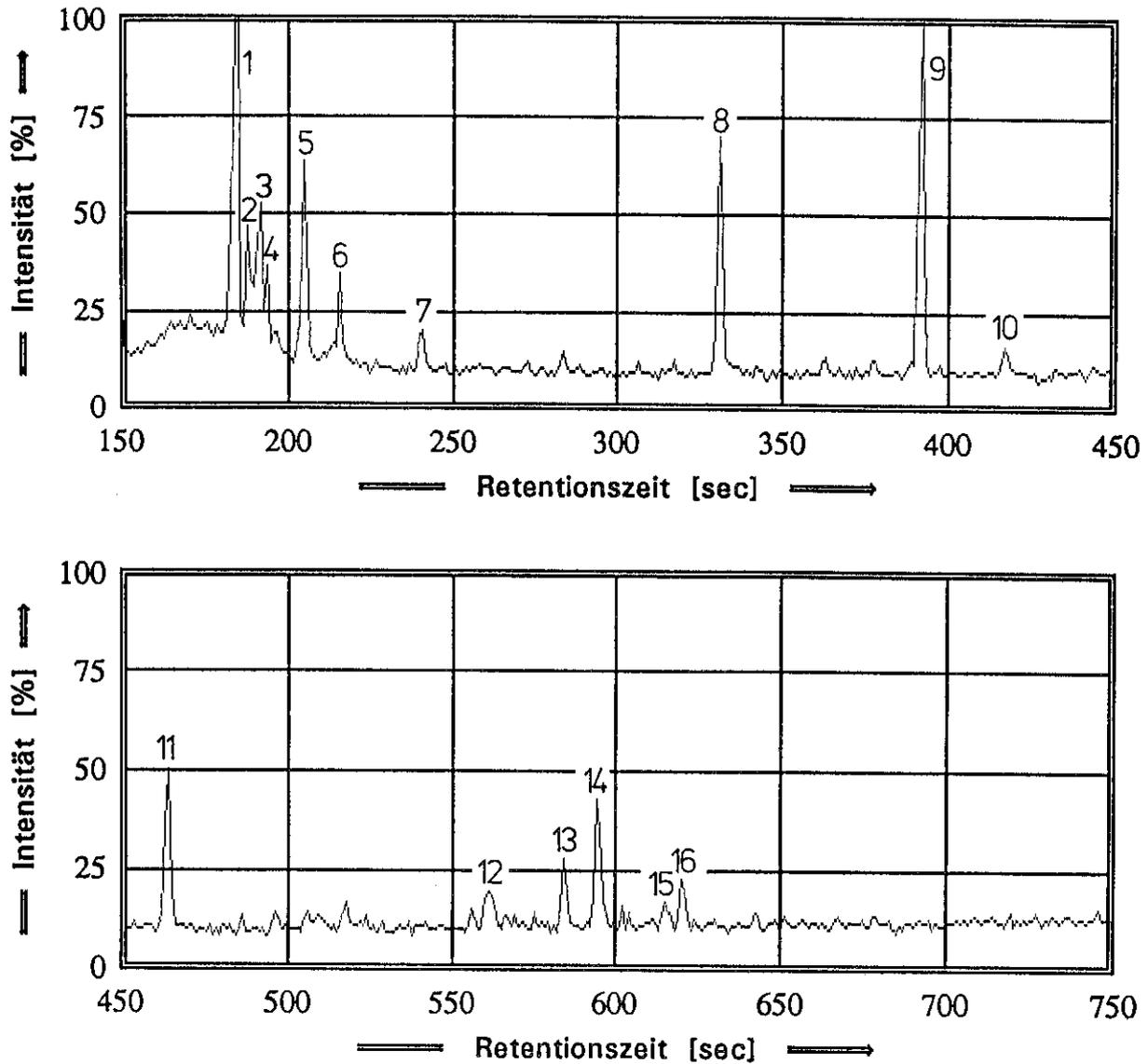


Bild 31a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Polycarbonat nach 7 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $\ell = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 150 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	