

BRANDSCHUTZ FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



BERICHTE

Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungsbrand Teil 2

von

M. Sc. Dennis Augustin

B. Sc. Florian Schoeps

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

204

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. 204

Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei
reproduzierbarem Entstehungsbrand Teil 2

VON

M. Sc. Dennis Augustin

B. Sc. Florian Schoeps

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Februar 2020

FA. Nr. 244 (2/2019)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: 204	Titel des Berichtes: Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungs-brand Teil 2: Grundlagen und Mobiliar		ISSN: 0170-0060
Autoren: M. Sc. Dennis Augustin B. Sc. Florian Schoeps		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 244 (2/2019)		Auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –Senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehr- angelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Vertei- digung	
Abschlussdatum: Februar 2020			
Seitenzahl: 58	Bilder: 40	Tabellen: 19	Literaturverweise: 20
<p style="text-align: center;">Kurzfassung:</p> <p>Im vorliegenden Bericht werden die im Vorgängerbericht dargestellten Überlegungen zur Reproduzierbarkeit von Brandversuchen erweitert. Auf Grundlage verbrennungstechnischer Theorien, welche zunächst auch vorgestellt werden, soll untersucht werden, ob sich klassische verbrennungstechnische Annahmen auf Realbrandszenarien übertragen lassen. Auf Grundlage geeigneter Vorversuche, welche aus dem Vorgängerbericht 203 abgeleitet und hochskaliert wurden, wird eine Materialauswahl mit entsprechender Probenverfügbarkeit getroffen. Besonders untersucht werden hierin folglich Möbel moderner Bauart. Damit sollen die in Forschungsbericht 203 angedeuteten potentiellen Unterschiede in der Brandentstehungsphase umrissen und mit abgedeckt werden. Folglich werden 3 Raumbrandversuche unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Es wird bei Werkstoffauswahl, Ventilationsbedingungen, Initialbrandlast und Initialbrandart penibel darauf geachtet reproduzierbare Bedingungen herzustellen. Mit Hilfe aufwändiger Messtechnik wurden zudem Emissionsmessungen und Temperaturverteilungen – jeweils aufgelöst über der Raumhöhe – durchgeführt. Hierfür wurde eine höhenverstellbare Probenahmesonde konzipiert und konstruiert, mit deren Hilfe in verschiedenen Raumhöhen gemessen werden kann. Auf Grundlage dieser Versuchsreihe wird erörtert, inwiefern Großversuche dieser Art reproduzierbar durchführbar sind. Ergänzt wurden diese Messungen um Messungen der Konzentration von Cyanwasserstoff, welche in Kooperation mit der DEKRA Umwelt GmbH durchgeführt wurden.</p>			
Schlagwörter: Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Brandverhalten Mobiliar, Realmaßstabsversuche, Kiesbettbrenner, Reproduzierbarkeit, Messungen von Cyanwasserstoff, Gasmessungen, Temperaturverteilung, Höhenverstellbare Probenahmesonde.			

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.**

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	IV
1. Einleitung	1
2. Grundlagen von Realbränden	3
2.1 Modellbildung und Brandverlauf	3
2.2 Brände	4
2.3 Strahlung	6
2.4 Brandstoffe und Begrifflichkeiten	9
2.5 Rauchgase	11
2.6 Zündmethoden	14
2.7 Probenkalorimetrie	15
3. Versuchsaufbau und Modellgrundlage	16
3.1 Vorversuchsreihe zur Bestimmung der Brandentstehungsphase	17
3.2 Ergebnisse Vergleich von Zündzeiten ausgewählter Probekörper	20
3.2.1 Vergleich von Zündzeiten ausgewählter Probekörper	22
3.3 Diskussion der Vorversuche	23
4. Großversuche am Szenario eines Raumbrandes	26
4.1 Versuchsaufbau	28
4.1.1 Höhenverstellbare Probenahmesonde	36
4.1.2 Messung Cyanwasserstoff HCN	37
5. Versuchsergebnisse	38
5.1 Ergebnisse Großversuch 1	38
5.2 Ergebnisse Großversuch 2	40
5.3 Ergebnisse Großversuch 3	41
6. Auswertung der Großversuche	44
6.1 Auswertung Großversuch 1	44
6.1.1 Wärmefreisetzung	44

6.1.2	Phänomene des beobachteten Brandverlaufes.....	45
6.2	Auswertung Großversuch 2.....	46
6.2.1	Wärmefreisetzung.....	46
6.2.2	Phänomene des beobachteten Brandverlaufes.....	46
6.3	Auswertung Großversuch 3.....	47
6.3.1	Wärmefreisetzung.....	48
6.3.2	Phänomene des beobachteten Brandverlaufes.....	48
6.4	Vergleich Großversuche.....	49
6.4.1	Kiesbettbrenner	49
6.4.2	Vergleich der Temperaturverläufe	50
6.4.3	Vergleich Gaskonzentrationen	53
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	58
	Literaturverzeichnis.....	60
	Anhang.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 zeigt die Wachstumsphasen und Wärmefreisetzung eines natürlichen Feuers über der Zeit erstellt nach Karlsson und Quintiere (Drysdale 2011).....	3
Abbildung 2 Branddreieck nach H.W. Emmons (1963)	5
Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt des Wellenlängenspektrums elektromagnetischer Strahlung (Oliver Brunn).....	6
Abbildung 4 zeigt das Aufspannen einer Einheitshalbkugel um eine punktförmige Strahlungsquelle zur Herleitung der Strahlungsintensität (Oliver Brunn)	7
Abbildung 5 zeigt das Wiensche Gesetz anhand der Strahlungsintensitäts-Peak-Verschiebung mit veränderter Wellenlänge (Djordjevic).....	8
Abbildung 6 Links: Idealisierte Brandverlaufskurve; Rechts: Reale Brandverlaufskurve mit gemittelten Durchschnittstemperaturen im Raum	10
Abbildung 7 IKA C200 Bombenkalorimeter aus Forschungsbericht #203	15
Abbildung 8 Flowchart der Vorversuchsreihe	17
Abbildung 9 Messvorrichtung Temperaturminimum Vorderseite	18
Abbildung 10 Messvorrichtung Temperaturminimum Detailansicht.....	18
Abbildung 11 Grundriss Brandraum mit Kiesbettbrenner, Vorversuch zur Bestimmung des Strahlungsminimums	19
Abbildung 12 Prozentuale Abweichung der Brenntemperatur	20
Abbildung 13 Diagramm Zündzeiten der Versuch 17 bis 20 mit entsprechendem Mittelwert von 7:09 (gestrichelte Linie)	22
Abbildung 14 Aufbau Sandwichplatten (Wiedemann 2007, S. 227)	24
Abbildung 15 Foto Aufbau eines Möbelstücks.....	24
Abbildung 16 Ablösen der Kantenumleimer.....	24
Abbildung 17 Grundriss Brandraum mit Möbeln	27
Abbildung 18 Möblierter Brandraum vor der Zündung	30
Abbildung 19 Positionen der Thermoelemente Großversuch 1 und 2	32
Abbildung 21 Fließschema Messtechnik zur Rauchgasmessung	33
Abbildung 21 Funktionsschema URAS (Tränkler und Reindl 2014, S. 1081).....	34

Abbildung 22 Funktionsschema magnetomechanischer Sauerstoffanalysator (Tränkler und Reindl 2014, S. 113–114).	35
Abbildung 24 Schaltplan höhenverstellbare Probenahmesonde	36
Abbildung 24 Höhenverstellbare Probenahmesonde auf dem Dach des Versuchsraumes	37
Abbildung 25 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 1.....	38
Abbildung 26 Gaskonzentrationen Großversuch 1	39
Abbildung 27 Brandraum nach dem Brandversuch	39
Abbildung 28 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 2.....	40
Abbildung 29 Gaskonzentrationen in Abhängigkeit zur Höhe Versuch 2	41
Abbildung 30 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 3.....	42
Abbildung 31 Gaskonzentrationen Großversuch 3	42
Abbildung 32 Blick durch das Fenster des Versuchsraumes bei Großversuch 3	43
Abbildung 33 Vergleich Temperaturkurven Kiesbettbrenner Versuch 1, 2 und 3 (Eigene Darstellung 2019).....	50
Abbildung 34 Vergleich Temperaturverläufe der drei Großversuche.....	51
Abbildung 35 Vergleich Großversuche 1 und 2.....	52
Abbildung 36 Vergleich der Temperaturverläufe ab 600°C	52
Abbildung 37 V1 und V2 CO Vergleich.....	56
Abbildung 38 V1 und V2 O ₂ -Vergleich	56
Abbildung 39 V1 und V2 CO ₂ -Vergleich	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Wärmestrahlung, charakteristische Farben.....	8
Tabelle 2 Übersicht der Verbrennungsprodukte nach (Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. 2014).....	11
Tabelle 3 Beschreibung unterschiedlicher Zündquellen.....	14
Tabelle 4 Maximaltemperaturen und Umgebungstemperatur Versuch: Bestimmung Temperaturminimum.....	19
Tabelle 5 Ergebnisse Bestimmung der Zündneigung.....	21
Tabelle 6 Mobiliar Brandraum	28
Tabelle 7 Ausgewählte Möbelstücke und daraus hergestellte Probekörper für Brandversuche.....	29
Tabelle 8 Auflistung aller Thermoelemente der Großversuche.....	31
Tabelle 9 Auflistung der Technik für die Gasanalytik.....	33
Tabelle 10 Zuordnung Mobiliar zu Gruppen.....	44
Tabelle 11 Umrechnung Brennwerte zu Heizwerte der Gruppen.....	45
Tabelle 12 Phänomene Großversuch 1	46
Tabelle 13 Phänomene Großversuch 2.....	47
Tabelle 14 Temperaturen und relative Luftfeuchtigkeit an den Versuchstagen (Kachelmannwetter.de)	48
Tabelle 15 Phänomene Großversuch 3	49
Tabelle 16 Zeitlicher Vergleich Phänomene Großversuch 1 und 2.....	53
Tabelle 17 Potentiell letale Kombinationen aus Expositionsdauer und CO-Konzentration (GESTIS).....	54
Tabelle 18 Physiologische Wirkung von Sauerstoffreduzierter Atmosphäre z. B. in (GIT Sicherheit + Management 2004).....	55
Tabelle 19 mögliche Einflussfaktoren der unterschiedlichen Brandphasen.....	58

1. Einleitung

In Baden-Württemberg ergaben sich im Jahr 2014 124.844 Einsätze für Berufs-, Werk-, und Freiwillige Feuerwehren. Darunter 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.

