



Forschungsbericht Raumbrände -

BAM Innovationsoffensive -

Projekt Brandspurenanalytik -

Teil 2: Versuchsaufbau und Brandspurenanalytik -

Ina Fettig, Stefan Seeger, Martin Werrel, Jan H. Deubel, Tina Raspe, Christian Piechotta, -
Simone Krüger -

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung -



Fachbereich 1.: Organische Umweltanalytik

Fachbereich 4.2: Materialien und Luftschadstoffe -

Fachbereich 7.5: Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen -

Ina Fettig, Jan H. Deubel, Tina Raspe, Stefan Seeger, Martin Werrel, Christian Piechotta,
Simone Krüger

Forschungsbericht Raumbrände

im Rahmen der BAM Innovationsoffensive Projektes Brandspurenanalytik

Teil 2: Versuchsaufbau und Brandspurenanalytik

2013

Herausgeber

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung

Fachbereich 1. Organische Umweltanalytik

Richard-Willstätter-Straße

12489 Berlin

E-Mail: info@bam.de

Internet: www.bam.de

Copyright © 2013 by

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung

ISBN 978-3-9815944-8-5

Abstract

The presented study is the 2nd part of the report "Chemical fire trace analysis". The complete report is divided into three parts. The aim of the research project was to achieve a better understanding on the effects of fire accelerants and to examine and combine methods and techniques to detect ignitable liquids during fire investigations. In the 2nd report we summarized the analytic results regarding the detection of fire accelerants. First bench-scale fire tests on living room materials and fire accelerants were performed. We investigated the residues and the particles after fire tests and optimized the analytical techniques to detect potentially involved liquids.

The real-scale fire tests were conducted in 2012 at the fire testing facility of the Leipzig Institute for Materials Research and Testing (MFPA Leipzig GmbH). The influence of fire accelerants on the fire behavior during living room fires was experimentally investigated by performing 5 different room fire scenarios. During the tests fire-technological quantities were determined as well as chemical-analytical studies were carried out. The focus was on the detection of smoke gases and the proof of used fire accelerants. The evaluation of traceable fire accelerants and the reconstruction of the fire development are based on a precise chemical analysis of the combustion products. Each of the fire rooms was equipped with the same living room inventory. The location and amount of fire accelerant (a mixture of diesel/gasoline) differed in 4 of 5 tests. One room fire experiment was carried out without fire accelerant. The fire residues and swipe samples (particles) were examined by Headspace-Solid Phase Microextraction–Gaschromatography–Mass spectrometry. In samples, taken after a controlled room fire, selected target compounds of the used ignitable liquids, that were applied prior to the fire, were detected in most of the samples. In samples from locations distant to the application site of the ignitable liquids the flammable substances could not reliably be detected. For the reconstruction of a suspicious fire scene, it is of prime importance – regarding the sampling strategy – to take many samples from different locations in order to get an extensive overview based on analytical data. In different room fires the accelerant could even be detected in swipe samples of condensed soot on the walls. This represents a promising approach regarding the sampling strategy in suspected cases of arson. Further experiments are required and have to be conducted to prove the adaptability and profit of this kind of sample taking. The mixed SPME fiber is ideally suited to adsorb all target analytes of the studied accelerants.

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht ist der 2. Teil eines Gesamtberichtes und schildert ausführlich die im Kontext des BAM-Innovationsoffensive-Projektes „Chemische Brandspurenanalytik“ durchgeführten Untersuchungen und fasst die gewonnenen analytischen Erkenntnisse zusammen. Der gesamte Bericht gliedert sich in drei Teile. Der erste Teil beinhaltet den Aufbau, die Durchführung und die brandtechnologische Auswertung der durchgeführten Raumbrandversuche, während in dem hier vorliegenden Teil die analytischen Methoden zum Nachweis des Brandbeschleunigers in den Brandrückständen vorgestellt und ausgewertet werden.

Die Beurteilung von Brandspuren und daraus abgeleitet die Rekonstruktion eines Brandverlaufes beruhen auch auf der präzisen chemischen Analyse der Brandprodukte. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine innovative Methodik entwickelt, wie verfügbare Analysetechniken in geeigneter Weise kombiniert werden können, um aus festen, flüssigen und gasförmigen Brandrückständen Rückschlüsse auf den Brandverlauf ziehen zu können. Neben der Untersuchung von Proben von realen Brandorten wurden verschiedene wohnungstypische Materialien unter Laborbedingungen unterschiedlichen Brandszenarien unterworfen. Die dabei entstehenden Brandgase, Aerosole sowie der verbleibende Brandrückstand wurden durch geeignete analytische Verfahren analysiert, um mögliche Brandursachen beurteilen zu können. Der Schwerpunkt dieses Berichtes liegt in dem Nachweis von Brandbeschleunigern. Es zeigte sich, dass mittels der Kombination aus HS-SPME-GC-MS sowohl in den festen Brandrückständen, als auch in den Kondensaten Brandbeschleuniger eindeutig und verlässlich nachgewiesen werden können.

Anhand von 5 verschiedenen Zimmerbrandversuchen wurde der Einfluss von Brandbeschleunigern auf den Brandverlauf experimentell untersucht. Es wurden verschiedene brandtechnologische Kennwerte, wie der Massenverlust des gesamten Brandraums, Brandraumtemperaturen, die Wärmefreisetzungen sowie die Rauchgasemissionen ermittelt und beurteilt. Die Rauchgasanalyse erfolgte im Schlot, im Brandraum sowie in der Brandraumöffnung mittels Fourier Transformierte Infrarot-FTIR-Spektroskopie. Neben diesen brandtechnologischen Untersuchungen, die im Bericht Teil 1 enthalten sind, erfolgten auch chemisch-analytische Untersuchungen nach dem Brand, mit dem Ziel, den eingesetzten Brandbeschleuniger nachzuweisen. Im Anschluss an die jeweiligen Zimmerbrandversuche wurden verschiedene Brandrückstandsproben aus dem Brandschutt, Wischproben von den Wänden und den übriggebliebenen Gegenständen genommen und mit Hilfe einer entwickelten HS-SPME-GC-MS-Methode (Headspace-Solid Phase Micro Extraction-Gas Chromatographie-Massenspektrometrie) in Hinblick eines möglichen Brandbeschleunigernachweis analysiert.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3 -
Kurzfassung	4 -
1 Einleitung	7 -
1.1 Hintergrund und Ziele.....	7 -
1.2 Brandbeschleuniger und Problematik des Nachweises	10 -
1.3 Brandanalytische Verfahren	12 -
2 Methodenentwicklung Chemische Analytik	13 -
2.1 Herstellung der Proben im Labormaßstab	13 -
2.2 Extraktionsarten für die Analyse von festen Brandrückstands-proben	19 -
2.2.1 Fest-Flüssig-Extraktion	19 -
2.2.2 Headspace-Probenahme	21 -
2.2.3 Festphasen Mikroextraktion	21 -
2.3 Brandanalytik von Partikeln.....	26 -
2.4 Brandgase	31 -
2.5 Probelagerung	33 -
2.6 Datenarchivierung	34 -
2.6.1 Probenbezeichnung.....	34 -
2.6.2 Datenbank	35 -
3.1 Zusammenfassung.....	35 -
3. Versuchsdurchführung Raumbrände.....	36 -
3.1 Versuchsaufbau	36 -
4.2 Versuchsdurchführung	37 -
4.3 Probenahme	39 -
4 Ergebnisse der Raumbrandversuche	42 -
Raumbrand 2	46 -
Raumbrand 3	47 -
Raumbrand 4	48 -
Raumbrand 5	49 -
6 Zusammenfassung	51 -
Literaturverzeichnis.....	54 -
Abbildungsverzeichnis.....	56 -

Tabellenverzeichnis	58 -
Anhänge.....	59 -

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziele

Über 23.000 Straftaten im Bereich Brandstiftungen wurden 2011 in Deutschland laut der offiziellen Polizeistatistik des Bundesinnenministeriums gezählt. Unter Brandstiftung versteht man das vorsätzliche oder fahrlässige und unerlaubte in Brand setzen eines nicht dazu bestimmten Sachgutes. Brandbeschleuniger sind leicht brennbare chemische Stoffe, die dazu verwendet werden, Sachgut in Flammen zu setzen oder nicht allein brennende Gegenstände zu verbrennen. Zu den meistens verwendeten Brandbeschleunigern gehört Spiritus (vergällter Ethanol), Benzin und Diesel, da diese leicht kommerziell erhältlich sind. Nur etwa die Hälfte aller Brandstiftungen kann aufgeklärt werden. Im Nachhinein ist es oftmals sehr schwierig festzustellen, ob es sich um eine Brandstiftung handelt. Zeitnahe Untersuchungen sind deshalb notwendig, um mögliche Brandbeschleuniger auch nachweisen zu können. Dafür müssen am Brandort Proben genommen werden.

Bei Brandermittlungen vor Ort ist der Nachweis, ob ein Brand vorsätzlich gelegt wurde und ein Brandbeschleuniger zur Brandlegung verwendet wurde, für die Aufklärung von großer Bedeutung. In diesem Forschungsprojekt wurden deshalb sowohl die chemisch-analytische Seite, der chemische Nachweis von Brandbeschleunigern, als auch die brandtechnologische Seite, Ermittlung von brandtechnologischen Stoffdaten und Berechnung von möglichen Brandverläufen mit dem Hintergrund der Brandstiftung bearbeitet.

Die Beurteilung von Brandspuren und - daraus abgeleitet - die Rekonstruktion des Brandverlaufes beruhen u.a. auf der chemischen Analyse der Brandprodukte. Ermittlungsbehörden, die mit der Aufklärung von Brandursachen und Brandverläufen beauftragt sind, arbeiten oft mit nicht-standardisierten Methoden. In der Vergangenheit kam es deshalb in mehreren Fällen in Gerichtsverfahren zur Anzweiflung der Aussagen aus diesen Analysen in Hinsicht auf den Tatbestand der Brandstiftung und die Verwendung von Brandbeschleunigern.

Der gesicherte Nachweis von Brandbeschleuniger in Brandrückständen ist im Falle einer möglichen Brandstiftung deshalb von großer Bedeutung und erfordert einige analytische Erfahrungen. Der nach einem mutwillig gelegten Feuer zurückbleibende Brandrückstand enthält meist nur noch Spuren von dem verwendeten Brandbeschleuniger.

Substanzen, die als Brandbeschleuniger eingesetzt werden, bestehen meist aus leichtflüchtigen Substanzen, die durch die hohen Temperaturen während eines Brandes, verdampfen die brennbaren Substanzen und ein gesicherter Nachweis wird dadurch drastisch erschwert. Daher ist es essentiell, dass gesicherte Brandrückstandsproben mittels einer nachweisstarken Analytik kriminaltechnisch analysiert werden um eine belegbare Entscheidung zu treffen, ob der Brand mittels Brandbeschleuniger entzündet wurde oder

eine andere Ursache hatte (defekte Elektrik, natürliche Ursache etc.). Hauptursache für die Entstehung von Bränden ist eine defekte Elektrik (31%), der Anteil an Brandstiftung macht etwa 15% aus (1).

Im Rahmen dieses Berichtes wird eine Vorgehensweise vorgestellt, wie verfügbare Analysetechniken in geeigneter Weise kombiniert werden können, um aus festen, flüssigen und gasförmigen Brandrückständen Rückschlüsse auf den Brandverlauf ziehen zu können. Neben der Untersuchung von Proben realer Brandorte wurden verschiedene Materialien, die typischerweise in Wohnungen vorkommen, unter Laborbedingungen unterschiedlichen Brandszenarien unterworfen. Diese wurden vom Schwelbrand ausgehend über die anaerobe Pyrolyse, den entstehenden Brand bis hin zum Vollbrand in Probenmaßstäben vom mg-Bereich bis hin zu Gebrauchsgegenständen wie Teppichen und Polstersitzen realisiert. Die dabei entstehenden Brandgase, Aerosole sowie die verbleibenden Brandrückstände wurden durch eine Vielzahl analytischer Verfahren charakterisiert, um mögliche Brandursachen beurteilen zu können. Diese Ergebnisse wurden einer Datenbank zugeführt, die der systematischen Archivierung der Daten und als Vergleichsgrundlage für die Beurteilung realer Brandereignisse sowie als Datenpool für nachfolgende numerische Berechnungen von möglichen bzw. unmöglichen Brandverläufen dienen soll.

Der Schwerpunkt der chemischen Brandspurenanalytik lag auf der Analyse der festen Brandrückstände, die mittels ausgewählter Extraktionsverfahren sowie verschiedener analytischer Verfahren in Kombination mit der GC-MS-Analyse (Gaschromatographie-Massenspektrometrie) mit dem Hintergrund des Nachweises von Brandbeschleunigern erfolgte. Als wesentliche Einflussfaktoren der Nachweisbarkeit zeigten sich vor allem die Art der Probenahme und insbesondere die Zeitdauer zwischen Probenahme und Analyse bzw. die dazwischen liegende Art der Probenaufbewahrung an sich. Die Ergebnisse zu verschiedenen Aufbewahrungs- und Stabilitätsversuchen werden in Hinblick auf Optimierung der Probenahmetechniken vorgestellt.

In der „Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH“ (MFPA) in Leipzig wurden fünf verschiedene Wohnzimmerbrandversuche durchgeführt. Die Zimmer wurden jeweils mit dem gleichen Mobiliar ausgestattet. In dem mit Teppich ausgelegten Brandraum, der ein typisches Wohnzimmer darstellen sollte, befanden sich Regale gefüllt mit wohnraumtypischen Utensilien, Sofas, Tische und Stühle. Als Brandbeschleuniger kam Benzin und Diesel als Gemisch zum Einsatz. Neben dem chemisch-analytischen Nachweis der Brandbeschleuniger wurde bei diesen Bränden auch der Einfluss der Brandbeschleuniger auf den Brandverlauf untersucht. Zu den ermittelten Kennwerten gehörten die Wärmefreisetzung, die Brandraum- und Rauchgastemperaturen, der Massenverlust und die Zusammensetzung des Rauchgases. Mit den gewonnenen Daten können desweiteren Aussagen über den Temperaturverlauf sowie zur Rauchgastoxizität während eines Zimmerbrandes getroffen werden.

Eine Übersicht über mögliche Brandprodukte, die im Brandrauch entstehen können, ist in Abbildung 1 wiedergegeben. Bei einer vollständigen Verbrennung sind die Hauptprodukte Kohlendioxid und Wasser; bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen auch Gase, wie Kohlenmonoxid. Je nachdem welche Materialien oder Kunststoffe brennen, können organische und anorganische Substanzen, wie in Abbildung 1 gezeigt entstehen.



Abbildung 1: Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrauch.



Abbildung 2: Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrückstand.

Eine Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrückstand nach einem Brand ist in Abbildung 2 zu erkennen. Auch hier unterscheidet man zwischen organischen und anorganischen Stoffen. Bekannt sind dabei Substanzen, wie Dioxine, Furane und Biphenyle. Ein wesentlicher Bestandteil im Brandrückstand ist Ruß. Von verwendeten Brandbeschleunigern sind dagegen nur Spuren von Brandbeschleunigerbestandteilen zu finden, die den Nachweis so schwer machen.

1.2 Brandbeschleuniger und Problematik des Nachweises

Als Brandbeschleuniger werden leicht brennbare bzw. entzündbare Substanzen bezeichnet. Darunter fallen unter anderem Benzin, Diesel, Ethanol, Spiritus, Lösungsmittel, Lackverdünner, Heizöl, feste und flüssige Grillanzünder. Das Brandverhalten der verschiedenen Brandbeschleuniger ist unterschiedlich, wie in Abbildung 3 zu erkennen ist. Während der auf einer Teppichprobe aufgetragene Spiritus innerhalb weniger Sekunden mit einer rußfreien Flamme verbrennt; der Masseverlust der Teppichprobe ist nur gering, verbrennen die Teppichproben fast komplett, wenn als Brandbeschleuniger Benzin oder Diesel verwendet wurde. Die Proben entzünden sich später und brennen viel intensiver ab. Diese Experimente zeigen deutlich die unterschiedlichen Eigenschaften und Brandverhalten von Brandbeschleunigern. Deshalb werden Brandbeschleuniger auch in verschiedene Klassen unterteilt.

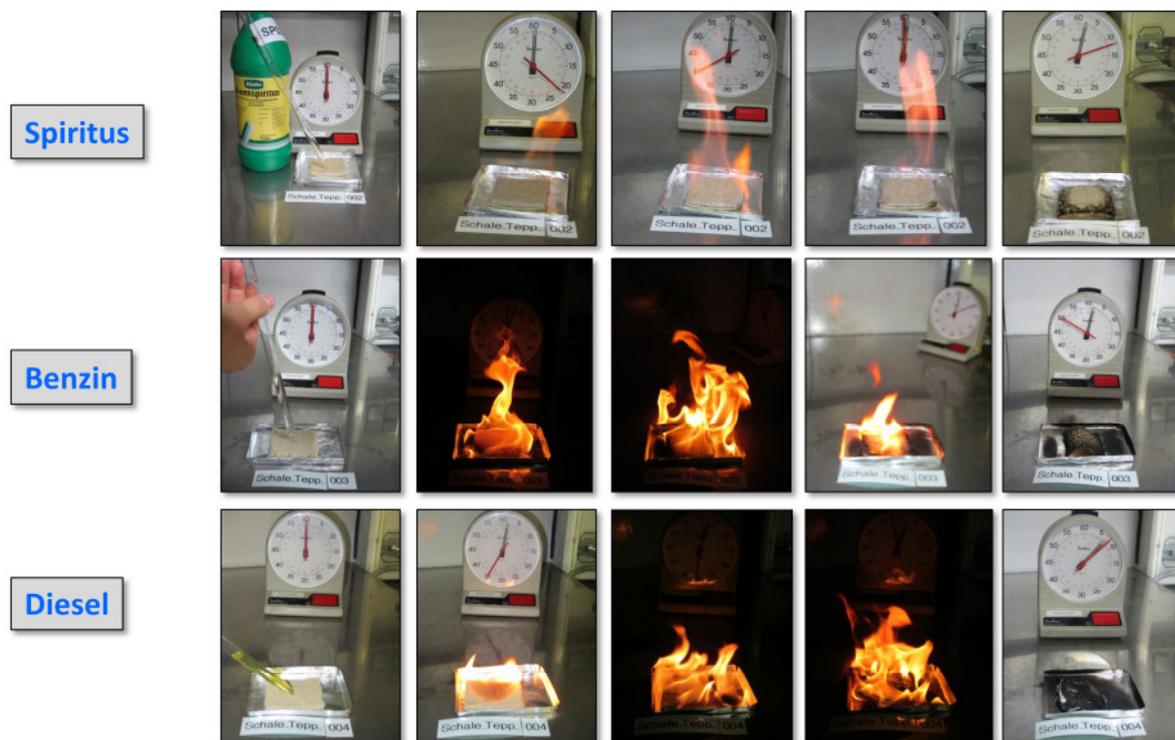


Abbildung 3: Brandverhalten von verschiedenen Brandbeschleunigern auf einer Teppichprobe.

Die unterschiedlichen Substanzen werden aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften in Klassen eingeteilt (2).

Tabelle 1: Brandbeschleuniger Klassen (3).

New ASTM classification system			
Class	Light	Medium	Heavy
Gasoline	Fresh gasoline typically falls in the range of C ₄ -C ₁₂		
Petroleum distillates	Petroleum ether, some cigarette lighter fluids, some camping fuels	Some charcoal starters, some paint thinners, some dry cleaning solvents	Kerosene, diesel fuel, some jet fuels, some charcoal starters
Isoparaffinic products	Aviation gas, specialty solvents	Some charcoal starters, some paint thinners, some copier toners	Some commercial specialty solvents
Aromatic products	Some paint and varnish removers, some automotive parts cleaners, xylenes, toluene-based products	Some automotive parts cleaners, specialty cleaning solvents, some insecticide vehicles, fuel additives	Some insecticide vehicles, industrial cleaning solvents
Naphthenic paraffinic products	Cyclohexane based solvents/products	Some charcoal starters, some insecticide vehicles, some lamp oils	Some insecticide vehicles, some lamp oils, industrial solvents
n-Alkanes products	Solvents, pentane, hexane, heptane	Some candle oils, copier toners	Some candle oils, carbonless forms, copier toners
De-aromatized distillates	Some camping fuels	Some charcoal starters, some paint thinners	Some charcoal starters, odorless kerosene
Oxygenated Solvents	Alcohols, ketones, some lacquer thinners, fuel additives, surface preparation solvents	Some lacquer thinners, some industrial solvents, metal cleaners/gloss removers	
Others-miscellaneous	Single component products, some blended products, some enamel reducers	Turpentine products, some blended products, various specialty products	Some blended products, various specialty products

Der nach einem mutwillig gelegten Feuer zurückbleibende Brandrückstand enthält – aufgrund der hohen Temperaturen während des Brandes – meist nur noch Spuren von Brandbeschleuniger. Um diesen nun sicher nachweisen zu können müssen die flüchtigen Komponenten extrahiert und analysiert werden. Da es sich bei Brandbeschleunigern meist nicht um Einzelverbindungen handelt, sondern um Mischungen aus unterschiedlichen Verbindungen ist es für die Extraktion von Bedarf Analyten von unterschiedlichsten Polaritäten zu extrahieren. Die Herausforderung bei der Interpretation der resultierenden Chromatogramme besteht in der Identifikation der erhaltenen Signale um entscheiden zu können, ob der Brand mittels eines Brandbeschleunigers entzündet wurde.

Gerade der Nachweis von Spiritus stellt eine sehr große Herausforderung dar. Spiritus enthält neben der Hauptkomponente Ethanol (>95%) in sehr geringem Maße Vergällungsmittel. Ein positiver Befund auf Spiritus ist jedoch nur dann gegeben, wenn auch Vergällungsmittel im Brandrückstand nachgewiesen werden können. Europaweit sind unterschiedlichste Vergällungsmittel zugelassen, eine beweissichere Identifizierung von Spiritus ist somit sehr problematisch.

Erschwerend kommt hinzu, dass bei einem Brand durch die Verbrennung von Brandgut auch Verbindungen gebildet werden können, die fälschlicherweise als brennbare Substanzen identifiziert werden können und somit zu einem falsch positiven Ergebnis führen können (4). Auch können aus unterschiedlichen Materialien auch ohne Einwirkung von Hitze solche

Substanzen ausdampfen. Teppiche können z.B. wasserabweisend beschichtet sein und diese Beschichtung kann auf Petroleumbasis sein. Ein weitere Grund für ein falsch positives Ergebnis können Kontaminationen des Brandrückstandes sein. Brandrückstandsproben bestehen zu einem hohen Anteil aus Kohle, die als Adsorptionsmaterial fungieren kann. So ist es denkbar, dass z.B. Autoabgase nahe der Brandstelle den Brandort kontaminieren und zu einem positiven Benzin- bzw. Dieselnachweis führen.

1.3 Brandanalytische Verfahren

Bei einem Brand entwickeln sich sehr schnell sehr hohe Temperaturen. Dadurch verbrennt nicht nur das brennbare Material in dem Brandraum, auch der Brandbeschleuniger selbst verbrennt dabei. Daher ist es für die kriminaltechnische Untersuchung erforderlich mit nachweisstarken Methoden zu arbeiten, die es ermöglichen den verwendeten Brandbeschleuniger auch im unteren Spurenbereich zu detektieren und zu identifizieren.

Im Laufe der Jahre wurden mehrere Methoden entwickelt um die brennbaren Verbindungen aus dem Brandgut zu isolieren und sie anschließend analytisch zu untersuchen. Darunter unter anderem Destillationsverfahren (Vakuum- und Dampfdestillation), Lösemittlextraktion, Headspace Probenahme, Verwendung von passiven Adsorbentien (Aktivkohle, Tenax TA[®], Carbotrap), Festphasenmikroextraktion (solid phase microextraction, SPME) und Purge und Trap Technik (5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12).

Der entscheidende Nachteil von Extraktionsverfahren ohne eine Aufkonzentrierung der Analyten (Lösemittlextraktion und Headspace Probenahme) stellt die schlechte Empfindlichkeit dieser Methoden dar. Verfahren, die die Analyten an Adsorbentien anreichern sind besser in der Lage Analyten in geringen Konzentrationen zu extrahieren und können es ermöglichen im Spurenbereich zu arbeiten. Die Probenextrakte werden anschließend meist gaschromatographisch mit einem massensensitiven Detektor (GC-MS) analysiert. Die Identifizierung der Brandbeschleuniger erfolgt mittels „visual pattern matching“ durch Vergleichschromatogramme von bekannten Referenzsubstanzen, durch Aufstocken mit Reinsubstanzen oder durch Identifizierung der Verbindungen mittels Substanzdatenbanken (2).

2 Methodenentwicklung Chemische Analytik

2.1 Herstellung der Proben im Labormaßstab

Im Rahmen des Projektes sollten, neben der Erfassung von Branddaten, unterschiedliche Extraktionsmethoden untersucht werden, um die Anwendbarkeit der zu entwickelnden Methoden für den Brandbeschleunigernachweis zu überprüfen. Dafür wurden verschiedene wohnungstypische Materialien im Labormaßstab in verschiedenen Brandprüfeinrichtungen (Rauchdichtekammer, Cone Calorimeter, siehe Abbildung 4) nach nationalen und internationalen Standards (DIN, ISO) Probenmaterial hergestellt. Die gezielte analytische Untersuchung der Brandprodukte unter verschiedenen genau definierten Abbrandbedingungen ermöglicht die systematische und umfassende Bewertung von Proben realer Brandorte. Bei der ganzheitlichen Analyse der Brandprodukte wurden die Brandgase, die Aerosole/Schwebeteilchen und die Brandrückstände mit geeigneten analytischen Methoden untersucht (siehe schematische Darstellung in Abbildung 5).



Abbildung 4: Rauchdichtekammer (links), Cone Calorimeter (rechts).

Im Weiteren werden die bei einem Brand entstehenden Produkte unterteilt in feste Brandrückstände, Brandgase, Partikel und Aerosole:

Feste Brandrückstände: Der Schwerpunkt bei der Brandrückstandsanalyse der festen Brandrückstände lag im Nachweis des Brandbeschleunigers. Die verschiedenen wohnungstypischen Materialien wurden unterschiedlichen Brandszenarien unterworfen. Die daraus resultierenden Brandrückstände wurden auf unterschiedlichen Wegen aufgearbeitet und analysiert (siehe Kapitel 2.2)

Brandgase: Die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Brandgase erfolgte mit Hilfe der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR). Dabei werden Komponenten, wie CO, CO₂, H₂O, CH₄, HCl, HCN, Acrolein und SO₂ qualitativ und quantitativ nachgewiesen. Die Kopplung eines FTIR-Spektrometers an die verschiedenen Brandprüfapparaturen erlaubt die Bestimmung umfangreicher stofflicher Kennwerte in Abhängigkeit des Brandszenarios.

Weiterhin wurden die optische Dichte des Brandrauches durch Transmissionsmessungen sowie Rauchgastemperaturen mittels Thermoelementen ermittelt. Die Messung des Massenverlustes der festen Materialien erfolgte über eine Abbrandwaage. Die Wärmefreisetzung wurde mit Hilfe der Sauerstoffverbrauchsmethode ermittelt. Sauerstoffmessungen beruhen auf einem paramagnetischen Verfahren.

Partikel, Aerosole: Die Partikelanzahlkonzentration (Anzahl pro Volumeneinheit) wurde mit Hilfe eines Partikelspektrometers (Engine Exhaust Particle Sizer EEPS / Lasercounter) im Bereich 5 nm bis hin zu 20 µm Partikeldurchmesser gröbenselektiv und zeitabhängig während der Brandversuche gemessen.

In einem Kaskadenimpaktor wurden gröbenaufgelöst Aerosolproben zur weiteren Analyse gesammelt. Die auf Aluplättchen gesammelten Fraktionen definierter Partikelgrößen wurden mittels der HS-SPME-GC-MS Methode analysiert um einen möglichen Brandbeschleunigernachweis zu erhalten.

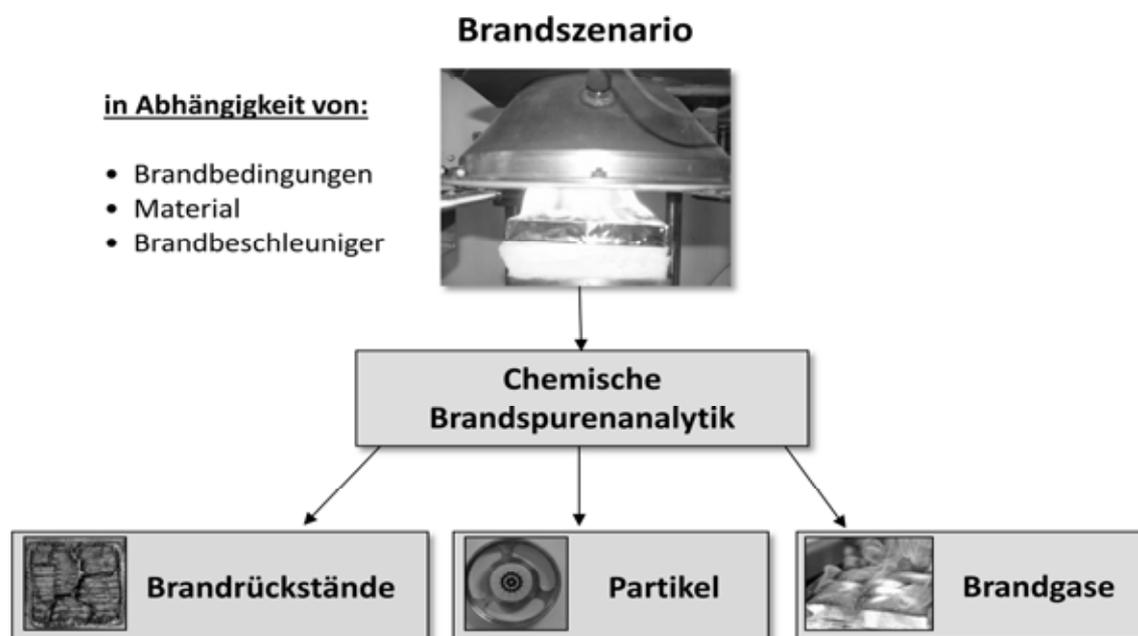


Abbildung 5: Überblick chemische Brandspurenanalytik.

Die verschiedenen Probematerialien (Holz, Spanplatte, Teppich, Kunststoff etc.) wurden in den Brandprüföfen unter Variation der Bestrahlungsstärke und der Sauerstoffkonzentration thermisch belastet. Als Probematerialien wurden typische Materialien gewählt, die bei einer

Wohnzeimereinrichtung Verwendung finden (siehe Abbildung 6) um eine Vergleichbarkeit mit realen Wohnungsbränden herstellen zu können.

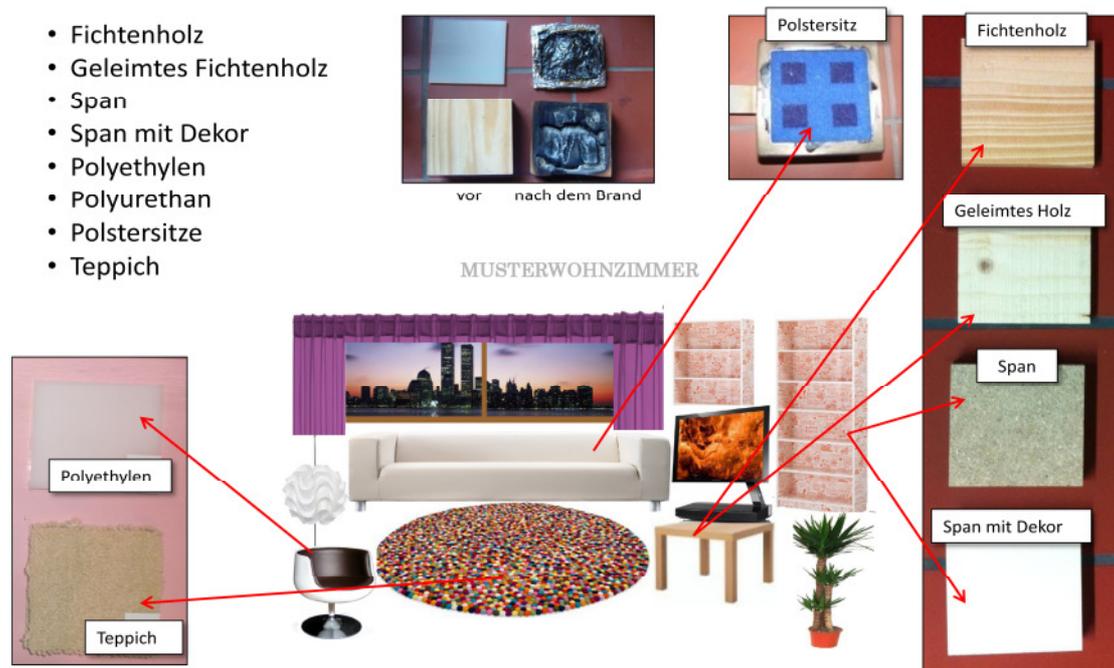


Abbildung 6: Verwendete Materialien für Herstellung der Bandproben im Labormaßstab.

Mit Hilfe der Brandprüföfen bzw. Brandprüfeinrichtungen ist es möglich verschiedenste **Brandszenarien** darzustellen.

Brände unterscheiden sich in Wärme- und Massentransport, welche durch Charakteristika wie Wärmefluss, Temperatur, Ventilation, usw. beschrieben werden. Es treten in der Regel drei charakteristische Entwicklungsstadien auf, die experimentell nachgestellt wurden:

- **Brandbeginn** charakterisiert durch die spezifische Zündquelle (Zigarette, Umgebungstemperaturen < Entzündungstemperaturen, gute Ventilation, etc.)
- **Brandentstehung** charakterisiert durch Wärmestrahlung zwischen 20-50 kW/m⁻², Temperaturen zwischen 400-600°C, gute Ventilation
- **Voll entwickelter Brand** charakterisiert durch Wärmestrahlung > 50 kW/m⁻², Temperaturen > 600°C, und schlechte Ventilation

Es wurden die Brandszenarien von der anaeroben Pyrolyse bis hin zum Post-Flashover-Stadium an den zwei Versuchsapparaturen Smoke Density Chamber (SDC) und Cone Calorimeter (CC) umgesetzt. In beiden Apparaturen werden flächige Proben im Zentimetermaßstab einer definierten Wärmestrahlung ausgesetzt.

Das Cone Calorimeter stellt ein durchströmtes System dar, in dem die Probe ständig durch einen definierten Frischluftstrom umspült wird. Im Gegensatz dazu ist die SDC eine geschlossene Kammer (Volumen 500 Liter), der während dem Versuch keine Luft zugeführt wird. Zur Umsetzung der verschiedenen Szenarien wurden die Versuchsapparaturen modifiziert. Das Cone Calorimeter wurde durch eine Atmosphärenbox, die Probe, Waage und Strahlungsquelle umschließt, ergänzt. Die Box wurde aus Druckgasflaschen mit Zuluft versorgt. Somit waren die Einstellung beliebiger Verbrennungsatmosphären und die Bestimmung der Wärmefreisetzung möglich.

Es wurden sowohl Proben mit und ohne Brandbeschleuniger hergestellt. Die Proben ohne Brandbeschleuniger dienten dazu, Verbrennungsprodukte des jeweiligen Materials identifizieren zu können und bei der Interpretation von Brandrückstandsproben berücksichtigen zu können. Bei den Versuchen mit Brandbeschleuniger wurde die jeweilige Substanz vor der thermischen Belastung auf das Probenstück aufgetragen.

Für Applikation von Brandbeschleunigern auf die Probenoberfläche für Experimente im Cone Calorimeter wurden Kanülen hergestellt, mit denen der Brandbeschleuniger mit Hilfe einer Glasspritze durch eine Öffnung in der Boxwand aufgebracht werden konnte, siehe Abbildung 7. Dadurch konnte der Brandbeschleuniger unmittelbar vor Versuchsbeginn bei geschlossener Box appliziert werden, was eine Verdampfung und die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung vor dem eigentlichen Versuch minimierte.



Abbildung 7: Auftragen von Brandbeschleuniger auf die Probe in die Atmosphärenbox im Cone Calorimeter.

Es wurden auch Proben ohne Brandbeschleuniger hergestellt um Verbrennungsprodukte des jeweiligen Materials identifizieren zu können und bei der Interpretation von Brandrückstandsproben berücksichtigen zu können. Bei den Versuchen mit Brandbeschleuniger wurde die jeweilige Substanz vor der thermischen Belastung auf das Probenstück aufgetragen.

Zwischen den Versuchen wurde der Brandprüfofen gereinigt um eine Verschleppung von Brandbeschleuniger zwischen den Versuchen zu verhindern. Da aufgrund des großen Probenaufkommens eine automatisierbare Methode nötig war, wurde der Brandrückstand

nicht im Ganzen analysiert. Aus dem Rückstand wurden jeweils mittig etwa 100 mg verbranntes Material entnommen und in ein 10-20 mL Vial überführt und mit einem Deckel mit Septum verschlossen und mit MilliQ-Wasser überschichtet. Der restliche Brandrückstand wurde in zuvor ausgeheizte Alutüten eingeschweißt. Die chromatographische Analyse erfolgte mit Hilfe eines Shimadzu GC-2010 Gaschromatographen gekoppelt mit einem Massenspektrometer (Shimadzu QP2010 Plus, Single Quadrupol, EI 70 eV). Die Injektortemperatur betrug 250°C und der Helium-Trägergasfluss 1.6 mL/min. Die chromatographische Trennung der Analyten wurde an einer DB-5-MS Kapillarsäule (30m x 0,25 mm x 0,25 µm) von Agilent durchgeführt. Die Ofentemperatur wurde zwei Minuten bei 50°C gehalten, mit 20°C/min auf 110°C und anschließend mit 30°C/min auf 310°C geheizt. Die Endtemperatur wurde eine Minute konstant gehalten. Die detektierten Substanzen wurden durch Vergleich mit der NIST 08 Massen Spektren Datenbank bzw. Vergleich der Retentionszeiten mit Standard Verbindungen identifiziert.

Für das Projekt „Chemische Brandspurenanalytik“ wurden unterschiedlichste **Brandbeschleuniger** verwendet (Abbildung 8).

Untersuchte Brandbeschleuniger

- Spiritus (verschiedene Sorten)
- Benzin
- Leichtbenzin
- Diesel
- Haushaltsreiniger
- flüssigen Grillanzünder
- Gel-Grillanzünder
- festen Grillanzünder
- Parfüm

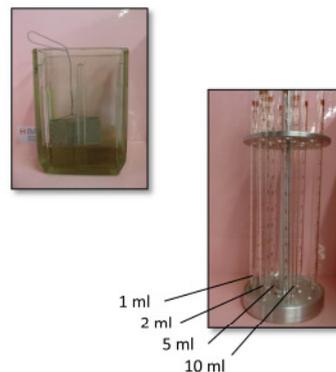


Abbildung 8: Verwendete Brandbeschleuniger und Methoden wie der Brandbeschleuniger aufgetragen wurde.

Im Rahmen dieses Forschungsberichtes soll nur auf die Methodenentwicklung für die Brandbeschleuniger Benzin und Diesel eingegangen werden, da diese bei den hier-

diskutierten Raumbränden zum Einsatz kamen. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen Chromatogramme von Benzin- bzw. Diesel-Lösungen. Die zugeordneten Verbindungen werden als Markerverbindungen für den jeweiligen Brandbeschleuniger für die Methodenentwicklung und Identifizierung herangezogen.

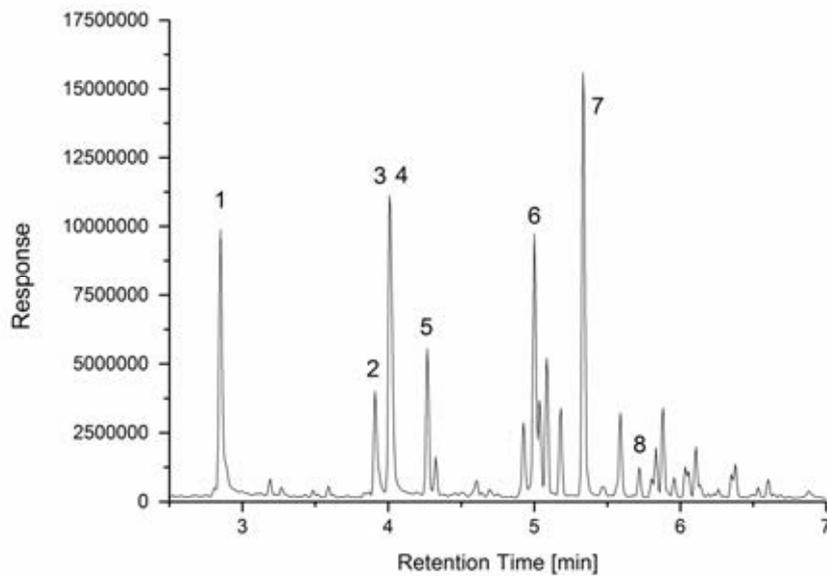


Abbildung 9: Chromatogramm ($m/z=50-500$) von Benzin. (1) Toluol, (2) Ethylbenzol, (3,4) m-, p-Xylol, (5) o-Xylol, (6) Ethylmethylbenzol, (7) Trimethylbenzol, (8) Indan (HS-SPME-GC-MS: Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min, 50°C).

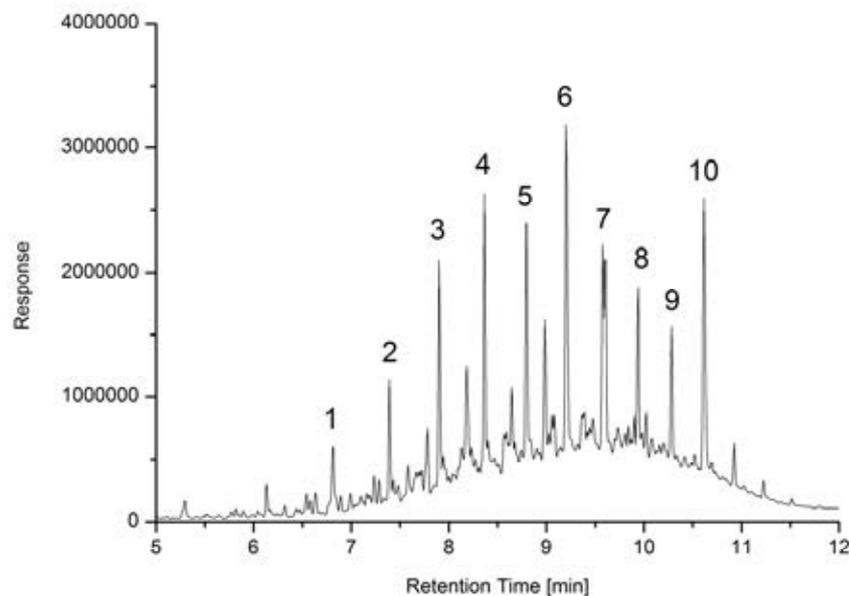


Abbildung 10: Chromatogramm ($m/z=50-500$) von Diesel. (1) Dodecan, (2) Tridecan, (3) Tetradecan, (4) Pentadecan (5) Hexadecan, (6) Heptadecan mit Pristan, (7) Octadecan mit Phytan, (8) Nonadecan, (9) Eicosan, (10) Heneicosan mit Biodiesel (HS-SPME-GC-MS: Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min, 50°C).

2.2 Extraktionsarten für die Analyse von festen Brandrückstandsproben

Die allgemeine Vorgehensweise bei der Herstellung der festen Brandrückstandsproben und der nachfolgenden chemischen Analytik ist in der Abbildung 11 zusammengefasst.

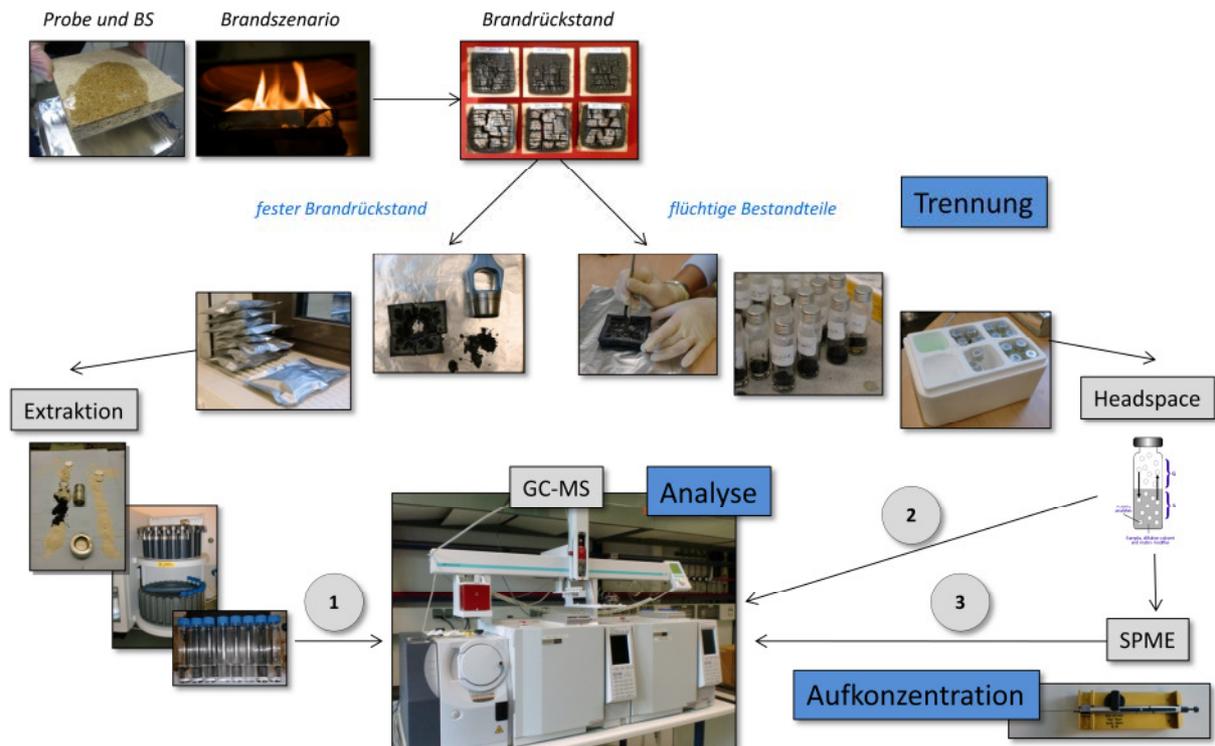


Abbildung 11: Schematischer Ablauf der Herstellung der Brandproben im Labormaßstab.

2.2.1 Fest-Flüssig-Extraktion

Bei der Fest-Flüssig Extraktion werden mit Hilfe eines Lösungsmittel Analyten aus einer festen Matrix herausgelöst. Dabei ist entscheidend, dass die Lösungsmittelpolarität auf die Polarität der zu extrahierenden Analyten angepasst ist. Die Fest-Flüssig-Extraktion des Brandgutes mit verschiedenen Lösungsmitteln wurde angewendet um den verwendeten Brandbeschleuniger zu extrahieren und um mögliche Reaktionsprodukte nachzuweisen, die bei der Verbrennung entstehen (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAKs), oder die durch eine Reaktion des Brandbeschleunigers mit dem Brandgut entstehen. Die im Cone-Kalorimeter hergestellten Brandproben wurden mittels ASE (accelerated solvent extraction) extrahiert. Diese Art der Fest-Flüssig-Extraktion ermöglicht ein zeitsparendes Extrahieren bei hohen Drücken und erhöhter Temperatur. Um die vorwiegend unpolaren Bestandteile der

Brandbeschleuniger und die unpolaren PAKs extrahieren zu können, wurden n-Hexan und Toluol als Lösungsmittel verwendet. Der Brandbeschleunigernachweis (Benzin, Diesel) dagegen gelang nach Extraktion mit n-Hexan und Toluol, allerdings nur nach Brandszenarien mit geringer thermischer Belastung der Probe und des Brandbeschleunigers (siehe Abbildung 12)) und bei Proben, die mit einer großen Menge an Brandbeschleuniger versetzt wurden.

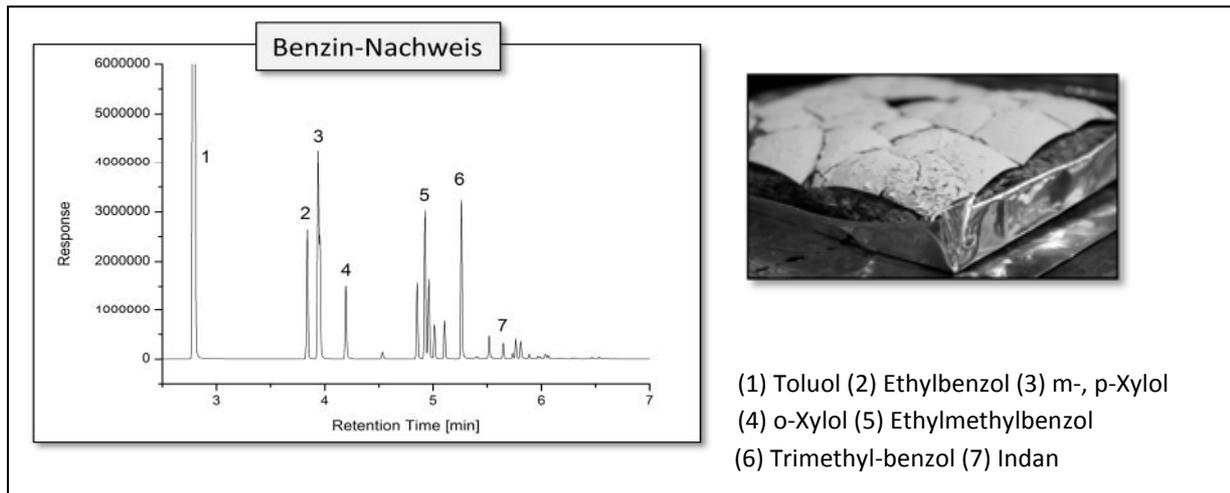


Abbildung 12: Chromatogramm von Span (mit Dekor) und 5 ml Benzin nach Brandversuch in der SDC, bei 25kW/m² und einer Branddauer von 600 s.

In allen Proben wurden keine weiteren Verbindungen wie PAKs oder weitere Reaktionsprodukte detektiert. Die Chromatogramme von extrahierten Brandrückständen ohne Brandbeschleuniger zeigten ebenfalls keine charakteristischen Verbindungen und auch ein relevanter Einfluss der Versuchsparameter konnte nicht ermittelt werden.

Für die Extraktion von Brandbeschleunigerspuren stellt die Lösemittelextraktion kein geeignetes Verfahren dar, da sehr hohe Konzentrationen an Brandbeschleuniger nötig sind um einen gesicherten Nachweis zu erhalten. Im Rahmen dieses Projektes kamen daher noch empfindlichere und selektivere Methoden zum Einsatz. Dafür wurden eine Reihe an Vormessungen durchgeführt: mit Brandbeschleuniger dotierte Holzkohleproben wurden unter Variation der jeweiligen Messparameter gaschromatographisch analysiert um die Messbedingungen zu optimieren, Vergleichsspektren aufzunehmen, Brandbeschleuniger-Komponenten zu identifizieren und Markerverbindungen für einen späteren Nachweis festzulegen. Für die Entwicklung dieser Methoden wurde Holzkohle mit den jeweiligen Brandbeschleunigern dotiert. Diese Messungen geschahen unter der Annahme, dass die Holzkohlematrix mit der Matrix des Brandgutes aus Holz- und Spanproben vergleichbar ist; entsprechende Messungen bestätigten diese Annahme.

2.2.2 Headspace-Probenahme

Bei der durchgeführten Headspace-Probenahme zur anschließenden GC/MS-Analyse wurde der Gasraum der temperierten Probe analysiert (ca. 100 mg Brandrückstand in einem 10 mL Vial). Durch Konditionierung der Probe stellt sich ein für die in der Probe enthaltenen Analyten ein Verteilungsgleichgewicht zwischen Gasraum und fester Matrix ein. Über die optimierten Messbedingungen (Extraktion bei 80 °C) war es möglich Benzin und Diesel nachzuweisen, z.B. bei Span-Proben mit 5 mL Brandbeschleuniger, verschwelt bei 25 kW/m² für 5 Minuten mit zusätzlicher Pilotflamme; ein Nachweis von Spiritus gelang hingegen nicht. Ein Nachweis von PAKs oder anderen charakteristischen Verbindungen über diese Methode konnte nicht erreicht werden. Die Headspace-Probenahme ist für den Brandbeschleunigernachweis nicht empfindlich genug und es wurde eine weitere Extraktionsmethode verwendet, die aufgrund eines adsorptiven Polymermaterials eine Aufkonzentrierung der Analyten ermöglicht.

2.2.3 Festphasen Mikroextraktion

Um die Empfindlichkeit für den Nachweis noch weiter herabzusetzen wurde ein adsorptives Verfahren zur Extraktion von flüchtigen organischen Verbindungen angewendet: die Festphasenmikroextraktion (solid phase microextraction, SPME). Bei dieser selektiven Analyt-Anreicherungsverfahren werden gasförmige Verbindungen an dem Sorbensmaterial der beschichteten SPME-Faser aufkonzentriert, dadurch ist der Nachweis von sehr geringen Analyt-Konzentrationen möglich. Als Beschichtung der Faser wurde eine Mischung aus drei Adsorptionsmaterialien unterschiedlicher Polarität gewählt (Divinylbenzol/Carboxen/Polydimethylsiloxan), um in der Lage zu sein, Analyten unterschiedlicher Polaritäten extrahieren zu können. Brandbeschleuniger auf Kohlenwasserstoffbasis wie Benzin und Diesel enthalten unpolare Verbindungen, Spiritus (Hauptkomponente Ethanol, versetzt mit verschiedenen Vergällungsmitteln) hingegen enthält überwiegend polare Komponenten. Durch Wahl dieser gemischten Faser war es möglich alle Untersuchungen mit nur einem Faser-Typ durchzuführen unabhängig von der Art des Brandbeschleunigers. Dies ist für die spätere Übertragbarkeit in die Praxis bei realen Brandproben von großem Vorteil, da so eine große Bandbreite an Komponenten unterschiedlichster Polarität aus unbekanntem Proben erfasst werden können. Zur Methodenentwicklung wurden Holzkohleproben mit den Brandbeschleunigern dotiert und unter Variation der SPME-Parameter (Agitatortemperatur, Inkubationszeit, Extraktionszeit) extrahiert (13). Die folgenden Abbildungen zeigen die Abhängigkeit der Peakflächen der Markerverbindungen von Benzin und Diesel bei verschiedenen SPME-Parametern. Die ermittelten Methodenparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Bei einer unbekanntem Probe empfiehlt es sich bei einer Temperatur von 50°C zu extrahieren um leichtflüchtige

Komponente nicht durch eine zu hohe Temperatur durch Verdampfen aus eines möglicherweise undichten Probenbehälters zu verlieren. Bei Anzeichen auf Diesel in der Probe sollte dann ein vorher abgetrenntes Aliquot der Probe bei 70°C analysiert werden um Verbindungen im höheren Siedebereich auch erfassen zu können.

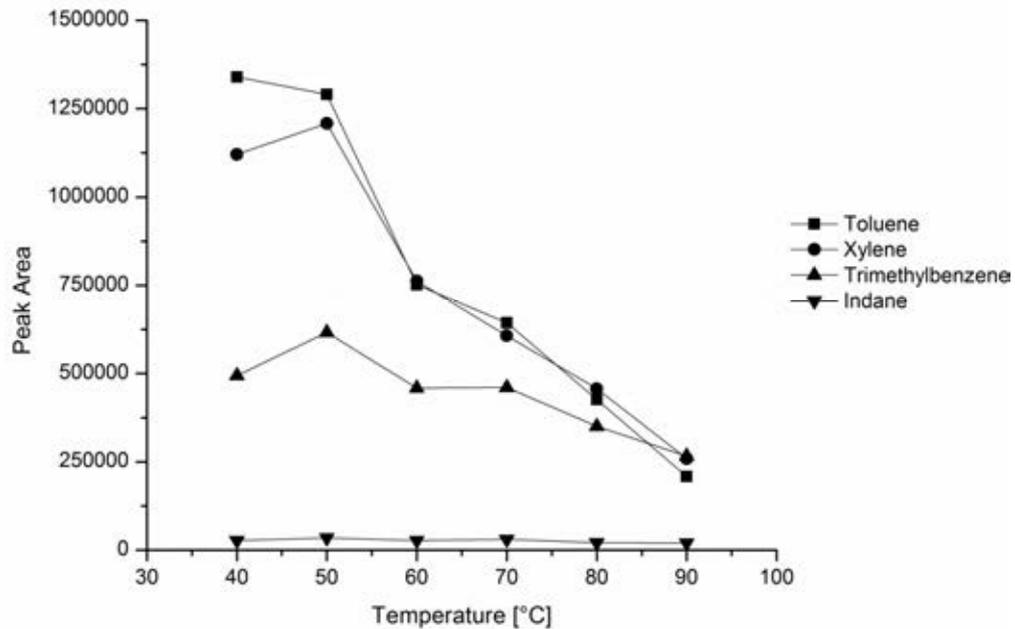


Abbildung 13: Variation der Agitatortemperatur, Brandbeschleuniger: Benzin (Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min) (13).