186	C_2H_6O	Ethanol
2	189	}	?
3	206		
5	206		
6	217	CCl_3F	Trichlorfluor-Methan
7	242		?
8	332	C_6H_6	Benzol
9	393	C_7H_{16}	Heptan
10	418		?
11	464	C_7H_8	Toluol
12	561	C_6H_5Cl	Chlor-Benzol
13	584	C_8H_{10}	Ethyl-Benzol
14	594	C_8H_{10}	p/m-Xylol
15	614	C_8H_8	Styrol
16	620	C_8H_{10}	o-Xylol
17	921		? (nicht mehr im Chromatogramm)
18	1792	$C_{16}H_{10}$	Pyren (————— " —————)

Bild 31b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

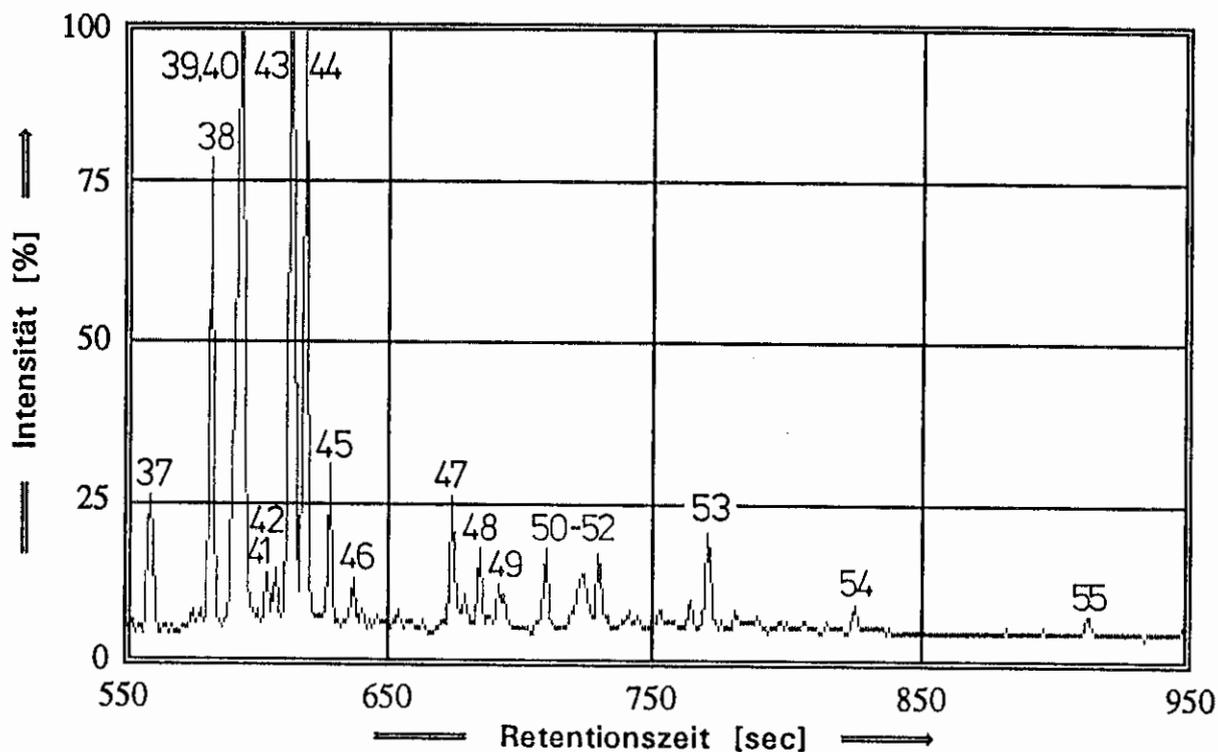
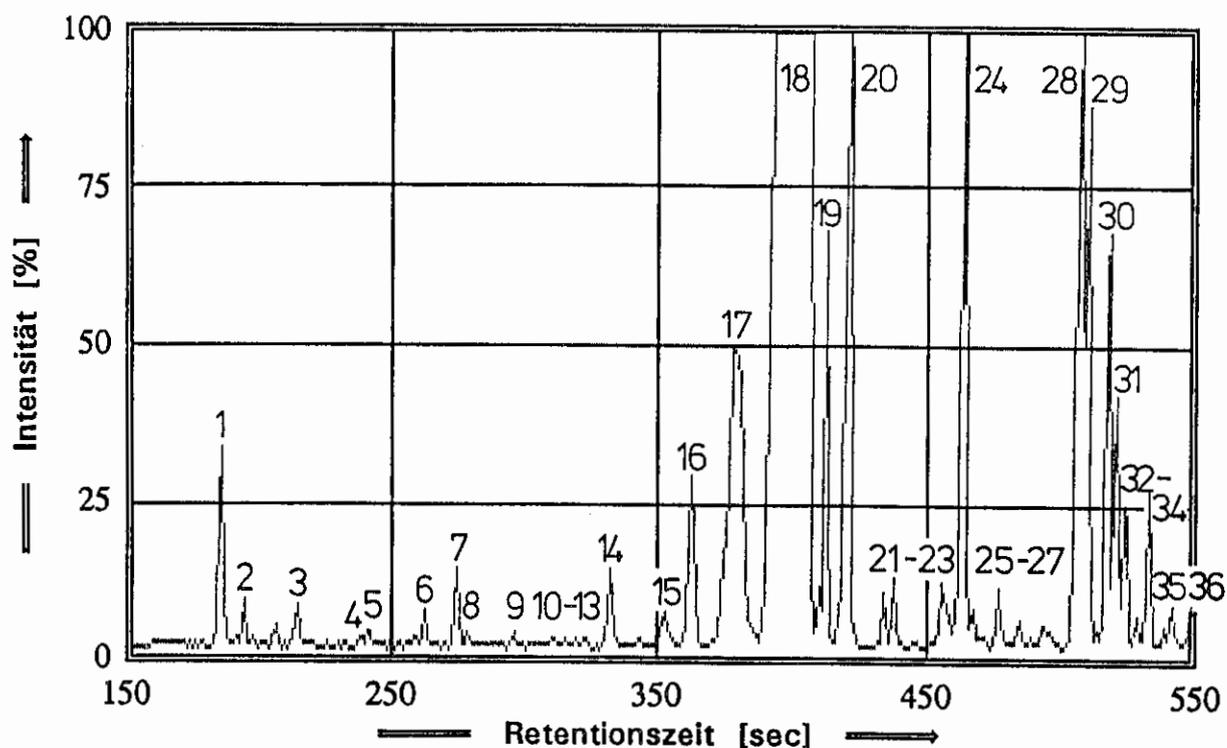