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. Darauf wurde bereits in Forschungsbericht 203 hingewiesen und erste Abschätzungen auf Grundlage reproduzierbarer Laborversuche wurden unternommen. 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). Eine daraus abgeleitete These lautet: Die Phase des Entstehungsbrandes 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 mittleren Übergangsstab, vor allem in Anbetracht unterschiedlicher Mobiliargenerationen, nachgewiesen werden. Damit soll im Anschluss eine Modellbildung für die reproduzierbare Abbildung von Realbränden unter Benutzung modernen Mobiliars ermöglicht werden. Gerade im Übergangsstab besteht jedoch die Herausforderung reproduzierbarer Brandverläufe. Erfahrungen der Forschungsstelle für Brandschutztechnik haben gezeigt, dass dies keine triviale Aufgabe darstellt (Christoph Menzel 2016).

Zunächst wird eine Auswahl möglicher Materialien getroffen. Durch geeignete Vorversuche (Kalorimeter, Labormaßstabsverbrennung) wurde bereits im Vorfeld ein hinsichtlich Reproduzierbarkeit interessantes Mobiliarportfolio erstellt sowie Zündzeiten und Wärmefreisetzung der ausgewählten Materialien im Labormaßstab ermittelt (vgl. Forschungsbericht #203 (Brandschutzforschung der Länder 2019)).

Anschließend wird durch Vorversuche eine mögliche Initialbrandvariante hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit untersucht, sowie möglichst reproduzierbare Zündzeiten ausgewählter Möbelstücke ermittelt.

Für die Untersuchung von Abweichungen bei Brandentstehungsphasen werden drei Zimmerbrände unter den gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Der Fokus liegt dabei — neben der Untersuchung der These zu Möbeln moderner Bauart — auf der Reproduzierbarkeit der Brandentstehungsphase. Die Temperaturverläufe aller Versuche werden erfasst und ausgewertet.

Mithilfe dieser Versuchsanordnung wird der Zeitpunkt des Flashovers ermittelt und auf Vergleichbarkeit überprüft. Darüber hinaus werden die relevanten Abgaskonzentrationen gemessen.

2. Grundlagen von Realbränden

In diesem Kapitel sollen die physikalischen und brandschutztechnischen Grundlagen diskutiert und erläutert werden, die für das Grundverständnis von Brandphänomenen erforderlich sind. Ergänzend wird auf Teil 1 dieses Berichtes verwiesen (Brandschutzforschung der Länder 2019).

2.1 Modellbildung und Brandverlauf

Auf Grundlage von ingenieurtechnischen Annahmen, muss man nun also verstehen, wie ein Naturbrand modellierbar ist.

Hierbei beeinflussen Raumvolumen, Brandentwicklung, Brandlast, Temperatur und Ventilationsbedingungen den Brandverlauf. Ist im Brandraum ausreichend Sauerstoff vorhanden, spricht man von einem brandlastgesteuerten Brand. In diesem Fall kann der Brennstoff sich fast vollständig in seine Reaktionsprodukte, i.d.R. CO_2 und H_2O , zersetzen. 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 deutlich niedriger. Der Anteil an Nebenprodukten wie CO und Pyrolysegasen ist hingegen deutlich höher (J. Blumenstock, D. Schelb, J. Kunkelmann, D. Max 2016, S. 3). In **Abbildung 1** ist der prinzipielle Temperaturverlauf eines Brandes dargestellt.

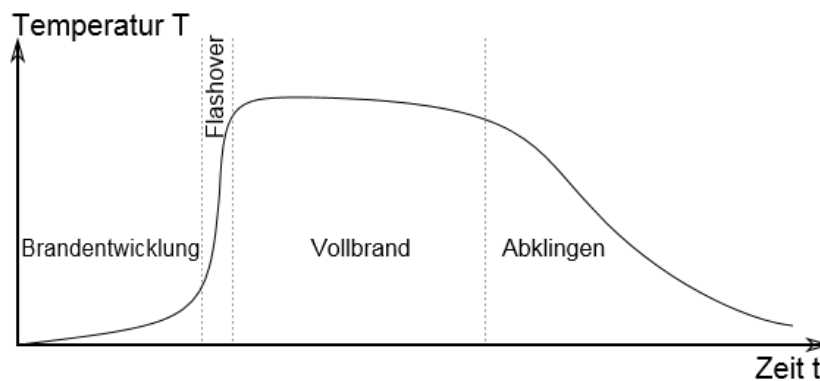


Abbildung 1 zeigt die Wachstumsphasen und Wärmefreisetzung eines natürlichen Feuers über der Zeit erstellt nach Karlsson und Quintiere (Drysdale 2011)

Die *Brandentwicklung* oder *Brandentstehungsphase* kann durchaus —in Abhängigkeit der Ventilationsbedingungen — mehrere Stunden andauern. Diese Periode ist charakterisiert durch geringe Wärmefreisetzung, geringe Temperatur und lokale Beschränkung auf den Bereich der Zündquelle bzw. des Initialbrandes. Der Übergang zum Vollbrand ist durch einen steilen Temperaturgradienten gekennzeichnet.

Am Übergang der Brandzone und direkt in der Flamme können daher durchaus hohe Temperaturen erreicht werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist ebenfalls abhängig von der Sauerstoffkonzentration (Drysdale 2011, S. 321–322).

Überschreitet die Umgebungstemperatur die Zündtemperatur der sich im Brandraum befindlichen Gegenstände, kommt es zur schlagartigen und gleichzeitigen Brandausbreitung, 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 aufgrund unterventilierter Bedingungen zu einem teilverlöschten 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 z.B. die Tür (typischerweise durch einen Feuerwehrmann im Innenangriff) 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 explosionsartigen Durchzündung (Backdraft).

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. Dabei sind Größenordnungen von 15-20 kW/m² aus der Literatur bekannt. Im Vollbrand werden Größenordnungen von 40-80 kW/m² gemessen und angegeben (Kunkelmann 1996).

2.2 Brände

Ein Brand als zu untersuchendes Verbrennungsereignis ist nach der Definition der DIN 14011 „ein nicht bestimmungsgemäßes Brennen, das sich **unkontrolliert** ausbreiten kann“ (Norm 14011:2018-01)

Diese Definition beschreibt das Phänomen gut und gibt schon einen Hinweis darauf, welche Schwierigkeiten die Beschreibung dieses Phänomens mit sich bringt. Denn Brände vor allem in Gebäuden finden in einer weitestgehend **nicht kontrollierten** Umgebung statt und jeder Brand läuft unter verschiedenen Randbedingungen ab.

Jeder Brand wird ganz allgemein durch eine Zündquelle im Beisein von Sauerstoff gezündet. Zum Unterhalt der Oxidation werden verschiedene physikalische Rahmenbedingungen und brandbestimmende Parameter vorausgesetzt (Joos 2006, S. 36–37) (Jürgen Troitzsch 1982, S. 12–13)

- Ausreichende Luftzufuhr (meist turbulente Strömungsbedingungen)
- Feste oder flüssige Brennstoffe müssen zunächst vergast werden
- Zündung durch Erreichen der Zündtemperatur (Autozündung) oder Zündquelle

Dies lässt sich im Branddreieck nach H.W. Emmons zielführend darstellen und veranschaulicht gut, wie Brände vermieden, bzw. auch induziert werden können.

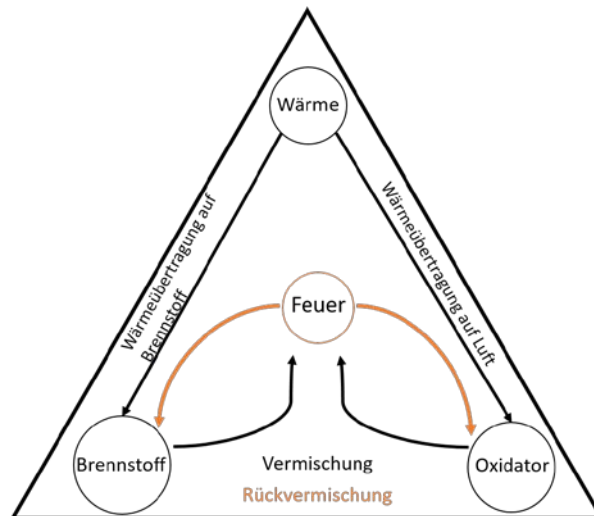


Abbildung 2 Branddreieck nach H.W. Emmons (1963)

Widmen wir uns den drei Säulen des Diagramms:

- **Wärme:** Kann durch Strahlung oder Konvektion -- seltener Wärmeleitung zugeführt werden. Wichtige Parameter sind Intensität, Gesamttemperatur und Einwirkungsdauer der Wärmezufuhr.
- **Oxidator:** Der Sauerstoff als Oxidator der Verbrennung wird dem Brand durch diffusive oder erzwungene Ventilation zugeführt.
- **Brennstoff:** Die Art des Brennstoffes beeinflusst den Brand vielfältig. Durch die für eine Verbrennung entstehende Notwendigkeit des gasförmigen Brennstoffzustandes verhalten sich feste und flüssige Brennstoffe wie Holz oder Benzin signifikant anders als gasförmige Brennstoffe wie z.B. Propan. Feste und flüssige Brennstoffe müssen zunächst vergast werden. Dies geschieht durch Phasenübergänge, etwa in Form einer Pyrolyse-Reaktion. Gleichzeitig sind Stoffzusammensetzung, Stoffstruktur und Brandgeometrie entscheidend für das Brennstoffangebot.

