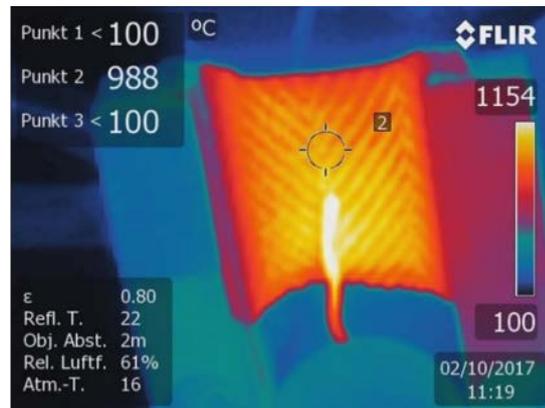


BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



BERICHTE

Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungsbrand im Labormaßstab

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

203

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE
VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und Zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 203

**Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei
reproduzierbarem Entstehungsbrand im Labormaßstab**

von

M. Sc. Dennis Augustin

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Dezember 2019

FA. Nr. 243 (1/2019)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: 203	Titel des Berichtes: Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungsbrand im Labormaßstab		ISSN: 0170-0060
Autor: M. Sc. Dennis Augustin		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 243 (1/2019)		Auftrag gebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: Dezember 2019			
Seitenzahl: 67	Bilder: 44	Tabellen: 7	Literaturverweise: 24
Kurzfassung:			
<p>Im vorliegenden Bericht werden Brandeigenschaften moderner und alter Möbel miteinander verglichen und im Bereich des Entstehungsbrandes untersucht. Dies geschieht für alle Materialien in geeigneten Versuchen im Labormaßstab.</p> <p>Die These: Moderne Möbel und entsprechende Raumausstattung führt zu kürzeren Brandentstehungsphasen und potentiell problematischeren Brandverläufen. Auf Grundlage der Laborversuche soll anschließend eine Modellbildung für die reproduzierbare Abbildung von Realbränden unter Benutzung modernen Mobiliars ermöglicht werden.</p> <p>Dazu wird zunächst eine geeignete Auswahl möglicher Materialien getroffen. Durch geeignete Vorversuche (Verbrennungskalorimeter, Labormaßstabsverbrennung) wird ein hinsichtlich Reproduzierbarkeit repräsentatives Mobiliarportfolio zusammengestellt. In geeigneten Messaufbauten wird für dieses Portfolio die Zündzeitpunkte und korrespondierende Wärmefreisetzung ermittelt.</p> <p>Mithilfe dieser Versuchsanordnung wird untersucht, ob und wie moderne Materialien sich von klassischen Möbelmaterialien unterscheiden. Ergänzend werden die Materialien auf Cyanwasserstoffemissionen und alle üblichen relevanten Rauchgasprodukte untersucht, um Rückschlüsse auf mögliche Schadstoffänderungen ziehen zu können.</p>			
Schlagwörter: Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Entstehungsbrand, Mobiliar, Raumbrand, Labormaßstab, Brandszenarien, Brände			

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken.

**Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die
Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für
Technologie verbunden.**

Inhalt

Berichtskennblatt.....	3
1. Einleitung	11
2. Rechtsgrundlagen des Brandschutzes.....	12
3. Grundlagen der Verbrennung.....	14
3.1 Flammentypen	14
Vormischflamme	15
Nicht vorgemischte Flamme	16
3.2 Turbulente und laminare Strömungen (Rohrströmungen)/ Flammen	16
3.3 Brandmodellierung.....	18
3.4 Brandstoffe und Begrifflichkeiten.....	19
3.5 Rauchgase.....	22
3.5.1 Stickoxide.....	26
3.5.2 Schwefeldioxid.....	26
3.5.3 Cyanwasserstoff (Blausäure).....	26
3.5.3 Fluorwasserstoff	28
3.5.4 Ruß	29
3.6 Schutz von Bauteilen und Flammschutzmittel	29
3.7 Zündmethoden.....	30
3.7.1 Holzkrippen	31
3.7.2 Poolfeuer	31
3.7.3 Kiesbettbrenner	32
3.7.4 Einzelgasbrenner	32
3.7.5 Ringofen	32
3.7.6 Wärmestrahler	33
3.7.7 Heizplatte.....	33
4. Methodik	34
5. Exkurs: Mobiliar über die Jahrzehnte.....	35
6. Versuchsaufbau	38

6.1	Auswahl Zündquelle.....	41
6.2	Versuchsaufbau: Probenhalterung und Messtechnik.....	42
6.2.1	Keramik-Hochtemperatur-Strahler.....	43
6.2.2	Rauchgassonde und Probenhalterung	44
6.2.3	Probenhalterung und Waage.....	44
6.2.4	Thermoelemente.....	45
6.2.5	Ethanol, Energieeintrag.....	45
6.2.6	Versuchsaufbau: Abgas-Analyse.....	46
7	Auswertung und Diskussion.....	49
7.1	Ausgangslage und allgemeines Verhalten.....	49
7.2	Rauchgase und Zündzeiten.....	50
	Auswertung der Holzstoff-Proben.....	50
	Auswertung und Vergleich der Nichtholzmaterialien.....	56
7.3	Überschlägige Messung des HCN Gehaltes.....	59
8	Fazit.....	63
	Literaturverzeichnis.....	66

Abbildung 1 Darstellung der Schutzziele entsprechend des Grundlegendokuments Brandschutz (Grundlegendokument Brandschutz, Teil 1, 2003)	13
Abbildung 2 Unterscheidung Flammentypen und Ort der Mischung (Eigene Darstellung der FFB in Anlehnung an (Lange ohne Datum) und (Watikha ohne Datum))	15
Abbildung 3 Vergleich laminarer- und turbulenter Strömungen (BitSign GmbH 2019).....	17
Abbildung 4 Flammenlänge in Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit.....	17
Abbildung 5 Wachstumsphasen und Wärmefreisetzung eines natürlichen Raumbrandes über der Zeit erstellt nach (Drysdale 1998)	18
Abbildung 6 Links: Idealisierte Brandverlaufskurve nach Drysdale (vgl. Abbildung 5); Rechts: Reale, selbst erstellte Brandverlaufskurve mit gemittelten Durchschnittstemperaturen im Raum	21
Abbildung 7 zeigt CO-Bildungsursachen und –Konzentrationen in einer Turbinenbrennkammer über $1/\lambda$ (nach Joos 2006).....	25
Abbildung 8 NO Recycling (Flagan und Seinfeld 1988).....	28
Abbildung 9 rußende Flamme (Seilnacht)	29
Abbildung 10 Ringschluss eines Benzolringes aus Ethin (Joos 2006).....	29
Abbildung 11 Prinzipskizze Holzkrippen (selbst erstelltes CAD Design).....	31
Abbildung 12 Prinzipskizze eines Kiesbettbrenners in Anlehnung an DIN 18234 (selbst erstelltes CAD Design)	32
Abbildung 13 Methodik der Versuchsdurchführung und Reihenfolge der Untersuchung (eigene Abbildung)	34
Abbildung 14 Vergleich unterschiedlicher Wärmefreisetzungen bei einem Zimmerbrand als Funktion der Mobiliarstrukturen (Massivholz v. Spanplattenbasiert).	35
Abbildung 15 Schnittbild zweier moderner Materialstrukturen (eigene Abbildung).....	36
Abbildung 16 Foto Aufbau eines Möbelstücks (eigene Abbildung).....	36
Abbildung 17 Skizze Aufbau eines Möbelstücks (eigene Abbildung)	36
Abbildung 18 Vergleich unterschiedlicher Gasemissionsschaubilder bei einer 2016 durchgeführten Versuchsreihe als Funktion der Mobiliarstrukturen (Massivholz v. Spanplattenbasiert).....	37
Abbildung 19 IKA C200 Bombenkalorimeter	39
Abbildung 20 Kalorimeterbombe, Zündvorrichtung, Behälter, Dichtung	39
Abbildung 21 Balkendiagramm gemessener und aus der Literatur ermittelter Heizwerte	40
Abbildung 22 Messkammer nach Vorbild DIN EN 13823.....	41

Abbildung 23 Probenhalter(D), Waage(E), Absaugtrichter, Thermoelemente (T1-T6), Keramikstrahler (B), Wärmeflussaufnehmer (A) und Rauchgassonde (C).....	42
Abbildung 24 Elstein HTS 1000 Keramikstrahler	43
Abbildung 25 Probenhalter mit Zündeinrichtung und Absaugtrichter.....	44
Abbildung 26 Aufbau Strahler	45
Abbildung 27 Aufbau Poolfeuer	45
Abbildung 28 Fließschema der Messtechnik und Abgasuntersuchung.....	47
Abbildung 29 Vergleich der beiden Holzmaterialien unter Einsatz eines Poolfeuers mit 100 ml Ethanol -- Wärmefreisetzungsrate und Temperaturen.....	49
Abbildung 30 Massenabnahme Spanplatte ohne Zündung mit Markierung der Strahler Abschaltung	50
Abbildung 31 Rauchende Probe.....	51
Abbildung 32 Mit Gaslanze gezündete Pyrolysegase	51
Abbildung 33 Abgase der Spanplatte mit deutlich erkennbarem Plateau und Zündung bei 450 s	51
Abbildung 34 WFR und Produktspezies-konzentrationen einer bestrahlten Probe über der Zeit.....	52
Abbildung 35 Abgase bei der Verbrennung der Spanplatte, Versuch ohne Zündung (Schwelbrand), reine Bestrahlung.....	53
Abbildung 36 Versuchzeiten eines vollständigen Abbrandes und Probenmaterialien.....	55
Abbildung 37 Brandentstehungszeiten (Zeit bis Maximum an CO erreicht wird) – orange markiert: moderne Materialien mit Kunststoffanteil.....	56
Abbildung 38 Naturfaserteppich HRR und Produkte.....	57
Abbildung 39 PP-Teppich, Wärmefreisetzungsrate, CO und CO ₂ Konzentrationen	58
Abbildung 40 Maximale CO-Konzentrationen	58
Abbildung 42 Dräger-Röhrchen Cyanwasserstoff (Dräger Safety AG & Co. KGaA 2015)	59
Abbildung 42 Skizzierter Beginn der HCN Messung während eines Brandversuches.....	60
Abbildung 44 HCN Konzentrationen im Schwelbrandbereich.....	61

Tabelle 1 Arten von Verbrennungsprozessen (Warnatz et al. 2001b, S. 7).....	15
Tabelle 2 CO Konzentrationen und direkte Komplikationen beim Menschen (Kunkelmann 1992)....	24
Tabelle 3 Letale Dosis (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2015)	27
Tabelle 4 Messgeräte und Messprinzipien.....	46
Tabelle 5 Probenmaterialien und Probenvergleich.....	48
Tabelle 6 maximale CO – Konzentrationen unterschiedlicher Materialiein.....	54
Tabelle 7 Tabelle HCN-Konzentrationen bei unterschiedlichen Bränden	61

1. Einleitung

In Baden-Württemberg ergaben sich 2014, 124.844 Einsätze für Berufs-, Werk-, und Freiwillige Feuerwehren. Davon waren 19.736 Brandeinsätze zu verzeichnen. (Feuerwehrstatistiken des Landes Baden-Württemberg 2018).

Mittlerweile geht man in Deutschland von 200.000 Wohnungsbränden pro Jahr aus. Hierfür gilt ein festgelegter Einsatzablauf für Angriffstrupps der Feuerwehr. Dieser beinhaltet neben dem Aufspüren und der Bekämpfung des Brandes auch das Abschätzen des Gefährdungspotentials in den betreffenden Wohneinheiten (ifs Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. 2010)

Mit zunehmender Verbreitung von Kunststoffen im Mobiliar und in der Inneneinrichtung von Wohnhäusern und Büros hat sich die Charakteristik der Entstehungsbrände in den letzten Jahrzehnten mutmaßlich verändert. Es ist zudem bekannt, dass neue Baustoffe und Technologien in rasantem Tempo entwickelt werden, um die Anforderungen an Nachhaltigkeit und/oder Energieeffizienz zu erfüllen. Es fehlt jedoch ein vollständiges Verständnis des Brandverhaltens dieser neuen Materialien und Technologien (McNamee et al. 2019). These: Die Phase des Entstehungsbrands wird kürzer, der Brandverlauf erfolgt tendenziell schneller und heftiger.

Bezüglich der Brandausbreitung ist grundsätzlich anzunehmen, dass die Mobiliareigenschaften und -strukturen für den eigentlichen Brandverlauf eine essentielle Rolle spielen (Society of Fire Protection Engineers 2016). Dies soll in geeigneten Versuchen im Labormaßstab und Übergangmaßstab, vor allem in Anbetracht unterschiedlicher Mobiliargenerationen, nachgewiesen werden. Damit soll anschließend eine Modellbildung für die reproduzierbare Abbildung von Realbränden unter Benutzung modernen Mobiliars ermöglicht werden.

Dazu wird zunächst eine Auswahl möglicher Materialien getroffen. Durch geeignete Vorversuche (Kalorimeter, Labormaßstabsverbrennung) wird ein hinsichtlich Reproduzierbarkeit interessantes Mobiliarportfolio untersucht sowie Zündzeiten und Wärmefreisetzung ausgewählter Materialien ermittelt.

Mithilfe dieser Versuchsanordnung wird untersucht, ob und wie moderne Materialien sich von klassischen Möbelmaterialien unterscheiden. Ergänzend werden die relevanten Abgaskonzentrationen gemessen um Rückschlüsse auf mögliche Schadstoffänderungen der Abgase unterschiedlicher Möbelgenerationen zu treffen. Auf Grundlage dieser Versuche sollen weiterführende und zukünftige Untersuchungen im Realmaßstab durchgeführt werden.

2. Rechtsgrundlagen des Brandschutzes

Maßnahmen, die den Brandschutz betreffen werden in zwei Kategorien unterteilt. Den **vorbeugenden Brandschutz** und den **abwehrenden Brandschutz**.

- **Der vorbeugende Brandschutz** umfasst alle Maßnahmen die im Vorfeld eines Brandes unternommen werden. Folglich sind das baulicher, anlagentechnischer und organisatorische Brandschutz.
- **Der abwehrende Brandschutz** hingegen umfasst alle Maßnahmen, die nach dem Entstehen eines Brandes getroffen werden müssen, insbesondere aber das Retten und Löschen durch die Feuerwehr. (Europäische Kommission 1994)

Das Baurecht konkretisiert Maßnahmen des *vorbeugenden Brandschutzes* dabei in Form von materiellen Anforderungen zur Erfüllung der Schutzziele.

Das Baurecht wird in der Bundesrepublik Deutschland als Landesrecht ausgeübt, das von den Bundesländern definiert und durchgesetzt wird. Hierfür werden Landesbauordnungen (LBO) erlassen.

Die grundsätzlichen Schutzziele, die ein Gebäude erfüllen muss, sind in den meisten Bauordnungen gleich und lehnen sich an der Schutzzieldefinition der Musterbauordnung (MBO) an. In § 14 (MBO) werden die Schutzziele des Brandschutzes wie folgt definiert:

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“

Das Grundlagendokument Brandschutz der europäischen Kommission greift die oben genannten Schutzziele auf und konkretisiert diese entsprechend (Europäische Kommission 1994) weiter.

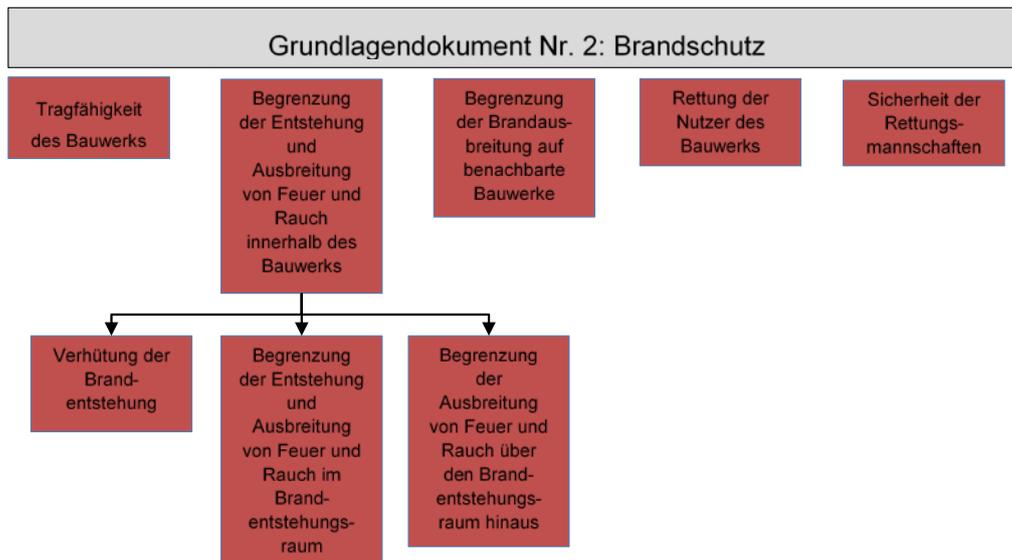


Abbildung 1 Darstellung der Schutzziele entsprechend des Grundlagendokuments Brandschutz (Grundlagendokument Brandschutz, Teil 1, 2003)

Es ist daher **inhärent naheliegend**, dass die Schutzziele nicht immer eindeutig einer bestimmten Brandschutzmaßnahme zugeordnet werden können. Vielmehr können Schutzziele teilweise nur durch ein Bündel an Brandschutzmaßnahmen unterschiedlichster Kategorien erreicht werden.

Zur Erfüllung bestimmter Schutzziele gibt das Baurecht konkrete materielle Anforderungen vor, z.B. hinsichtlich des Raumabschlusses und der Feuerwiderstandsfähigkeit, die Bauprodukte bzw. Bauarten in der jeweiligen Einbausituation erfüllen müssen.

Werden die materiellen Anforderungen nicht eingehalten (z.B., weil das Bestandsinventar schon vorhanden ist), so können weitere bzw. andere Maßnahmen ergriffen werden um die Schutzziele einzuhalten.

Zur Anwendung von Ingenieurmethoden sind folgende Möglichkeiten aufgeführt (Schneider et al. 2007):

- Ermittlung grundlegender Kenntnis über die Entwicklung und Ausbreitung von Feuer und Brandgasen
- Bewertung von Einwirkungen
- Beurteilung des Verhaltens von Bauprodukten, wenn sie einem Brand ausgesetzt sind
- Beurteilung der Brandmeldung, Aktivierung und Brandbekämpfung
- Beurteilung und Bemessung von Räumungs- und Rettungsmaßnahmen

Auf Grundlage dieser Methodenliste ist auch der für die Untersuchung der vorliegenden Möbelstücke notwendige Rahmen offensichtlich gesteckt (Dominique Max 2014).

3. Grundlagen der Verbrennung

Vor der eigentlichen Untersuchung und Modellbildung, steht zunächst die Beschreibung und Definition von Brandphänomenen. Hierzu werden kurz einige verbrennungstechnische Grundlagen eingeführt, die für die Modellbildung notwendig sind.

Verbrennung ist –allgemein definiert– eine mit *Feuer* verbundene chemische Umsetzung von Brennstoffen. Chemisch gesehen ist *Feuer* eine Oxidationsreaktion mit Flammenercheinung. Erscheinung ist letztlich eine Emission im Wellenlängenspektrum diskreter und/oder kontinuierlicher Strahlung. Bei einer Verbrennung handelt es sich um eine exotherme Reaktion. Das heißt, dass mit Feuererscheinung verlaufende Reaktionen mehr Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgeben als zum Entzünden benötigt wird (Joos 2006). Feuer ist heiß, weil die Umwandlung der schwachen Doppelbindung im Sauerstoffmolekül, O₂, in die stärkeren Bindungen in den Verbrennungsprodukten (Kohlendioxid und Wasser) Energie freisetzt (418 kJ pro 32 g O₂); die Bindungsenergien im Brennstoff spielen nur eine untergeordnete Rolle. Es handelt sich also um eine klassische *RedOx-Reaktion* (Prof. Dr. Henning Bockhorn). Als Brand hingegen bezeichnet man ein unerwünschtes Schadenfeuer.

Wir haben nun Verbrennung als exotherme chemische Reaktion von Brennstoffen mit Oxidationsmitteln eingeführt. Diese chemische Reaktion kann vereinfacht geschrieben werden als:



Wobei Q die bei der Reaktion frei werdende Wärme (oder auch Wärmefreisetzung) darstellt.

Am Beispiel Methan/Sauerstoff lautet die Gleichung dann:



In Abhängigkeit des Luftangebotes wird zweckmäßig die Luftzahl Lambda eingeführt. Unter Betrachtung der Luftmenge lautet die Verbrennungsgleichung dann:

3.1 Flammentypen

Die Einteilung von Flammen ist auf Grundlage vieler Eigenschaften möglich, häufig wird zwischen vier verschiedenen Flammentypen unterschieden (Joos 2006).

