



**VST**

**FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-  
UND SYSTEMTECHNIK**



Otto von Guericke Universität Magdeburg  
Institut für Apparate- und Umwelttechnik  
Lehrstuhl Anlagentechnik und Anlagensicherheit  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
7.5 Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen  
Raumbrände und Brandverhalten von Baustoffen  
Dr.-Ing Anja Hofmann-Böllinghaus

## **ABSCHLUSSBERICHT ZUM ZVEI-FORSCHUNGSVORHABEN „BRANDFRÜHSTERKENNUNG“**

Projekt: Ermittlung von Brandindikatoren in Vorstufen der Brandentstehung von Bauprodukten, Industriegütern und Gebrauchsgegenständen als Grundlage für neue Methoden der Brandfrühsterkennung

Kurztitel: Brandfrühsterkennung

Datum: November 2016

Bearbeiter: M.Sc. Marco Trott, OvGU  
Dipl.-Chem. Tanja Gnutzmann, BAM



Inhalt	
Projektbeschreibung .....	6
1. AP 1 – Literaturrecherche .....	7
1.1. Emissionen in verschiedenen Brandphasen .....	7
1.2. Detektion von Brandemissionen .....	14
1.3. Exposition mit starken Zündquellen .....	15
1.4. Zusammenfassung .....	16
2. AP 2 – Probengewinnung, Probenvorbereitung und Probencharakterisierung .....	17
2.1. Probenauswahl und Probengewinnung .....	17
2.2. Kabel und Leitungen .....	18
2.3. Elektrogeräte .....	20
2.4. Organische Dämmstoffe .....	21
2.5. Probenaufbereitung für das Arbeitspaket 3 .....	23
2.6. Probenaufbereitung für die Arbeitspakete 4 und 5 .....	24
2.7. Probencharakterisierung .....	25
3. AP 3 – Untersuchung thermischer Zersetzungsvorgänge .....	26
3.1. SEDEX-Versuchsapparatur .....	26
3.2. Simultane thermische Analyseapparatur .....	28
3.3. Auswertung .....	28
3.3.1. Kabel und Leitungen .....	29
3.3.1.1. H07V-K .....	29
3.3.1.2. NHXH-J E90 .....	30
3.3.1.3. (N)HXHX-J FE 180/E 90 .....	31
3.3.1.4. H05RN-F .....	32
3.3.1.5. NHXMH-j .....	32
3.3.1.6. NYM-j .....	33

3.3.1.7.	NYJ-J.....	34
3.3.1.8.	MegaLine F6-90 S/F .....	34
3.3.2.	Organische Dämmstoffe.....	35
3.3.2.1.	Polyurethan.....	35
3.3.2.2.	Polyurethan (schwer entflammbar) .....	36
3.3.2.3.	Polystyrol.....	36
3.3.3.	Elektrische Haushaltsgeräte.....	37
3.3.3.1.	Kaffeemaschine.....	37
3.3.3.2.	TFT-Monitor.....	37
3.3.3.3.	Wasserkocher .....	38
3.3.3.4.	Staubsauger.....	38
3.4.	Zusammenfassung .....	39
4.	AP 4 – Schwel- und Glimmbrandversuche .....	43
4.1.	Versuchsapparatur - Vitiated Mass Loss Calorimeter .....	43
4.2.	Auswertung.....	46
4.2.1.	Kabel und Leitung.....	49
4.2.1.1.	H05RN-F.....	50
4.2.1.2.	H07VK.....	52
4.2.1.3.	NYM-J.....	54
4.2.1.4.	NYJ .....	56
4.2.1.5.	MegaLine.....	58
4.2.1.6.	(N)HXH.....	59
4.2.1.7.	(N)HXHX .....	61
4.2.1.8.	(N)HXMH .....	63
4.2.2.	organische Dämmstoffe.....	65

4.2.2.1. Polyurethan, rein.....	65
4.2.2.2. Polyurethan, schwerentflammbar.....	67
4.2.3. Elektrische Haushaltsgeräte.....	69
4.2.3.1. Drucker.....	69
4.2.3.2. Monitor.....	71
4.2.3.3. PC, Computer-Tower.....	72
4.2.3.4. Kaffeefullautomat.....	74
4.2.3.5. Staubsauger.....	76
4.2.3.6. Kaffeemaschine.....	77
4.2.3.7. Wasserkocher.....	79
4.3. Zusammenfassung.....	81
5. AP 5 - Versuche bei flammender Verbrennung.....	90
5.1. Versuchsaufbau: Single-Burning-Item-Test-Kammer.....	90
5.2. Auswertung.....	93
5.2.1. Organische Dämmstoffe.....	94
5.2.1.1. Polyurethan, rein.....	94
5.2.1.2. Polyurethan, schwerentflammbar.....	95
5.2.1.3. Polystyrol (Styrodur).....	97
5.2.2. Elektrische Haushaltsgeräte.....	98
5.2.2.1. Drucker.....	98
5.2.2.2. Kaffeemaschine.....	99
5.2.2.3. Staubsauger.....	100
5.2.2.4. Wasserkocher.....	101
5.3. Zusammenfassung.....	102
6. Zusammenfassung der Projektergebnisse.....	104