Die bei der Verbrennung erzeugte Wärme ist neben der Reaktion der Hauptschadensmechanismus bei Bränden. Es gibt drei Arten von Wärmetransportvorgängen, von denen nur zwei für Brände relevant sind:

- Wärmeleitung durch mechanische Kopplung und Temperaturgradienten,
- Konvektion, das Mitführen innerer Energie in einem strömenden Medium,
- Wärmestrahlung, also elektromagnetische Wellen.

Die Wärmestrahlung ist eine Übertragungsform von Wärme, die nicht an Materie gebunden ist. Dabei wird die Wärme durch elektromagnetische Wellen in den Raum über einem Strahlungssender emittiert. Im Falle eines Brandes sind die Flamme sowie die heißen Verbrennungsprodukte in erster Linie Ruß (Festkörperstrahlung) und Gase solche Strahlungsemitter (für tiefere Beschreibung vgl. Kap. 2.3 (Andreas Heilos 2002)).

Der Emissionsgrad fester Körper wie Rußpartikeln oder größerer Materialien wird – da die Absorption und damit auch die Emission wie erwähnt schon in sehr dünnen Oberflächenschichten stattfindet – stark von der Oberflächenstruktur und Farbe beeinflusst. Bei metallischen Oberflächen etwa weißt eine glatte Oberfläche einen in der Regel kleineren Emissionsgrad mit einer geringeren Abhängigkeit von der Wellenlänge auf als eine rauere Oberfläche.

Die Art der Flamme sowie die beim Brand erzielte Temperatur sind ausschlaggebend für Ausmaß und Art von thermischer Freisetzung sowie Entstehung und chemischem Charakter des Rauchgases. Flammen können im Allgemeinen unterschieden werden in vorgemischte und nicht vorgemischte (oder Diffusions-) Flammen.

Alle natürlich (und unbeabsichtigt) auftretenden – und damit hier zu bewertenden – Verbrennungserscheinungen beruhen auf Diffusionsflammen.

2.3 Strahlung

Elektromagnetische Strahlung kann wellentheoretisch oder quantenphysikalisch über den Austausch von Photonen beschrieben werden. Der Praktikabilität halber wird zunächst der wellentheoretische Teil beschrieben.

Zur Klassifizierung von Strahlung wird diese gemäß ihrer physikalischen Eigenschaft in Abhängigkeit der Frequenz in Wellenlängenbereiche unterteilt. Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,1-100 μm wird üblicherweise als Wärmestrahlung, Strahlung im Bereich von 0,8-360 μm als Infrarotstrahlung bezeichnet.

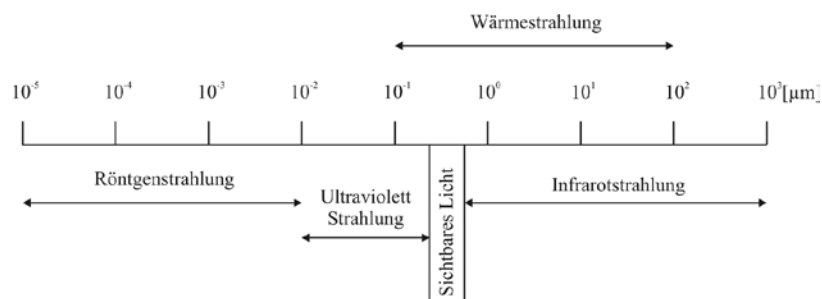


Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt des Wellenlängenspektrums elektromagnetischer Strahlung (Oliver Brunn)

Im Gegensatz zur Wärmeübertragung durch Konvektion oder Wärmeleitung ist die Wärmestrahlung an sich weder an ein Medium noch eine Distanz gebunden.

Ursächlich für Strahlung ist die Umsetzung von innerer Energie eines Moleküls. Entsprechend ihrer Freiheitsgrade setzen Moleküle durch Bewegung innere Energie im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung frei. Die so emittierte Strahlung kann durch Absorption wieder in innere Energie rückgewandelt werden. Einem einzelnen Teilchen kann dabei keine Wärmestrahlung zugeordnet werden (Oliver Brunn, S. 19–20) (Andreas Heilos 2002, S. 5–6). Dies bedeutet auch, dass alle Körper mit einer Temperatur $> -273,15K$, also über dem absoluten Nullpunkt, aufgrund ihrer Eigenbewegung strahlen.

Zur mathematischen Beschreibung der Strahlungsintensität I kann eine Einheitskugel um eine punktförmige Strahlungsquelle aufgespannt werden. Betrachtet man die Strahlungsleistung eines Flächenelementes S , so lässt sich die Flussdichte e als $\frac{dE}{dS}$ beschreiben.

Unter einem Winkel α in der Betrachtung einer Halbkugel erhält man daraus das Lambert'sche Cosinus-Gesetz $e(\alpha) = e(0) * \cos\alpha$.

Dieses beschreibt die Winkelabhängigkeit der Strahlungsflussdichte. (Oliver Brunn, S. 19–20)

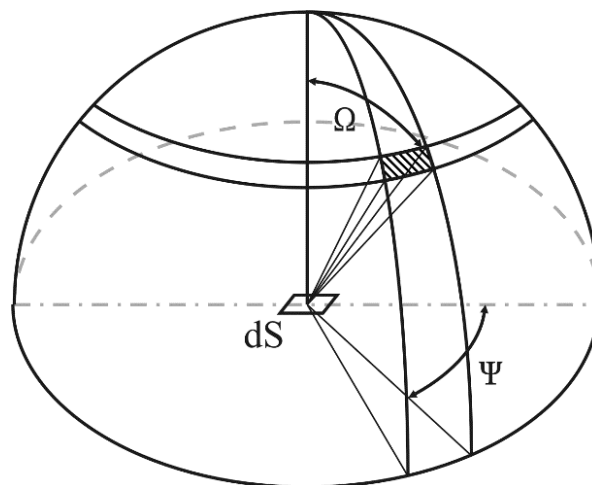


Abbildung 4 zeigt das Aufspannen einer Einheitshalbkugel um eine punktförmige Strahlungsquelle zur Herleitung der Strahlungsintensität (Oliver Brunn)

Bei hohen Temperaturen wird die Wärmestrahlung eines Körpers „sichtbar“. Grund hierfür ist das aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz ableitbare Wiensche Verschiebungsgesetz.

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8 \mu m * K}{T}$$

Das Strahlungsmaximum verschiebt sich dabei mit höherer Temperatur hin zu kürzeren Wellenlängen (**Abbildung 5** zeigt das Wiensche Gesetz anhand der Strahlungsintensitäts-Peak-Verschiebung mit veränderter Wellenlänge). Am Beispiel von Stahl soll dies exemplarisch aufgezeigt werden: Für Stahl, der mit steigender Temperatur im Schmiedeverfahren geglüht wird, gilt daher: Er strahlt zunächst rötlich, dann gelb und schließlich grell und weiß (Drysdale 2011) vgl. hierzu **Tabelle 1**.

Tabelle 1 Wärmestrahlung, charakteristische Farben

Temperatur (°C)	Farbe
550	Erstes rötliches Glühen
900	Rot
1100	orange
1400	Weiß

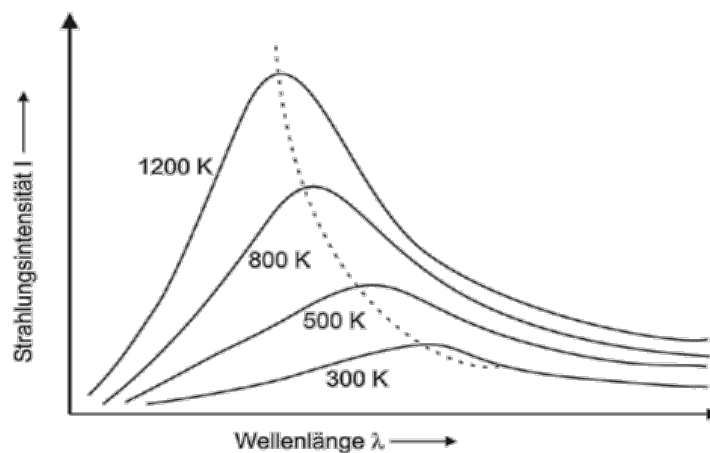


Abbildung 5 zeigt das Wiensche Gesetz anhand der Strahlungsintensitäts-Peak-Verschiebung mit veränderter Wellenlänge

Für die Messung von Strahlung ist Kenntnis des Materialverhaltens zwingend vonnöten.