- Turbulente Vormischflammen
- Laminare Vormischflammen
- Turbulente nicht vorgemischte Flammen
- Laminare nicht vorgemischte Flammen

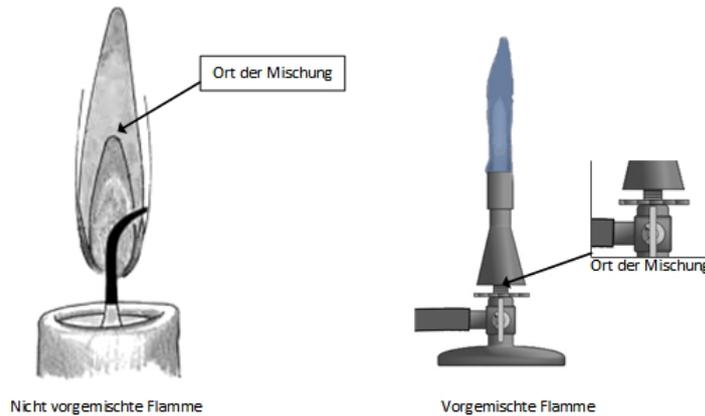


Abbildung 2 Unterscheidung Flammentypen und Ort der Mischung (Eigene Darstellung der FFB in Anlehnung an (Lange ohne Datum) und (Watikha ohne Datum))

Vormischflamme

Bei einer Vormischflamme sind Brennstoff und Oxidationsmittel bereits vor der Verbrennung homogen gemischt. Durch das dabei vorliegende Gleichgewicht wird die Verbrennung als stöchiometrisch bezeichnet. Ist im Verhältnis zum Oxidationsmittel zu viel Brennstoff vorhanden, bezeichnet man die Verbrennung als **fett**, im umgekehrten Fall als **mager** (Warnatz et al. 2001a)

Das Verhältnis dieser Mischungen aus Luft und Brennstoff wird mit Hilfe der dimensionslosen Luftzahl λ charakterisiert (DiNenno 2016). Die Luftzahl ergibt sich aus der für die Verbrennung tatsächlich zur Verfügung stehenden Luftmenge m_{verf} und der für eine stöchiometrische Verbrennung benötigten Luftmenge m_{ben} (Warnatz et al. 2001b, S. 6–7).

$$\lambda = \frac{n_{verf}}{n_{ben}}$$

Tabelle 1 Arten von Verbrennungsprozessen (Warnatz et al. 2001b, S. 7)

fette Verbrennung	$\lambda < 1$
stöchiometrische Verbrennung	$\lambda = 1$
magere Verbrennung	$\lambda > 1$

Die Verbrennung von vorgemischten Flammen hat im Gegensatz zu nicht-vorgemischten Flammen den Vorteil, dass hohe Temperaturen erreicht werden und sie nahezu rußfrei abläuft. Der Nachteil vorgemischter Flammen ist, dass durch die Mischung von Oxidationsmittel und Brennstoff schon vor der Verbrennung ein explosionsfähiges Gemisch vorliegt (Warnatz et al. 2001b, S. 5–7). Wird das Gemisch nicht direkt gezündet oder erlischt die Flamme gar, bilden sich schnell explosionsfähige Gemisch Zusammensetzungen. Auch Rückzündungen der Flamme in die bereits gemischten Bereiche sind ohne geeignete Gegenmaßnahmen möglich.

Nicht vorgemischte Flamme

Bei einer nicht-vorgemischten Flamme kommt es erst während der Verbrennung zur Mischung von Brennstoff und Oxidationsmittel. Das Verhältnis von Brennstoff und Oxidationsmittel ist dabei innerhalb der Flamme unterschiedlich. Auf der Seite des Brennstoffs findet also eine fette-, und auf der Seite des Oxidationsmittels eine magere Verbrennung statt. Lediglich an der Flammenfront liegt eine stöchiometrische Verbrennung vor (s. **Abbildung 2**). Optisch lassen sich nicht-vorgemischte Flammen außer bei aufwendigen Mischtechniken häufig durch ein gelbes Leuchten erkennen. Das Leuchten resultiert aus thermischer Strahlung, welche von glühenden Rußteilchen der fetten Bereiche emittiert wird. Typische Beispiele sind Flugzeug-Turbinen, Strahlungsbrenner, Holzfeuer und Kerzen (Warnatz et al. 2001b, S. 5–8).

3.2 Turbulente und laminare Strömungen (Rohrströmungen)/ Flammen

Laminare Strömungen finden, wie in **Abbildung 3** zu sehen, in geradlinigen, parallelen und schichtförmigen Bahnen statt.

Mit Hilfe der Reynolds Zahl lässt sich rechnerisch auf Basis des Verhältnisses zwischen Trägheits- und Zähigkeitskräften abschätzen, ob eine turbulente Strömung vorliegt.

$$Re = \frac{\rho U L}{\eta} = \frac{U L}{\nu}$$

Hierbei ist ρ die Dichte, U die Strömungsgeschwindigkeit, L die charakteristische Länge, η die dynamische Viskosität und ν kinematische Viskosität ($\nu = \eta/\rho$) (Herwig 2000, S. 175).

Aus dieser Gleichung ergibt sich, dass bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten laminare und bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten sogenannte turbulente Strömungszustände vorliegen.

Dabei bildet Zahl $Re = 10000$ in der üblichen Literatur den Grenzwert, ab dem eine Strömung sicher turbulent ist. Bei einer turbulenten Strömung verlaufen die Bahnen wirbelhaft und zufällig und die Strömungsgrößen verhalten sich stochastisch (Spurk und Aksel 2010). Dieses Phänomen lässt sich am besten bei einer Rohrströmung, wie in **Abbildung 3** zu erkennen. Das Modellieren von Turbulenz ist äußerst komplex. Häufig kommt hier das Modell der Wirbelkaskaden zum Einsatz.

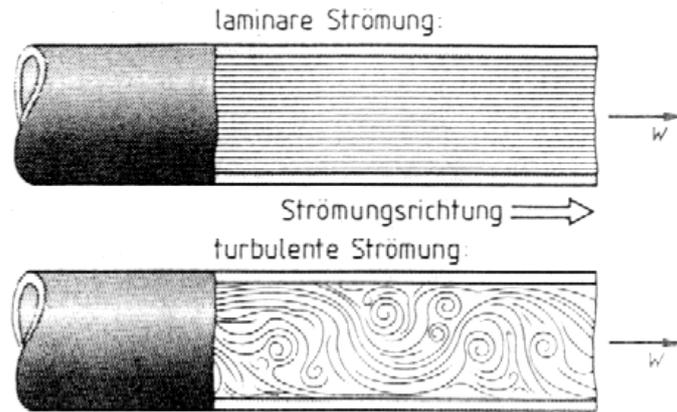


Abbildung 3 Vergleich laminarer- und turbulenter Strömungen (BitSign GmbH 2019)

Bei laminaren Flammen findet die Strömung in gradlinigen parallelen Bahnen statt. Eine Bunsenbrennerflamme ist unter bestimmten Bedingungen (Luftzufuhr offen, Gasstrom hoch) ein gutes Beispiel für eine derartige Flamme. Turbulente Flammenfronten weisen lokal gekrümmte und gestreckte laminare Flammen auf, das lokale Geschwindigkeitsfeld schwankt um einen Mittelwert. Die Verbrennung erfolgt in einem turbulenten Strömungsfeld. Otto-Motoren, stationäre Gasturbinen sind typische Beispiele hierfür (Warnatz et al. 2001b, 5,7).

Die Flammenlänge ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Sie nimmt mit steigender Geschwindigkeit bis zu dem Übergang zur Turbulenz zu. Wie in **Abbildung 4** zu erkennen, ist die Flammenlänge ab diesem Punkt unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit (Joos 2006, S. 331–332). Dies ist zurückzuführen auf eine autonome Durchmischung durch Reibungseffekte (vgl. Reynoldszahl, dissipativer Term im Nenner).

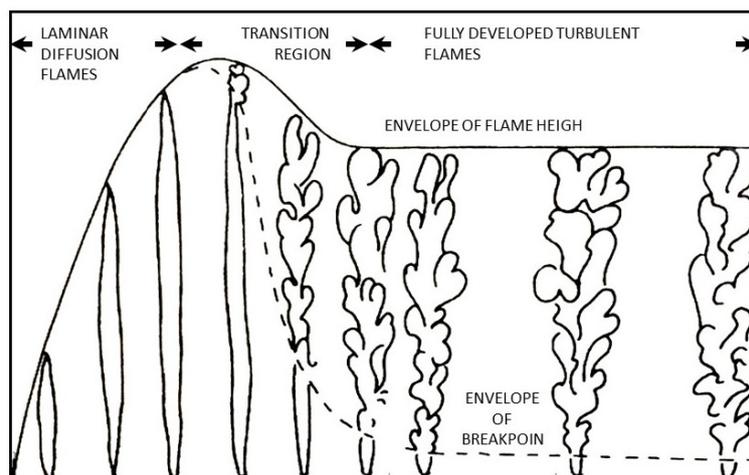


Abbildung 4 Flammenlänge in Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit

3.3 Brandmodellierung

Auf Grundlage von ingenieurtechnischen Annahmen, muss ein Modell für einen Naturbrand erstellt werden.

Hierbei beeinflussen Raumvolumen, Brandentwicklung, Brandlast, Temperatur und die Ventilationsbedingungen den Brandverlauf. Ist im Brandraum ausreichend Sauerstoff vorhanden spricht man von einem brandlastgesteuerten Brand (Dietmar Hosser - vfdB 2013). In diesem Fall kann der Brennstoff sich fast vollständig in seine Reaktionsprodukte i.d.R. CO_2 und H_2O umsetzen. Dieser Prozess geschieht bei hoher Raumtemperatur, hoher spezifischer Energiefreisetzung und nur geringer Bildung von Nebenprodukten wie z.B. CO .

Ist weniger Sauerstoff als benötigt im Raum vorhanden, bezeichnet man den Brand als ventilationsgesteuert. Da in diesem Fall der Sauerstoff für einen vollständigen Abbrand fehlt, sind die Temperaturen dabei deutlich niedriger. Der Anteil an Nebenprodukten wie CO und Pyrolysegasen ist hingegen deutlich höher. Es ist zu beachten, dass sich wie in **Abbildung 5** zu sehen, die Ventilationsbedingungen während des Brandverlaufs ändern können.

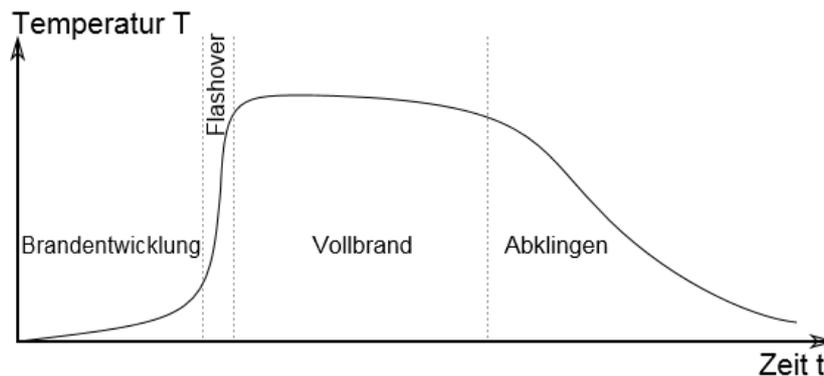


Abbildung 5 Wachstumsphasen und Wärmefreisetzung eines natürlichen Raumbrandes über der Zeit erstellt nach (Drysdale 1998)

Die **Brandentwicklung** oder **Entstehungsbrandphase** kann grundsätzlich durchaus mehrere Stunden andauern. Diese Periode ist charakterisiert durch geringe Wärmefreisetzung, geringe Temperatur und lokale Beschränkung auf den Bereich der Zündquelle. Der Übergang zum Vollbrand ist durch einen steilen Temperaturgradienten gekennzeichnet. Am Übergang der Brandzone und direkt in der Flamme können daher schnell hohe Temperaturen erreicht werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Sauerstoffkonzentration (Drysdale 2011, S. 321–322).

Überschreitet die Umgebungstemperatur die Zündtemperatur der sich im Brandraum befindlichen Gegenstände, kommt es zur schlagartigen, explosionsähnlichen Brandausbreitung unter Druckanstieg, dem so genannten **Flashover**. Zu unterscheiden ist der Flashover dabei von der Rauchgasdurchzündung, dem so genannten Rollover. Dieser beschreibt lediglich das Durchzünden von Rauchgasen, nicht jedoch den Umschlag zum Vollbrand. Kommt es in einem abgeschlossenen Raum zu einem bereits verlöschten Brand, können durch die vorhergehende hohe Temperatur weiterhin brennbare Pyrolysegase im Raum

zurückbleiben. Durch das allmähliche Abkühlen der Gase entsteht im Raum ein Unterdruck. Wird nun die Tür (typischerweise durch einen Feuerwehrmann) geöffnet, strömt schlagartig Sauerstoff in den Raum. Die verbliebenen Gase bilden mit der umgebenden Luftatmosphäre ein zündfähiges Gemisch. In Verbindung mit vorhandenen Zündquellen (typischerweise Glutnester oder kleinen Flammenbränden auf Oberflächen) kommt es unter Umständen zur lebensgefährlichen schlagartigen Durchzündung.

Bei Wohnungsbränden ist zudem vor allem die Temperatur und Wärmestrahlung des Entstehungsbrandes von großer Bedeutung. Ist die Strahlung groß genug um alle Oberflächen zum erwähnten Ausgasen zu bekommen, so kommt es zur oben beschriebenen schlagartigen Durchzündung der Gase.

3.4 Brandstoffe und Begrifflichkeiten

Eine wesentliche den Brand beeinflussende Größe ist die Art und Anordnung brennbarer Stoffe bzw. Stoffgemische. Brandstoffe sind Stoffe, die an einem Brand beteiligt sind. Es werden die Brandstoffe und deren Brandverhalten unter anderem entsprechend ihres Aggregatzustandes unterschieden.

Brennbare Gase und Dämpfe verbrennen mit einer Flamme, in der Sauerstoff mit Brennstoff reagieren.

Das Brandverhalten brennbarer Flüssigkeiten entspricht dem brennbarer Gase und Dämpfe, jedoch mit dem Unterschied, dass durch auf die Flüssigkeit einwirkende Wärme die brennbaren Gase zunächst durch Verdampfen entstehen müssen. In der Brandschutzforschung wird bei Bränden brennbarer Flüssigkeitsreservoirs auch von „Pool“- oder Lachenbränden gesprochen (Society of Fire Protection Engineers).

Feststoffe können mit Flamme und/oder unter Bildung von Glut verbrennen. Bei einem Feststoffbrand wird der Feststoff durch Pyrolyse oder Schmelzen in eine Flüssigkeit überführt, die sich wiederum zersetzt oder verdampft (Society of Fire Protection Engineers). Die brennbaren Dämpfe können bei genügender Energie des Brandes mit einer Flamme abbrennen. Bei einem Glutbrand entsteht keine Flammenbildung und die Pyrolyseprodukte kondensieren im Wesentlichen in der kalten Luft und bilden Aerosole. Erfahrungsgemäß sind solche Brände mit einer sehr hohen Rauchgasproduktion verbunden.

Die Abbrandrate beschreibt die durch den Brand umgesetzte brennbare Masse pro Zeit. Sie ist u.a. abhängig von dem Stoff bzw. des Stoffgemisches und der Anordnung des Brandstoffes.

Für die Untersuchung und Beschreibung eines Brandes ist die Energiefreisetzung oder auch Brandleistung eine wichtige und oft genutzte Größe. Sie beschreibt die freiwerdende Energie pro Zeit in Watt üblicherweise in Megawatt (MW) oder Kilowatt (kW). Dabei wird für brandschutztechnische Betrachtungen, die Energiefreisetzung durch das Produkt der umgesetzten Masse eines Brandstoffes mit dessen stoffspezifischen unteren Heizwert H_u (üblicherweise in MJ/kg) bestimmt.

Die Ventilationsbedingungen nehmen einen entscheidenden Einfluss auf die Energiefreisetzung eines Brandes. Man unterscheidet zwischen brandlastgesteuerten Bränden, bei denen genügend Sauerstoff

vorhanden ist um frei gewordene Brennstoffe stöchiometrisch zu verbrennen und ventilationsgesteuerten Bränden, bei denen ein unzureichendes Sauerstoffangebot vorhanden ist. Dadurch verringert sich die thermische Leistung und somit auch die Verbrennungsgeschwindigkeit. Gleichzeitig steigt die Gefahr einer Rauchgaszündung, etwa durch Öffnen der Tür durch die angreifende Feuerwehr. In der Regel trifft man zumeist auf brandlastgesteuerte Brände. Die Brandarten brandlast- und ventilationsgesteuerter Brände werden in der Fachliteratur auch als Brandregime bezeichnet (DiNenno 2016).

Üblicherweise können bei einem Brand in Räumen drei typische Abschnitte unterschieden werden.

Zunächst der Entstehungsbrand oder Entwicklungsbrand der direkt nach der Zündung eines brennbaren Gegenstandes zu beobachten ist. Die Brandentwicklung oder Entstehungsbrandphase kann mehrere Stunden andauern. Diese Periode ist charakterisiert durch geringe Wärmefreisetzung, geringe Temperatur und lokale Beschränkung auf den Bereich der Zündquelle (Drysdale 1998).

Stehen ausreichend Sauerstoff und brennbare Gase zur Verfügung, kann es zu einem schlagartigen Übergang eines lokal begrenzten Brandes zu einem Vollbrand im Raum kommen. Dies geht einher mit einem steilen Temperaturgradienten, der auch als messtechnisches Indiz für diesen Übergang dient.

Dabei gasen die zuvor von der strahlenden Flamme und der Gasschicht thermisch aufbereiteten, brennbaren Oberflächen in großen Mengen aus und entzünden im gesamten Volumen. Dieses Phänomen beschreibt den so genannten Flashover oder Feuerübersprung. Dies ist gleichzeitig auch der Zeitpunkt, zu dem ein Brand von einem brandlastgesteuerten zu einem ventilationsgesteuerten Brand umschlagen kann (Kunkelmann 2003).

Der anschließende Vollbrand zeigt die größte Brandleistung (Literaturangaben über die flächenbezogene Leistungsdichte reichen dabei von 50 bis 400 kW/m² (Kunkelmann 2003)) und damit auch die größte thermische Einwirkung auf Bauteile.

Die Brandleistung bleibt danach solange nahezu konstant bis ein Löscheinsatz erfolgreich ist oder der größte Teil der Brandlast verbrannt ist. Danach liegt ein abklingender Brand bis zum Verlöschen des Brandes vor, der von einer stetigen Temperaturabnahme begleitet wird.

Dieses Verhalten wird aus den folgenden Abbildungen ersichtlich. In **Abbildung 6** links ist die idealisierte Brandverlaufskurve aus der Literatur dargestellt. Demgegenüber steht in **Abbildung 6** rechts eine reale Brandverlaufskurve mit gemittelten Durchschnittstemperaturen. Die beschriebenen Brandverlaufphasen lassen sich deutlich erkennen. Der nachvollziehbare Wunsch nach Erkenntnisgewinn, bezüglich dieser Brandverlaufskurve ist, dass sich diese auch für moderne Möbel wiederholt.

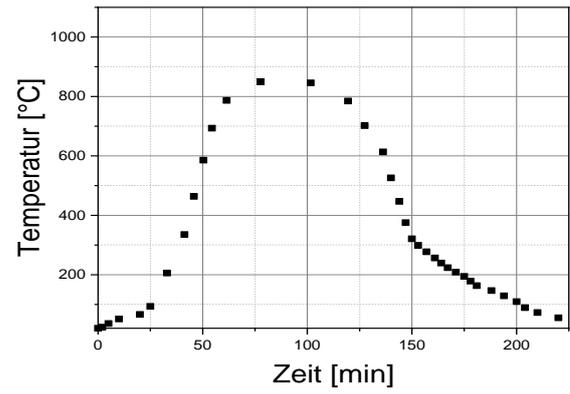
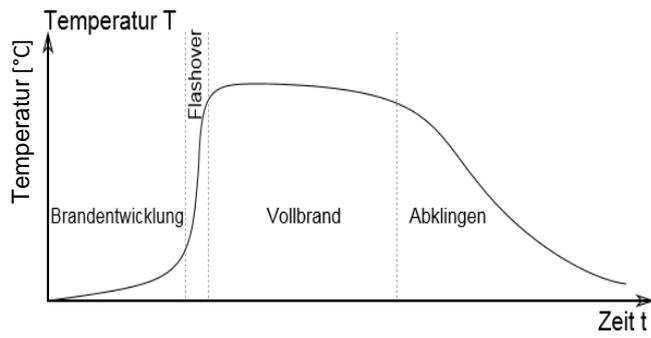


Abbildung 6 Links: Idealisierte Brandverlaufskurve nach Drysdale (vgl. **Abbildung 5**); Rechts: Reale, selbst erstellte Brandverlaufskurve mit gemittelten Durchschnittstemperaturen im Raum

3.5 Rauchgase

Rauch ist ein allgemein verwendeter, oft aber nicht näher definierter, Begriff in Wissenschaft und Alltag. Hier hilft man sich für die Definition von Rauch gem. DIN 14011 im feuerwehrtaktischen Umfeld gerne mit der Definition als „sichtbarer Teil der flüchtigen Verbrennungsprodukte“. Grundsätzlich, ist die Definition von Rauch als Überbegriff für die "Summe gasförmiger Produkte, die beim Verbrennen oder Pyrolysieren organischen Materials entstehen und sowohl flüssige als auch feste Partikeln, sowie nicht abreagierte Reaktionsgase enthalten" (Warnatz et al. 2001a) aber feuerwehrunabhängig zweckmäßig. Rauch entsteht als Produkt von Verbrennungen immer dann, wenn eine Verbrennung im Bilanzraum der Verbrennung nicht vollständig abläuft. Er entsteht sowohl bei Schwelbränden als auch Flammen- und Vollbränden, wobei sich die Entstehungsmechanismen und Eigenschaften z.T. deutlich unterscheiden.