Anhang A	Elementaranalysen .....	109
Anhang B	ATR-Messungen - Auswertung und Spektren .....	121
Anhang C	Kalibrierpunkte des FTIR Dx-4000.....	141
Anhang D	Querempfindlichkeiten des FTIR Dx-4000.....	142
Anhang E	Auswertung der SEDEX- und STA-Untersuchungen .....	143
Anhang F	Quellenverzeichnis.....	188
Anhang G	Ergebnisse der Versuche bei flammender Verbrennung (AP 5).....	191
Anhang H	Ergebnisse der Versuche bei schwelender Verbrennung (AP 4) .....	214

## Projektbeschreibung

Die Detektion von Bränden erfolgt heutzutage überwiegend durch Brandmelder die auf die Kenngrößen Rauch bzw. Wärmestrahlung ansprechen. Da diese Parameter erst in einer verhältnismäßig späten Phase der Brandentwicklung auftreten und zuverlässig messbar sind, besteht in der Industrie und Versicherungswirtschaft ein erhebliches Interesse Methoden zu entwickeln, die eine frühere Branderkennung erlauben und dadurch aktiv zu einer Personen- und Sachschadensminimierung beitragen.

Ein Ansatz ist die Detektion von Brandgasen, die bei Zersetzungsprozessen emittiert werden, noch bevor Flammen oder Rauch auftreten. Das Forschungsprojekt „Brandfrühsterkennung“ greift diesen Ansatz auf und versucht die Emissionen relevanter Brandstoffe zu erfassen und daraus effiziente Messmethoden für eine frühestmögliche Detektion von unerwünschten Schadfeuern abzuleiten.

Das Projekt wird durch die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) gemeinschaftlich durchgeführt und gliedert sich in mehrere Arbeitspakete (AP). Zunächst erfolgt eine Literaturrecherche zu den Themen Emissionen in verschiedenen Brandphasen sowie deren Detektion. Im AP2 wird anschließend die Probenauswahl, Probengewinnung sowie Probencharakterisierung für die geplanten Versuche beschrieben.

Die Arbeitspakete 3,4 und 5 dokumentieren die durchgeführten Untersuchungen der unterschiedlichen Brandphasen Aktivierung und thermische Zersetzung, Schmel- und Glimmbrand sowie flammende Verbrennung. Eine Unterscheidung ist erforderlich, da jede von ihnen charakteristische Eigenheiten in der Emission von Gasen und Strahlung aufweist, deren Kenntnis für eine optimale Branddetektion notwendig ist. Durch die erhobenen Messdaten ist es möglich, Kriterien für Branddetektoren zu definieren, um mit ihnen eine frühestmögliche Branderkennung zu erreichen.

## 1. AP1 – Literaturrecherche

Dieses Kapitel beschreibt die zu Beginn des Forschungsvorhabens durch die OvGU durchgeführte ausführliche Literaturrecherche zu den Themen Emissionen in verschiedenen Brandphasen sowie deren Detektion.

### 1.1. Emissionen in verschiedenen Brandphasen

Ein wichtiges Werkzeug zur frühen Branddetektion ist die Analyse der bei der thermischen Aufbereitung von Materialien freigesetzten Pyrolysegase. Der Fokus vieler bisheriger Untersuchungen lag nahezu ausschließlich auf den Phasen des Schwel- oder Flammenbrandes, so dass dafür bereits eine fundierte Datenlage in der Literatur zu finden und in Standardwerken zusammengefasst ist, Babrauskas [1], SFPE [2]. Für die früheste Brandphase, die durch Aktivierung und thermische Zersetzung der Stoffe geprägt ist, existieren weitaus weniger Quellen.

Die Ursache dafür liegt darin, dass die im Brandverlauf sehr frühen, d. h. bei verhältnismäßig geringen Reaktionstemperaturen (ab etwa 150 °C bis etwa 400 °C) auftretenden chemischen Reaktionen in den Brandstoffen bisher nicht eingehend beachtet wurden. Im Folgenden soll eine Übersicht über einige relevante Literaturstellen gegeben werden.