Bild 32a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Hart-PVC nach 4 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $150 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	187	$C_2H_3ClO_2$ Chlor-Essigsäure	
2	196	?	
3	216	CCl_3F Trichlorfluor-Methan	
4	239	C_5H_6 3-Penten-1-in	
5	243	}	
6	250		}
7	275		
8	279	C_5H_6O 2-Methyl-Furan	
9	297	?	
10	311	?	
11	316	C_6H_8 1,4-Cyclohexadien	
12	320	?	
13	324	C_7H_{12} 3-Methyl-1,5-Hexadien	
14	333	C_6H_6 Benzol	
15	354	}	
16	360		}
17	379		
18	395	C_7H_{16} Heptan	
19	413	?	
20	421	C_8H_{16} 1-Methyl-2-Propyl-Cyclopentan	
21	435	?	
22	439	C_7H_{12} 1-Methyl-2-Methylen-Cyclopentan	
23	457	C_7H_{12} 2-Methyl-2,4-Hexadien	
24	464	C_7H_8 Toluol	
25	477	}	
26	480		}
29	510		

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorigen Seite

30	518	$C_6H_{14}O_3$	1,2,6-Hexantriol
31	521	}	?
⋮	⋮		
33	529		
34	533	$C_6H_8O_2$	1,2-Cyclohexandion
35	542		?
36	548		?
37	561	C_6H_5Cl	Chlor-Benzol
38	584	C_8H_{10}	Ethyl-Benzol
39	594	C_8H_{10}	p/m-Xylol
40	597	C_8H_6	Ethynyl-Benzol
41	606		?
42	608		?
43	615	C_8H_8	Styrol
44	620	C_8H_{10}	o-Xylol
45	630	}	?
⋮	⋮		
47	676		
48	687	C_9H_{12}	Propyl-Benzol
49	693		?
50	712	C_9H_{12}	1,2,3-Trimethyl-Benzol
51	725		?
52	731		?
53	772	C_9H_8	1-Propinyl-Benzol
54	827		?
55	914	$C_{10}H_8$	Azulen