CO als wichtiges Rauchgas ist ein farb- und geruchloses Gas, bei erhöhter Temperatur sehr reaktiv und gilt gemeinhin als häufigste Todesursache bei Rauchvergiftungen. Seine Giftigkeit beruht darauf, dass es sich anstelle von O₂ in Form von äußerst stabilem Carboxyhämoglobin am Hämoglobin (Blutfarbstoff) bindet – dies liegt begründet in der Rolle von CO als natürlichem Metaboliten. Die Bindungskraft der Carboxylgruppe ist dabei deutlich stärker als der des Sauerstoffkomplexes, ca. 200 - 300 mal so stark und behindert damit den Sauerstofftransport im Blut. Eine CO kann somit ohne Weiterreaktion im Körper direkt zum Tod führen. CO wird auch in letalen Konzentrationen im Rauchgas angetroffen, spielt jedoch hauptsächlich in Emittentennähe eine gesundheitsgefährdende Rolle (Warnatz et al. 2001a).

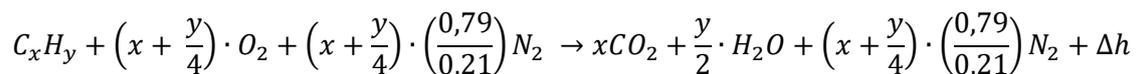
In Rauchgasen finden sich unter fetten Bedingungen in der Regel auch Kohlenwasserstoffe wieder. Es wäre nicht korrekt dabei von einer Bildung im eigentliche Sinne zu sprechen. Vielmehr handelt es sich um unvollständig verbrannte Restbestände der Ausgangsbrennstoffe. Diese unvollständige Verbrennung resultiert aus lokaler Flammenlöschung, etwa durch Quenchen der Verbrennungsreaktion an kalten Wänden (Joos 2006) (Drysdale 2011).

Als Produkt stehen damit nicht durchoxidierte Kohlenwasserstoffe mit ungesättigten Bindungen. Vor allem Ethinbildung spielt als Vorläuferrolle für eine ständig stattfindende Ringbildung von Kohlenwasserstoffen eine entscheidende Rolle. Ethin ist dabei in fetten Flammen in hohen Konzentrationen zu finden. Durch Ringbildung und entsprechende Weiterreaktion findet ein komplexer Prozess statt, der letztlich in Rußagglomeraten resultiert.

Rußpartikel haben nicht nur aufgrund ihrer existenten karzinogenen Wirkung eine erhöhte (vor allem gesundheitliche) Relevanz, sondern spielen auch aufgrund ihres Einflusses auf die thermische Strahlung eine wichtige Rolle. Da es sich bei Strahlung durch Ruß (schnell zu erkennen am gelben Leuchten der Flamme) um Festkörperstrahlung handelt, weist diese im Gegensatz zur schmalbandigen Gasstrahlung ein ausgeglichenes Strahlungsspektrum auf (Joos 2006). Aufgrund der z.T. hohen Anzahl an Rußpartikeln kann Ruß die Strahlung heißer Gase daher deutlich erhöhen.

Rauchgase als Überbegriff für gasförmige Verbrennungsprodukte liefern aufgrund der chemisch komplexen Eigenschaften von natürlichen und künstlich hergestellten Brennstoffen im Alltag ein breites Profil an Schadstoffen. SO₂ als Hauptverursacher von saurem Regen, für die Atemwege gefährliche Aerosole, Fluorwasserstoff (HF) und Cyanwasserstoff (HCN) als potentiell direkt letale Giftstoffe sowie Ozon und Methanal sollen an dieser Stelle beispielhaft als Gefahrstoffe genannt werden. Darüber hinaus treten HCL als Verbrennungsprodukt von PVC, Kabeln und HF als Verbrennungsprodukt bei Kabel- oder Batteriebränden in der Realität häufig auf. Diese wirken reizend auf die Atemwege und können bis zur Lungenembolie führen.

Die Stoffzusammensetzung der durch Verbrennung und Pyrolyse entstandenen flüchtigen Stoffe im Umfeld eines Brandes ist äußerst komplex, da die Moleküle durch Spaltung von Polymeren (langkettigen Kohlenwasserstoffmolekülen) entstehen. Die Brandlast besteht dabei aus Stoffgemischen. Im Allgemeinen sind dies jedoch vor allem Kohlenwasserstoffe (CH_n), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂) (Drysdale 2011, S. 3–4). Daraus resultierend lässt sich – in Abhängigkeit des Luftangebotes – folgende, für die Verbrennung eines Alkanes idealisierte allgemeine Reaktionsgleichung mit zu erwartenden Produkten aufstellen (Joos 2006):



Bei komplexeren Edukten, wird die Verbrennungsreaktion und somit auch obige Gleichung ungleich komplexer.

Bei Verbrennungsprozessen werden unterschiedliche Reaktionsprodukte freigesetzt. Viele dieser Reaktionsprodukte sind für den Menschen toxisch. Ob und in welcher Menge toxische Stoffe freigesetzt werden, ist dabei von Brennstoff, Temperatur und Ventilationsbedingungen abhängig. So kann der freigesetzte Rauch grundsätzlich und ganz allgemein unterteilt werden:

- Rauch aus Schwelbränden zeigt analoge Eigenschaften zu Rauch der entsteht, wenn organische Materialien chemische Degradation durch Erwärmung zeigen (meist strenger Geruch, leichte Rauchspuren). Die so entstandenen flüchtigen Stoffe kondensieren mit kalter Luft aus. Dabei entstehen Aerosole welche aus kleinen Tropfen und Partikeln mit einem mittleren Partikeldurchmesser von $\sim 1 \mu\text{m}$ bestehen. Die verrußte Oberfläche bekommt öligen Charakter. (Drysdale 2011, S. 443). Zudem wird durch die unvollständige Verbrennung eine Vielzahl an „intermediary-products“ (CO, NO_x...) emittiert
- Rauch, der aus Vollbränden entsteht, besteht hingegen hauptsächlich aus Feststoff-Partikeln. Diese entstehen durch unvollständige Verbrennung und Pyrolyse unter geringer Sauerstoffzufuhr. (Drysdale 2011, S. 443). Das Hauptverbrennungsprodukt ist jedoch CO₂.

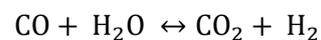
Tabelle 2 CO Konzentrationen und direkte Komplikationen beim Menschen (Kunkelmann 1992)

Konzentration	Komplikation
0,003 %	MAK-Wert für 8-stündige Arbeit
0,02 %	Leichte Kopfschmerzen in 2-3 Stunden
0,04 %	Kopfschmerzen im Stirnbereich in 1-2 Stunden, breiten sich in 2,3-3,5 Stunden im ganzen Kopf aus
0,08 %	Schwindel, Übelkeit + Gliederzucken in 45 Minuten, Bewusstlos in 2 Stunden
0,16 %	Schwindel, Übelkeit + Kopfschmerz in 20 Minuten, Tod in 2 Stunden
0,32 %	Schwindel, Übelkeit + Kopfschmerz in 5-10 Minuten, Tod in 30 Minuten
0,64 %	Schwindel + Kopfschmerz in 1-2 Minuten, Tod in 10-15 Minuten
1,28 %	Tod in 1-3 Minuten

CO reagiert mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid. Die Oxidationsreaktion von Kohlenmonoxid ist für eine vollständige Verbrennung geschwindigkeitsbestimmend (Joos 2006, S. 631), somit spielt CO in vielen Berechnungen eine wichtige Rolle.

Im ideal-stöchiometrischen Bereich kann die Brutto-Gleichung der CO-Reaktion zusammengefasst werden zu (Joos 2006, S. 631)

Formel 1 Wasser-Oxidation von CO



Folgende Bedingungen können ursächlich für die Existenz von CO im Rauchgas geschlossener Systeme sein ($\Phi = \frac{1}{\lambda}$) (Joos 2006)

- Zu fette Bedingungen ($\Phi > 1,2$)
- Zu magere Bedingungen ($\Phi < 0,8$)

Die Bildung von CO muss somit hinsichtlich fetten, mageren und stöchiometrischen Bedingungen untersucht werden. Die Verbrennungsreaktion findet dabei unterschiedlich statt. In natürlichen Bränden durchläuft eine Flamme ein Spektrum von Luftzahlen. Verschiedene Prozesse zur CO-Bildung müssen daher beobachtet werden.

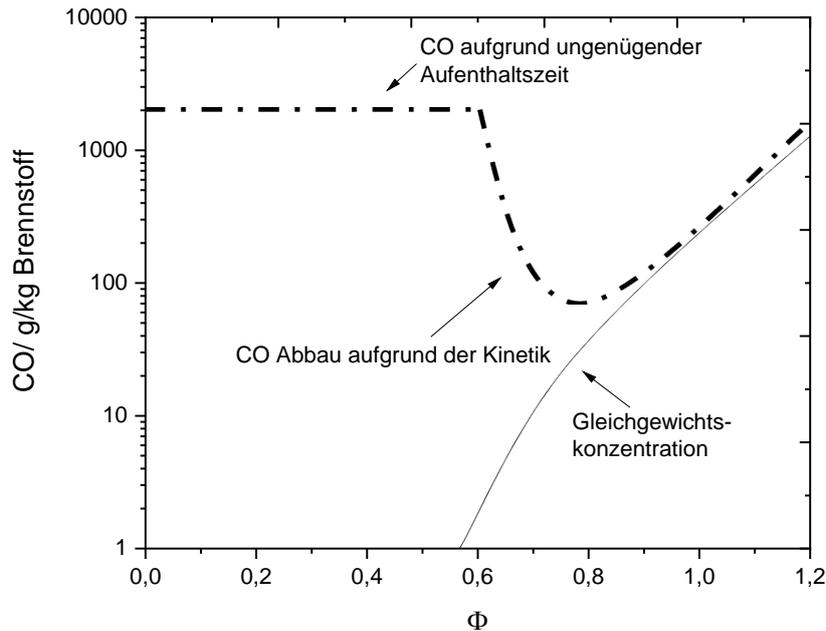


Abbildung 7 zeigt CO-Bildungsursachen und -Konzentrationen in einer Turbinenbrennkammer über $1/\lambda$ (nach Joos 2006)

Im fetten Bereich benötigt die CO-Bildung eine große Aufenthaltszeit (siehe **Abbildung 7**, am Beispiel einer Turbinenbrennkammer). Der CO-Gehalt ist Produkt einer unvollständigen Verbrennung aufgrund O_2 -Mangels. „Der Sauerstoffmangel bewirkt, dass die CO-Oxidation in Konkurrenz zur Wasserstoff-Oxidation abläuft“ (Joos 2006, S. 631).

Die Reaktionsmechanismen können für den fetten Bereich wie folgt formuliert werden (Djordjevic 2011):

Formel 2 Oxidationsmechanismus im fetten Bereich

-
1. $CO + OH \cdot \leftrightarrow CO_2 + H \cdot$
 2. $H_2 + OH \cdot \leftrightarrow H_2O + H \cdot$
-

Die 1. Reaktion ist kinetisch kontrolliert und läuft daher langsamer ab. Die zweite Reaktion läuft schneller ab und befindet sich im Gleichgewicht. Die Radikale dienen dabei als hochreaktive Kettenträger. (Neda Djordevic 2011, S. 80)

Im mageren Bereich läuft die 1. Reaktion nicht mehr in Konkurrenz zur H_2 -Oxidation ab. Analog zum fetten Bereich läuft die 1. Reaktion langsamer ab.

Formel 3 Oxidationsmechanismus im mageren Bereich

-
1. $CO + OH \cdot \leftrightarrow CO_2 + H \cdot$
 2. $O_2 + H \cdot \leftrightarrow OH + O \cdot$
-

Im fetten und im mageren Bereich sind die Haupt-Reaktionen also kinetisch kontrolliert. Die Radikalbildungsreaktionen von OH und H laufen wesentlich schneller ab und sind daher aufgrund ihrer hohen Reaktivität besonders relevante Zwischenprodukte der CO-Oxidation.

3.5.1 Stickoxide

Stickoxide, auch als NO_x , bezeichnet können auf verschiedene Arten entstehen. Bei hohen Temperaturen (ab ca. 1200 °C) beispielsweise reagiert der Luftstickstoff mit dem Luftsauerstoff. Es ist auch möglich, dass die Brennstoffe selbst Stickstoff enthalten, welcher mit dem Luftsauerstoff reagieren kann. Stickoxide können anschließend mit der Luftfeuchtigkeit zu Salpetersäure (HNO_3) weiterreagieren. (Joos 2006)

3.5.2 Schwefeldioxid

Schwefeldioxid entsteht bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Brennstoffen, wie z. B. nicht entschwefelte Erdölprodukte. Schwefeldioxid kann in Verbindung mit der Luftfeuchtigkeit zu schwefeliger Säure (H_2SO_3) oder Schwefelsäure (H_2SO_4) reagieren (Gestis Stoffdatenbank). AGW 1 ml/m^3 oder 2.7 g/m^3

3.5.3 Cyanwasserstoff (Blausäure)

Cyanwasserstoff liegt bei Raumtemperatur als eine leicht flüchtige Flüssigkeit oder, mit einem Siedepunkt von 26°C, gar als Gas vor. Der Cyanwasserstoff ist farblos und riecht nach Bittermandel.

Gasförmiger Cyanwasserstoff ist sehr reaktionsfähig und daher extrem entzündlich. Der Flammpunkt liegt bei >-20 °C. Die Selbstzündtemperatur liegt bei 535 °C. Es kann sich weiterhin in Wasser und somit auch in der Luftfeuchtigkeit lösen. Die wässrige Lösung ist nur schwach sauer. Die Säurestärke liegt unterhalb der Säurestärke von Kohlensäure. Es kann eine Polymerisation stattfinden, welche exotherm ist und sich bis zu einer Explosion beschleunigen kann, wenn die Temperatur über 180 °C steigt.

Cyanwasserstoff wirkt toxisch, da er inhibierend auf die Zellatmung wirkt. Er kann sowohl über die Atemwege als auch über die Haut in den Körper gelangen, um dort seine inhibierende Wirkung auszuüben. Bei akutem Kontakt kommt es zu Störungen der Nerven, des Herz-Kreislaufes, des Stoffwechsels sowie zur Atemlähmung. Die Toxizität ist sehr hoch. Daher kann Cyanwasserstoff bereits nach einigen Sekunden zum Tod führen.

Bei längerem Kontakt mit Cyanwasserstoff kann zur Beurteilung der toxischen Belastung der sog. MAK-Wert herangezogen werden. Mit dem Inkrafttreten der neuen Gefahrstoffverordnung am 01. Januar 2005 ist der MAK-Wert zwar durch den AGW-Wert ersetzt worden, für die Betrachtung ist dieser dennoch zweckmäßig. Der MAK-Wert beschreibt die höchstzulässige Konzentration eines Schadstoffes

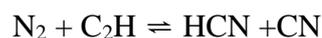
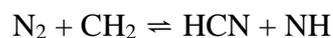
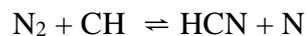
am Arbeitsplatz. Dabei wird von einer durchschnittlichen Arbeitsleistung von 8 Stunden pro Tag bzw. 40 Stunden pro Woche ausgegangen. Der MAK-Wert für Cyanwasserstoff liegt bei 1,9 ppm.

Als tödliche Konzentrationen werden von der DGUV folgende Volumenkonzentrationen genannt.

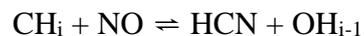
Tabelle 3 Letale Dosis (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2015)

Konzentration in Vol.-ppm	Expositionsdauer
270	sofort
181	10 min
135	30 min
108-135	0,5-1 h
50	kurzzeitig tolerierbar

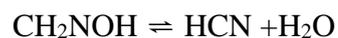
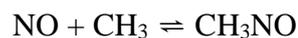
Cyanwasserstoff entsteht durch die Reaktion von Kohlenwasserstoffradikalen mit Stickstoff ((Ebersohl 2014)



und von Stickstoffmonoxid mit einem CH_i-Radikal.



z. B. mit einem CH₃-Radikal



Die oben genannten Reaktionsmechanismen stellen nur einen Teil mehrerer parallel ablaufender Reaktionen dar. Ein weiterer Teil ist das sog. NO-Recycling. Dieses ist in **Abbildung 8** bildhaft dargestellt und soll exemplarisch die Komplexität der Kinetik darstellen. Hierbei ist prinzipiell dargestellt, dass der Cyanwasserstoff in einem Gleichgewicht mit anderen Stickstoffverbindungen steht

3.5.4 Ruß

Die Ursache für eine Sichtbehinderung bei Bränden ist meistens rußhaltiger Rauch. Als Ruß wird ein schwarzer, pulverförmiger Feststoff bezeichnet, der bei der Verbrennung entsteht. Vergleiche hierzu **Abbildung 9** & **Abbildung 10**. Die Rußbildung basiert auf polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). PAKs haben kanzerogene Eigenschaften und sind daher gesundheitsschädlich.



Abbildung 9 rußende Flamme (Seilnacht)

PAKs bilden sich bevorzugt in fetten Umgebungsbedingungen. Als wichtigster Vorläufer von Ruß gilt Ethin, welches mit CH- und CH₂-Radikalen zu einem C₃H₃-Radikal reagiert. Aus zwei C₃H₃-Radikalen bildet sich, wie in **Abbildung 10** aufgezeigt, durch Rekombination und Umlagerung der erste Benzolring. (Joos 2006). Anhand dieses Mechanismus wird schnell deutlich, warum bei unvollständigen Reaktionen (Anwesenheit von Doppelbindungen) vermehrt Ruß entsteht.

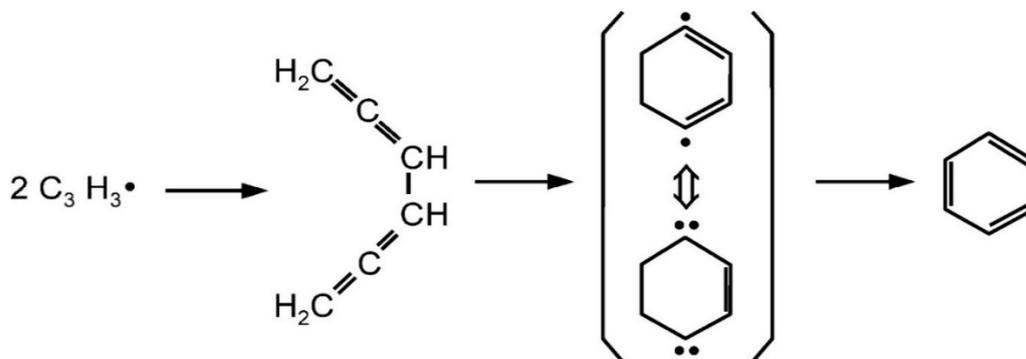


Abbildung 10 Ringschluss eines Benzolringes aus Ethin (Joos 2006)

3.6 Schutz von Bauteilen und Flammenschutzmittel

Die Klassifizierung des Brandverhaltens von Bauteilen und Baustoffen wird durch die Norm DIN 4102-2 geregelt. Bei neu zugelassenen Baustoffen wird für die Einstufung nur noch die DIN EN 13501 verwendet. Bauteile werden entsprechend ihrer Feuerwiderstandsdauer in verschiedene Feuerwiderstandsklassen eingeteilt. Diese erhalten den Kennbuchstaben F und eine Zahl, welche die bei der Prüfung ermittelte Feuerwiderstandsdauer in Minuten angibt. So steht die Feuerwiderstandsklasse F30 etwa für eine Widerstandszeit von 30 Minuten unter Normbedingungen.

Die verbrennungstechnischen Eigenschaften von Schadenfeuern und daraus abgeleiteten gesetzlichen Vorgaben, führen in Endkundenprodukten häufig zur Anwendung von so genannten Flammschutzmitteln.