Neben der Brandgasanalyse stellt die quantitative Erfassung und Auswertung elektromagnetischer Strahlung, die bei der Zersetzung der Brandstoffe freigesetzt wird, eine weitere Methode zur Detektion von Indikatoren von Brandvorläuferreaktionen dar. Die Untersuchungen des Forschungsvorhabens sollen daher nicht nur Korrelationen zwischen Stofftemperatur und Gaskonzentrationen erfassen und tabellieren, sondern auch kalorimetrische und optische Parameter zuordnen.

Ein großer Bestandteil moderner Bauwerke sowie von Komponenten der IT-Infrastruktur, Gebäudeausrüstung und Einrichtungsgegenständen sind Kunststoffe. Hierbei spielen vor allem Polymerwerkstoffe eine führende Rolle. Die häufigsten Vertreter sollen im Folgenden kurz unter dem Gesichtspunkt ihres Anwendungsfeldes aufgezeigt werden.

Sehr verbreitet ist Polyurethan (PUR), welches vor allem in Fassadendämmstoffen und Polstermöbeln verwendet wird. Des Weiteren finden sich große Mengen an Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE), vorzugsweise in Form von Rohrleitungen, Bauteilen elektronischer Geräte sowie als Grundstoff für eine Vielzahl von Haushaltsprodukten, wie Flaschen und Kunststofffolien.

Weitere wichtige Vertreter sind Polyvinylchlorid (PVC), welches ein Bestandteil vieler Bodenbeläge, Bauprodukte und Kabelisolierungen ist, sowie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) als einer der häufigsten Kunststoffe in Gehäusen von Elektrogeräten und IT-Komponenten.

Es existieren einige Untersuchungen, die die bei der Zersetzung und Verbrennung freiwerdenden gasförmigen Bestandteile qualitativ erfassen. Eine gute allgemeine Übersicht über die Zersetzungsprodukte von Kunststoffen liefert der Bericht „Beurteilung von Kunststoffbränden“ des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz aus dem Jahr 1995 [3]. Darüber hinaus spezifiziert die Arbeit von Herrera et al. [4] die Hauptprodukte der Zersetzung von stickstoffhaltigen Verbindungen wie Polyamid, Polyurethan und Polyacrylnitril. Die Autoren benennen dabei vor allem Cyanwasserstoff (HCN), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) als die relevantesten Emissionen. Diese Stoffe konnten auch in anderen Arbeiten nachgewiesen werden. So zum Beispiel für Polyamid im EU-Forschungsprojekt PREFIRE-NANO [5]. Untersuchungen zu Polyurethan wurden unter anderem in den Arbeiten von Garrido [6] sowie Lingling [7] vorgenommen. In der Zeitschrift Schadenprisma, welche vom Verband der öffentlichen Versicherer herausgegeben wird, findet sich bereits im Jahr 1997 ein Artikel [4], in dem die häufigsten Brandfolgeprodukte Temperaturbereichen zugeordnet werden. Die Aussagen der Autoren sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Tabelle 1: Zuordnung verschiedener Pyrolyse- und Verbrennungsgase zu Temperaturzonen nach [4]

Temperaturbereich [°C]	Bildung von
100 - 300	H <sub>2</sub> O, HCN, H <sub>2</sub> S, Halogenwasserstoffe, Monomere aus Polymeren
300 - 400	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , Formaldehyd, Essigsäure, etc.
500 - 600	Kohlenwasserstoffe mittlerer Kettenlänge (C <sub>7</sub> - C <sub>10</sub> ), Benzol, Phenole, halogenierte Aromaten
400 - 700	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dioxine, etc.
> 800	CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>

Eine ausführliche Analyse der Pyrolyse- und Verbrennungsprodukte von Polyvinylchlorid findet sich in den Arbeiten von Aracil et al. [8] und Benes et al. [9]. Die Autoren stellen fest, dass es zu mehreren Zersetzungsreaktionen kommt. Im Temperaturbereich um 300 °C erfolgt die Dehydrochlorierung des PVC und es kommt zur Bildung von Chlorwasserstoff und Benzol sowie Phthalaten und Kohlenstoffdioxid, was auf die dem PVC beigemischten Füllmittel, wie CaCO<sub>3</sub> und andere Additive zurückgeführt wird. Bei weiterer Zuführung von Wärme kommt es außerdem zur Bildung von Toluol und kurzkettigen Kohlenwasserstoffen in relevanten Mengen. Im Gegensatz zu vielen anderen Polymerwerkstoffen, findet bei der Verbrennung von PVC nahezu keine Bildung von Kohlenstoffmonoxid statt. Dieser Fakt wurde auch in anderen Arbeiten belegt (vgl. Stec. et al. [10]).