Bild 32b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

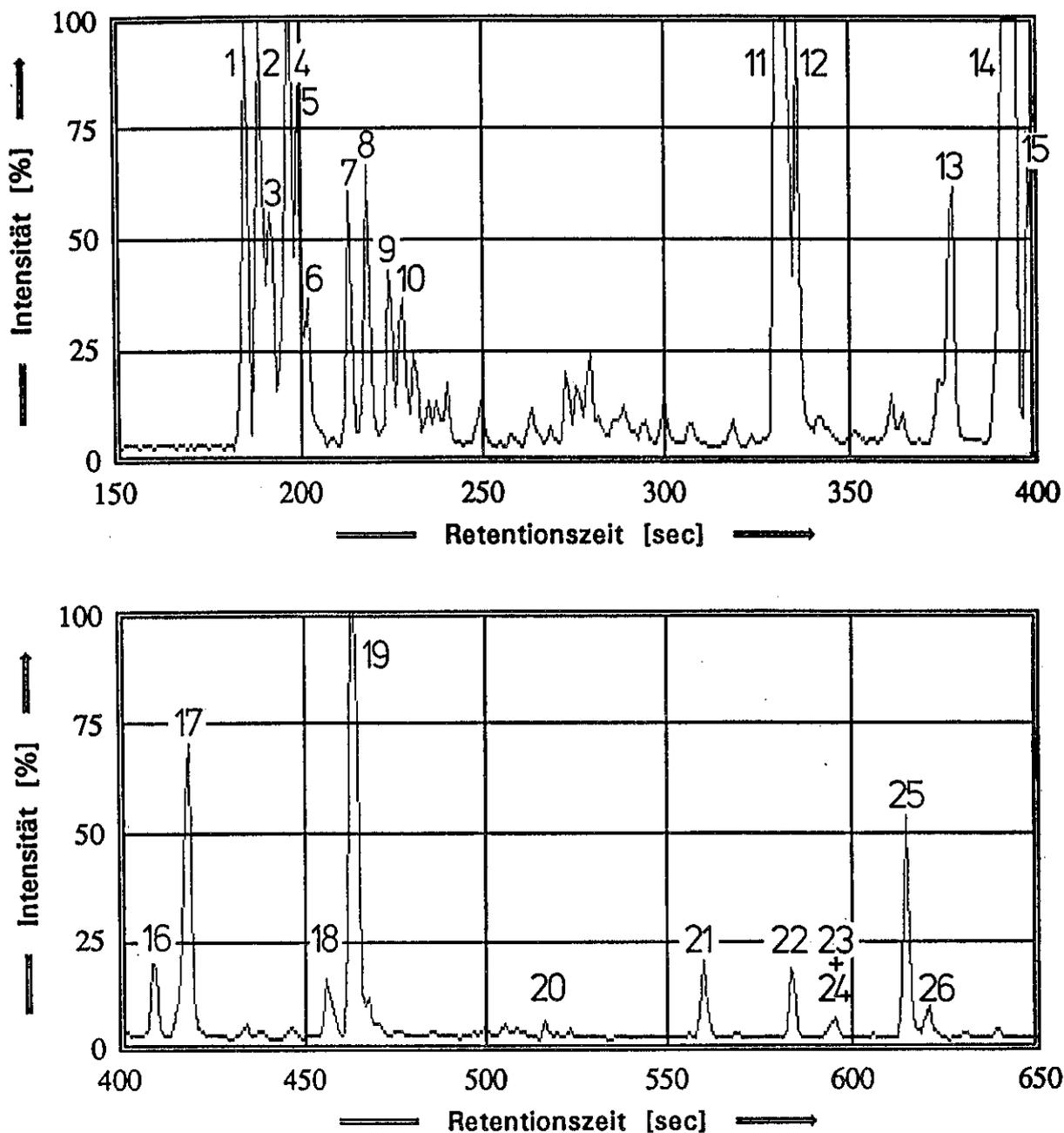


Bild 33a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Hart-PVC nach 6¼ Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnfilm-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: 35 °C (4 min) - 15 °C/min - 150 °C (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek	
1	186	}	?
:	:		
3	193		
4	197	C_2H_3Cl	Chlor-Ethen
5	200	}	?
:	:		
10	230		
11	333	C_6H_6	Benzol
12	337		?
13	379		?
14	395	C_7H_{16}	Heptan
15	400		?
16	410		?
17	419	C_7H_{14}	Methyl-Cyclohexan
18	456	C_7H_{12}	2-Methyl-2,4-Hexadien
19	464	C_7H_8	Toluol
20	517	$C_6H_{14}O_3$	1,2,6-Hexantriol
21	560	C_6H_5Cl	Chlor-Benzol
22	583	C_8H_{10}	Ethyl-Benzol
23	593	C_8H_{10}	p/m-Xylol
24	596	C_8H_6	Ethynyl-Benzol
25	614	C_8H_8	Styrol
26	620	C_8H_{10}	o-Xylol