Flammschutzmittel sind Stoffe welche die Entstehung sowie die Ausbreitung von Bränden einschränken, verlangsamen oder verhindern sollen. Anwendung finden sie überall dort, wo sich potentielle Brandlasten, wie z.B. Möbel aus Kunststoffen und/oder Holz, Textilien, Teppiche oder Wohnungsinventuren befinden. Ein weiterer Anwendungsbereich ist auch die Erfüllung von brandschutztechnischen Anforderungen von Werkstoffen und Bauteilen. Die Wirkungsweise von Flammschutzmitteln lässt sich einteilen in:

-
- Physikalisches Wirkprinzip
 - Chemisches Wirkprinzip
-

Chemisches Wirkprinzip: Durch die Wahl des Flammschutzmittels (bevorzugt Halogenverbindungen) kann eine induzierte Radikalbildungsreaktion ablaufen. Dadurch wird eine so genannte Abbruchreaktion hervorgerufen. Dabei werden Radikale mit Reaktionsradikalen der Verbrennungsreaktion rekombiniert. Die eigentliche Reaktion wird dadurch abgebrochen. Dies funktioniert naturgemäß genau so lange, wie ein Angebot an Radikalen erbracht werden kann.

Physikalisches Wirkprinzip: Hier macht man sich physikalische Hemmnisse zum weiteren Verlauf der Verbrennungsreaktion zu Nutze.

So kann die Zersetzung des Brennstoffes zu einer endothermen Freisetzung von Wasser aus dem Flammschutzmittel führen. Die Reaktion wird von dem zur Verdampfung gebrachten Wasser gekühlt.

Bei anorganischen Flammschutzmitteln, z.B. roter Phosphor, bildet dieser eine Schicht aus Phosphor- und Polyphosphorsäuren auf der Oberfläche aus und lässt diese aufquellen. Daraus bildet sich eine isolierende Schicht und schützt somit das Material vor erneutem Sauerstoffzutritt.

Der Einsatz von Flammschutzmitteln bei Möbeln ist häufig schwer ermittelbar. Es finden sich so gut wie keine Stoffdaten zu Möbelmaterialien von Herstellerseite aus. Gleichwohl ist bekannt, dass in industriell gefertigten Pressspanmöbeln und einigen Kantenumleimer brandhemmende Materialien verwendet werden (Etwa im Leim oder in Kunststoffen).

3.7 Zündmethoden

Wichtig für die Ergebnisse eines Brandversuches ist die richtige Wahl der Initialbrandlast. In diesem Abschnitt sollen bereits etablierte Verfahren zur Brandsimulation aus verschiedenen Literaturwerken dargestellt werden.

3.7.1 Holzkrippen

Holzkrippen bestehen aus regelmäßig angeordneten Holzstäben. Dieses Verfahren wird z. B. für die Prüfung des Brandschutzes von großflächigen Dächern benutzt. Dabei sind die Menge, Maße, Feuchtigkeit und die Zündung des Holzes genormt. (DIN 18234)



Abbildung 11 Prinzipskizze Holzkrippen (selbst erstelltes CAD Design)

Holz hat den Vorteil, dass es prinzipiell einfach transportiert und gelagert werden kann. Allerdings wird zum gleichmäßigen, flächigen Entzünden ein Brandbeschleuniger, wie z. B. Benzin, benötigt.

Bei Brandsimulationen, in denen Stoffemission (insbesondere Ruß und Feststoffpartikel) gemessen werden soll, hat Holz den Nachteil, dass es für eine reproduzierbare Anwendung konditioniert und definiert gelagert werden muss.

Diese Art von Brandsimulation wurde im Jahr 2004 unter anderem von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) des KIT verwendet, um die Einsatzmöglichkeiten eines mobilen Infrarot-Gasanalytators zu prüfen. Dazu wurde exemplarisch eine Holzkrippe sowie darin enthaltene Hart-PVC-Stäbe und kunststoffummanteltes Kupferkabel verbrannt (Basmer und Zwick 2004).

3.7.2 Poolfeuer

Ein Poolfeuer ist eine mit z. B. Benzin oder Ethanol befüllte Wanne, die entzündet wird. Das Verfahren eines Poolfeuers ist in der VDI Richtlinie 6019, Blatt 1, geregelt. In der VDI Richtlinie ist sowohl die Wannengröße als auch die empfohlene Flüssigbrennstoffmenge genormt. Die Brennstoffwanne sollte in eine Wasserwanne gestellt werden, um eine gleichmäßige Wärmefreisetzungsrates über die gesamte Abbrenndauer zu erreichen. Mit den Angaben aus der Norm und der Anzahl an Wannen lässt sich die Wärmefreisetzungsrates aus der Richtlinie entnehmen. Die Brandwanne bietet den Vorteil, dass über relativ lange Zeit eine konstante und hohe Wärmeleistung erbracht wird. (VDI Richtlinie 6019) Allerdings ist ein Poolfeuer nicht nachregelbar (Menzel und Dinkov 01) – was für Zwecke der Reproduzierbarkeit aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten eine Notwendigkeit ist -- und stellt so ein Problem für die wiederholbare Abbildung von Brandrandbedingungen dar.

Ethanol als Brennstoff hat den Einsatzvorteil gegenüber Holz oder fossilen Brennstoffen, dass die Flamme rußarm brennt.

Poolfeuer mit Benzin als Brennstoff werden aktuell zur Prüfung der Sicherheit von modernen Lithium-Ionen Traktionsbatterien für die Fahrzeugbranche verwendet (gemäß ECE R100-Richtlinie).

Gasbrenner haben den Vorteil, dass die Leistung während der Brandsimulation gezielt geregelt werden kann. So können – anders als bei Holzkrippen – Abbrandprofile und Leistungsdaten gezielt und zeitaufgelöst vorgegeben werden. Als Brenngas können z. B. Methan oder Propan verwendet werden. Bei größerem Verbrauch ist Methan bzw. Erdgas praktikabler, da dieses häufig von Energieversorgern direkt über Leitungen zur Verfügung gestellt wird.

3.7.3 Kiesbettbrenner

Bei diesem Verfahren in Anlehnung an DIN 18234 wird das Gas vor der Entzündung durch ein Kiesbett geleitet. Dadurch kann eine über die gesamte Fläche gleichmäßige Gasverteilung erreicht und ein gleichmäßiger, kontrollierter und reproduzierbarer Brand mit chemischem Energieeintrag (d.h. definiertem Heizwert) simuliert werden.

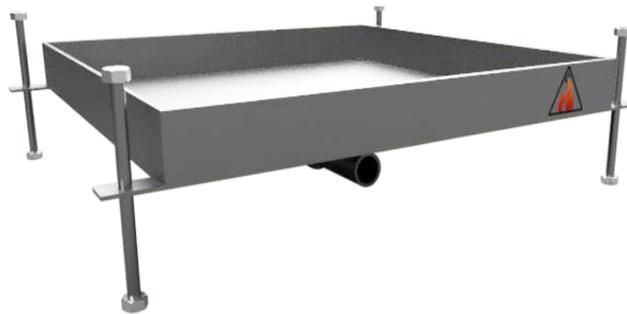


Abbildung 12 Prinzipskizze eines Kiesbettbrenners in Anlehnung an DIN 18234 (selbst erstelltes CAD Design)

3.7.4 Einzelgasbrenner

Bei Einzelgasbrennern wird das Gas über eine Düse in die Umgebung geleitet und direkt über der Düse entzündet. Hierbei kann häufig zwischen Diffusions- und Vormischflamme gewechselt werden.

Mit einer Diffusionsflamme wird ein relativ realitätsnaher Brand simuliert. Der Unterschied zu einem Realbrand liegt darin, dass das Gas mit relativer hoher Geschwindigkeit austritt. Zudem ist die thermische Belastung bei einem Einzelgasbrenner sehr punktuell. Auch mit mehreren Brennern lässt sich die Brandlast nicht optimal verteilen. Jedoch lässt sich durch eine Prallplatte die Gasgeschwindigkeit vermindern und eine bessere Verteilung erreichen.

(Mineralienatlas Lexikon - Bunsenbrenner) (Forschungsstelle für Brandschutztechnik 2015)

3.7.5 Ringofen

Nach dem Entwurf der DIN 53436 soll das neue Verfahren des Ringofens genormt und etabliert werden. Bei diesem Verfahren soll ein sog. Ringofen zur analytisch-toxikologischen Untersuchung von

thermischen Zersetzungsprodukten verwendet werden. Hierbei wird die zu untersuchende Probe in eine Kuvette eingebracht und die Kuvette anschließend in ein Quarzglasrohr gelegt. Der Ringofen umschließt das Quarzglasrohr in Strömungsrichtung vor dem Rohr. Das Rohr ist auf einer Seite zur Umgebung offen und an der anderen Seite mit den Messgeräten verbunden. Durch die offene Seite wird Umgebungsluft angesaugt (DIN 53436).

3.7.6 Wärmestrahler

Durch Wärmestrahler lassen sich indirekte thermische Belastungen simulieren. Im Realfall kann ein brennbarer Gegenstand so weit entfernt von der Flamme sein, dass es zu keinem direkten Kontakt zwischen der Flamme und dem Gegenstand kommt. Ein Wärmestrahler bietet den Vorteil, dass sich die Energie großflächig und gleichmäßig, sowie reproduzierbar aufbringen lässt und der konvektions-Anteil sehr gering ist. Strahler können entweder elektrisch oder mit Gas betrieben sein.

3.7.7 Heizplatte

Mit einer Heizplatte kann Energie gleichmäßig in eine Probe eingebracht werden. Dadurch kann ebenfalls eine indirekte thermische Belastung simuliert werden. Ein mögliches Simulationsszenario wäre beispielsweise ein Brand in einem angrenzenden Raum, bei dem die resultierende Wärmeleitung durch Türen analysiert werden soll.

Dieses Verfahren wurde an der FFB z.B. verwendet, um Wolle zu pyrolysieren. Dabei wurde ein Gemisch aus 60% Wolle (Mohair, Haare der Angora Ziege) und 40% Acryl (Acryl ist eine funktionelle Gruppe der organischen Chemie) auf eine Heizplatte gelegt und erwärmt. (Basmer und Zwick 2004)

4. Methodik

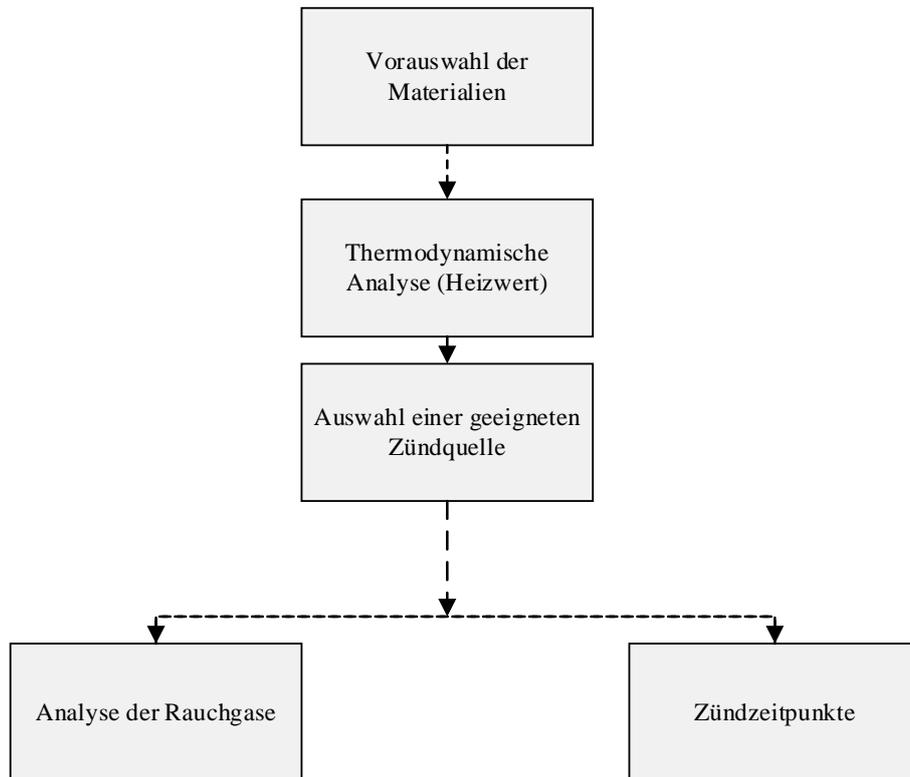


Abbildung 13 Methodik der Versuchsdurchführung und Reihenfolge der Untersuchung (eigene Abbildung)

Es werden für verschiedenste, sorgfältig nach Epochen ausgewählte gebräuchliche Möbelmaterialien das Brandverhalten und die thermische Belastbarkeit im Labormaßstab bestimmt werden. Der Fokus liegt dabei zunächst auf der Reproduzierbarkeit eines Initialbrandes, bzw. einer Zündquelle und der thermodynamischen Analyse der Materialien. Die Vorauswahl der Materialien geschieht durch erste Messversuche unter Zuhilfenahme einer IR-Kamera und optischen Abschätzung des Brandverhaltens, und Erstellung eines Materialkataloges.

Ziel der Untersuchung: Ein erster Schritt in die Definition für ein mögliches Beurteilungskriterium für den Wandel von Brandentstehungsphasen mit dem Einzug moderner Materialien in moderne Lebensräume. Dies soll im Idealfall festlegen und definieren kann, bis zu welcher Abweichung Unterschiede als signifikant bezeichnet werden können.

Da schlussendlich Zimmerbrände unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden sollen, ist auch der im Folgenden beschriebene Laborversuchsaufbau entscheidend.

5. Exkurs: Mobiliar über die Jahrzehnte

Bei der Bewertung von Gefahrenpotentialen und Brandverläufen ist es letztlich unerlässlich immer auch zu einer Bewertung der möglichen Brandlast. Es ist schlicht naheliegend, hierfür die Einrichtungstrends zu betrachten um das Gefahrenpotential unter Umständen einer Neubewertung zu unterziehen.

Der Begriff der *modernen Möbel* bezieht sich dabei auf Möbeldesigns, die vom späten 19. Jahrhundert bis in die Gegenwart produziert werden. Nach dem Zweiten Weltkrieg beeinflussten die zunehmende Kommodifizierung und Ökonomisierung die Bewertung von Zweckmäßigkeit und Design vieler Elemente. Dies resultierte zunächst in neuem Designempfinden und veränderte die Ästhetik der Wohneinrichtungen stark.

Gleichzeitig wurden durch neue Produktionsprozesse andere Materialien nicht nur ästhetisch, sondern auch ökonomisch allgegenwärtig. Dies spiegelt sich in einer Abkehr von geschreinerten Möbeln, hin zu industriell massengefertigten Möbel wieder.

Diese Entwicklung verändert die Brandentstehungsphase und unter Umständen die Art der Brandlast. Furnierholz- und Cellulose- basierte Möbelstrukturen zeigten in Vorversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik in Karlsruhe z.T. signifikant andere Brandeigenschaften und Rauchgasemissionen im Vergleich zu Massivholzstrukturen. Die Integrale Wärmefreisetzung (WFR) ist in Vorversuchen im Labormaßstab dabei ca. 20 % höher, wie aus **Abbildung 14** (als gedachte Fläche unter der Kurve) leicht zu entnehmen ist.

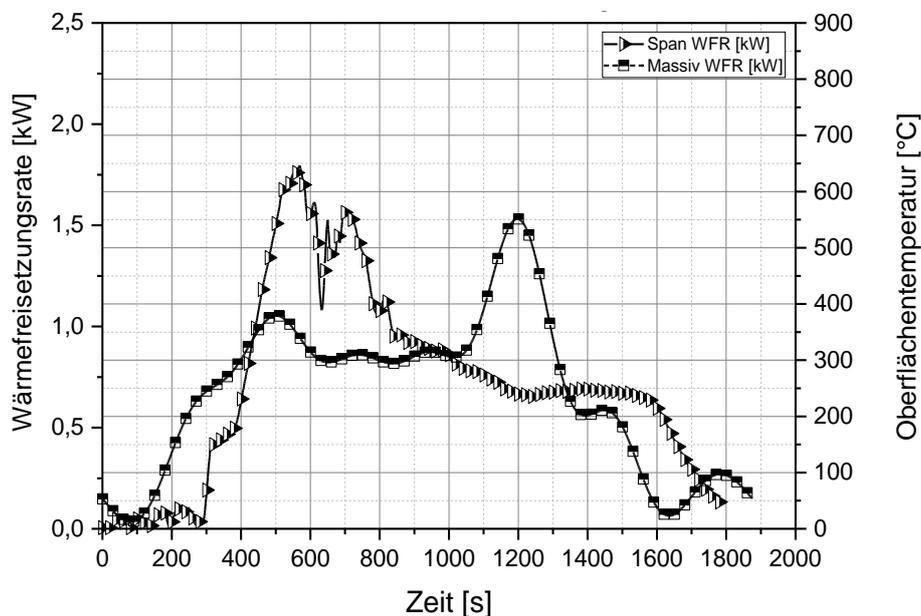


Abbildung 14 Vergleich unterschiedlicher Wärmefreisetzungen bei einem Zimmerbrand als Funktion der Mobiliarstrukturen (Massivholz v. Spanplattenbasiert).

Begründet werden kann dies durch schnellere und somit heftiger verlaufende Brandverläufe aufgrund der geringeren Masse und einem komplett anders gearteten strukturellen Aufbau der Möbelstücke.

An einem geeigneten Schnittbild (siehe **Abbildung 15**), lässt sich dieser Aufbau anschaulich darstellen.



Abbildung 15 Schnittbild zweier moderner Materialstrukturen (eigene Abbildung)

Ein wiederkehrender Typ dieses durchaus komplexen Aufbaus stellt sich unter genauerer Analyse dabei wie folgt dar **Abbildung 17** & **Abbildung 18**:



Abbildung 16 Foto Aufbau eines Möbelstücks (eigene Abbildung)

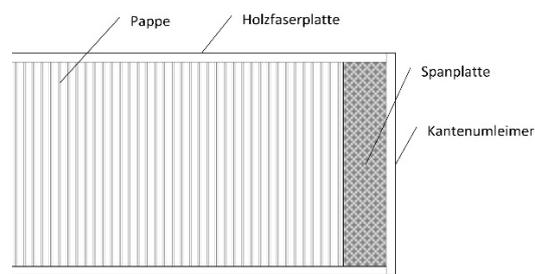


Abbildung 17 Skizze Aufbau eines Möbelstücks (eigene Abbildung)

Die äußerste Schicht der Möbel besteht an den seitlichen Kontaktflächen aus einer lackierten Holzfaserverplatte. Darunter befindet sich eine Wabenstruktur aus Pappe. An den Kanten bilden Kantenumleimer die äußerste Schicht. Unter diesen befindet sich eine Spanplatte.

Der komplexe Aufbau der Möbel aus verschiedenen Materialien und der Einfluss von Kantenumleimern hat bereits in an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Raumbrandversuchen und Vorversuchen zu Problemen geführt. Es zeigte sich, dass etwa die Kantenumleimer der Probenmaterialien nicht zu vergleichbaren Zeitpunkten zu brennen beginnen, sondern zu unterschiedlichen Zeiten lediglich abtropfen (vgl. hierzu Kapitel 3.6). Erst die darunterliegende Spanplatte entzündete sich. Dies führt zu unterschiedlichen Zündverhalten. Dies wiederum ist ein Störfaktor bei dem Wunsch nach Reproduzierbarkeit.

Der Brandverlauf selbst ist – sofern die Vollbrandphase erreicht ist – nicht grundsätzlich anders zu erwarten. In 2016 durchgeführten Versuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wird dies anschaulich dargestellt. Hier werden in geschlossenen Volumina gezündete Materialien bezüglich ihrer Abgasemissionen verglichen. CO₂ als stabiles Endprodukt einer Verbrennungsreaktion ist ein sehr guter Indikator für die Qualität und Vollständigkeit einer Verbrennung, da die Verbrennungskinetik bei diesen Temperaturen die Oxidationsreaktion stark hin zu CO₂ verschiebt.