Mischungen von Kunst- und Zusatzstoffen mit teilweise komplexen Zusammensetzung finden sich in Elektronikschrott, der in der modernen Gesellschaft in großen Mengen in Abfallsortieranlagen und Recyclingunternehmen anfällt. Auch für darin enthaltene Komponenten, die zu einem Großteil aus Leiterplatten bestehen, existieren Untersuchungen, wie die von Cafiereo et al. [11], Moltó et al. [12] oder Guan et al. [13]. Auch diese Artikel bestätigen die grundsätzliche Zusammensetzung der Pyrolysegase aus kurzkettigen Kohlenwasserstoffen, Benzol, Phenol und Styrol, Monomeren der Polymere sowie den typischen Produkten der vollständigen und unvollständigen Verbrennung.





Neben der Vielzahl bereits genannter Kunststoffe, spielen Holzwerkstoffe eine bedeutende Rolle in der industriellen und privaten Anwendung. Am häufigsten genutzt werden sie als Baustoffe für Gebäude und als Grundstoff vieler Möbel. Auch verwandte Stoffgruppen, wie Zellstoffe (z. B. Pressspan), werden als Isoliermaterial elektrischer Maschinen und Haushaltsgeräte eingesetzt. Ihnen gemeinsam ist die chemische Zusammensetzung aus den drei Hauptkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin, die - wie auch Fateh et al. [14] in ihrer Arbeit feststellen - zu einem dreistufigen Zersetzungsprozess der Stoffe führen.

Im Temperaturbereich von 200 °C bis 300 °C setzen erste Pyrolyseprozesse ein, die bei einer Luftatmosphäre zu einer Bildung von Isocyanensäure und Essigsäure führen. Außerdem konnten die Autoren die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methanol und Ameisensäure in unterschiedlichen Temperaturbereichen beobachten. Bei Temperaturen über 550 °C kam es zu Oxidationsvorgängen der nach der Pyrolyse übriggebliebenen Holzkohle, wobei CO, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O freigesetzt wurden. Bei einer Zersetzung unter Stickstoffatmosphäre konnten außerdem Formaldehyd, Methan und Cyanwasserstoff nachgewiesen werden.

Wie auch in der Arbeit von Moreno und Font [15] zeigt sich ein deutlicher Unterschied in den freigesetzten Pyrolysegasen, wenn die Untersuchungen in einer inerten Atmosphäre, wie Stickstoff oder Helium, durchgeführt werden. In der genannten Veröffentlichung untersuchen die Autoren Möbelholzabfälle, die im Gegensatz zu reinem Holz mit unterschiedlichen Zusatzmitteln versetzt sind. Hierzu zählen beispielsweise Flammschutzmittel oder Lacke. Es wurden dabei veränderte thermokinetische Parameter wie die Verschiebung der benötigten Aktivierungsenergie zu höheren Werten festgestellt, aber auch eine Produktion weiterer Gase, wie Ammoniak und Stickoxide.

Wie sich in der vorliegenden Recherche gezeigt hat, werden Untersuchungen zu Stofffreisetzungen in unterschiedlichen Brandphasen zumeist in Fachartikeln oder Übersichtsarbeiten präsentiert. Es existieren jedoch auch Dissertationsschriften unterschiedlicher Autoren, die sich mit der Bestimmung thermokinetischer Parameter und Zersetzungsprodukte befassen. Ein Beispiel ist die Arbeit von Witkowski [16], in der die Zersetzung von Polymerwerkstoffen wie Polyacrylnitril, Polypropylen sowie Ethylen-

Vinyl-Acetat mittels einer Kopplung aus Simultanthermischer Analyse (STA) und Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) untersucht wird. Des Weiteren hat Jiang [17] Untersuchungen für Möbelstoffe, wie Polyurethanschaum, Textilstoffe und Möbelholz, mittels Cone Calorimeter, STA, Single-Burning-Item Test (SBI) und weiteren Prüfmethoden durchgeführt.

Eines der umfangreichsten Werke im Zusammenhang mit Entzündungsvorgängen ist das Ignition Handbook [1] von Babrauskas. Dort beschreibt der Autor umfänglich das Entzündungsverhalten einer Vielzahl von Stoffen und geht dabei auch detailliert auf mögliche Ursachen für Brandentstehungen und die dabei zu berücksichtigenden Parameter ein. Weitere sehr umfangreiche Übersichtswerke zum Themenkomplex der Verbrennung von Kunststoffen und zellstoffartigen Stoffen sind das Plastics Flammability Handbook von Troitzsch [18] sowie das SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [2].