Bild 33b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

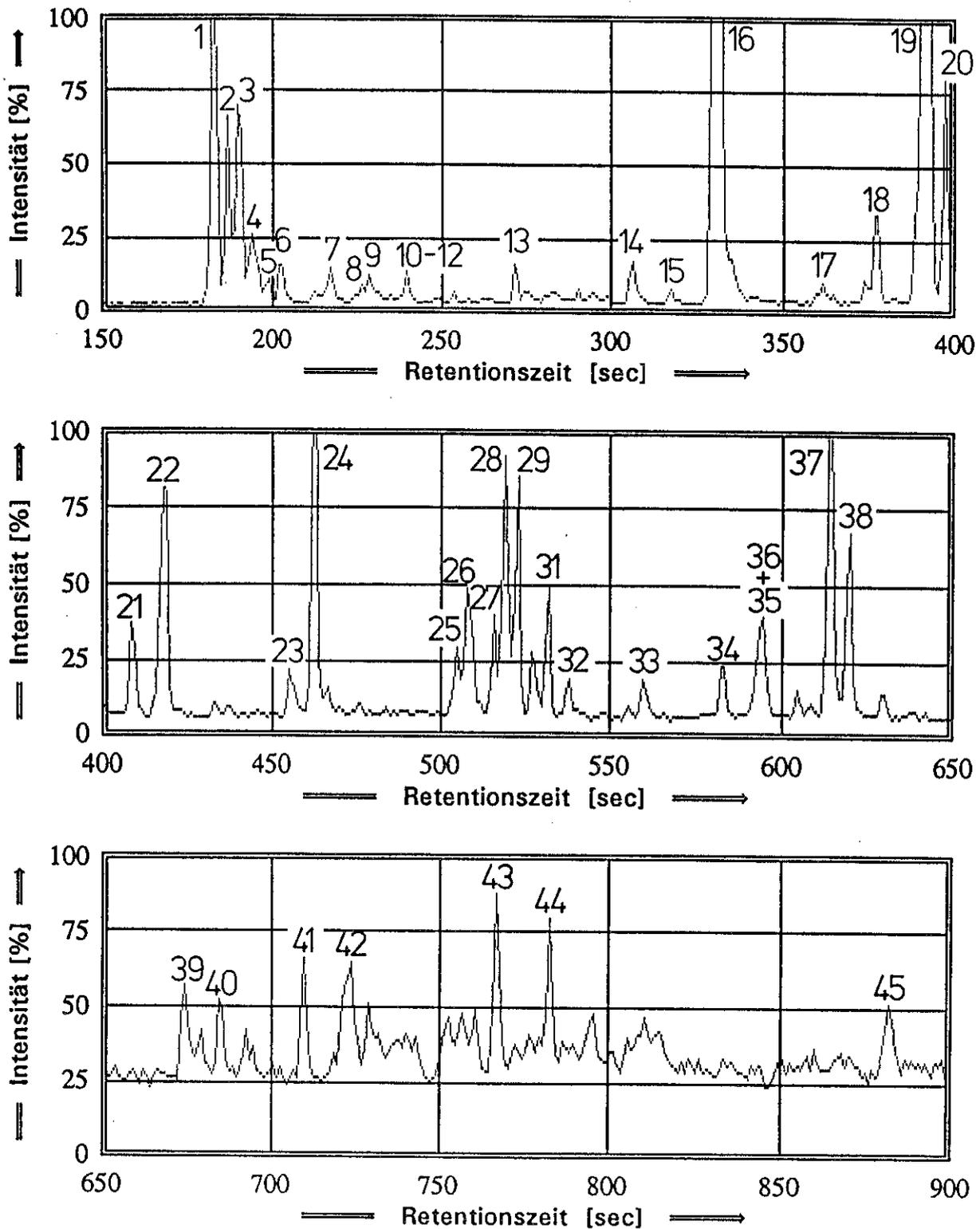


Bild 34a: Das Totalionenchromatogramm der Brandgasanalyse von Hart-PVC nach 8 Minuten Branddauer

Analytische Parameter der GC/MS-Analyse:

- Trennsäule: Dünnschicht-Quarzkapillarsäule (OV-1),
 $l = 50 \text{ m}$, $\varnothing_i = 0,25 \text{ mm}$, $\delta = 0,4 \mu\text{m}$,
- Trägergas: Helium mit 140 kPa Vordruck,
- Temperaturprogramm: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (4 min) - $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ - $150 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 min)

Peak-Nr.	Retentionszeit [sec]	Vorschläge der NIST-Bibliothek
1	186	} ?
∴	∴	
3	193	
4	197	C ₂ H ₃ Cl Chlor-Ethen
5	202	? ?
6	205	? ?
7	218	CCl ₃ F Trichlorfluor-Methan
8	229	} ?
∴	∴	
10	242	
11	251	C ₂ H ₂ Cl ₂ 1,2-Dichlor-Ethen
12	256	? ?
13	274	? ?
14	309	C ₂ H ₄ Cl ₂ 1,2-Dichlor-Ethan
15	320	? ?
16	333	C ₆ H ₆ Benzol
17	363	? ?
18	378	? ?
19	394	C ₇ H ₁₆ Heptan
20	399	? ?
21	409	C ₇ H ₁₄ 1-Hepten
22	418	C ₈ H ₁₆ 1-Methyl-2-Propyl-Cyclopentan

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorigen Seite

23	456	C_7H_{12}	2-Methyl-2,4-Hexadien
24	463	C_7H_8	Toluol
25	505		?
26	508		?
27	517	$C_6H_{14}O_3$	1,2,6-Hexantriol
28	520	}	?
:	:		
30	528		
31	533	$C_6H_8O_2$	1,2-Cyclohexandion
32	540		?
33	562	C_6H_5Cl	Chlor-Benzol
34	583	C_8H_{10}	Ethyl-Benzol
35	593	C_8H_{10}	p/m-Xylol
36	597	C_8H_6	Ethynyl-Benzol
37	614	C_8H_8	Styrol
38	620	C_8H_{10}	o-Xylol
39	677		?
40	686	C_9H_{12}	Propyl-Benzol
41	711	C_9H_{12}	1,2,3-Trimethyl-Benzol
42	725		?
43	768	C_9H_8	4-Ethynyl-Toluol
44	784	$C_9H_{19}Cl$	1-Chlor-Nonan
45	883	$C_{10}H_8$	Naphthalin