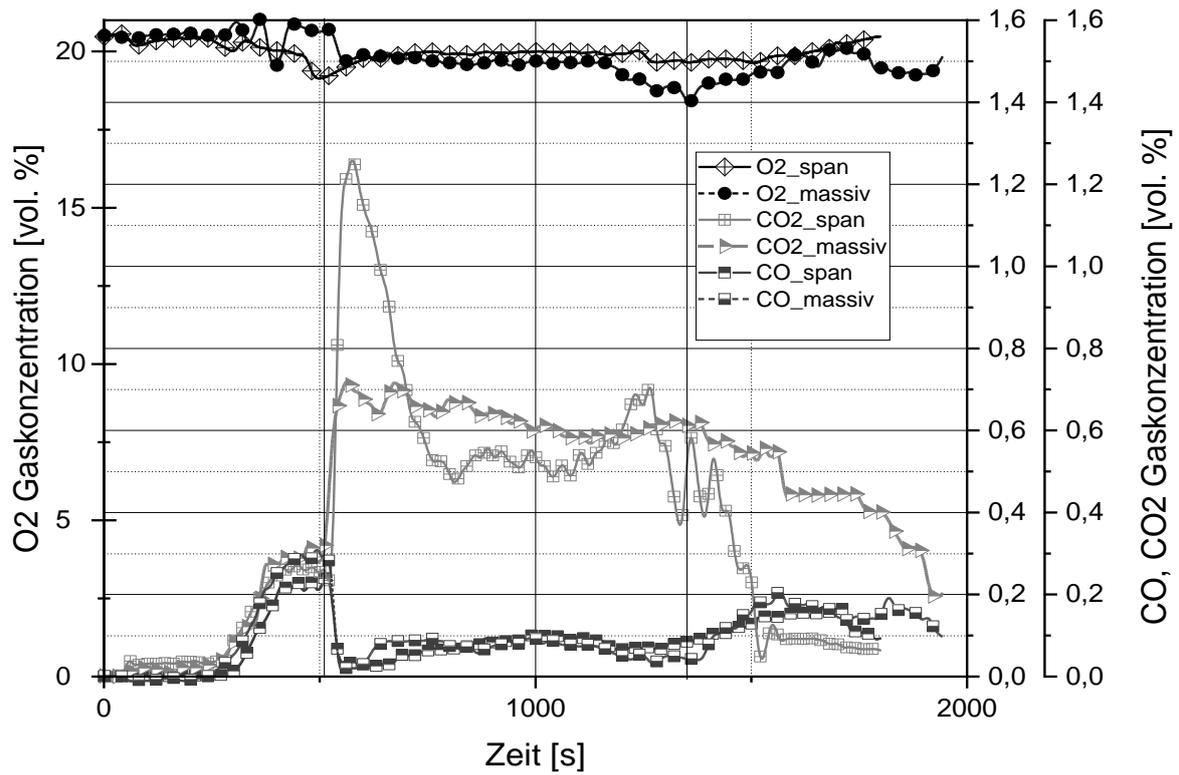


Abbildung 18 Vergleich unterschiedlicher Gasemissionsschaubilder bei einer 2016 durchgeführten Versuchsreihe als Funktion der Mobiliarstrukturen (Massivholz v. Spanplattenbasiert)

Abbildung 18 zeigt unterschiedliche Brandverläufe anhand von Gasemissionen für unterschiedliche Mobiliarstrukturen. Hier sind deutliche Unterschiede zwischen alten und neuen Strukturen zu erkennen.

6. Versuchsaufbau

Auf Grundlage der im Kapitel **Exkurs: Mobiliar über die Jahrzehnte** gemachten Beobachtung wurden kalorimetrische Untersuchungen der Materialien durchgeführt. In verbrennungskalorimetrischen Versuchen wurden hierfür verschiedene Materialien unterschiedlichen Alters untersucht. Bei der Verbrennungskalorimetrie handelt es sich um die messtechnische Bestimmung spezifischer Verbrennungsenthalpien mithilfe eines Kalorimeters. Dieses dient somit der Bestimmung von Heizwerten getesteter (in diesem Fall zum Teil unbekannter) Materialien zum praxisnahen Einsatz in der Heiz- und Sicherheitstechnik. Hierbei wird in den oberen Heizwert und unteren Heizwert unterschieden (Joos 2006).

Unterer Heizwert $H_{Br,u}(T_0)$:

Er wird in Übereinstimmung mit DIN-Normen oft nur als Heizwert bezeichnet (Joos 2006). Er entspricht dem Betrag der Verbrennungsenthalpie, wenn das bei der Verbrennung entstehende Wasser gasförmig vorliegt. Er liefert somit den Betrag der maximal nutzbaren freigesetzten Wärme eines Stoffes bei Oxidation mit Sauerstoff. In technischen Feuerungen wird im Allgemeinen im Abgas der Taupunkt nicht unterschritten. Für diese Anwendung ist es also sinnvoll mit $H_{Br,u}$ zu rechnen.

Brennwert (veraltet: Oberer Heizwert $H_{Br,o}(T_0)$)

Der Brennwert entspricht der Verbrennungsenthalpie bei Kondensation des entstehenden Wasserdampfes (Joos 2006).

Die frühere Bezeichnung des oberen Heizwertes entspricht folglich der Summe aus unterem Heizwert und der Verdampfungsenthalpie des bei der Verbrennungsreaktion entstandenen, kondensierten Wassers (Joos 2006). Zur Bestimmung des Brennwertes muss also zunächst die Verbrennungsenthalpie eines Stoffes bestimmt werden. Um hingegen den unteren Heizwert bestimmen zu können, muss bekannt sein, wie viel Wasserstoff in einer Probe gebunden ist und wie viel Wasser dementsprechend auskondensieren kann. Dies ist bei Nicht-Reinstoffen schwierig zu bestimmen. Daher wurde zunächst der Brennwert der verwendeten Proben bestimmt. Dieser ist für nicht wasserstoffhaltige Stoffe (beispielsweise reines Kohlenmonoxid CO) identisch mit dem unteren Heizwert. Bei Holz kann der Unterschied bis zu 20 % betragen, da der Wassergehalt im Material deutlich höher ausfällt.

Zur Bestimmung des Brennwertes kam ein Brennk calorimeter vom Typ IKA C200 (**Abbildung 19**) zum Einsatz. Mit diesem wurde mittels einer Bombenkalorimetrie der obere Heizwert der Proben bestimmt. Dabei wird die zu messende Substanz in einen Glas-Tiegel gefüllt. Dieser wird in eine Bombe (abgeschlossenes Metallgefäß mit konstantem Volumen in dem die Verbrennung stattfindet) eingehängt, welche mit Sauerstoff gefüllt und druckdicht verschlossen wird. Mithilfe eines unter Spannung gesetzten Baumwollfadens und dadurch erzeugten Lichtbogens wird der zu bestimmende Stoff gezündet. Die Substanz wird so unter Sauerstoffüberdruck ($p = 30 \text{ bar}$) verbrannt.

Die Bombe wird bei Probeneinbau mit einer definierten Wassermenge umgeben, welcher zunächst einen inneren Wasserbehälter füllt in dem die Bombe montiert ist. Dieser ist mit Wasser einer ebenfalls definierten Menge umgeben. Anschließend werden die Temperaturen des Wassers automatisiert bestimmt.

Da die Verbrennung bei konstantem Volumen und ohne Austausch von Arbeit erfolgt, ist die vom Messsystem mit dem Kalorimeter ausgetauschte Wärme gleich der Änderung der inneren Energie (Joos 2006). Darüber hinaus ist die spezifische Wärmekapazität von Wasser bei dieser Versuchsanordnung konstant. So kann über eine Bestimmung der Wärmemenge nach direkt der obere Heizwert bestimmt werden.



Abbildung 19 IKA C200 Bombenkalorimeter



Abbildung 20 Kalorimeterbombe, Zündvorrichtung, Behälter, Dichtung

Die gemessenen Brennwerte wurden auf Grundlage von (Vornorm DIN V 18599-1:2018-09) nach unten abgeschätzt und mit Literaturheizwerten verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in **Abbildung 21** dargestellt.

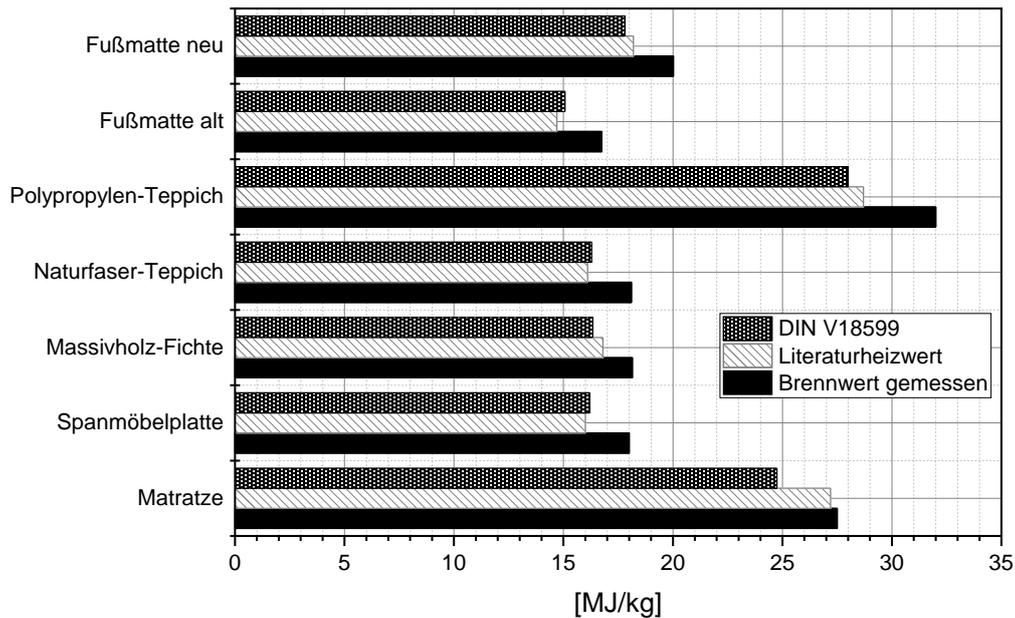


Abbildung 21 Balkendiagramm gemessener und aus der Literatur ermittelter Heizwerte

Auf Grundlage der ermittelten Heizwerte wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, mit dem im Labormaßstab Zünd- und Brandverhaltensweisen bestimmt werden sollten.

Zur Bestimmung der Brandeigenschaften von Wohnraumeinrichtungsgegenständen wurden 10 cm x 10 cm große Proben im Labormaßstab mit 2 thermischen Belastungsarten entzündet (Wärmestrahler & Ethanol-Poolfeuer) und Abgase sowie die Massenabnahme (und somit reziprok die Abbrandmasse) der Proben erfasst. Zusätzlich wurde die Strahlungsleistung mit einem Wärmeflussaufnehmer bestimmt.

Die Messungen wurden alle an einer Kleinbrandversuchsanlage der FFB durchgeführt. Diese besteht aus einem Ofenaufbau, der nach Vorbild europäischer Normen (DIN EN 13823) aufgebaut wurde und der für Anwendungen im „mittleren Beanspruchungsbereich“ vorgesehen ist. Die Messstände wurden darauf ausgelegt und darin aufgebaut. In diesem Kapitel sollen die Versuchsaufbauten vorgestellt und die Messmethodik erläutert werden.



Abbildung 22 Messkammer nach Vorbild DIN EN 13823

6.1 Auswahl Zündquelle

Um größtmögliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird als Zündquelle ein Wärmestrahler verwendet. Dies hat den Vorteil, dass die Phänomenologie des Wärmeübergangs durch gezielte Messung der Strahlungsintensität mittels eines Wärmeflussaufnehmers über den der Abstand zur Probe gezielt einstellbar ist. Zusätzlich wurden vergleichende Proben mit 100 ml Spiritus als Poolfeuer durchgeführt.

6.2 Versuchsaufbau: Probenhalterung und Messtechnik

In **Abbildung 23** ist der schematische Aufbau des Messstandes für die Strahlerzündung in der Versuchskammer dargestellt.

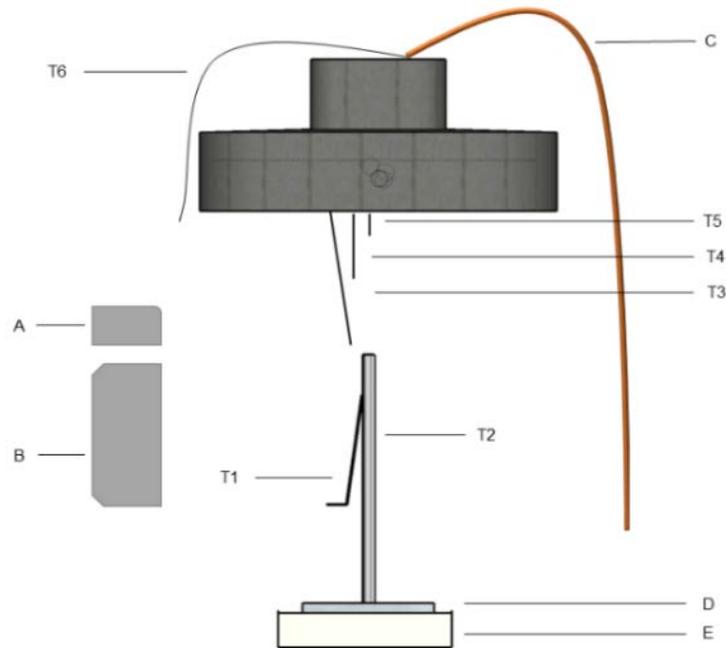


Abbildung 23 Probenhalter(D), Waage(E), Absaugtrichter, Thermoelemente (T1-T6), Keramikstrahler (B), Wärmeflussaufnehmer (A) und Rauchgassonde (C)

Die Anlage kann unterteilt werden in:

- *Wärmeflussaufnehmer A* zur reproduzierbaren Kontrolle der Wärmestrahlung
- Keramik-Hochtemperatur-Strahler B
- Rauchgassonde C
- Probenhalterung D
- Waage E
- Thermoelemente T1-T6

Dabei wurde die Auftriebsströmung der entstehenden Rauchgase örtlich kanalisiert in dem ein sich verjüngender Edelstahl-Trichter verwendet wurde. Dieser wurde 45 cm über der Probe angebracht. Der Einfluss der sehr viel größeren Brennkammer auf die Speziesverdünnung konnte so verringert werden.

Als *Wärmeflussaufnehmer* wurde ein wassergekühltes Modell des Typs Gardon-Gauge der Firma Medtherm verwendet. Mit diesem wurde der Keramikstrahler als Zündquelle ermittelt

Dabei handelt es sich um ein Thermoelement in einem Kupfergehäuse. Dieses ist mit einem schwarzen Graphitlack beschichtet welcher einen Emissionsgrad $> 0,99$ aufweist. Das Thermoelement sitzt im

inneren des beschichteten Gehäuses und kann über thermoelektrische Eigenschaften (Zeeman-Effekt) mithilfe einer definierten Gehäuse-Wasserkühlung (14 °C Wasser-Eintrittstemperatur) ein im Schwarzkörperofen zuvor kalibriertes Spannungssignal abgeben. Mittels Anpassung durch eine Kalibrierkurve entspricht dies der Wärmestrahlung in W/cm^2 . Durch die Oberflächenbeschichtung und die Konstruktion kann der Wert ohne Emissionsgradkorrektur über eine indirekte Messung (Erwärmung des beschichteten Gehäuses) gemessen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Temperaturgrenze des Wärmeflussaufnehmers nicht überschritten wird. Durch Vorversuche und Messung der Wasseraustrittstemperatur konnte dies sichergestellt werden.

6.2.1 Keramik-Hochtemperatur-Strahler

Für den Zündenergieeintrag wird ein Keramikwärmestrahler gewählt. Dabei handelt es sich um ein Modell des Typs HTS der Firma Elstein (vgl. **Abbildung 24**). Der Wärmestrahler mit den Maßen 12 x 12cm besteht aus einer mit einer Keramikplatte bedeckten Heizschlange. Dieser leistet 1 kW und erreicht dabei eine Betriebstemperatur von 850°C. (Herstellerangaben).

Nach Vorversuchen mit kleineren Strahlern desselben Typs erscheint dieses Wärmestrahler Modell aufgrund seiner erhöhten, für die Anwendung geeigneteren Leistung gut geeignet. Mithilfe einer Wärmebildkamera kann dabei festgestellt werden, dass dieser nicht gleichmäßig über der Fläche abstrahlt. Im Bereich der Heizschlangen findet hier eine leichte lokale Überhöhung der angegebenen Maximaltemperatur statt. Da der Wärmestrahler aber nicht auf Kontakt, sondern in geeignetem Abstand betrieben wird, kann eine gleichmäßige Abstrahlung in praktikabler Näherung angenommen werden. Die in Hersteller-Handbüchern angegebene Temperatur von 900 °C wird im Mittel auch erreicht.



Abbildung 24 Elstein HTS 1000 Keramikstrahler

6.2.2 Rauchgassonde und Probenhalterung

Die für die Rauchgasmessungen verwendete Rauchgassonde besteht aus einem Kupferrohr mit 3 mm Innendurchmesser welches in die verjüngte Öffnung des Trichters eingeführt wird. Durch diese Anordnung soll der Strömungseinfluss auf das Rauchgas vermindert und der verdünnende Effekt des Verhältnisses $\frac{V_{Brennkammer}}{V_{Probe}} \gg 100$ auf die Rauchgaskonzentration verkleinert werden.

6.2.3 Probenhalterung und Waage

Die Probenhalterung ermöglicht eine Höhen- und Winkelverstellbarkeit der Probe. Dadurch kann die optimale Position der Probe zum Strahler und somit eine gleichmäßig einstellbare Temperatur gewährleistet werden. Die Massenabnahme der Probe während der Verbrennung wird mithilfe einer Waage des Typs Kern PCB-6000 mit RS232 Schnittstelle und sekundlicher Taktung ermittelt. Mithilfe des erhaltenen Massenverlaufs kann nach Bestimmung der Masseabnahmerate die Wärmefreisetzungsrate (unter Berufung der in u.a. **Abbildung 21** beschriebenen Vergleichsmethode mit Literaturheizwerten) bestimmt werden.

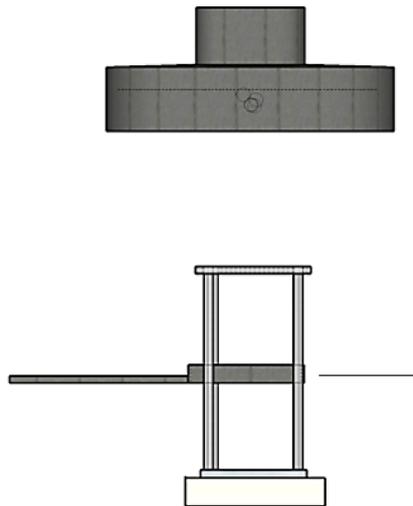


Abbildung 25 Probenhalter mit Zündeinrichtung und Absaugtrichter

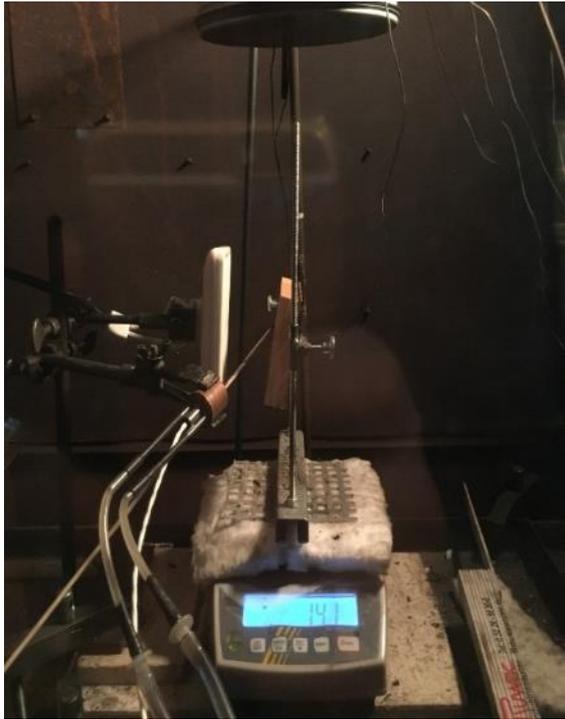


Abbildung 26 Aufbau Strahler

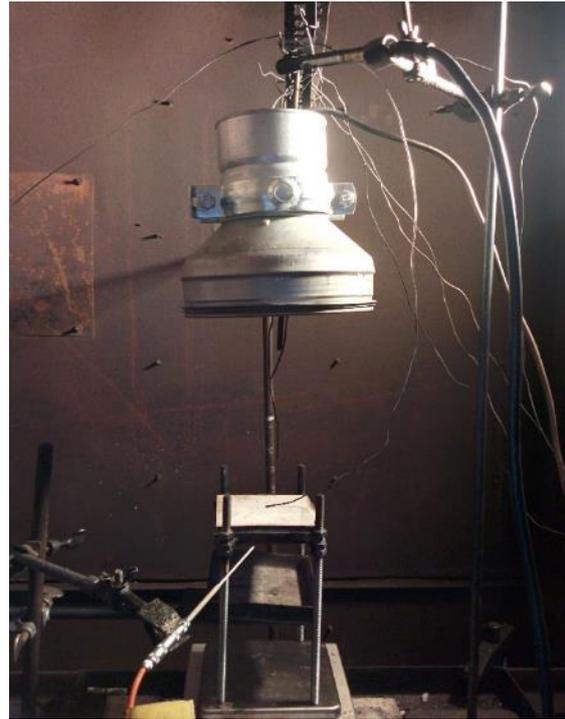


Abbildung 27 Aufbau Poolfeuer

6.2.4 Thermoelemente

Die Versuchskammer gemäß **Abbildung 22** wird mit 6 Thermoelementen ausgestattet. T1 ist dabei vom Typ S, alle anderen Thermoelemente vom Typ K. Thermoelemente vom Typ S weisen im Gegensatz zu Thermoelementen vom Typ K einen erweiterten Temperaturbereich, schnelleres Ansprechverhalten sowie eine konstruktionsbedingt höhere Genauigkeit auf, sind gleichzeitig aber weniger robust. Mithilfe der Thermoelemente kann der Brandfortschritt bestimmt und die Flammgeometrie eindimensional über der Höhe vermessen werden. T1 befindet sich auf der Probe, T2 unter der Probe. T3, T4 und T5 vermessen im Abstand von 5cm, 25cm und 35cm über der Probe die Flamme auf verschiedenen Punkten der senkrechten Achse. T6 misst die Rauchgastemperatur auf Höhe der Sonde. Dieser Messaufbau ist für beide Aufbauten identisch. Lediglich T1 und T2 ändern ihre Orientierung um 90 ° mit Änderung des Probenhalter-Zündquellen-Winkels, bleiben dabei jedoch stets in direktem Probenkontakt.