Speziell auf das Brandverhalten von Abfallstoffen und Gemischen solcher Stoffe waren Untersuchungen von Krüger et. al. [19], sowie Krause et. al. [20] gerichtet. Im sog. DIN-Rohr (einem Test zur Rauchentwicklung von Baustoffen, DIN 53436 [26]) wurden Proben verschiedener Abfallstoffe (Pappe/Papier, Holz, PVC, ABS, PUR, Abfälle aus dem Dualen System) Temperaturen von 200 °C bis 600 °C in Schritten von 100 K exponiert. Mittels eines Fourier-Transformierten-Infrarot-Spektrometers wurden Konzentrationen gasförmiger Reaktionsprodukte quantitativ gemessen.

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen Konzentrations-Zeit-Verläufe für Kohlenstoffmonoxid und Formaldehyd aus Papier/Pappe-Abfällen bei Exposition bei verschiedenen Temperaturen.

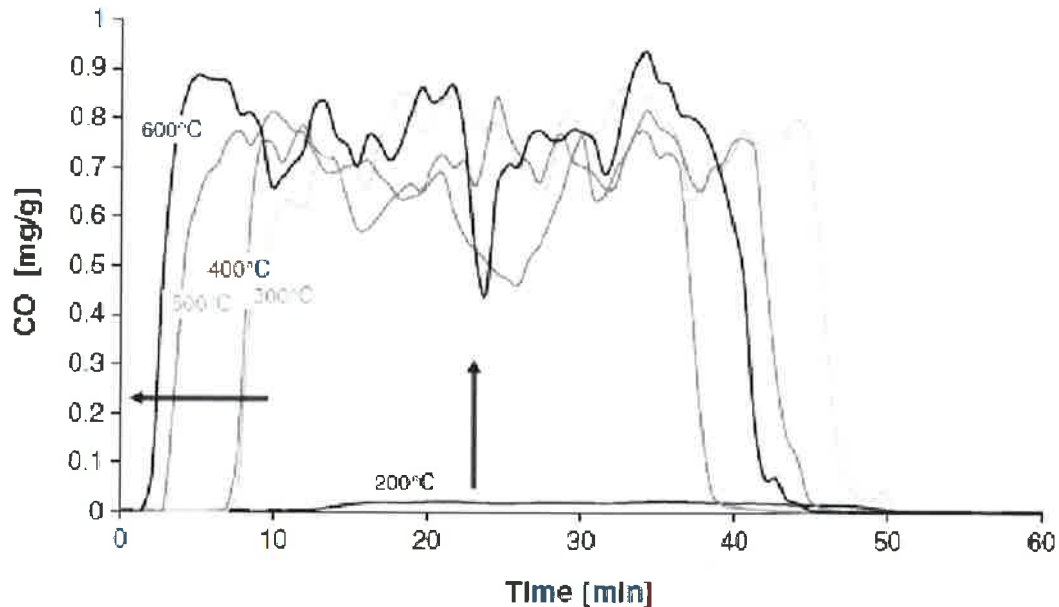


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid beim Verschwelen von Papier/Papper-Abfällen im DIN-Rohr bei verschiedenen Expositionstemperaturen (aus [19])

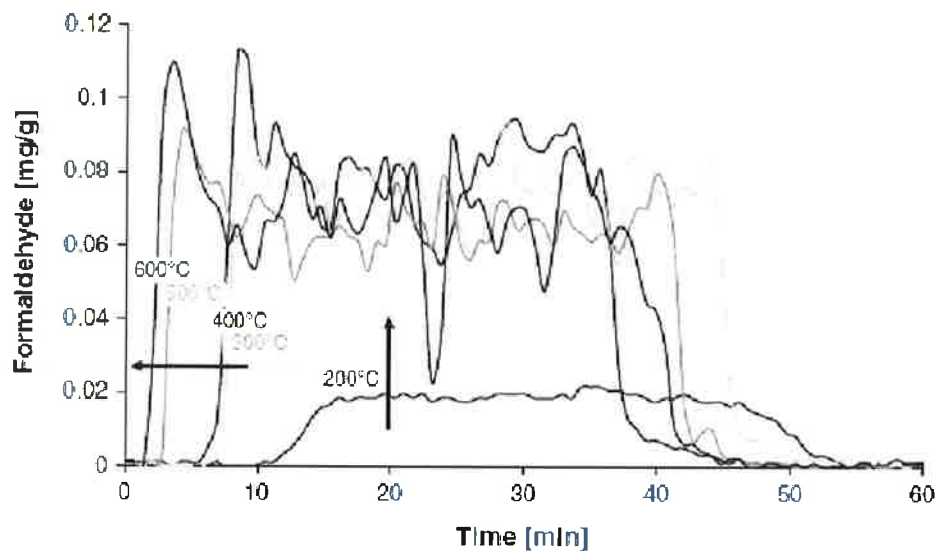


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Konzentration von Formaldehyd beim Verschwelen von Papier/Papper-Abfällen im DIN-Rohr bei verschiedenen Expositionstemperaturen (aus [19])

Krüger et. al. [19] konnten auch eine Korrelation dieser Emissionen mit der optischen Dichte des in dieser frühen Phase emittierten Rauches herstellen. Ein Beispiel für vier verschiedene Abfallfraktionen ist in Abbildung 3 dargestellt. Die dort gezeigten

Kurvenverläufe der Transmission beziehen sich auf eine Temperaturexposition der jeweiligen Proben im DIN-Rohr von 300 °C.