Bild 34b: Die Identifikationsvorschläge der NIST-Bibliothek für die oben abgebildeten Peaks

Tabelle 1: Fortsetzung der Zusammenstellung für die Chromatogramme von Bild 5 bis 20

NIST-Vorschlag	Chromatogramm	Σ-formel	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20
			relative Retentionszeit (t _{Benzol} = 100)														
Methyl-Cyclohexan		C ₇ H ₁₄															
(3-Methyl-Butyl)-Cyclopentan		C ₁₀ H ₂₀															
1-Methyl-2-Methylen-Cyclopentan		C ₇ H ₁₂											133				
2-Methyl-2,4-Hexadien		C ₇ H ₁₂															
Toluol		C ₇ H ₈	140	140	152	120	155	140	140	140	141	140	140	140	155	151	148
Oktan		C ₈ H ₁₈															172
1,2,6-Hexantriol		C ₆ H ₁₄ O ₃															
Furaldehyd		C ₅ H ₄ O ₂			180	123	185										
1,3-Dimethyl-Cyclohexan		C ₈ H ₁₆											156				
1,2-Cyclohexandion		C ₆ H ₈ O ₂															
Chlor-Benzol		C ₆ H ₅ Cl			193	138	201				170						
Ethyl-Cyclohexan		C ₈ H ₁₆											170	169			
1-Ethyl-2,4-Dimethyl-Cyclohexan		C ₁₀ H ₂₀											172				
Ethyl-Benzol		C ₈ H ₁₀	177					177			176	178	177	177	176		
p/m-Xylol		C ₈ H ₁₀	180	179	211	147	215	179		179	180	179	180	179	220	210	217
Ethynyl-Benzol		C ₈ H ₆			211	147	215	180		180	181	180					
Styrol		C ₈ H ₈	186	186	223	151	231	186		186	187	186	186	185	227	219	
o-Xylol		C ₈ H ₁₀						188		187	189	188	187	187			225
Isopropyl-Benzol		C ₉ H ₁₂									200						235
Benzaldehyd		C ₇ H ₆ O			254		264				206				255	244	245
Propyl-Benzol		C ₉ H ₁₂					254								264	253	253

Tabelle 1: Fortsetzung der Zusammenstellung für die Chromatogramme von Bild 5 bis 20

NIST-Vorschlag	Chromatogramm	relative Retentionszeit (t _{Benzol} = 100)																		
		5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20				
Chlor-Phenol	C ₆ H ₅ ClO			373	230	378														
2-Methyl-Naphthalin	C ₁₁ H ₁₀			446	270	454				294					419	410				
1,4-Dihydro-1,4-Methano-Naphthalin	C ₁₁ H ₁₀									297										
Dichlor-Propenyl-Benzol	C ₉ H ₈ Cl ₂			463																
2-Ethenyl-Naphthalin	C ₁₂ H ₁₀									310										
Ethyl-Naphthalin	C ₁₂ H ₁₂				292	494														
1,2-Dimethyl-Naphthalin	C ₁₂ H ₁₂				298	509				324										
Acenaphthylen	C ₁₂ H ₈									326										
1,8-Dimethyl-Naphthalin	C ₁₂ H ₁₂									327										
1-(2-Propenyl)-Naphthalin	C ₁₃ H ₁₂						314								331					
1-Phenyl-2,4-Hexadiin-1-on	C ₁₂ H ₈ O														340					
Dibenzo-Furan	C ₁₂ H ₈ O				561	325														
Fluoren	C ₁₃ H ₁₀														354					
1,3-Diphenyl-Propan	C ₁₅ H ₁₆														368					
Methyl-Fluoren	C ₁₄ H ₁₂														406					
Phenanthren	C ₁₄ H ₁₀																			
1,4-Dihydro-1,4-Etheno-Anthracen	C ₁₆ H ₁₂														404					
2-Phenyl-Inden	C ₁₅ H ₁₂														425					
1-Phenyl-Naphthalin	C ₁₆ H ₁₂														453					
Pyren	C ₁₆ H ₁₀														469					