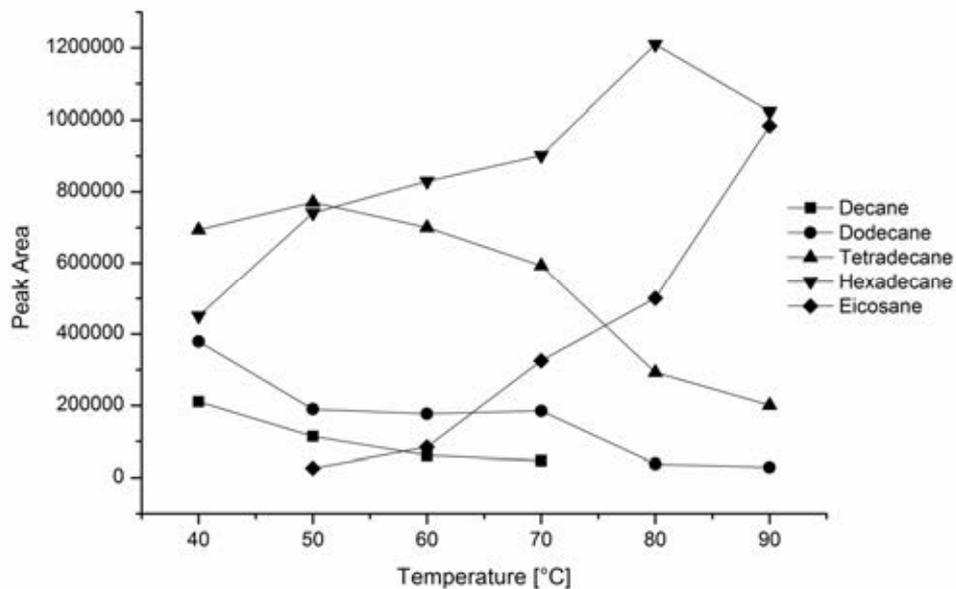


Abbildung 14: Variation der Agitatortemperatur, Brandbeschleuniger: Diesel (Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min) (13).

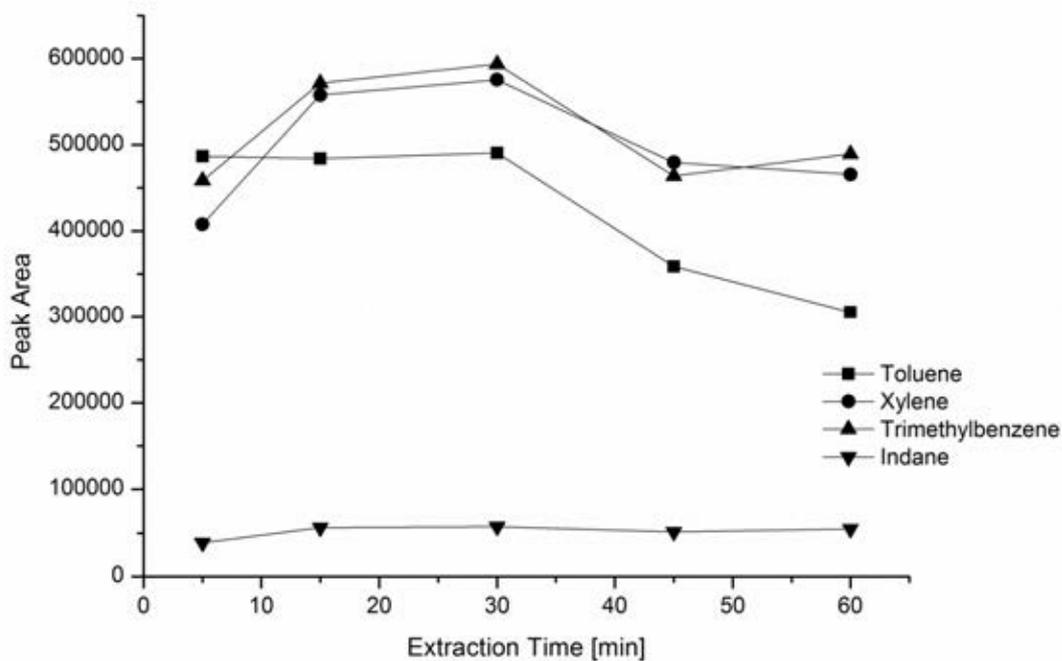


Abbildung 15: Variation der Extraktionszeit, Brandbeschleuniger: Benzin (Inkubationszeit 5 min, Agitatortemperatur 50°C) (13).

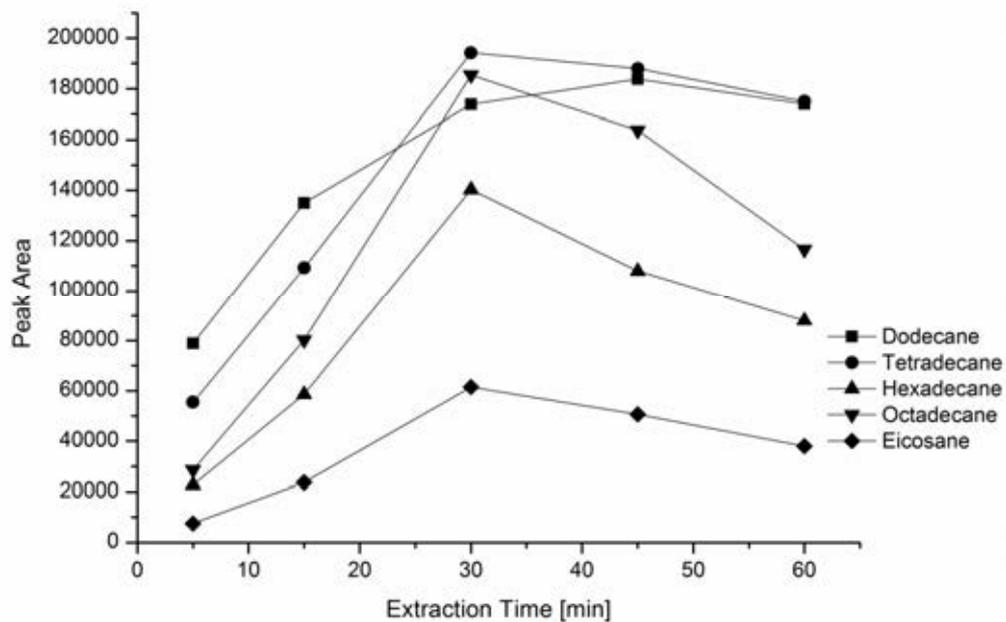


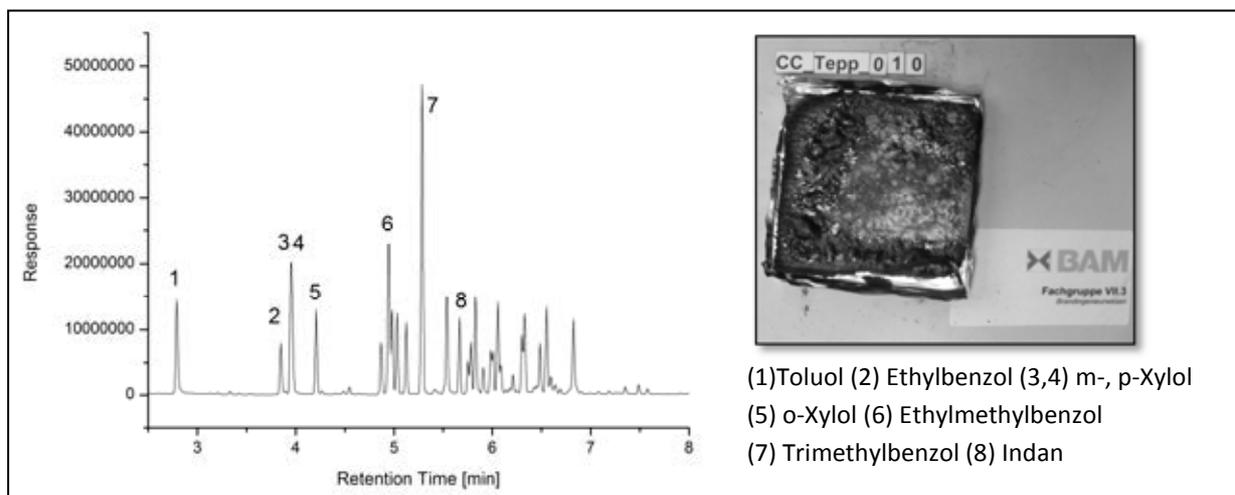
Abbildung 16: Variation der Extraktionszeit, Brandbeschleuniger: Diesel (Inkubationszeit 5 min, Agitatortemperatur 70°C) (13).

Tabelle 2: HS-SPME Methodenparameter für Benzin und Diesel – DVB/CAR/PDMS-Faser (13).

Brandbeschleuniger	Agitortemperatur	Inkubationszeit	Extraktionszeit
Benzin	50°C	5 min	30 min
Diesel	70°C	5 min	30 min

Die HS-SPME-GC-MS-Methode erwies sich erwartungsgemäß als empfindlichste der verwendeten Extraktionsmethode. Dies gilt sowohl für die festen Brandrückstände als auch für die Partikelproben, die während der Brandversuche in einem Kaskadenimpaktor gesammelt wurden. Untersuchungen zur Probenahme im Labormaßstab zeigten, dass es möglich war den Brandbeschleuniger auch in Wischproben (abwischen der Wand des Brandprüfofens mit Glaswolle) nachzuweisen. Dies greift den theoretischen Ansatz auf, dass durch die Hitzeentwicklung bei einem Brand der leichtflüchtige Brandbeschleuniger verdampft und sich zusammen mit entstehenden Rußpartikeln an den kälteren Stellen des Raumes niederschlägt und dort rekondensiert. Im Rahmen der Raumbrandversuche wurden ebenfalls Wischproben genommen und in einigen Proben gelang der Brandbeschleunigernachweis. Mit Hilfe dieser Technik wurden alle Proben der Raumbrandversuche analysiert.

Im Folgenden sind einige Beispiele von positiven Brandbeschleunigernachweis aufgeführt: Diese Brandversuche wurden sowohl in kleinem Labormaßstab (Cone Calorimeter, Rauchkammer) als auch im größeren Maßstab (SBI, Teppichprüfstand) durchgeführt. Der Nachweis von Brandbeschleunigern gelingt auch noch nach sehr drastischen Brandbedingungen und mit sehr geringen Brandbeschleunigermengen. In Abbildung 17 ist der Nachweis von Benzin in Teppichproben, in Abbildung 18 ist der Nachweis von Diesel in Spanproben und in Abbildung 19 ist der Nachweis von Spiritus in Spanproben dargestellt. Eine größere Teppichprobe wurde mit 5 ml Benzin versetzt und im RPT-Gerät (Radiant Panel Test) verbrannt. Der Nachweis des Benzins ist in Abbildung 20 wiedergegeben.



(1)Toluol (2) Ethylbenzol (3,4) m-, p-Xylol
 (5) o-Xylol (6) Ethylmethylbenzol
 (7) Trimethylbenzol (8) Indan

Abbildung 17: Chromatogramm von 30 sec in Benzin eingelegten Teppichproben nach Cone Calorimeter Versuch (1 min, Pilotflamme, 25 kW/m²).

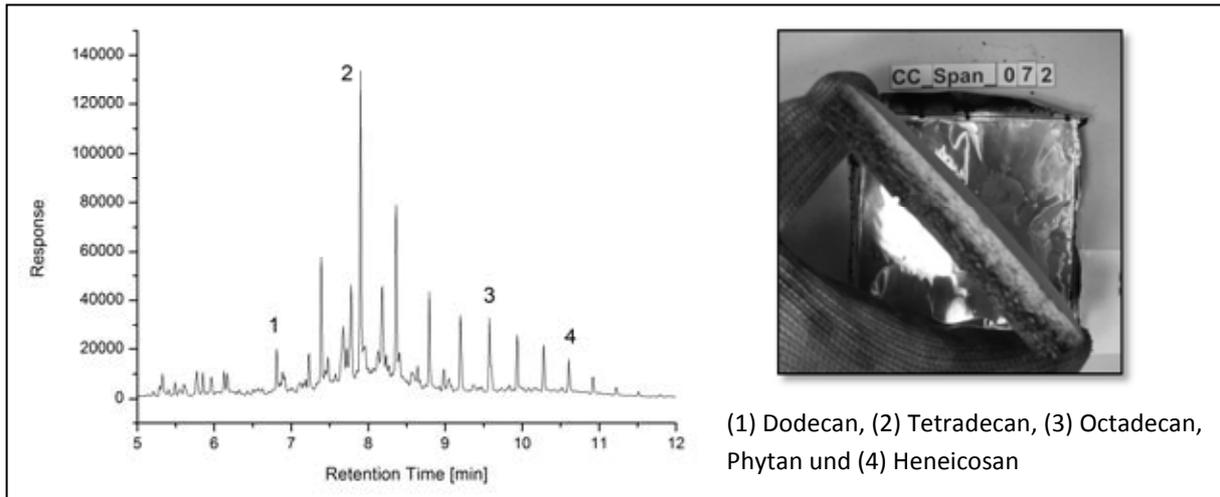


Abbildung 18: Chromatogramm von 1ml Diesel dotierten Span nach Cone Calorimeter Versuch (10 min, 25 kW/m²).

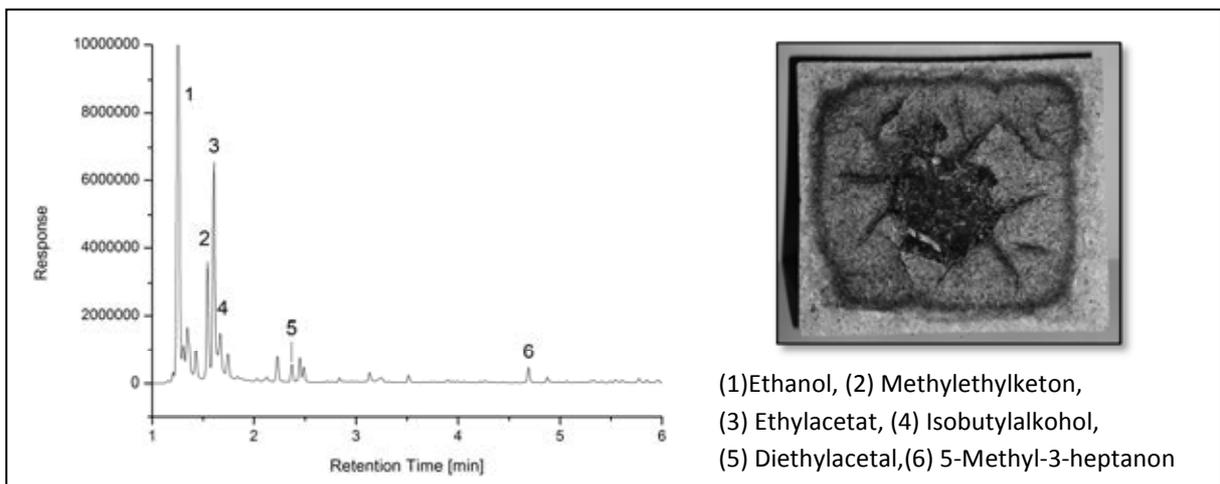


Abbildung 19: Chromatogramm von 30s in Spiritus eingelegten Span nach Rauchkammer Versuch (10 min, 25 kW/m²).

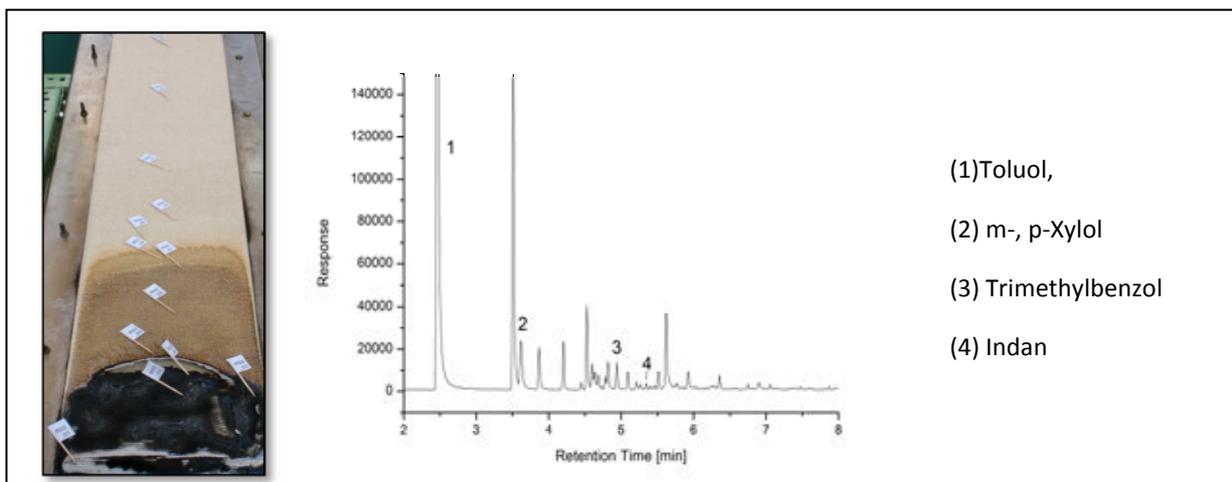


Abbildung 20: Chromatogramm einer Teppichprobe (mit 5 ml Benzin), welche 10 min mit 10 kW/m² und einer zusätzlichen Zündflamme beansprucht wurde.

Weitere analytische Ergebnisse zu den Laborbrandversuchen sind im Anhang A (Brandbeschleunigernachweis), Anhang B (Rauchemission), Anhang C und D (Einbrandtiefen) zu finden.

Ein Vergleich der verwendeten Extraktionsmethoden in Hinblick auf Nachweisbarkeit des Brandbeschleunigers ist in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Vergleich der verwendeten Extraktionsmethoden beim Nachweis von Brandbeschleunigern

Methode	Vorteile	Nachteile
ASE	-Brandbeschleuniger können teilweise nachgewiesen werden, Brandmarkerverbindungen nicht	- wenig sensitive Methode - ungewünschte Verbindungen von der Matrix können ebenfalls herausgelöst werden - Lösungsmittelpolarität entscheidend - 400 mg Rückstand für ASE Zelle, Aufarbeitung, Aufwand, Zeit und Kosten
Headspace	-Brandbeschleuniger können teilweise nachgewiesen werden,	- wenig empfindliche Methode
HS-SPME	-Brandbeschleuniger können auch bei stark verbrannten Proben nachgewiesen werden, -empfindlich, einfache Handhabung, keine Aufarbeitung, geringer Zeitaufwand	- keine quantitative Methode ohne Zugabe eines internen Standards - auch unerwünschte Analyten adsorbieren an der Faser und besetzen die Oberfläche - Probe kann nur einmal analysiert werden

2.3 Brandanalytik von Partikeln

In diesem Projekt wurde auch Partikel, die im Brandfall entstehen untersucht. Die durchgeführten Untersuchungen im Laborbrandmaßstab beinhalteten dabei zwei Bereiche. Zum einen betrifft dies die Aerosolspektrometrie, d.h. es wurden Partikelgrößenverteilungen und Partikelanzahlkonzentrationen während der Laborbrandversuche gemessen. Zum anderen wurde ein Aerosolsampling durchgeführt, um Brandspuren des Brandbeschleunigers auf entstehenden Partikeln zu untersuchen. Dazu mussten die Partikelproben durch Extraktion oder HS-Techniken zunächst aufgearbeitet und anschließend mit Hilfe der GC-MS analysiert, wie zuvor auch bereits bei den Brandrückständen beschrieben.

Für das Aerosolsampling wurde die Partikel und Kondensate, die während der Brandversuche entstanden sind, in einem ein 13stufiger Kaskadenimpaktor gesammelt, welcher an die Rauchkammer angeschlossen wurde, wie in Abbildung 21 zu erkennen ist. Die während des Brandversuches entstandenen Partikel und Kondensate wurden in den einzelnen Stufen in Abhängigkeit der Partikelgröße (von 10 bis 0,3 μm) gesammelt (Abbildung 22), in Vials verpackt und mittels HS-SPME-GC-MS bezüglich des Brandbeschleunigers weitergehend untersucht.

Werden Holzproben in der Rauchkammer verschwelt, so können in den während des Brandversuches gesammelten Partikeln die Abbauprodukte des Holzes wieder gefunden werden (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Zusätzlich zu den im Kaskadenimpaktor getrennten Partikeln und Kondensaten wurden Wischproben an den Rauchkammerwänden mit Glaswolle und einer entsprechenden Schablone durchgeführt und anschließend ebenfalls in Vials verpackt und nach o.g. Procedure analysiert (siehe Abbildung 25).

Der Nachweis von Benzin als Brandbeschleuniger gelingt sowohl bei den Partikelproben aus dem Kaskadenimpaktor als auch bei den Wischproben. Über HS-SPME-GC-MS-Analyse war es möglich, neben den thermischen Abbauprodukten des Holzes, auch den verwendeten Brandbeschleuniger Benzin in dem Kondensat-Rückstand nachzuweisen. Die Analyse der Kondensationsprodukte, die sich nach einem Brand, an den Wänden abschlagen, d.h. durch Wischproben, stellt einen weiteren erfolgsversprechenden Ansatz bei der Ermittlung der Brandursache dar.

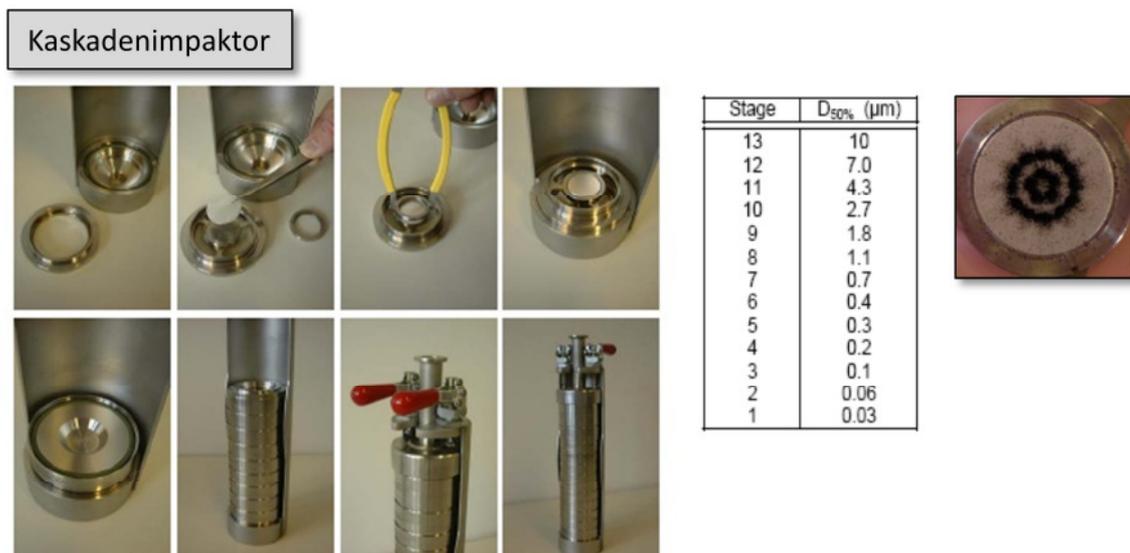


Abbildung 21: 13 stufiger Impaktor zum Aerosolsampling während der Laborbrandversuche (links) sowie partikelgrößenabhängige Stufen des Kaskadenimpaktors und ein Beispiel einer Impaktorfolie mit gesammelten Partikeln (rechts).

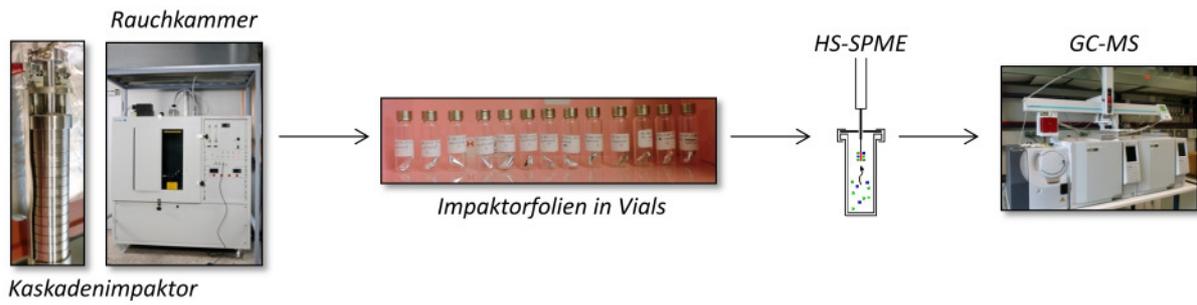


Abbildung 22: Vorgehensweise zum Nachweis von Brandbeschleunigern an Partikeln (links: angeschlossener Kaskadenimpaktor, Mitte: herausgenommene Impaktorfolien, rechts: mit HS-SPME-GC-MS analysierte Partikelproben).

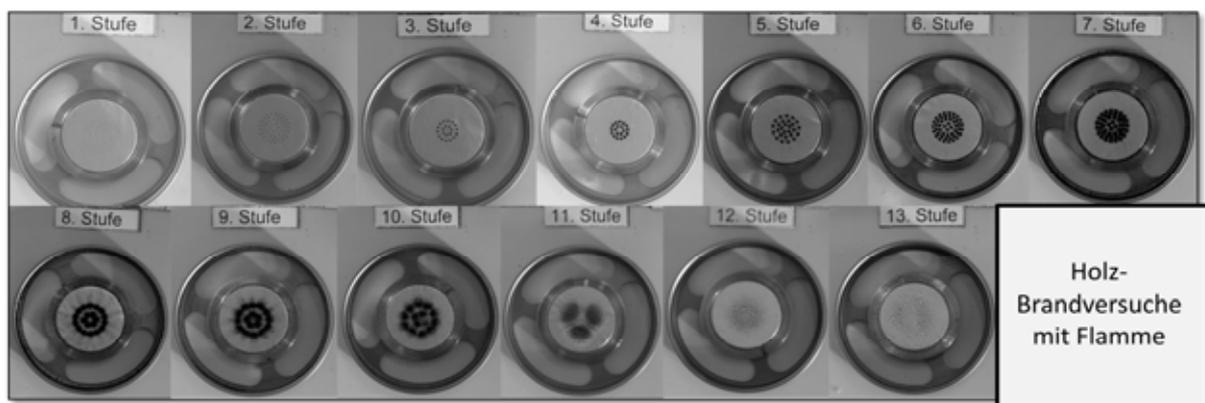


Abbildung 23: 13 Stufen eines Kaskadenimpaktors nach einem Brandversuch (20 min, 25 kW/m²) von Holz in der Rauchkammer.

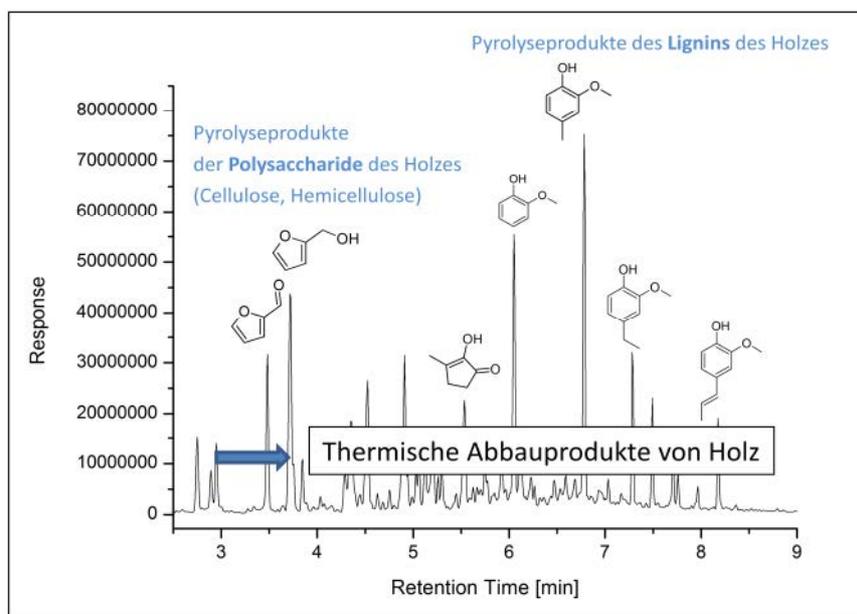


Abbildung 24: Nachweis von Abbauprodukten von Holz nach einem Brandversuch (20 min, 25 kW/m²) von Holz in der Rauchkammer.

Wischproben



Abbildung 25: Wischproben von den Wänden der Rauchkammer.

Für die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung und der absoluten Partikelanzahlkonzentration während der Laborbrandversuche wurde an die Rauchkammer ein Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS)-Gerät angeschlossen, wie in Abbildung 26 zu erkennen ist.

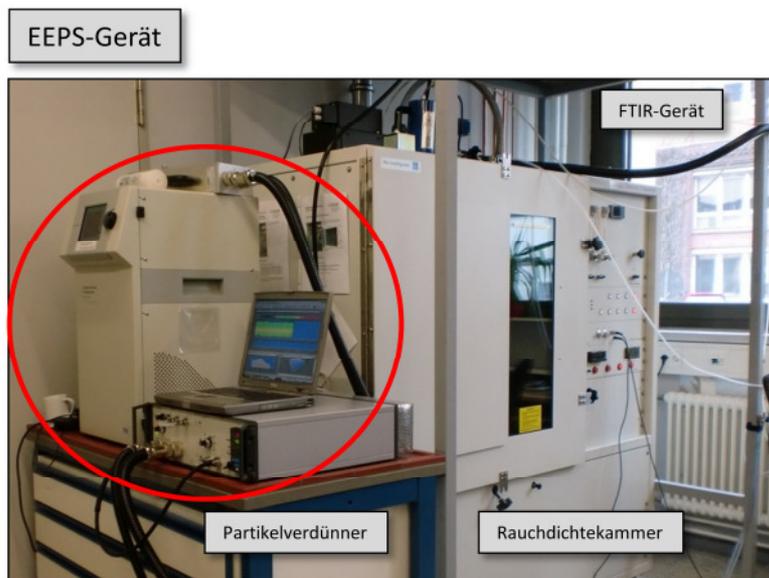


Abbildung 26: Rauchkammer mit angeschlossenem EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer)-Gerät zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung und der Partikelanzahlkonzentration.

In Abbildung 27 ist die Partikelgrößenverteilung während des Brandversuches von Holz mit und ohne zusätzliche Flamme in der Rauchkammer dargestellt. Man kann in der Partikelgrößenverteilung deutliche Unterschiede zwischen den Brandversuchen mit und ohne Flamme erkennen. Ein schwelender Versuch ohne Flamme bewirkt vorwiegend zwei Partikelmoden mit Partikeldurchmessern von 190 und 80 nm. Betrachtet man die absolute Partikelanzahlkonzentration, dann sind z.B. nach 9 min Branddauer etwa 3×10^6 Partikel im Brandraum vorhanden. Findet ein Brandversuch mit Flamme statt, verändert sich die

Partikelgrößenverteilung. Es entstehen vorwiegend Partikel mit kleinerem Durchmesser von etwa 30 nm; auch ist die Partikelanzahlkonzentration wesentlich geringer als bei der schwelenden Verbrennung.

Bei den flammenlosen Brandversuchen zeigte sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Partikelanzahlkonzentration und der spezifischen optischen Dichte (Abbildung 28).

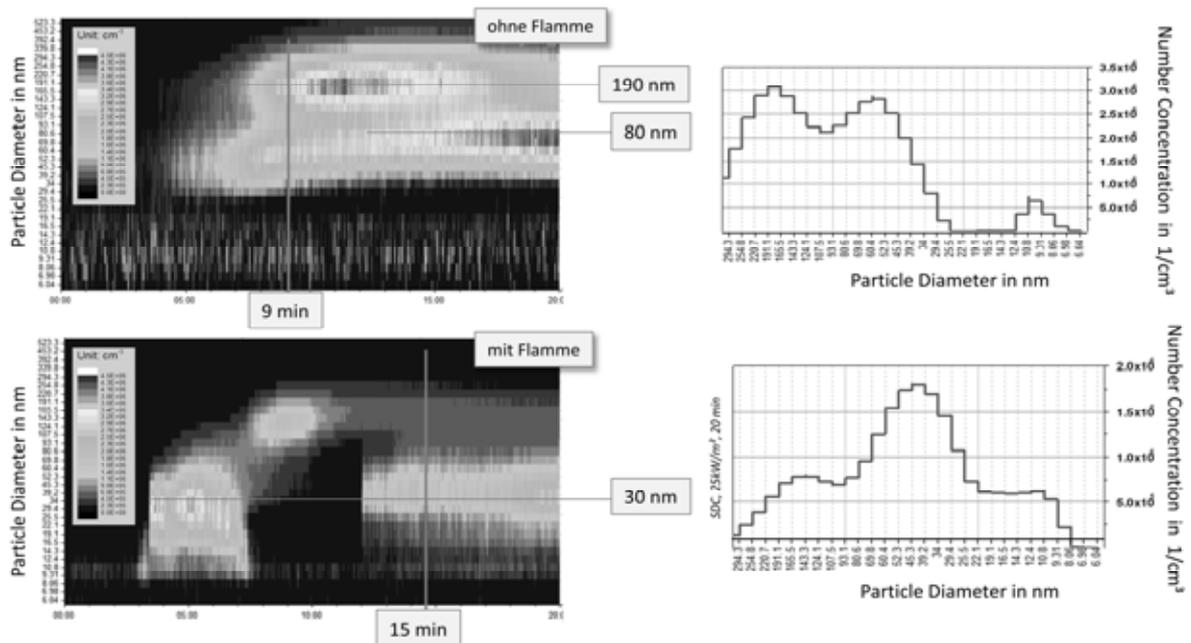


Abbildung 27: Partikelgrößenverteilung (links) während eines Brandversuch (20 min, 25 kW/m²) mit (oben) und ohne zusätzliche Flamme (unten) von Holz in der Rauchkammer sowie die entsprechende Partikelanzahlkonzentration nach 9 min und 15 min.

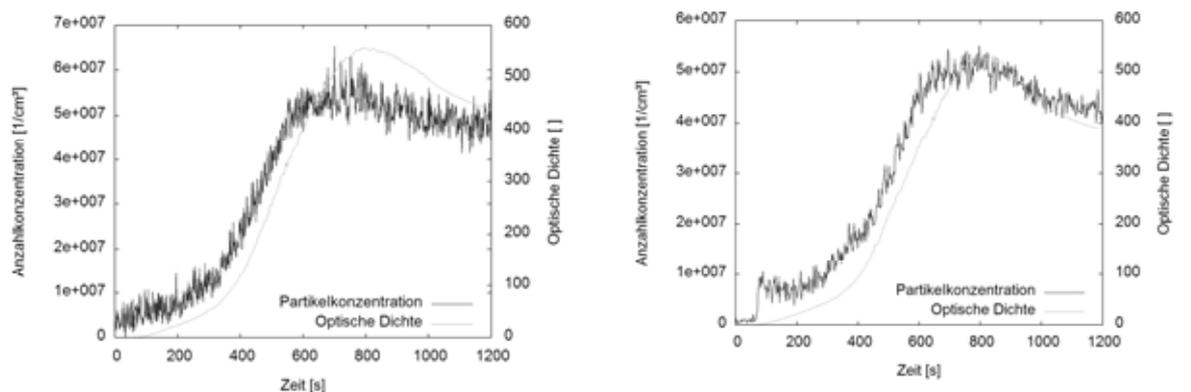


Abbildung 28: Optische Dichte und Partikelanzahlkonzentration während eines Brandversuch (20 min, 25 kW/m²) von Holz in der Rauchkammer (rechts mit Benzin und links ohne Brandbeschleuniger).

Weiterhin konnte nur sehr geringe Einflüsse des Brandbeschleunigers auf die Partikelgrößenverteilung während der Brandversuche nachgewiesen werden. Die spezifische optische Dichte nimmt mit zunehmender Menge an Brandbeschleuniger ab. In Abbildung 29 ist beispielhaft die spezifische optische Dichte des Brandrauchs in der SDC bei der Verschwelung von Spanplatte für verschiedene Brandbeschleunigermengen dargestellt. Benzin hat einen deutlich, mindernden Einfluss auf die Entstehung von Rußpartikeln bei der Pyrolyse von Spanplatte. Dies ist umso mehr interessant, da sich die Proben in diesen Versuchen nicht entzünden sondern nur schwelen. Die Darstellung in Abbildung 29 zeigt, dass der Einfluss des Brandbeschleunigers auf die optische Dichte in der Anfangsphase des Versuchs, in der der größte Teil des Brandbeschleunigers verdampft bzw. thermisch zersetzt wird, am größten ist. Gegen Versuchsende ist der Einfluss kaum noch vorhanden.

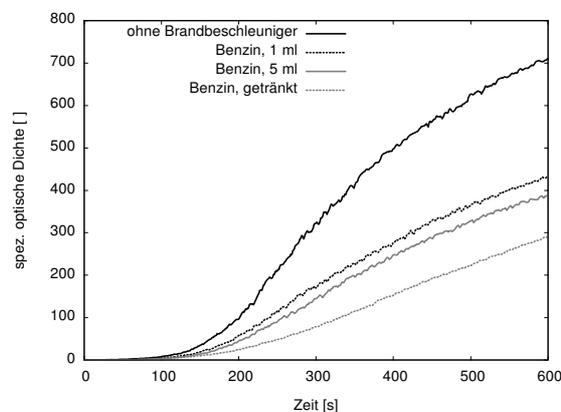


Abbildung 29: Optische Dichte während eines Brandversuches (20 min, 25 kW/m²) von Span in der Rauchkammer in Abhängigkeit der zugesetzten Brandbeschleunigermenge.

2.4 Brandgase

Die quantitative Erfassung toxischer Rauchgaskomponenten, wie Kohlenmonoxid, Cyanwasserstoff, etc. erfolgte durch Kopplung eines FTIR-Spektrometers an die Rauchdichtekammer bzw. im Abzugsrohr des Cone Calorimeters. Der Brandbeschleuniger wurde über eine Spritze direkt auf die Proben in der Atmosphärenbox des Cone Calorimeters aufgetragen, wie in Abbildung 30 zu erkennen ist. Die Ergebnisse zeigen, dass der Brandbeschleuniger keinen wesentlichen Einfluss auf die qualitative und quantitative Zusammensetzung des Rauchgases hat und lediglich eine zeitliche Verschiebung der Brandgasemissionen bewirkt, wie in Abbildung 30 zu erkennen ist.

Hingegen hat die Sauerstoffatmosphäre einen sehr starken Einfluss auf die Rauchgaszusammensetzung und die Rauchentwicklung. In einer an das Cone Calorimeter angeschlossenen Atmosphärenbox wurden die verschiedenen Materialien mit z.B. 50 kW/m²

beaufschlagt und in Abhängigkeit der Sauerstoffatmosphäre (0-21 Vol% Sauerstoff) untersucht. Die Rauchentwicklung und die Rauchgaszusammensetzung während der Brandversuche von z.B. Spanplatten in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration sind in Abbildung 31 und Abbildung 32 wiedergegeben. Mit abnehmender Sauerstoffkonzentration nehmen die Rauchentwicklung und die Emission von Brandgasen, wie Kohlenstoffmonoxid, Cyanwasserstoff, Ammoniak, Methan und Formaldehyd zu, während der Kohlenstoffdioxid- und Stickoxidanteil abnimmt.

Es zeigte sich, dass Wärmefreisetzungsrate, Massenverlustrate und Entstehungsanteile der Brandprodukte vom Sauerstoffgehalt, der Bestrahlungsstärke und dem Material abhängig sind, der Einsatz von Brandbeschleunigern bewirkt dagegen nur eine zeitliche Verschiebung der Kenngrößen.

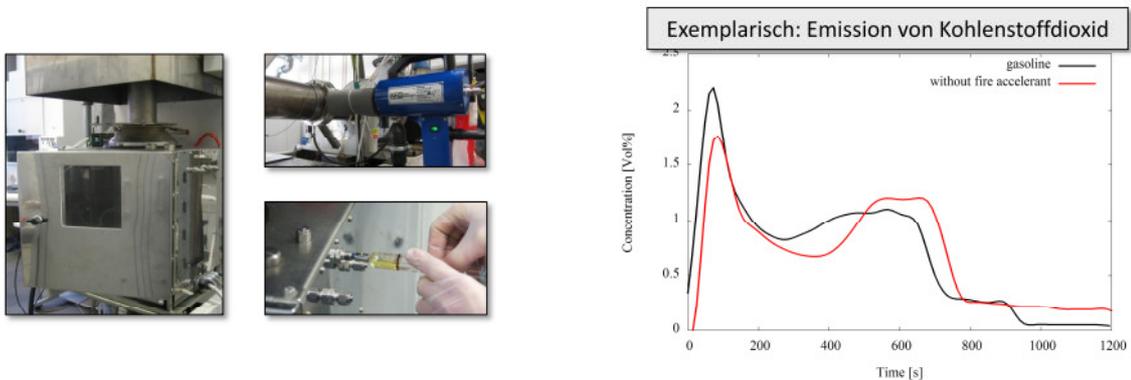


Abbildung 30: Auftragen des Brandbeschleunigers durch eine Spritze direkt auf die Probe in der Atmosphärenbox (links) und resultierende Kohlenstoffdioxidemission mit und ohne Brandbeschleuniger während eines Cone Calorimeter Brandversuches mit 50 kW/m^2 .

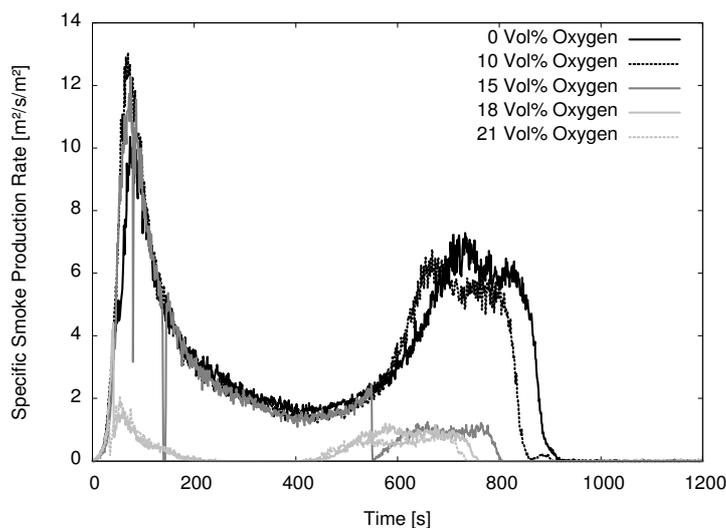


Abbildung 31: Rauchentwicklung während der Brandversuche von Span im Cone Calorimeter mit Atmosphärenbox bei 50 kW/m^2 in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration.

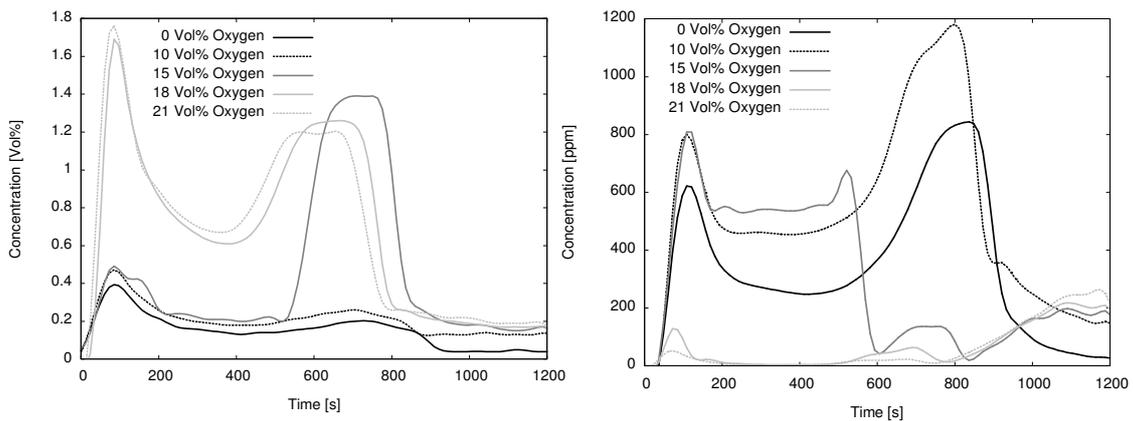


Abbildung 32: Kohlenstoffdioxid (links)- und Kohlenstoffmonoxidkonzentration während eines Brandversuches von Span im Cone Calorimeter mit Atmosphärenbox bei 50 kW/m² in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration.

2.5 Probelagerung

Da die Proben nicht immer zeitnah analysiert werden konnten, wurden Experimente zur Probelagerung durchgeführt. Die Versuche zeigten, dass es für die Konservierung der Proben in den Vials vorteilhaft ist, wenn sie mit 2 mL MilliQ-Wasser überschichtet werden (Abbildung 33).

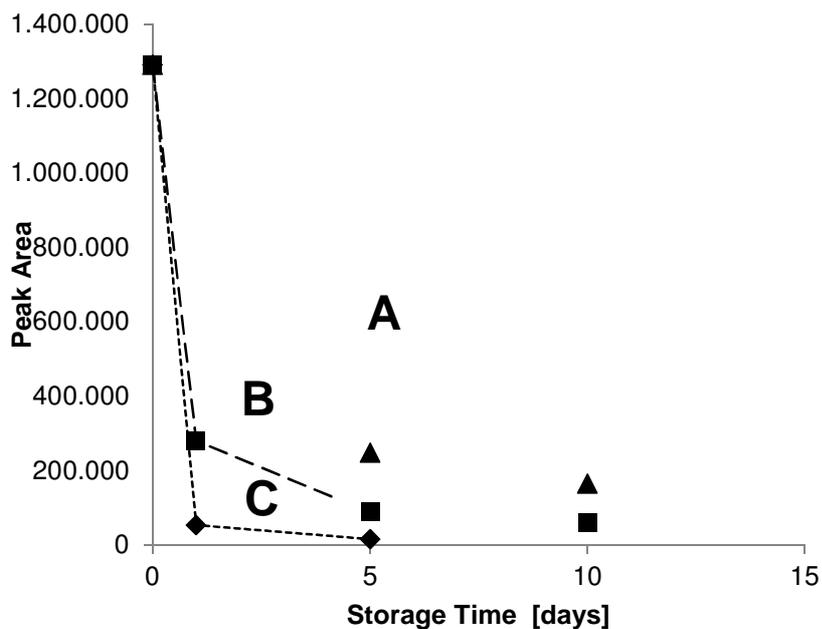


Abbildung 33: Abhängigkeit der Peakflächen der Benzinmarker Verbindung Toluol ($m/z=91$) unter verschiedenen Lagerungsbedingungen (HS-SPME-GC-MS. A: Probe überschichtet mit MilliQ-Wasser, B: Vial geschlossen, C: Vial offen.

2.6 Datenarchivierung

2.6.1 Probenbezeichnung

Für die systematische Benennung der einzelnen Experimente und der zugehörigen Proben wurde ein Benennungssystem entwickelt, das es ermöglicht jeder Probe eine eindeutige Bezeichnung zu zuordnen. Aus dem Probenname ist zu zudem ablesbar, in welchem Versuchsgerät die Probe hergestellt wurde, um welches Probematerial und –typ es sich handelt, wie die Probe aufgearbeitet wurde etc. (Abbildung 34 und 35).



Abbildung 34: Handkarte zur Probenbezeichnung, Bezeichnung direkt nach Probenherstellung.

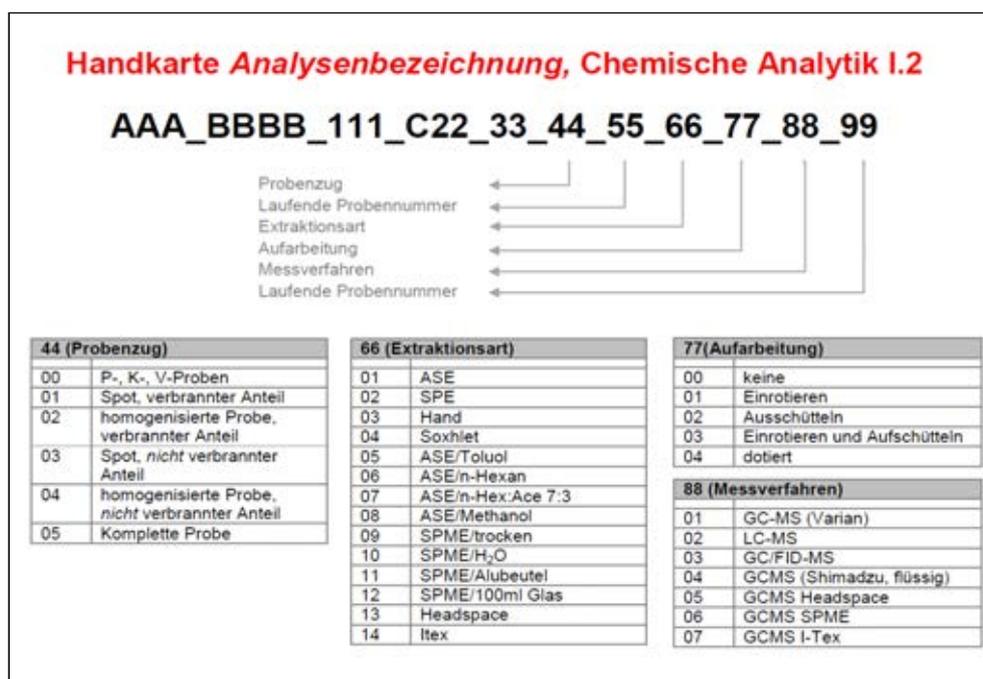


Abbildung 35: Handkarte zur Probenbezeichnung, Bezeichnung vor chemischer Analyse.

2.6.2 Datenbank

Zur Archivierung aller Versuche und Ergebnisse wurde eine Access-Datenbank angelegt. Innerhalb dieser Datenbank ist es möglich nach beliebigen Parametern zu suchen (z.B. Material, Versuchsgerät, Art des Brandbeschleunigers etc.) und sich die Ergebnisse anzeigen zu lassen. Abbildung 36 zeigt die Oberfläche der Datenbank.

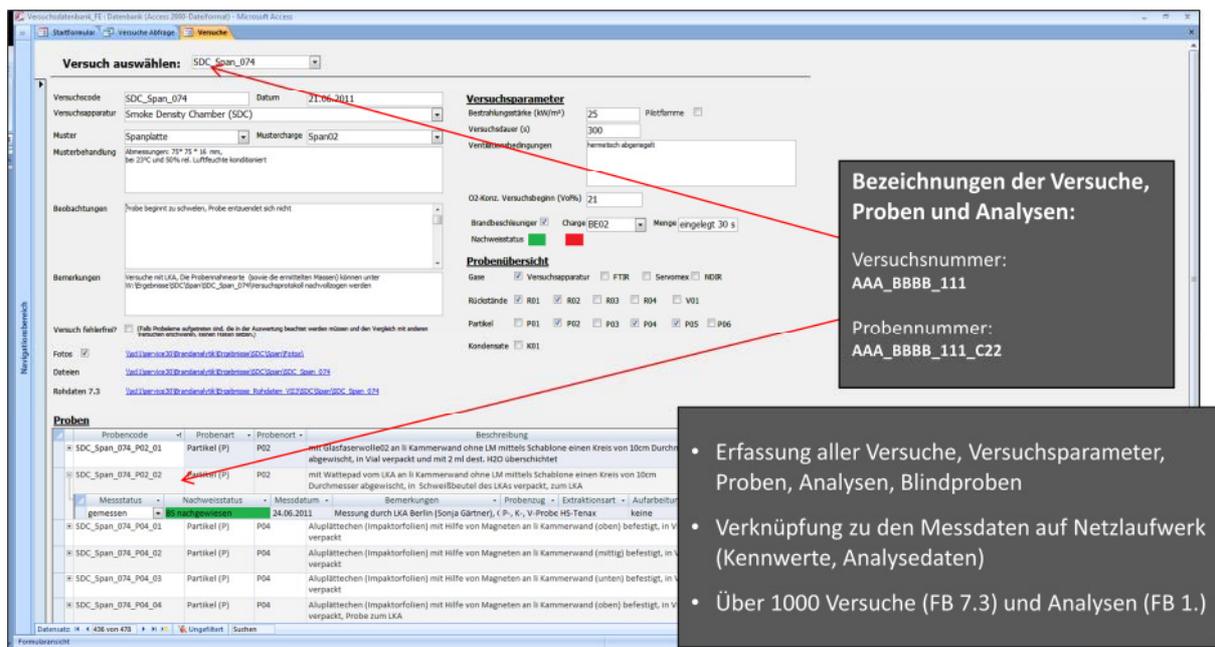


Abbildung 36: Oberfläche der Datenbank zur Archivierung der Experimente und der Ergebnisse.

3.1 Zusammenfassung

Es wurde eine geeignete Prüfmethode zum Nachweis von Brandbeschleunigern entwickelt. Mit Hilfe der HS-SPME-GC-MS-Analyse konnten Brandbeschleuniger, wie Benzin, Diesel und Spiritus in Abhängigkeit verschiedener Brandszenarien nachgewiesen werden. Die Brandbeschleuniger konnten im Brandrückstand als auch an Partikeln sowie durch Wischproben nachgewiesen werden. Wischproben an realen Brandorten bieten aufgrund der leichten Verfügbarkeit neben den klassisch genommenen Brandrückstandsproben damit eine weitere Alternative beim Brandbeschleunigernachweis. Der Einfluss verwendeter Brandbeschleuniger wird in den Brandgasen durch eine zeitliche Verschiebung der Emission der Brandgase deutlich.

3. Versuchsdurchführung Raumbrände

3.1 Versuchsaufbau

Die Raumbrandversuche wurden an der Brandprüfstelle Laue der Gesellschaft für Materialforschung für das Brandwesen Leipzig mbH (MFPA) durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus kann dem Forschungsbericht Raumbrände – Teil 1 Versuchsaufbau und brandtechnologische Untersuchungen entnommen werden (14). Insgesamt wurden fünf Versuche durchgeführt. Für jeden Versuch wurde der Brandraum identisch eingerichtet und mit Teppich ausgelegt. Es wurden typische Wohnzimmergegenstände verwendet um möglichst realistische Bedingungen zu erzielen. Unter anderem wurde der Raum ausgestattet mit zwei Sofas, zwei Tischen, vier Stühlen, Plastik- und Glasvasen, Lampen und Stoff. In den fünf Regalen befanden sich 350 kg Kataloge, 20 kg Polyurethanblöcke und 8.5 kg Polyamidformteile. Die gesamte Brandlast des Raumes betrug pro Versuch etwa 8414 MJ (415 MJm^{-2}), der mittlere Heizwert lag bei 13 MJkg^{-1} . Die Abbildungen 37 und 38 den Versuchsaufbau.

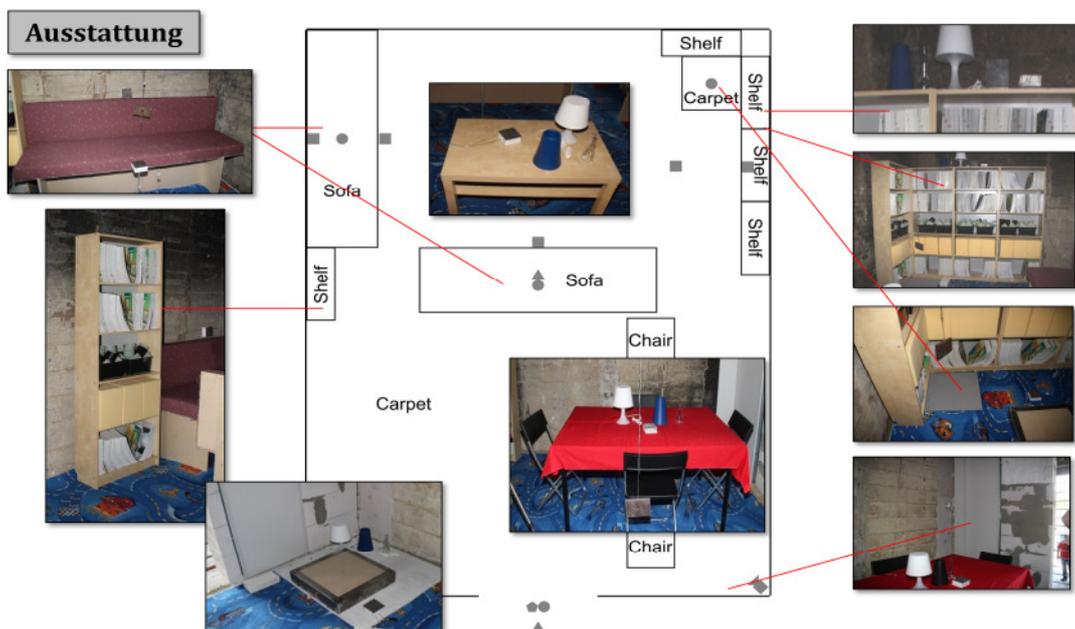


Abbildung 37: Schematische Darstellung des Brandraumes mit Fotos der Einrichtungsgegenstände.

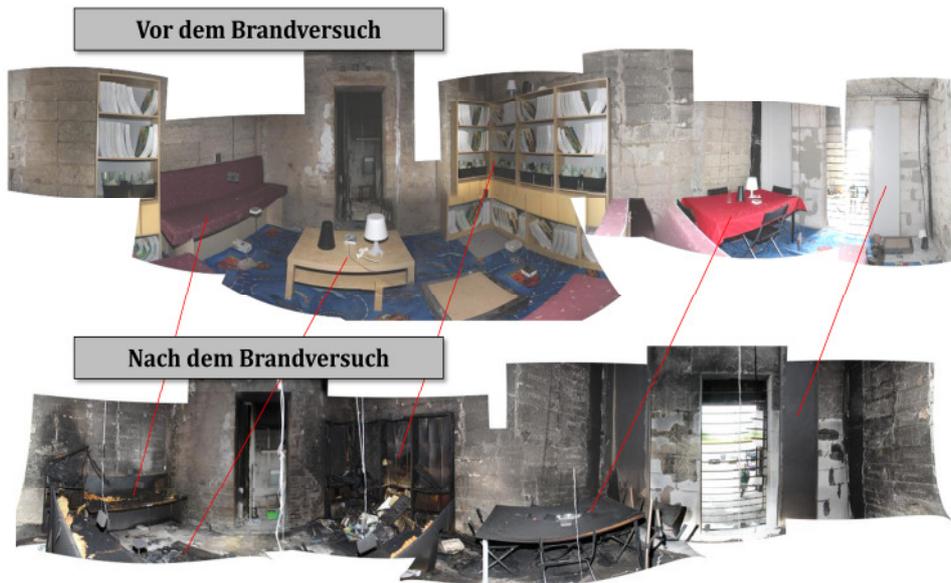


Abbildung 38: Brandraum vor und nach dem Brand (Versuch 5).