Zusätzlich wurde ein Platten-Thermoelement im Boden der Messkammer zur Kontrolle der Raumtemperatur verwendet.

6.2.5 Ethanol, Energieeintrag

Im Poolfeuer Versuchsaufbau der Vorversuche grundsätzlich eine flüssige Brandlast verwendet. In dieser Versuchsreihe kamen dabei jeweils 100 ml Ethanol mit einer Reinheit von 99,9% zum Einsatz. Dies entspricht bei Raumtemperatur etwa 79 g Ethanol. Das Ethanol wurde in die Brennwanne eingefüllt und gezündet

Der Energieeintrag des Ethanol bei dargestelltem Probenaufbau berechnet sich nach $Q = H_{\text{Br,u}} * m$ zu 2,1 MJ.

6.2.6 Versuchsaufbau: Abgas-Analyse

Die Probeentnahme erfolgt über Rauchgassonde mit einer dahinter geschalteten Pumpe. Der mit Hilfe eines Schwebekörper-Durchflussmessers eingestellte Durchfluss beträgt 0,7 l/min. Das Rauchgas strömt durch eine Trockensäule mit Silica-Gel-Kugeln in ein Messrack. In diesem sind ein *ABB Uras* zur Messung des O₂ und CO-Gehaltes so wie ein *Emerson Binos* zur Messung von CO₂ in Serie geschaltet. Diese werden zunächst mit geeigneten Prüfgasen kalibriert. Die analogen Messsignale werden von zwei AD-Wandler/DAQ-Modulen (Data Acquisition) in ein digitales Signal übersetzt. Dieses wird mithilfe der Software DASyLab (Data Acquisition System Laboratory) ausgewertet und in Microsoft Excel gespeichert, welches somit auch als Echtzeitüberwachung der Speziesverläufe dient. **Tabelle 4** zeigt die verwendeten Messgeräte und dazugehörigen Messprinzipien: Die Messsysteme sind dabei in Reihe geschaltet und werden von einer externen Pumpe betrieben.

Tabelle 4 Messgeräte und Messprinzipien

Messgerät	Messgröße	Messprinzip
ABB Uras	O ₂ , CO	NDIR (Nicht dispersive Infrarot Absorption)
Emerson Binos	CO ₂	NDIR (Nicht dispersive Infrarot Absorption)

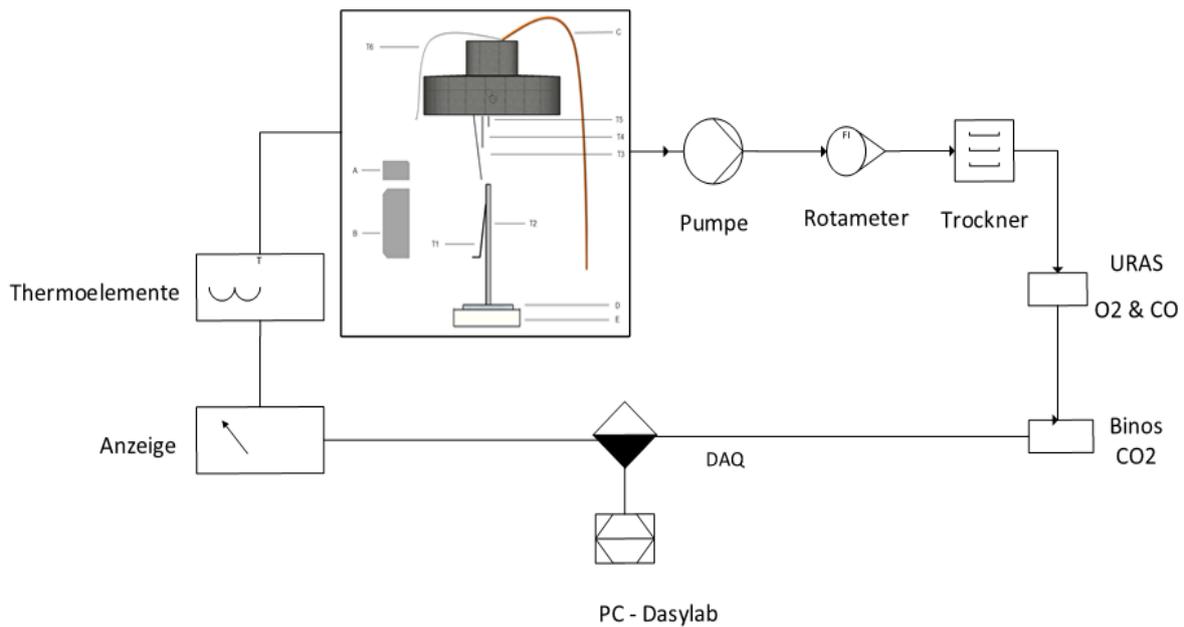


Abbildung 28 Fließschema der Messtechnik und Abgasuntersuchung

Zur Untersuchung eines möglichen Brandverlaufs im Wohnungsbrandszenario wurde nach Vorversuchen eine geeignete Auswahl an Einrichtungsgegenständen und Probenmaterialien gewählt.

Dabei wird in unterschieden in:

- „neue“, zeitaktuelle, kurz zuvor erstandene
- „alte“, vor 30 Jahren typischerweise verwendete Materialien aus Hausbeständen unterschieden.

Die Proben wurden zu Beginn auf eine konstante Größe von 10 cm x 10 cm gebracht, um Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Die Materialdicke variiert dabei Stoffabhängig. Das Massivholz weist dabei eine Dicke von 22 mm, die Spanmöbelplatte von 16 mm auf.

Bei den Textilprodukten ist die Bestimmung der Dicke wenig praktikabel da diese als handelsübliche Teppiche/Fußmatten aufgrund der variierenden Faserformen keine homogene Dicke aufweisen. Der PU-Schaumstoff wurde zu 20 mm Dicke gewählt.

Tabelle 5 Probenmaterialien und Probenvergleich

Material	Neu	Alt	Masse neu in g	Masse alt in g
Holz	Spanmöbelplatte (Discounter)	Fichte (Massivholz)	100-105	90-95
Teppich	Kunstfaser-Langflor- Teppich (Discounter), 100% Polypropylen	Perser-Teppich, Naturfaser	17-20	13-15
Fußmatte	Kunstfaser-Fußmatte, PP Unterschicht(Discounter)	Sisal-Kunststoff Fußmatte (Discounter)	14-15	16-17
Matratze	PU-Schaum		6-7	

Aufgrund seiner weiten Verbreitung und unklaren Zusammensetzung ist die Spanmöbelplatte als Form des Holzspanwerkstoffes von besonderer Bedeutung für die Brandausbreitung in modernen Wohnungen. Im Allgemeinen wird hierfür Nadelholz verwendet, welches zunächst getrocknet, zerspant und anschließend unter Druck (i.d.R. in Autoklaven) verleimt wird. Dabei kommen in den Außenschichten feinere, in der Mittelschicht gröbere Späne zum Einsatz. Als Leim kommen im günstigen Bereich vor allem UF-Klebstoffe (Urea-Formaldehyd), im höherwertigeren und professionellen Bereich (nicht quellbare Ausführung) vor allem Melamin-Klebstoffe zum Einsatz. Beide Leime sind bei der Verbrennung potenziell besonders gesundheitsgefährdend und daher genauer zu untersuchen.

7 Auswertung und Diskussion

Für das Verständnis von Brandverhalten und Schadstoffemissionen bei Entstehungsbränden wurden Rauchgasuntersuchungen, Temperatur- und Strahlungsmessungen durchgeführt. Gestützt auf Vorversuche mit Brennwanne (Vergleiche hierzu exemplarisch **Abbildung 29** – Hier wird der Peak der Verbrennung für Spanholz Möbel zu einem früheren Zeitpunkt erreicht), wurden anschließend Versuche unter Zuhilfenahme des oben beschriebenen Wärmestrahlers durchgeführt, um verschiedene Brandszenarien (Schwelbrand, Flammenbrand) abdecken zu können. Dabei wurde jeder Versuch mindestens dreifach durchgeführt um Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der erhaltenen Messwerte gewährleisten zu können.

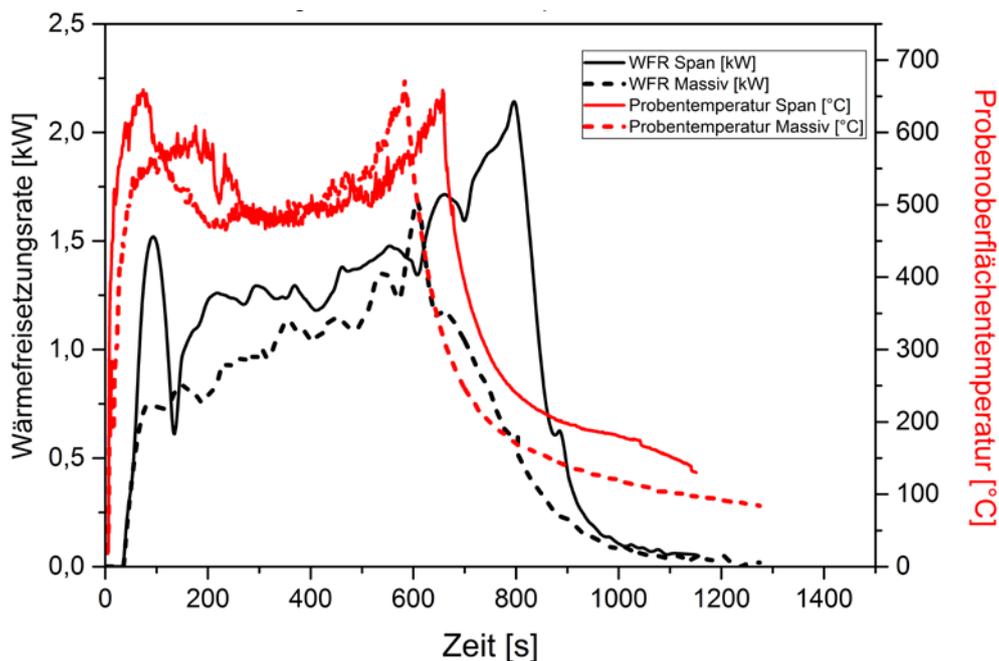


Abbildung 29 Vergleich der beiden Holzmaterialien unter Einsatz eines Poolfeuers mit 100 ml Ethanol -- Wärmefreisetzungsrate und Temperaturen

7.1 Ausgangslage und allgemeines Verhalten

Während der Versuche nimmt die Masse der Proben grundsätzlich ab. Für Schwelbrandversuche gilt dabei: Bei Erreichen einer Massenabnahmerate unter $0,1 \frac{g}{s}$ wird der Strahler abgeschaltet (**Abbildung 30**). Die Messung wird nach einer Abklingphase in der die Temperatur auf der Probe, sowie die gemessene Wärmestrahlung wieder auf einen geeigneten Endwert $< 0,8 \text{ W/m}^2$ zurückfällt beendet. Auf Grundlage dieser Regeln wurde ein geeigneter Strahlerabstand reproduzierbar festgelegt.

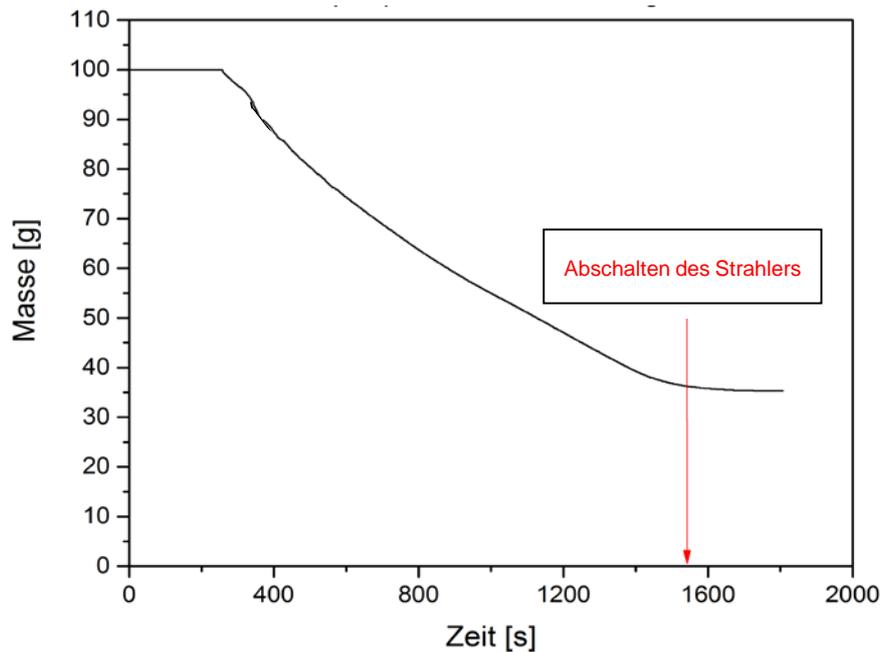


Abbildung 30 Massenabnahme Spanplatte ohne Zündung mit Markierung der Strahler Abschaltung

Unter Zuhilfenahme der ermittelten Brennwerte und eines Abgleiches mit bekannten Stoffheizwerten aus der Literatur, konnten für alle Materialien Wärmefreisetzungsverläufe über der Zeit ermittelt werden.

7.2 Rauchgase und Zündzeiten

Als Brandlast für den Labormaßstab kamen die zuvor bestimmten Proben zum Einsatz. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit werden zunächst die Holzproben miteinander verglichen. Da diese in Haushalts-Einrichtungen mengen- und volumen-mäßig auch die größte Gruppe darstellen, wird hierauf zunächst das Hauptaugenmerk gelegt.

Auswertung der Holzstoff-Proben

Aus Vorversuchen hat sich ergeben, dass die Holzproben (sowohl moderne, als auch alte) beim verwendeten Wärmestrahleraufbau keine Flammenerscheinung zeigten, sondern lediglich schwelen/glimmen. Vor allem die Holzproben bilden bei diesem Schwelvorgang deutlich sichtbare Pyrolysegase und rauchen stark (**Abbildung 31**).



Abbildung 31 Rauchende Probe

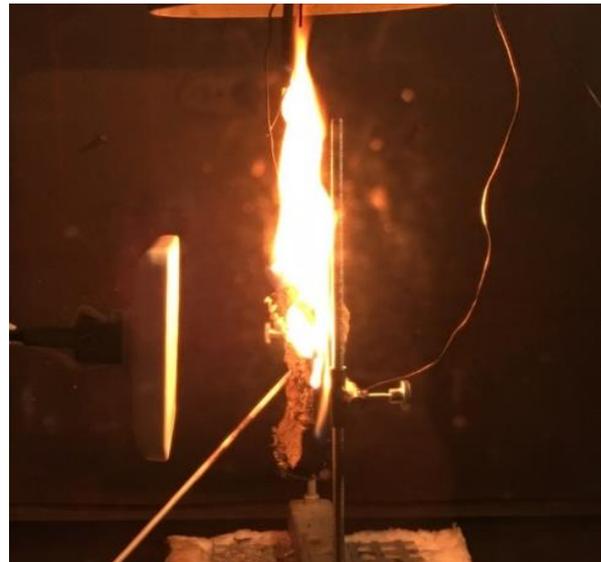


Abbildung 32 Mit Gaslanze gezündete Pyrolysegase

Im Brandfall tritt Schwelen selten singulär auf. Funkenflug, plötzliche Ventilation und Flammenüberschläge sorgen hier, zumindest lokal, meist für eine Zündung der brennbaren flüchtigen Stoffe. Aus diesem Grund wird zusätzlich zu einem definierten und reproduzierbaren Zeitpunkt mithilfe einer Gaslanze ein kurzer Zündimpuls gesetzt. Die Probe beginnt daraufhin zu brennen (**Abbildung 32**).

Am Beispiel der Spanmöbelplatte im Strahlerversuch mit Zündung: Ab einer Temperatur von etwa 250 °C entsteht deutlich sichtbar Rauch. Gleichzeitig setzt ein Anstieg der CO- und CO₂-Konzentration ein. Mit Erreichen eines stationären Konzentrationszustandes anhand eines Konzentrations-Plateaus in den Rauchgasverläufen findet die Zündung statt (**Abbildung 33**). Der exakte Zündzeitpunkt ist damit zwar probenabhängig verschieden, der Versuchsverlauf jedoch reproduzier- und vergleichbar.

Ab dem Zündzeitpunkt deutlich zu erkennen, ist dabei der gleichzeitig zum Abfall von CO stattfindende Anstieg von CO₂ bei erfolgter Zündung.

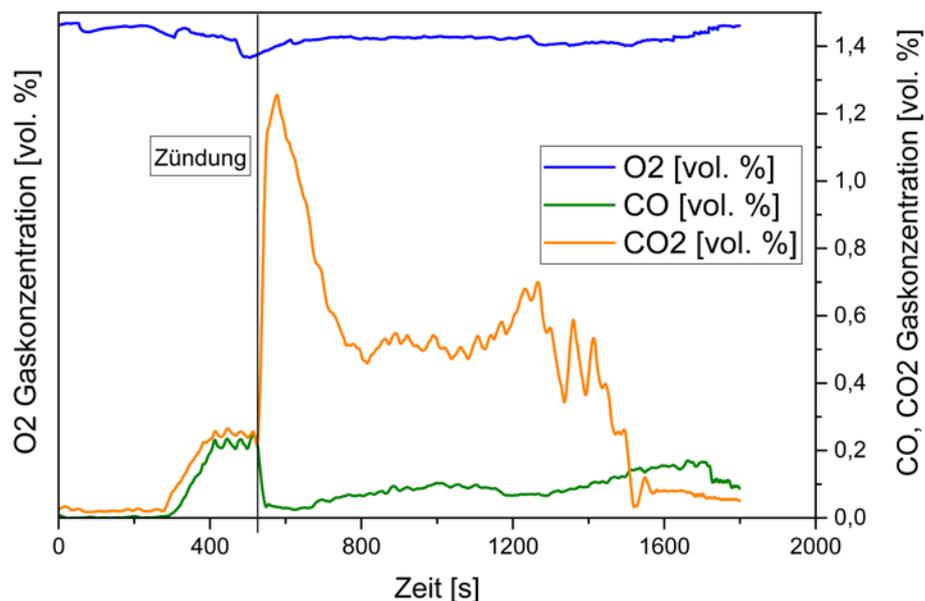


Abbildung 33 Abgase der Spanplatte mit deutlich erkennbarem Plateau und Zündung bei 450 s

Die CO-Bildungsreaktion geht zu Beginn mit einem leichten Abfall der Sauerstoffkonzentration einher. Unter sauerstoffarmen Bedingungen kommt es zur Bildung von CO. Dieses steht im Reaktionsgleichgewicht mit CO₂ und verschiebt sich nach der Zündung daher auf die Seite von CO₂. Mit Erlöschen der sichtbaren Flamme kommt es zu einem Abfall der CO₂ Werte. Gleichzeitig steigt die CO und O₂-Konzentration über der Zeit an, bis sie fast wieder das Ausgangsniveau vor der Zündung erreicht hat.

Betrachtet man die Spanplattenproben unter Schwelbrandbedingungen (s. **Abbildung 34** erkennt man zunächst einen Anstieg des CO-Konzentrationsniveaus auf einen Wert, welcher den von CO₂ leicht übersteigt. Dieser Anstieg kann erst nach Erreichen einer Grenztemperatur von 240° C beobachtet werden. Nach einiger Zeit kommt es zu einem Schnittpunkt der beiden Konzentrationsverläufe und CO₂ dominiert. Dieser Effekt konnte für alle Holzproben (Spanmöbelplatte und Massivholz) beobachtet werden und wird bedingt durch die Verschiebung des Gleichgewichts zugunsten von CO₂. Die O₂-Konzentration bleibt während des gesamten Versuches aufgrund der verdünnenden Wirkung des großen Brennkammervolumens auf einem konstant hohen Niveau. Lokal kann jedoch bei Einsetzen der Zündung ein Abfallen der O₂-Konzentration beobachtet werden. Mit Fortschreiten der Bestrahlung nimmt die CO-Konzentration leicht ab, die CO₂-Konzentration steigt leicht. Mit Abschalten des Strahlers und Abkühlen der Probe sinken alle gemessenen Produktspezieskonzentrationen auf Ausgangsniveau. Der Brand erhält sich in diesem Versuchsaufbau folglich nicht selbst und ist damit gut geeignet zur Untersuchung von Brandverhalten.