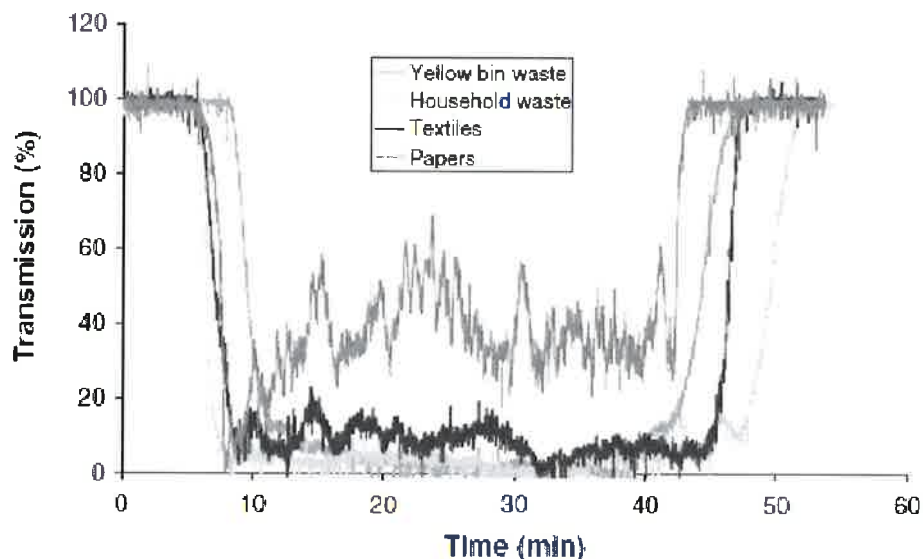


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Transmission bei Temperaturexposition von 300 °C verschiedener Abfallfraktionen im DIN-Rohr (aus [19])

Für die Erstellung dieser Literaturübersicht erfolgte eine Recherche in einer Vielzahl renommierter Fachjournale, die sich vornehmlich mit den Themen Pyrolyse und Verbrennungsvorgänge befassen. Nach einer umfangreichen Sichtung der dort publizierten Beiträge wurde eine Auswahl der für das Forschungsvorhaben relevanten Artikel getroffen. Die nachfolgende Tabelle 2 liefert eine Zusammenfassung der erfassten Journale mit Zuordnung der daraus zitierten Artikel zu den unterschiedlichen Stoffgruppen. Wie bereits erwartet, hat sich gezeigt, dass nur wenige Untersuchungen existieren, in denen gasförmige Produkte von Brandvorläuferreaktionen quantitativ erfasst und thermokinetische Parameter beschrieben wurden. Aufgefallen ist jedoch, dass mehrere Autoren die Pyrolyseprozesse spezieller chemischer Komponenten (z. B. Ammoniumperchlorat) betrachtet haben. Die dabei veröffentlichten Ergebnisse sind jedoch nur für einzelne, spezialisierte Unternehmen relevant, sodass auf eine Erwähnung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verzichtet wurde.

Neben Artikeln aus Fachzeitschriften sind im Anhang F auch weitere wissenschaftliche Arbeiten und Berichte zum angesprochenen Themenbereich aufgeführt.

Tabelle 2: Anzahl relevanter Artikel in Fachzeitschriften in Bezug auf Emissionen verschiedener Brandstoffe.

Journal	Kunststoffe	Zellstoffartige Produkte	Abfallstoffe
Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	5	2	
Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	2		
Thermochimica Acta	1		
Polymer degradation and Stability	1		
Fire and Materials	1		1
Materialprüfung			1

## 1.2. Detektion von Brandemissionen

Die Detektion von Bränden wurde über viele Jahrzehnte durch klassische Technologien, wie die optische Messung oder Ionisation der Atmosphäre sowie durch Auswertung elektromagnetischer Strahlung (Infrarotstrahlung), geprägt. Ein immer wieder auftretendes Problem dieser Sensoren ist ihre hohe Anfälligkeit für Falschalarme. Diese werden zumeist durch Staub oder Aerosolpartikel in der Umgebungsluft sowie durch Insekten hervorgerufen.