4.2 Versuchsdurchführung

Der erste Versuch wurde ohne Brandbeschleuniger mittels eines Feuerzeuges ausgelöst. Die weiteren vier Versuche wurden mittels eines Brandbeschleunigergemisches aus Benzin und Diesel (1:1, v/v) und einer Fernzündeinrichtung (siehe Abbildung 39). Der erste Versuch ohne Brandbeschleuniger wurde durchgeführt um Hintergrundbelastungen der Brandstätte und entstehende Brandprodukte durch das Verbrennen der Einrichtung zu erfassen. Zusätzlich wurden vor jedem Versuch Vials gefüllt mit Holzkohle im Brandraum aufgestellt und erst kurz vor der Entzündung der jeweiligen Versuche entfernt. Diese Proben dienen der Bestimmung der „Luft-Kontamination“. Auf dem Testgelände ist von einer nicht unerheblichen Kontamination der Luft durch Kraftstoffabgase zu rechnen. Die erfasste Kontamination wurde für die Auswertung berücksichtigt um nicht zu einem falsch positiven Ergebnis bei den Brandrückstandsproben zu gelangen.

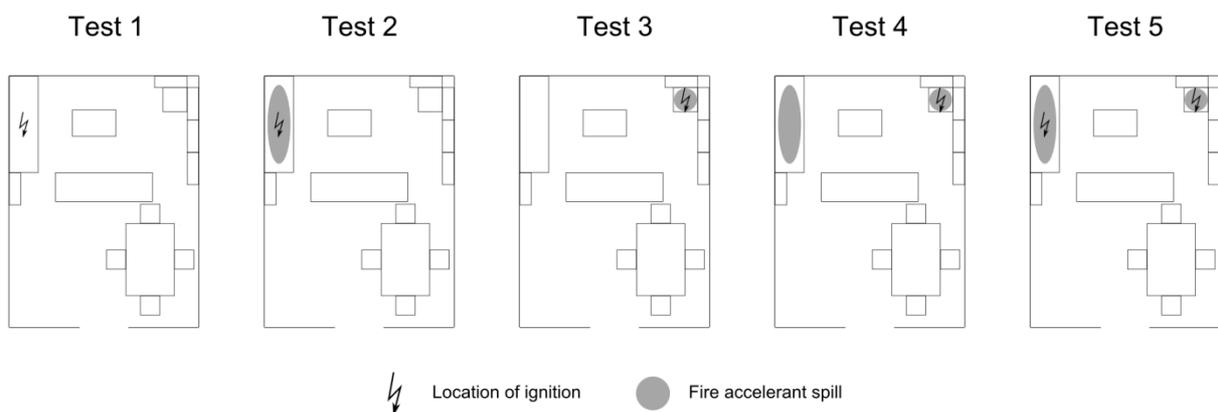


Abbildung 39: Szenarien der fünf Raumbrände – Zündort und Auftragsort des Brandbeschleunigers.

Im Falle einer Brandstiftung mit flüssigen Brandbeschleunigern können sowohl die energetisch gefährlichen, brandtechnologischen Kennwerte (Temperatur, Wärme) als auch die stofflich gefährlichen Kennwerte (Rauchtoxizität) wesentlich schneller Maximalwerte erreichen, als bei einer technischen Brandursache.

Durch den Einsatz von Brandbeschleunigern bei Raumbränden kommt es zu einer beschleunigten Brandentwicklung und zu einem frühzeitiger einsetzenden Flashover. Ohne Brandbeschleuniger fand in Versuchen der Flashover nach 780 s statt, beim Einsatz von Brandbeschleunigern dagegen verkürzt sich die Zeit bis zum Flashover um mehr als die Hälfte.

In Abbildung 40 und Tabelle 4 sind die zeitlichen Abläufe der fünf Raumbrandversuche dargestellt.

Tabelle 4: Ereignisübersicht der einzelnen Szenarien, Zeitangaben in Sekunden (14).

Tabelle 4.1: Ereignisübersicht, Zeitpunkte in Sekunden

Versuch	Brandbeschleuniger	Flashover	Löschbeginn
MFPA_Zimmer_001	-	780	1200
MFPA_Zimmer_002	-60	390	720
MFPA_Zimmer_003	-50	260	1800
MFPA_Zimmer_004	-70	300	1800
MFPA_Zimmer_005	-56	210	240

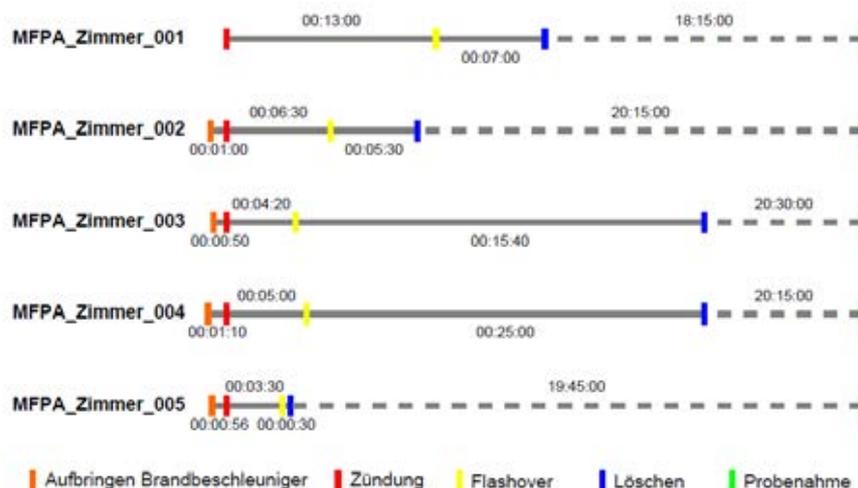


Abbildung 40: Ereignisübersicht der Szenarien, schematische Darstellung, Zeitangaben [Stunde:Minute: Sekunde] (14).

Der Einfluss des Brandbeschleunigers konnte auch anhand der ermittelten brandtechnologischen Kenndaten, wie z.B. Wärmefreisetzungsrate und Brandraumtemperaturen nachgewiesen werden. Dabei wurden die jeweiligen Maximalwerte

nicht in ihrer Quantität, sondern lediglich in ihrem zeitlichen Auftreten durch den Brandbeschleuniger beeinflusst. Mit den gewonnenen Daten aus den Raumbrandversuchen können die energetischen Gefahren zur entstehenden Wärme und den Temperaturen sowie die stofflichen Gefahren bezüglich der Rauchgastoxizität abgeschätzt werden. Innerhalb weniger Sekunden wurden im Brandraum Temperaturen erreicht, die für Personen tödlich wären. Es wurden Maximaltemperaturen von etwa 850°C und Wärmefreisetzungsraten von maximal 4 bis 6 MW erreicht. Das zeitliche Erreichen der Maxima wurde durch den Einsatz eines Brandbeschleunigers stark beschleunigt. Es werden folglich sowohl die energetischen Kennwerte als auch die stofflichen Kennwerte in ihrer zeitlichen Entwicklung bei Raumbrandversuchen entscheidend vom Einsatz von Brandbeschleunigern beeinflusst. Die quantitative Erfassung toxischer Rauchgaskomponenten erfolgte mit Hilfe der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie. Die Rauchgaszusammensetzung wurde dabei im Brandraum, an der Brandraumöffnung, unter der Decke und im Schlot ermittelt.

Die Emission von Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Cyanwasserstoff und anderen Rauchgaskomponenten begann im Falle der Brandstiftung wesentlich zeitiger als dies ohne zusätzlichen Brandbeschleuniger der Fall ist. Die Quantität der Rauchgaskomponenten dagegen war nahezu gleich. Die gemessenen maximalen Rauchgaskonzentrationen in der Brandraummitte erreichten z.B. Werte von etwa 4 bis 8 Vol% Kohlenmonoxid und etwa 600 bis 900 ppm Cyanwasserstoff. In allen Fällen wurden erhebliche toxische Rauchgaskonzentrationen im Brandraum und an der Brandraumöffnung nachgewiesen. Auch nach Abklingen des Brandes nach 14 h konnte noch Kohlenmonoxid in deutlichen Mengen nachgewiesen werden, weshalb es wichtig ist, vor dem Betreten eines Brandraumes bei z.B. Brandermittlungen die Kohlenmonoxid-Konzentration zu überprüfen. Alle weiteren Details sind im Teil 1 ausführlich beschrieben.

4.3 Probenahme

Nach dem das Feuer mit Wasser gelöscht wurde kühlte der Brandraum jeweils über Nacht aus (ca. 20 Stunden). Es wurden sowohl Brandrückstandsproben als auch Wischproben genommen. Für die Wischproben wurden Oberflächen mit ausgeheizter Glaswolle (60°C, 24 h) abgewischt und Rußproben genommen. Die Brandrückstandsproben wurden in ausgeheizten Plastiktüten eingeschweißt um sie vor Kontamination zu schützen. Vor dem Einschweißen wurde ein Aliquot der Probe (ca. 1 g) in ein 20 mL Glas Vial überführt, mit 2 mL MilliQ-Wasser überschichtet und mit einem Deckel verschlossen. Die Glaswolle der Wischproben wurde ebenfalls in 20 mL Vials mit 2 mL MilliQ-Wasser überschichtet und bis zur Analyse verschlossen. Je nach Zustand des Raumes nach dem Brand konnten unterschiedlich viele Proben genommen werden. Je länger das Feuer brannte, desto schwieriger war es die Proben zu sichern, das der Raum teilweise komplett ausbrannte. Bei Versuch 5, mit einer Branddauer von fünf Minuten, konnten die meisten Proben gesichert

werden. Bei jedem Versuch wurde bei den Probenahmen darauf geachtet ein enges und vergleichbares Raster der Probenahme zu erhalten um bei der Auswertung vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Die Abbildung 41 bis Abbildung 45 zeigen Bilder zur Probenahme nachdem der Brandraum ausgekühlt war.



- Brandrückstände
- Wischproben

Abbildung 41: Probenahme einer Brandrückstandsprobe nach gelöschtem Brand.



Abbildung 42: Entnahme einer Wischprobe mit Glaswolle nach dem gelöschten Brand.



Abbildung 43: Brandrückstandsprobe.



Abbildung 44: Eingeschweißte Brandrückstandsprobe.



Abbildung 45: Brandrückstandsproben in verschlossenen 20 mL Vials.

4 Ergebnisse der Raumbrandversuche

Alle gesicherten Proben wurden mittels der optimierten HS-SPME-GC-MS-Methode gaschromatographisch analysiert (Geräteparameter siehe Kapitel 2.1 Herstellung der Proben im Labormaßstab). In Abbildung 46 ist ein Überblick über die Vorgehensweise wiedergegeben.

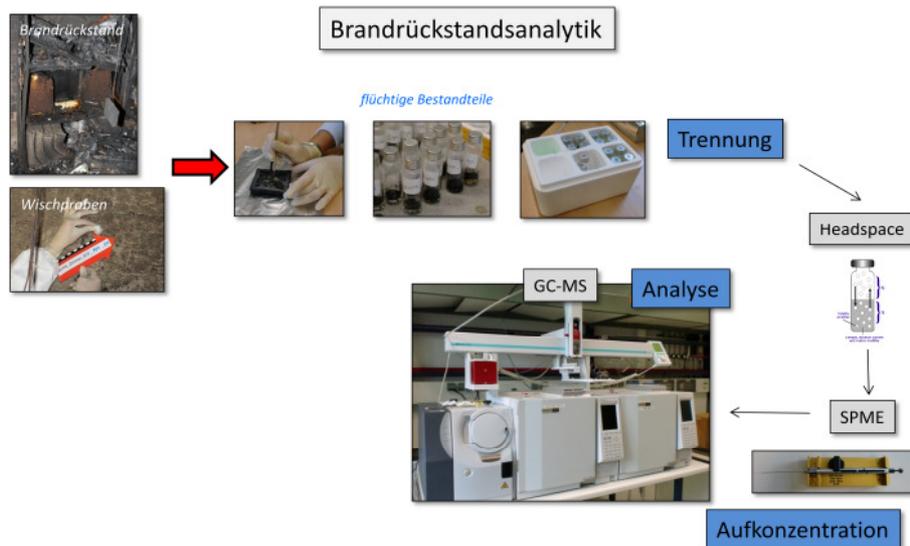


Abbildung 46: Chemisch-analytischer Nachweis der Brandbeschleuniger in Brandrückstandsproben und Wischproben.

In Tabelle 5 sind die verwendeten Markerverbindungen für den Brandbeschleunigernachweis aufgelistet. Die Brandbeschleuniger konnten sowohl im Brandrückstand als auch an Partikeln sowie durch Wischproben nachgewiesen werden, wie in Abbildung 47 zu erkennen ist.

Tabelle 5: Markerverbindungen der Brandbeschleuniger und zugehörige Masse zu Ladungsverhältnis (13).

Ignitable Liquid	Target Compound	m/z
Gasoline	Toluene	91
	m-, p-Xylene	91
	Trimethylbenzene	105
	Indane	117
Diesel fuel	Dodecane	57
	Tetradecane	57
	Heptadecane	57
	Octadecane	57
	Eicosane	57

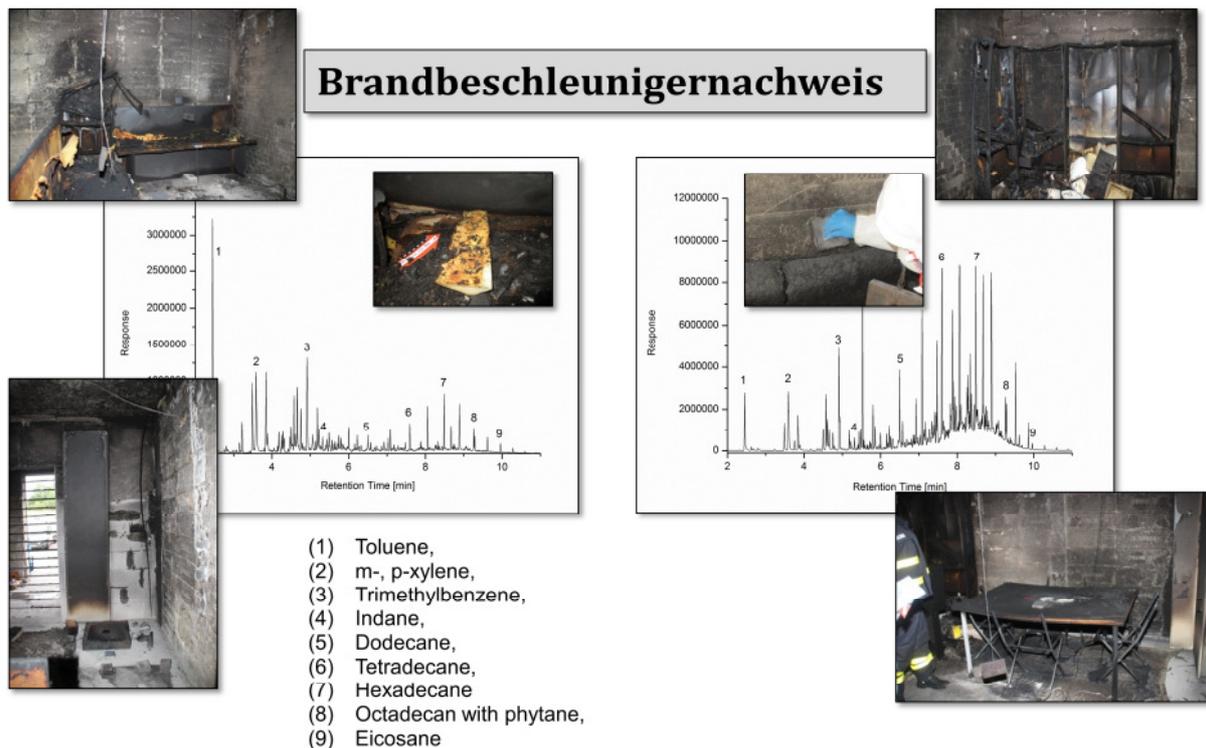


Abbildung 47: Brandbeschleunigernachweis im Brandrückstand und in Wischproben nach Raumbrandversuch 5.

Der Nachweis von Brandbeschleunigern in den Wischproben von den Wänden eröffnet ein neues und einfach durchzuführendes Anwendungsfeld in der Brandursachenermittlung vor Ort. Um die Nachweisfähigkeit zu erhöhen und die Proben zu konservieren, wurden die Wischproben mit destilliertem Wasser überschichtet. Dabei zeigte sich ein deutlich positiver Einfluss auf die Konservierung der Probe. Auch die Lagerung der Proben hat einen großen Einfluss auf die Nachweisfähigkeit, deshalb wurden die Proben in Beuteln aufbewahrt, die zusätzlich vorher ausgeheizt wurden, um Verunreinigungen ausschließen zu können. Die durch eigene Laborversuche gewonnenen Erkenntnisse wurden bei den durchgeführten Zimmerbrandversuchen umgesetzt.

Mittels HS-SPME-GC-MS Analyse konnten die flüchtigen Bestandteile der Brandbeschleuniger in einigen Proben nachgewiesen werden. In Abbildung 48 sind die charakteristischen Bestandteile der Diesel- und Benzin-Komponenten, wie z.B. Toluol, m-, p-Xylol, Trimethylbenzen, Indan, Dodecan, Tetradecan, Hexadecan, Oktadecan und Eicosan zu erkennen. Es handelt sich dabei um eine Brandrückstandsprobe des Sofas.

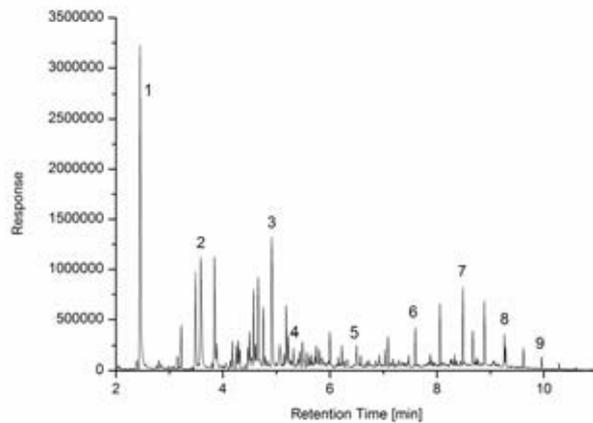


Abbildung 48: Chromatogramm (m/z 57, 71, 91, 105, 117) einer Brandrückstandsprobe vom Sofa (Versuch 5): (1) Toluol, (2) m-, p-Xylol, (3) Trimethylbenzen, (4) Indan, (5) Dodecan, (6) Tetradecan, (7) Hexadecan (8) Oktadecan, (9) Eicosan.

Auch im Fall der Wischproben konnten teilweise die flüchtigen Bestandteile der Brandbeschleuniger nachgewiesen werden, wie in Abbildung 49 zu erkennen ist. Hierbei handelt es sich um eine Wischprobe über dem Sofa. Je weiter man sich von der eigentlichen Quelle des Brandbeschleunigers befand, desto schwieriger war der Nachweis des Brandbeschleunigers. Der Nachweis der Brandbeschleuniger in den Wischproben gelang z.B. nicht an den Tapetenelementen an der Brandraumöffnung.

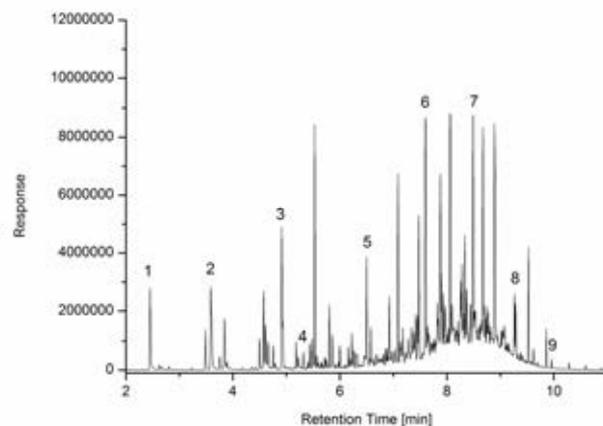


Abbildung 49: Chromatogramm (m/z 57, 71, 91, 105, 117) einer Wischprobe vom Sofa (Versuch 5): (1) Toluol, (2) m-, p-Xylol, (3) Trimethylbenzen, (4) Indan, (5) Dodecan, (6) Tetradecan, (7) Hexadecan (8) Oktadecan, (9) Eicosan.

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Brandbeschleunigernachweises in Rückständen, Kondensaten und Wischproben anhand der Raumgeometrie topographisch zusammengefasst, um einen Eindruck zu bekommen, wieweit der Brandbeschleuniger von der Quelle aus noch nachweisbar ist. Des Weiteren sind in Anhang C und D die analytischen Ergebnisse aus den Raumbrandversuchen zusammengefasst.

Raumbrand 1

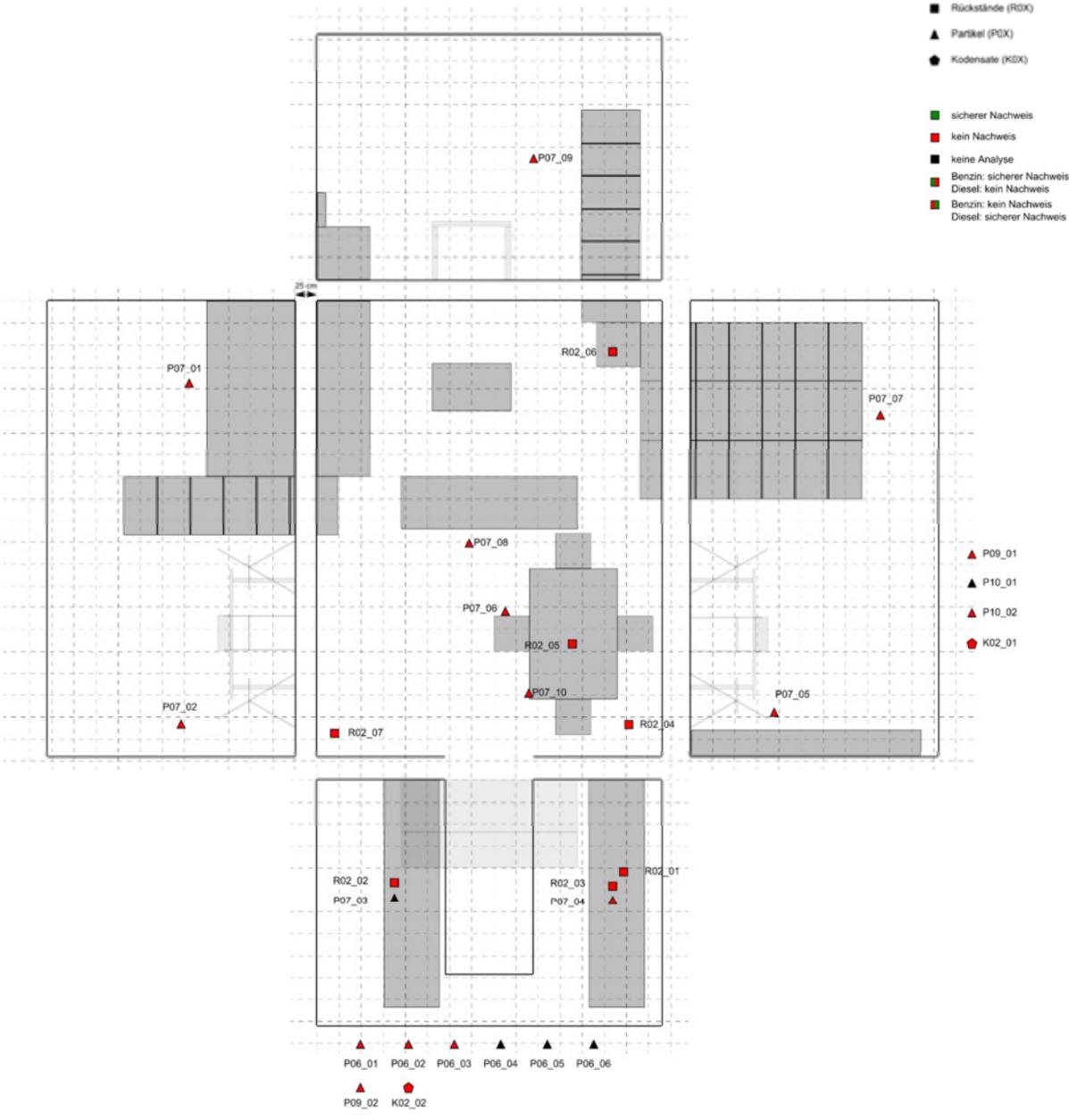


Abbildung 50: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 1.

Raumbrand 2

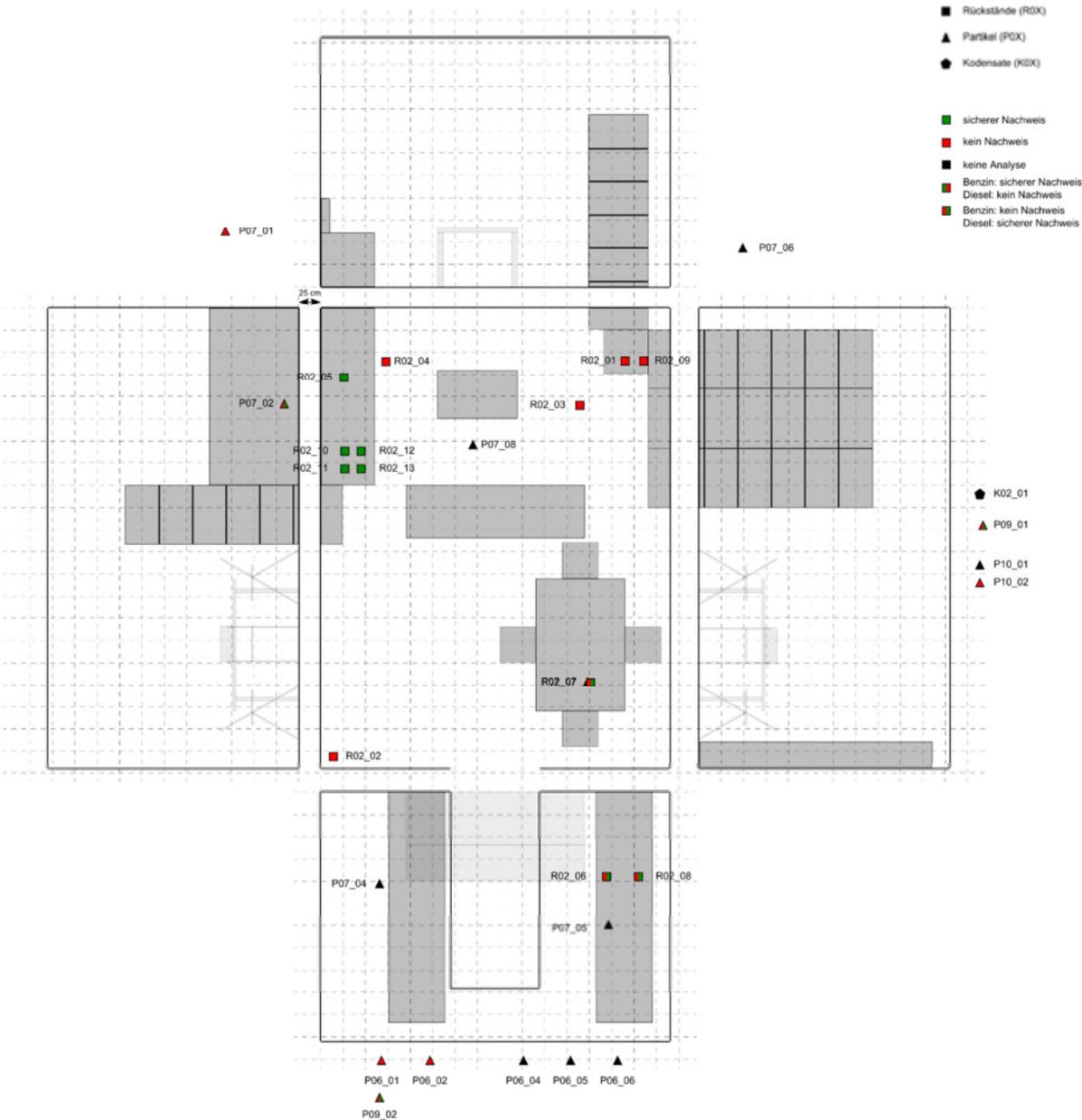


Abbildung 51: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 2.

Raumbrand 3

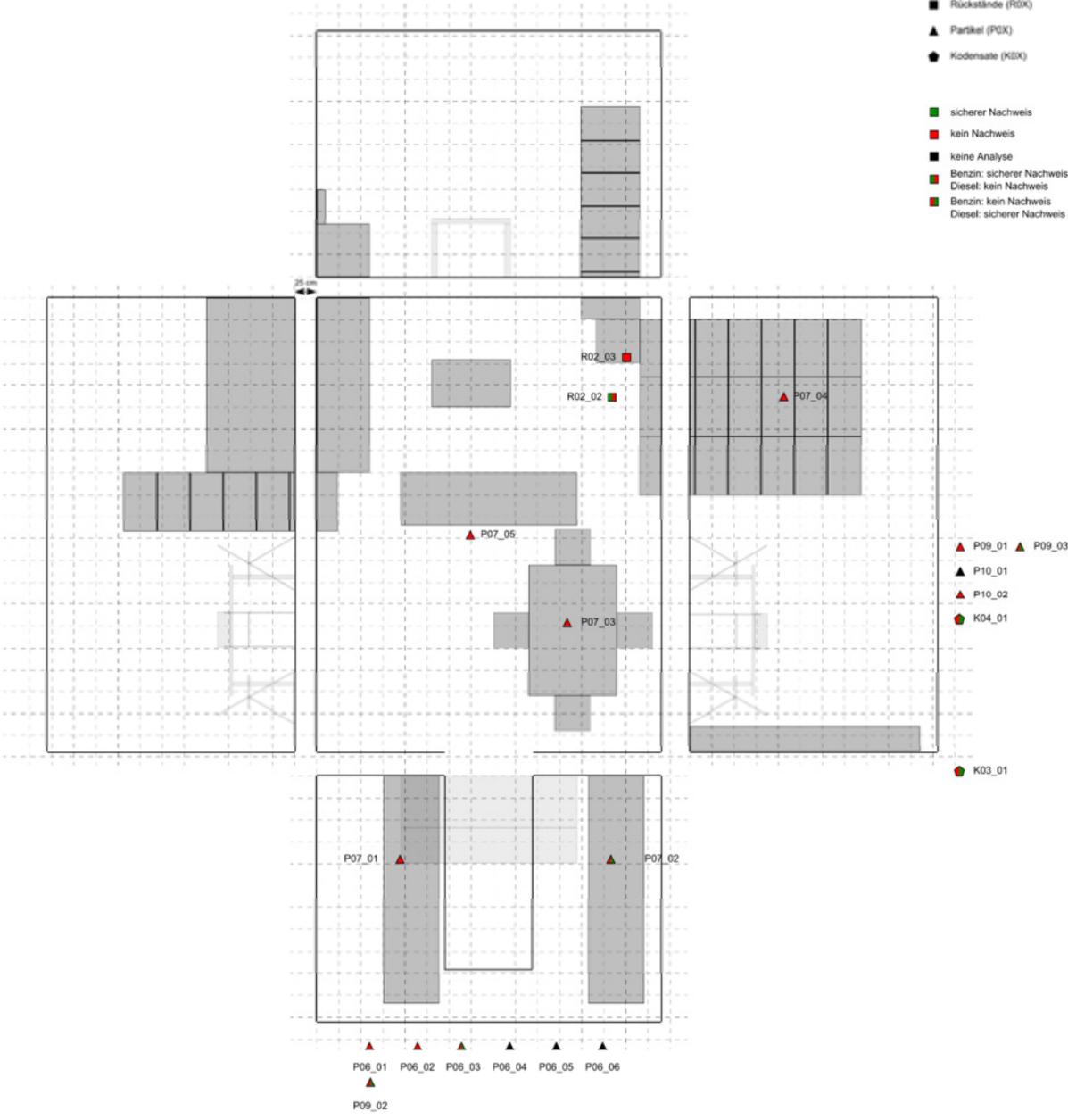


Abbildung 52: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 3.

Raumbrand 4

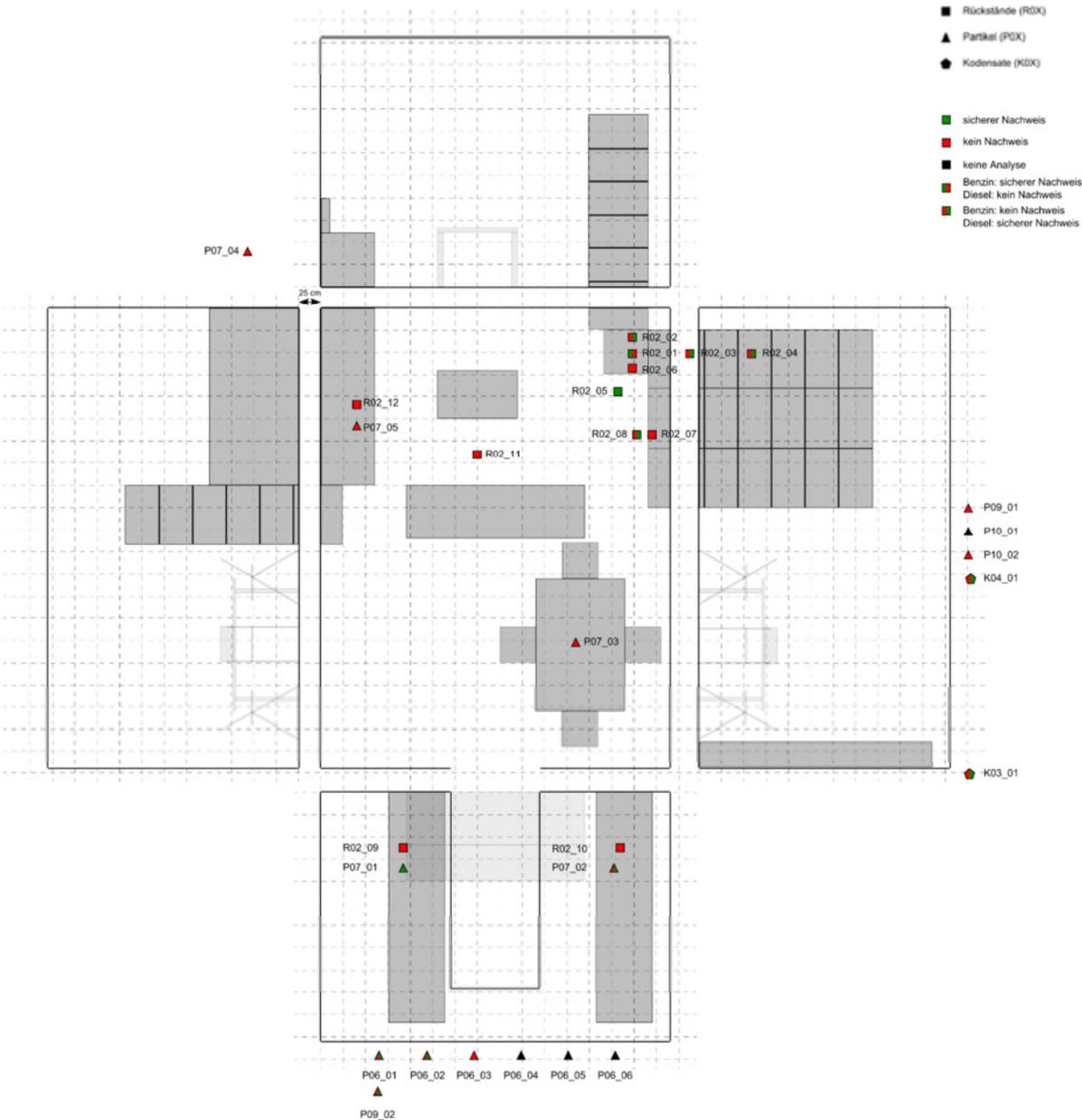


Abbildung 53: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 4.

Raumbrand 5

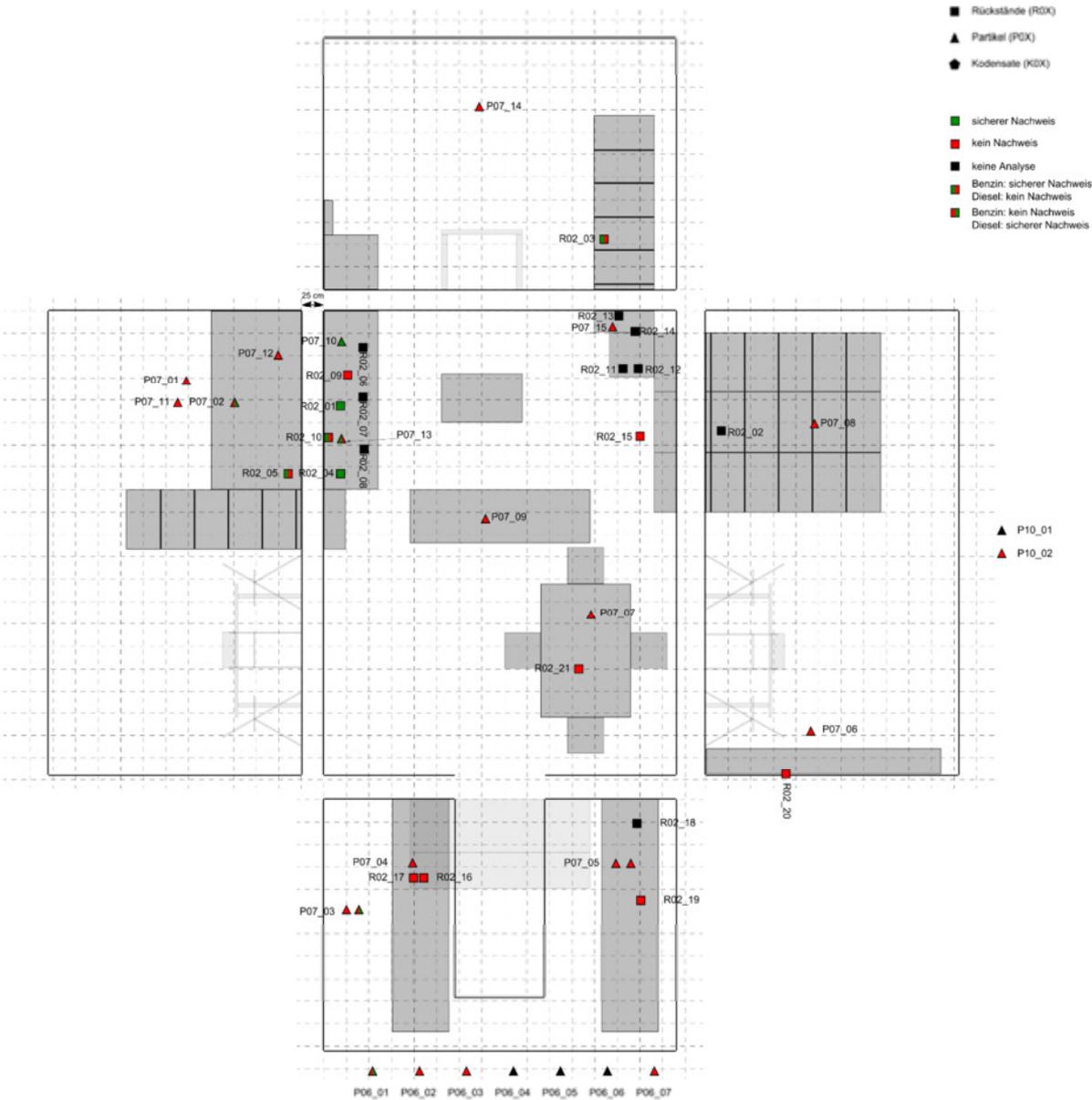


Abbildung 54: Probennahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 5.

6 Zusammenfassung

Im ersten Teil des Forschungsprojekts wurden verschiedene wohnungstypische Materialien und ihr Brandverhalten in Kombination mit flüssigen Brandbeschleunigern in Form von Laborbrandversuchen in der Rauchdichtekammer (DIN EN ISO 5659-2), im Cone Calorimeter (ISO 5660-1) und im offenen Kalorimeter in der Single Burning Item Test Apparatur (DIN EN 13823) untersucht. In der Rauchdichtekammer und der speziellen Kammer zur Atmosphärenkontrolle des Cone-Kalorimeters sowie im offenen Kalorimeter wurden die abgrenzbaren **Brandszenarien** *Schwelbrand*, *Entstehungsbrand* und *Vollbrand* durch Variation der Parameter *Bestrahlungsstärke*, *Bestrahlungsdauer*, *Zündung durch Zündflamme* bzw. *Zündfunke* und *Sauerstoffgehalt der Verbrennungsatmosphäre* im Probenkleinmaßstab realisiert. Die Ergebnisse einer an die Realisierung der o.g. Brandszenarien angeschlossenen Charakterisierung der gasförmigen, festen und flüssigen Brandrückstände wurden einer Datenbank zugeführt, die der systematischen Archivierung der Daten sowie als Vergleichsgrundlage für die Beurteilung realer Brandereignisse.

Die Analyse der verbliebenen **festen Brandrückstände** mittels ausgewählten Extraktionsverfahren in Kombination mit der GC-MS-Analyse erfolgte vor dem Hintergrund des Nachweises von Brandbeschleunigern. Als wesentliche Einflussfaktoren der Nachweisbarkeit zeigten sich die *Art der Probenahme* und insbesondere die *Zeitdauer* zwischen Probenahme und Analyse bzw. die dazwischenliegende *Art der Probenaufbewahrung* an sich, so dass zusätzliche Aufbewahrungs- und Stabilitätsversuche durchgeführt wurden. Die Auswertung dieser zeigte, dass die Konzentration an Brandbeschleuniger schon nach einem Tag drastisch zurückgehen kann.

Auch das Nachweisverfahren selbst zeigte signifikante Einflüsse auf die Nachweisbarkeit: Durch **Fest-Flüssig-Extraktion** (Lösemittlextraktion) blieb aufgrund der Methodenempfindlichkeit sowohl der Nachweis von Brandmarkern als auch jener von Brandbeschleunigern aus. Der Einfluss der Versuchsparameter, die das vorliegende Brandszenario beschrieben, konnte ebenfalls nicht abgebildet werden. Im ebenfalls angewandten und nach Vorversuchen optimierten **Headspace-Verfahren** glückte der Nachweis von Benzin und Diesel als Brandbeschleuniger, während dieser für Spiritus weiterhin ausblieb. Die auf Grundlage bereits und insbesondere hinsichtlich der Probenahme und Probenaufbewahrung erlangter Erkenntnisse weiter optimierte **Festphasenmikroextraktion SPME** führte zu einem Nachweis der Brandbeschleuniger Benzin und Diesel sowie vereinzelt auch des Spiritus.

Mit Hilfe der Gaschromatographie-Massenspektrometrie- (GC-MS)-Analyse konnten Brandbeschleuniger, wie Benzin, Diesel und Spiritus in Abhängigkeit verschiedener Brandszenarien nachgewiesen werden. Die Brandbeschleuniger konnten sowohl im Brandrückstand als auch an Partikeln sowie durch Wischproben nachgewiesen werden. Die Partikel wurden in Laborbrandversuchen in der Rauchkammer mit Hilfe von angeschlossenen

Kaskadenimpaktoren getrennt, gesammelt und anschließend mit der HS-SPME-GC-MS Methode erfolgreich bezüglich des Brandbeschleunigernachweises untersucht. Auch in den Wischproben an den Wänden der Rauchkammer konnten Brandbeschleunigerbestandteile nachgewiesen werden. Wischproben an realen Brandorten bieten aufgrund der leichten Verfügbarkeit neben den klassisch genommenen Brandrückstandsproben damit eine weitere Alternative beim Brandbeschleunigernachweis. Um die Nachweisfähigkeit zu erhöhen und die Proben zu konservieren, wurden die Wischproben mit destilliertem Wasser überschichtet. Auch die Lagerung der Proben hat einen großen Einfluss auf die Nachweisfähigkeit, deshalb wurden die Proben in zu schweißbaren Beuteln aufbewahrt, die zusätzlich vorher ausgeheizt wurden, um Verunreinigungen ausschließen zu können. Die durch eigene Laborversuche gewonnenen Erkenntnisse wurden bei den durchgeführten Zimmerbrandversuchen umgesetzt.

Aufgrund der einfachen Handhabung, der hohen Empfindlichkeit und des geringen Zeitaufwandes ist die **HS-SPME-GC-MS** die Methode der Wahl für die Extraktion flüchtiger Bestandteile aus dem Brandrückstand bzw. Wischproben für den Brandbeschleunigernachweis.

Neben dem Einfluss von Brandbeschleunigern auf das Brandverhalten einzelner **Materialien in Laborbrandversuchen**, wurde im zweiten Teil des Forschungsprojektes anhand von fünf verschiedenen **Raumbrandversuchen** an der MFPA Leipzig im Originalmaßstab der Einfluss der Brandbeschleuniger auf den Brandverlauf in einem Brandraum untersucht und die entwickelte analytische Methodik zum Nachweis von Brandbeschleunigern im Originalbrandmaßstab überprüft. Im Anschluss an die jeweiligen Zimmerbrandversuche wurden verschiedene Brandrückstandsproben aus dem Brandschutt, Wischproben von den Wänden und den übriggebliebenen Gegenständen genommen und mit Hilfe der HS-SPME-GC-MS-Methode analysiert und die verwendeten Brandbeschleuniger konnten in vielen Proben nachgewiesen und die Anwendbarkeit der Methode bestätigt werden. Der Nachweis gelang zum Teil auch in Wischproben. Bei der Übertragung in die Praxis ist dies eine einfache anzuwendende Möglichkeit einer zusätzlichen Probennahme vor Ort.

Der Nachweis des verwendeten Brandbeschleunigers bei den Raumbrandversuchen gelang aber nur, mit wenigen Ausnahmen, wenn die Probe nah am Auftragungsort des Brandbeschleunigers genommen wurde. Daher ist im Realfall eine umfangreiche Probenahme unabdingbar. Ein weiterer Faktor, der den Nachweis des verwendeten Brandbeschleunigers stark beeinflusst, ist die Branddauer. Je stärker der Raum ausbrennt, desto schwieriger gestaltet sich die Probensicherung und es wird unwahrscheinlicher den Brandbeschleuniger nachweisen zu können.

Zusammenfassend soll festgehalten werden, dass für eine gesicherte brandanalytische Methode das Zusammenspiel von mehreren Faktoren entscheidend ist:

- Zeit bis das Feuer gelöscht wurde,
- umfangreiche und zeitnahe Probenahme durch geschulte Experten,

- Probelagerung in luftdichten Behältern,
- nachweisstarke Analytik, die zeitnah durchgeführt wird und
- geschulte Experten für die Interpretation der erhaltenen Spektren.

Literaturverzeichnis

1. IFS Report „Trends aus der Schadendatenbank“, Institut für Schadensverhütung und Schadensforschung der öffentlichen Versicherer, 9. Jahrgang 2006, 1.
2. American Society for Testing and Materials. ASTM Method E1618-01 Standard test method for ignitable liquid residues in extracts from fire debris samples by gas chromatography-mass spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2002.
3. Stauffer E, Lentini JJ. ASTM standards for fire debris analysis: a review. *Forensic Science International* 132 (2003) 63–7.
4. Bertsch, W. Volatiles from Carpet: a Source of Frequent Misinterpretation in Arson Analysis, *Journal of Chromatography A*, 674,1994, 329-333.
5. American Society for Testing and Materials. ASTM Method E1386-00 Standard practice for separation and concentration of ignitable liquid residues from fire debris samples by solvent extraction. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2002.
6. American Society for Testing and Materials. ASTM Method E1388-00 Standard practice for sampling of headspace vapors from fire debris samples. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2002.
7. American Society for Testing and Materials. ASTM Method E1412-00 Standard practice for separation of ignitable liquid residues from fire debris samples by passive headspace concentration with activated charcoal. West Conshohocken, PA: ASTM International, .
8. Newman RT, Dietz WR, Lothridge K. The use of activated charcoal strips for fire debris extraction by passive diffusion. Part 1: The effects of time, temperature, strip size and sample concentration. *J Forensic Sci* 1996;41(3):361-70.
9. Borusiewicz R, Zieba-Palus J. Comparison of the effectiveness of Tenax TA® and Carbotrap 300® in concentration of flammable liquid compounds. *J Forensic Sci* 2007;52(1):70-4.
10. Ahmad UK, Voon CK. Detection of accelerants in fire debris using headspace solid-phase microextraction-capillary gas chromatography. *Malaysian Journal of Analytical Sciences* 2001;7(1):57-63.
11. American Society for Testing and Materials. ASTM Method E2154-01 Standard practice for separation and concentration of ignitable liquid residues from fire debris samples by passive headspace concentration with solid phase microextraction. West Conshohocke.
12. Bogusz MJ. [ed.], *Forensic science, Handbook of Analytical Separations*, Elsevier Science B.V., Amsterdam 2000.
13. Fettig I. ... *JOFS*.

14. Deubel JH, Werrel M, Krüger S, Raspe T. Forschungsbericht Raumbrände BAM Innovationsoffensive Projekt Brandspurenanalytik Teil 1: Versuchsaufbau und brandtechnologische Untersuchungen. 2013.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrauch.	9 -
Abbildung 2: Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrückstand.	9 -
Abbildung 3: Brandverhalten von verschiedenen Brandbeschleunigern auf einer Teppichprobe.	10 -
Abbildung 4: Rauchdichtekammer (links), Cone Calorimeter (rechts).	13 -
Abbildung 5: Überblick chemische Brandspurenanalytik.	14 -
Abbildung 6: Verwendete Materialien für Herstellung der Brandproben im Labormaßstab...	15 -
Abbildung 7: Auftragen von Brandbeschleuniger auf die Probe in die Atmosphärenbox im Cone Calorimeter.	16 -
Abbildung 8: Verwendete Brandbeschleuniger und Methoden wie der Brandbeschleuniger aufgetragen wurde.	17 -
Abbildung 9: Chromatogramm ($m/z=50-500$) von Benzin. (1) Toluol, (2) Ethylbenzol, (3,4) m-, p-Xylol, (5) o-Xylol, (6) Ethylmethylbenzol, (7) Trimethylbenzol, (8) Indan (HS-SPME-GC-MS: Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min, 50°C).	18 -
Abbildung 10: Chromatogramm ($m/z=50-500$) von Diesel. (1) Dodecan, (2) Tridecan, (3) Tetradecan, (4) Pentadecan (5) Hexadecan, (6) Heptadecan mit Pristan, (7) Octadecan mit Phytan, (8) Nonadecan, (9) Eicosan, (10) Heneicosan mit Biodiesel (HS-SPME-GC-MS: Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min, 50°C).	18 -
Abbildung 11: Schematischer Ablauf der Herstellung der Brandproben im Labormaßstab. ..	19 -
Abbildung 12: Chromatogramm von Span (mit Dekor) und 5 ml Benzin nach Brandversuch in der SDC, bei 25kW/m ² und einer Branddauer von 600 s.	20 -
Abbildung 13: Variation der Agitortemperatur, Brandbeschleuniger: Benzin (Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min) (13).	22 -
Abbildung 14: Variation der Agitortemperatur, Brandbeschleuniger: Diesel (Inkubationszeit 5 min, Extraktionszeit 10 min) (13).	22 -
Abbildung 15: Variation der Extraktionszeit, Brandbeschleuniger: Benzin (Inkubationszeit 5 min, Agitortemperatur 50°C) (13).	23 -
Abbildung 16: Variation der Extraktionszeit, Brandbeschleuniger: Diesel (Inkubationszeit 5 min, Agitortemperatur 70°C) (13).	23 -
Abbildung 17: Chromatogramm von 30 sec in Benzin eingelegten Teppichproben nach Cone Calorimeter Versuch (1 min, Pilotflamme, 25 kW/m ²).	24 -
Abbildung 18: Chromatogramm von 1ml Diesel dotierten Span nach Cone Calorimeter Versuch (10 min, 25 kW/m ²).	25 -
Abbildung 19: Chromatogramm von 30s in Spiritus eingelegten Span nach Rauchkammer Versuch (10 min, 25 kW/m ²).	25 -
Abbildung 20: Chromatogramm einer Teppichprobe (mit 5 ml Benzin), welche 10 min mit 10 kW/m ² und einer zusätzlichen Zündflamme beansprucht wurde.	25 -

Abbildung 21: 13 stufiger Impaktor zum Aerosolsampling während der Laborbrandversuche - (links) sowie partikelgrößenabhängige Stufen des Kaskadenimpaktors und ein Beispiel einer Impaktorfolie mit gesammelten Partikeln (rechts).....	27 -
Abbildung 22: Vorgehensweise zum Nachweis von Brandbeschleunigern an Partikeln (links: - angeschlossener Kaskadenimpaktor, Mitte: herausgenommene Impaktorfolien, rechts: mit HS-SPME-GC-MS analysierte Partikelproben).....	28 -
Abbildung 23: 13 Stufen eines Kaskadenimpaktors nach einem Brandversuch (20 min, 25 - kW/m ²) von Holz in der Rauchkammer.	28 -
Abbildung 24: Nachweis von Abbauprodukten von Holz nach einem Brandversuch (20 min, - 25 kW/m ²) von Holz in der Rauchkammer.	28 -
Abbildung 25: Wischproben von den Wänden der Rauchkammer.	29 -
Abbildung 26: Rauchkammer mit angeschlossenen EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer)-Gerät - zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung und der Partikelanzahlkonzentration.....	29 -
Abbildung 27: Partikelgrößenverteilung (links) während eines Brandversuch (20 min, 25 - kW/m ²) mit (oben) und ohne zusätzliche Flamme (unten) von Holz in der Rauchkammer - sowie die entsprechende Partikelanzahlkonzentration nach 9 min und 15 min.....	30 -
Abbildung 28: Optische Dichte und Partikelanzahlkonzentration während eines Brandversuch - (20 min, 25 kW/m ²) von Holz in der Rauchkammer (rechts mit Benzin und links ohne - Brandbeschleuniger).	30 -
Abbildung 29: Optische Dichte während eines Brandversuches (20 min, 25 kW/m ²) von Span - in der Rauchkammer in Abhängigkeit der zugesetzten Brandbeschleunigermenge.....	31 -
Abbildung 30: Auftragen des Brandbeschleunigers durch eine Spritze direkt auf die Probe in - der Atmosphärenbox (links) und resultierende Kohlenstoffdioxidemission mit und ohne - Brandbeschleuniger während eines Cone Calorimeter Brandversuches mit 50 kW/m ²	32 -
Abbildung 31: Rauchentwicklung während der Brandversuche von Span im Cone Calorimeter - mit Atmosphärenbox bei 50 kW/m ² in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration.	32 -
Abbildung 32: Kohlenstoffdioxid (links)- und Kohlenstoffmonoxidkonzentration während - eines Brandversuches von Span im Cone Calorimeter mit Atmosphärenbox bei 50 kW/m ² in - Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration.....	33 -
Abbildung 33: Abhängigkeit der Peakflächen der Benzinmarkerverbindung Toluol (m/z= 91) - unter verschiedenen Lagerungsbedingungen (HS-SPME-GC-MS. A: Probe überschichtet mit MilliQ-Wasser, B: Vial geschlossen, C: Vial offen.....	33 -
Abbildung 34: Handkarte zur Probenbezeichnung, Bezeichnung direkt nach - Probenherstellung.....	34 -
Abbildung 35: Handkarte zur Probenbezeichnung, Bezeichnung vor chemischer Analyse. ...	34 -
Abbildung 36: Oberfläche der Datenbank zur Archivierung der Experimente und der - Ergebnisse.	35 -
Abbildung 37: Schematische Darstellung des Brandraumes mit Fotos der - Einrichtungsgegenstände.	36 -
Abbildung 38: Brandraum vor und nach dem Brand (Versuch 5).....	37 -
Abbildung 39: Szenarien der fünf Raumbrände – Zündort und Auftragsort des - Brandbeschleunigers.....	37 -

Abbildung 40: Ereignisübersicht der Szenarien, schematische Darstellung, Zeitangaben - [Stunde:Minute:Sekunde] (14).....	38 -
Abbildung 41: Probenahme einer Brandrückstandsprobe nach gelöschtem Brand.	40 -
Abbildung 42: Entnahme einer Wischprobe mit Glaswolle nach dem gelöschten Brand.	40 -
Abbildung 43: Brandrückstandsprobe.	41 -
Abbildung 44: Eingeschweißte Brandrückstandsprobe.	41 -
Abbildung 45: Brandrückstandsproben in verschlossenen 20 mL Vials.	41 -
Abbildung 46: Chemisch-analytischer Nachweis der Brandbeschleuniger in Brandrückstandsproben und Wischproben.....	42 -
Abbildung 47: Brandbeschleunigernachweis im Brandrückstand und in Wischproben nach Raumbrandversuch 5.....	43 -
Abbildung 48: Chromatogramm (m/z 57, 71, 91, 105, 117) einer Brandrückstandsprobe vom Sofa (Versuch 5): (1) Toluol, (2) m-, p-Xylol, (3) Trimethylbenzen, (4) Indan, (5) Dodecan, (6) Tetradecan, (7) Hexadecan (8) Oktadecan, (9) Eicosan.	44 -
Abbildung 49: Chromatogramm (m/z 57, 71, 91, 105, 117) einer Wischprobe vom Sofa (Versuch 5): (1) Toluol, (2) m-, p-Xylol, (3) Trimethylbenzen, (4) Indan, (5) Dodecan, (6) Tetradecan, (7) Hexadecan (8) Oktadecan, (9) Eicosan.	44 -
Abbildung 50: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 1.	45 -
Abbildung 51: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 2.	46 -
Abbildung 52: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 3.	47 -
Abbildung 53: Probenahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 4.	48 -
Abbildung 54: Probennahmeorte und analytische Ergebnisse für Raumbrand 5.	49 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Brandbeschleuniger Klassen (3).	11 -
Tabelle 2: HS-SPME Methodenparameter für Benzin und Diesel – DVB/CAR/PDMS-Faser (13). -	24 -
Tabelle 3: Vergleich der verwendeten Extraktionsmethoden beim Nachweis von Brandbeschleunigern.....	26 -
Tabelle 4: Ereignisübersicht der einzelnen Szenarien, Zeitangaben in Sekunden (14).	38 -
Tabelle 5: Markerverbindungen der Brandbeschleuniger und zugehörige Masse zu Ladungsverhältnis (13).	42 -