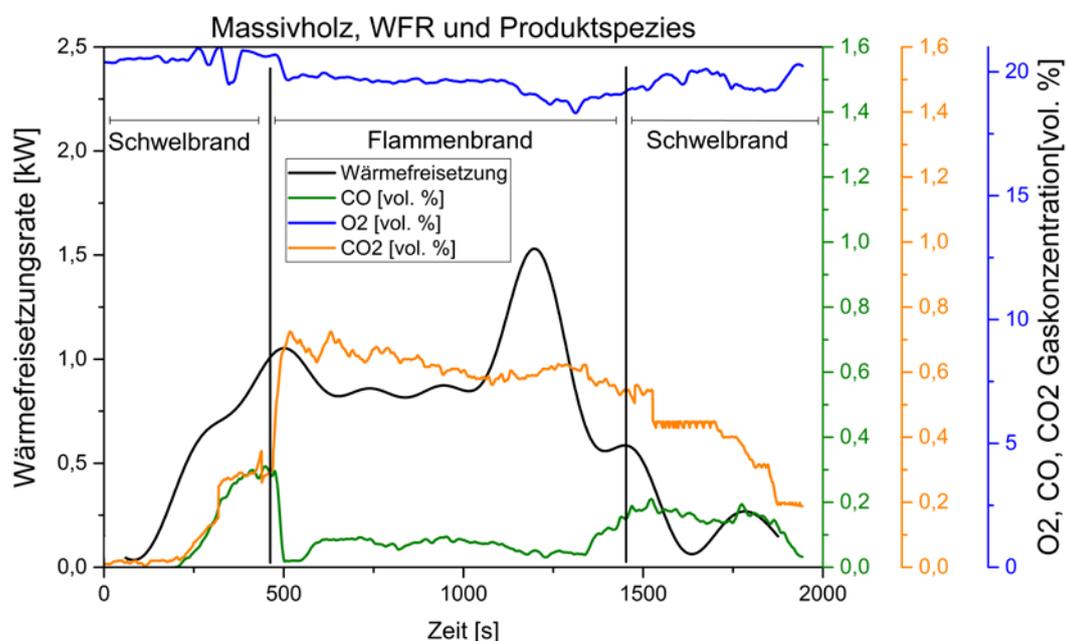


Abbildung 34 WFR und Produktspezies-konzentrationen einer bestrahlten Probe über der Zeit

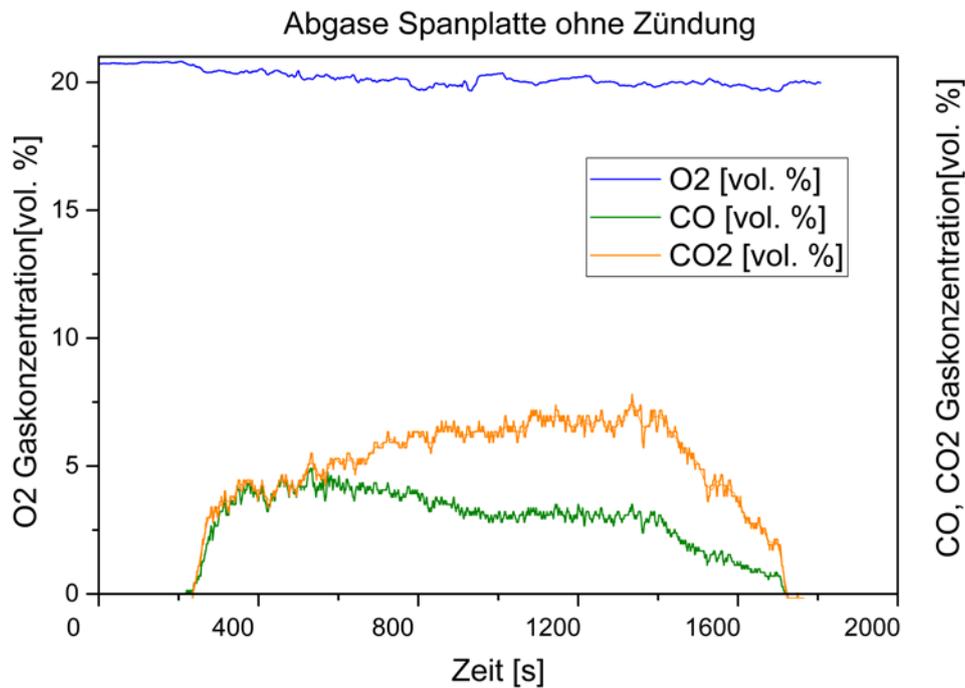


Abbildung 35 Abgase bei der Verbrennung der Spanplatte, Versuch ohne Zündung (Schwelbrand), reine Bestrahlung

In **Abbildung 34** Die vertikalen Linien in **Abbildung 3** repräsentieren Zündung und Erlöschen des Flammenbrandes. Es fällt dabei auf, dass unter flammenden Bedingungen mit Flamme die CO-Konzentration ab- und die CO₂-Konzentration ansteigen. Mit höherer Wärmefreisetzungsrate scheint die CO₂-Bildung bevorteilt zu werden. Die maximale Wärmefreisetzungsrate übersteigt dabei den Wert von 2 kW insgesamt nicht. Gleichwohl zeigt sich in deren Anstiegsbereich ein zeitgleicher Anstieg von CO₂, was für eine Verschiebung des Boudouard-Gleichgewichts zugunsten von CO₂ spricht.

Bei Schwelbränden werden absolute CO-Konzentrationswerte gemessen, welche die von Bränden mit sichtbarer Flamme *deutlich* übersteigen (erkennbar auch in **Abbildung 35**). Erreicht werden die CO-maximal-Konzentrationen im frühen Brandstadium (bei ca. 1/3 der Gesamtversuchszeit). Ursache hierfür ist die beschriebene CO-Kinetik. Die Oxidation von CO zu CO₂ benötigt eine ausreichende Temperatur, die unter Schwelbrandbedingungen nicht bereitgestellt werden kann. Daher ist die sich einstellende Brandbedingung für diese Phänomenologie durchaus typisch für verschiedene Möbeltypen. Die CO-Bildung wird von folgenden Randbedingungen bevorteilt: *Geeignete (kurze) Verweilzeit* in der Region des eigentlichen Brandes, *hohe Temperaturen* und *geeignetes Sauerstoffangebot*. In **Tabelle 6** ist deutlich zu erkennen, dass die maximale CO-Konzentration im Allgemeinen unter Schwelbrandbedingungen (also fetter Verbrennung und längerer Versuchsdauer) höher liegt. Die maximalen Konzentrationen wurden dabei farblich hinterlegt. Bei Flammenbränden herrschen im Vergleich magere Bedingungen und höhere Temperaturen. Lediglich beim Polypropylen-Teppich variiert dieser Zusammenhang etwas, die CO-Konzentration ist auch beim Flammenbrand vergleichsweise hoch. Dies kann vermutlich auf Struktureigenarten des Langflor-Teppichs zurückgeführt werden. Hier kommt es zum ungleichmäßig abbrennen des Teppichs unter

Flammenbrandbedingungen. Lokale Reaktionszentren mit Sauerstoffmangel können sich ausbilden. Somit sorgen Schwelbrandbedingungen für eine erhöhte CO-Konzentration. **Tabelle 6** deckt sich insofern mit den oben getroffenen Annahmen.

Tabelle 6 maximale CO – Konzentrationen unterschiedlicher Materialein

Probe	Max. Konzentration Flammenbrand	CO- Max. Konzentration Schwelbrand	CO- Max. Konzentration Poolfeuer
Spanmöbelplatte	0,07	0,35	0,098
Massivholz (Fichte)	0,09	0,40	0,092
PP-Teppich	0,33	0,40	0,07
Naturfaserteppich	0,14	0,28	0,09
Fußmatte-Alt	0,045	0,10	0,04
Fußmatte-Neu	0,08	0,19	0,12
PU-Matratze	0,07	0,12	0,1

Im direkten Vergleich unterscheiden sich Spanmöbelplatten als Repräsentanten neuer, und Massivholzmöbelplatten als Vertreter alter Inneneinrichtungsgegenstände – jeweils bei Betrachtung gleicher Versuchsbedingungen -- hierbei nur unwesentlich. Tendenziell sind aufgrund der Brandverläufe allerdings etwas höhere CO Konzentrationen für Massivholzstrukturen zu erwarten.

Die Versuchszeiten der Spanmöbelplatten sind beim Flammenbrand bis zum vollständigen Abbrand etwas kürzer, was für eine bessere Verbrennung mit geringerem Schwelbrandanteil spricht (**Abbildung 36**). Gleichzeitig glimmen und schwelen Spanmöbelplatten im direkten Vergleich der Probentypen im reinen Bestrahlungsversuch ohne Zündung etwa gleich lange. Im Allgemeinen bedeutet eine kürzere Versuchszeit für die gemessenen Proben eine höhere Massenabnahmerate und somit eine höhere Wärmefreisetzungsrate. Im Allgemeinen lässt sich nach Auswertung der Versuchsrandbedingungen somit eine etwas kürzer verlaufende Brandphase für neue Möbelstücke erkennen, die mit einer höheren Wärmefreisetzungsrate einhergeht.

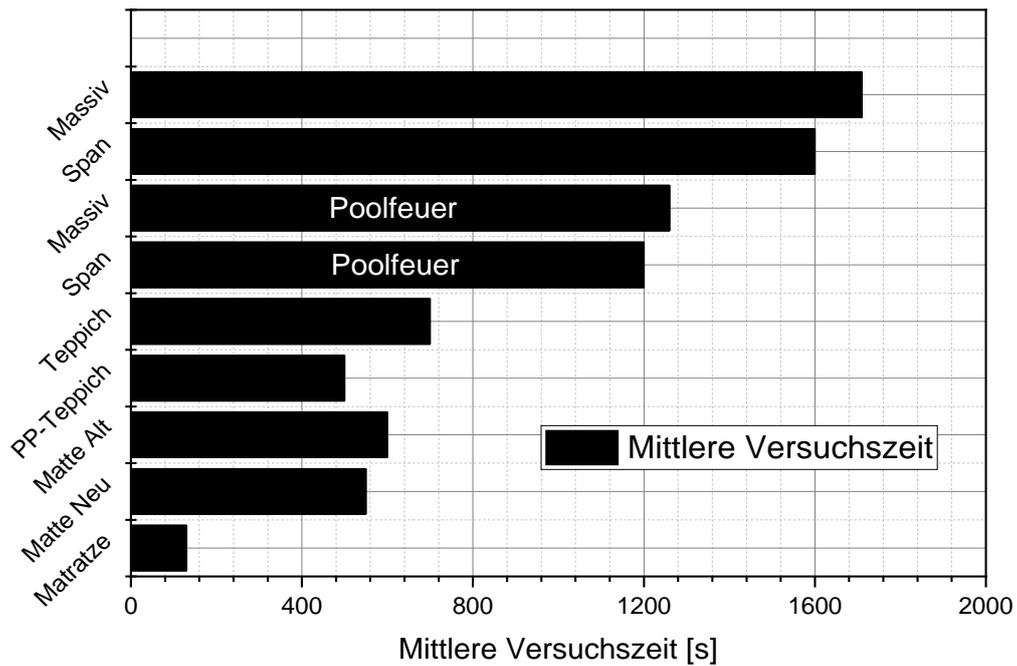


Abbildung 36 Versuchszeiten eines vollständigen Abbrandes und Probenmaterialien

Für die Risikoeinschätzung spielt vor allem die Dauer der Brandentstehungsphase eine wichtige Rolle. Diese dient als Indiz für die Entflammbarkeit eines Materials. Leichte Entflammbarkeit geht dabei mit kurzer Brandentstehungsphase und früher Schadstofffreisetzung einher. Die Brandentstehungsphase wurde hierbei als Erreichen des oben beschriebenen Konzentrationsplateaus definiert. Dies führt zu den in **Abbildung 37** dargestellten Brandentstehungszeiten. Hierbei wurden die neuen Proben orange hinterlegt. Ein Trend zu kürzeren Brandentstehungsphasen bei neuen Materialien ist dabei in allen Fällen deutlich zu erkennen.

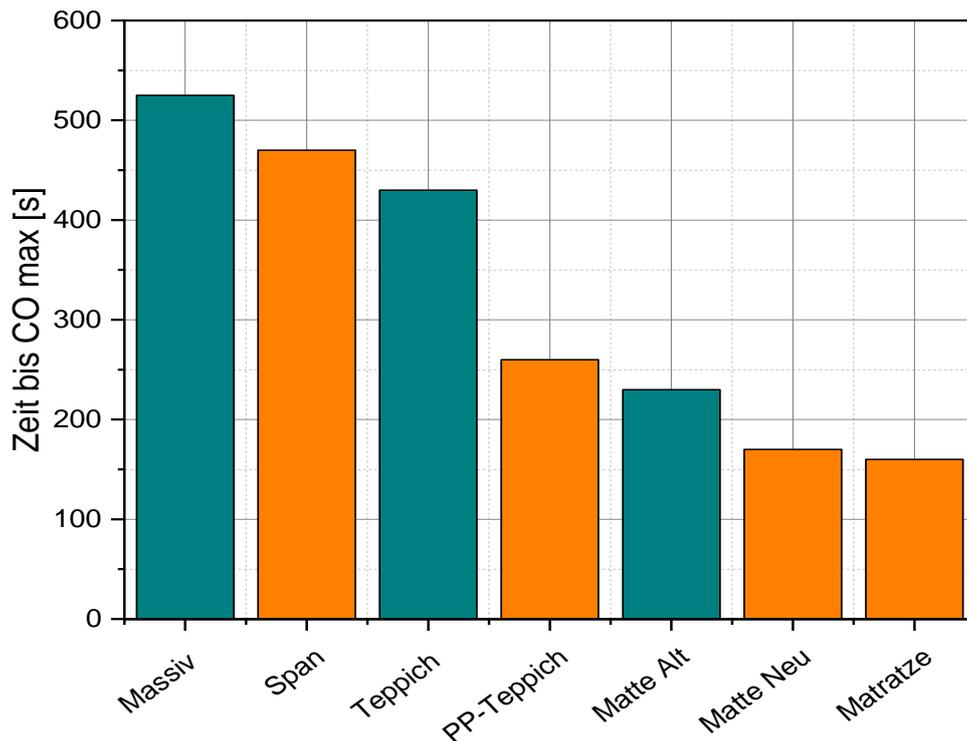


Abbildung 37 Brandentstehungszeiten (Zeit bis Maximum an CO erreicht wird) – orange markiert: moderne Materialien mit Kunststoffanteil

Auswertung und Vergleich der Nichtholzmaterialien

Die Nichtholzmaterialien zeigen in ihrem Abbrandverhalten gegenüber den Holz- und Naturstoffproben einige Besonderheiten. Die Entstehungsbrand- so wie die Abklingphase sind meist deutlich verkürzt, die eigentliche Brandphase verläuft dabei deutlich stärker ausgeprägt. Erkennbar ist dies auch durch hohe Stichflammen und zischendes Verbrennen der Materialien unter verstärkter Geräuschentwicklung (Indiz für höhere Flammengeschwindigkeiten). Zurückzuführen ist dies vermutlich auf das Verbrennen von in den Proben vorhandenen Kunststoffen. Die Proben weisen offensichtlich eine deutlich geringere Masse als die verwendeten Holzproben auf, die gesamte Branddauer fällt dadurch deutlich kürzer aus.

Vergleicht man beispielsweise die beiden Teppichgenerationen unter Schwelbrandbedingungen mit Zündung und trägt dabei Produktspezies und Wärmefreisetzung über der Zeit auf, so ergibt sich ein eindeutiges Bild. Die Wärmefreisetzungsrates des Polypropylen-Teppichs ist hier deutlich höher als beim Naturfaserteppich. Gleichzeitig ist die Versuchszeit beim Polypropylen-Teppich um etwa 100 s (oder 1/3 der Gesamtversuchszeit) verkürzt. Der Polypropylen-Teppich brennt dabei mit deutlich sichtbarer Flamme ab, wohingegen der Naturfaserteppich schwelend und hauptsächlich glimmend abbrennt. Dabei sind die Rückstände beim Polypropylen-Teppich hauptsächlich ascheförmig, wohingegen sie beim Naturfaserteppich in seinen ursprünglichen Probemaßen nahezu vollständig erhalten bleiben. Die Probe wird dabei dünner und spröde, bleibt als Grundgerüst des Materialaufbaus aber vorhanden.

Dies deutet auf eine andere Faserstruktur und Faserzusammensetzung im Teppich hin. Dies ist vermutlich auf die verwendeten Naturfasern zurückzuführen welche nicht wie kohlenwasserstoffbasierte Fasern direkt verbrennen, sondern durch ihre quervernetzten Polymere (Naturpolymere sind in der Regel sehr groß) zunächst verkohlen und schwelen. Die Matratze verbrennt in diesem Zusammenhang besonders schnell. Der Stoff ist aufgrund seiner geschäumten Struktur äußerst porös und weist bei gleichen Probemassen eine sehr kleine dichte, und somit sehr kleine Gesamtmasse (und damit eine große Abbrandmasse) auf. Die Brandentstehungsphase und die Brandphase sind dadurch extrem kurz und verlaufen sehr ausgeprägt.

In **Abbildung 38** und **Abbildung 39** werden exemplarisch beide Teppichgenerationen verglichen. Auffällig ist dabei der erhöhte Anstieg der Wärmefreisetzungsrate (der hier bereits 100 s früher einsetzt) und CO₂-Konzentration bei der neuen Möbelgeneration. Für die Fußmatten konnten analoge Verläufe ermittelt werden.

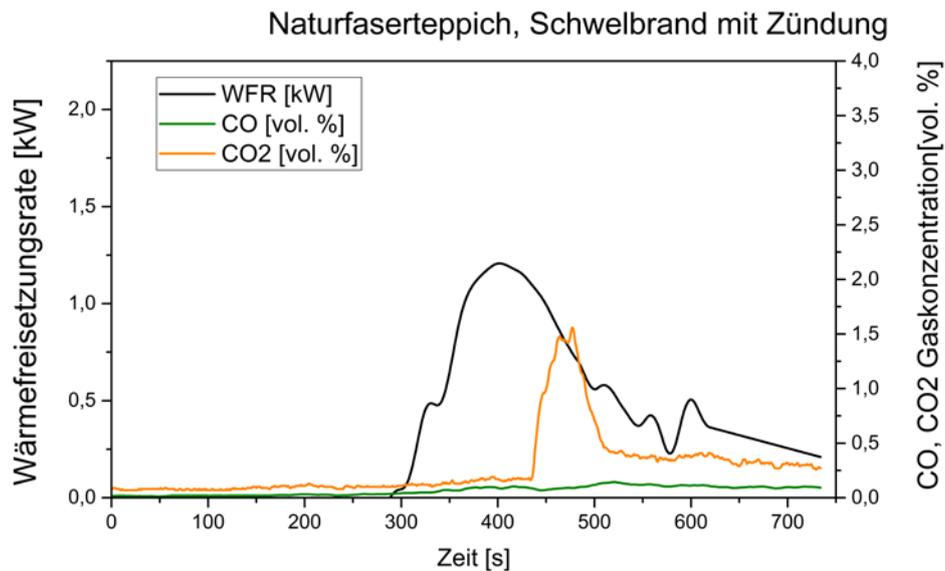


Abbildung 38 Naturfaserteppich HRR und Produkte

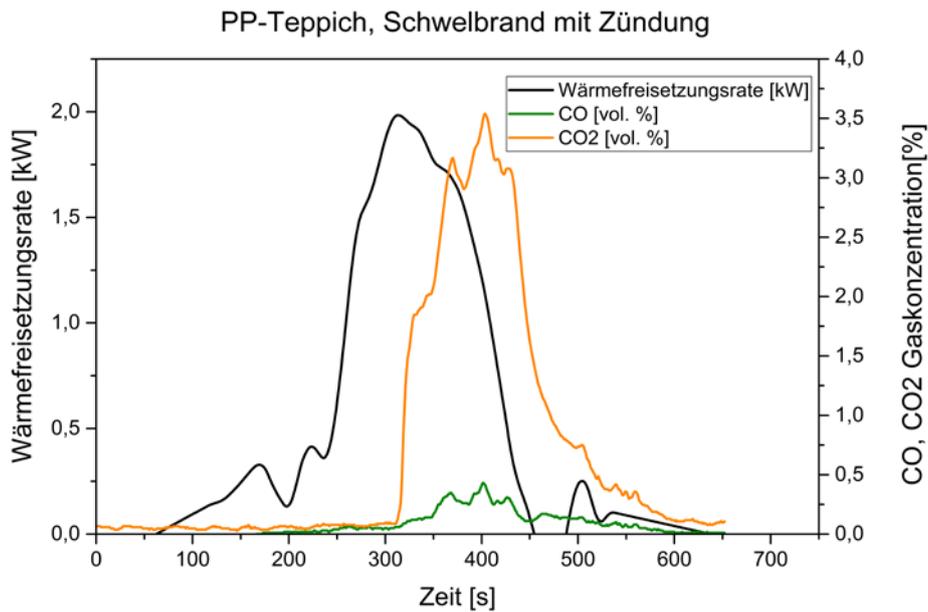


Abbildung 39 PP-Teppich, Wärmefreisetzungsrate, CO und CO₂ Konzentrationen

In **Abbildung 40** sind die ermittelten maximalen CO-Konzentrationen für die unterschiedlichen Belastungsarten graphisch dargestellt. Moderne Möbelmaterialien zeigen eine klare Tendenz zu erhöhten CO-Emissionen. Besonders die textilen Materialien fallen in diesem Zusammenhang negativ auf. Aufgrund der oben beschriebenen CO-Kinetik fallen die absolut ermittelten CO-Konzentrationen im Schwelbrand-Bereich höher aus als im Flammenbrandbereich.