In den letzten Jahren konnte sich aufgrund der immer leichter und preiswerter herstellbaren Halbleitertechnik eine neue Methode etablieren, die darauf beruht Brandgase zu messen und so die Sensitivität für Störgrößen zu minimieren. Auch dafür existieren verschiedene technologische Ansätze, die in den Werken von Kohl und Wagner [21] und Comini et al. [22] umfänglich analysiert und diskutiert werden. Die wesentlichen Typen lassen sich dabei in Metalloxidsensoren, Feldeffekttransistor-Sensoren (FET) und optische Sensoren (Optoden) unterscheiden. Eine Untersuchung, welche Vor- und Nachteile die jeweiligen Typen in Bezug auf die Branddetektion besitzen, findet sich in den Artikeln von Hoefler und Gutmacher [23], [24].

Neben diesen Verfahren existieren auch aktuelle Forschung zur Nutzung fotoakustischer Spektroskopiemethoden für die frühe Detektion von Brandgasen [25].

### 1.3. Exposition mit starken Zündquellen

Eine der gebräuchlichsten Untersuchungsapparaturen für das Brandverhalten von brennbaren Stoffen ist das Cone-Kalorimeter nach ISO 5660 [27]. Bei diesen Tests wird eine Probe der Abmessungen 100 mm x 100 mm x 20 mm einer Strahlungswärmequelle von 25 kW/m<sup>2</sup> bis 75 kW/m<sup>2</sup> ausgesetzt. Gemessen werden die Volumenkonzentrationen von Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid sowie die Temperatur und der Volumenstrom im Rauchgaskanal. Die Wärmefreisetzungsrate (freigesetzte Reaktionswärme pro Zeit) wird aus den gemessenen Gaskonzentrationen nach der Sauerstoffverbrauchsmethode [1] berechnet. In Luft kommt es bei solchermaßen starken Zündquellen zu einem sehr schnellen Durchlaufen der Schwelphase und raschem Einsetzen der flammenden Verbrennung. Unter diesen Gegebenheiten eignet sich das Cone-Kalorimeter nicht für die Erfassung der frühen Brandphase. Wird jedoch durch einen zusätzlichen Aufbau das einströmende Stickstoff/Sauerstoff-Gemisch kontrolliert, so lassen sich durch Sauerstoffverarmung frühe Brandphasen gut abbilden.

Eine solche Versuchsanordnung („vitiated chamber“) wurde von Werrel et. al. verwirklicht [28]. Dadurch wurde es möglich, Wärmefreisetzungsraten und Volumenkonzentrationen der Reaktionsprodukte auch bei Sauerstoffanteilen im Frischgas von weniger als 21 % zu messen und somit Schwelbrandbedingungen gezielt zu simulieren. Die von Werrel et.al. [28] gewählte Versuchsanordnung ist in Abbildung 4 gezeigt.