Anhänge

- Anhang A:** Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich des Nachweises von Brandbeschleunigern auf verschiedenen Materialien nach Beanspruchung in verschiedenen Brandprüfeinrichtungen
- Anhang B:** Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Rauchentwicklung und der Rauchgaszusammensetzung von verschiedenen Materialien nach Beanspruchung in der Rauchkammer
- Anhang C:** Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Einbrandtiefen von verschiedenen Materialien nach Beanspruchung in der Rauchkammer
- Anhang D:** Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Einbrandtiefen von verschiedenen Materialien nach Beanspruchung im Cone Calorimeter
- Anhang E:** Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich des Nachweises von Brandbeschleunigern nach den Raumbrandversuchen 001 bis 004
- Anhang F:** Zusammenfassung der Ergebnisse zur Reproduzierbarkeit bezüglich des Nachweises von Brandbeschleunigern nach dem Raumbrandversuch 005- Vergleich der Ergebnisse dreier Laboratorien
- Anhang G:** Eigene Veröffentlichungen, Poster, Vorträge

Anhang A

Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich des Nachweises von Brandbeschleunigern auf verschiedenen Materialien nach Beanspruchung in verschiedenen Brandprüfeinrichtungen

Anhang A: Zusammenfassung Analytikergebnisse bezüglich des Nachweis von Brandbeschleunigern auf verschiedenen Materialien nach Beanspruchung in verschiedenen Brandprüfeinrichtungen

Abb. A1 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material: Holz

verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_012	BS nicht nachgewiesen	K01	25	600	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_012	BS nicht nachgewiesen	P02	25	600	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_013	BS nicht nachgewiesen	K01	25	600	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_018	BS nicht nachgewiesen	K01	25	600	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_018	BS nicht nachgewiesen	P02	25	600	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_019	BS nicht nachgewiesen	K01	25	600	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_007	BS nicht nachgewiesen	K01	25	900	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_007	BS nicht nachgewiesen	P02	25	900	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	900	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	splitlos	
SDC_Holz_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	900	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	splitlos	
SDC_Holz_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	900	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	splitlos	
SDC_Holz_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	900	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	splitlos	
SDC_Holz_008	BS nicht nachgewiesen	K01	25	900	ja	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_008	BS nicht nachgewiesen	P02	25	900	ja	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_holz_015	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_015	BS nicht nachgewiesen	P02	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_016	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_021	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_021	BS nicht nachgewiesen	P02	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_021	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_021	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_021	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_021	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	keine	GC/FID-MS		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	SP01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_025a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/n-Hex:ACE 7:3	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_029a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_029a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_029a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_029a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE	Einrotieren und Ausschütteln	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_Holz_029c	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_029c	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_029c	BS nicht nachgewiesen	P02	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_029c	BS nicht nachgewiesen	P02	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_029c	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_029c	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_040	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	ja	21	SP01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_040	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	ja	21	SP01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_040	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	SP01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_045	BS nicht nachgewiesen	V01	50	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_047	BS nicht nachgewiesen	V01	50	1200	nein	21	SP01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_053	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_053	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_053	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_053	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_053	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	SP02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_054	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_054	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_054	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_054	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_054	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	SP02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min

Abb. A1: Analyseergebnisse von mit Spiritus versehene Holzproben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A2 Versuchapparatur:Smoke Density Chamber

Material:Holz

verwendeter Brandbeschleuniger: Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktions-art	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_027a	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	BE01	komplette Probe	SPME/Alubeutel	keine	GC-MS SPME		

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_027a	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME		
SDC_Holz_027a	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_027b	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	BE01	komplette Probe	SPME/Alubeutel	keine	GC-MS SPME		
SDC_Holz_027b	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME		
SDC_Holz_027c	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	BE01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_027c	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME		
SDC_Holz_027c	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_027c	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_027c	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_027c	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	BE01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_028a	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_028a	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_028c	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	BE01	P-, K-, V-Proben		keine	GC-MS SPME		
SDC_Holz_030a	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_030a	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	BE01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	K01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	P02	25	1200	nein	21	BE01	P-, K-, V-Proben	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	P02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	R01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	BE01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 30	50°C, 5 min 10 min
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_030c	BS nicht nachgewiesen	V01	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		
SDC_Holz_051b	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Holz_051b	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec, 5 min
SDC_Holz_051b	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec, 5 min
SDC_Holz_051b	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec, 5 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_051b	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Holz_051b	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec, 5 min
SDC_Holz_051b	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec, 5 min
SDC_Holz_051b	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 10 min
SDC_Holz_051b	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Holz_051b	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Holz_051b	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Holz_051b	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Holz_051b	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_051c	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_051d	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_055	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_055	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_055	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_055	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_055	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_055	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_056	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_056	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_056	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_056	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_056	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_056	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_056	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	BE02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min

Abb. A2: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Holzproben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A3 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:Holz

verwendeter Brandbeschleuniger: Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktions-art	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_057	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DIO1	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_057	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DIO1	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec 5 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Holz_057	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Holz_057	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Holz_057	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_058	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 5 min
SDC_Holz_058	BS nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Holz_058	BS nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Holz_058	BS Analyten vorhanden	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Holz_058	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Holz_058	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	ja	21	DI01	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 5 min 30 min

Abb. A3: Analyseergebnisse von mit Diesel versehenen Holzproben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A4 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger: Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	HS-Tenax	keine	GC/MS-TDS	01:25	20 min bei 70 °C
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	HS-ACS	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	16h bei 70 °C
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_071	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM EtOH	50°C, 5 min, 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_008	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_008	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP01	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Span_009	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_009	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP01	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Span_010	BS nachgewiesen	R04	25	600	nein	21	SP01	komplette Probe	SPME/Alubeutel	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_010	BS nachgewiesen	R04	25	600	nein	21	SP01	komplette Probe	SPME/Alubeutel	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_041	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_041	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_046	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_046	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_054	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_054	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_054	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_054	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_054	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	SP02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_055	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_055	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_055	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 10 min
SDC_Span_055	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_055	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_055	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	ja	21	SP02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min

Abb. A4: Analyseergebnisse von mit Spiritus versehenen Spanproben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A5 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_005	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_005	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_006	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_006	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_022	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_022	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_023	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_023	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_024	BS Analyten vorhanden	R02	50	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_024	BS Analyten vorhanden	R02	50	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_025	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_025	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_026	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_026	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_027	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_027	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_028	BS nicht nachgewiesen	R02	50	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_028	BS nicht nachgewiesen	R02	50	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_029	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_029	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_030	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 10 min
SDC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_033	BS nachgewiesen	R03	25	600	nein	21	BE01	komplette Probe	Headspace	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_034	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_037	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_038	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_038	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_042	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_042	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_044	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_044	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_047	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_047	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_049	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_049	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_056	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_056	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_056	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_056	BS Analyten vorhanden	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_056	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_056	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_057	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_057	BS Analyten vorhanden	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_057	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_057	BS Analyten vorhanden	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_057	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_057	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_057	BS nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	BE02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_074	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS Analyten vorhanden	P02	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	HS-Tenax	keine	GC/MS-TDS	1:25	20 min bei 70 °C
SDC_Span_074	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS Analyten vorhanden	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS Analyten vorhanden	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS Analyten vorhanden	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_074	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS Analyten vorhanden	P05	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_074	BS nicht nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_074	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_075	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS Analyten vorhanden	P02	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS Analyten vorhanden	P02	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	HS-ACS	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	16h bei 70 °C
SDC_Span_075	BS Analyten vorhanden	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS Analyten vorhanden	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS Analyten vorhanden	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS Analyten vorhanden	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_075	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_075	BS nicht nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_075	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min, 30 min

Abb. A5: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Spanproben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A6 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_035	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_036	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Span_039	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_039	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_040	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_040	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_043	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_043	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 ab 3.5 min	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_045	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_045	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_048	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_050	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_050	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM ohne	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_058	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_058	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec 1 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_058	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Span_058	BS nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Span_058	BS nachgewiesen	P04	25	1200	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_058	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_058	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	DI01	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_059	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_059	BS nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Span_059	BS nachgewiesen	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Span_059	BS Analyten vorhanden	P03	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec 1 min
SDC_Span_059	BS nicht nachgewiesen	P04	25	1200	ja	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 10 sec 5 min
SDC_Span_059	BS nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_059	BS nachgewiesen	R02	25	1200	ja	21	DI01	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 5 min 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	HS-Tenax	keine	GC/MS-TDS	1:25	20 min bei 70 °C
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_076	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P02	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	HS-ACS	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	16h bei 70 °C
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	P05	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	direkt	keine	GC/MS (Agilent)	splitlos	keine
SDC_Span_077	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min, 30 min

Abb. A6: Analyseergebnisse von mit Diesel versehenen Spanproben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A7 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:SpanD

verwendeter Brandbeschleuniger:Spiritus

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_SpanD_005	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
SDC_SpanD_005	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
SDC_SpanD_005	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	SIM splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_SpanD_005	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	SIM splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_SpanD_006	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	SIM splitlos	50°C, 5 min 30 min
SDC_SpanD_006	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	SIM splitlos	50°C, 5 min 30 min

Abb. A7: Analyseergebnisse von mit Spiritus versehenen Span mit Dekor Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A8 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:SpanD

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_SpanD_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_007	BS Analyten vorhanden	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	SIM split 10	
SDC_SpanD_007	BS Analyten vorhanden	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	SIM split 10	
SDC_SpanD_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_007	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_007	BS nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	SIM split 10	
SDC_SpanD_007	BS nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	SIM split 10	
SDC_SpanD_007	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	SIM split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_SpanD_007	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	
SDC_SpanD_008	BS nachgewiesen	R02	25	600	ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	SIM split 10	50°C, 5 min 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_SpanD_008	BS nachgewiesen	R02	25	600	ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	SIM split 10	50°C, 5 min 30 min

Abb. A8: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Span mit Dekor Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A9 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:SpanD

verwendeter Brandbeschleuniger:Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_SpanD_009	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_009	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_009	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	SIM split 10	
SDC_SpanD_009	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_009	BS nicht nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)		
SDC_SpanD_009	BS nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	SIM split 10	
SDC_SpanD_009	BS nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
SDC_SpanD_009	BS nachgewiesen	R01	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	SIM split 10	
SDC_SpanD_009	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	SIM split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_SpanD_009	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	SIM split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_SpanD_010	BS nachgewiesen	R02	25	600	ja	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	SIM split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_SpanD_010	BS nachgewiesen	R02	25	600	ja	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	SIM split 10	70°C, 5 min 30 min

Abb. A9: Analyseergebnisse von mit Diesel versehenen Span mit Dekor Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A10 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:Teppich

verwendeter Brandbeschleuniger:Spiritus

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Tepp_018	BS nicht nachgewiesen	P06	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	SIM EtOH, split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_019	BS Analyten vorhanden	P06	25	300	nein	21	SP02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	SIM EtOH, split 10	50°C, 5 min 30 min

Abb. A10: Analyseergebnisse von mit Spiritus versehenen Teppich Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A11 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:Teppich

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Tepp_001	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec, 1 min
SDC_Tepp_001	BS Analyten vorhanden	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec, 1 min
SDC_Tepp_001	BS Analyten vorhanden	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 10 sec, 1 min
SDC_Tepp_001	BS nicht nachgewiesen	P03	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	70°C, 10 sec, 1 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Tepp_001	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_001	BS nachgewiesen	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, nicht verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_006	BS nicht nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_006	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_007	BS nicht nachgewiesen	P04	25	600	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_007	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_008	BS nicht nachgewiesen	P04	25	1200	nein	21	BE02	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_008	BS Analyten vorhanden	R02	25	1200	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min

Abb. A11: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Teppich Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
-------	----------------	-----------	-------------------------	-------------------	-------------	-------------------------------	----------------	-----------	----------------	--------------	---------------	-------	------------

Abb. A12 Versuchapparatur: Smoke Density Chamber

Material:Teppich

verwendeter Brandbeschleuniger:Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
SDC_Tepp_009	BS nachgewiesen	P04	25	300	nein	21	DI01	P-, K-, V-Proben	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min
SDC_Tepp_009	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70°C, 5 min 30 min

Abb. A12: Analyseergebnisse von mit Diesel versehenen Teppich Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in der Smoke Density Chamber

Abb. A13 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Holz

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Holz_020	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_020	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_020	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Holz_021	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_021	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_021	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Holz_022	BS nicht nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_022	BS Analyten vorhanden	R02	50	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_022	BS nicht nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Holz_023	BS nicht nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_023	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_023	BS nicht nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min

Abb. A13: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Holz Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A14 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Holz

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin/Dieselmischung

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Holz_018	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_018	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_018	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_018	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Holz_019	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_019	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Holz_019	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Holz_019	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min

Abb. A14: Analyseergebnisse von mit Benzin/Dieselmisch versehenen Holz Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A15 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Spiritus

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_029	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	270	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_033	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_033	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_033	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_033	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_074	BS Analyten vorhanden	R01	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_074	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_074	BS Analyten vorhanden	R01	25	300	nein	21	SP02	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_074	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	SP02	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_074	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_074	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_074	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_074	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_074	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_075	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_075	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_075	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_075	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_075	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_076	BS nicht nachgewiesen	R02	25	900	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_076	BS nicht nachgewiesen	R02	25	900	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_076	BS nicht nachgewiesen	R02	25	900	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_076	BS nicht nachgewiesen	R02	25	900	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_076	BS nicht nachgewiesen	R02	25	900	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_099	BS nicht nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_099	BS nicht nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_099	BS nicht nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_100	BS nicht nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_100	BS nicht nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_101	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_101	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min

Abb. A15: Analyseergebnisse von mit Spiritus versehenen Span Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
-------	----------------	-----------	-------------------------	-------------------	-------------	-------------------------------	----------------	-----------	----------------	--------------	---------------	-------	------------

Abb. A16 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_031	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_031	BS Analyten vorhanden	R01	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	splitlos	
CC_Span_031	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_031	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_031	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	BE02	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_031	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	BE02	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_031	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	BE02	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_031	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_031	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_034	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_034	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_034	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	split 10	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_034	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_034	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_068	BS nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	BE02	komplette Probe	SPME/Alubeutel	keine	GC-MS SPME	split 10	Ofen 50 Grad, 30 min
CC_Span_068	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_068	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_068	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_068	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_068	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_068	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_069	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_069	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_069	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_069	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_069	BS nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_069	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_070	BS Analyten vorhanden	R02	25	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_070	BS Analyten vorhanden	R02	25	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_070	BS Analyten vorhanden	R02	25	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_070	BS Analyten vorhanden	R02	25	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_070	BS Analyten vorhanden	R02	25	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_070	BS nicht nachgewiesen	R02	25	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_096	BS nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_096	BS nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_096	BS nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_097	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_097	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_097	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_098	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_098	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_098	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_123	BS nachgewiesen	R02	50	330	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nicht nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_124	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nicht nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_124	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS Analyten vorhanden	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_124	BS nicht nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_125	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_125	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_125	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50 °C, 5 min 30 min
CC_Span_125	BS nicht nachgewiesen	R02	50	900	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_160	BS nachgewiesen	R02	25	310	Ja	15	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_160	BS Analyten vorhanden	R02	25	310	Ja	15	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_161	BS Analyten vorhanden	R02	25	881	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_161	BS nicht nachgewiesen	R02	25	881	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	
CC_Span_162	BS Analyten vorhanden	R02	25	1354	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_162	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1354	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	
CC_Span_163	BS Analyten vorhanden	R02	25	1346	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_164	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1392	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10 SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_164	BS Analyten vorhanden	R02	25	1392	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_165	BS Analyten vorhanden	R02	25	1513	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_166	BS nicht nachgewiesen	R02	15	1909	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_166	BS nicht nachgewiesen	R02	15	1909	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_167	BS nachgewiesen	R02	15	514	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_167	BS Analyten vorhanden	R02	15	514	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_168	BS nachgewiesen	R02	15	610	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_168	BS Analyten vorhanden	R02	15	610	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_169	BS Analyten vorhanden	R02	15	2565	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_169	BS nicht nachgewiesen	R02	15	2565	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_170	BS nachgewiesen	R02	15	598	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_170	BS nicht nachgewiesen	R02	15	598	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_171	BS nachgewiesen	R02	15	589	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_171	BS nicht nachgewiesen	R02	15	589	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_182	BS Analyten vorhanden	R02	25	1378	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_182	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1378	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_183	BS Analyten vorhanden	R02	25	838	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_183	BS nicht nachgewiesen	R02	25	838	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_184	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1600	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_184	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1600	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_Span_185	BS nachgewiesen	R02	15	1667	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_Span_185	BS nicht nachgewiesen	R02	15	1667	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_SpanD_030	BS Analyten vorhanden	R02	25	380	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_SpanD_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	380	Ja	21	BE02					split 10	50°C 5 min 30 min
CC_SpanD_031	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1377	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_SpanD_031	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1377	Ja	21	BE02					split 10	50°C 5 min 30 min

Abb. A16: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Span Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A17 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_032	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_032	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_032	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	ASE/n-Hexan	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_032	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	DI01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	keine	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_032	BS nicht nachgewiesen	R01	25	300	nein	21	DI01	homogenisierte Probe, verbrannter Anteil	ASE/Toluol	Einrotieren	GC-MS (Shimadzu, flüssig)	split 10	
CC_Span_032	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	split 10	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_032	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	split 10	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/trocken	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_032	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_094	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_094	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_094	BS nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_095	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_095	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_095	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_102	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_102	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_102	BS nachgewiesen	R02	50	600	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_103	BS nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_103	BS nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_103	BS nachgewiesen	R02	50	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_104	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_104	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_104	BS Analyten vorhanden	R02	50	900	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min

Abb. A17: Analyseergebnisse von mit Diesel versehenen Span Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A18 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin/Diesel Gemisch

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Span_121	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_121	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_121	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_121	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min
CC_Span_122	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_122	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_122	BS Analyten vorhanden	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Span_122	BS nicht nachgewiesen	R02	25	600	Ja	21	BE02 DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min

Abb. A18: Analyseergebnisse von mit Benzin/Diesel Gemisch versehenen Span Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A19 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Span mit Dekor

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
-------	----------------	-----------	-------------------------	-------------------	-------------	-------------------------------	----------------	-----------	----------------	--------------	---------------	-------	------------

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_SpanD_030	BS Analyten vorhanden	R02	25	380	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C 5 min 30 min
CC_SpanD_030	BS nicht nachgewiesen	R02	25	380	Ja	21	BE02					split 10	50°C 5 min 30 min
CC_SpanD_031	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1377	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50°C 5 min 30 min
CC_SpanD_031	BS nicht nachgewiesen	R02	25	1377	Ja	21	BE02					split 10	50°C 5 min 30 min

Abb. A19: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Span mit Dekor Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A20 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material: Teppich

verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Tepp_002	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_002	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace	splitlos	80°C/90°C, 5 min

Abb. A20: Analyseergebnisse von mit Spiritus versehenen Teppich Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A21 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material: Teppich

verwendeter Brandbeschleuniger: Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Tepp_001	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_001	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_001	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		80°C/90°C, 5 min
CC_Tepp_010	BS nachgewiesen	R02	25	85	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_010	BS nachgewiesen	R02	25	85	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME		50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_010	BS nicht nachgewiesen	R02	25	85	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		80°C/90°C, 5 min
CC_Tepp_011	BS nachgewiesen	R02	25	120	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_011	BS nachgewiesen	R02	25	120	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME		50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_011	BS nicht nachgewiesen	R02	25	120	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		80°C/90°C, 5 min
CC_Tepp_012	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_012	BS nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME		50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_012	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		80°C/90°C, 5 min
CC_Tepp_013	BS nachgewiesen	R02	25	180	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_013	BS nachgewiesen	R02	25	180	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME		50 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_013	BS nicht nachgewiesen	R02	25	180	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		80°C/90°C, 5 min

Abb. A21: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Teppich Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
-------	----------------	-----------	-------------------------	-------------------	-------------	-------------------------------	----------------	-----------	----------------	--------------	---------------	-------	------------

Abb. A22 Versuchapparatur: Cone Calorimeter

Material:Teppich

verwendeter Brandbeschleuniger:Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_Tepp_003	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	70 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_003	BS Analyten vorhanden	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos	70 °C, 5 min 30 min
CC_Tepp_003	BS nicht nachgewiesen	R02	25	300	nein	21	DI01	Spot, verbrannter Anteil	Headspace	keine	GC-MS Headspace		80°C/90°C, 5 min

Abb. A22: Analyseergebnisse von mit Diesel versehenen Teppich Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A23 Versuchapparatur:Cone Calorimeter

Material:Polyurethan (PUR)

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
CC_PUR_012	BS nachgewiesen	R02	15	984	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_PUR_012	BS Analyten vorhanden	R02	15	984	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_PUR_014	BS Analyten vorhanden	R02	25	734	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_PUR_014	BS nicht nachgewiesen	R02	25	734	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 10 min
CC_PUR_034	BS nicht nachgewiesen	R02	25	210	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C 5 min 5 min
CC_PUR_036	BS nicht nachgewiesen	R02	25	202	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_PUR_038	BS nachgewiesen	R02	15	951	nein	0	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_PUR_041	BS nicht nachgewiesen	R02	15	251	Ja	18	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_PUR_043	BS nicht nachgewiesen	R02	15	231	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min
CC_PUR_044	BS nicht nachgewiesen	R02	0	390	Ja	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	splitlos SIM	50°C 5 min 30 min

Abb. A23: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen PUR Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung in dem Cone Calorimeter

Abb. A24 Versuchapparatur:DIN-Rohr

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Spiritus

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
DIN_Span_002	BS nachgewiesen	R02	200	1800	nein	21	SP02						
DIN_Span_006	BS nicht nachgewiesen	R02	400	1800	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 / SIM EtOH	50°C, 5 min 30 min
DIN_Span_006	BS nicht nachgewiesen	R02	400	1800	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 / SIM EtOH	50°C, 5 min 30 min
DIN_Span_006	BS nicht nachgewiesen	R02	400	1800	nein	21	SP02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H ₂ O	keine	GC-MS SPME	split 10 / SIM EtOH	50°C, 5 min 30 min

Abb. A24: Analyseergebnisse von mit Spiritus versehenen Span Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung im DIN-Rohr

Abb. A25 Versuchapparatur:DIN-Rohr

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Benzin

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
DIN_Span_003	BS nachgewiesen	R02	200	1800	nein	21	BE02						
DIN_Span_007	BS nachgewiesen	R02	400	1800	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min
DIN_Span_007	BS Analyten vorhanden	R02	400	1800	nein	21	BE02	Spot, verbrannter Anteil	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	split 10	50°C, 5 min 30 min

Abb. A25: Analyseergebnisse von mit Benzin versehenen Span Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung im DIN-Rohr

Abb. A26 Versuchapparatur:DIN-Rohr

Material:Span

verwendeter Brandbeschleuniger:Diesel

Probe	Nachweisstatus	Probenort	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	Pilotflamme	O ₂ -Konzentration	verwendeter BS	Probenzug	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
DIN_Span_004	BS nachgewiesen	R02	200	1800	nein	21	DI01						

Abb. A26: Analyseergebnisse von mit Diesel versehenen Span Proben nach unterschiedlicher Beanspruchung im DIN-Rohr

Anhang B

Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Rauchentwicklung und der Rauchgaszusammensetzung von verschiedenen Materialien nach Beanspruchung in der Rauchkammer

Abb.: B1

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Holz
verwendeter Brandbeschleuniger:	ohne
Versuchsparameter:	SDC_Holz_001: 600s, 25kW/m ² , oF, oBS
	SDC_Holz_002: 1200s, 25kW/m ² , oF, oBS
	SDC_Holz_004: 900s, 25kW/m ² , oF, oBS

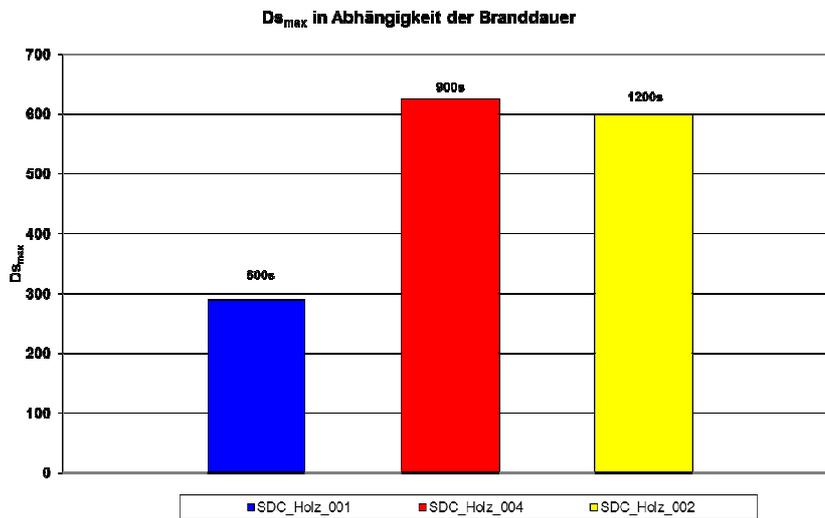


Abb.: B2

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Holz
verwendeter Brandbeschleuniger:	ohne
Versuchsparameter:	SDC_Holz_002: 1200s, 25kW/m ² , oF, oBS
	SDC_Holz_033a: 1200s, 25kW/m ² , mF, oBS

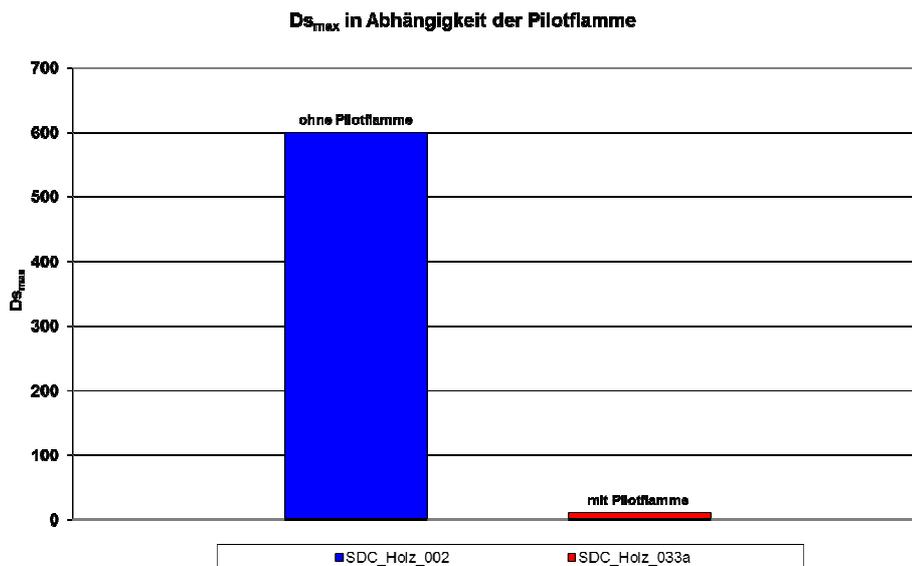


Abb.: B3

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_047:1200s, 50kW/m²,oF, SP

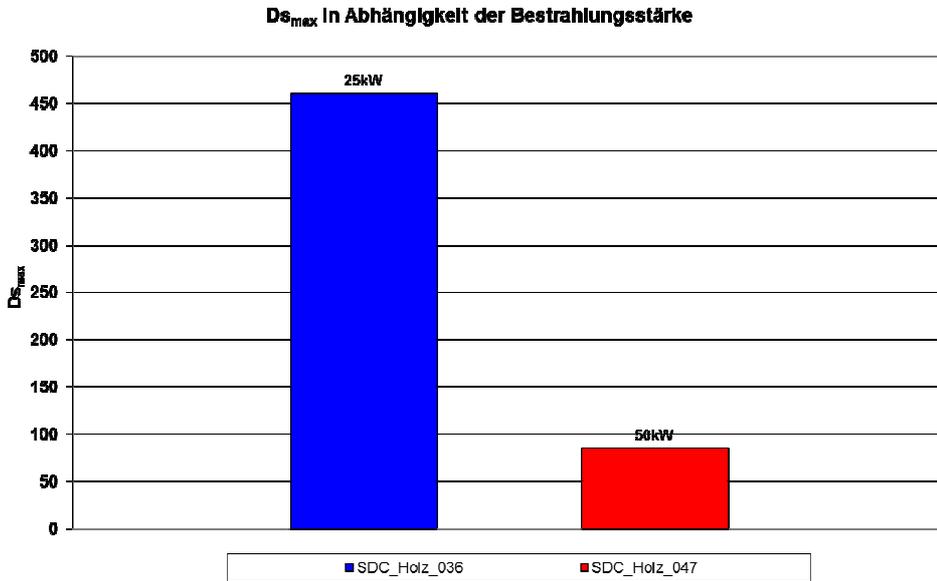


Abb.: B4

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml), Viss (5ml), Benzin (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_037:1200s, 25kW/m²,oF, Vi
SDC_Holz_038:1200,25kW/m²,oF, Be

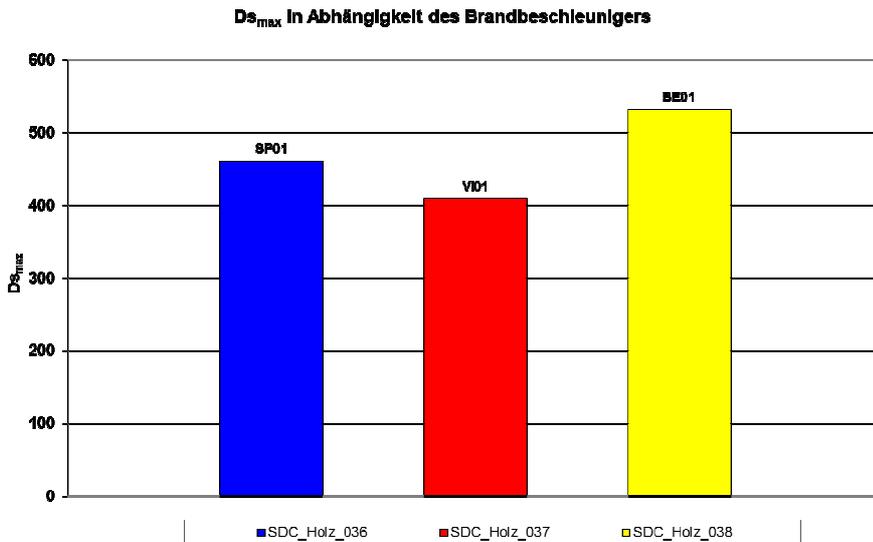


Abb.: B5

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Holz
verwendeter Brandbeschleuniger:	Spiritus (1ml, 2ml, 5ml)
Versuchsparameter:	SDC_Holz_016:1200s, 25kW/m ² , oF,SP SDC_Holz_022:1200s, 25kW/m ² ,oF,SP SDC_Holz_036:1200,25kW/m ² ,oF,Sp

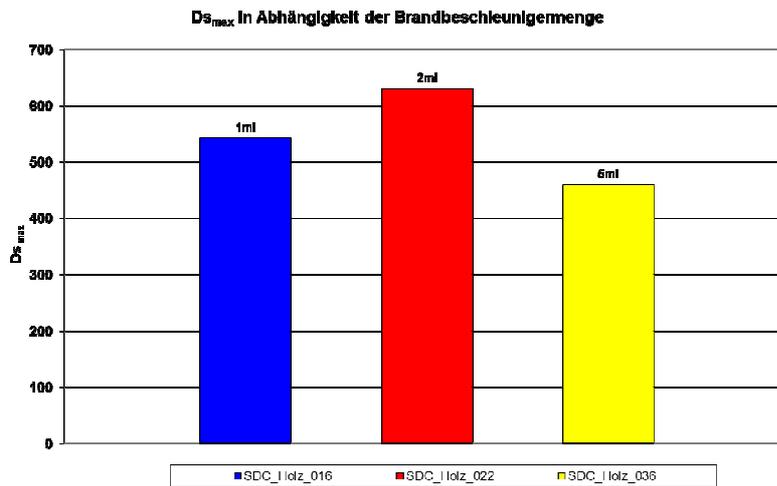


Abb.: B6

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Holz
verwendeter Brandbeschleuniger:	ohne
Versuchsparameter:	SDC_Holz_001: 600s, 25kW/m ² ,oF, oBS SDC_Holz_002:1200s, 25kW/m ² , oF, oBS SDC_Holz_004: 900s, 25kW/m ² ,oF, oBS

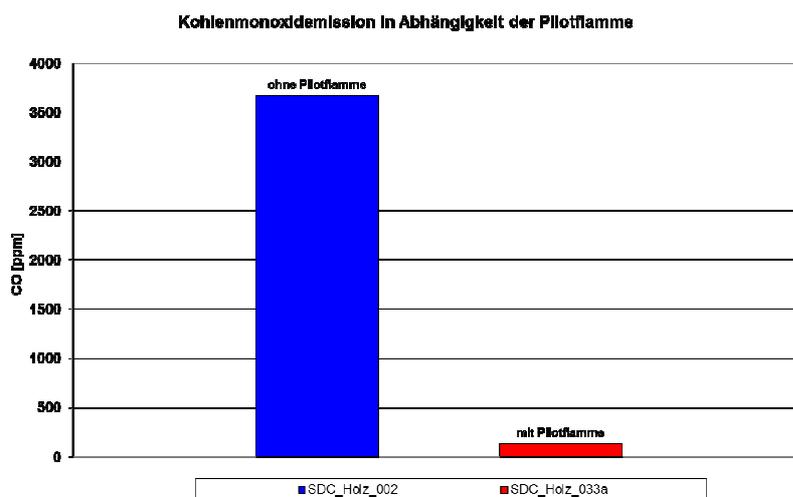


Abb.: B7

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_002:1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_033a:1200s, 25kW/m²,mF, oBS

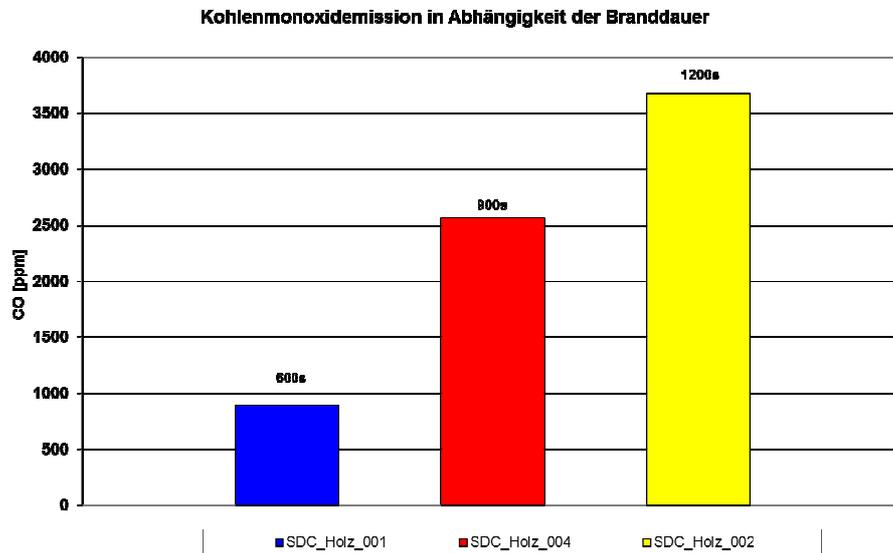


Abb.: B8

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_047:1200s, 50kW/m²,oF, SP

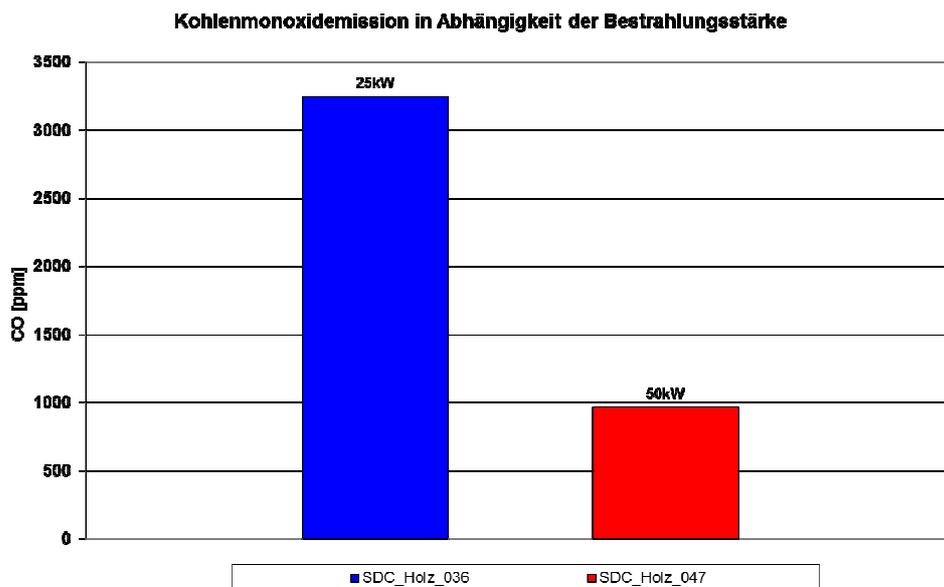


Abb.: B9

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml), Viss (5ml), Benzin (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_037:1200s, 25kW/m², oF, Vi
SDC_Holz_038:1200,25kW/m², oF, Be

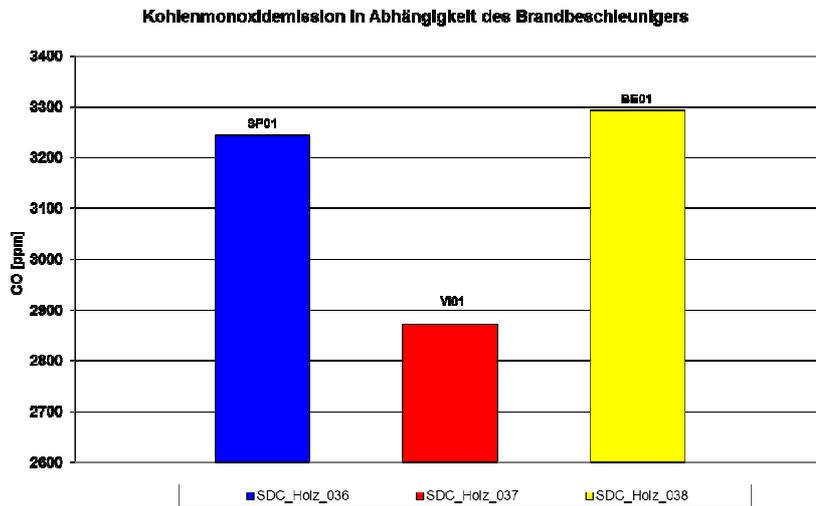


Abb.: B10

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml, 2ml, 5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_016:1200s, 25kW/m², oF,SP
SDC_Holz_022:1200s, 25kW/m², oF,SP
SDC_Holz_036:1200,25kW/m², oF,Sp

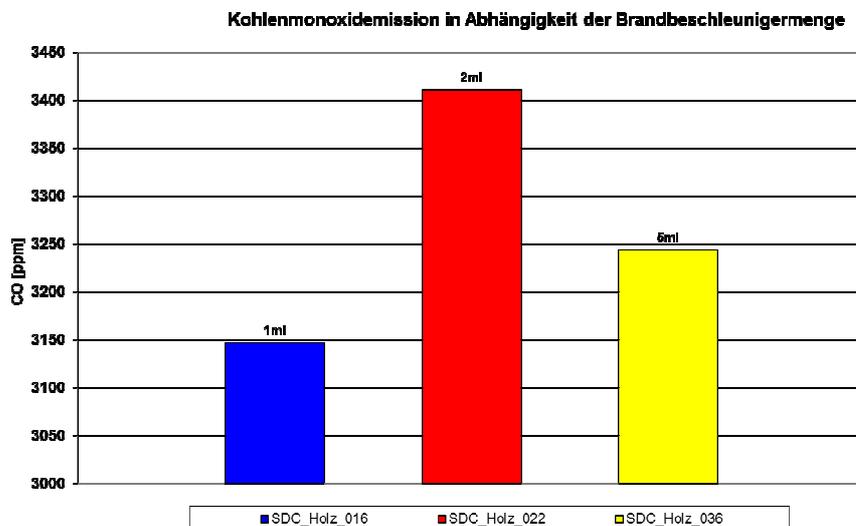


Abb.: B11

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_001: 600s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_002: 1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_004: 900s, 25kW/m², oF, oBS

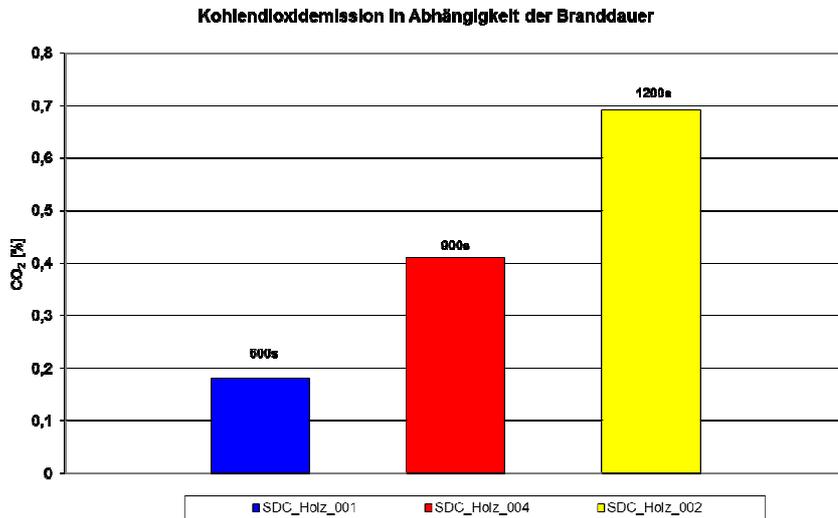


Abb.: B12

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_002: 1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_033a: 1200s, 25kW/m², mF, oBS

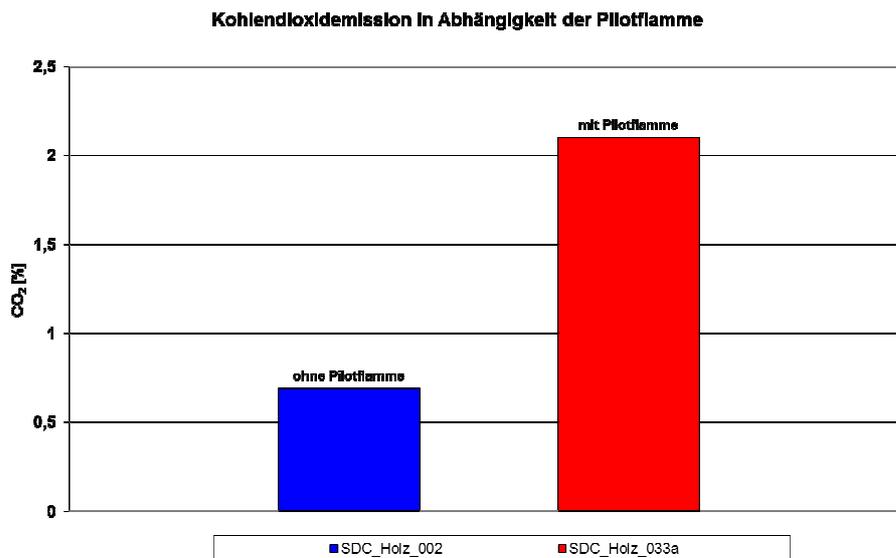


Abb.: B13

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_047:1200s, 50kW/m²,oF, SP

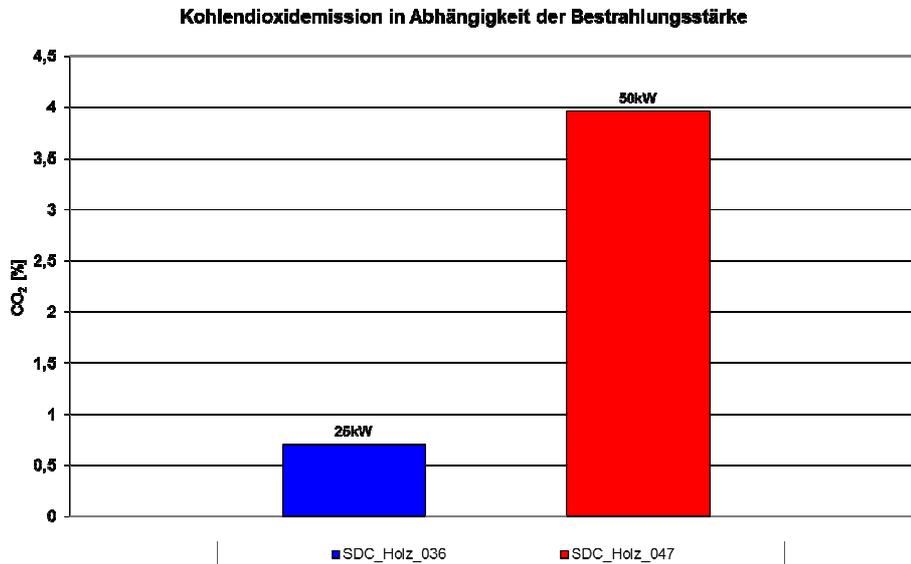


Abb.: B14

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml), Viss (5ml), Benzin (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_037:1200s, 25kW/m²,oF, Vi
SDC_Holz_038:1200,25kW/m²,oF, Be

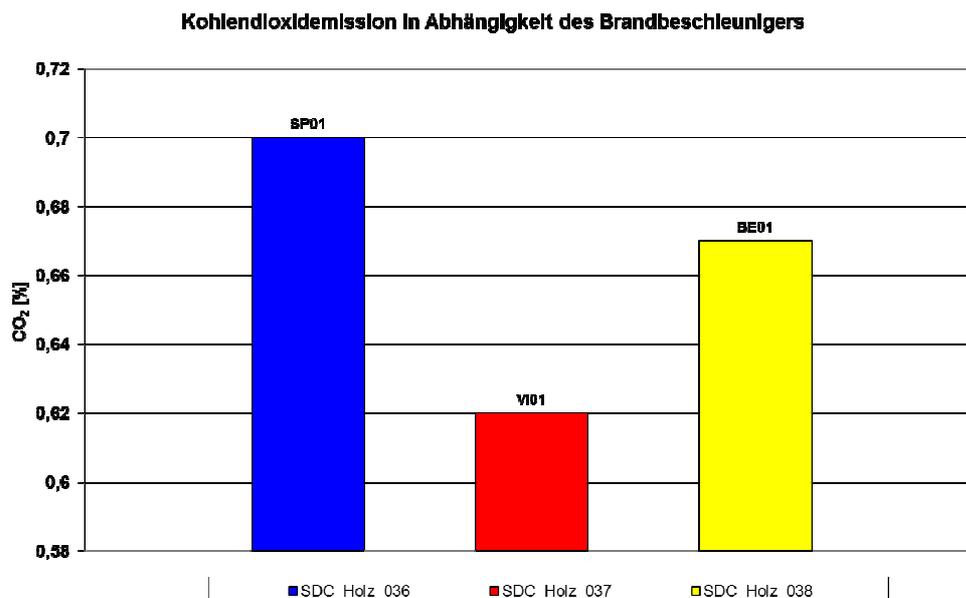


Abb.: B15

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml, 2ml, 5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_016:1200s, 25kW/m², oF,SP
SDC_Holz_022:1200s, 25kW/m²,oF,SP
SDC_Holz_036:1200,25kW/m²,oF,Sp

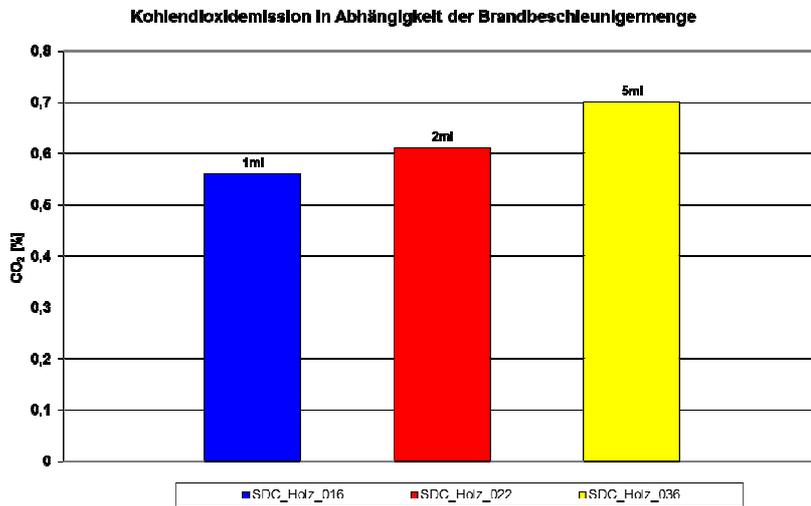


Abb.: B16

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_001: 600s, 25kW/m²,oF, oBS
SDC_Holz_002:1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_004: 900s, 25kW/m²,oF, oBS

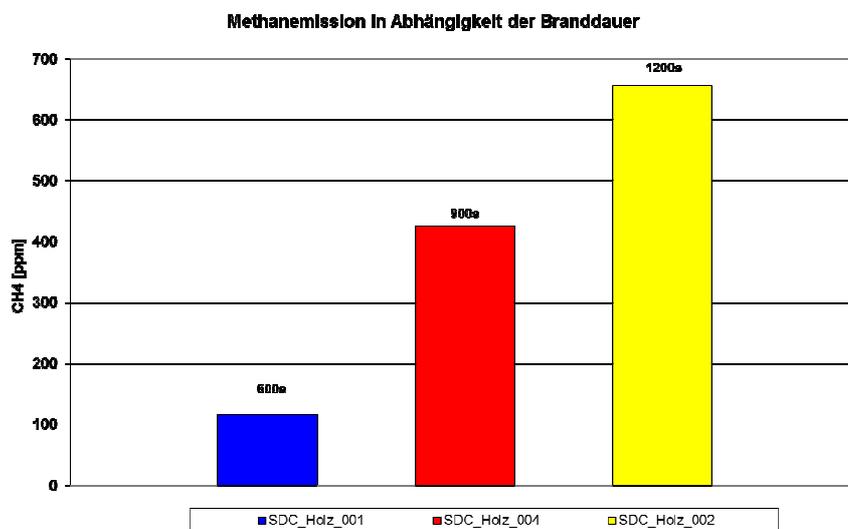


Abb.: B17

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_002:1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_033a:1200s, 25kW/m²,mF, oBS

Methanemission in Abhängigkeit der Pilotflamme

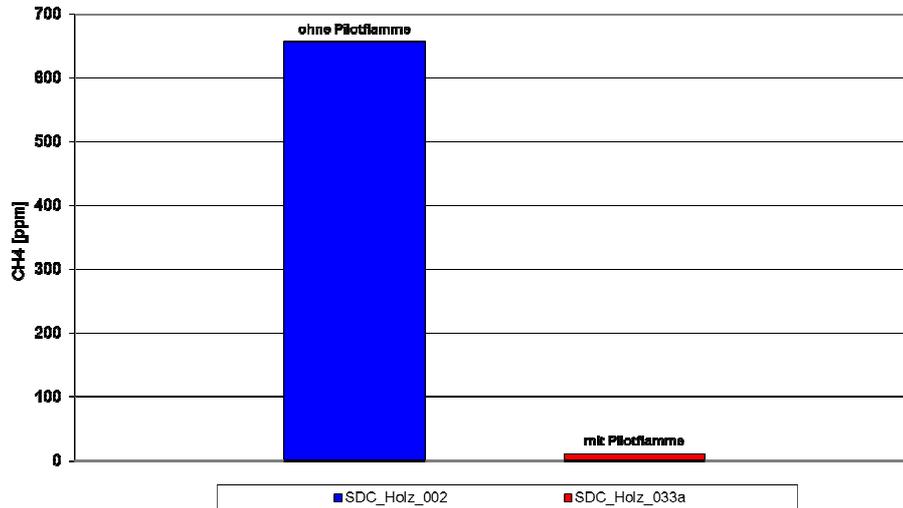


Abb.: B18

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_047:1200s, 50kW/m²,oF, SP

Methanemission in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke

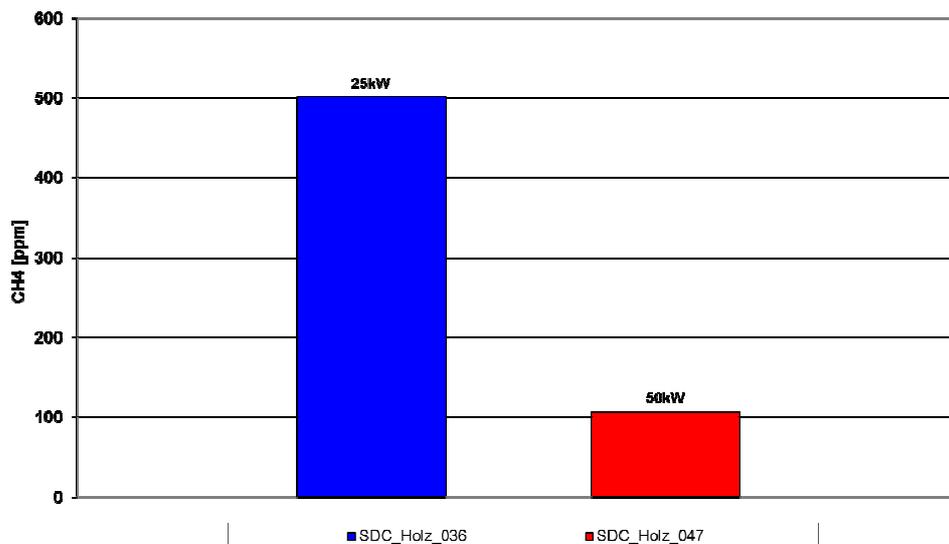


Abb.: B19

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml), Viss (5ml), Benzin (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_037:1200s, 25kW/m², oF, Vi
SDC_Holz_038:1200,25kW/m²,oF, Be

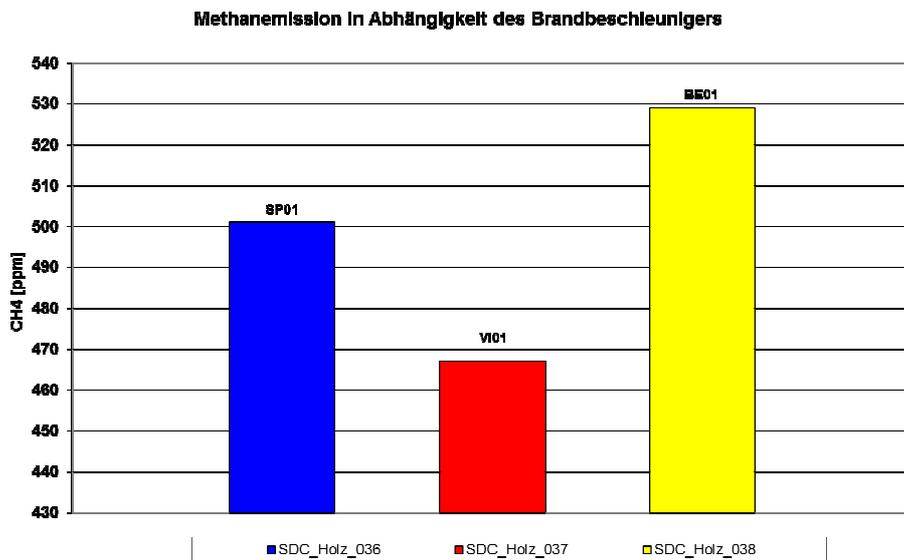


Abb.: B20

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml, 2ml, 5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_016:1200s, 25kW/m², oF,SP
SDC_Holz_022:1200s, 25kW/m²,oF,SP
SDC_Holz_036:1200,25kW/m²,oF,Sp

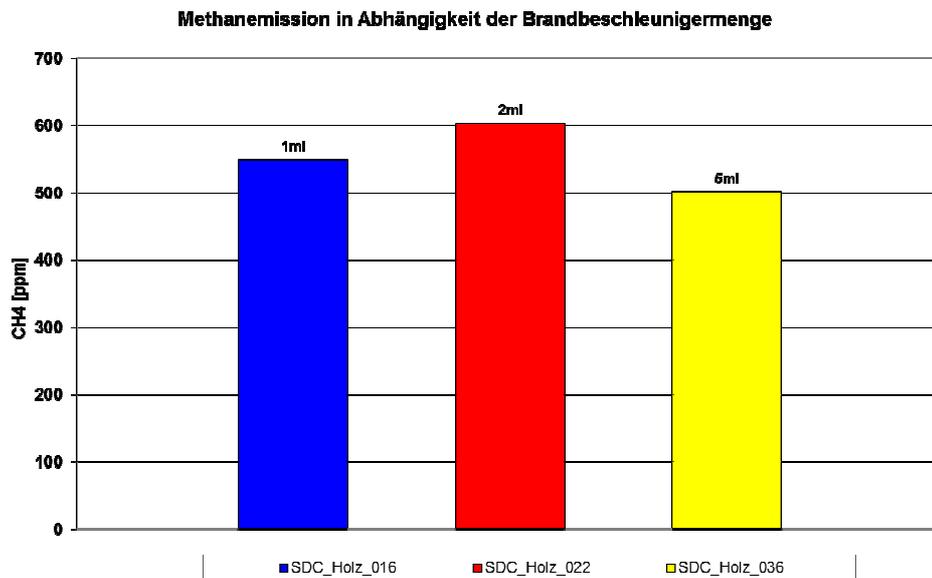


Abb.: B21

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_001: 600s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_002: 1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_004: 900s, 25kW/m², oF, oBS