Tabelle 1: Fortsetzung der Zusammenstellung für die Chromatogramme von Bild 21 bis 34

NIST-Vorschlag	Chromatogramm	relative Retentionszeit ($t_{Benzol} = 100$)														
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
Cyclopentadien	C_5H_6						59									
2-Methyl-1-Penten	C_6H_{12}							82	82							
Methyl-Cyclopentan	C_6H_{12}	82														
2-Methyl-Furan	C_5H_6O													84		
Hexanol	$C_6H_{14}O$						71									
Hexen	C_6H_{12}			78												
1,2-Dichlor-Ethan	$C_2H_4Cl_2$															93
1,5-Hexadien-3-in	C_6H_6															
1-Methyl-1,3-Cyclopentadien	C_6H_8	95														
1,4-Cyclohexadien	C_6H_8							89							95	
3-Methyl-1,5-Hexadien	C_7H_{12}														97	
Benzol	C_6H_6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Benzol	C_6D_6			100												
1,3-Cyclohexadien	C_6H_8	104														
Diethoxy-Methan	$C_3H_{12}O_2$															
Propansäure-Methylester	$C_4H_8O_2$															
Heptan	C_7H_{16}	119	119	124	121	120	125	118	119	117	118	118	119	119	118	118
1-Hepten	C_7H_{14}															123
2-Hepten	C_7H_{14}										123					
Hexafluor-2-Propanon	C_3F_6O															
1-Methyl-2-Propyl-Cyclopentan	C_9H_{18}	126	127					126	126					126		126

Tabelle 1: Fortsetzung der Zusammenstellung für die Chromatogramme von Bild 21 bis 34

NIST-Vorschlag	Chromatogramm	relative Retentionszeit ($t_{\text{Benzol}} = 100$)													
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Methyl-Cyclohexan	C_7H_{14}				127		133								126
(3-Methyl-Butyl)-Cyclopentan	$C_{10}H_{20}$	131	131		131			130							
1-Methyl-2-Methylen-Cyclopentan	C_7H_{12}												132		
2-Methyl-2,4-Hexadien	C_7H_{12}												137	137	137
Toluol	C_7H_8	140	140	154	140	140	146	139	139	145	140	139	139	139	139
Oktan	C_8H_{18}														
1,2,6-Hexantriol	$C_6H_{14}O_3$							155					156	155	155
Furaldehyd	$C_5H_4O_2$														
1,3-Dimethyl-Cyclohexan	C_8H_{16}														
1,2-Cyclohexandion	$C_6H_8O_2$												160		160
Chlor-Benzol	C_6H_5Cl											169	168	168	169
Ethyl-Cyclohexan	C_8H_{16}														
1-Ethyl-2,4-Dimethyl-Cyclohexan	$C_{10}H_{20}$														
Ethyl-Benzol	C_8H_{10}	177	177		177	176		176	176			176	175	175	175
p/m-Xylol	C_8H_{10}	180	180	210						195		179	178	178	178
Ethinyll-Benzol	C_8H_6	180	181		180	180	197	180	180	205			179	179	179
Styrol	C_8H_8	186	186		186	185	206	185	185	219		185	185	184	184
o-Xylol	C_8H_{10}	188	188	225								187	186	186	186
Isopropyl-Benzol	C_9H_{12}											198			
Benzaldehyd	C_7H_6O							204							
Propyl-Benzol	C_9H_{12}			278								207	241	206	206