Das dabei maximal erreichbare Einstrahlungs-/Ausstrahlungs-Verhältnis ist das des sogenannten *schwarzen Körpers*. Hinsichtlich seiner Strahlungseigenschaften weist der schwarze Körper ein ideales Verhalten auf. Der Körper nimmt die auf ihn auftreffende Strahlungsenergie komplett auf und „wandelt sie vollständig in innere Energie um“ (Oliver Brunn, S. 22)

Im Gegensatz dazu steht der *reale Körper*. Ein realer Körper mit der Temperatur T emittiert pro Oberflächenelement eine Energiestromdichte \dot{q} : (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen 2013)

$$\dot{q} = \varepsilon * \sigma * T^4$$

Hierin ist \dot{q} die Wärmestromdichte, ε der Emissionsgrad des realen Körpers und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante. \dot{q} ist eine winkelabhängige Größe (vgl. hierzu **Abbildung 4**) Der Emissionsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen abgegebener Strahlung eines Körpers und der abgegebenen Strahlung eines Schwarzen Körpers- Für einen idealen schwarzen Körper, gilt daher: $\varepsilon = 1$.

Wichtiger Zusammenhang: Die Wärmestromdichte hängt mit der vierten Potenz von der Temperatur ab. Damit ist Strahlung wichtigstes Wärmetransportphänomen bei Bränden.

2.4 Brandstoffe und Begrifflichkeiten

Eine wesentliche, den Brand beeinflussende Größe ist die Art und Anordnung des verbrennenden Stoffes bzw. der Stoffgemische (Warnatz et al. 2001). 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 reagiert.

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.

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. 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 abhängig von dem Stoff bzw. vom Stoffgemisch 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 über 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 besteht. 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 (Drysdale 1998).

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 Brandentstehungsphase kann mehrere Stunden andauern. Diese Periode ist charakterisiert durch geringe Wärmefreisetzung, geringe Temperatur und lokale Beschränkung auf den Bereich der Zündquelle.

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 (DiNenno 2016).

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 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 Temperaturabnahme begleitet wird.

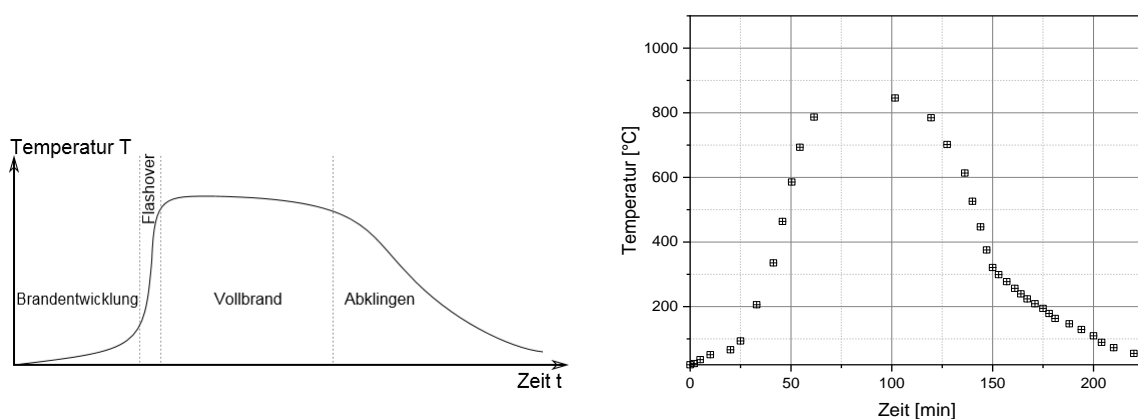


Abbildung 6 Links: Idealierte Brandverlaufskurve; Rechts: Reale Brandverlaufskurve mit gemittelten Durchschnittstemperaturen im Raum

2.5 Rauchgase

Rauch als Überbegriff für die "Summe gasförmiger Produkte, die beim Verbrennen oder Pyrolysieren organischen Materials entstehen und sowohl flüssige als auch feste Partikel sowie nicht abreagierte Reaktionsgase enthalten", ist ein allgemein verwendeter Begriff in Wissenschaft und Alltag. Rauch entsteht als Produkt von Verbrennungen immer dann, wenn eine Verbrennung — mindestens lokal — nicht vollständig abläuft (Joos 2006). Er entsteht sowohl bei Schwelbränden als auch Flammen- und Vollbränden, wobei sich die Entstehungsmechanismen und Eigenschaften z.T. deutlich unterscheiden. Die nachfolgende **Tabelle 2** zeigt exemplarisch eine Übersicht der nach VdB 2014 zu erwartenden Verbrennungsprodukte in Abhängigkeit zur Brandstoffgruppe und der Brandphase.

Tabelle 2 Übersicht der Verbrennungsprodukte nach (Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. 2014)

Brandstoffgruppe	Entstehungsbrand	Vollbrand
Cellulose (Holz, Papier, Zellstoff)	CO ₂ , CO, H ₂ O	CO ₂ , CO, H ₂ O, Aldehyde* , KW
Eiweißprodukte (Wolle, Haare, Federn)	CO ₂ , CO, H ₂ O HCN, SO ₂	CO ₂ , CO, H ₂ O, HCN, SO₂, H₂S, Amine
Polymer mit Kohlenwasserstoffen (PVC, PE, Polystyrol)	CO ₂ , CO, H ₂ O KW	CO ₂ , CO, H ₂ O, NO _x Aldehyde
Polymer mit Halogenen (halogenierte Flammschutzmittel, PVC)	CO ₂ , CO, H ₂ O, HCl, CKW	CO ₂ , CO, H ₂ O HCl COCl₂, CKW, Aromaten, Chloraromaten
Polymer mit Stickstoff (Stickstoffbasierte Flammschutzmittel, Melamin,	CO ₂ , CO, H ₂ O NO _x , Amine	CO ₂ , CO, H ₂ O, HCN, NO_x, Ammoniak, Isocyanate
1. Reihe	Mineralisierungs- und Nebenprodukte	
2. Reihe und folgende	Schadstoffe der unvollständigen Verbrennung und Pyrolyse	
*fett	Hauptanteile schädlicher Verbindungen	
normal	in Rauchgasen, Ruß oder Flugasche enthaltene Verbindungen	
KW	Kohlenwasserstoffe	
CKW	Chlorkohlenwasserstoffe	

Im Folgenden werden die Stoffe Kohlenstoffmonoxid und Cyanwasserstoff näher betrachtet.

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 (O₂Hb) in Form von äußerst stabilem Carboxyhämoglobin (COHb) am Hämoglobin (Blutfarbstoff) bindet – dies liegt begründet in der Rolle von CO als natürlichem Metaboliten der Zellatmung von Sauerstoff. Die Bindungskraft der Carboxylgruppe ist dabei deutlich stärker als die des Sauerstoffkomplexes, im Besonderen dabei ca. 200- - 300-mal so stark, und behindert damit den Sauerstofftransport im Blut.

Grundsätzlich gilt: Ab einem Anteil von 25 % COHb im Blut treten Vergiftungserscheinungen wie Kopfschmerzen, Ohrensausen und Schwindelgefühl auf. Bei einem Anteil von 50 % COHb kommt es zur Bewusstlosigkeit. Ab 60 % COHb Anteil kann der Tod eintreten. Ein Sekundäreffekt einer CO-Vergiftung ist die Erhöhung der Atemfrequenz, die zur erhöhten inhalativen Aufnahme von Gefahrstoffen führt (Lohs et al. 2008, S. 246).

Eine CO-Intoxikation 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.

Cyanwasserstoffgas (HCN) ist das Gas der Blausäure und zählt zu den stärksten und am schnellsten wirkenden bekannten Giften (Lohs et al. 2008, S. 76). Es zählt ebenso zu den Nervengiften und wurde als Zyklon B zur Massenvernichtung in Konzentrationslagern verwendet.

Bei der Aufnahme von geringen Dosen kommt es vor dem Eintritt des Todes durch Atemlähmung zu heftigen Erregungszuständen, Schwindel, Angstgefühlen und Krämpfen. HCN wird inhalativ und dermal aufgenommen, es hemmt die Ferricytochromoxidase und lähmt dadurch die Zellatmung (Lohs et al. 2008, S. 76)

Der AGW für Cyanwasserstoff beträgt 1 mg/m³ (Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) 2006, S. 33)

In Rauchgasen finden sich unter fetten Bedingungen in der Regel auch Kohlenwasserstoffe wieder. Es wäre nicht korrekt, dabei von einer Bildung im eigentlichen 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.

Als Produkt stehen damit nicht durchoxidierte Kohlenwasserstoffe mit ungesättigten Bindungen. Vor allem die Ethinbildung spielt als Vorreaktion 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 (zu erkennen am gelben Leuchten der Flamme) um Festkörperstrahlung handelt, weist diese im Gegensatz zur schmalbandigen Gasstrahlung ein ausgeglichenes Strahlungsspektrum auf. Aufgrund der z.T. hohen Anzahl an Rußpartikeln kann Ruß die Strahlung heißer Gase daher deutlich erhöhen.

Rauchgase als Überbegriff für Aerosol-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 und HF bei Kabelbränden und vielen Schaumstoffen in der Realität häufig auf (gerade bei modernen Mobiliaraufbauten in modernen Möbeln). Diese wirken reizend auf die Atemwege und können bis zur Lungenembolie führen

In diesem Kapitel wurden die wesentlichen Parameter von Verbrennung und Bränden erläutert, die letztlich charakteristisch für einen typischen Verlauf sind. Will man einen Brand und dessen Brandfolgen wie Temperatur und Rauchbildung ab- oder nachbilden, so spielt die Kenntnis der einflussgebenden Parameter eine große Bedeutung.