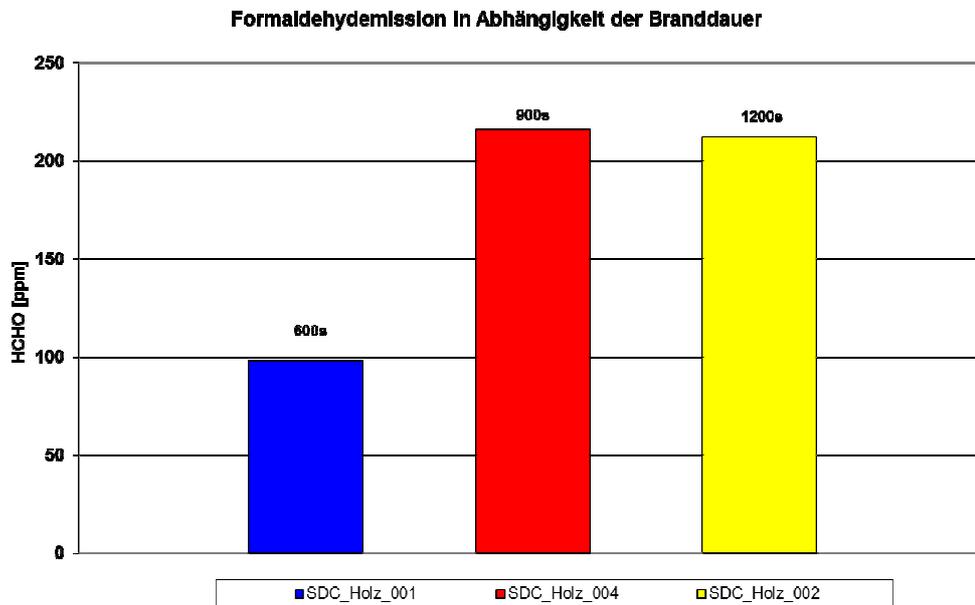


Abb.: B22

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_002: 1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_033a: 1200s, 25kW/m², mF, oBS

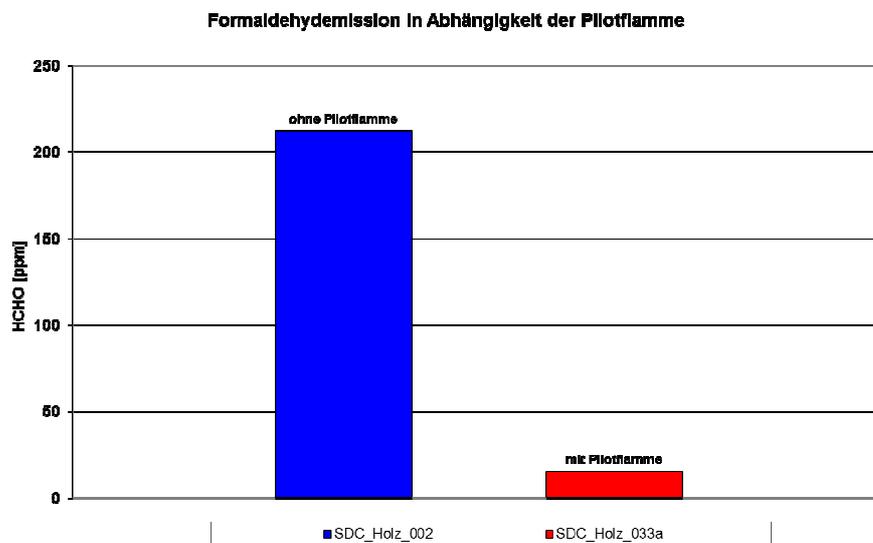


Abb.: B23

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_047:1200s, 50kW/m², oF, SP

Formaldehydemission in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke

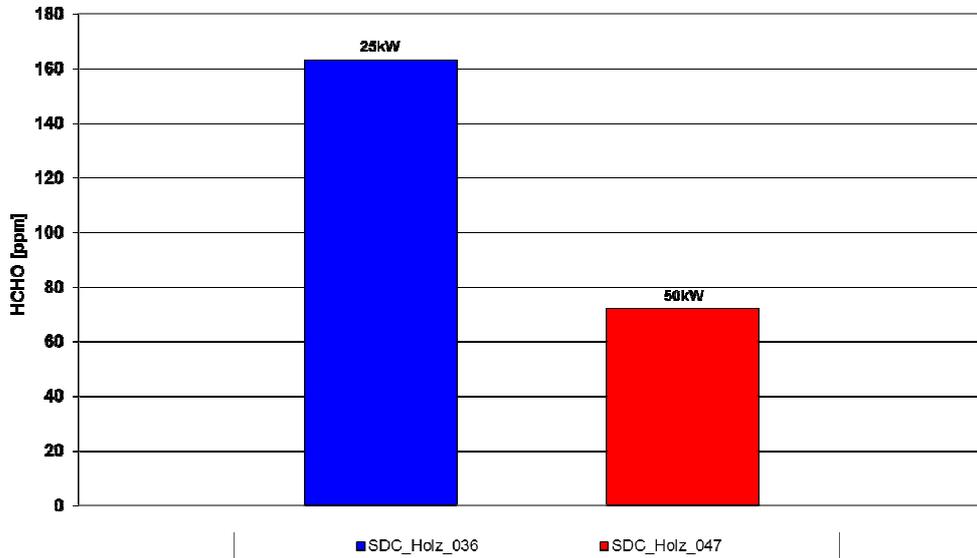


Abb.: B24

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml), Viss (5ml), Benzin (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_037:1200s, 25kW/m², oF, Vi
SDC_Holz_038:1200, 25kW/m², oF, Be

Formaldehydemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

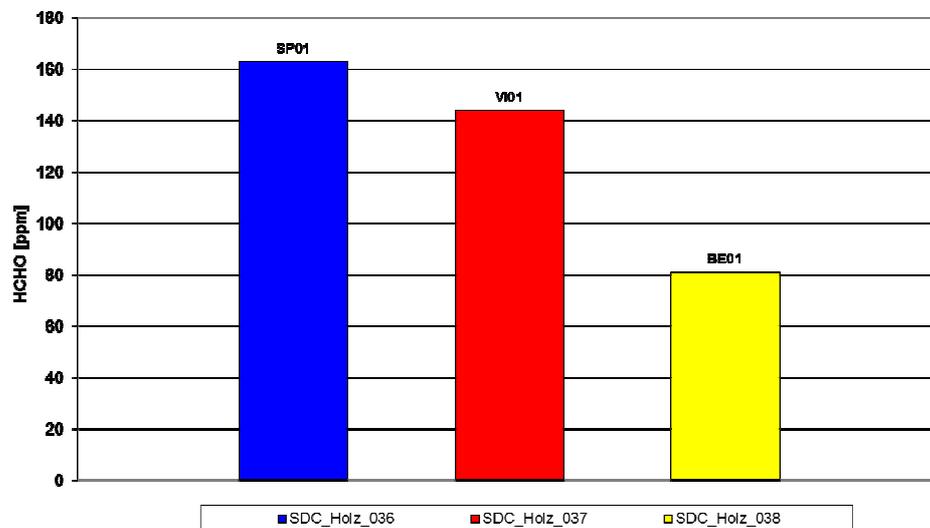


Abb.: B25

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml, 2ml, 5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_016:1200s, 25kW/m², oF,SP
SDC_Holz_022:1200s, 25kW/m²,oF,SP
SDC_Holz_036:1200,25kW/m²,oF,Sp

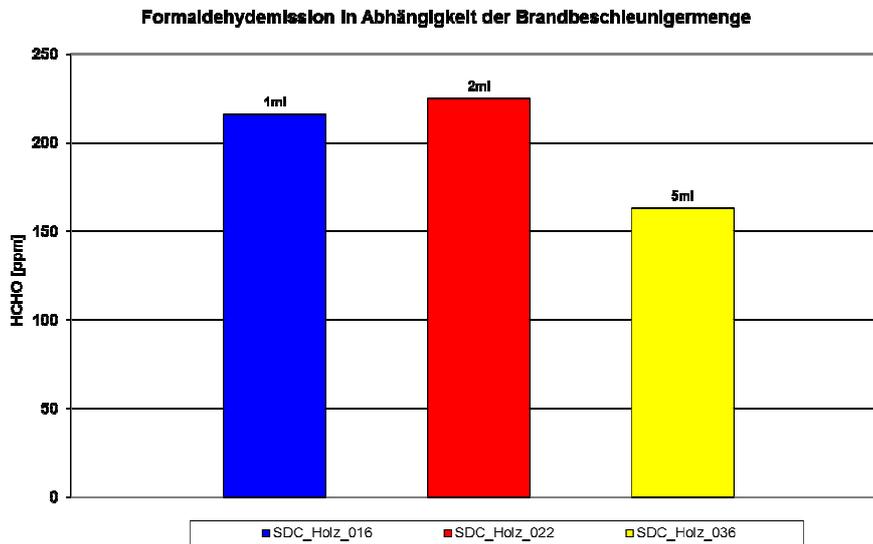


Abb.: B26

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_001: 600s, 25kW/m²,oF, oBS
SDC_Holz_002:1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_004: 900s, 25kW/m²,oF, oBS

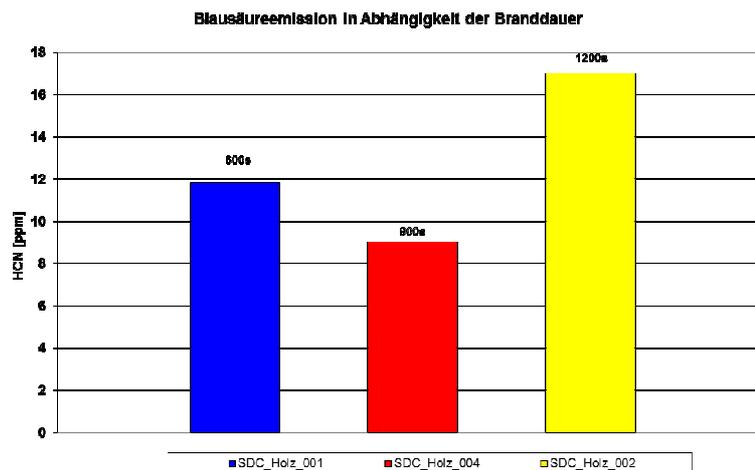


Abb.: B27

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: ohne
Versuchsparameter: SDC_Holz_002:1200s, 25kW/m², oF, oBS
SDC_Holz_033a:1200s, 25kW/m²,mF, oBS

Formaldehydemission In Abhängigkeit der Pilotflamme

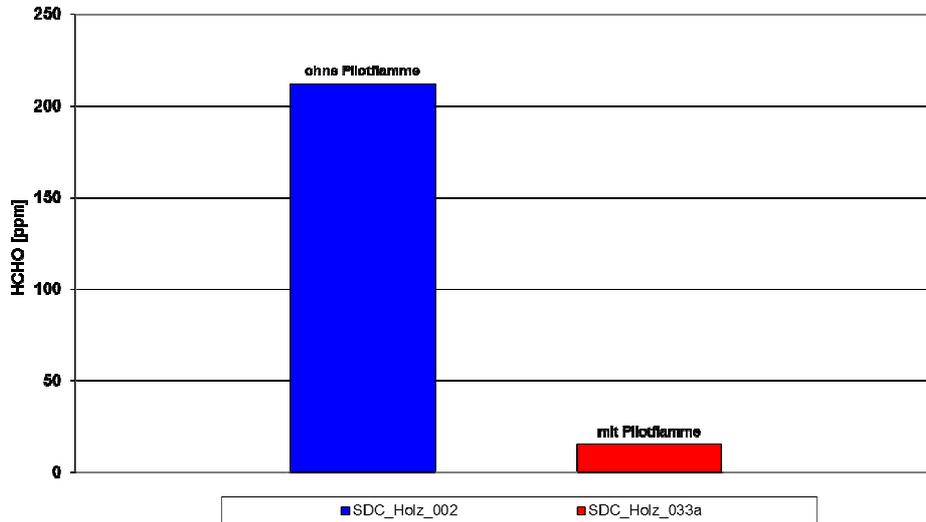


Abb.: B28

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Holz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (5ml)
Versuchsparameter: SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m², oF, SP
SDC_Holz_047:1200s, 50kW/m²,oF, SP

Blausäureemission in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke

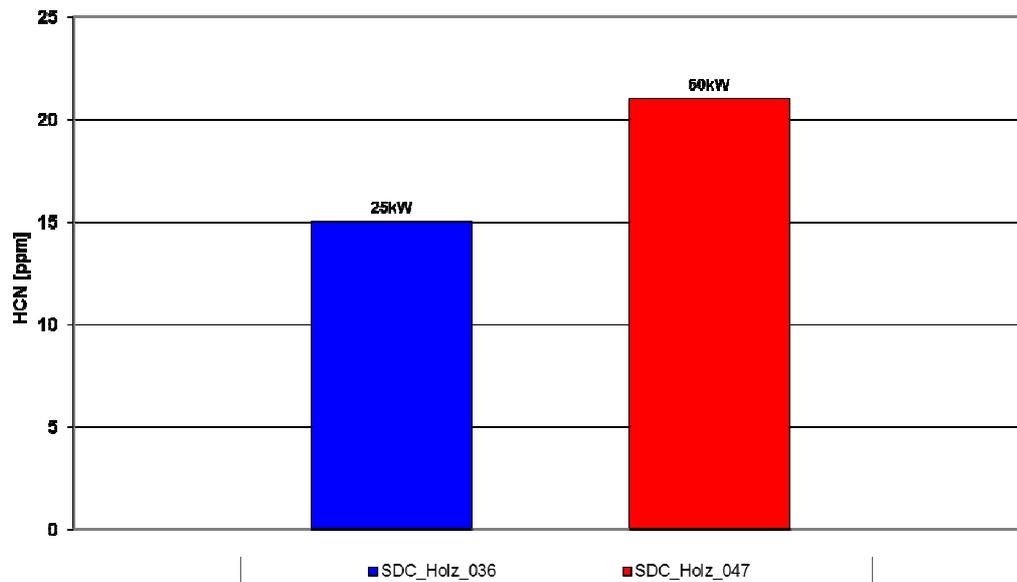


Abb.: B29

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Holz
verwendeter Brandbeschleuniger:	Spiritus (5ml), Viss (5ml), Benzin (5ml)
Versuchsparameter:	SDC_Holz_036:1200s, 25kW/m ² , oF, SP SDC_Holz_037:1200s, 25kW/m ² , oF, Vi SDC_Holz_038:1200,25kW/m ² , oF, Be

Blausäureemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

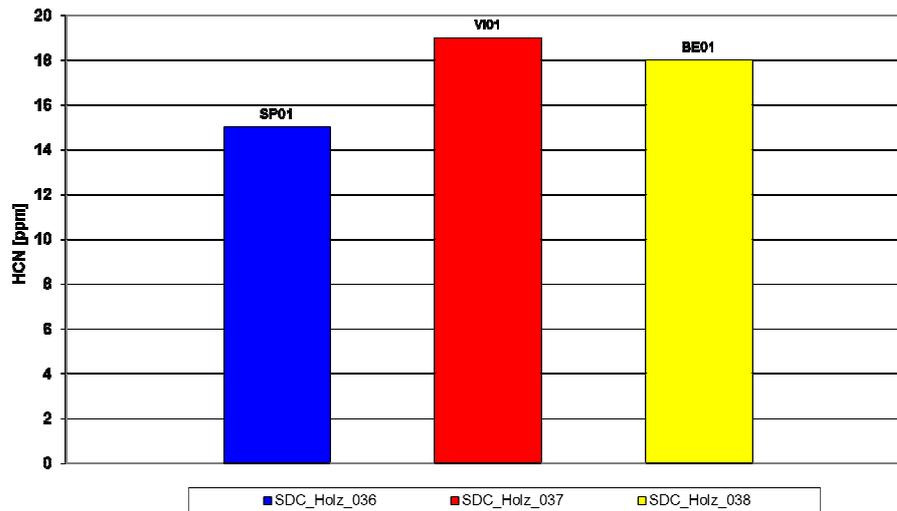


Abb.: B30

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Holz
verwendeter Brandbeschleuniger:	Spiritus (1ml, 2ml, 5ml)
Versuchsparameter:	SDC_Holz_016:1200s, 25kW/m ² , oF,SP SDC_Holz_022:1200s, 25kW/m ² , oF,SP SDC_Holz_036:1200,25kW/m ² , oF,Sp

Blausäureemission in Abhängigkeit der Brandbeschleunigermenge

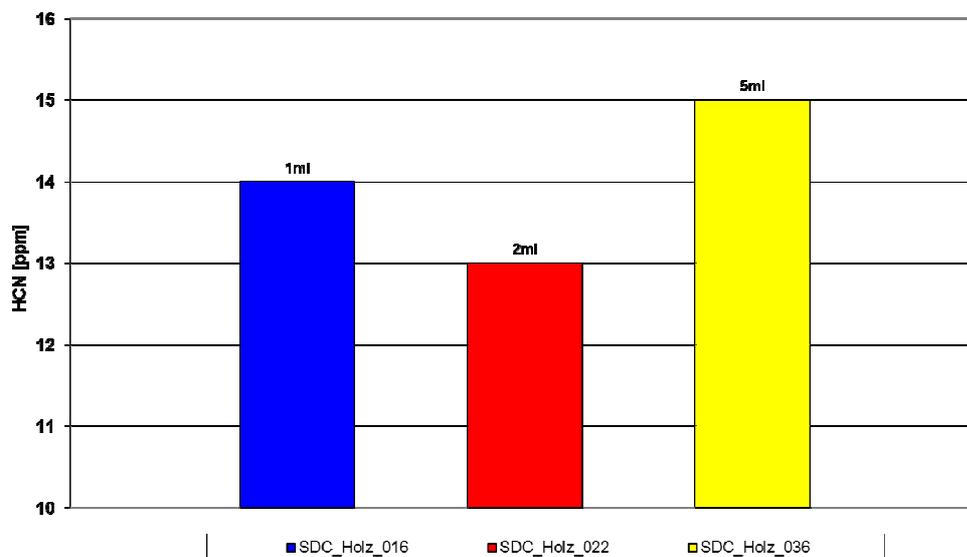


Abb.: B31

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_002a:1200s, 25kW/m²,mF

D_{s,max} in Abhängigkeit der Pilotflamme

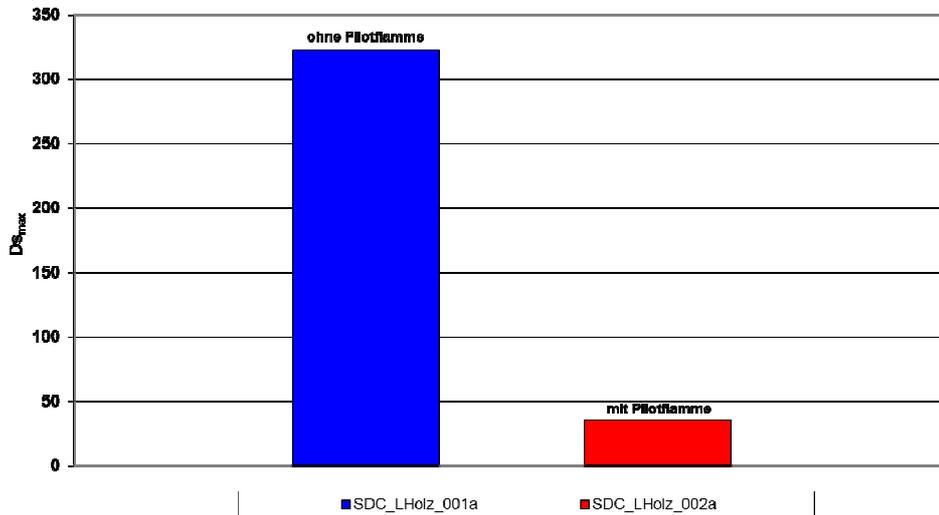


Abb.: B32

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml) Benzin (1ml)
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_003a:1200s, 25kW/m²,oF, Sp
SDC_LHolz_004b:1200s,25kW/m²,oF,Be

D_{s,max} in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

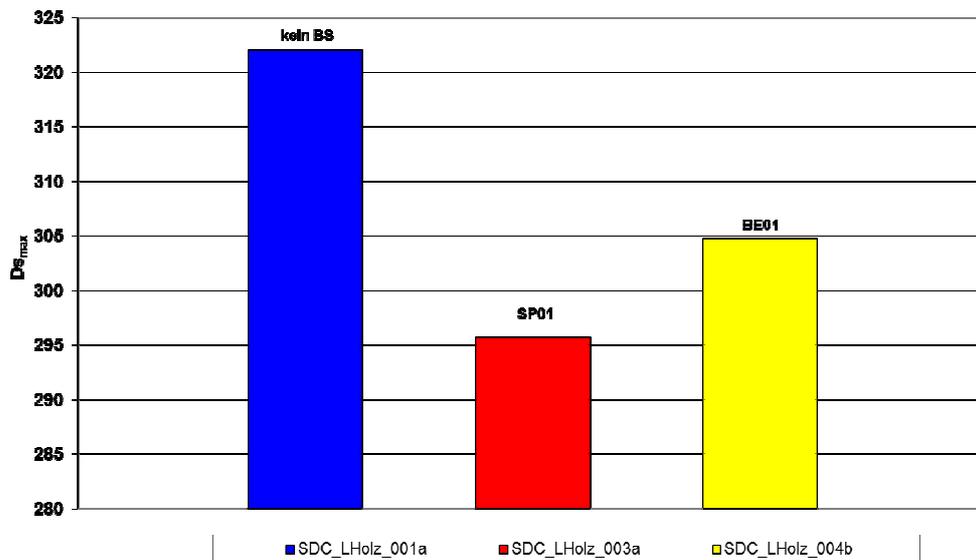


Abb.: B33

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_002a:1200s, 25kW/m²,mF

Kohlenmonoxidemission in Abhängigkeit der Pilotflamme

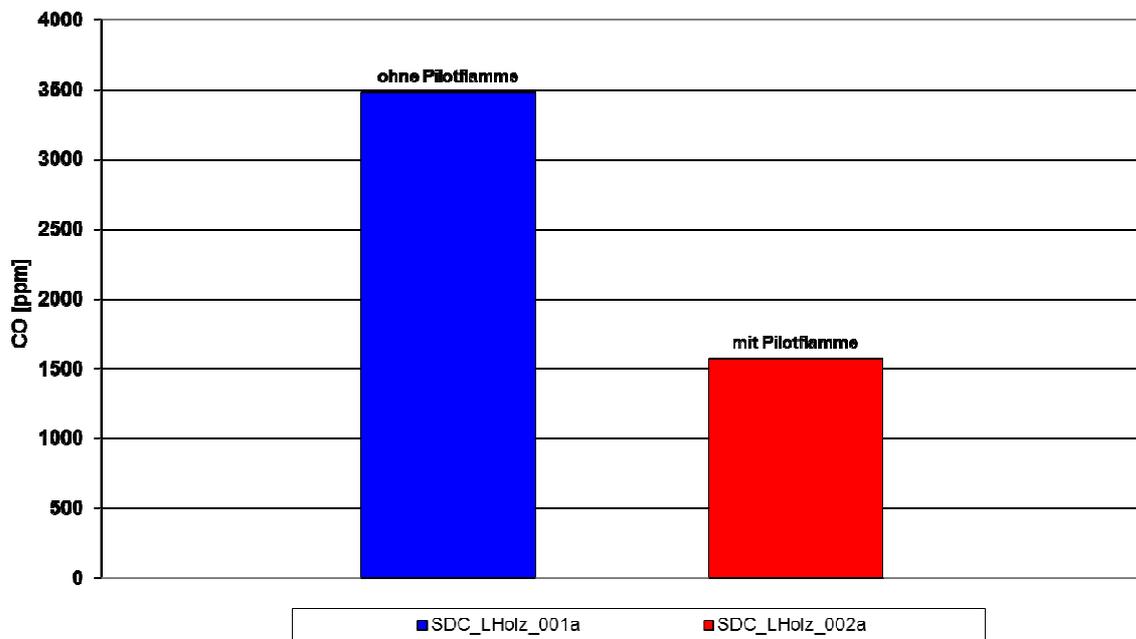


Abb.: B34

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml) Benzin (1ml)
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_003a:1200s, 25kW/m²,oF, Sp
SDC_LHolz_004b:1200s,25kW/m²,oF,Be

Kohlenmonoxidemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

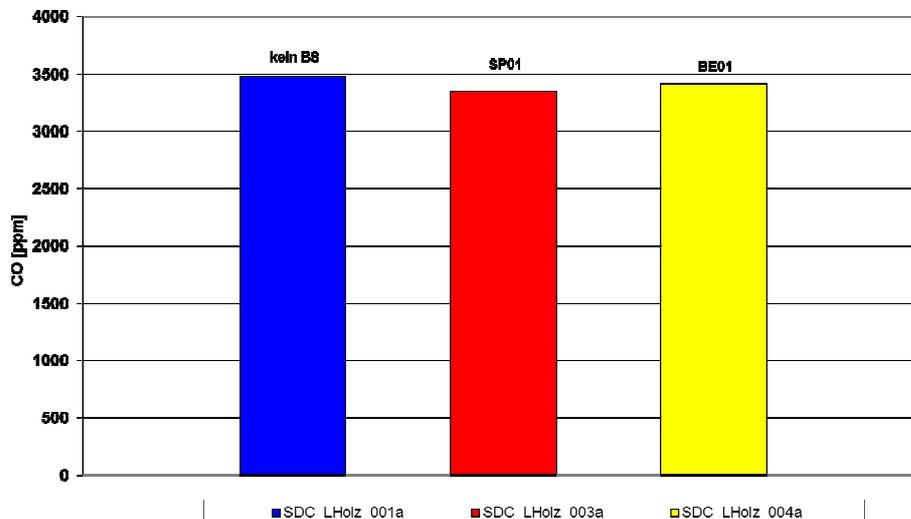


Abb.: B35

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_002a:1200s, 25kW/m²,mF

Kohlendioxidemission in Abhängigkeit der Pilotflamme

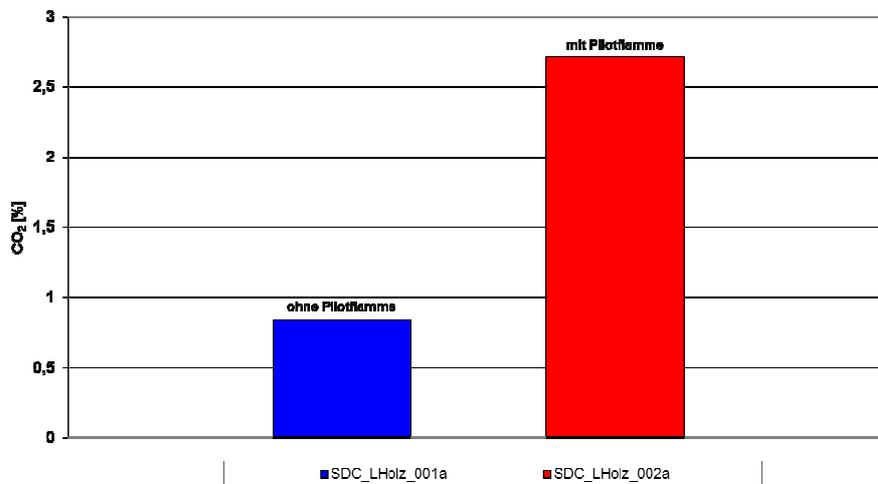


Abb.: B36

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml) Benzin (1ml)
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_003a:1200s, 25kW/m²,oF, Sp
SDC_LHolz_004b:1200s,25kW/m²,oF,Be

Kohlendioxidemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

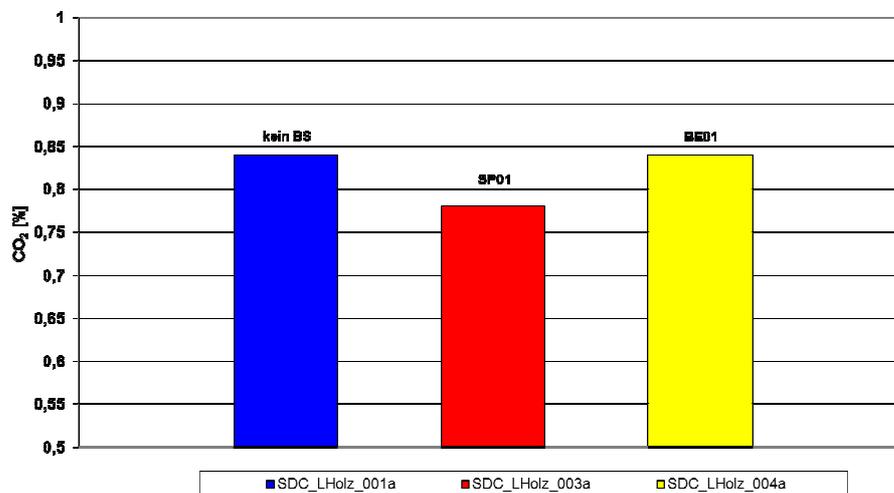


Abb.: B37

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_002a:1200s, 25kW/m²,mF

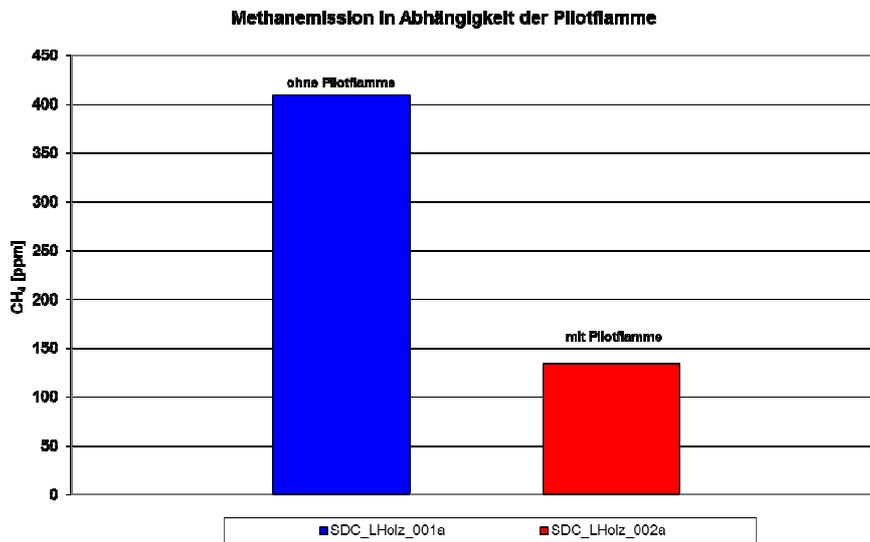


Abb.: B38

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml) Benzin (1ml)
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_003a:1200s, 25kW/m²,oF, Sp
SDC_LHolz_004b:1200s,25kW/m²,oF,Be

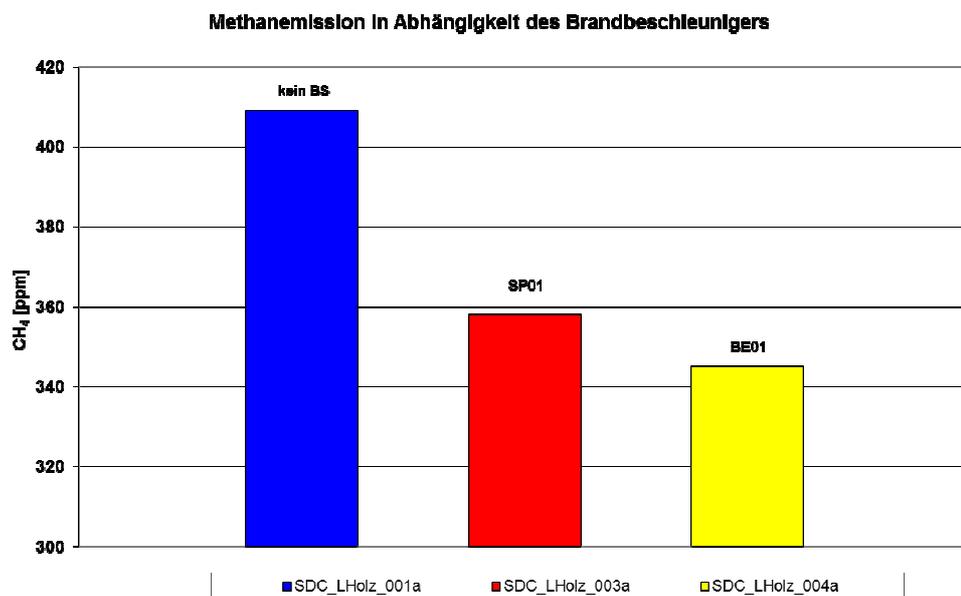


Abb.: B39

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_002a:1200s, 25kW/m²,mF

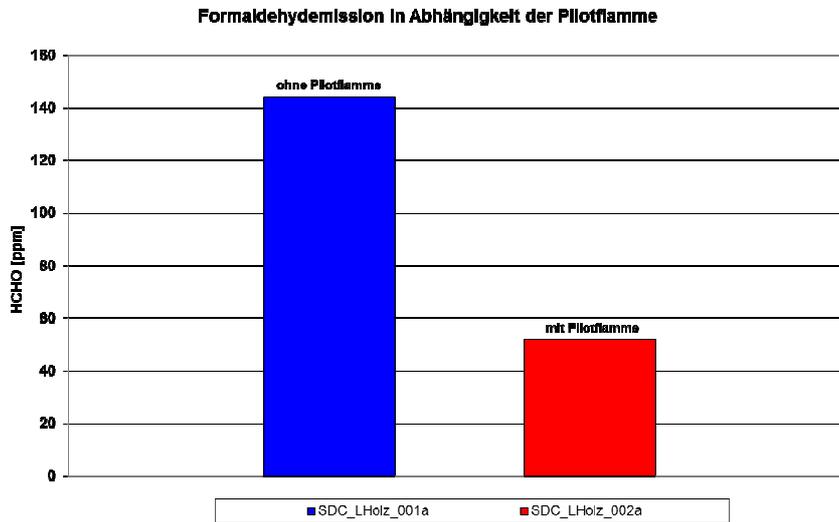


Abb.: B40

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger: Spiritus (1ml) Benzin (1ml)
Versuchsparameter: SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m², oF
SDC_LHolz_003a:1200s, 25kW/m²,oF, Sp
SDC_LHolz_004b:1200s,25kW/m²,oF,Be

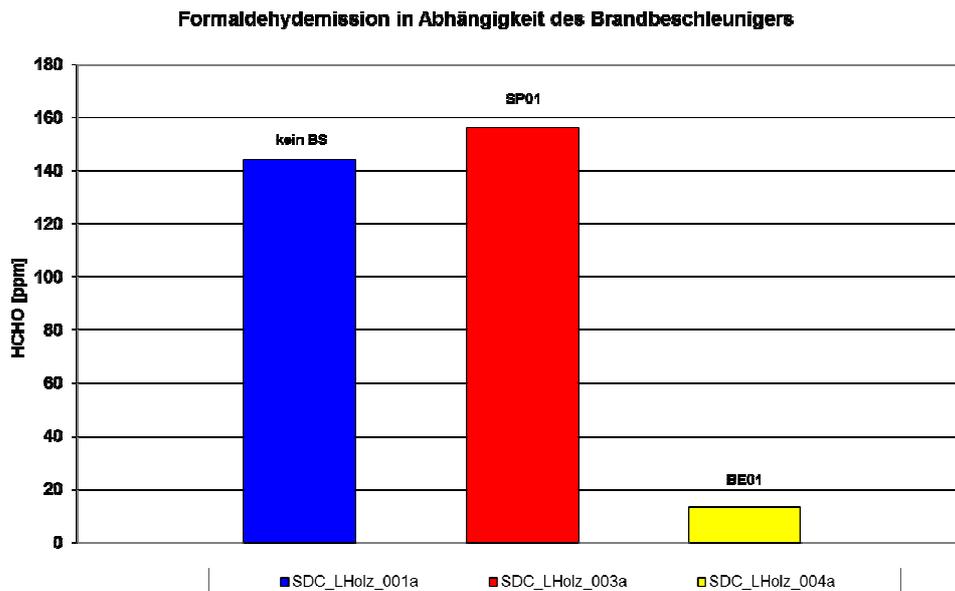


Abb.: B41

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger:	Kein
Versuchsparameter:	SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m ² , oF SDC_LHolz_002a:1200s, 25kW/m ² ,mF

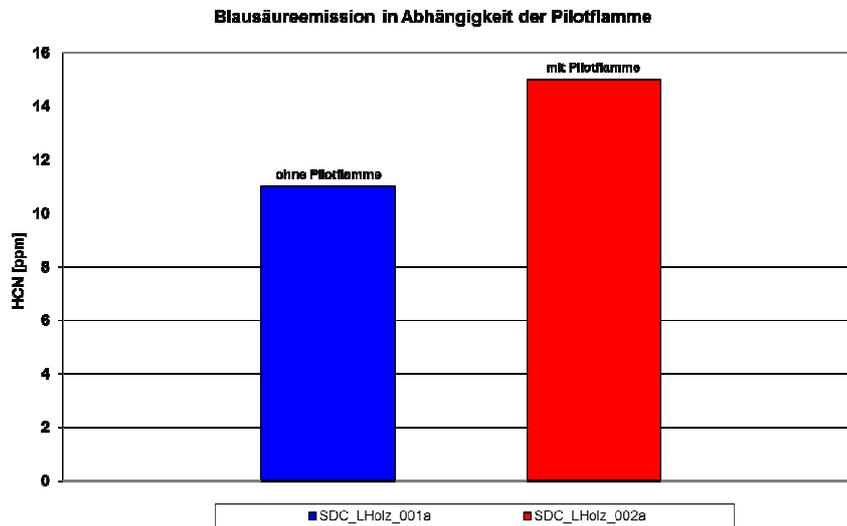


Abb.: B42

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Leimholz
verwendeter Brandbeschleuniger:	Spiritus (1ml) Benzin (1ml)
Versuchsparameter:	SDC_LHolz_001a:1200s, 25kW/m ² , oF SDC_LHolz_003a:1200s, 25kW/m ² ,oF, Sp SDC_LHolz_004b:1200s,25kW/m ² ,oF,Be

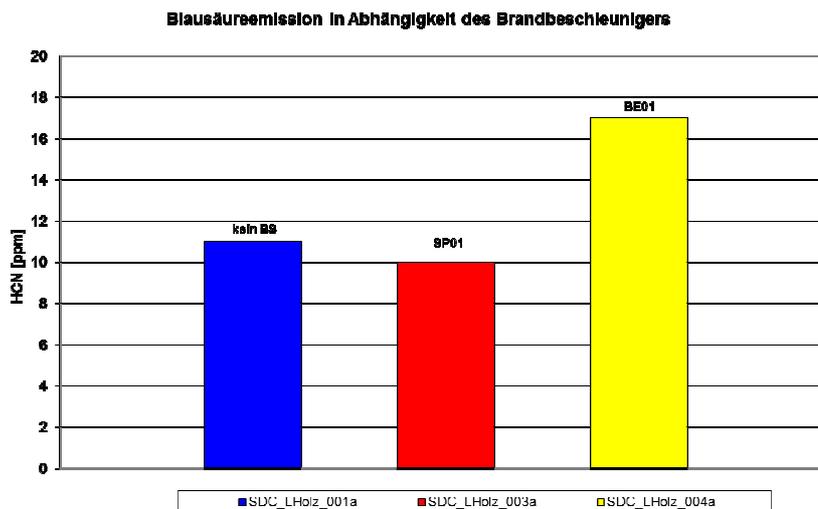


Abb.: B43

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Spanplatte
verwendeter Brandbeschleuniger:	Kein, Benzin (5ml, 10ml)
Versuchsparameter:	SDC_Span_012:600s,25kW/m ² ,mF
	SDC_Span_014:600s,50kW/m ² ,mF
	SDC_Span_031:600s,25kW/m ² ,oF,Be (5ml)
	SDC_Span_032:600s,25kW/m ² ,oF,Be (10ml)

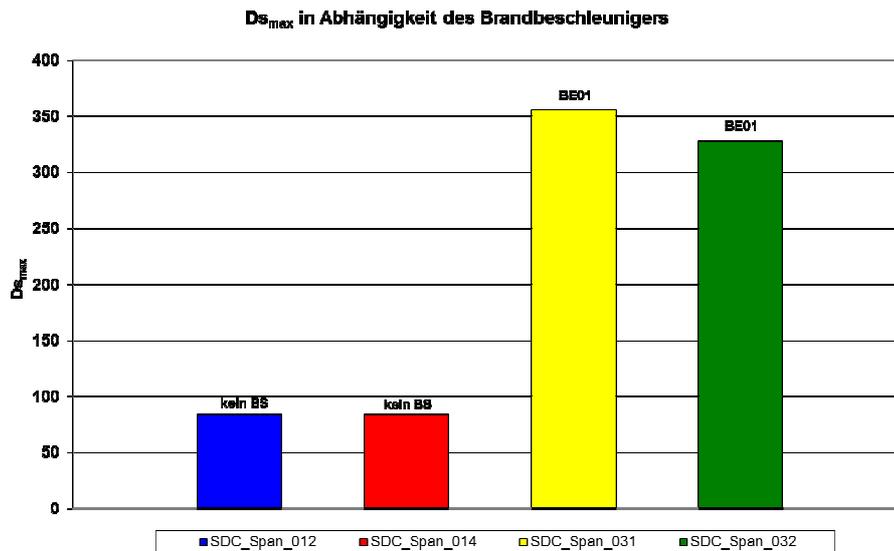


Abb.: B44

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Spanplatte
verwendeter Brandbeschleuniger:	Benzin (5ml, 10ml)
Versuchsparameter:	SDC_Span_031:600s,25kW/m ² ,oF,Be
	SDC_Span_032:600s,25kW/m ² ,oF,Be

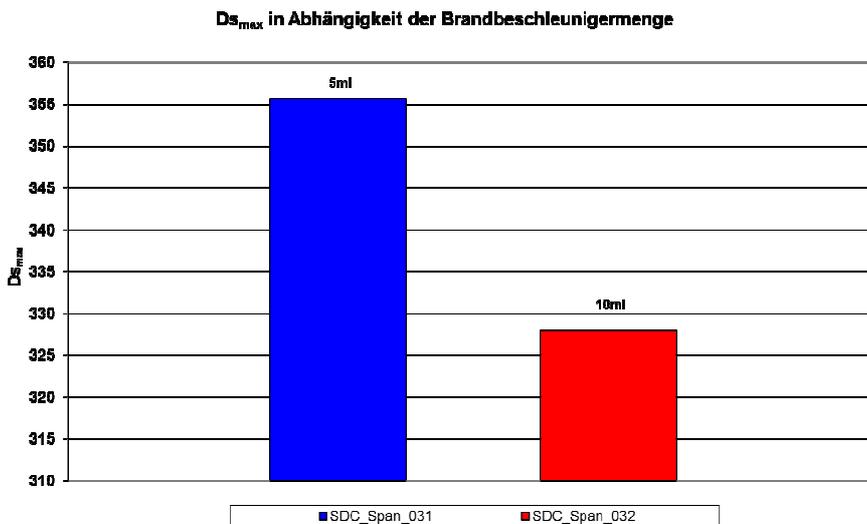


Abb.: B45

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte
 verwendeter Brandbeschleuniger: Kein, Benzin (5ml, 10ml)
 Versuchsparameter: SDC_Span_012:600s,25kW/m²,mF
 SDC_Span_014:600s,50kW/m²,mF
 SDC_Span_031:600s,25kW/m²,oF,Be (5ml)
 SDC_Span_032:600s,25kW/m²,oF,Be (10ml)

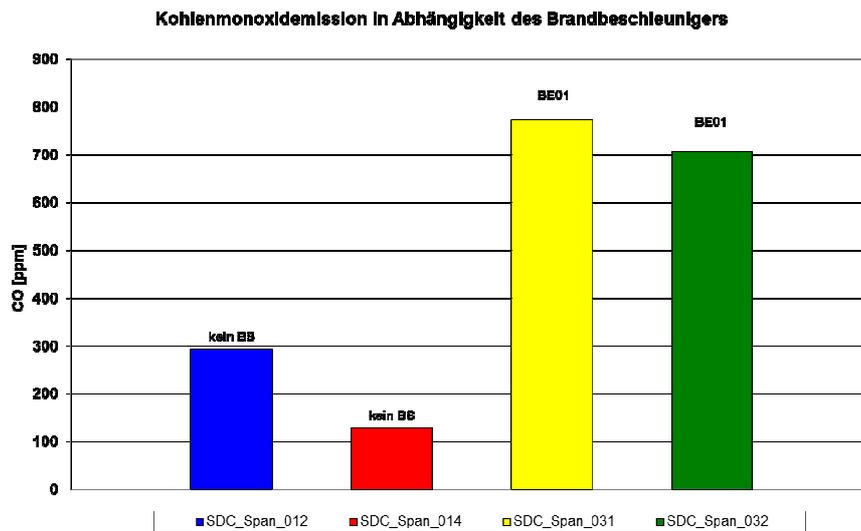


Abb.: B46

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte
 verwendeter Brandbeschleuniger: Benzin (5ml, 10ml)
 Versuchsparameter: SDC_Span_031:600s,25kW/m²,oF,Be
 SDC_Span_032:600s,25kW/m²,oF,Be

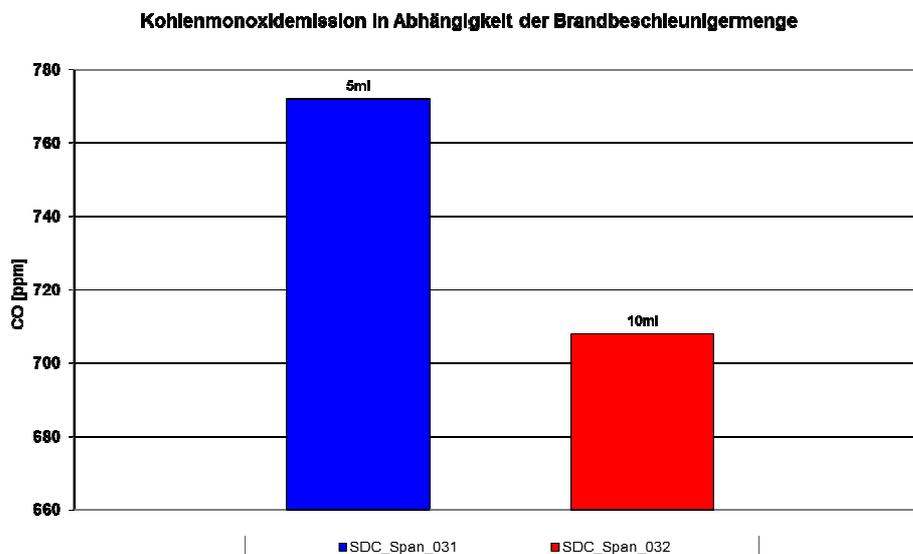


Abb.: B47

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Spanplatte
verwendeter Brandbeschleuniger:	Kein, Benzin (5ml, 10ml)
Versuchsparameter:	SDC_Span_012:600s,25kW/m ² ,mF SDC_Span_014:600s,50kW/m ² ,mF SDC_Span_031:600s,25kW/m ² ,oF,Be (5ml) SDC_Span_032:600s,25kW/m ² ,oF,Be (10ml)

Kohlendioxidemission In Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

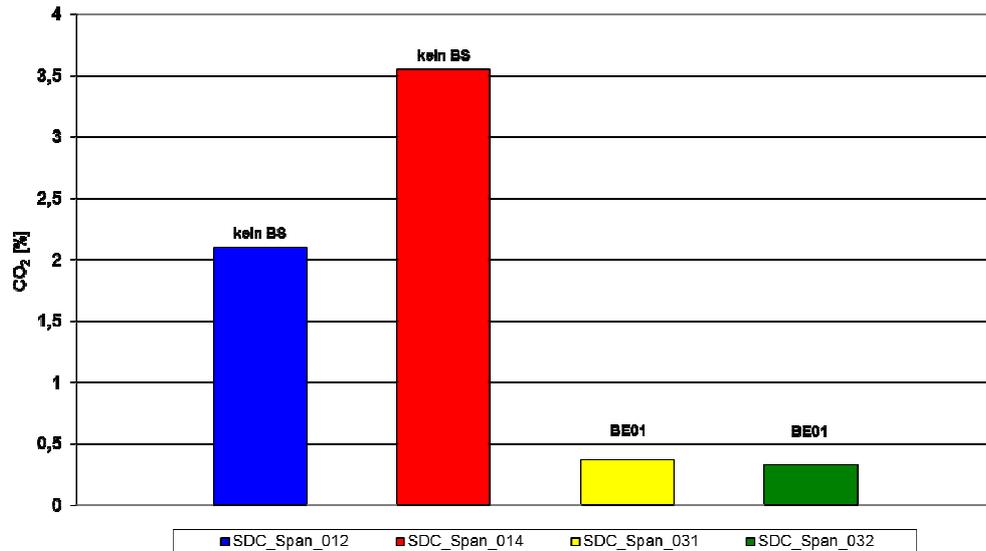


Abb.: B48

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Spanplatte
verwendeter Brandbeschleuniger:	Benzin (5ml, 10ml)
Versuchsparameter:	SDC_Span_031:600s,25kW/m ² ,oF,Be SDC_Span_032:600s,25kW/m ² ,oF,Be

Kohlendioxidemission In Abhängigkeit der Brandbeschleunigermenge

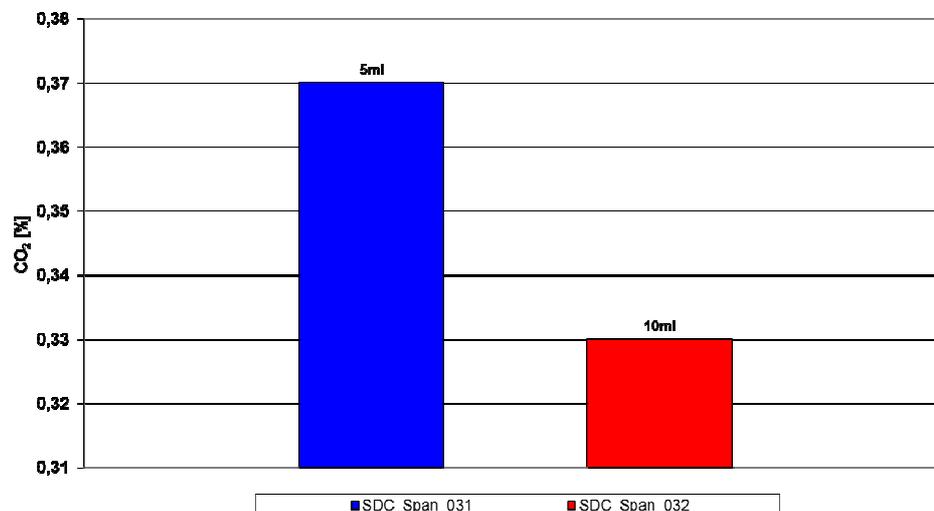


Abb.: B49

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Spanplatte
verwendeter Brandbeschleuniger:	Kein, Benzin (5ml, 10ml)
Versuchsparameter:	SDC_Span_012:600s,25kW/m ² ,mF SDC_Span_014:600s,50kW/m ² ,mF SDC_Span_031:600s,25kW/m ² ,oF,Be (5ml) SDC_Span_032:600s,25kW/m ² ,oF,Be (10ml)

Methanemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

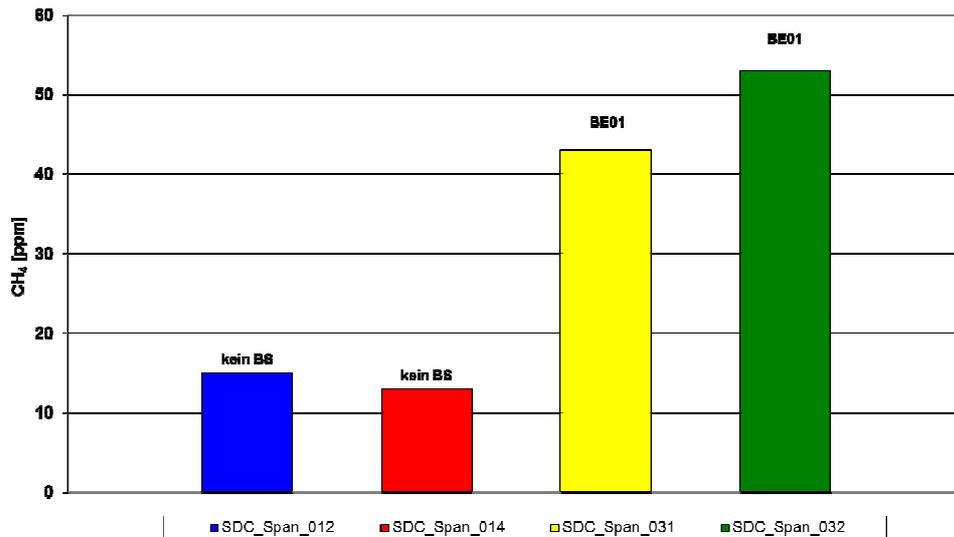


Abb.: B50

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Spanplatte
verwendeter Brandbeschleuniger:	Benzin (5ml, 10ml)
Versuchsparameter:	SDC_Span_031:600s,25kW/m ² ,oF,Be SDC_Span_032:600s,25kW/m ² ,oF,Be

Methanemission in Abhängigkeit der Brandbeschleunigermenge



Abb.: B51

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte
 verwendeter Brandbeschleuniger: Kein, Benzin (5ml, 10ml)
 Versuchsparameter: SDC_Span_012:600s,25kW/m²,mF
 SDC_Span_014:600s,50kW/m²,mF
 SDC_Span_031:600s,25kW/m²,oF,Be (5ml)
 SDC_Span_032:600s,25kW/m²,oF,Be (10ml)

Blausäureemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

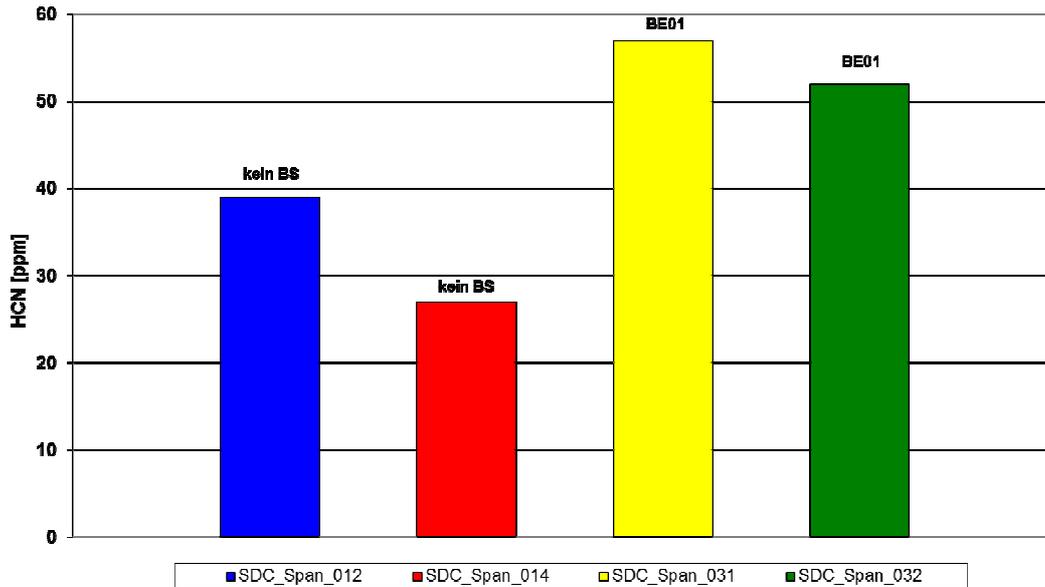


Abb.: B52

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte
 verwendeter Brandbeschleuniger: Benzin (5ml, 10ml)
 Versuchsparameter: SDC_Span_031:600s,25kW/m²,oF,Be
 SDC_Span_032:600s,25kW/m²,oF,Be

Formaldehydemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

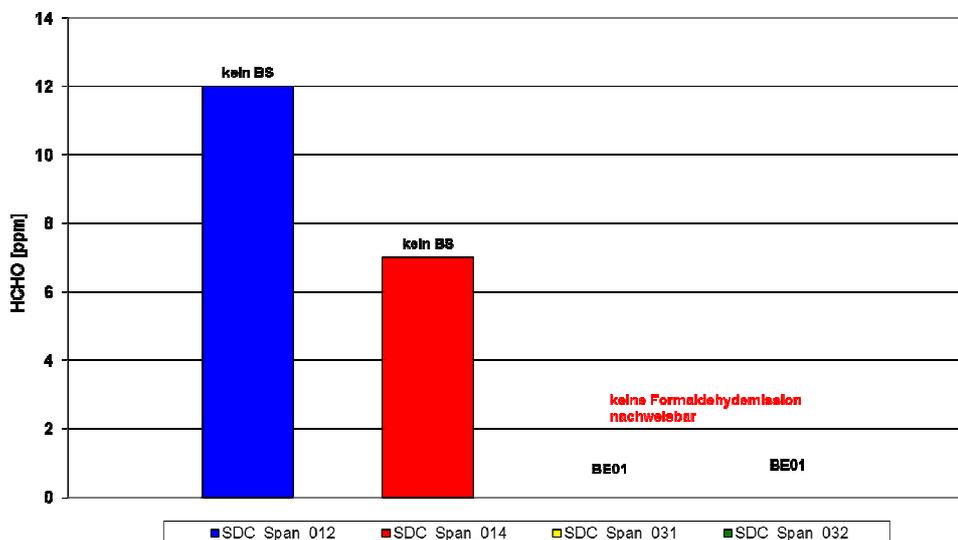


Abb.: B53

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte
 verwendeter Brandbeschleuniger: Kein, Benzin (5ml, 10ml)
 Versuchsparameter: SDC_Span_012:600s,25kW/m²,mF
 SDC_Span_014:600s,50kW/m²,mF
 SDC_Span_031:600s,25kW/m²,oF,Be (5ml)
 SDC_Span_032:600s,25kW/m²,oF,Be (10ml)

Blausäureemission in Abhängigkeit des Brandbeschleunigers

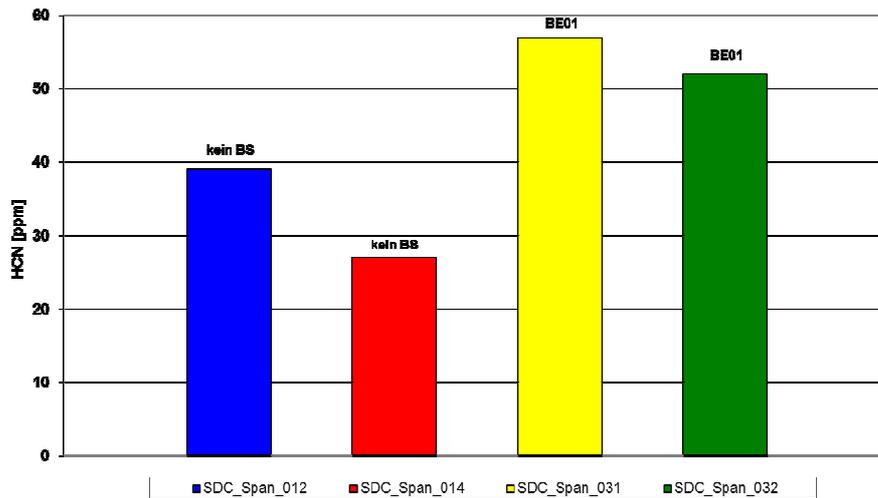


Abb.: B54

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte
 verwendeter Brandbeschleuniger: Benzin (5ml, 10ml)
 Versuchsparameter: SDC_Span_031:600s,25kW/m²,oF,Be
 SDC_Span_032:600s,25kW/m²,oF,Be