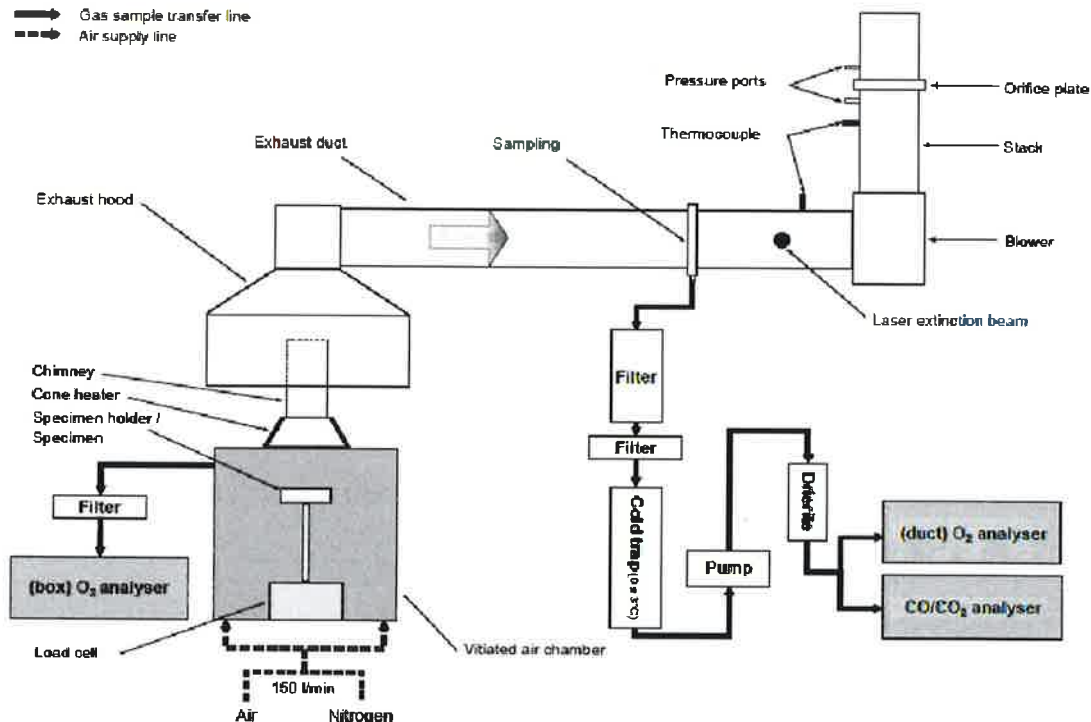


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Cone-Kalorimeters mit kontrollierter Gaszuführung („vitiated chamber“), (aus [28])

## 1.4. Zusammenfassung

Die Motivation des Vorhabens „Brandfrühsterkennung“ resultiert zum großen Teil aus dem Umstand, dass zu den Reaktionsverläufen in der frühesten Phase der Brandentwicklung nur punktuell Erkenntnisse publiziert sind. Zu unterscheiden ist dabei zwischen durch Fremdzündung und Selbstentzündung hervorgerufenen Bränden. Während für die Selbstentzündung z. B. von Schüttungen poröser Feststoffe relativ viele Untersuchungen verfügbar sind, ist dies für die frühe Brandphase unter Fremdzündung nicht der Fall. Die vorliegende Literaturlauswertung bezieht sich lediglich auf die Vorgänge mit Fremdzündung, da diese für die beabsichtigte Entwicklung der Detektionsmethoden maßgeblich sind.



## 6. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden Proben aus den Bereichen der elektrischen Leitungen, der IT- und Haushaltselektronik sowie der organischen Dämmstoffe hinsichtlich ihres Brandverhaltens in den Phasen der thermischen Aktivierung und Zersetzung, der Schwel- und Glimmbrandphase sowie der flammenden Verbrennung untersucht. Die gewonnenen Daten können dazu genutzt werden, um Detektoren zu entwickeln, die im Gegensatz zu herkömmlichen optischen Sensoren resistenter gegen Täuschungsalarme sind und Entstehungsbrände frühzeitig erkennen können.

Ein deutlicher Mehrwert für die Personensicherheit durch eine Brandfrühsterkennung liegt vor allem darin, dass toxische Gase erfasst werden können, die insbesondere bei Entstehungs- und Schwelbränden wesentlich eher auftreten als beispielsweise hohe Wärmestrahlungen einer flammenden Verbrennung. Bisher lag der Fokus hauptsächlich auf Kohlenstoffmonoxid als Leitkomponente für Rauchgasvergiftungen. Durch die gewonnenen Ergebnisse wird ersichtlich, dass dieses zwar keinesfalls unbedeutend ist, jedoch auch eine Vielzahl anderer toxischer Komponenten entstehen, die schon in geringen Volumenkonzentrationen tödlich wirken können und daher als geeigneten Detektionsgröße beachtet werden sollten.

Neben dem schon angesprochenen Kohlenstoffmonoxid, welches in allen Versuchen als relevantes Reaktionsgas nachgewiesen werden konnte, haben sich vor allem Chlorwasserstoff und Cyanwasserstoff als geeignete Detektorgase aller Brandphasen gezeigt. Diese sind vor allem deshalb interessant, weil ihre toxikologischen Grenzwerte etwa um den Faktor 10 niedriger sind als bei CO und sie dadurch eine höhere Gefährdung für Personen im Brandfall darstellen.

Neben der umfangreichen Erfassung von Reaktionsgasen ist ein weiteres Ergebnis dieses Projekts die Aufzeichnung von Daten, die das Reaktionsverhalten der Brandstoffe charakterisieren und daher als Grundlage für die Entwicklung von Verbrennungsmodellen genutzt werden können. Dies sind insbesondere die

Wärmeströme sowie die auftretende Masseabnahme im Zuge der thermischen Aufbereitung der Materialien.

Die gewonnenen Daten stellen einen ersten Schritt in der Erforschung von zukünftigen Sensortechnologien dar. Als nächste Maßnahmen sollte ein bedeutendes Augenmerk auf die Charakterisierung des Ausbreitungsverhaltens der Brandgase in Gebäuden gelegt werden. Hierbei muss vor allem der Einfluss von Geometrien und Strömungsbedingungen innerhalb von Räumen und Anlagen auf die Ausbreitung der Gase auf dem Weg zum Brandmelder untersucht werden. Dadurch können schlussendlich Empfehlungen für die Eignung und den Installationsort von Brandgasmeldern gegeben und Ansätze für die Weiterentwicklung bestehender Technologien entwickelt werden.