Im Folgenden werden Problematiken bezüglich Bauteilen und Baumaterialien beschrieben, die ein ingenieurmäßiges Abschätzen von Brandfolgen und Brandverläufen zulassen, dies aber auch notwendig machen.

2.6 Zündmethoden

Zur Untersuchung von Proben auf ihre Brandeigenschaften wird die Wahl einer geeigneten thermischen Belastungsart notwendig. Diese sind z.T. in entsprechenden Normen festgelegt und verfügen über systeminhärente Vor- und Nachteile, sind also nicht universell einsetzbar. Dabei unterscheiden sich die Belastungsarten vor allem nach **Art** und **Form** des Wärmeeintrages.

Hierbei wird vor allem nach unterschiedlichen Wärmeübergängen (konvektiver Wärmeübertrag und Wärmeübertrag mittels Strahlung) unterschieden.). **Tabelle 3** stellt einen Überblick über die verschiedenen Beflammungsarten, Initialbrände und Zündmethoden dar.

Tabelle 3 Beschreibung unterschiedlicher Initialbrände und Zündmethoden

Typ	Vorteile	Nachteile
Holzkippen	gut lagerbar geringe Gefahr der ungewollten Entzündung geeignet für Großmaßstab	rußende Flamme Naturstoff zur Zündung wird ein Brandbeschleuniger benötigt Wärmefreisetzungsrate von der Branddauer abhängig
Poolfeuer	bei Verwendung geeigneter Brennstoffe sehr rußarm gleichmäßige Verteilung der Brandlast zeitlich Konstante Wärmefreisetzungsrate geeignet für Großmaßstab	hochentzündlich → potentiell gefährlich In Vorversuchen mit großen Schwankungen versehen
Poolfeuer Wasser & Gas	gleichmäßige Verteilung der Brandlast geeignet für Großmaßstab	Nach Erlöschen der Flamme und Nicht-Abschalten der Gaszufuhr Explosionsgefahr
Kiesbettbrenner	gleichmäßige Verteilung der Brandlast geeignet für Großmaßstab	relativ hohe Austrittsgeschwindigkeit des Gases (Gefahr) Rückschlaggefahr bei Untervertilierung
Strahler	reine Wärmestrahlung	relativ große Menge an elektrischer Energie benötigt
Heizplatte	reine Wärmeleitung (geringer Anteil konvektiver Wärmeübertragung)	Träge Sehr träge

Die Wahl der Zündmethode hängt schlussendlich immer auch vom nachzustellenden Brandverlauf ab. Für die Überprüfung eines Haushaltsbrandes sind exotische Vorgehensweisen mit technisch aufwändigen Methoden üblicherweise nicht sinnvoll.

Die Wahl der zum Einsatz kommenden Versuchsmethode trifft somit der Versuchingenieur. Ein logisch angebrachtes Vorgehen ist das Trennen nach Wärmeübergangsmechanismen. Hierbei gilt es nach Anwendungsfällen zu priorisieren.

2.7 Probenkalorimetrie

Im Vorfeld dieses Berichtes wurden kalorimetrische Untersuchungen der Materialien durchgeführt. Eine genauere Definition der Untersuchungen ist in Forschungsbericht # 203 — Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungsbrand im Labormaßstab — zu finden (Brandschutzforschung der Länder 2019). Grundsätzlich aber wurden mithilfe von verbrennungskalorimetrischen Versuchen 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 nach oberem Heizwert und unterem Heizwert unterschieden (moderne Begrifflichkeit: Brennwert und Heizwert (Joos 2006)). Mit dem verwendeten Messaufbau lässt sich jedoch nur der obere Heizwert ermitteln. Dies führte dazu, dass der untere Heizwert mit Hilfe von Normen und empirischen Literaturwerten auf Grundlage der gemessenen Größen ergänzend abgeschätzt wurde.



Abbildung 7 IKA C200 Bombenkalorimeter aus Forschungsbericht #203

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

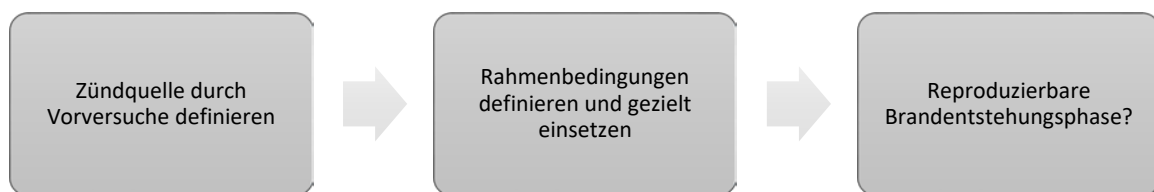
3 Versuchsaufbau und Modellgrundlage

Es soll für verschiedenste gebräuchliche Möbelstücke das Brandverhalten bei — wenn möglich — reproduzierbarem Entstehungsbrand untersucht werden. Der Fokus liegt dabei zunächst auf der Möglichkeit einer Reproduzierbarkeit des Entstehungsbrandes.

Die Methodik unterliegt dabei dem allgemeinen kausallogischen Ansatz, dass *reproduzierbare Effekte durch gleichbleibende Rahmenbedingungen zu erreichen sind*.

Variierbare Rahmenbedingungen mit zu erwartenden, großen Auswirkungen auf ein mögliches Versuchsbild werden dabei betrachtet für:

- den Versuchsraum
- die Ventilation
- die Brandlast
- den Initialbrand



Ziel der Untersuchung: eine Definition für ein mögliches Beurteilungskriterium für die Reproduzierbarkeit von Brandentstehungsphasen, welches im Idealfall festlegen und definieren kann, bis zu welcher Abweichung Brandentstehungsphasen als reproduzierbar bezeichnet werden können.

Da schlussendlich Zimmerbrände unter identischen Bedingungen durchgeführt werden, ist auch der im Folgenden beschriebene Versuchsaufbau für alle Zimmerbrände identisch. Die Zimmerbrände werden in dem beschriebenen Brandraum unter den genannten Rahmenbedingungen durchgeführt. Der Brandraum ist mit ca. 316 kg Mobiliar bestückt. Dieses wurde auf Grundlage der Versuche von Teil 1 ausgewählt und nach Formfaktor, Gewicht und Material ausgewählt und wird in Kapitel 4.1 genauer beschrieben.

3.1 Vorversuchsreihe zur Bestimmung der Brandentstehungsphase

Mit Hilfe von Vorversuchen sollen der Initialbrand und unterschiedliche Probekörper bezüglich ihres Brandverhaltens untersucht werden (vgl. **Abbildung 8**). Ziel ist es, zu bestimmen, ob die Raumtemperatur im Umfeld des Initialbrandes gleichförmig verteilt ist und ob dessen Wärmefreisetzung und thermische Leistung stationär sind. Außerdem werden die Zündzeiten¹ verschiedener Probekörper bestimmt. Es werden hierzu jeweils immer zwei gleiche Probekörper unter gleichen Bedingungen analysiert. Damit sollen beobachtbare Unterschiede bei der Entzündung der Probekörper bestimmt werden. Die Ergebnisse fließen in die Beurteilung der Reproduzierbarkeit von Brandentstehungsphasen ein.

Das Augenmerk liegt bei dieser Versuchsreihe auf der Reproduzierbarkeit von Versuchen. Diesbezüglich ist besonders die Brandentstehungsphase von hoher Relevanz, da diese über den weiteren Brandverlauf – und z.T. auch über dessen Intensität entscheidet.

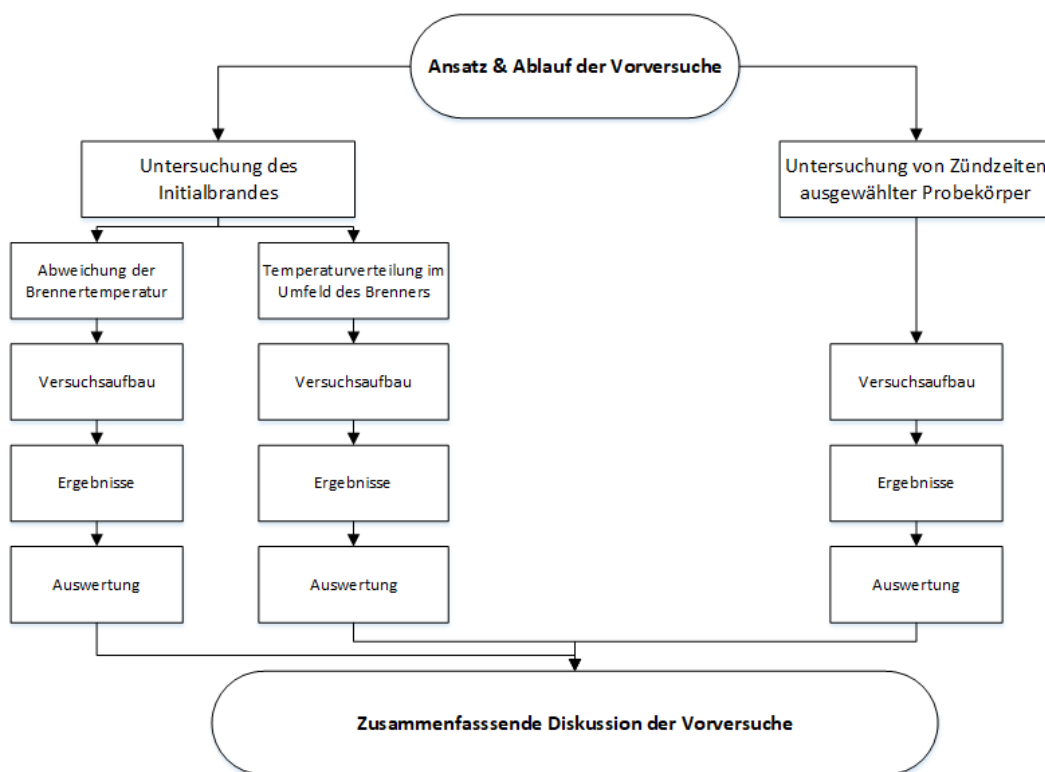


Abbildung 8 Flowchart der Vorversuchsreihe

Alle genannten Untersuchungsobjekte werden mit thermischer Leistung von 140 kW durch den bereits beschriebenen Kiesbettbrenner beaufschlagt. Auf diese Weise ist der Einsatz chemischer Brennstoffe — hier: Propangas — möglich.