Blausäureemission in Abhängigkeit der Brandbeschleunigermenge

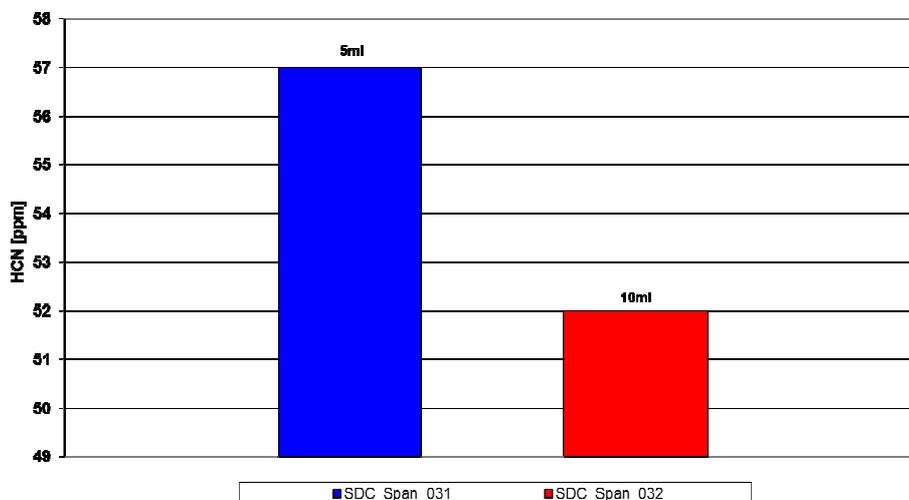


Abb.: B55

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte mit Dekor
 verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
 Versuchsparameter: SDC_SpanD_011:1200s, 50kW/m², oF
 SDC_SpanD_012:1200s, 50kW/m², oF
 SDC_SpanD_013:1200s, 50kW/m², mF
 SDC_SpanD_014:1200s, 50kW/m², mF

D_{s,max} In Abhängigkeit der Pilotflamme

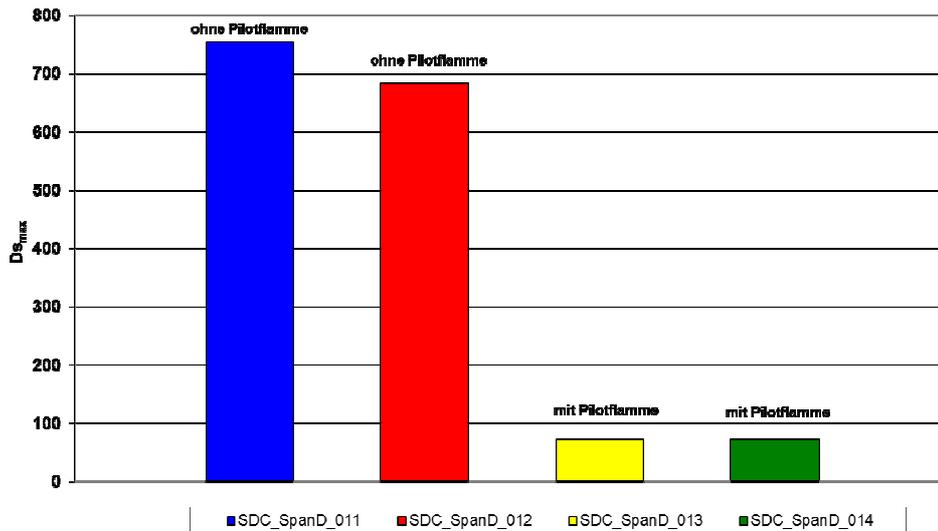


Abb.: B56

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
 Material: Spanplatte mit Dekor
 verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
 Versuchsparameter: SDC_SpanD_011:1200s, 50kW/m², oF
 SDC_SpanD_012:1200s, 50kW/m², oF
 SDC_SpanD_013:1200s, 50kW/m², mF
 SDC_SpanD_014:1200s, 50kW/m², mF

Kohlenmonoxidemission In Abhängigkeit der Pilotflamme

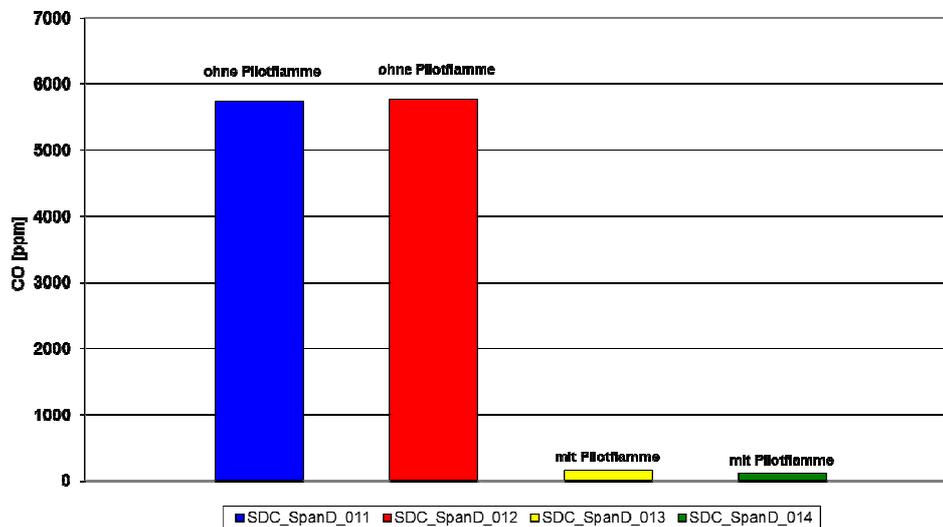


Abb.: B57

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Spanplatte mit Dekor
verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
Versuchsparameter: SDC_SpanD_011:1200s, 50kW/m², oF
SDC_SpanD_012:1200s, 50kW/m², oF
SDC_SpanD_013:1200s, 50kW/m², mF
SDC_SpanD_014:1200s, 50kW/m², mF

Kohlendioxidemission in Abhängigkeit der Pilotflamme

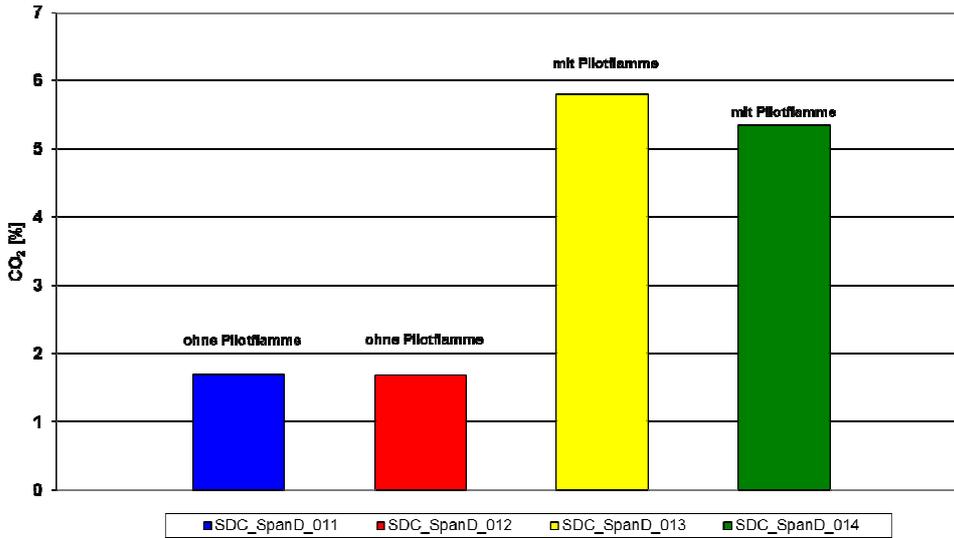


Abb.: B58

Versuchsapparatur: Smoke Density Chamber
Material: Spanplatte mit Dekor
verwendeter Brandbeschleuniger: Kein
Versuchsparameter: SDC_SpanD_011:1200s, 50kW/m², oF
SDC_SpanD_012:1200s, 50kW/m², oF
SDC_SpanD_013:1200s, 50kW/m², mF
SDC_SpanD_014:1200s, 50kW/m², mF

Formaldehydemission in Abhängigkeit der Pilotflamme

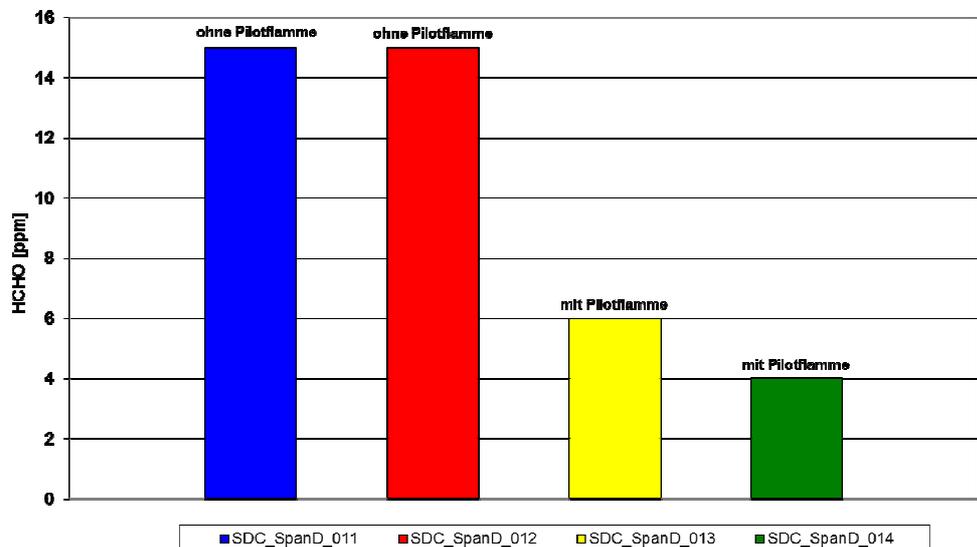
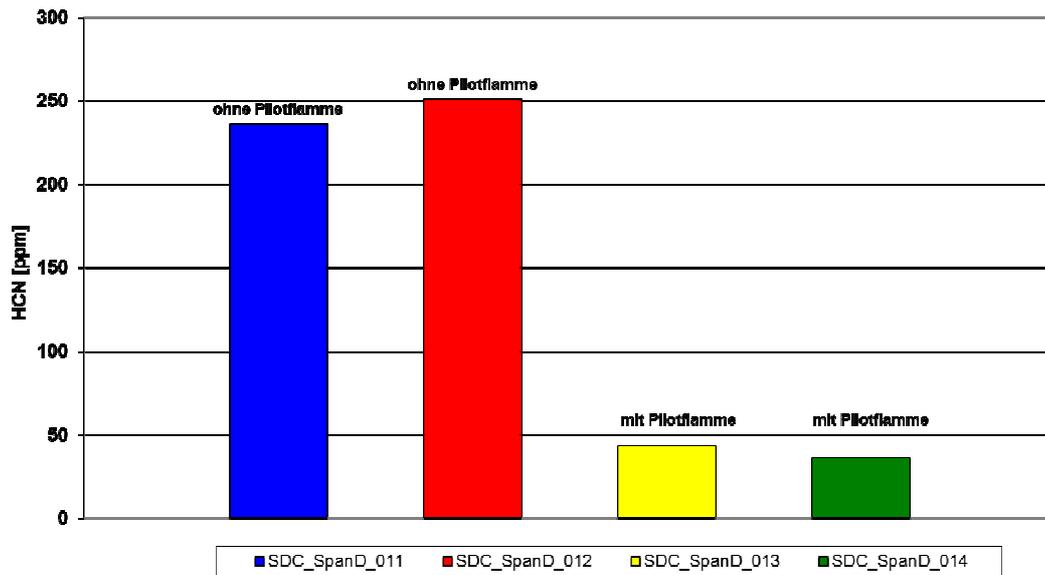


Abb.: B59

Versuchsapparatur:	Smoke Density Chamber
Material:	Spanplatte mit Dekor
verwendeter Brandbeschleuniger:	Kein
Versuchsparameter:	SDC_SpanD_011:1200s, 50kW/m ² , oF
	SDC_SpanD_012:1200s, 50kW/m ² , oF
	SDC_SpanD_013:1200s, 50kW/m ² , mF
	SDC_SpanD_014:1200s, 50kW/m ² , mF

Blausäureemission In Abhängigkeit der Pilotflamme

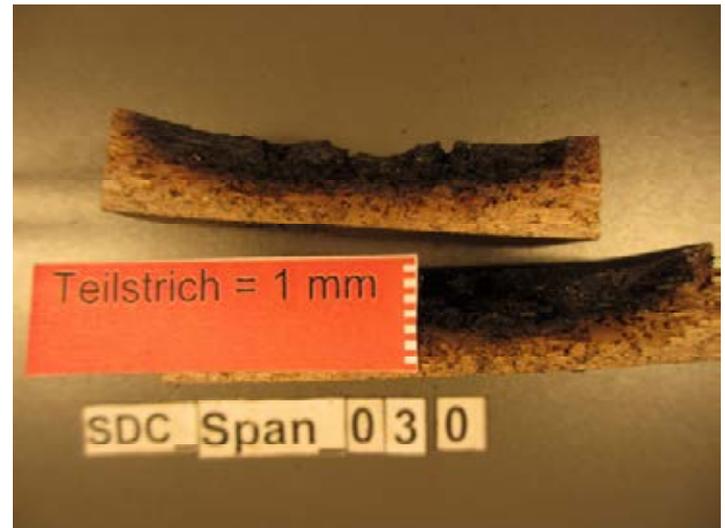


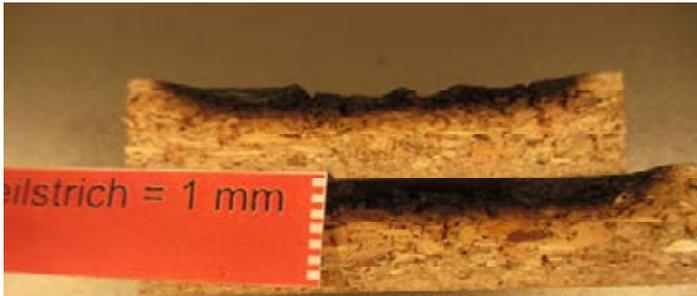
Anhang C

Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der
Einbrandtiefen von verschiedenen Materialien nach
Beanspruchung in der Rauchkammer

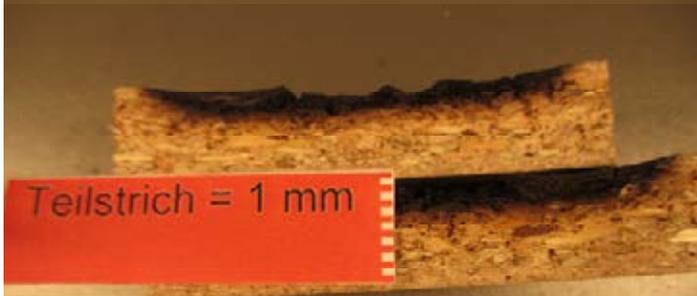
Anhang C: Einbrandtiefen in Spanproben nach Brandversuchen in der Smoke Density Chamber



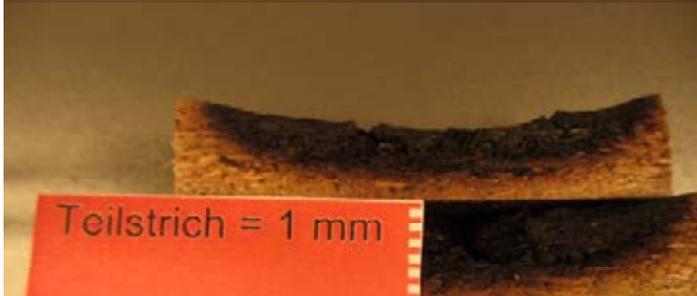




SDC Span 0 3 2



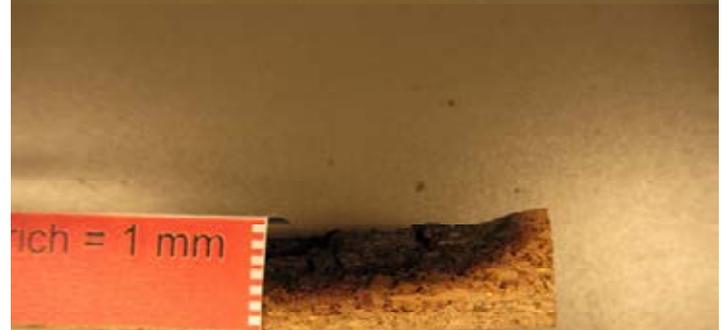
SDC Span 0 3 2



SDC Span 0 3 6



SDC Span 0 3 6

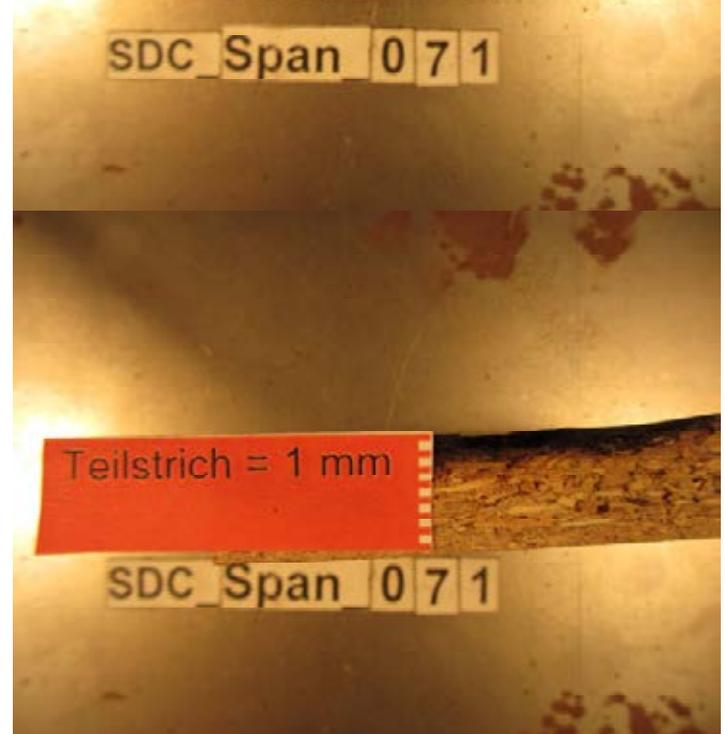


SDC Span 0 2 6



SDC Span 0 3 7

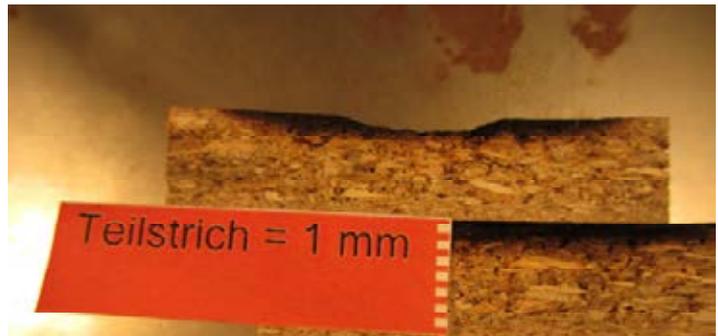






Teilstrich = 1 mm

SDC Span 0 7 3



Teilstrich = 1 mm

SDC Span 0 7 5



Teilstrich = 1 mm

SDC Span 0 7 3



Teilstrich = 1 mm



Teilstrich = 1 mm

SDC Span 0 7 5



Teilstrich = 1 mm

SDC Span 0 7 6



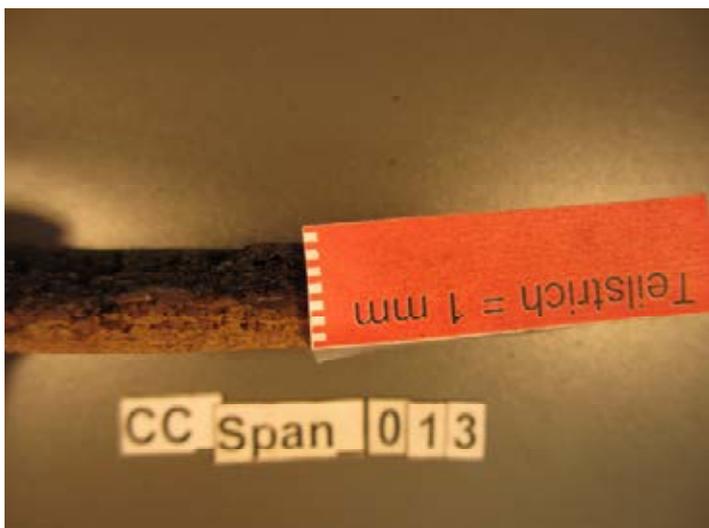
Anhang D

Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der
Einbrandtiefen von verschiedenen Materialien nach
Beanspruchung im Cone Calorimeter

Anhang D: Einbrandtiefen von verschiedenen Materialien nach Beanspruchung im Cone Calorimeter

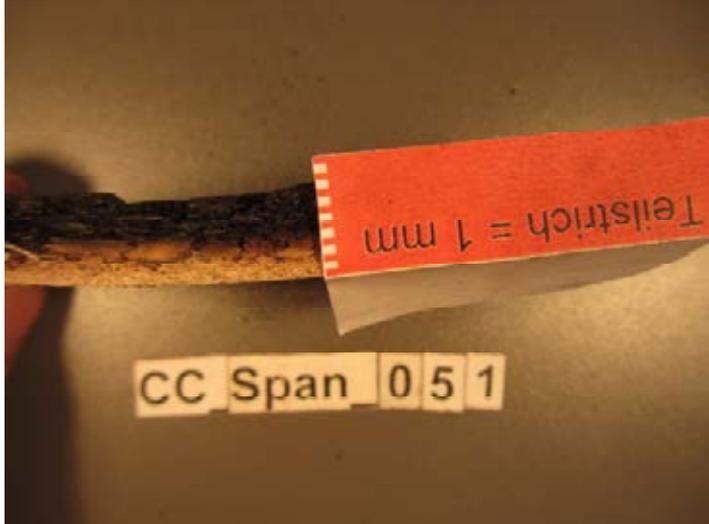
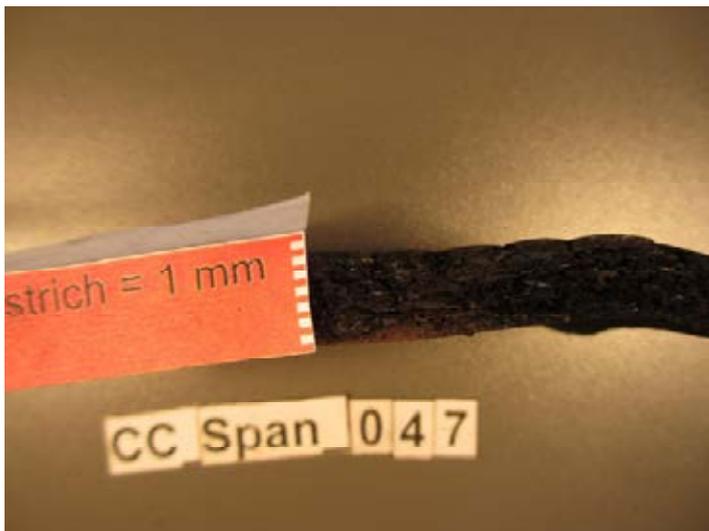




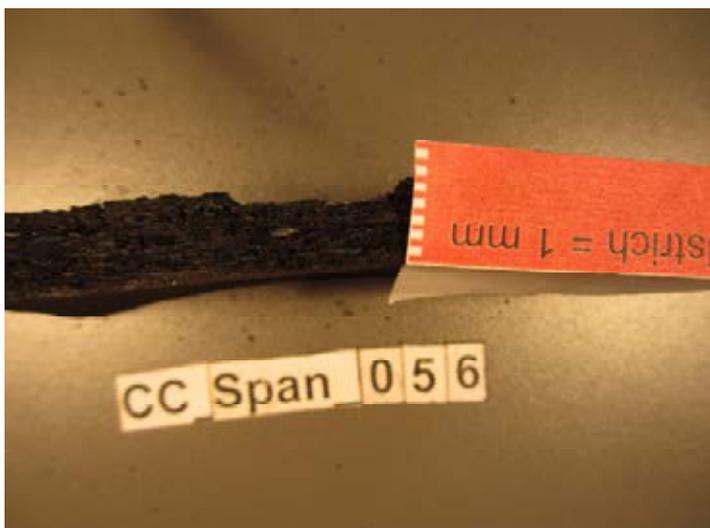


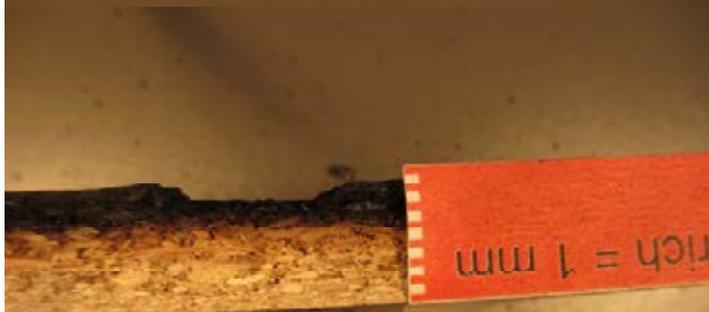


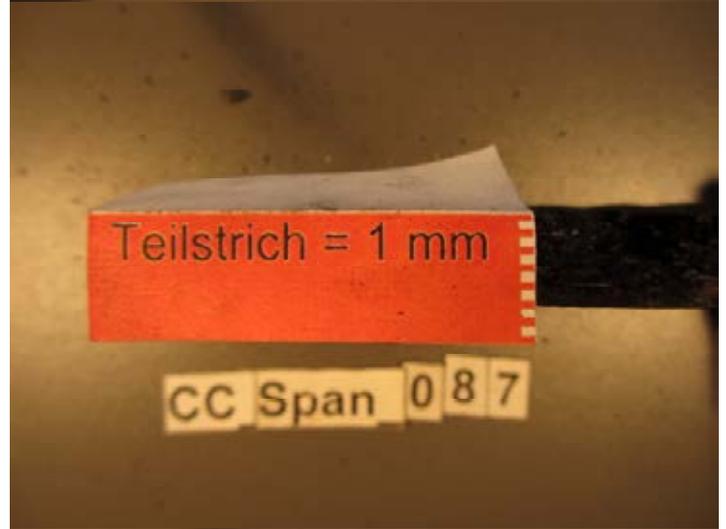




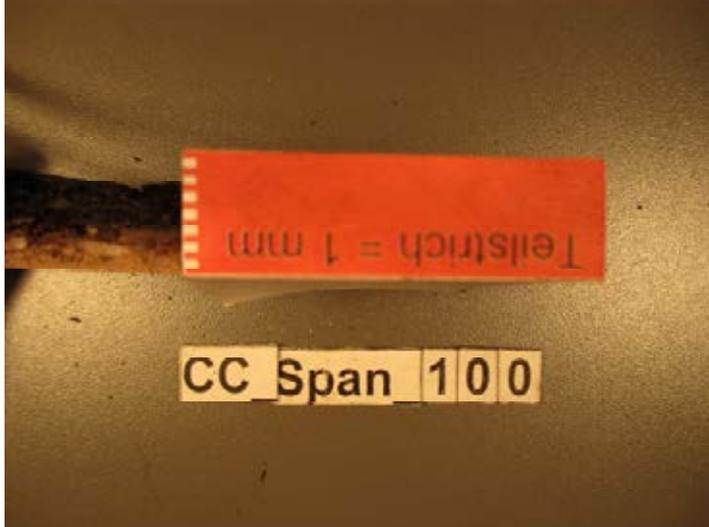
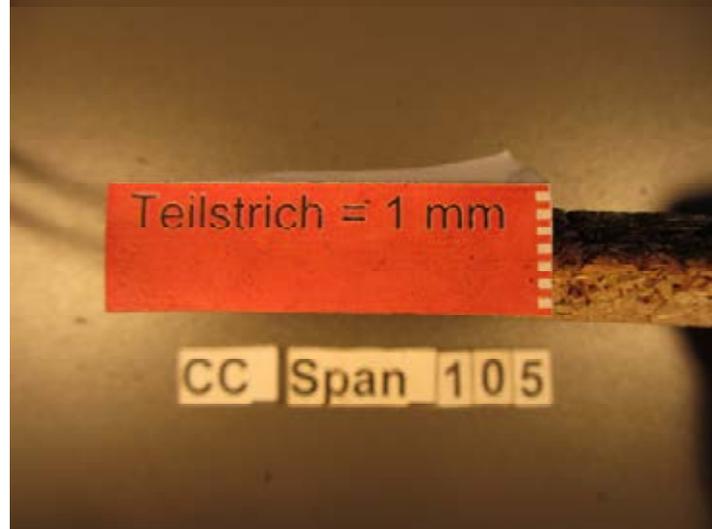
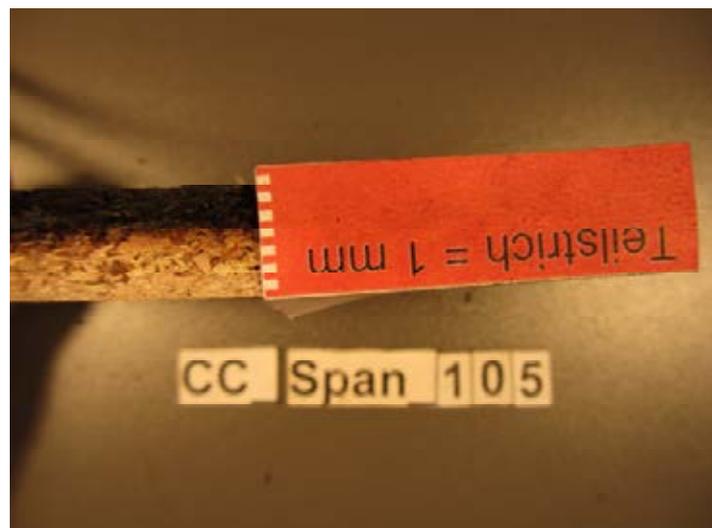




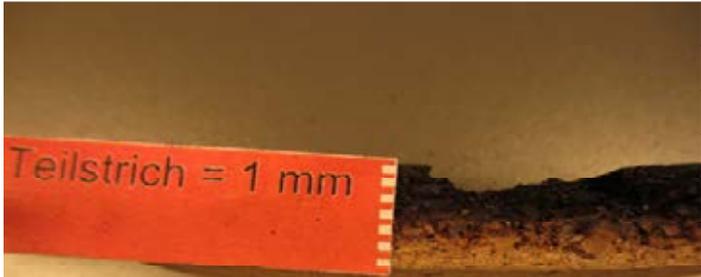












CC Span 1 1 0



CC Span 1 1 2



CC Span 1 1 1



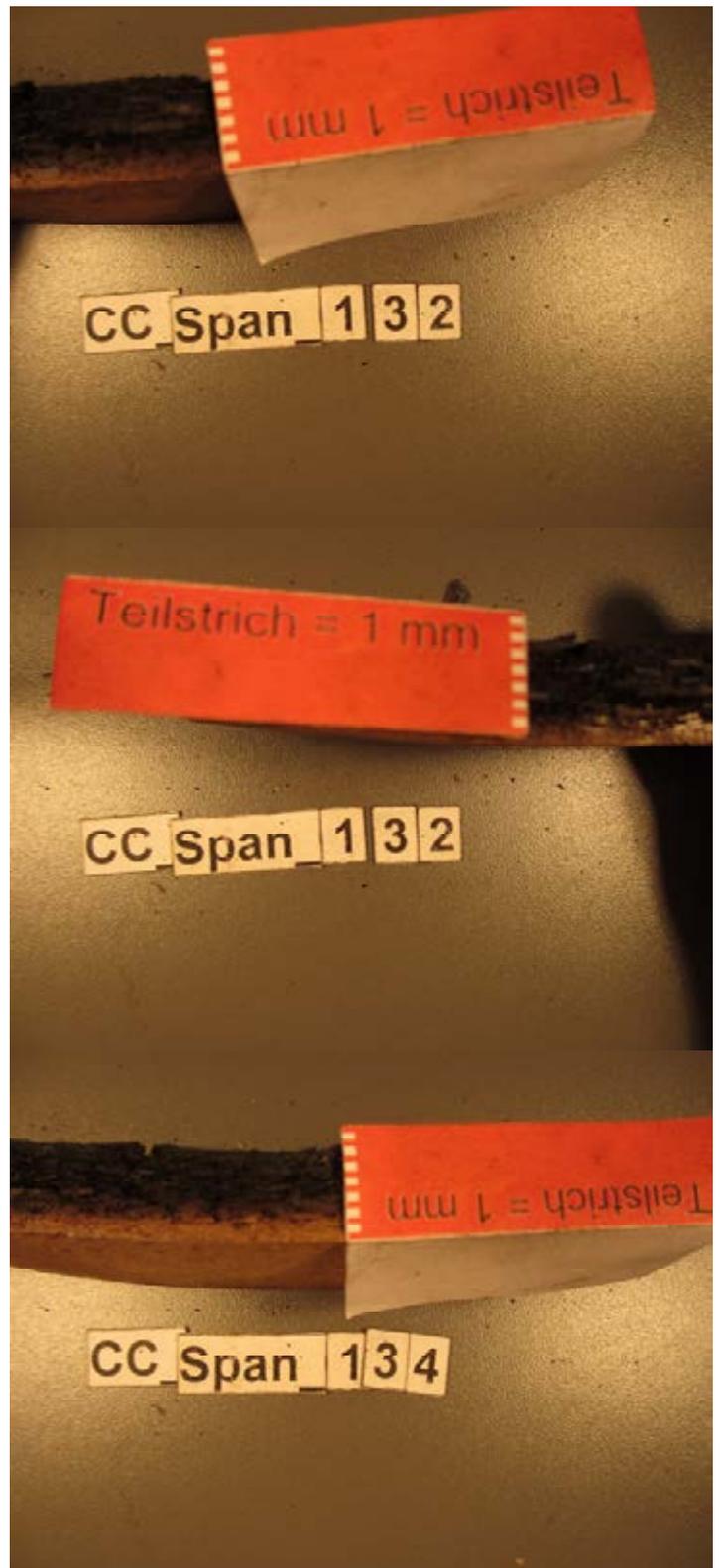
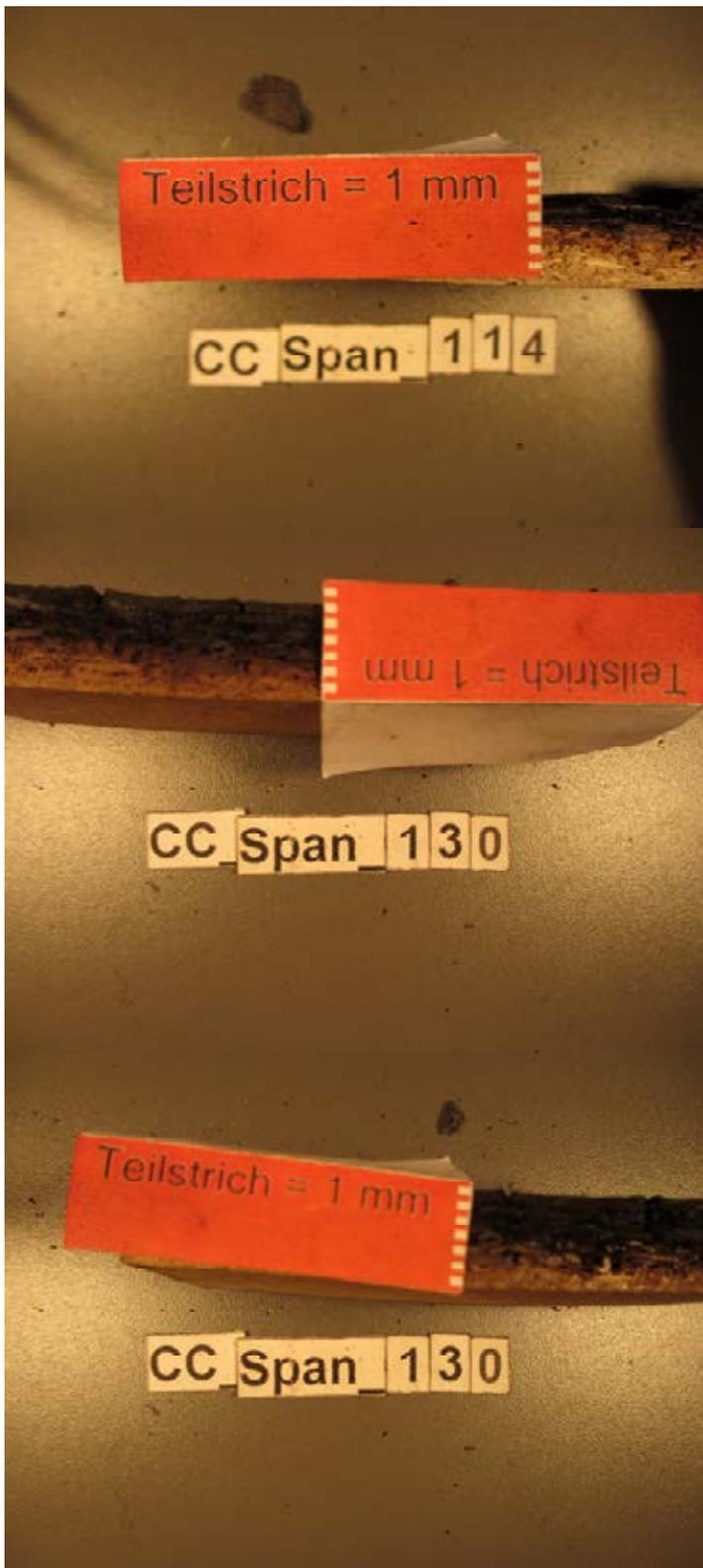
CC Span 1 1 2



CC Span 1 1 1

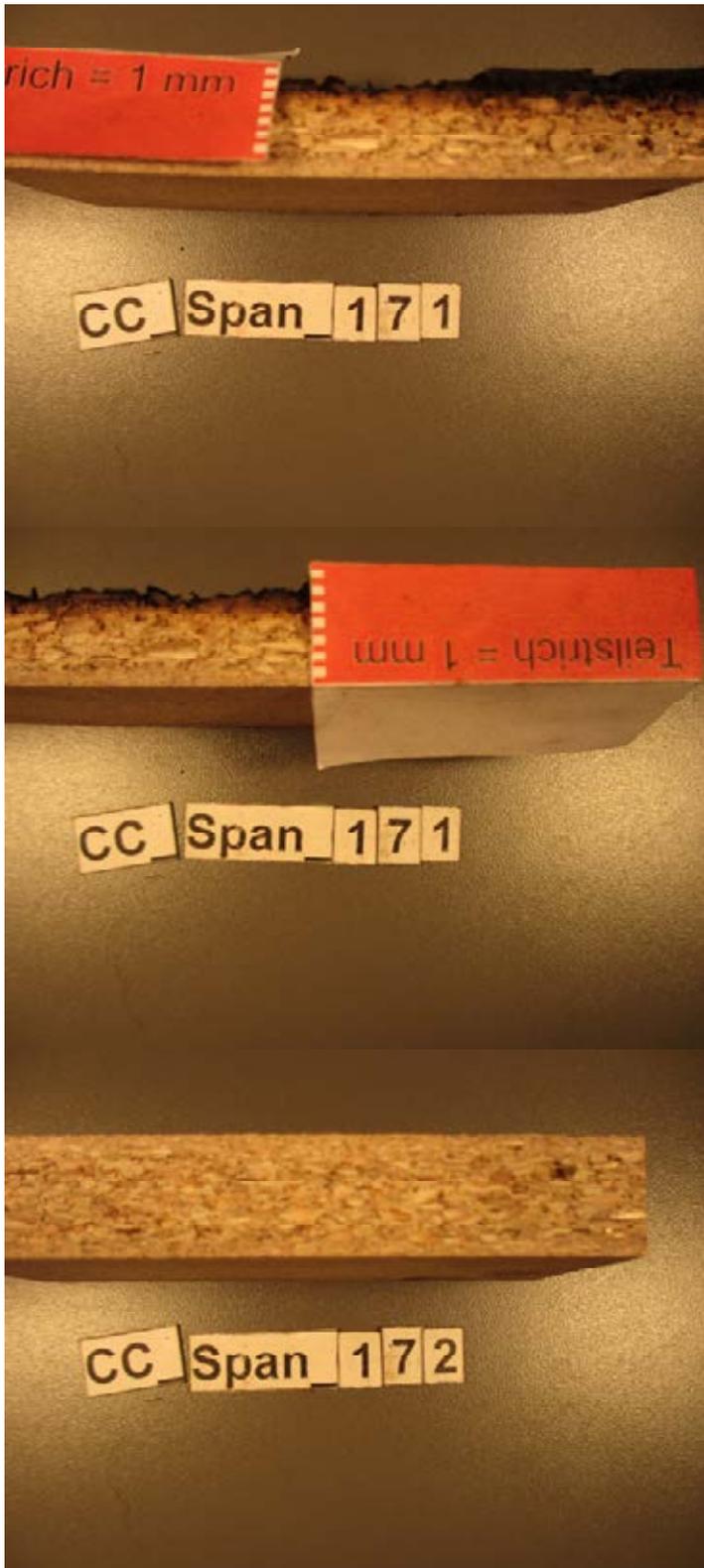


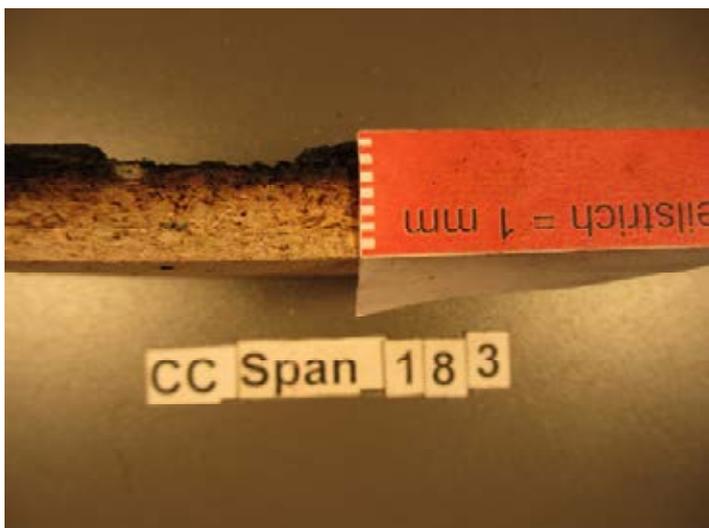
CC Span 1 1 4

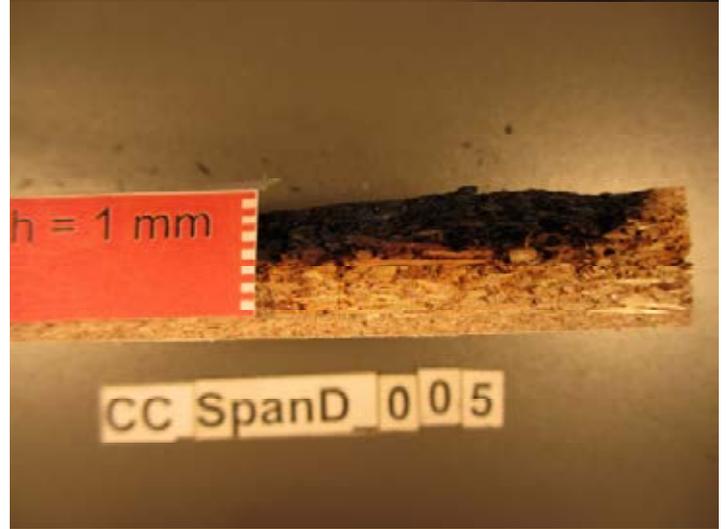




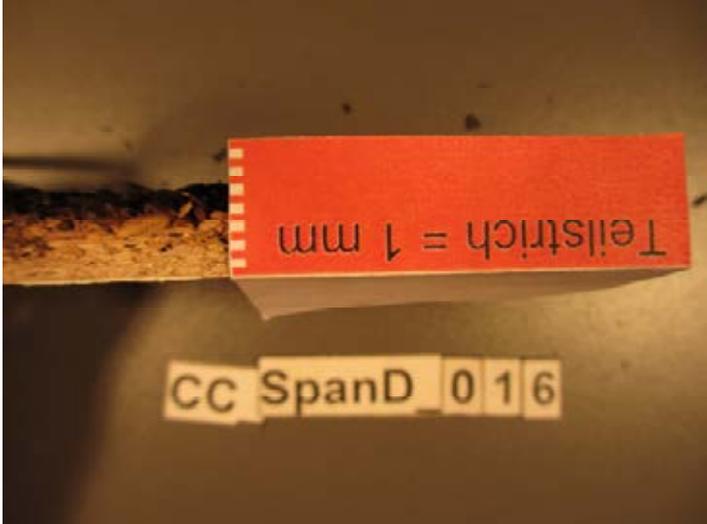


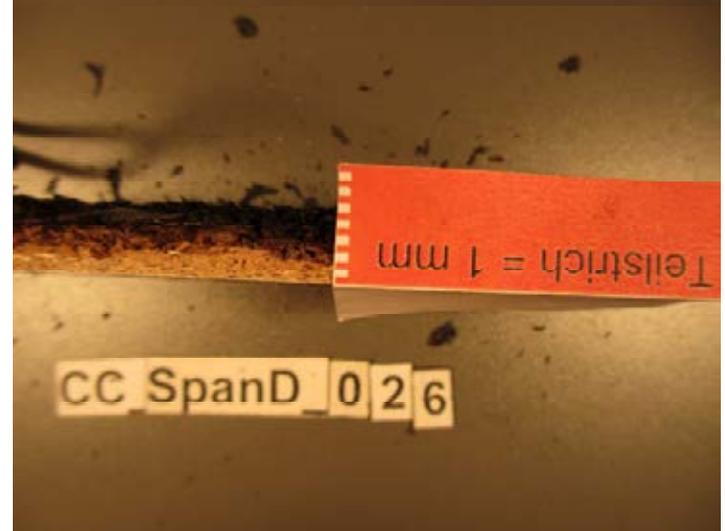


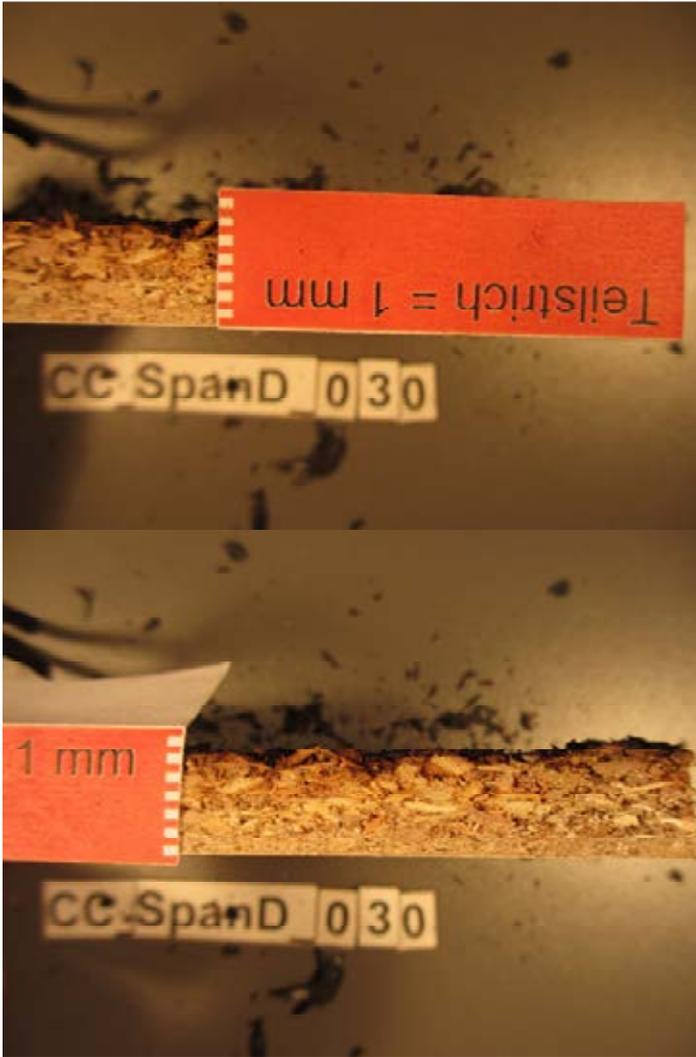












Einbrandtiefen nach Cone Calorimeter Versuchen von verschiedenen Materialien

Versuchscode	Charge	BS	Bestrahlungs- stärke (kW)	Versuchs- dauer (s)	O2-Konzentration (Vol%)	Durchgebrannt?	Restdicke (mm)	Einbrandtiefe (mm)
CC_Holz_003	Holz02		25	1200	21	ja		
CC_Holz_004	Holz02		25	600	15	-	0,66	6,79
CC_Holz_005	Holz02		25	1200	10	ja		
CC_Holz_006	Holz02		25	600	10	-	1,50	6,14
CC_Holz_007	Holz02		25	1200	15	ja		
CC_Holz_008	Holz02		50	600	21	ja		
CC_Holz_009	Holz02		50	1200	21	ja		
CC_Holz_010	Holz02		50	600	15	ja		
CC_Holz_011	Holz02		50	1200	15	ja		
CC_Holz_012	Holz02		50	600	10	ja		
CC_Holz_013	Holz02		50	1200	10	ja		
CC_Holz_014	Holz02		25	600	0	-	4,45	4,02
CC_Holz_015	Holz02		25	1200	0	ja		
CC_Holz_016	Holz02		50	1200	0	ja		
CC_Holz_017	Holz02		50	600	0	ja		
CC_Holz_018	Holz02	BE02 DI01	25	300	21	-	2,50	5,43
CC_Holz_019	Holz02	BE02 DI01	25	600	21	ja		
CC_Holz_020	Holz02	BE02	25	300	21	-	6,64	1,96
CC_Holz_021	Holz02	BE02	25	600	21	ja		
CC_Holz_024	Holz02		25	1200	21	ja		
CC_Holz_025	Holz02		25	600	21	ja		
CC_Holz_026	Holz02		25	600	15	ja		
CC_Holz_027	Holz02		25	1200	15	ja		
CC_Holz_028	Holz02		25	1200	10	ja		
CC_Holz_029	Holz02			600	10	-	3,65	3,34
CC_Holz_031	Holz02		25	1200	21	ja		
CC_Span_006	Span02		50	600	21	-	1,00	10,34
CC_Span_007	Span02		50	1200	21	ja		
CC_Span_008	Span02		50	600	15	-	5,84	7,10
CC_Span_009	Span02		50	1200	21	ja		
CC_Span_010	Span02		50	600	15	-	6,28	5,87
CC_Span_011	Span02		50	1200	15	ja		
CC_Span_012	Span02		50	1200	15	ja		
CC_Span_013	Span02		50	600	10	-	6,89	5,65
CC_Span_014	Span02		50	600	10	-	7,33	5,38
CC_Span_015	Span02		50	1200	10	ja		
CC_Span_016	Span02		50	1200	10	ja		
CC_Span_019	Span02		25	1200	21	ja		
CC_Span_021	Span02		25	600	15	-	9,58	4,82
CC_Span_022	Span02		25	600	15	-	10,64	3,74
CC_Span_023	Span02		25	600	10	-	10,84	3,60
CC_Span_024	Span02		25	1200	15	ja		
CC_Span_025	Span02		25	1200	15	ja		
CC_Span_026	Span02		25	600	10	-	10,44	4,31
CC_Span_027	Span02		25	1200	10	-	5,50	7,08
CC_Span_028	Span02		25	1200	10	-	3,33	9,19
CC_Span_033	Span02	SPO2	25	300	21	-	10,33	3,78
CC_Span_036	Span02		50	600	10	-	6,58	5,88
CC_Span_037	Span02		50	1200	10	ja		
CC_Span_038	Span02		50	1200	10	ja		
CC_Span_039	Span02		50	600	10	-	6,24	6,34
CC_Span_040	Span02		50	1200	15	ja		
CC_Span_041	Span02		50	1200	15	ja		
CC_Span_042	Span02		50	1200	21	ja		
CC_Span_043	Span02		50	600	15	-	6,09	6,40
CC_Span_044	Span02		50	600	15	-	6,25	6,13
CC_Span_045	Span02		50	1200	21	ja		
CC_Span_046	Span02		50	600	21	-	3,26	8,36
CC_Span_047	Span02		50	600	21	-	2,89	8,28
CC_Span_048	Span02		50	1200	21	ja		
CC_Span_049	Span02		50	1200	10	ja		
CC_Span_050	Span02		50	1200	15	ja		
CC_Span_051	Span02		50	600	15	-	4,76	7,01
CC_Span_052	Span02		25	1200	10	-	4,98	7,43
CC_Span_053	Span02		25	1200	10	-	3,61	8,59
CC_Span_054	Span02		25	600	10	-	9,39	5,04

Einbrandtiefen nach Cone Calorimeter Versuchen von verschiedenen Materialien

Versuchscode	Charge	BS	Bestrahlungsstärke (kW)	Versuchsdauer (s)	O2-Konzentration (Vol%)	Durchgebrannt?	Restdicke (mm)	Einbrandtiefe (mm)
CC_Span_055	Span02		25	600	10	-	9,65	4,47
CC_Span_056	Span02		25	1200	15	-	2,22	9,32
CC_Span_057	Span02		25	1200	15	-	2,54	9,25
CC_Span_058	Span02		25	600	15	-	9,24	4,67
CC_Span_059	Span02		25	600	15	-	10,07	4,14
CC_Span_061	Span02		25	1200	21	ja		
CC_Span_062	Span02		25	1200	21	ja		
CC_Span_064	Span02		25	600	10	-	9,72	4,40
CC_Span_065	Span02		25	1200	10	-	3,77	8,45
CC_Span_066	Span02		25	1200	15	ja		
CC_Span_067	Span02		25	600	10	-	9,43	1,70
CC_Span_077	Span02		75	600	21	ja		
CC_Span_078	Span02		75	600	21	ja		
CC_Span_079	Span02		75	1200	21	ja		
CC_Span_080	Span02		75	1200	21	ja		
CC_Span_081	Span02		75	600	15	ja		
CC_Span_082	Span02		75	1200	15	ja		
CC_Span_083	Span02		75	600	15	ja		
CC_Span_084	Span02		75	1200	15	ja		
CC_Span_085	Span02		50	1200	18	ja		
CC_Span_086	Span02		50	1200	18	ja		
CC_Span_087	Span02		50	600	18	-	4,48	6,80
CC_Span_088	Span02		50	600	18	-	3,61	7,83
CC_Span_089	Span02		75	600	21	ja		
CC_Span_090	Span02		75	600	21	ja		
CC_Span_091	Span02		75	1200	21	ja		
CC_Span_092	Span02		75	1200	21	ja		
CC_Span_093	Span02		75	1200	0	ja		
CC_Span_094	Span02	DI01	25	300	21	-	11,32	3,62
CC_Span_095	Span02	DI01	25	300	21	-	11,16	3,04
CC_Span_099	Span02	SP02	50	300	21	-	9,72	2,20
CC_Span_100	Span02	SP02	50	600	21	-	5,22	6,99
CC_Span_101	Span02	SP02	50	900	21	ja		
CC_Span_105	Span02		25	600	21	-	7,82	5,12
CC_Span_106	Span02		25	600	0	-	10,40	3,93
CC_Span_107	Span02		25	1200	0	-	5,68	7,64
CC_Span_109	Span02		25	600	0	-	9,79	4,62
CC_Span_110	Span02		25	1200	0	-	5,92	7,23
CC_Span_111	Span02		50	600	0	-	6,81	5,99
CC_Span_112	Span02		50	600	0	-	7,20	5,62
CC_Span_113	Span02		50	1200	0	ja		
CC_Span_114	Span02		50	600	0	-	6,43	6,42
CC_Span_115	Span02		50	1200	0	ja		
CC_Span_130	Span02		25	1200	10	-	4,92	8,02
CC_Span_131	Span02		25	1200	21	ja		
CC_Span_132	Span02		25	1200	15	-	3,92	8,15
CC_Span_133	Span02		25	1200	21	ja		
CC_Span_134	Span02		25	1200	10	-	4,48	8,38
CC_Span_135	Span02		50	1200	21	ja		
CC_Span_136	Span02		50	1200	15	ja		
CC_Span_137	Span02		50	1200	10	ja		
CC_Span_138	Span02		50	600	10	-	6,37	6,15
CC_Span_139	Span02		50	600	15,3	-	6,42	6,01
CC_Span_150	Span02		75	894	0	ja		
CC_Span_152	Span02		50	1143	0	ja		
CC_Span_153	Span02		75	961	0	ja		
CC_Span_157	Span02		50	1128	15	ja		
CC_Span_158	Span02		75	802	21	ja		
CC_Span_159	Span02		75	863	15	ja		
CC_Span_160	Span02	BE02	25	310	15	-	11,86	2,90
CC_Span_161	Span02	BE02	25	881	18	ja		
CC_Span_167	Span02	BE02	15	514	18	-	11,03	3,89
CC_Span_168	Span02	BE02	15	610	18	-	9,93	4,34
CC_Span_170	Span02	BE02	15	598	21	-	9,10	4,96
CC_Span_171	Span02	BE02	15	589	18	-	10,50	3,77
CC_Span_172	Span02	BE02	0	151	21	-	16,00	0,00
CC_Span_173	Span02	BE02	0	266	21	-	16,00	0,00
CC_Span_083	SPan02	BE02	25	838	0	-	10,24	3,83
CC_Span_186	Span02	BE02	0	344	21	-	16,00	0,00
CC_Span_189	Span02		50	1139	0	ja		
CC_Span_200	Span02		50	1160	21	ja		
CC_Span_217	Span02		50	976	21	ja		