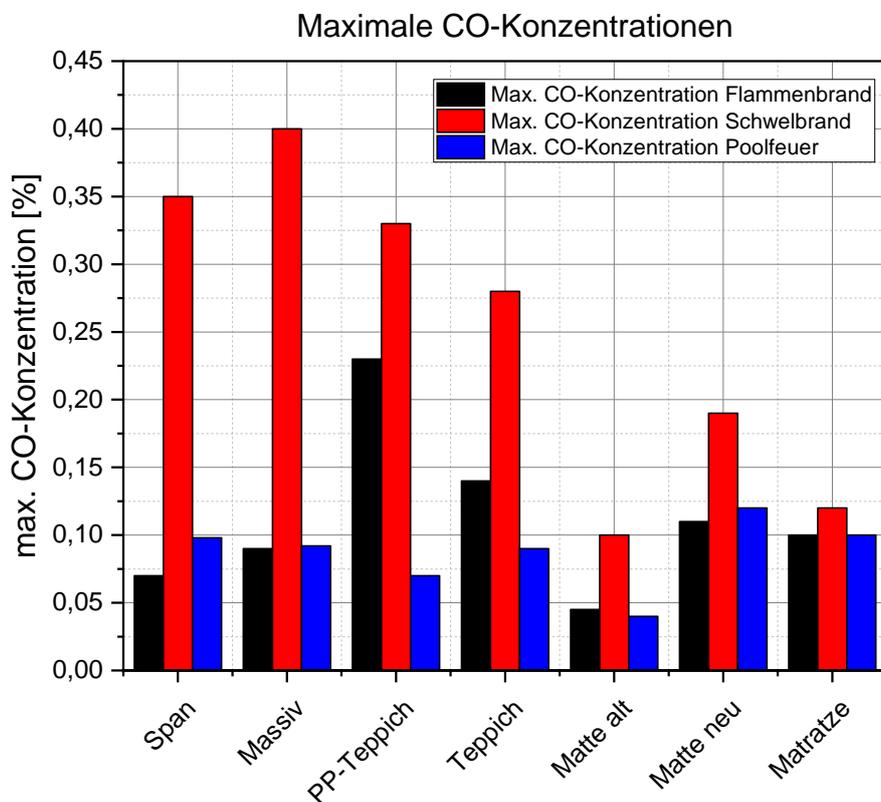
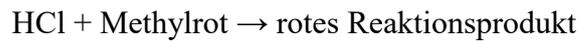
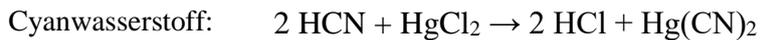


Abbildung 40 Maximale CO-Konzentrationen

Bedingt durch die Reagenzien gibt es eine hohe Standardabweichung. Diese liegt bei den Cyanwasserstoffröhrchen bei ± 10 bis 15% . Dazu kommt, dass die Messungen durch bestimmte Stoffe in der Luft verfälscht werden können. Bei den hier durchgeführten Versuchen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit keine dieser Stoffe entstanden. (Dräger Safety AG & Co. KGaA 2015)

Indikatorreaktionen:



(Dräger Safety AG & Co. KGaA 2015)

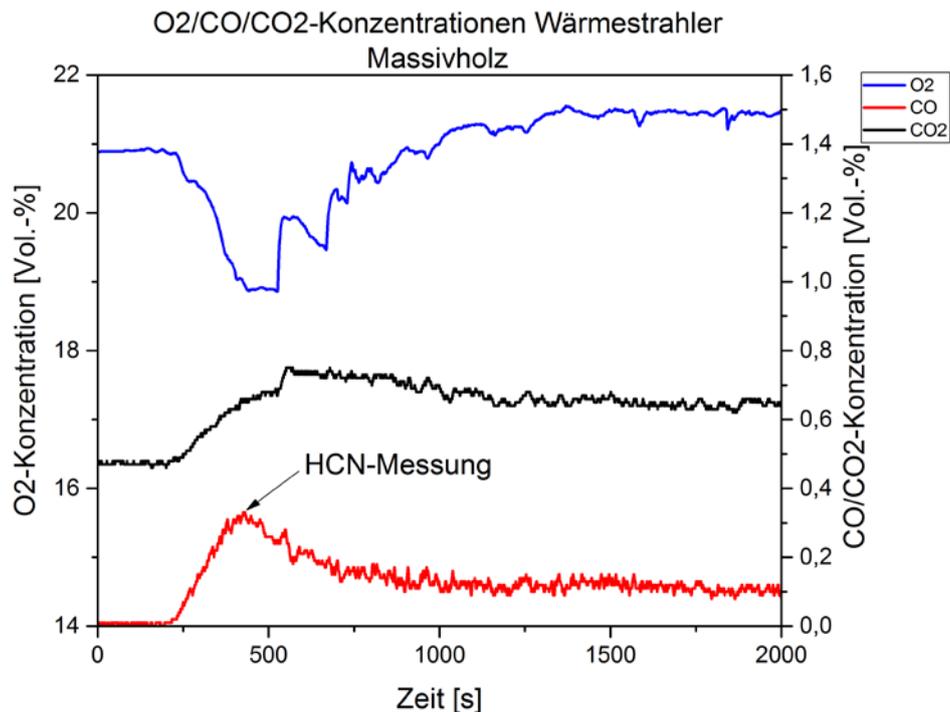


Abbildung 42 Skizzierter Beginn der HCN Messung während eines Brandversuches.

Die HCN-Konzentrationen wurden bei Erreichen eines kurzzeitig quasistationären Zustandes des Brandverlaufes mittels einer Zweifachbestimmung gemessen. Der gewählte Punkt ist eine Abschätzung des Maximums der CO-Konzentration.

Bei den Versuchen ergaben sich folgende Werte in ppm:

Tabelle 7 Tabelle HCN-Konzentrationen bei unterschiedlichen Bränden

Stoff	Versuch 1	Versuch 2
Teppich neu	0	0,5
Teppich alt	6	10
Fußmatte neu	0,1	0,5
Fußmatte alt	2	2,5
Spanplatte	> 60	> 60
Massivholz	0	0,5
Schaumstoff	0,5	1

In **Abbildung 44** HCN Konzentrationen im Schwelbrandbereich sind diese zur besseren Vergleichbarkeit in einem Säulendiagramm aufgetragen. Die Abweichungen der Versuche untereinander sind in der Regel klein (s. **Abbildung 44**).

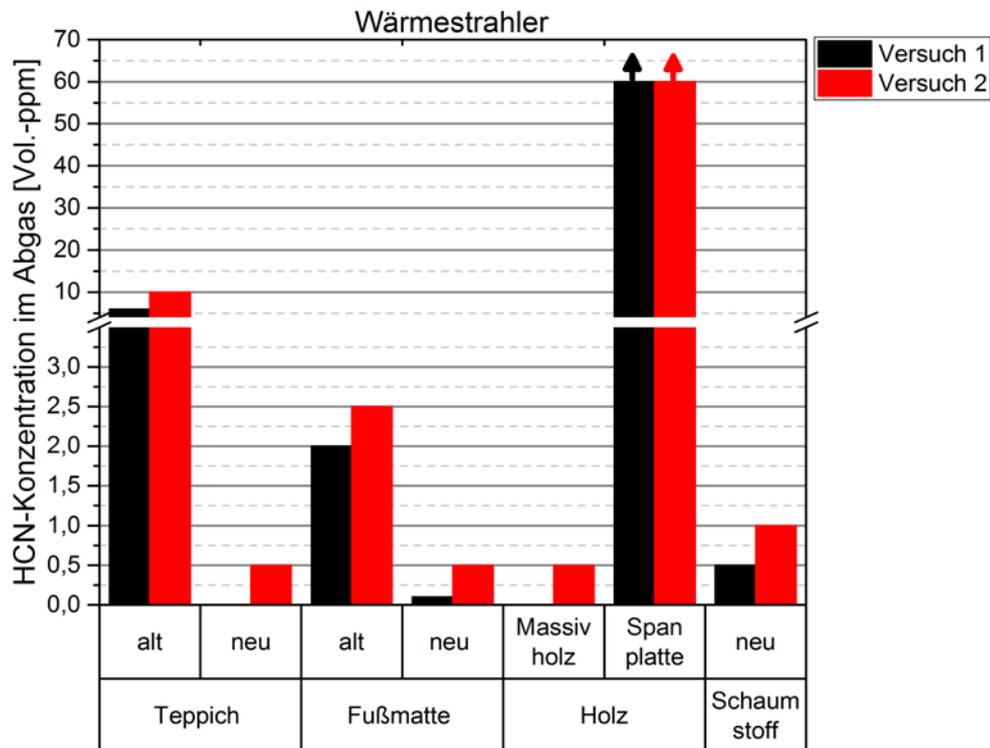


Abbildung 43 HCN Konzentrationen im Schwelbrandbereich

Dabei ist zu erkennen, dass insbesondere die beiden Holzarten gravierende Unterschiede im direkten Vergleich miteinander zeigen. Im Vergleich zwischen alt und neu ergibt sich eine Zunahme des Wertes der neuen Probe im Bereich zweier Größenordnungen (> 100 %) gegenüber der alten Probe.

Auch bei den Teppichen ist ein deutlicher Unterschied zwischen neu und alt erkennbar. Hier ergibt sich für den ermittelten Wert der neuen Probe eine deutliche Abnahme verglichen mit der alten Probe. Schaumstoffhaltige Proben als solches sind zusätzlich eine besondere Gefahrenquelle.

Eine Untersuchung in größerem Maßstab zum Vergleich der HCN und CO-Konzentrationen ist auf Grundlage dieser Vorversuche vorgesehen.

8 Fazit

In diesem ersten Teil des Forschungsvorhabens zur Untersuchung unterschiedlicher Mobiliargenerationen wurden Mobiliargegenstände systematisch und im Labormaßstab untersucht. Eine Untersuchung fand dafür hinsichtlich Unterschieden bzgl. Brandentwicklungsphasen, sowie resultierender Gasemissionen statt.

Das grundsätzliche Vorgehen fußt dabei auf einer Bestandsaufnahme bisher durchgeführter Untersuchungen und Möbelstrukturen, sowie Verbrennungstechnischen Grundlagen. Auf Basis dieser Randbedingungen wurde ein Messaufbau entworfen, mit dem im Labormaßstab reproduzierbare Brandbedingungen nachgestellt werden können.

Zu diesem Zweck wurde mithilfe von Wärmeflussaufnehmern und Wärmebildkameras, sowie Vorversuchen mit unterschiedlichen Zündmethoden, eine geeignete, reproduzierbare Zündquelle ermittelt. Diese bestand im vorliegenden Fall aus einem Hochtemperaturkeramikstrahler in geeignetem Abstand zur Probe. Mit kalorimetrisch ermittelten Materialdaten und einem geeigneten, auf Grundlage der Messtechnik entwickelten Messaufbau wurden dann vergleichende Brandversuche durchgeführt. Dabei wurden gleichzeitig Wärmefreisetzung und Temperatur, aber auch Gasemissionen ermittelt. Allgemein wurden die Proben sowohl im Schwelbrand, als auch im offenen Flammenbrand bis zum Vollbrand untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen Brandentstehungsphase und Materialeigenschaften besteht. Es konnte gezeigt werden, dass moderne Einrichtungsmaterialien mit verstärktem Kunststoffanteil eine **kürzere Brandentstehungsphase** so wie eine **kürzere Branddauer** aufweisen. Darüber hinaus konnten für moderne Materialien höhere Massenabnahmeraten und somit **höhere Wärmefreisetzungsraten** ermittelt werden.

Die modernen Möbelmaterialien zeigen bezüglich ihrer Kohlenstoffmonoxid-Emissionen dabei ein größeres Gefährdungspotential als vergleichbare Materialien die charakteristisch für alte Wohneinrichtungsgegenstände sind. Diese Maximalkonzentrationen ließen sich nur bei reinem Schwelen der Proben beobachten. Verbrennt die Probe mit deutlich sichtbarer Flamme, so oxidiert das CO verstärkt zu CO₂, die CO-Konzentration sinkt somit unter die bestimmten Konzentrationen für Schwelbrandversuche. Daher spielt bei der Nachbildung von Realbränden und deren Folgenabschätzung für die Beurteilung des Brandverlaufs im Labormaßstab, die erhöhte Wärmefreisetzungsrates und kürzere Brandentstehungsphase eine größere Rolle für die Gefährdungseinschätzung als die freigesetzten Kohlenmonoxid-Konzentrationen. Die Eigenschaften der unterschiedlichen Brandentstehungsphasen variieren deutlich und erfordern dadurch die Notwendigkeit einer zusätzlichen Betrachtung der Brandentstehungsdauer im größeren Maßstab. Dabei ist besonderes Augenmerk auf die Übertragbarkeit reproduzierbarer und vergleichbarer Eigenschaften zu legen.

Bezüglich HCN-Emissionen muss grundsätzlich nach der Materialart der gewählten Proben und jeweiligen Brandbedingungen unterschieden werden:

Spanplatte:

Bei der Spanplatte ist bei der Verschmelzung der Probe ohne sichtbare Flamme eine sehr hohe HCN-Konzentration messbar. Bei der Verbrennung mit einer offenen Flamme ist die HCN-Konzentration weitaus geringer als im Schmelzustand, da das HCN in der Flamme weiterreagiert. Daraus ergibt sich, dass die HCN-Konzentration je nach Brandphase und Ort des Brandausbruches variiert und so nicht integral direkt miteinander verglichen werden kann.

Die erhöhte HCN-Emission resultiert wahrscheinlich hauptsächlich aus der Melaminharzbeschichtung und Kunststoffanteilen, etwa der Laminierfolien.

Massivholz:

Das Massivholz zeigt nur eine geringe HCN-Emission und lässt sich schwer entzünden.

Schaumstoff

Bei der Verschmelzung schaumstoffhaltiger Proben kommt es zu einer geringen HCN-Emission. Der Schaumstoff schmilzt hauptsächlich und tropft ab. Sobald der Schaumstoff sich entzündet, verbrennt er schnell und kann daher in einer größeren Menge (z. B. Matratze) eine große Gefahr darstellen. Die hohe Verbrennungsgeschwindigkeit ergibt sich aufgrund der Schaumstruktur und die damit verbundene große Reaktionsoberfläche wird damit stark beeinflusst. Die HCN-Konzentration ist für alle Testfälle im Allgemeinen hoch.

Teppich

Bei den Teppichen werden nur relativ geringe HCN-Konzentrationen im Abgas erreicht. Die HCN-Emission scheint maßgeblich durch die Fasern verursacht zu werden, da diese aus Tierwolle bestehen.

Bei beiden Proben ergaben sich vergleichsweise geringe HCN-Konzentrationen im Abgas. Dies deutet darauf hin, dass die verwendeten Materialien aller Probekörper stickstoffarm sind. Auch die Abbrandgeschwindigkeit stellt sich im direkten Vergleich eher langsam dar.

Mithilfe der ermittelten Brandentstehungszeiten lassen sich also Rückschlüsse auf mögliche Brandentstehungsphasen ziehen, die unter Einbezug der Materialparameter diesbezüglich deutlich verkürzt sein können. In Verbindung mit dem erhöhten Kunststoffanteil der entsprechenden neuwertigen Möbelproben und der gemessenen Kohlenmonoxid-Konzentrationen lässt sich somit ein höheres Gefährdungspotential dieser Möbel konstatieren. Die These von der Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen in realen Möbeln bezüglich einer Anpassung der Risikoeinschätzung und Quantifizierung der Gefahren von modernen Einrichtungsgegenständen gegenüber alten Einrichtungsgegenständen konnte damit bestätigt werden.

Im Nachfolger dieses Berichtes werden auf Grundlage der gewonnenen Erfahrungen Untersuchungen im Realmaßstab zum Brandverhalten unterschiedlicher Möbelgenerationen und in Räumen angestrebt und mit Erkenntnissen zu Raumbränden kombiniert. Dabei soll auch hier der besondere Fokus auf Reproduzierbarkeit gelegt werden.

Literaturverzeichnis

Dietmar Hosser - vfdB (2013): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Aktenzeichen: TB 04-01. Richtlinie.

Vornorm DIN V 18599-1:2018-09: DIN V 18599-1:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden_ - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung_ - Teil_1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.

DiNenno, Philip J. (2016): SFPE handbook of fire protection Engineering. NFPA National Fire Protection Association. New York City: Springer-Verlag New York.

Djordjevic, Neda (2011): Flammenstabilisierung durch Verbrennung in festen Schwämmen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Engler-Bunte-Institut für Verbrennungstechnik.

Dominique Max (2014): Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes.

Dräger Safety AG & Co. KGaA (Hg.) (2015): Dräger-Röhrchen & CMS-Handbuch. Boden-, Wasser- und Luftuntersuchungen sowie technische Gasanalyse. 17. Auflage.

Drysdale, Dougal (2011): An introduction to fire dynamics. 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781119975465>.

Ebersohl, Nicole (2014): Untersuchung der Wechselwirkung von NO und Ruß in laminaren, rußenden Vormischflammen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Online verfügbar unter <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000045122>.

Europäische Kommission (1994): Grundlagendokument Nr. 2: Brandschutz. Hg. v. EWG. Mitteilung der Kommission über die Grundlagendokumente der Richtlinie des Rates.

Feuerwehrstatistiken des Landes Baden-Württemberg (2018): Feuerwehrstatistik des Landes Baden-Württemberg 2018. Unter Mitarbeit von Land Baden-Württemberg. Hg. v. LFS BW. Online verfügbar unter <https://www.lfs-bw.de/Fachthemen/RechtOrganisation/Documents/Statistik/Feuerwehrstatistik2018.pdf>, zuletzt geprüft am 14.10.

Goertz, Roland (2014): Die Gefahren des Brandrauchs (S+S Report, 4).

Herwig, Heinz (2000): Wärmeübertragung A-Z. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

ifs Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. (2010): IFS: 200.000 Wohnungsbrände im Jahr – häufigste Ursache Haushaltsgeräte. Unter Mitarbeit von Dr. Rolf s/416632/IFS-200-000-Wohnungsbraende-im-Jahr-haeufigste-Ursache-Haushaltsgeraete.html.

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (2015): GESTIS-Stoffdatenbank. Online verfügbar unter [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$vid=gestisdeu:sdbdeu\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$vid=gestisdeu:sdbdeu$3.0), zuletzt geprüft am 19.10.2015.

Joos, Franz (2006): Technische Verbrennung. Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen : mit 65 Tabellen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-34334-2>.

Kunkelmann, Jürgen (2003): Flashover/Backdraft Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen. Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Forschungsstelle für Brandschutztechnik.

McNamee, Margaret; Meacham, Brian; van Hees, Patrick; Bisby, Luke; Chow, W. K.; Coppalle, Alexis et al. (2019): IAFSS agenda 2030 for a fire safe world. In: *Fire Safety Journal* 110, S. 102889. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102889.

Menzel, Christoph; Dinkov, Ilian (01): Untersuchung zum Handrückentest der Feuerwehr. In: *BRANDSchutz Deutsche Feuerwehr-Zeitung* 2017, 01.

Prof. Dr. Henning Bockhorn: Grundlagen der Verbrennungstechnik Skript zur Vorlesung (2008), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.

Schneider, Ulrich; Hegger, T.; Max, Ulrich (2007): Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz: expert Verlag.

Spurk, Joseph H.; Aksel, Nuri (2010): Strömungslehre. Einführung in die Theorie der Strömungen. Unter Mitarbeit von Spurk Aksel. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10408120>.

Troitzsch, Jürgen (1982): Brandverhalten von Kunststoffen: Hanser.

Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R. (2001a): Verbrennung - Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Warnatz, Jürgen; Maas, Ulrich; Dibble, Robert W. (2001b): Verbrennung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.