¹ Zeit von Entzündung des Initialbrandes bis zur optisch wahrnehmbaren Zündung des Probekörpers

Mit Thermoelementen (vgl. **Abbildung 9** und **Abbildung 10**) des Typ K wird die Strahlungsleistung der Brenner radial im Umfang des Brenners und bei definiertem Abstand des Messkörpers bestimmt. Dies wird aufgrund systematisch bedingter zu erwartender Messungenauigkeiten notwendig.

Die Messvorrichtung besteht aus einem Metallrahmen, in den eine nichtbrennbare Brandschutzplatte eingespannt ist. Auf der Brandschutzplatte befindet sich ein (a) ungeschütztes, und ein (b) vor direkter Wärmestrahlung des Brenners geschütztes Thermoelement (vgl. hierzu die Theorie zur thermischen Strahlung in Kapitel 2.3 – der Zweck des Strahlungsschutzes ist damit inhärent naheliegend). Die Werte des ungeschützten Thermoelementes sind bei der Auswertung ausschlaggebend.

Für die bessere Vergleichbarkeit der gemessenen Temperaturen wird zusätzlich mit einem weiteren Thermoelement (Typ K) die Umgebungstemperatur abseits des Brenners gemessen.

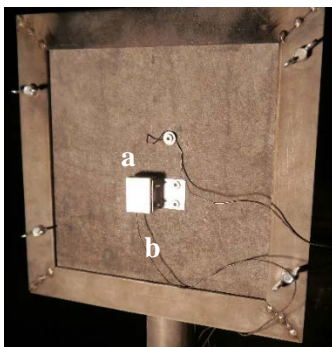


Abbildung 9 Messvorrichtung
Temperaturminimum Vorderseite

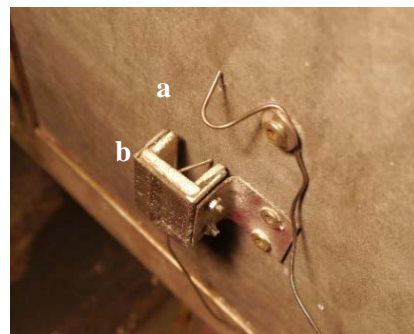


Abbildung 10 Messvorrichtung Temperaturminimum
Detailansicht

Wie auf **Abbildung 11** zu sehen, wird die Messvorrichtung nacheinander 50 cm entfernt vom Kiesbettbrenner in Nord-, West- und Südrichtung platziert. (Diese Nomenklatur hat sich bewährt, da so die Eindeutigkeit der Wandseiten gewährleistet werden kann). Da die Anschlussleitung des Kiesbettbrenners in Ostrichtung verläuft, können in dieser Richtung keine Proben platziert werden. Der Kiesbettbrenner steht bei den Versuchen in der Mitte des Brandraumes und wird mit einer Leistung von 120 kW betrieben. Die Brenndauer betrug bei allen Versuchen 4 min.

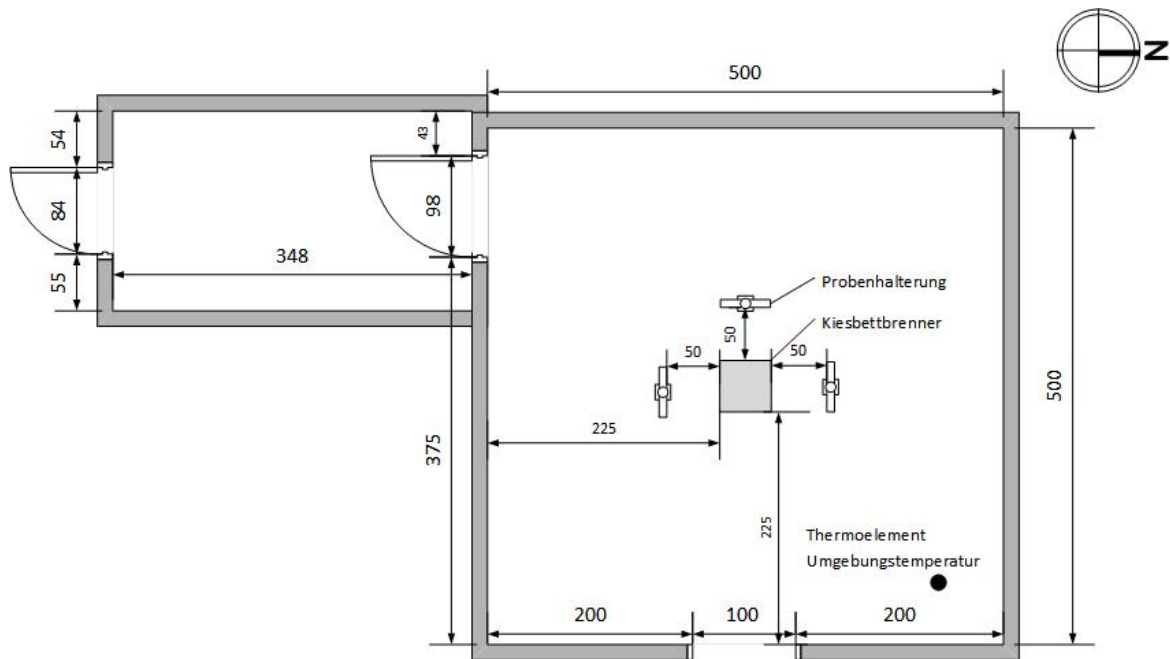


Abbildung 11 Grundriss Brandraum mit Kiesbettbrenner, Vorversuch zur Bestimmung der minimal zur Entzündung notwendigen Wärmestrahlung

In der nachfolgenden **Tabelle 5** werden die gemessenen Maximaltemperaturen der einzelnen Thermoelemente an der Probe sowie die Umgebungstemperaturen bei der Zündung des Brenners abgebildet.

Tabelle 4 Maximaltemperaturen und Umgebungstemperatur Versuch: Bestimmung Temperaturminimum

Versuchsnummer	Umgebungstemperatur (Bei Zündung des Brenners)	Tmax. Thermoelement a (ohne Strahlungsschutz)	Tmax. Thermoelement b (mit Strahlungsschutz)
1 Norden	16,9 °C	83,1 °C	49,7 °C
2 Westen	21,0 °C	95,8 °C	60,6 °C
3 Süden	22,0 °C	90,1 °C	61,0 °C

Mit dieser Abstandsgröße wird der Aufbau des Raumbrandversuchs gestaltet. Entscheidend ist auf Grundlage der Strahlungsintensität und des Wärmeeintrages die Positionierung des Kiesbettbrenners relativ zu den Versuchsstücken. Der Wärmeeintrag soll ohne direkten Kontakt der Materialien mit den Flammen erfolgen. So soll Reproduzierbarkeit gewährleistet werden, weil Inhomogenitäten des Flammenkontaktes umgangen werden.

Sowohl für die Vorversuche als auch für die Großversuche wird ein Kiesbettbrenner als Initialbrand verwendet.

Um die Flamme des Kiesbettbrenners auf Abweichungen bzgl. der Temperatur zu untersuchen, wurde bei mehreren Versuchen die Temperatur oberhalb der Flamme ermittelt. Folgend werden die Integrale der einzelnen Temperaturkurven ermittelt. Anhand der Integrale wird die prozentuale Streuung um den Mittelwert inmitten der Versuche berechnet.

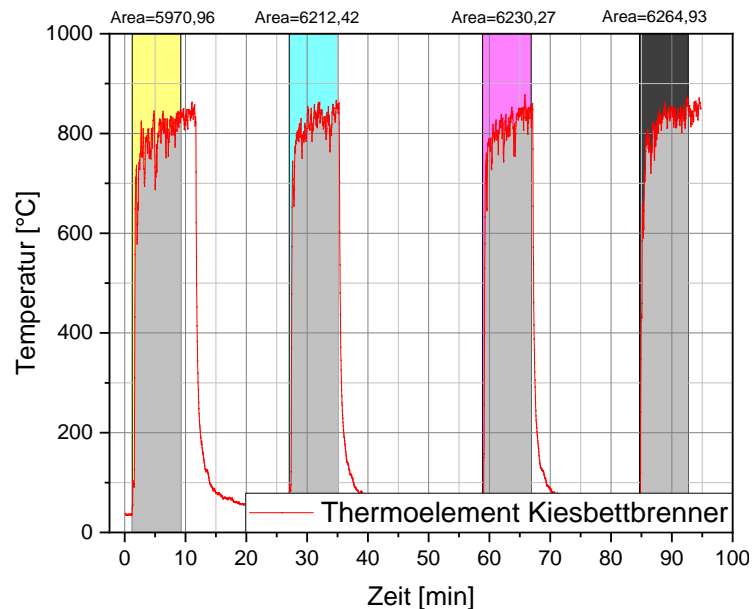


Abbildung 12 Prozentuale Abweichung der Brennertemperatur

Die Integrale weisen eine Streuung um den Mittelwert von ca. 2 % auf. Auf Basis dieser Ergebnisse kann von einer gleichbleibenden Leistung des Kiesbettbrenners ausgegangen werden.