Einbrandtiefen nach Cone Calorimeter Versuchen von verschiedenen Materialien

Versuchscode	Charge	BS	Bestrahlungs- stärke (kW)	Versuchs- dauer (s)	O2-Konzentration (Vol%)	Durchgebrannt?	Restdicke (mm)	Einbrandtiefe (mm)
CC_Span_224	Span02		75	887	21	ja		
CC_Span_225	Span02		75	876	0	ja		
CC_Span_226	Span02		75	980	18	ja		
CC_SpanD_001	SpanD02		25	600	21	-	8,94	3,40
CC_SpanD_002	SpanD02		25	600	15	-	9,84	1,61
CC_SpanD_003	SpanD02		25	1200	21	-	2,71	6,50
CC_SpanD_004	SpanD02		25	1200	15	-	4,64	5,63
CC_SpanD_005	SpanD02		25	600	10	-	10,20	5,90
CC_SpanD_006	SpanD02		25	1200	10	-	7,60	8,15
CC_SpanD_007	SpanD02		50	600	21	-	4,97	9,29
CC_SpanD_008	SpanD02		50	600	15	-	4,24	6,98
CC_SpanD_009	SpanD02		50	1200	21	ja		
CC_SpanD_010	SpanD02		50	1200	15	ja		
CC_SpanD_011	SpanD02		50	1200	10	ja		
CC_SpanD_012	SpanD02		50	600	10	-	5,08	5,78
CC_SpanD_013	SpanD02		25	1200	0	-	4,65	5,97
CC_SpanD_014	SpanD02		25	600	0	-	9,94	4,63
CC_SpanD_016	SpanD02		50	600	0	-	7,34	3,88
CC_SpanD_017	SpanD02		50	1200	0	ja		
CC_SpanD_021	SpanD02		25	600	21	-	11,50	3,79
CC_SpanD_022	SpanD02		25	1200	21	-	2,00	6,75
CC_SpanD_023	SpanD02		25	1200	15	-	4,34	5,95
CC_SpanD_024	SpanD02		25	600	15	-	9,76	3,89
CC_SpanD_025	SpanD02		25	600	10	-	9,92	5,46
CC_SpanD_026	SpanD02		25	1200	10	-	5,86	4,58
CC_SpanD_029	SpanD02		75	1139	0	ja		
CC_SpanD_035	SpanD02		50	1176	0	-	11,13	1,15

Anhang E

Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich des
Nachweises von Brandbeschleunigern nach den
Raumbrandversuchen 001 bis 004

Abb.E1

Versuchapparatur: Raumbrand

Material:verschiedene

verwendeter Brandbeschleuniger: Benzin/Diesel Gemisch

Probe	Nachweisstatus	Probenmaterial	Versuchsdauer (s)	O2-Konzentration	Extraktionsart	Aufarbeitung	Messverfahren	Split	Inkubation
MFPA_Zimmer_001_K02_01	BS nicht nachgewiesen	Kondensat (fl) aus Waschflasche FTIR	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_K02_02	BS nicht nachgewiesen	Kondensat aus Waschflasche FTIR Schlot	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P06_01	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P06_02	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P06_03	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_01	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_02	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_04	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_05	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_06	BS nicht nachgewiesen	Wischprobe von Metall, Gestelle Stuhl/Tisch, weißlicher Ruß	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_07	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_08	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Metall (Raummitte)	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_09	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P07_10	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Tischbein (weißlicher Ruß)	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P09_01	BS nicht nachgewiesen	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Öffnung	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P09_02	BS nicht nachgewiesen	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Schlot	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_P10_02	BS nicht nachgewiesen	Glasfaser Filter , abgefilterter Ruß/Partikel von FTIR Raum	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_R02_01	BS nicht nachgewiesen	Dämmmaterial, Zwischen Tapetenelement2 und Steinwand	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_R02_02	BS Analyten vorhanden	Tapetenelement	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_R02_03	BS nicht nachgewiesen	Tapetenelement	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_R02_04	BS Analyten vorhanden	Tapetenelement	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_R02_05	BS nicht nachgewiesen	Draht	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_R02_06	BS nicht nachgewiesen	Papier	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_001_R02_07	BS nicht nachgewiesen	Teppich "cars"	720	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_K03_01	BS Analyten vorhanden	Kondensat aus Teflonschlauch, Zuleitung FTIR Öffnung	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_P06_01	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_P06_02	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min

MFPA_Zimmer_002_P07_01	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_P07_02	BS Analyten vorhanden	Rußabwischung von Plattenthermoelement	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_P09_01	BS Analyten vorhanden	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Öffnung	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_P09_02	BS Analyten vorhanden	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Schlot	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_P10_02	BS nicht nachgewiesen	Glasfaser Filter , abgefilterter Ruß/Partikel von FTIR Raum	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_01	BS nicht nachgewiesen	Katalogreste	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_02	BS nicht nachgewiesen	Teppich "cars"	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_03	BS nicht nachgewiesen	Teppich "cars"	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_04	BS nicht nachgewiesen	Teppich "cars"	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_05	BS nachgewiesen	Spanplatte/Sitzpolster	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_06	BS Analyten vorhanden	Tapetenelement	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_07	BS Analyten vorhanden	Tischdecke	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_08	BS Analyten vorhanden	Tapetenelement	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_09	BS nicht nachgewiesen	Teppich "cars"	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_10	BS nachgewiesen	Kataloge	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_11	BS nachgewiesen	Kataloge	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_12	BS nachgewiesen	Kataloge	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_002_R02_13	BS nachgewiesen	Kataloge	1200	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_K03_01	BS Analyten vorhanden	Kondensat aus Teflonschlauch, Zuleitung FTIR Öffnung	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_K04_01	BS Analyten vorhanden	Kondensat aus Filterkartusche zwischen FTIR/ O ₂ Analysator Brandraum	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P06_01	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P06_02	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P06_03	BS Analyten vorhanden	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P07_01	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P07_02	BS Analyten vorhanden	Rußabwischung von Steinwand	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P07_03	BS nicht nachgewiesen	Wischprobe von Metall, Gestelle Stuhl/Tisch, weißlicher Ruß	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P07_04	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P07_05	BS nicht nachgewiesen	Wischprobe von Metall, Raummitte	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P09_01	BS nicht nachgewiesen	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Öffnung	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P09_02	BS Analyten vorhanden	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Schlot	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P09_03	BS Analyten vorhanden	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Öffnung (Langzeitmessung)	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_P10_02	BS nicht nachgewiesen	abgefilterter Ruß/Partikel aus Filter FTIR Raum	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min

MFPA_Zimmer_003_R02_02	BS Analyten vorhanden	PA	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_003_R02_03	BS nicht nachgewiesen	Teppich "grau"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_K03_01	BS Analyten vorhanden	Kondensat (fl) aus Teflonschlauch, Zuleitung FTIR Öffnung	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_K04_01	BS Analyten vorhanden	Kondensat aus Filterkartusche zwischen FTIR/ O ₂ Analysator Brandraum	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P06_01	BS Analyten vorhanden	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P06_02	BS Analyten vorhanden	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P06_03	BS nicht nachgewiesen	Filterpapier (Glasfaser) aus Schornstein(Schlot)	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P07_01	BS nachgewiesen	Rußabwischung von Tapetenelement	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P07_02	BS Analyten vorhanden	Rußabwischung von Tapeten, Aluprofil, Steinwand	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P07_03	BS nicht nachgewiesen	Wischprobe von Metall, Gestelle Stuhl/Tisch, weißlicher Ruß	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P07_04	BS nicht nachgewiesen	Rußabwischung von Steinwand	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P07_05	BS nicht nachgewiesen	Wischprobe von Metall, Raummitte	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P09_01	BS nicht nachgewiesen	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Öffnung	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P09_02	BS Analyten vorhanden	Ruß/Partikel aus Waschflasche, Zuleitung FTIR Schlot	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_P10_02	BS nicht nachgewiesen	abgefilterter Ruß/Partikel aus Filter FTIR Raum	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_01	BS Analyten vorhanden	Teppich "grau"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_02	BS Analyten vorhanden	Teppich "grau"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_03	BS Analyten vorhanden	Teppich "grau"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_04	BS Analyten vorhanden	Teppich "grau"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_05	BS Analyten vorhanden	Teppich "cars"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_06	BS nicht nachgewiesen	Teppich "cars"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_07	BS nicht nachgewiesen	Teppich "cars"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_08	BS Analyten vorhanden	Teppich "cars"	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_09	BS nicht nachgewiesen	Tapetenelement	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_10	BS nicht nachgewiesen	Tapetenelement	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_11	BS nicht nachgewiesen	Spanplatte	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min
MFPA_Zimmer_004_R02_12	BS nicht nachgewiesen	Stoff Sofa	1800	21	SPME/H2O	keine	GC-MS SPME	Split 40 (nachträglich manuell)	50°C 5 min 30 min

Anhang F

Zusammenfassung der Ergebnisse zur
Reproduzierbarkeit bezüglich des Nachweises von
Brandbeschleunigern nach dem Raumbrandversuch
005- Vergleich der Ergebnisse dreier Laboratorien

Abb.F1

Versuchapparatur: Raumbrand

Material:verschiedene

verwendeter Brandbeschleuniger: Benzin/Diesel Gemisch

Probennummer	Probenmaterial	Versuchsdauer (s)	Probenverpackung	Labor 1		Labor2		Labor 3	
				Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel
MFPA_Zimmer_005_R02_04 + 05		240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_06	PU+Stoffreste	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_07	Spanplatte	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_08	Spanplatte	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_09	Spanplatte	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_10	Teppich "cars"	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_11	Teppich "cars"	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_12	Teppich "grau"	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_13	Teppich "cars"	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_R02_14	Teppich "cars"	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_01	Regal	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_02	Regal	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_03	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_04	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_05	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_06	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_07	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_08	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_09	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_10	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_11	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_12	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_13	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						
MFPA_Zimmer_005_P07_14	Rußabwischung	240	In Vial, Parafilm						

Anhang G

Veröffentlichungen, Poster, Vorträge

Eigene Referenzen: Veröffentlichungen im Projekt

1. Krüger, S., Deubel, J., Raspe, T., Fettig, I., Piechotta, Ch., Seeger, S., Rothhardt, M.:
Chemical analysis of scorch marks during smouldering of spruce wood - Fire debris, particles and smoke gases
Poster: 10th International IAFSS Symposium
College Park, MD, USA, 19.06.2011 bis 24.06.2011
2. Krüger, S., Deubel, J., Fettig, I., Raspe, T., Rothhardt, M.:
Investigations on particles and smoke gas composition during smouldering of spruce wood
Poster: ANAKON 2011
Zurich, Switzerland, 22.03.2011 bis 25.03.2011
3. Krüger, S. (Vortragender), Werrel, M., Deubel, J.:
A Controlled-atmosphere Cone Calorimeter-Experiences and Characteristics
Vortrag: Flammenschutz-Workshop
Ludwigshafen am Rhein, Germany, 28.11.2011
4. Werrel, M. (Vortragender), Deubel, J., Hofmann-Böllinghaus, A., Antonatus, E., Krüger, S.:
Use and Benefit of a Controlled-atmosphere Cone Calorimeter
Vortrag: Fire and Materials Conference 2013
San Francisco, CA, USA, 28.01.2013 bis 30.01.2013
5. Werrel, M., Deubel, J., Krüger, S., Hofmann-Böllinghaus, A., Antonatus, E., Krause, U., Deuerler, F.: *Use and benefit of a controlled-atmosphere cone calorimeter*, Beitrag zu einem Tagungsband: Fire and materials 2013 - 13th International conference and exhibition (Proceedings) (2013), 273-286; Interscience Communications.
6. Werrel, M. (Vortragender), Deubel, J., Krüger, S., Krause, U.:
Calculation of the Heat Release Rate from Oxygen Consumption in the Cone Calorimeter using the Controlled-atmosphere box
Poster: 10th International Symposium on Fire Safety Science, University of Maryland
College Park, MD, USA, 19.06.2011 bis 24.06.2011
7. Werrel, M. (Vortragender), Deubel, J., Krüger, S.:
Vitiated Cone Calorimeter - ein Modell zur szenarioabhängigen Beurteilung von Brandgefahren?
Vortrag: Doktorandentag des Lehrstuhles Anlagentechnik und Anlagensicherheit der OvGU
Magdeburg, Germany, 09.12.2011 bis 09.11.2011
8. Deubel, J. (Vortragender), Krüger, S., Werrel, M., Krause, U.:
Burning Behavior of Particle Board in the Vitiated Cone Calorimeter
Vortrag: Fire Safety Day 2012
Lund, Sweden, 18.04.2012
9. Deubel, J., Fettig, I., Werrel, M., Krüger, S., Piechotta, Ch.:
Investigation on the Detectability of Fire Accelerants after different Fire Scenarios in the Cone Calorimeter
Poster: 10 th International Symposium on Fire Safety Science, University of Maryland
College Park, MD, USA, 19.06.2011 bis 24.06.2011
10. Fettig, I., Piechotta, Ch., Krüger, S., Deubel, J., Riexinger, D., Raspe, T., Nehls, I.:
Chemische Brandspurenanalytik - Nachweis von Benzin in Brandrückständen
Poster: ANAKON 2011
Zürich, Switzerland, 22.03.2011 bis 25.03.2011

11. Fettig, I. (Vortragender), Piechotta, Ch., Krüger, S., Deubel, J., Werrel, M., Raspe, T.:
Chemische Brandspurenanalytik - Nachweis von Benzin und Diesel in Brandrückständen bei einem Wohnzimmerbrand
Poster: ANAKON
Essen, Germany, 04.03.2013 bis 07.03.2013
12. Piechotta, Ch., Krüger, S., Fettig, I., Deubel, J., Riexinger, D., Raspe, T., Nehls, I.:
Chemische Brandspurenanalytik - Methoden zum Nachweis von Brandbeschleunigern in Brandrückständen
Poster: ANAKON 2011
Zürich, Switzerland, 22.03.2011 bis 25.03.2011
13. Krüger, S. (Vortragender), Raspe, T., Deubel, J., Piechotta, Ch., Fettig, I., Seeger, S., Rothhardt, M., Schartel, B.:
Chemische Brandspurenanalytik
Vortrag: BAM Kolloquium
Berlin, Germany, 09.11.2011
14. Seeger, S., Krüger, S., Raspe, T., Piechotta, Ch., Fettig, I., Deubel, J., Rothhardt, M.:
Partikelanalyse im Brandfall
Vortrag: Workshop Chemische Brandspurenanalytik
Berlin, Deutschland, 09.04.2013
15. Deubel, J. (Vortragender), Krüger, S., Werrel, M., Krause, U.:
Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Brandbeschleuniger auf den Verlauf von Raumbränden
Vortrag: 2. vfdb-Jahrestagung
Magdeburg, Germany, 21.03.2013 bis 22.03.2013
16. Krüger, S. (Vortragender), Fettig, I., Piechotta, Ch., Raspe, T., Berger, A.:
Quantitative Rauchgasanalyse bei Raumbränden
Poster: ANAKON 2013
Essen, Germany, 04.03.2013 bis 07.03.2013
17. Krüger, S., Deubel, J., Werrel, M., Fettig, I., Raspe, T., Piechotta, Ch.: *Experimental studies on the effect of fire accelerant during living room fires*, Beitrag zu einem Tagungsband: Fire and materials 2013 - 13th International conference and exhibition (Proceedings) (2013), 729-743; Interscience Communications
18. Deubel, J., Werrel, M., Krüger, S., Krause, U.: *Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Brandbeschleuniger auf den Verlauf von Raumbränden*, Beitrag zu einem Tagungsband: 3. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag / vfdb-Workshop (2013), 1-9; Hrsg.: Hochschule Magdeburg-Stendal, ISBN 978-3-00-041601-9
19. Krüger, S. (Vortragender), Deubel, J., Fettig, I., Piechotta, Ch., Raspe, T., Werrel, M., Berger, A.:
Kalorimetrische Untersuchungen bei Raumbränden
Vortrag: Ulm-Freiburger Kalorimetrietage 2013
Freiberg, Germany, 27.02.2013 bis 01.03.2013
20. Deubel, J. (Vortragender), Krüger, S., Fettig, I., Piechotta, Ch., Raspe, T., Werrel, M., Berger, A.:
Berechnung der Wärmefreisetzung bei Raumbränden
Poster: Ulm-Freiburger Kalorimetrietage 2013
Freiberg, Germany, 28.02.2013 bis 01.03.2013

21. Krüger, S. (Vortragender), Raspe, T., Deubel, J., Werrel, M., Piechotta, Ch., Fettig, I.:
Brandtechnologische und chemisch-analytische Untersuchungen zum Einfluss von
Brandbeschleunigern bei Zimmerbränden
Vortrag: Brand- und Explosionsschutztag 2013
Magdeburg, Germany, 21.03.2013 bis 22.03.2013
22. Krüger, S. (Vortragender), Fettig, I., Piechotta, Ch., Raspe, T., Werrel, M., Berger, A.:
Experimental studies on the effect of fire accelerants during living room fires
Vortrag: Fire and Materials, 13th international Conference and Exhibition
San Francisco, CA, USA, 28.01.2013 bis 30.01.2013
23. Krüger, S. (Vortragender), Raspe, T., Deubel, J., Werrel, M., Stahn, S.:
Welche energetischen und stofflichen Gefahren gehen von Raumbränden aus?
Vortrag: vfdb Jahrestagung 2013
Weimar, Deutschland, 27.05.2013 bis 29.05.2013
24. Krüger, S., Deubel, J., Fettig, I., Piechotta, Ch., Raspe, T., Werrel, M., Berger, A.:
Einfluss von Brandbeschleunigern bei Wohnzimmerbränden und deren Nachweis
Poster: Ulm-Freiburger Kalorimetrietage 2013
Freiberg, Germany, 27.02.2013 bis 01.03.2013
25. Krüger, S., Deubel, J., Werrel, M., Raspe, T., Fettig, I., Berger, A.: *Brandtechnologische und
chemisch-analytische Untersuchungen zum Einfluss von Brandbeschleunigern bei
Zimmerbränden*, Beitrag zu einem Tagungsband: 3. Magdeburger Brand- und
Explosionsschutztag / vfdb-Workshop (2013), 1-10 Hrsg.: Hochschule Magdeburg-Stendal,
ISBN 978-3-00-041601-9.
26. Krüger, S., et.al. *Rauchgasanalyse und Brandverhalten von verschiedenen Sitzmaterialien im
Transportsektor*, 5. Intern. Fachtagung Fire Safety in rail systems, Wien, 21-22 October 2010,
ISBN: 978-3-940727-23-7.
27. Krüger, S., Hofmann, A., Krause, U., *Chemical analysis of smoke of burning upholstered bus
seats*, German Fire Protection Association, Leipzig, 06-08 June 2010, pp. 1-12, ISBN: 978-3-
00-03966-2.
28. Krüger, S. (Vortragender), Hofmann, A., Krause, U.:
Chemical analysis of upholstered seats for investigation of bus fires
Vortrag: 11th International Seminar on Fire Protection, trade fair Interschutz 2010
Leipzig, Germany, 06.06.2010 bis 12.06.2010
29. Krüger, S., et.al. *Smoke gas analysis by Fourier transform infrared spectroscopy*, AUBE 2009,
14th International conference on automatic fire detection, Duisburg, 08-10 September 2009,
pp. 165-172, ISBN: 978-3-940402-01-1.
30. Hofmann, A., Krüger, S., *Experimental and numerical investigations of the burning behavior of
vehicle materials small, intermediate and large scale investigations*, Interscience
Communications, 12th International fire science & engineering conference, Nottingham, UK,
05-07 July 2010, pp. 1139-1150, ISBN: 978-0-9541216-6-2.
31. Krüger, S., Hofmann, A., Krause, U., *Investigations of smoke gas composition during a car fire*,
12th International fire science & engineering conference, Nottingham, UK, 05-07 July 2010,
pp. 1755-1760, ISBN: 978-0-9541216-6-2.
32. Hofmann-Böllinghaus, A., Knaust, Ch., Krüger, S., Raspe, T., Deubel, J.:
Assessment of development time of a smouldering fire at a crime scene experimental and
numerical investigations

- Vortrag: Fire & Materials Konferenz 2011
San Francisco, CA, USA, 31.01.2011 bis 02.02.2011
33. Hofmann, A., Krüger, S., Knaust, Ch.: *Untersuchung realer Wohnungsbrände durch Großversuch und Computermodellierung*, Beitrag zu einem Tagungsband: 10. SKZ Fachtagung - Kunststoffe, Brandschutz und Flammschutzmittel (2009) Abschnitt F, 1-17; SKZ.
34. Plagge, M., Krüger, S., Berger, A., Deubel, J.:
STA-FTIR Untersuchungen als Eingabeparameter für die numerische Simulation von Brandversuchen
Poster: 19. Ulm-Freiberger Kalorimetrietage
Freiberg, Germany, 16.03.2011 bis 18.03.2011
35. Werrel, M., Krüger, S., Deubel, J., Piechotta, Ch., Fettig, I.:
Cone Calorimeter-Daten als Eingabeparameter für die numerische Simulation von Brandvorgängen
Poster: 19. Ulm-Freiberger Kalorimetrietage
Freiberg, Germany, 16.03.2011 bis 18.03.2011
36. Deubel, Jan (Vortragender), Krüger, S., Krause, U.:
Analytische und numerische Untersuchungen zum materialspezifischen Brandverhalten als Basis für die Rekonstruktion von Bränden
Vortrag: Doktorandentag, Universität Magdeburg; Lehrstuhl Anlagentechnik und Anlagensicherheit
Magdeburg, Germany, 09.12.2011
37. Deubel, J. (Vortragender), Krüger, S., Raspe, T., Fettig, I.:
Numerische Simulation von verschiedenen Brandszenarien mit Brandbeschleuniger
Vortrag: Workshop Chemische Brandspurenanalytik, BAM
Berlin, Germany, 09.04.2013
38. Krüger, S., Deubel, J., Raspe, T., Fettig, I., Piechotta, Ch.: *Chemische Brandspurenanalytik*, Beitrag zu einem Tagungsband: Vfdb-Jahresfachtagung 2012 (2012), 517-539; VdS Schadenverhütung; Hrsg.: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb).
39. Krüger, S. (Vortragender), Raspe, T., Deubel, J., Piechotta, Ch., Fettig, I.:
Chemisch-analytischer Nachweis von festen, flüssigen und gasförmigen Brandprodukten
Vortrag: Brandsymposium
Bad Liebenstein, Germany, 13.11.2012 bis 15.11.2012
40. Krüger, S. (Vortragender), Raspe, T., Deubel, J., Piechotta, Ch., Fettig, I.:
Chemische Brandspurenanalytik in der BAM
Vortrag: Arbeitstagung Brandspurenanalytik 2012
Bautzen, Germany, 01.10.2012 bis 02.10.2012
41. Krüger, S. (Vortragender), Deubel, J., Fettig, I., Raspe, T., Piechotta, Ch.:
Brandanalytik
Vortrag: Arbeitstagung Brandschäden 2012
Rennerod, Germany, 09.05.2012 bis 11.05.2012
42. Krüger, S. (Vortragender), Deubel, J., Fettig, I., Raspe, T., Piechotta, Ch.:
Methoden der Brandspurenanalytik
Vortrag: vfdb Jahrestagung 2012
Cologne, Germany, 21.05.2012 bis 23.05.2012

43. Krüger, S.:
Analytische Untersuchungen zur Toxizität von Rauchgasen
Vortrag: VfdB-Jahrestagung 2009
Mannheim, Germany, 24.05.2009 bis 27.05.2009
44. Krüger, S. (Vortragender), Deubel, J., Fettig, I., Raspe, T., Piechotta, Ch.:
Experimentelle Realisierung von Brandszenarien und deren brandtechnologische Analyse
Vortrag: Brandursachenseminar der Landespolizei Mecklenburg-Vorpommern
Güstrow, Germany, 12.11.2012 bis 16.11.2012
45. Krüger, S. (Vortragender), Raspe, T., Deubel, J., Fettig, I., Seeger, S.:
Chemische Brandspurenanalytik
Vortrag: Workshop Chemische Brandspurenanalytik, BAM
Berlin, Germany, 09.04.2013
46. Krüger, S., Deubel, J., Raspe, T., Piechotta, Ch., Fettig, I. (Vortragender):
Analytische Untersuchungen zum Nachweis von Brandbeschleuniger in Brandrückständen
Vortrag: Workshop - Chemische Brandspurenanalytik
Berlin, Germany, 09.04.2013
47. Deubel, J. (Vortragender), Krüger, S., Werrel, M., Piechotta, Ch., Fettig, I.:
Kalorimetrische Untersuchungen zur Brandursachenermittlung
Vortrag: 19. Ulm-Freiburger Kalorimetrietage
Freiburg, Germany, 16.03.2011 bis 18.03.2011
48. Deubel, J. (Vortragender), Werrel, M., Krüger, S., Piechotta, Ch., Fettig, I., Krause, U.:
Chemical Analysis of Fire Effluents and Fire Debris
Vortrag: SP Guest Researcher Colloquium
Borås, Sweden, 19.04.2012
49. Krüger, S. (Vortragender), Piechotta, Ch., Seeger, S., Deubel, J., Krause, U.:
Chemical analysis of spruce wood during thermal exposure
Vortrag: Joint Symposium on Thermal Analysis and Calorimetry, Dresden 26-28 May 2010
Dresden, Germany, 26.05.2010 bis 28.05.2010
50. Krüger, S. (Vortragender):
Analytische Untersuchungen zur Toxizität von Rauchgasen
Vortrag: Vfdb-Jahrestagung 2009
Mannheim, Germany, 24.05.2009 bis 27.05.2009
51. Deubel, J. (Vortragender), Krüger, S., Piechotta, Ch.:
Chemische Brandanalytik
Vortrag: Workshop 'Brandschutzforschung'
Magdeburg, Germany, 04.10.2010 bis 05.10.2010
52. Krüger, S., Berger, A., Krause, U.:
Chemical-analytical investigation of fire products in intermediate storages of recycling materials
Zeitschriftenartikel: Fire and materials 36 (2012) 3, 165-175; Heyden
ISSN 0308-0501, 1099-1018
53. Krüger, S., Hofmann, A., Krause, U.:
Brandanalytische Untersuchungen von Polymerwerkstoffen - Toxizität von Rauchgasen am Beispiel von Polyvinylchlorid (PVC)
Zeitschriftenartikel: MP materials testing 52 (2010) 3, 124-131; Hanser; Hrsg.: Bundesanstalt

für Materialforschung und -prüfung

ISSN 0025-5300

54. Deubel, J.H., Werrel, M., Raspe, T., Fettig, I., Piechotta, Ch., Krüger, S.: Forschungsbericht: Raumbrände - Teil 1: Versuchsaufbau und brandtechnologische Untersuchungen, ISBN: 978-3-9815944-2-3, 2013

Eingereichte und akzeptierte Zeitschriftenartikel:

55. Fettig, I., et al., J. of Forensic, ID-JOFS-12-649.R.1

56. Werrel, M., et al, FAM, ID-FAM-12-0035.R.1

Chemical analysis of scorch marks during smouldering of spruce wood - Fire debris, particles and smoke gas composition

Simone Krüger, Christian Piechotta, Ina Fettig, Stefan Seeger, Jan Deubel, Dagmar Riexinger, Monika Rothhardt and Tina Raspe

VII.3 Fire Engineering

Federal Institute for Materials Research and Testing, BAM

Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin, Germany

ABSTRACT

The assessment of scorch marks and the reconstruction of the fire development are based on the precise chemical analysis of combustion products. In this study the impact of different parameters (such as irradiance, irradiation time, smouldering with and without additional flame, oxygen availability, kind and amount of additional fire accelerants) on wood samples during smouldering were investigated. The aim of this work was to develop an innovative methodology, such as available analysis techniques can be combined in an appropriate way to draw conclusions from the solid, liquid and gaseous fire residues on the fire development.

KEYWORDS: smoke, fire investigation, fire chemistry, smouldering, fire debris, smoke gas, particle

INTRODUCTION

Wood is a typical component of homes equipment. If a fire is sparked in homes, the emanating smoke spreads rapidly and large quantities of toxic smoke gases are produced. The assessment of smoke emission and composition is essential for safety in flats and other facilities. There are about 7,500 home fires every year, where about 600 people died [1]. The most common cause of fire is in the field of electricity, but also arson is very common with a share of 15%. The evidence of scorch marks or fire accelerants is essential to clarify such acts. The assessment of scorch marks, the detection of fire accelerants and the reconstruction of the fire development is based on the chemical analysis of combustion products. In this work an innovative methodology was developed to combine available analysis techniques in order to draw conclusions from the fire process with the help of solid, liquid and gaseous fire residues. Different materials (spruce wood, particle board) were investigated under laboratory conditions subjected to different fire scenarios. The resulting combustion gases, aerosols and the remaining residue were analysed using appropriate analytical methods to assess causes of fire and toxicity. Typical fire scenarios are the developing fire, the full fire and the smouldering. In a joint project, all three fire scenarios are considered, but the primary aim of this work was to investigate three kinds of combustion products of spruce wood: gases, residues and particles during the fire scenario smouldering. The scenario of smouldering was realised in the Smoke Density Chamber (SDC). Thereby the influences of irradiance, irradiation time, with and without additional flame, the kind and the amount of fire accelerants to the smoke emission, the smoke gas composition, the particle size distribution and the fire debris analysis were investigated. Spruce wood was used as model system for wood; it corresponds to grade A standard with no knots and additives. Furthermore glued spruce wood and particle board specimens were investigated. In the course of the joint project there are going to be investigations on common items such as furniture. The concept of this project is shown in Fig. 1.

During the smouldering procedures, under controlled ventilation conditions, the sample mass were continuously measured, thus, giving the weight loss vs. time. In addition, the transmission and the optical density of the smoke gases were determined during the smouldering of spruce wood. Thereby, the composition and the quantity of smoke gases (such as carbon monoxide, hydrogen cyanide, hydrochloric acid, etc.) were determined by using Fourier transformed infrared spectroscopy (FTIR). A mobile FTIR-spectrometer was directly coupled with the chamber and the gases were collected through a removable probe sensor, which offers the advantage to measure components of gases continuously. Our own work on combustion of toys, upholstered seats, PVC plates and recycled materials showed that the FTIR spectroscopy is very suitable for this kind of smoke gas analysis [2-5]. The composition of the gases changed during the smouldering, depending on the temperatures, and the exposure time. Furthermore it is certain that the type and amount of fire accelerants have also influence on the gas components as well as the impact of an additional gas ignition source. In addition to the gas components the resulting particles

with their according particle size distribution were investigated during the smouldering in the Smoke Density Chamber using Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) and Laser Counter (LC). Thereby, particle sizes can be detected from 6 nm up to 560 nm (EEPS) and from 300 nm up to 20 μm (LC).

The third part of this work is the chemical analysis of the fire residues. The burned spruce wood samples were extracted in different solvents (toluol, etc.) using the Accelerated Solvent Extraction (ASE). The extracts were evaporated and analysed by gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC-MS) in order to detect substances, like polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs. Furthermore, the fire residues were investigated by Headspace- and SPME (Solid-phase microextraction)-GC-MS analysis in order to detect low concentrations of volatile components of the fire accelerants. Holistically analytic observation of smouldering involved substances, such as solids and liquid fire residues, particles, and combustion gases were presented and discussed depending on the fire exposure.

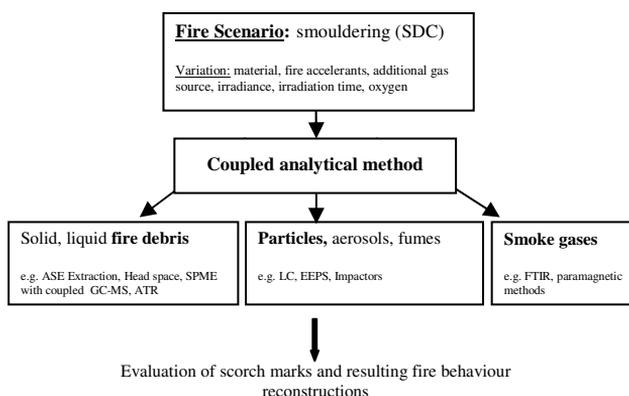


Fig.1. Concept of the chemical analysis of scorch marks of spruce wood during smouldering in the Smoke Density Chamber

FIRE SCENARIO SMOULDERING AND THE COUPLED ANALYTICAL METHODS

In a closed test chamber (SDC) the samples were exposed to horizontal thermal irradiation of 25 and 50 kW/m^2 (according to DIN EN ISO 5659-2), with or without a pilot flame to perform different fire debris of spruce wood specimens. Furthermore, additional 5 ml of accelerant (benzine, spirit, household cleaner viss) were applied with a pipette on the spruce wood specimens just before the smouldering experiments started. The methylated spirit and the household cleaner were purchased from a local grocery store and the benzine was collected from a local gas station.

A mobile FTIR spectrometer (Nicolet type 380, Thermo Fisher Scientific GmbH) was connected to the chamber. The sampling gas was conveyed to the FTIR spectrometer through a (heated to 180°C) 2 micron particulate filter, directly behind the exhaust and the FTIR spectra were measured at a gas temperature of 180°C and with a resolution of 0.5 cm^{-1} .

Additionally an Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS, TSI Inc, USA) spectrometer was connected to the SDC. The EEPS enables fast particle size measurements with a time resolution of 0.1 second (10 size spectra per second). An EEPS operates at 10 l/min standard test flow.

After the smouldering experiments, the fire debris has been investigated in several ways, which is explained in the chapter Fire debris analysis. Different extraction methods were used to develop a standard working method for suspected arson cases. All analyses were performed using a Shimadzu GC-2010 gas chromatograph interfaced with an Shimadzu QP 2010 Plus mass spectrometer and equipped with an Agilent DB-5MS capillary column (30 m x 0.25 mm x 0.25 μm). The inlet temperature was 250°C ; the helium carrier gas pressure 1.61 ml/min and the samples were injected in split mode using a CombiPAL automated sampler. The transfer line between the GC and the mass spectrometer was maintained at 310°C . The mass spectrometer was equipped with an electron ionisation source operated at 70 eV and a quadrupole mass analyser operated in full scan mode (m/z 30-500). The identification of the detected compounds was made by using the NIST 08 mass spectra library and comparison of retention times of standard compounds.

SMOKE GAS EMISSION

However, the main reason for the different smouldering experiments is to produce different fire debris to identify typical scorch marks. But the various fire conditions do not only have an impact on the fire debris, but also on the smoke evolution and smoke gas composition. The specific optical density were determined according to various influences and summarised in the chapter smoke evolution. The corresponding results of smoke gas analysis can be found in chapter smoke gas composition.

Smoke evolution

The influences of: irradiance, irradiation time, an additional flame, oxygen availability, the kind and the amount of fire accelerants and the kind of wood to the transmission and the corresponding specific optical density were investigated according to DIN EN ISO 5659-2. Characteristic parameters for smoke evolution are specific optical density D_s , maximum specific optical density D_{smax} , time to D_{smax} in [s] and mass optical density MOD in [m^2/kg].

- Influence of irradiance

The specific optical density and the time until reaching the maximum specific optical density decrease with higher irradiance. As expected, the mass loss is higher with increasing irradiance. The influence of irradiance to mass loss and specific optical density during smouldering of spruce wood is shown in Tab. 1.

Table 1. Characteristic values of spruce wood during smouldering (1200s) according to DIN EN ISO 5659 -2: Influence of irradiance.

Irradiance [kW/m^2]	Mass loss [%]	D_{smax} []	Time to D_{smax} [s]
25 kW/m^2 with flaming	54,20	23	1193
50 kW/m^2 with flaming	73,55	17	76
25 kW/m^2 without flaming	51,83	604	878
50 kW/m^2 without flaming	77,19	54	147

- Influence of irradiation time

The mass loss increases with higher irradiation time (Tab. 2). In the beginning, the specific optical density and the time to D_{smax} increase until 900s, followed by a slightly decrease until 1200s. The mass optical density reaches the maximum after 600s. With further increasing irradiation time the optical density decreases, caused by the more complete combustion.

Table 2. Characteristic values during smouldering (25 kW/m^2 , without flame) of spruce wood according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of irradiation time.

Time [s]	Mass loss [%]	D_{smax} []	Time to D_{smax} [s]	MOD [m^2/kg]
300	4,5	27,86	300	59,4
600	26,4	400,87	601	220,6
900	38,2	625,89	894	216,6
1200	51,83	604,04	878,0	113,1

- Influence of additional flame

The experiments were performed with and without an additional gas burner ignition source during smouldering experiments. An additional flame affected a higher mass loss and a lower specific optical density during smouldering of spruce wood specimens (Tab. 3).

Table 3. Characteristic values of spruce wood during smouldering (25 kW/m^2) according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of an additional flame.

Time [s]	Mass loss [%]	D_{smax} [l]	Time to D_{smax} [s]	MOD [m^2/kg]
300 (without flaming)	4,5	27,86	300	59,4
300 (with flaming)	13,3	15,86	244	14,8
600 (without flaming)	26,4	400,87	600,5	220,6
600 (with flaming)	42,7	11,45	595,5	4,34
1200 (without flaming)	51,83	604,04	878,0	113,1
1200 (with flaming)	54,2	23,48	1193	6

- Influence of the kind of fire accelerant

The addition of various fire accelerants (benzine, methylated spirit and household cleaner Viss) caused a decrease in the maximum specific optical density and in the mass optical density. But there is no significant difference between the various fire accelerants. The additional influence of the fire accelerants to the mass loss is very low and only in the case of benzine the additional mass loss was detectable. These results are shown in Fig. 2 and Tab. 4.

Table 4. Characteristic values of spruce wood during smouldering (25 kW/m^2 , without flaming) according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of fire accelerants.

Fire accelerant	Mass loss [%]	D_{smax} [l]	Time to D_{smax} [s]	MOD [m^2/kg]
without fire accelerant	51,83	604,04	878,0	113,1
5 ml spirit	51,34	497,58	871,34	87,8
5 ml benzine	56,03	499,71	813,3	89,1
5 ml viss	52,88	440,72	870,5	86,93

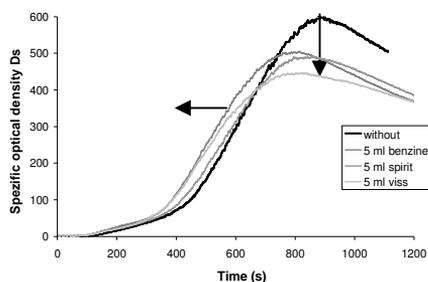


Fig. 2. Specific optical density of spruce wood doped with different fire accelerants during smouldering (25 kW/m^2 , without flaming) according to DIN EN ISO 5659-2.

- Influence of the amount of fire accelerant

An increasing amount of fire accelerant, e.g. benzine, causes a higher mass loss and a small decrease in the mass optical density. The specific optical density and the time to D_{smax} do not change; the difference between 1 and 5 ml fire accelerant is insignificant (Tab. 5).

Table 5. Characteristic values of spruce wood during smouldering (25 kW/m^2 , without flame) according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of amount of fire accelerants.

Fire accelerant	Mass loss [%]	D_{smax}	Time to D_{smax} [s]	MOD [m^2/kg]
without fire accelerant	51,83	604,04	878,0	113,1
1 ml benzine	53,83	490,05	797,7	98,7
5 ml benzine	56,03	499,71	813,3	89,1

- Influence of the kind of wood

The influence of the kind of wood to the maximum specific optical density during smouldering is shown in Fig. 3. The specific optical density of the spruce wood is much lower than in the case of the corresponding glued spruce wood and the particle board. The mass loss is increasing in the following order: particle board < spruce wood < glued spruce wood.

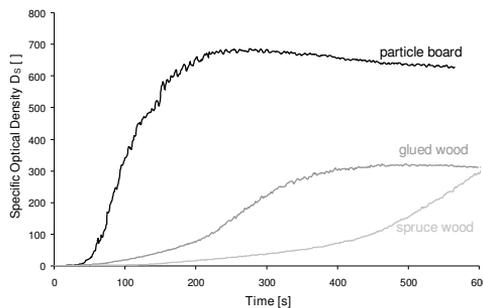


Fig. 3. Specific optical density of spruce wood, glued wood and particle board during smouldering (25 kW/m^2 , without flaming) according to DIN EN ISO 5659-2.

- Influence of oxygen availability

Particle board without veneer, used for furniture (thickness 16 mm), was tested at different oxygen concentrations (50 kW/m^2 , 1200s). The specimen was installed in a sample holder in the smoke density chamber and the door and the lower vent were closed. The upper vent was open. Then gaseous nitrogen was introduced into the chamber via an opening in the chamber ceiling. The actual oxygen concentration was checked with a paramagnetic oxygen monitor. When the desired oxygen concentration was reached, the nitrogen supply and the opening in the ceiling were closed; the upper vent was shut afterwards. In the tests at lower oxygen levels the specimen mass and the transmission were recorded. Figure 4 shows the characteristics of the specific optical density at four different oxygen levels from ambient to 3,2Vol%.

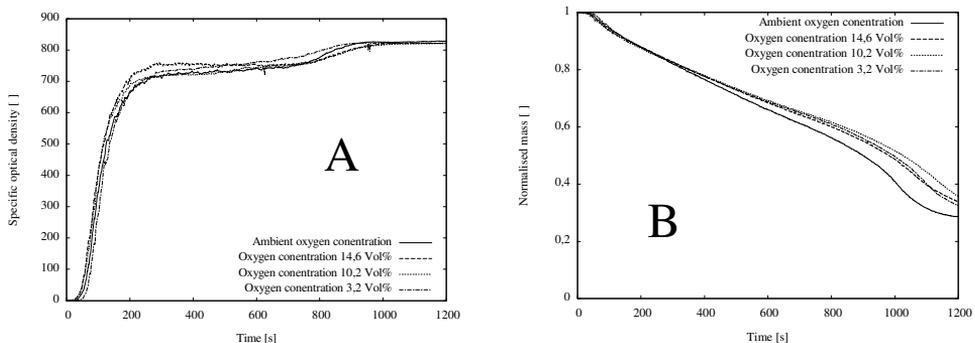


Fig. 4. Specific optical density (A) and mass loss (B) of particle board at different oxygen concentrations during smouldering (50 kW/m^2 , without flaming) similar to DIN EN ISO 5659-2.

There is no dependence of the specific optical density respectively the transmission from the oxygen concentration. Also the maximum values of the specific optical density are all in the same range (Tab. 6). The time to maximum specific optical density is significantly lower at 3,2Vol% oxygen but the curves in Fig. 4 show a very similar characteristic for all oxygen levels. Figure 4 also shows the normalised mass over the time. The total mass loss at ambient oxygen concentration is the highest value. The mass losses at oxygen levels lower than ambient are in the same range.

Table 6. Characteristic values of particle board during smouldering (50 kW/m^2 , without flaming) similar to DIN EN ISO 5659-2: Influence of oxygen availability.

Oxygen concentration [Vol%]	Mass loss [%]	D_{smax} []	Time to D_{smax} [s]	MOD [m^3/kg]
ambient	71,5	828,87	1173	78,1
14,6	66,1	822,22	1143	84,9
10,2	64,2	821,42	1189	83,3
3,2	67,5	822,84	929	81,9

Smoke gas composition

Besides the smoke evolution, the quantitative gas composition was recorded during smouldering using a coupled FTIR spectrometer. The specimens were positioned underneath a conical heater and the fire effluents were accumulated over a time period of 20 minutes in the chamber. The main products observed were carbon dioxide (CO_2) and water vapour, but also traces of carbon monoxide (CO) and methane (CH_4) could be found. Furthermore, aliphatic CH_2 -/ CH_3 -stretching vibrations (2920 , 2860 and 2960 , 2890 cm^{-1}) and aromatic CH -stretching vibrations (3000 to 3100 cm^{-1}) were found. Quantitative data are reported here for CO_2 , CO, CH_4 , ethylene (C_2H_4), formaldehyde (CH_2O), benzene (C_6H_6), acroleine ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$), phenol ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$) and hydrogen cyanide (HCN) which are among the 18 chemical species for which the spectrometer was calibrated.

- Influence of irradiance

The concentration of carbon dioxide increases with increasing irradiance. In contrast, the concentration of methane, ethylene, phenol, formaldehyde, acroleine, benzene and hydrogen cyanide decrease. At higher irradiance less products of incomplete combustion (e.g. CO) are produced. The maximum concentration of the smoke gas components during smouldering of spruce wood are shown in Tab. 7.

Table 7. Maximum concentration [ppm] of smoke gas components during smouldering (without flaming, 1200s) of spruce wood according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of irradiance.

Irradiance [kW/m^2]	CO_2	CO	CH_4	C_2H_4	C_6H_6	CH_2O	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	HCN
25 kW/m^2	6300	3670	654	44	25	212	72	25	10
50 kW/m^2	30700	798	124	18	0	9	3	13	8

- Influence of irradiation time

The concentration of the smoke gases increases significantly with increasing irradiation time during smouldering. The influence of irradiation time on the maximum concentration of smoke gas components during smouldering of spruce wood is shown in Tab. 8.

Table 8. Maximum concentration [ppm] of smoke gas components during smouldering (without flaming, 1200s) of spruce wood according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of irradiance.

Time [s]	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₆ H ₆	CH ₂ O	C ₃ H ₄ O	C ₆ H ₆ O	HCN
300	500	26	1	6	4	31	-	2	3
600	2000	1299	177	14	10	128	53	13	7
900	3800	2563	425	29	21	216	86	24	7
1200	6300	3670	654	44	25	212	72	25	10

- Influence of additional flame

The main difference was found between the experiments with additional flame and without. The concentration of carbon dioxide increases dramatically with an additional flame during the smouldering experiments. The emission of carbon dioxide and carbon monoxide during smouldering without additional flame (incomplete combustion) was exactly the other way around. An additional flame affected a higher concentration of carbon dioxide caused by the more complete combustion, while smoke gas combustion products, like carbon monoxide, methane and formaldehyde are more produced without an additional flaming (Tab. 9).

Table 9. Maximum concentration [ppm] of smoke gas components during smouldering (25 kW/m², 1200 s) of spruce wood according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of an additional flame.

Pilot flame	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₆ H ₆	CH ₂ O	C ₃ H ₄ O	C ₆ H ₆ O	HCN
with flaming	21500	156	9	4	0	21	6	2	10
without flaming	2000	1299	177	14	10	128	53	13	7

- Influence of the kind of fire accelerant

The influence of an additional fire accelerant to the quantitative smoke gas composition is barely detectable. The additional fire accelerants influence slightly the time dependent emission of carbon dioxide and carbon monoxide. The ratio of CO/CO₂ of the different spruce wood specimens doped with 5 ml fire accelerant is shown in Fig. 5. But there is no distinguishable difference between the kinds of fire accelerants.

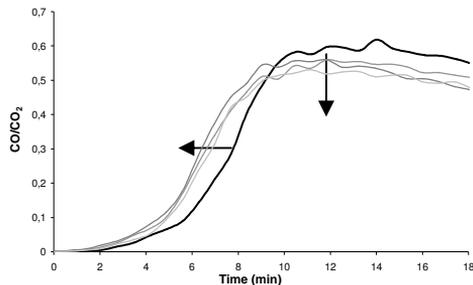


Fig. 5: Ratio of CO/CO₂ of spruce wood: (1) without accelerant, (2) with 5 ml methylated spirit, (3) with 5 ml house hold cleaner Viss, (4) with 5 ml benzine during smouldering (25 kW/m², without flame).

- Influence of the amount of fire accelerant

An increasing amount from 1 to 5 ml fire accelerant affected no significant change in the smoke gas emission. The run of the ratio CO/CO₂ is indistinguishable.

- Influence of the kind of wood

The influence of the kind of wood on the smoke gas composition is significant. The model system spruce wood showed in comparison to the corresponding glued spruce wood and the particle board a much lower emission of carbon dioxide and carbon monoxide. The particle board, which is a basic material for furniture, shows the highest concentration of carbon monoxide and carbon dioxide (Fig. 6). In contrast to both spruce wood specimens, ammonia and hydrogen cyanide are emitted additionally during smouldering of the particle board.

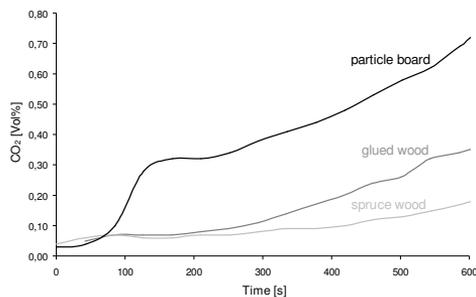


Fig. 6. Run of carbon dioxide in [ppm] during smouldering (25 kW/m^2 , without flame) of different wood specimens.

PARTICLE EMISSION

Particle number concentration and particle size distribution

The EEPS spectrometer was used to measure the size distribution of the emitted particles. (i.e. the particle number concentration in different size classes ranging from 5.6 to 560 nm). The very high particle concentrations in the smoke gases made the application of an aerosol diluter with a dilution factor of 1/4000 between the SDC and the EEPS/LC necessary. Therefore, the aerosol test flow rate taken out of the SDC was only 2 l/min. However, the analysed aerosol was fed into the SDC again so that the gas balance of the whole system was not affected. Fine particle emissions in the range from 300 nm to 20 μm were parallel measured with a laser counter (type 1.108, Grimm, Germany). This instrument works at a flow rate of 1 l/min and classifies particles in 15 size channels.

- Influence of irradiation time and influence of an additional flame

The resulting time dependent size distribution of emitted particles of spruce wood doped with 5 ml spirit during the smouldering experiment according to DIN EN ISO 5659-2 is reflected in Fig. 7. The levels of grey indicate the particle number concentration. Two particle sizes modes at 80 and 190 nm emerged during the smouldering experiment (25 kW/m^2 , without flame). A maximum concentration particle at 190 nm diameter develops after 11 min, while another maximum concentration at 80 nm shapes up after 20 min. Therefore, the maximum of the particle size distribution changes to smaller particles with increasing time during smouldering. It is surprising that at these high concentrations there was obviously no formation of agglomerates with increasing exposure time. The change in maxima after 12 to 15 min is in coincidence with the point where the CO/CO_2 ratio comes to the stationary phase and the smoke emission and the specific optical density reached the maxima. It seems like a change in mechanism. Figure 8 shows the particle number size distribution after 9 min during the smouldering experiments. There are two particle modes and the particle number concentration at 180 nm reaches 3 million particles per cm^3 . Only minor contributions to the aerosol size distribution were measured with the LC above 300 nm.

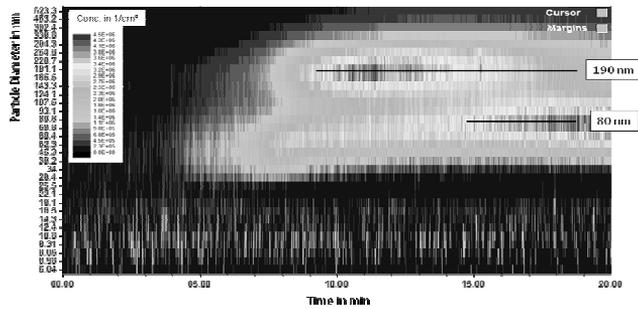


Fig. 7. Time dependent particle number size distribution of spruce wood doped with 5 ml methylated spirit during smouldering (25 kW/m^2 , 1200s) without additional flame according to DIN EN ISO 5659-2.

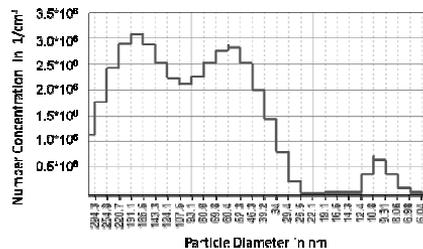


Fig. 8. Particle number size distribution of spruce wood doped with 5 ml methylated spirit, taken 9 min after the start of smouldering (25 kW/m^2) without additional flame according to DIN EN ISO 5659-2.

Another spruce wood specimen was smouldered under the same conditions except an additional flame. The particle size distribution is totally different. While two particle modes at 190 nm and 80 nm were produced during smouldering without flame, only smaller particles with 34 nm diameters were formed during smouldering with an additional flame (Fig. 9). Furthermore, there was also no formation of agglomerates. The particle number size distribution after 15 min is shown in Fig. 10. The particle number concentration at 34 nm is for example about 1,8 million particles per cm^3 . In contrast to the experiments without additional flaming, fewer and smaller particles are emitted during the smouldering with additional flame. Again, only minor contributions to the aerosol size distribution were measured with the LC above 300 nm.

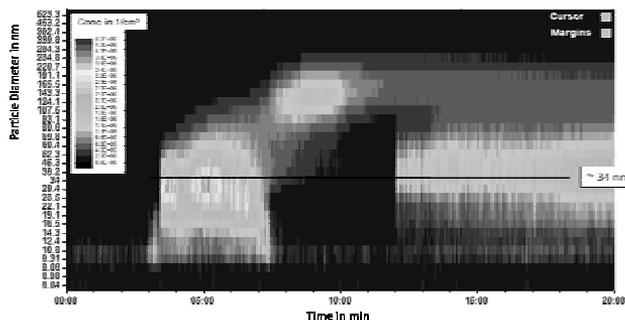


Fig. 9. Time dependent particle number size distribution of spruce wood doped with 5 ml methylated spirit during smouldering (25 kW/m^2 , 1200s) with additional flame according to DIN EN ISO 5659-2.

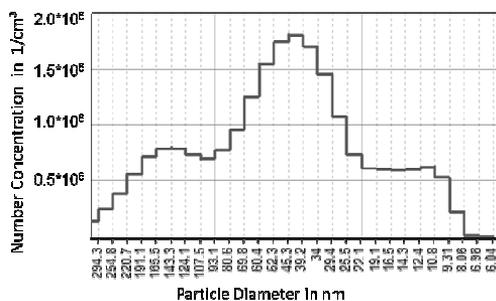


Fig. 10. Particle number size distribution from spruce wood doped with 5 ml methylated spirit, taken 9 min after start of smouldering (25 kW/m^2) with additional flame according to DIN EN ISO 5659-2.

- Influence of the kind of fire accelerant

There is no detectable significant difference in particle emission between spruce wood with various fire accelerants (benzene, methylated spirit and household cleaner viss).

FIRE DEBRIS ANALYSIS

The impact of different parameters during the burning process (irradiance, irradiation time, smouldering with and without a flame, kind and amount of fire accelerants) to wood samples were investigated. Fire exposed specimens were spruce wood and particle board. Especially the detection and identification of ignitable liquids from fire debris is of prime importance for forensic fire investigation in suspected arson cases. Liquid fire accelerants like methylated spirits, benzene or diesel consist of high volatile organic compounds. The material recovered from a fire may only contain traces of the used accelerant due to high temperatures during a fire. For the analysis of fire debris, it is necessary to extract the volatile components from the fire debris, to prove the presence of an ignitable liquid. In this study different extraction methods were used in order to develop a standard working method for the case of suspected arson.

Solvent extraction

The solvent extraction method was chosen to investigate the solid combustion residues to detect fire accelerants, verify characteristic compounds resulting from the combustion of wood like polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and identify compounds resulting from the reaction of an accelerant with wood during combustion.

For the extraction of components from solid sample matrices a solid-liquid extraction can be used. This method removes soluble components from solids using a solvent. Common solid-liquid extraction is a time consuming sample preparation technique where a lot of solvent is necessary. In this study a pressurized liquid extraction (here ASE[®], Dionex) is used. A technique for a rapid extraction of solids (i.e. fire debris), using a solvent at elevated temperatures and pressures. Advantages of this accelerated solvent extraction technique are: lower solvent consumption and shorter extraction time compared with the conventional extraction. The solvent of choice should have a favourable distribution coefficient for the solutes of interest, should be pure and of a high volatility. Ignitable liquids, such as petroleum based fuels are highly soluble in non-polar solvents such as hexane or methylene chloride. Weaknesses of this sample preparation are:

- Interferences from the matrix caused by co-extraction of unrelated matrix components
- Low sensitivity unless the solvent is evaporated (possible loss of the volatile compounds during evaporation)
- Solvent purity and required caution owing to toxicity of solvents
- Poor extraction efficiencies caused by using a solvent with improper polarity

The burned and crushed test samples-spiked with internal standards (tree deuterated PAHs) to survey the recovery rate - were treated with the ASE method using solvents of different polarities (toluene, hexane, hexane:acetone (7:3), methanol) to extract polar and non-polar components from the solid combustion residues. The evaporated extraction solutions were analysed using GC-MS. The resulting chromatograms showed no signs of ignitable liquid residues or PAHs which are characteristic for burned wooden samples. Furthermore no characteristic compounds could be identified. The spectra showed no difference regarding the varied conditions during the smouldering process (irradiance, irradiation time, with and without additional flame). Reasons for this negative result could be e.g. the low sensitivity of the chosen method, loss of the volatile compounds because of solvent evaporation or evaporation during sample preparation before the ASE treatment (cutting the residue with a mortar). Comparative samples using crushed charcoal spiked with accelerant (benzine) were treated under the same conditions as the test samples to verify the method. It was possible to detect the ignitable liquid in these samples. Figure 11 shows the applicability of the developed ASE method. Re-analysis of newly produced fire debris must indicate whether a timely accelerated solvent extraction leads to a positive proof of the deployed accelerant.

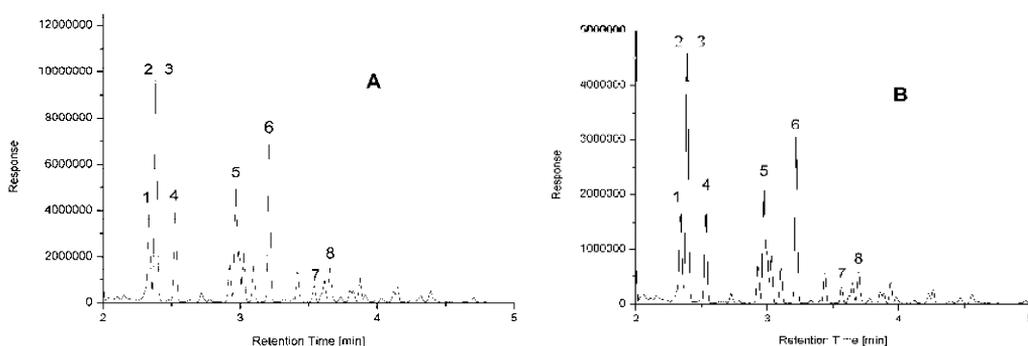


Fig. 11. Chromatograms of (A) neat benzene dissolved in hexane (5 $\mu\text{L}/\text{mL}$), (B) ASE (hexane) treated charcoal sample (spiked with benzene before extraction); GC temperature program: $60^\circ\text{C}/(20^\circ\text{C}/\text{min})/110^\circ\text{C}/(10^\circ\text{C}/\text{min})/310^\circ\text{C}(4\text{ min})$; labeled components: (1) ethylbenzene, (2, 3) m-, p-xylene, (4) o-xylene, (5) 1-ethyl-3-methylbenzene, (6) 1,2,4-trimethylbenzene, (7) indane, (8) 1,2-diethylbenzene.

Determination of volatile substances

Due to the negative results using solvent extraction, more sensitive and specific methods for the detection of ignitable liquid residues and possible reaction products were selected.

- Headspace analysis

Static headspace analysis is a technique used for analysis of volatile organic compounds like ignitable liquids. The procedure is based on the equilibration of volatile compounds between a solid phase (e.g. fire debris) and the gas phase. The sealed sample is tempered in an incubation oven until it has reached a state of equilibrium (volatile organic compounds diffuse into the gas phase). Once the sample has reached equilibrium, an aliquot is taken from the headspace using a heated gas-tight syringe. The test portion is injected into the split injection port of the GC and the volatile compounds are analysed with the mass analyser. Static headspace is relatively simple, nondestructive, requires no extensive sample preparation and no solvent. Handicaps of this method are i.e. discrimination towards low volatile compounds, lack of sensitivity and the use of internal standards for quantitative analysis. Before analysing the smouldered test samples, neat ignitable liquids (benzine, methylated spirit) and charcoal samples spiked with the accelerants were extracted using the static headspace method and analyzed using GC-MS to identify the major components. In order to maximize the optimal measuring conditions, the samples were analysed under different conditions (variation of the incubation temperature), to develop the method of measurement.

The smouldered test samples were analysed (incubation at 80°C) but no ignitable liquid could be detected, not even with incubation times up to nine hours. The spectra showed no difference regarding the varied conditions during the process of combustion (irradiance, irradiation time, with and without additional flame). Reasons for this negative result could be e.g. the low sensitivity of the chosen method or loss of the volatile compounds due to a long storage time of the prepared samples before they were analysed.

- Solid phase microextraction (SPME)

SPME—an adsorptions technique—is a selective enrichment procedure designed to remove and trap volatiles from the headspace above a liquid or solid sample. SPME technology utilizes a sorbent coated silica fiber retracted within a syringe. The needle is inserted into the tempered sample container; the fiber is exposed to the headspace for a period of time and retracted back into the needle. Thermal desorption of the adsorbed analytes occurs in the heated split injector port of the GC. The sorbent fibers available consist of different materials and exist in a variety of stationary phase thicknesses. In this study a 100 µm PDMS (polydimethylsiloxane) sorbent is used, a non-polar fiber, able to absorb the target compounds of the ignitable liquids. Before analysing the smouldered test samples, neat ignitable liquids (benzene dissolved in acetone, methylated spirit) and charcoal samples spiked with the accelerants were extracted using the SPME method and analysed using GC-MS to identify the major components (Fig. 12 and 13). In order to maximize the optimal measuring conditions, the samples were analysed under different conditions (variation of: incubation temperature 40-90°C, incubation time 5-60 min and extraction time 10 sec-10 min), to develop the method of measurement.

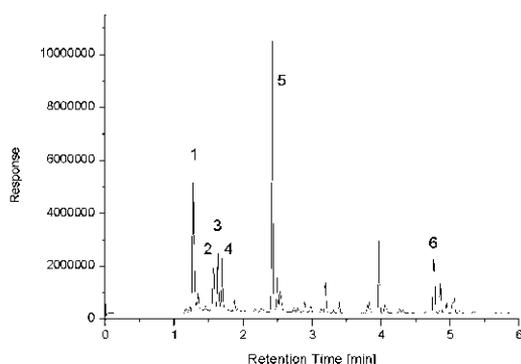


Fig. 12. Chromatogram of 100 mg charcoal spiked with 1 µL methylated spirit (Phönix GmbH), GC temperature program: 40°C(2 min)/(20°C/min)/110°C/(30°C/min)/310°C(1 min); labeled components: (1) ethyl alcohol, (2) 2-butanone, (3) ethyl acetate, (4) isobutylalcohol, (5) diethyl acetal, (6) 3-octanone.

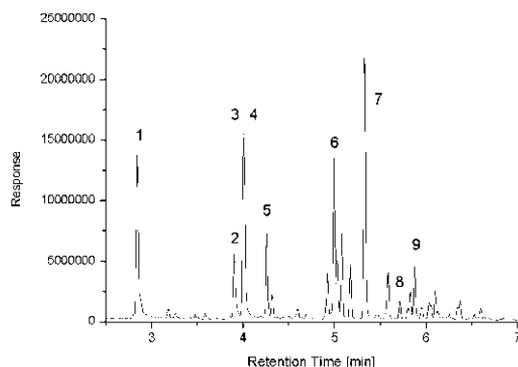


Fig. 13. Chromatogram of 100 mg charcoal spiked with 10 µL benzene (0,5 µL/mL dissolved in acetone), GC temperature program: 40°C(2 min)/(20°C/min)/110°C/(30°C/min)/310°C(1 min); labeled components: (1) toluene, (2) ethylbenzene, (3, 4) m-, p-xylene, (5) o-xylene, (6) 1-ethyl-3-methylbenzene, (7) 1,2,4-trimethylbenzene, (8) indane, (9) 1,2-diethylbenzene.

The burned test samples were extracted using the optimized parameters for the SPME technique (incubation at 50°C, incubation time 5 min, extraction time 30 min) and analysed by GC-MS but no ignitable liquid could be detected. Reasons for this negative result could be e.g. the low sensitivity of the chosen method or loss of the volatile compounds due to a long storage time of the samples before they were analysed.

To study the effect of analyte loss due to long storage time prior to extraction and GC-MS analysis, new fire samples were prepared. Particle board specimens–endowed with benzine – were exposed to horizontal thermal irradiation in the SDC device and quickly extracted with the SPME method and analysed by GC-MS. The fire accelerant could be detected in each sample (Fig. 14). This illustrates the importance for the analysis of ignitable liquids residues, to quickly sample and analyse the fire debris after the fire occurs. The recovery rate decreases with a higher irradiance and/or a longer irradiation time.

Studies on the stability of doped charcoal samples showed a drastic declining recovery rate for the accelerant if the sample is analysed only one day after sample preparation. Measurements of those samples revealed the benefit to cover the debris with water to preserve the sample (Fig. 15). Under these conditions it was possible – even ten days after sample preparation – to detect the endowed ignitable liquid using the developed SPME method.

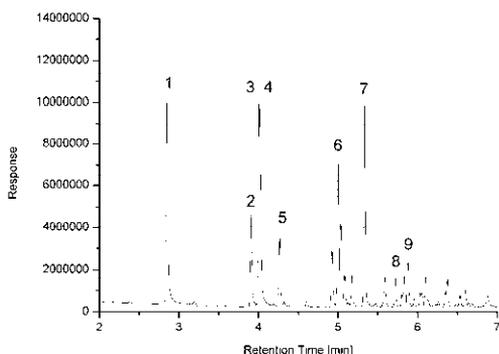


Fig. 14. Chromatogramm of a smouldered chipboard sample (accelerant: benzine); GC temperature program: 40°C(2 min)/(20°C/min)/110°C/(30°C/min)/310°C(1 min); labeled components: (1) toluene, (2) ethylbenzene, (3, 4) m-, p-xylene, (5) o-xylene, (6) 1-ethyl-3-methylbenzene, (7) 1,2,4-trimethylbenzene, (8) indane, (9) 1,2-diethylbenzene.

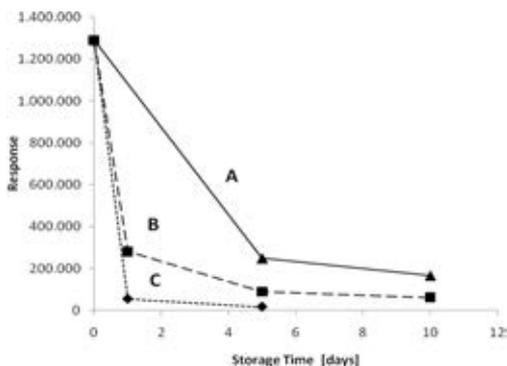


Fig. 15. Relationship between the response (reviewed analyt: toluene) and different storage conditions of doped charcoal specimens (benzine), sample stored in: (A) sealed vial, sample covered with water, (B) sealed vial, (C) unsealed vial

CONCLUSIONS

- Holistically analytic observation of smouldering involved substances, such as solids and liquid fire residues, particles, and combustion gases were realised in the smoke density chamber.
- The smoke evolution (transmission, specific optical density) and mass loss showed differences regarding the varied conditions during smouldering (irradiance, irradiation time, with and without additional flame, kind of wood and the use of a fire accelerant). But the influence of oxygen availability and the influence of the kind and the amount of additional fire accelerants to the smoke evolution are barely detectable.
- The qualitative and quantitative smoke gas compositions depend on combustion conditions like irradiance, irradiation time, with and without additional flame and dramatically depend on the material (spruce wood, glued spruce wood, particle board). In contrast the influence of additional fire accelerants to the smoke gas composition is insignificant and only causes a small time shift in emission.
- The particle number size distribution and the particle number concentration vary with the conditions during the smouldering experiments with or without additional flaming. While two particle modes at 190 nm and 80 nm were produced during smouldering without flame, only smaller particles at 34 nm were formed during smouldering with an additional flame. In contrast to the experiments without additional flaming, there are fewer and smaller particles during the smouldering with additional flame. Furthermore, there was no formation of agglomerates.
- Fire debris analyses during the fire scenario smouldering was realised with different extraction techniques and GC-MS analysis. The detection of fire accelerants and typical fire markers can be achieved. The volatile substances could be detected with a developed SPME method and GC-MS analysis.
- The evidence of fire accelerants is critically dependent on the sampling technique, the storage conditions and especially the storage time.

REFERENCES

- [1] IFS Report „Trends aus der Schadendatenbank“, Institutes für Schadensverhütung und Schadensforschung der öffentlichen Versicherer, 9. Jahrgang (2006), 1
- [2] Krüger, S., “Smoke gas analysis by Fourier transform infrared spectroscopy”, *AUBE-Proceedings of the 14th International conference on automatic fire detection*, ISBN: 978-3-940402-01-1, 2009, pp. 165-172.
- [3] Krüger, S., Hofmann, A. and Krause, U., “Chemical analysis of smoke of burning upholstered bus seats”, *Interschutz-Proceedings of the 11th International Seminar on Fire Protection*, German Fire Protection Association, ISBN: 978-3-00-03966-2, 2010, pp. 1-12.
- [4] Hofmann, A. and Krüger, S., “Experimental and numerical investigations of the burning behavior of vehicle materials small, intermediate and large scale investigations”, *INTERFLAM-Proceedings of the 12th International fire science & engineering conference*, Interscience Communications, ISBN: 978-0-9541216-6-2, 2010, pp. 1139-1150.
- [5] Krüger, S., Hofmann, A. and Krause, U., “Investigations of smoke gas composition during a car fire”, *INTERFLAM-Proceedings of the 12th International fire science & engineering conference*, Interscience Communications, ISBN: 978-0-9541216-6-2, 2010, pp. 1755-1760.

Chemical analysis of scorch marks during smouldering of spruce wood - Fire debris, particles and smoke gas composition

Krüger, S., Piechotta, Ch., Fettig, I., Deubel, J.H., Raspe, T., Seeger, S., Rothhardt, M.
BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 7.3, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin

Aim

- ▶ The assessment of scorch marks or fire accelerants and the reconstruction of the fire development are based on the precise chemical analysis of combustion products.
- ▶ In this work an innovative methodology was developed to combine available analysis techniques in order to draw conclusions from the fire process with the help of solid,

Results

- ▶ The particle number size distribution and the particle number concentration during smouldering of spruce wood dramatical varied with or without additional flaming (fig.1).
- ▶ Two particle modes at 190 nm and 80 nm were produced during smouldering without flame, only smaller particles at 34 nm were formed during smouldering with an additional flame.
- ▶ In contrast to the experiments without additional flaming, there are fewer and smaller particles during the smouldering with additional flame. Furthermore, there was no formation of agglomerates.
- ▶ The specific optical density and the qualitative and quantitative smoke gas composition are dramatically depend on combustion conditions like irradiance, irradiation time, with and without additional flame, kind of wood and the use of a fire accelerant (fig.2,3, tab.1).
- ▶ In contrast the influence of additional accelerant to the smoke gas composition is insignificant and only causes a small time shift in emission (fig.4).
- ▶ Fire debris analyses during the fire scenario smouldering was realised with different extraction techniques and GC-MS analysis. The detection of fire accelerants and typical fire markers can be achieved. The volatile substances could be detected with a developed SPME method and GC-MS analysis.
- ▶ The evidence of fire accelerants is critically dependent on the sampling technique, the storage conditions and especially the storage time (fig.7).

Fire Debris

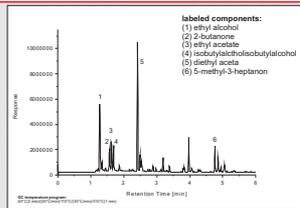


Figure 5: Chromatogram of 100 mg charcoal spiked with 1 µL methylated spirit.

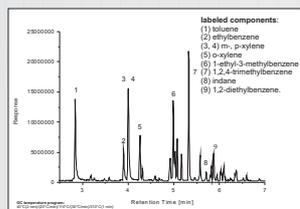


Figure 6: Chromatogram of 100 mg charcoal spiked with 10 µL benzene (0.5 µL/mL dissolved in acetone).

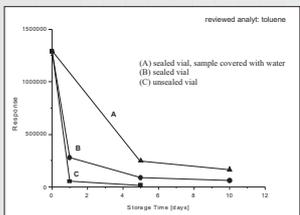
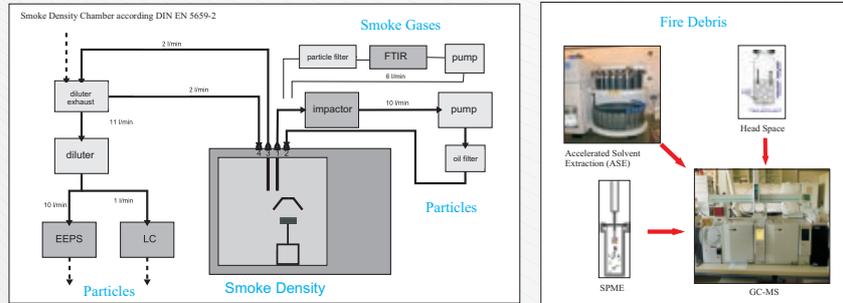


Figure 7: Relationship between the response and different storage conditions of doped charcoal specimens (benzene).

Experimental set up



Particles

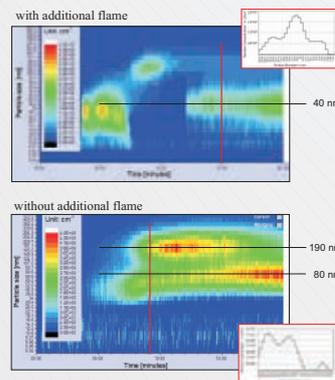


Figure 1: Time dependent particle number size distribution during smouldering (25 kW/m², with and without flame) of spruce wood.

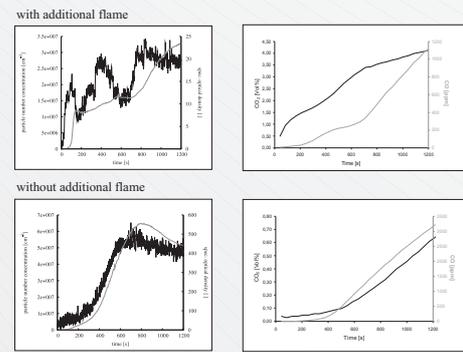


Figure 2: Particle number concentration and specific optical density (left) and emission of CO₂ and CO (right) during smouldering (25 kW/m² with and without flame) of spruce wood.

Smoke gases

Irradiance [kW/m²]	CO₂	CO	CH₄	C₂H₄	C₆H₆	CH₂O	C₃H₈O	C₆H₁₀O	HCN
25 kW/m²	6300	3670	654	44	25	212	72	25	10
50 kW/m²	30700	798	124	18	0	9	3	13	8

Table 1: Maximum concentration [ppm] of smoke gas components during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood: Influence of irradiance.

Figure 3: Transmission and specific optical density during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood as a function of irradiance.

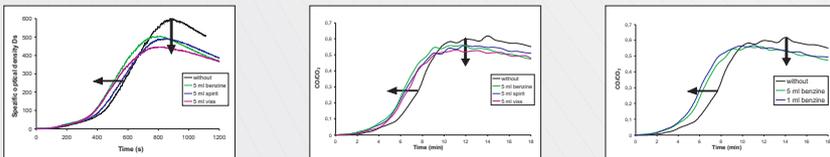


Figure 4: Specific optical density (left) and the ratio of CO/CO₂-ratio (middle) during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood with additional 5 ml of different accelerants (middle) and various amounts of benzene (right).

Conclusion

- ▶ The impact of irradiance, irradiation time and an additional flame to smoke gases and particle emissions is clearly detectably during smouldering of spruce wood.
- ▶ But the influence of fire accelerants is barely detectable and causes mainly a time shift of the characteristic values like specific optical density and emission of smoke gases.
- ▶ The evidence of fire accelerants can be achieved, but it is critically dependent on the sampling technique, the storage conditions and especially the storage time.



Investigations on particle and smoke gas composition during smouldering of spruce wood

Krüger, S., Piechotta, Ch., Fettig, I., Deubel, J.H., Raspe, T., Seeger, S., Rothardt, M.
 BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 7.3, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin

Introduction

- ▶ The assessment of scorch marks and the reconstruction of the fire development are based on the precise chemical analysis of combustion products.
- ▶ In this study the impact of different parameters (such as irradiance, irradiation time, smouldering with and without additional flame, kind and amount of additional fire accelerants) on spruce wood samples during smouldering were investigated.
- ▶ The aim of this work was to develop an innovative methodology, such as available analysis techniques can be combined in an appropriate way to draw conclusions from the solid, liquid and gaseous fire residues on the fire development.

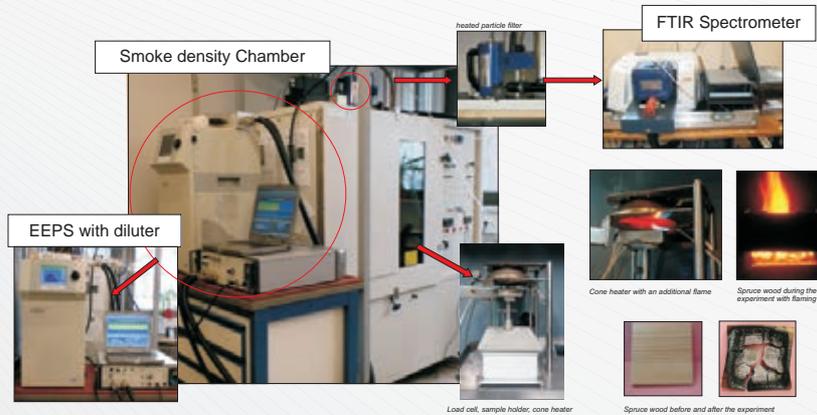


Figure 1: Experimental set up.

Method

- ▶ The specimens with additional accelerants (benzine, spirit, etc) were exposed to an ignition source in a closed test chamber (SDC, according to DIN EN ISO 5659-2, fig. 1).
- ▶ During the smouldering procedures under controlled ventilation conditions the sample mass were continuously measured, thus, giving the weight loss vs. time.
- ▶ In addition, the transmission and the optical density of the smoke gases were determined. Furthermore a mobile FTIR-spectrometer, which offers the advantage to measure components of smoke gases continuously, was directly coupled with the chamber.
- ▶ The resulting particles were investigated according to their particle size distribution during the smouldering in the Smoke Density Chamber using an Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS).

Results

- ▶ The smoke evolution (transmission, specific optical density) and mass loss showed differences regarding the varied conditions like irradiance, irradiation time, with and without additional flame, kind of wood and the use of a fire accelerant (fig.3-4, tab.2). But the influence of oxygen availability and the influence of the kind and the amount of additional fire accelerants to the smoke evolution are barely detectable (fig.5).
- ▶ The qualitative and quantitative smoke gas composition also dramatically depend on combustion conditions like irradiance, irradiation time, with and without additional flame and the wood material (spruce wood, glued spruce wood, particle board), (see fig.3, tab.1,3). In contrast the influence of additional accelerant to the smoke gas composition is insignificant and only causes a small time shift in emission (fig.5).
- ▶ The particle number size distribution and the particle number concentration during smouldering of spruce wood dramatically varied with or without additional flaming (fig.2). While two particle modes at 190 nm and 80 nm were produced during smouldering without flame, only smaller particles at 34 nm were formed during smouldering with an additional flame. In contrast to the experiments without additional flaming, there are fewer and smaller particles during the smouldering with additional flame. Furthermore, there was no formation of agglomerates.

Conclusion

- ▶ The impact of irradiance, irradiation time and an additional flame to smoke gases and particle emissions is clearly detectably during smouldering of spruce wood.
- ▶ But the influence of fire accelerants is barely detectable and causes mainly a time shift of the characteristic values like specific optical density and emission of smoke gases.

▶ Influence of an additional flaming

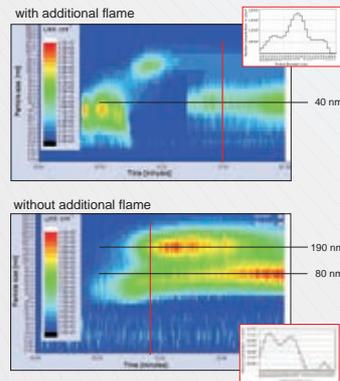


Figure 2: Time dependent particle number size distribution during smouldering (25 kW/m², with and without flame) of spruce wood.

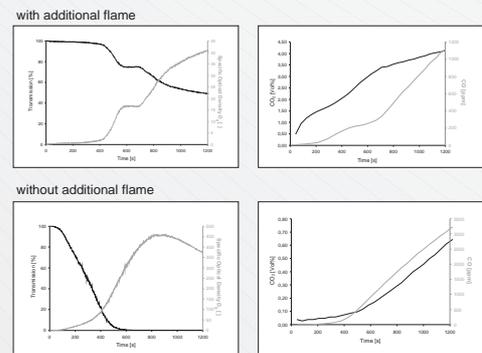


Figure 3: Transmission and specific optical density (left) and emission of carbon dioxide and carbon monoxide (right) during smouldering (25 kW/m² with and without flame) of spruce wood.

Pilot flame	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₂ O	C ₂ H ₂ O	C ₆ H ₆ O	HCN
with flaming	21500	156	9	4	0	21	6	2	10
without flaming	2000	1299	177	14	10	128	53	13	7

Table 1: Maximum concentration [ppm] of smoke gas components during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood: Influence of additional flaming.

▶ Influence of irradiation time

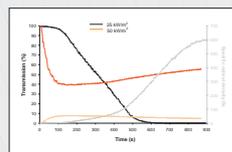
Time [s]	Mass loss [%]	D _{max} [l]	Time to D _{max} [s]	MOD [m ² /kg]
300	4,5	27,86	300	59,4
600	26,4	400,87	601	220,6
900	38,2	625,89	894	216,6
1200	51,83	604,04	878,0	113,1

Table 2: Characteristic values during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood according to DIN EN ISO 5659-2: Influence of irradiation time.

Time [s]	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₂ O	C ₂ H ₂ O	C ₆ H ₆ O	HCN
300	500	26	1	6	4	31	-	2	3
600	2000	1299	177	14	10	128	53	13	7
900	3800	2563	425	29	21	216	86	24	7
1200	6300	3670	654	44	25	212	72	25	10

Table 3: Maximum concentration [ppm] of smoke gas components during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood: Influence of irradiation time.

▶ Influence of irradiation



Irradiance [kW/m ²]	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₂ O	C ₂ H ₂ O	C ₆ H ₆ O	HCN
25 kW/m ²	6300	3670	654	44	25	212	72	25	10
50 kW/m ²	30700	798	124	18	0	9	3	13	8

Table 3: Maximum concentration [ppm] of smoke gas components during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood: Influence of irradiance.

Figure 4: Transmission and specific optical density during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood as a function of irradiance.

▶ Influence of accelerants

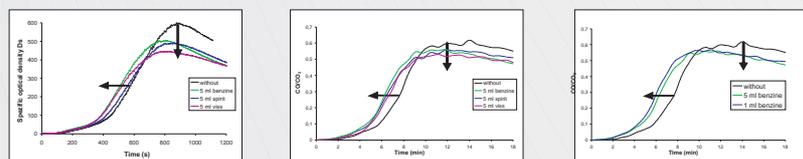


Figure 5: Specific optical density (left) and the ratio of CO:CO₂ ratio (middle) during smouldering (25 kW/m²) of spruce wood with additional 5 ml of different accelerants (middle) and various amounts of benzene accelerant (right).



Chemische Brandspurenanalytik - Nachweis von Benzin in Brandrückständen

I. Fettig, Ch. Piechotta, S. Krüger, J. Deubel, D. Riexinger, T. Raspe, I. Nehls

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Richard-Willstätter-Str. 11, D-12489 Berlin

Einleitung

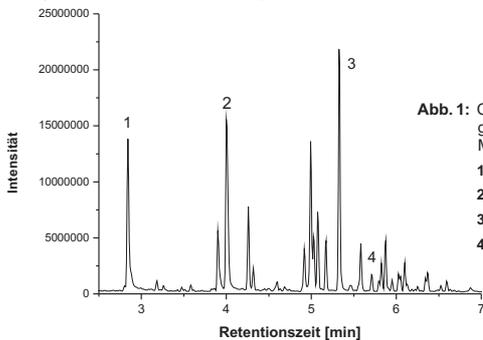
- Im Fall einer möglichen Brandstiftung ist der gesicherte Nachweis von Brandbeschleunigern in Brandrückständen von großer Bedeutung.
- Der Brandrückstand enthält - aufgrund der hohen Temperaturen während des Brandes - meist nur noch Spuren des verwendeten Brandbeschleunigers.
- Die Beurteilung von Brandspuren und Brandrückständen zur Rekonstruktion des Brandverlaufes beruht auf dem Einsatz einer nachweisstarken und präzisen Analyse der Brandprodukte.

Ziel

- Entwicklung einer Headspace(HS)-SPME-GC-MS-Methode zum Nachweis von Benzin in Brandrückständen und Anwendung der Methode auf Brandrückstandsproben aus dem Cone-Kalorimeter und der SDC-Kammer.

Experimenteller Teil

- SPME-Methodenentwicklung:** mit Benzin dotierte Holzkohle-Proben wurden unter Variation der Messbedingungen (Agitatortemperatur, Inkubations-, Extraktionszeit) mittels GC-MS analysiert.



- Bestrahlung** der mit Benzin dotierten Span-Proben in der SDC-Kammer (DIN EN ISO 5659-2) und im modifizierten Cone-Kalorimeter (ISO 5660-1).
- Anschluss eines 13-stufigen **Kaskadenimpaktors** an die SDC-Kammer zur Untersuchung der Partikel, die während der Bestrahlung entstehen.



Abb. 2: SDC-Kammer



Abb. 3: Cone-Kalorimeter



Abb. 4: Kaskadenimpaktor

Methodenparameter:

GC	: Shimadzu GC 2010
Detektion	: Shimadzu QP 2010 Plus mass spectrometer
Ionisierung	: EI, 70 eV
Säule	: Agilent DB-5MS (25 m x 0.25 mm x 0.25 µm)
	: 50°C(2 min)/(20°C/min)/110°C/(30°C/min)/310°C(1 min)
Trägergas	: Helium, 1.6 mL/min
SPME-Faser	: Supelco DVB/CAR/PDMS 50/30 µm

Ergebnisse und Diskussion

Optimale Messbedingungen der HS-SPME-Methode für Benzin:

- Agitatortemperatur: 50°C
- Inkubationszeit: 5 min
- Extraktionszeit: 30 min

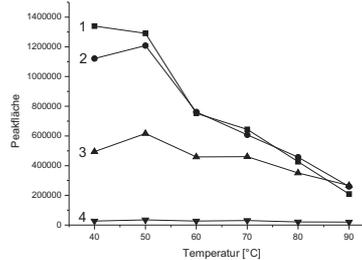


Abb. 5: Einfluss der Agitatortemperatur auf die Peakflächen

- 1 Toluol
- 2 m-, p-Xylol
- 3 Trimethylbenzol
- 4 Indan

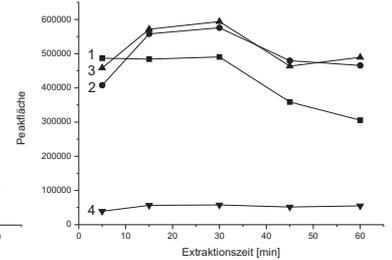


Abb. 6: Einfluss der Extraktionszeit auf die Peakflächen

- 1 Toluol
- 2 m-, p-Xylol
- 3 Trimethylbenzol
- 4 Indan

Gelungener Nachweis von Benzin auf Brandrückstandsproben aus dem Cone-Kalorimeter:



Abb. 7: Entnahme einer Brandrückstandsprobe für die SPME-Analyse

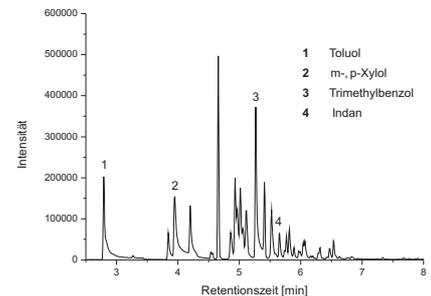


Abb. 8: MIC-Chromatogramm (m/z 91, 105, 117) einer Brandrückstandsprobe (1 mL Benzin, 10 min mit 25 kW/m² bestrahlt)

Kaskadenimpaktor:

- es konnten keine reinen Partikel erhalten werden
- gelungener Nachweis von Benzin auf Impaktionsplatten aus dem Kaskadenimpaktor



Abb. 9: Impaktionsplatte der 3. Stufe

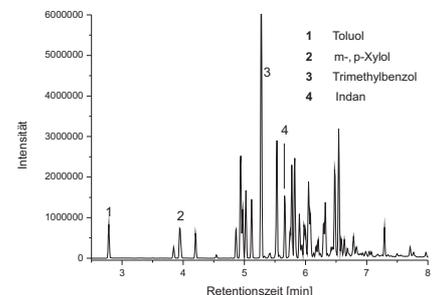


Abb. 10: MIC-Chromatogramm (m/z 91, 105, 117) einer Impaktionsplatte

Ausblick

- HS-SPME-GC-MS-Methodenentwicklung für weitere Brandbeschleuniger (Spiritus, Diesel, etc.).
- Anwendung der entwickelten Methode an Brandrückstandsproben aus Realbränden.
- Entwicklung einer Arbeitsanweisung für den Nachweis von Brandbeschleunigern in festen Brandrückstandsproben und aus Kondensatproben.

Chemische Brandspurenanalytik – Nachweis von Benzin und Diesel in Brandrückständen bei einem Wohnzimmerbrand

I. Fettig, S. Krüger, J. H. Deubel, M. Werrel, T. Raspe, C. Piechotta

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Richard-Willstätter-Str. 11, D-12489 Berlin

Einleitung

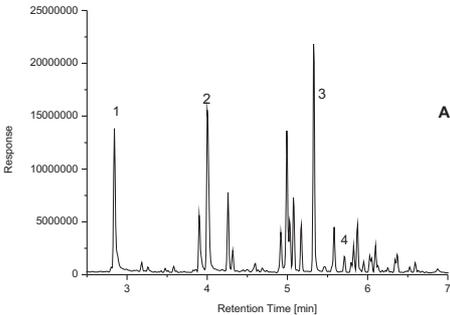
- Im Fall einer möglichen Brandstiftung ist der gesicherte Nachweis von Brandbeschleunigern in Brandrückständen von großer Bedeutung.
- Der Brandrückstand enthält - aufgrund der hohen Temperaturen während des Brandes - meist nur noch Spuren des verwendeten Brandbeschleunigers.
- Die Beurteilung von Brandspuren und Brandrückständen zur Rekonstruktion des Brandverlaufes beruht auf dem Einsatz einer nachweisstarken und präzisen Analyse der Brandprodukte.

Ziel

- Anwendung einer entwickelten HS-SPME-GC-MS-Methode für den Nachweis von Brandbeschleunigern in Brandrückstandsproben aus kontrollierten Raumbränden.

Experimenteller Teil

- SPME-Methodenentwicklung:** mit Benzin und Diesel dotierte Holzkohle-Proben wurden unter Variation der Messbedingungen (Agitatortemperatur, Inkubations-, Extraktionszeit) mittels GC-MS analysiert.



- Wohnzimmerbrandversuche:** In den Einrichtungen der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA) wurden fünf verschiedene Wohnzimmerbrandversuche durchgeführt. Die Modell-Zimmer wurden jeweils mit dem gleichen Mobiliar ausgestattet (Gesamtbrandlast 8.416 MJ). Als Brandbeschleuniger kam Benzin und Diesel (1:1) zum Einsatz.

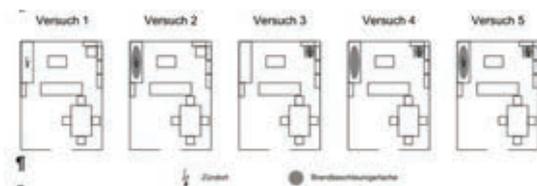


Abb. 2: Versuchsanordnung und Zündorte der fünf Raumbrandversuche

Methodenparameter:

GC	: Shimadzu GC 2010
Detektion	: Shimadzu QP 2010 Plus mass spectrometer
Ionisierung	: EI, 70 eV
Säule	: Agilent DB-5MS (25 m x 0.25 mm x 0.25 µm) 50°C(2 min)/(20°C/min)/110°C/(30°C/min)/310°C(1 min)
Trägergas	: Helium, 1,6 mL/min
SPME-Faser	: Supelco DVB/CAR/PDMS 50/30 µm

Ergebnisse und Diskussion

Optimale Messbedingungen der HS-SPME-Methode:

- Agitatortemperatur: 50°C (Benzin), 70°C (Diesel)
- Inkubationszeit: 5 min
- Extraktionszeit: 30 min

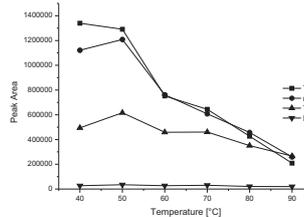


Abb. 3: Einfluss der Agitatortemperatur auf die Peakflächen von Benzin-Markerverbindungen

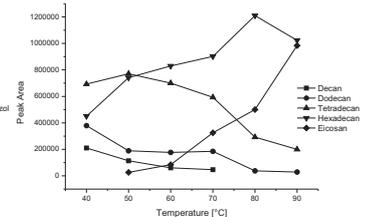


Abb. 4: Einfluss der Agitatortemperatur auf die Peakflächen von Diesel-Markerverbindungen

Probenahme:

Nach Auskühlen des Brandraumes (18 h nach Zündung) wurden im Brandraum Rückstandsproben gesichert. Es wurden auch Wischproben (Rußpartikel von der Wand) genommen.



Abb. 5: Brandraum vor der Zündung



Abb. 6: Brandraum nach der Zündung

Brandbeschleunigernachweis:

In einigen der Brandrückstandsproben konnte der verwendete Brandbeschleuniger eindeutig nachgewiesen werden. Auch in Wischproben gelang der positiver Nachweis.

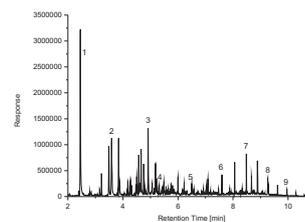


Abb. 7: GC-MS Chromatogramm einer Brandrückstandsprobe

1) Toluol (2) m-, p-Xylol, (3) Trimethylbenzol, (4) Indan, (5) Dodecan, (6) Tetradecan, (7) Hexadecan (8) Octadecan Co-Elution mit Phytan, (9) Eicosan.

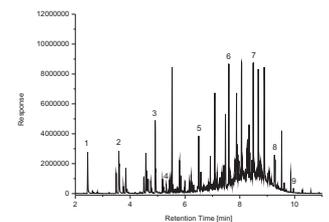


Abb. 8: GC-MS Chromatogramm einer Wischprobe

1) Toluol (2) m-, p-Xylol, (3) Trimethylbenzol, (4) Indan, (5) Dodecan, (6) Tetradecan, (7) Hexadecan (8) Octadecan Co-Elution mit Phytan, (9) Eicosan.

Ausblick

- HS-SPME-GC-MS-Methodenentwicklung für weitere Brandbeschleuniger (Spiritus, Lackverdünner, etc.).
- Weitere Experimente für den Nachweis von Brandbeschleuniger in Wischproben.
- Entwicklung einer Arbeitsanweisung für den Nachweis von Brandbeschleuniger in festen Brandrückstandsproben.

Danksagung

Gesellschaft für Materialforschung und Prüfanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA)

Literatur

- [1] I. Fettig, S. Krüger, J. H. Deubel, M. Werrel, T. Raspe, C. Piechotta. Evaluation of a Headspace Solid-Phase Microextraction Method for the Analysis of Ignitable Liquids in Fire Debris. J Forensic Sci. In Press.

Chemische Brandspurenanalytik - Methoden zum Nachweis von Brandbeschleunigern in Brandrückständen

Ch. Piechotta, S. Krüger, I. Fettig, J. Deubel, D. Riexinger, T. Raspe, I. Nehls

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Richard-Willstätter-Str. 11, D-12489 Berlin

Einleitung

- Die Beurteilung von Brandspuren und -rückständen mit der daraus abgeleiteten Rekonstruktion des Brandverlaufes beruht auf dem Einsatz einer nachweisstarken und präzisen chemischen Analyse der Brandprodukte
- Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Verwendung von Brandbeschleunigern zu legen. Eruiert werden soll hier, ob ein verwendeter Brandbeschleuniger direkte Auswirkungen auf ein Brandzenario hat und sich das Produktspektrum in den Brandspuren von dem unterscheidet, in dem beim Abbrand keine brandbeschleunigenden Verbindungen verwendet wurden. Im Sinne einer ganzheitlichen analytischen Betrachtung der am Brand beteiligten Stoffe sollen feste bzw. flüssige Brandrückstände, Aerosole, Partikel, Brandgase, sowie Kondensate unter der Maßgabe betrachtet werden, ob Spuren von verwendeten Brandbeschleunigern [1] nachgewiesen werden können

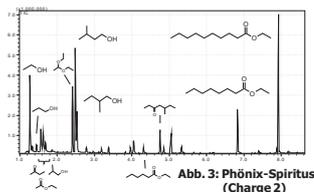
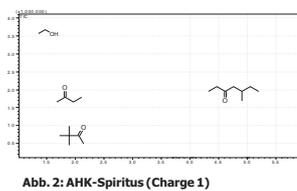
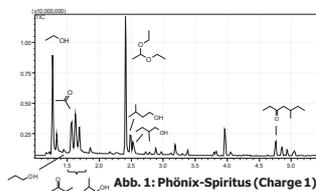
Ziel

Entwicklung und Evaluierung eines Verfahrens zur Bestimmung von Spiritus als Brandbeschleuniger in Brandrückständen. Zum Einsatz kommt hier die Headspace (HS)-SPME-GC-MS um Spuren des exemplarisch ausgewählten Brandbeschleunigers in Brandrückstandsproben verlässlich nachzuweisen.

Experimenteller Teil

SPME-Methode:

Zur Methodenentwicklung wurden drei verschiedene Spiritusformulierungen verwendet. Ca. 100 mg Holzkohle wurden mit 1 µL Spiritus versetzt und nach ca. 10 Minuten Einwirkzeit mit 2 mL Wasser überschichtet und mittels HS-SPME-GC-MS charakterisiert.



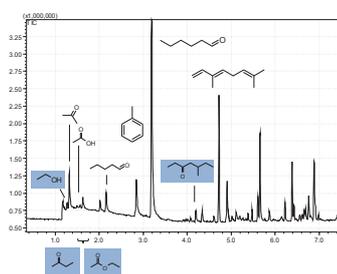
Methodenparameter:



GC : Shimadzu GC 2010
 Detektion : Shimadzu QP 2010 Plus mass spectrometer
 Ionisierung : EI, 70 eV
 Säule : Agilent DB-5MS (25 m x 0.25 mm x 0.25 µm)
 50°C(2 min)/(20°C/min)/110°C/(30°C/min)/310°C(1 min)
 Trägergas : Helium, 1.6 mL/min
 SPME-Faser : Supelco DVB/CAR/PDMS 50/30 µm

Ergebnisse und Diskussion

- Optimierte HS-SPME-Bedingungen für die Erfassung von Spiritus:
 - Agitator Temperatur: 50°C
 - Inkubationszeit: 5 min (bei 50°C)
 - Extraktionszeit: 30 min (bei 50°C)
- Mit Hilfe der entwickelten HS-SPME-Methode lassen sich die exemplarisch ausgewählten Spiritusformulierungen eindeutig qualitativ nachweisen.



- Es zeigt sich bei der analytischen Charakterisierung von unverbranntem Holz mittels HS-SPME-GC-MS, dass einige für Spiritus typische Verbindungen als Blindwert vorhanden sind.



- Bestrahlung einer mit Spiritus dotierten Holzprobe in der SDC-Kammer (DIN EN ISO 5659-2).
- Es können mittels HS-SPME-GC-MS Bestandteile des Spiritus auch in verbrannten Holzproben nachgewiesen werden. Auch lassen sich typische Markerverbindungen für einen Holzbrand eindeutig charakterisieren.

Struktur	Verbindung	Struktur	Verbindung
	o-Cresol		Furfural
	o-Guaiacol		Furfurylalkohol
	p-Cresol		2-Furanon
	4-Ethylguaiacol		2-Hydroxy-1-methylcyclopenten-3-on
	(E)-Isoeugenol		

- Pyrolyseprodukte des Lignins und der Polysaccharide des Holzes

Ausblick

- HS-SPME-GC-MS-Methodenentwicklung für weitere Brandbeschleuniger (Benzin, Diesel, etc.).
- Anwendung der entwickelten Methode an Brandrückstandsproben aus Realbränden.
- Entwicklung einer Arbeitsanweisung für den Nachweis von Brandbeschleunigern in festen Brandrückstandsproben.
- Nachweis von Spiritus als Brandbeschleuniger in Löschwasser durch SPE-Anreicherung

Literatur

- [1] Baerncopf, J. M., McGuffin, V. L. and Smith, R. W., Association of Ignitable Liquid Residues to Neat Ignitable Liquids in the Presence of Matrix Interferences Using Chemometric Procedures. Journal of Forensic Sciences, no. doi: 10.1111/j.1556-4029.2010.01563.x

Investigations on the Detectability of Fire Accelerants after different Fire Scenarios in the Cone Calorimeter

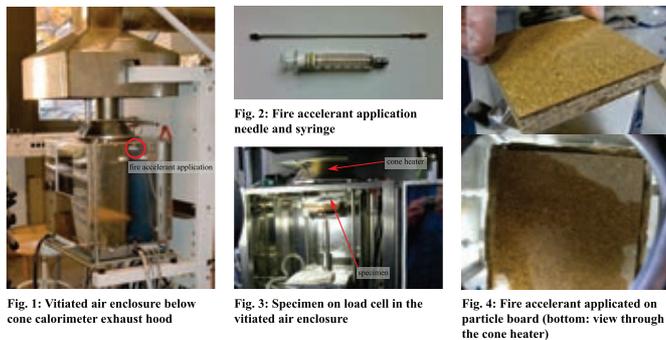
Jan H. Deubel, Ina Fettig, Martin Werrel, Simone Krüger and Christian Piechotta

BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany, jan.deubel@bam.de

Introduction

- Chemical analysis of fire debris is a common method in fire investigations. The aim of these analyses is the detection of fire accelerants to provide evidence in case of suspected arson. But the influence of the fire scenario on the detectability of fire accelerants is not well known. Examinations that deal with this subject are mostly focused on the analytical method [1] and work with less hard or undefined fire scenarios [2].
- In this study a well known and defined physical fire model was used to determine the fire accelerant detectability as a function of the fire scenario. The examined specimens were raw particle board (thickness 16 mm, furnishing applications), spruce wood (thickness 10 mm) and carpet (polyamide). Spirit, gasoline and diesel fuel were used as fire accelerants.

Method



- The fire scenarios were realized with the Cone Calorimeter (ISO 5660). The Cone Calorimeter was supplemented with a vitiated air enclosure (commercially available from FTT) that was fed with synthetic air (fig. 1).
- The fire accelerants (max. five milliliters) were applied with a syringe (fig. 2) on the specimen surface through a closable opening in the enclosure's side panel straight before the opening of the shutter. In some cases the specimens were saturated for 30 seconds in the fire accelerant instead of applying it with the injection. The fire accelerant mass fractions on the soaked specimen were around 10 % (particle board with spirit), 14 % (particle board with gasoline) and 42 % (carpet with gasoline). The specimens with the fire accelerant were exposed to heat fluxes of 25 and 50 kW/m² for one to five, ten and 15 minutes with and without electrical spark igniter.
- Samples (aliquotes) from the center of the specimens exposed surface were put into vials after the test (fig. 7). The gas phase in the vials was extracted by using a passive headspace technique (HS, fig. 5) or by headspace-solid phase microextraction (SPME, fig. 6). Afterwards the gas phase was analyzed in order to verify the fire accelerant with gas chromatography coupled to a mass spectrometer. The parameters of the chemical analysis are listed in table 1. The influence of water, covering the aliquot in the vial, on the accelerant detectability was also examined for the SPME-method.

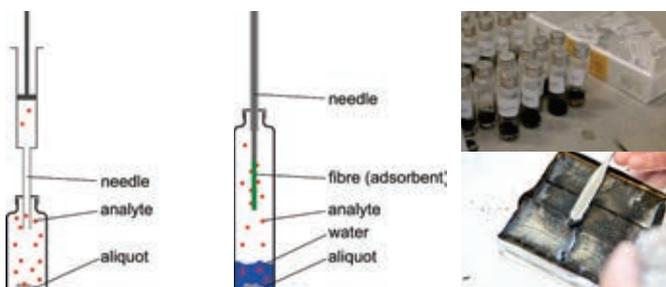


Fig. 5: Passive headspace

Fig. 6: Headspace-solid phase microextraction

Fig. 7: Aliquots in SPME-vials covered with parafilm (top), sampling of a wood aliquot (bottom)

Tab. 1: Parameters of the chemical analysis

gas chromatograph	Shimadzu GC 2010
detector	Shimadzu QP 2010 Plus mass spectrometer
ionization	EI, 70 eV
column	Agilent DB-5MS (25 m x 0.25 mm x 0.25 μm)
carrier gas	helium, 1.6 l/min
SPME-fiber	Supelco DVB/CAR/PDMS 50/30 μm

Results

- SPME is the more sensitive method and detects fire accelerants after more stringent fire scenarios than the passive headspace method (cf. fig. 8). Water covering improves the detection with the SPME-method.
- The reliable detection of any fire accelerant after a test duration of ten minutes only succeeded with particle board and SPME. No fire accelerant on any specimen was assuredly detectable after 15 minutes of exposure. It was not possible to detect all relevant components for a positive confirmation within sufficient intensity.
- Only diesel fuel and gasoline in combination with particle board were detectable after tests at 50 kW/m².
- The headspace method only succeeded at five-minute-tests with gasoline and diesel fuel on particle board and one and two minutes tests with carpet soaked with gasoline.
- The detection of fire accelerants on carpet was difficult in this study. This is due to the material composition of the carpet (polyamide) and its burning behavior. The carpet melts during the test and solidifies before the sampling. This can reduce the concentration of fire accelerant in the headspace even if bigger amounts of accelerant had been put on the carpet.
- The samples for the chemical analysis were taken at the location with the highest radiation impact. In practice the samples are also taken at locations where the fire accelerant was shielded from the fire, e.g. accelerant that flew under furnishing. Consequently this study represents stringent conditions for the fire accelerant detection.
- The detectability of fire accelerants strongly depends on the burnt material. The fire scenario and the amount of fire accelerant are further important influences.

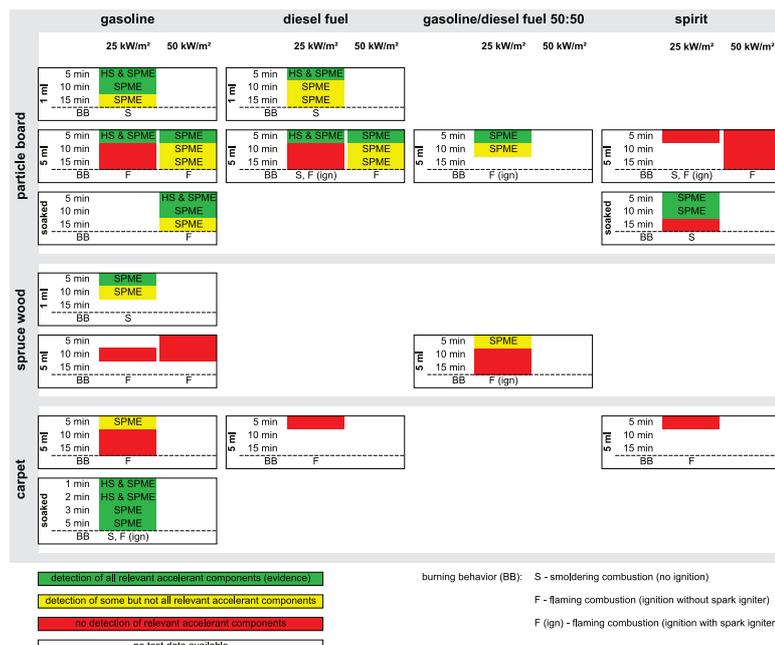


Fig. 8: Overview of the detectability of fire accelerants on different substrates and the burning behavior

Literature

- [1] Ahmad, Umi K.; Voon, Chin K.: Detection of Accelerants in Fire Debris using Headspace Solid Phase Microextraction-Capillary Gas Chromatography. Malaysian Journal of Analytical Sciences 7 (2001), Nr. 1, p. 57 – 63
- [2] Borusiewicz, R.; Zieba-Palus, J.; Zadora, G.: The influence of the type of accelerant, type of burned material, time of burning and availability of air on the possibility of detection of accelerants traces. Forensic science international 160 (2006), p. 115 – 126

Berechnung der Wärmefreisetzungsrate bei Raumbränden mittels Sauerstoffverbrauchskalorimetrie



Jan H. Deubel, Martin Werrel, Simone Krüger, Tina Raspe

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, jan.deubel@bam.de

Einleitung

Zur Untersuchung des Einflusses von Brandbeschleunigern auf den Verlauf von Raumbränden wurden fünf Versuche durchgeführt. Die Brandlast war bei allen Versuchen identisch und entsprach mit zwei Sofas, einem Esstisch mit vier Stühlen, einem Couchtisch und fünf Regalen einem Wohnzimmer.

Die Brandlastdichte betrug 415 MJ/m².

Als Brandbeschleuniger wurde ein Gemisch aus Benzin und Diesel in Mengen zwischen einem halben und einem Liter verwendet.

Messtechnik

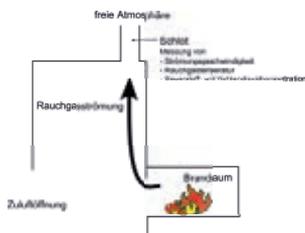


Abb. 1: Seitenansicht des Prüfstands mit Abzugsweg der Rauchgase und der Lage des Brandraums



Abb. 2: Blick von der Zuluftöffnung in den Prüfstand auf die Brandraumöffnung



Abb. 3: Blick von oben in den Schlot mit den bidirektionalen Sonden, den Gasnahmesonden und den Thermoelementen

Die Rauchgase ziehen durch natürliche Konvektion aus dem Brandraum durch den Schlot in die freie Atmosphäre ab.

Im Schlot wird die Rauchgastemperatur mit sechs Mantelthermoelementen, die Strömungsgeschwindigkeit mit sechs bidirektionalen Sonden und die Konzentration von Sauerstoff (paramagnetischer Sensor) und Kohlendioxid (Infrarotsensor) gemessen.

Eine Waage unter dem Brandraum misst die Masse der Brandlast.

Berechnung

Berechnung der Geschwindigkeit an den bidirektionalen Sonden [1,2]

$$v = CF^{-1} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot T}{\rho_{STP} \cdot T_{STP}}}$$

v	Geschwindigkeit an der bidirektionalen Sonde
CF	Kalibrierfaktor (1,06)
Δp	gemessene Druckdifferenz
T	gemessene Fluidtemperatur
ρ_{STP}	Fluiddichte Normzustand (1,293 kg m ⁻³)
T_{STP}	Temperatur Normzustand (273,15 K)

Berechnung des Massenstroms im Schlot

$$\dot{m} = C \cdot \bar{v} \cdot A \cdot \rho_{STP} \cdot \frac{T_{STP}}{T}$$

\dot{m}	Massenstrom durch den Schlot
C	Strömungsbeiwert (0,8)
\bar{v}	mittlere Geschwindigkeit im Schlot (Mittelwert der bidirektionalen Sonden)
A	Querschnittsfläche des Schlots (2,4 m ²)
T	mittlere Rauchgastemperatur im Schlot (Mittelwert der Thermoelemente)

Der Strömungsbeiwert berücksichtigt den Einfluss der Öffnungsgeometrie auf den Massenstrom. Er wurde mittels numerischer Simulation der Strömung durch den Schlot mit dem Fire Dynamics Simulator (FDS 5.5.3) in einer Parameterstudie ermittelt.

Berechnung der Wärmefreisetzungsrate [3,4]

$$\dot{q} = E \frac{\Phi}{1 + \phi X_{O_2}^A (\beta - 1)} \dot{m} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}) X_{O_2}^A$$

$$\phi = \frac{X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^A) - X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^A)}{(1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A) X_{O_2}^A}$$

\dot{q}	Wärmefreisetzungsrate
E	Wärmefreisetzungsrate pro verbrauchter Sauerstoffmasseeinheit (13,1 MJ/kg _{O₂})
Φ	Sauerstoffverbrauchsfaktor
β	stöchiometrischer Verdünnungsfaktor (1,5)
M_{O_2}	Molare Masse Sauerstoff
M_a	Molare Masse Luft
X_{H_2O}	Wasserdampfkonzentration in der Zuluft
$X_{CO_2}^A$	Molanteil Kohlendioxid im Rauchgas (Schlot)
$X_{O_2}^A$	Molanteil Sauerstoff im Rauchgas (Schlot)
$X_{CO_2}^{A0}$	Molanteil Kohlendioxid in der Zuluft
$X_{O_2}^{A0}$	Molanteil Sauerstoff in der Zuluft

Ergebnisse

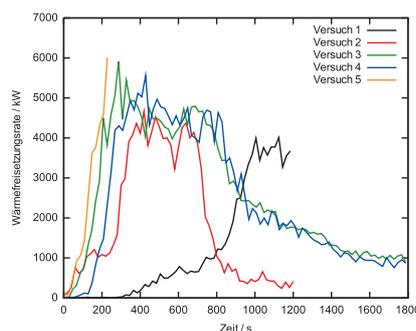


Abb. 4: Berechnete Wärmefreisetzungsrate der fünf Versuche, die Darstellung endet mit dem Versuchsabbruch durch Löschen

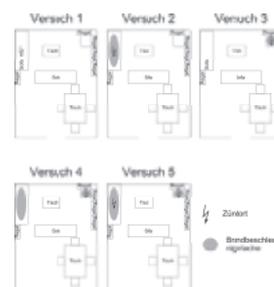


Abb. 5: Szenarien

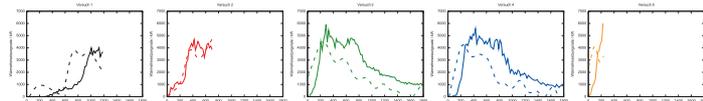


Abb. 6: Vergleich der mittels Sauerstoffverbrauchsmethode berechneten Wärmefreisetzungsrate (durchgezogene Linien) mit dem Produkt aus der Massenverlustrate und dem mittleren Heizwert der Brandlast (Strichlinien)

Die Sauerstoffverbrauchskalorimetrie wurde zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate von Raumbrandversuchen erfolgreich angewendet.

Visuelle Beobachtungen zum Brandverlauf werden durch kalorimetrische Messungen unterstützt: Die Zuwendung mit Brandbeschleuniger führt zu einem schnelleren Brandverlauf.

Bei einer langsamen Brandentwicklung (Versuch 1) und in der Brandentwicklungsphase (Versuch 3 bis 5) wird die Wärmefreisetzungsrate mit der Sauerstoffverbrauchsmethode mit einem zeitlichen Verzug bestimmt (vgl. Abb. 6). Grund ist die Abkühlung und Verdünnung des Rauchgases zwischen der Brandraumöffnung und der Messstelle im Schlot.

Literatur

- [1] McCaffrey, B.J.; Heskestad, G.: A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application. In: Combustion and Flame 26 (1976), S. 125-127
- [2] Kraul, Alexander: Experimentelle Untersuchungen zur Kalibrierung bidirektionaler Sonden. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Hochschule Magdeburg Stendal, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Bachelorarbeit, 2009
- [3] Janssens, Marc L.: Measuring rate of heat release by oxygen consumption. In: Fire Technology 27 (1991), Nr. 3, S. 234-249
- [4] Babrauskas, Vytenis (Hrsg.); Grayson, Stephen J. (Hrsg.): Heat Release in Fires. London, New York: Elsevier Applied Science, 1992