3.2 Ergebnisse Vergleich von Zündzeiten ausgewählter Probekörper

Die **Tabelle 5** zeigt die gemessene Zeit von der Entzündung des Kiesbettbrenners bis zur Zündung der Probekörper in Abhängigkeit von dessen Material, die Entfernung zum Brenner sowie der Brennerleistung. In einem einfachen Probeaufbau analog zu **Abbildung 11** wurden die einzelnen Gegenstände und Probeteile damit auf ihre Zündneigung untersucht. Zwischen den Versuchen 9 und 11 wurde die Leistung des Kiesbettbrenners von ursprünglich 120 kW² auf 140 kW gesteigert.

² Entsprechend 5080 sl/h Propangas (155 g/min)

Tabelle 5 Ergebnisse Bestimmung der Zündneigung

Versuchsnummer	Probekörper	Entfernung zum Brenner	Leistung Kiesbettbrenner (berechnet)	Entzündung
7	Couchtisch	20cm	120 kW	6:50 min
8	Couchtisch	20cm	120 kW	._**
9	Regal	20cm	120 kW	7:25 min
11	Regal	20cm	140 kW	14:33 min
12	Wandregal	16cm	140 kW	7:30 min
13	Wandregal	16cm	140 kW	6:30 min
14	Sessel halbiert	20cm	140 kW	00:57 min
15	Sessel halbiert	20cm	140 kW	1:02 min
16	Holz (8,4%)*	20cm	140 kW	._**
17	Holz (8,0%)*	15cm	140 kW	8:05 min
18	Holz (7,7%)*	15cm	140 kW	7:08 min
19	Holz (7,6%)*	15cm	140 kW	5:50 min
20	Holz (7,7%)*	15cm	140 kW	7:39 min

*Unmittelbar vor den Versuchen mit einem Materialfeuchtemessgerät (Greisinger GMR 110) an einer Stelle in ca. 5 mm tiefe gemessene Holzfeuchte bei 13 °C

**Es fand nach 15 min keine Entzündung statt

3.2.1 Vergleich von Zündzeiten ausgewählter Probekörper

- Die ersten Versuche der Versuchsreihe, die Versuche 7 und 8 wurden mit einem halbierten Couchtisch als Probekörper durchgeführt. Die Differenz zwischen den Zündzeiten beträgt mindestens 8 min 10 s.
- Zwischen den Versuchen 9 und 11 wurde die Brennerleistung mit dem Ziel, eine schnellere Entzündung der Probekörper zu erreichen, von 120 kW auf 140 kW erhöht.
- Um einen Referenzwert hinsichtlich der Abweichung von Zündzeiten zu erhalten, wurde eine Versuchsreihe mit unbehandeltem Holz annähernd gleicher Holzfeuchte durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigt **Abbildung 13**.

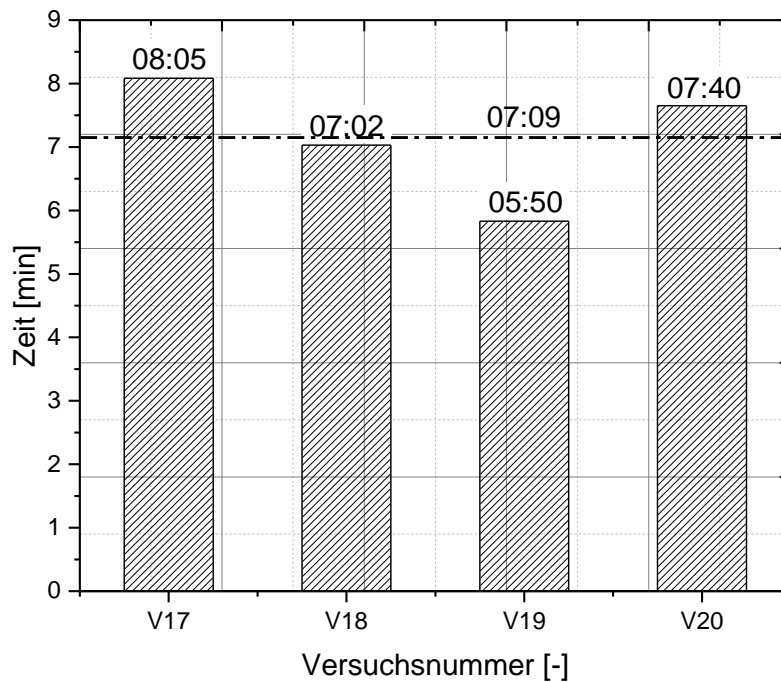


Abbildung 13 Diagramm Zündzeiten der Versuche 17 bis 20 mit Angabe des Mittelwerts von 7 min 9 s (gestrichelte Linie)

3.3 Diskussion der Vorversuche

Es wurden folgende Parameter kontrolliert:

- Brennerleistung
- Ventilation des Brandraumes (Tür geschlossen, Fenster offen)
- Volumenstrom der Hallenlüftung 30.000 Nm³/h (Normkubikmeter pro Stunde)
- Abstand zwischen Probe und Brenner
- Höhe der Probe

Dies schließt gleichzeitig viele Fehlerquellen aus. Die Ergebnisse der Vorversuche zeigen trotz gleichbleibender Versuchsbedingungen teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse (Zeitspannen von 5 s bis ca. 8 min)

Insbesondere bei den Versuchen 7 und 8 sowie 9 und 11 weichen die Zündzeiten stark voneinander ab. Bei den Versuchen 9 und 11 trat entgegen der durch die höhere Brennerleistung zu erwartenden schnelleren Entzündung der Probe eine Verlängerung der Zündzeit auf.

Die Unterschiede bei den Zündzeiten der Versuche 12,13 und 14,15 sind neben denen der Versuche mit Holz am geringsten.

Die als Probekörper verwendeten Möbel moderner Bauart zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass sie in sog. *Plattenbauweise* aus Spanplatten, Hartfaserplatten und aus so genannten *Sandwichplatten* mit Kunststoffeinfassungen (Kantenumleimer) aufgebaut sind.

Grundsätzlich gilt für diese Möbel, dass sie aus vielen verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften und Strukturen aufgebaut sind.

Sandwichplatten bestehen aus drei Schichten. Zwei Deckschichten (**a**) und dem Kern (**b**) (**Abbildung 14**). Die Deckschichten bestehen beispielsweise aus Hartfaserplatten. Der Kern kann in verschiedenen Bauweisen ausgeführt werden (Schaumstoff, Faltblech, Honigwabe etc.) und aus verschiedenen Materialien bestehen. Beispielsweise wird für den Kern Papier, Schaumstoff oder Balsaholz verwendet (Wiedemann 2007, 222, 227, 228).

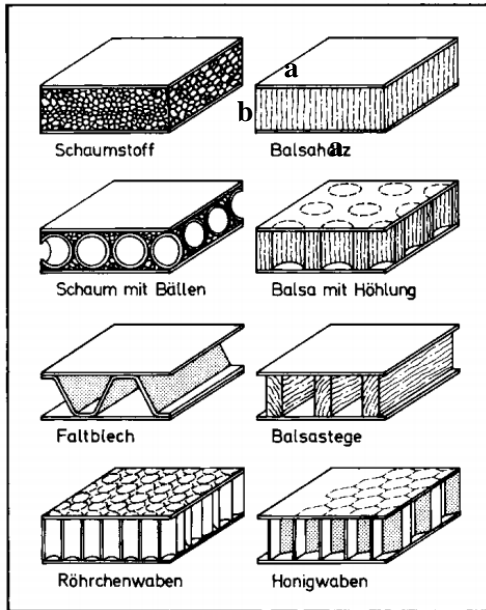


Abbildung 14 Aufbau Sandwichplatten (Wiedemann 2007, S. 227)

Abbildung 15 Foto Aufbau eines Möbelstücks

Die äußerste Schicht der verwendeten Sandwichplatten besteht an den Außenkanten aus einer lackierten Holzfaserschicht. Darunter befindet sich eine Wabenstruktur aus Pappe. An den Kanten bilden Kantenumleimer aus Kunststoff die äußerste Schicht. Unter diesen befindet sich eine Spanplatte. Es zeigte sich, dass die Kantenumleimer bei den Vorversuchen nicht brannten, sondern zu unterschiedlichen Zeiten lediglich abtropften. Erst die darunterliegende Spanplatte entzündete sich nach weiterer Erwärmung.



Abbildung 16 Ablösen der Kantenumleimer

Der komplexe Aufbau der Möbel aus verschiedenen Materialien und die nicht brennenden Kantenumleimer geben Indizien für eine Erklärung der beobachteten unterschiedlichen Zündzeiten. Für diese Theorie sprechen auch die kleineren Differenzen der Zündzeiten bei den Versuchen mit dem Sessel und dem Holz.

Holz gleicher Geometrie und Feuchte (Differenz kleiner 1%) wurde als zusätzlicher Probekörper verwendet, um die Differenzen der Zündzeiten eines Probekörpers aus nur einem Material zu untersuchen. Die maximale Differenz der Zündzeiten dieser Probekörper betrug 2:15 min.

Die oben beschriebene Struktur vieler Probekörper in Kombination mit konstanter Brennerleistung, geringer Abweichung der Integrale der Temperaturkurven des Brenners sowie einer geringen Streuung um den Mittelwert bei der Untersuchung der Brennerleistung (Versuche 2 – 4) lassen die Vermutung zu, dass nicht der Kiesbettbrenner oder die äußeren Rahmenbedingungen, sondern im Wesentlichen die Beschaffenheit der Probekörper für die unterschiedlichen Zündzeiten verantwortlich sind.

4. Großversuche am Szenario eines Raumbrandes

In Raumbrandversuchen unter realen und üblichen Kenndaten sollen die Beobachtungen aus den Laborversuchen verifiziert werden.

Dazu wird ein gasbetriebener Kiesbettbrenner im Innern des $L = 5 \text{ m} \times B = 5 \text{ m} \times H = 2,6 \text{ m}$ großen Raumes aufgestellt. Im Kontext dieser Versuchsreihe ist festzuhalten, dass die Brennerleistung im gewählten Fall mehrere Größenordnungen über sonst üblicherweise gewählten kleineren Zündquellen liegt (etwa kleine Ethanolpoolfeuer in Zimmerecken). Dies ist durch den nicht vorhandenen Kontakt mit der Flamme zu rechtfertigen. Es findet also kein Zündkontakt zwischen Oberfläche und Flammenfront statt, die initiale Zündenergie wird nur durch Strahlung und Konvektion übertragen und ist so entsprechend reproduzierbar gestaltet. Nach Entzünden des ersten Möbelstückes wird zu einem definierten Zeitpunkt die Brennerleistung auf null reduziert. In Vorversuchen wird gezielt versucht, reproduzierbare Entzündungsbedingungen zu finden. Die gewählte Methode lässt sich auch in anderen Versuchen leicht abbilden und die Versuchsrahmenbedingungen sind so objektiv zu gewährleisten.

Da drei Zimmerbrände unter identischen Bedingungen durchgeführt werden, ist auch der im Folgenden beschriebene Versuchsaufbau für alle Zimmerbrände identisch. Die Zimmerbrände werden in dem beschriebenen Brandraum unter den genannten Rahmenbedingungen durchgeführt. Der Brandraum ist mit ca. 320 kg Mobiliar bestückt. Das Mobiliar besteht aus den in **Tabelle 6** gezeigten Gegenständen:

Der Brandversuchsraum besteht aus einer gemauerten Bausubstanz mit für diese Versuchsreihe offen gehaltenem Fenster. Dadurch werden unterventilierte Brandbedingungen aus Sicherheitsgründen vermieden.

Die Möbel sind bei beiden Versuchen gemäß dem Plan in **Abbildung 17** angeordnet. Der grundlegende Aufbau ist sowohl durch die raumbedingte Geometrie, als auch durch die 2017 durchgeführten Realbrandversuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik teilweise vorbestimmt.

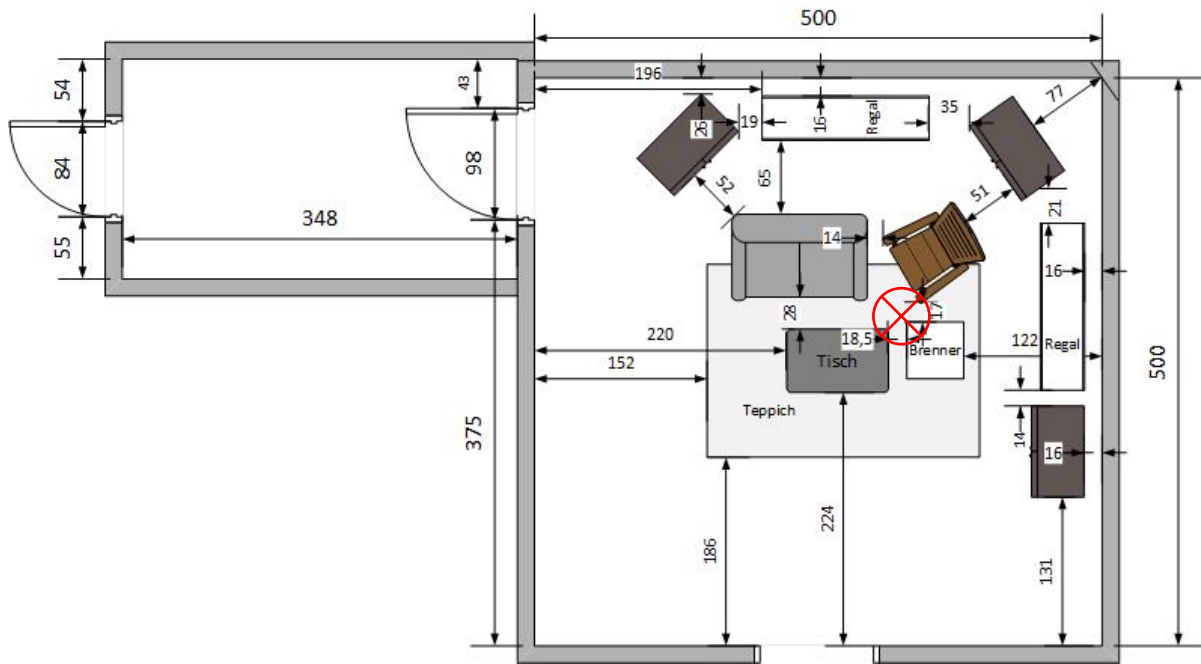


Abbildung 17 Grundriss Brandraum mit Möbeln

Die Raumtemperatur wird an 3 Stellen im Raum mit jeweils 8 Thermoelementen des Typ K über der Höhe aufgelöst. Der Raum selbst ist auf einer Waage gelagert. So kann unter Bestimmung der Abbrandrate und empirisch ermittelten, approximierten Heizwerte die Wärmefreisetzungsrate durch den einfachen, aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik leicht zu erklärenden Zusammenhang $HRR = \dot{m} \cdot H_u$ ermittelt werden.

Zusätzlich kommt eine Abgasmessung von CO , CO_2 und O_2 zum Einsatz. Mit dieser kann der Brandverlauf nach gängigen Kriterien (Sauerstoffverbrauch, CO_2 -Produktion, CO -Produktionskinetiken) in verschiedene Brandphasen eingeteilt werden. Ergänzend soll durch die DEKRA eine HCN-Messung am Fensterauslass durchgeführt werden. Gerade in der Entstehungs- und Schwelbrandphase sind hier erhöhte Werte zu erwarten. Die höhenverstellbare Probenahmesonde für $CO/CO_2/O_2$ ermöglicht, Emissionen in verschiedenen Grenzschichthöhen messen zu können. Die erfassten Werte dienen bei zukünftigen Projekten der Forschungsstelle für Brandschutztechnik als empirische Randbedingungen für numerische Rechnungen.

4.1 Versuchsaufbau

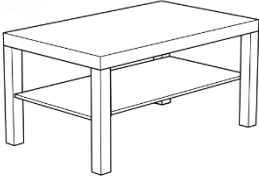








Die Zimmerbrände wurden in dem in **Abbildung 17** beschriebenen Brandraum unter den genannten Rahmenbedingungen durchgeführt. Der Brandraum ist mit ca. 316 kg Mobiliar bestückt. Das Mobiliar besteht aus:

Tabelle 6 Mobiliar Brandraum

Möbel	Gewicht
1 Sofa	17,42 kg
1 Sessel	13,4 kg
1 Teppich	5,8 kg
1 Tisch	8,9 kg
2 Regale	58,5 kg (jeweils)
2 Kommoden	58,9 kg (jeweils)
1 Kommode (klein)	35,2 kg

Ergänzend ist in **Tabelle 7** eine visualisierte Auswahl der in Frage gekommenen Möbelstücke für die daraus hergestellten Probekörper dargestellt.

Tabelle 7 Ausgewählte Möbelstücke und daraus hergestellte Probekörper für Brandversuche

Nummer	Art	Möbelstück	Abbildung der Probe
1	Couchtisch		
2	Regal		
3	Wandregal		
4	Sessel		
5	Holz		

Die Anordnung der Möbel ist **Abbildung 17** zu entnehmen. Die Positionierung der Möbelstücke relativ zur Zündquelle ergibt sich aus den Vorversuchen. Hier wurde der Sessel als zuverlässigste Zündquelle etabliert und aufgrund der geringen Abweichung der Vorversuche (**Tabelle 5**) direkt neben dem Kiesbettbrenner platziert. Es wird erwartet, dass er sich als erstes nach dem Kiesbettbrenner entzündet und zu einer deutlichen Temperaturerhöhung im Brandraum führt. **Abbildung 18** zeigt den möblierten Brandraum vor der Zündung.



Abbildung 18 Möblierter Brandraum vor der Zündung

Zur Bestimmung des Abbrandes liegt der Boden auf einer Waage auf. Die Temperatur wird mit 17 Thermoelementen (**Tabelle 8**) des Typs K (*Ni-Cr-Ni*) gemessen.

Tabelle 8 Auflistung aller Thermoelemente der Großversuche

Nummer Thermoelement	Bezeichnung Thermoelement	Höhe Thermoelement in cm
T1	Tisch	43
T2	Sofa	-
Thermokette Brenner		
T3	Brenner mitte	175
T4	Brenner unten	74
T5	Brenner mitte	110
T6	Brenner oben	258
Thermokette C		
T7	C oben	250
T8	C oben-mitte	198
T9	C mitte	143
T10	C mitte-unten	100
T11	C unten	44
Thermokette A		
T12	A unten	73
T13	A unten-mitte	118
T14	A mitte	143
T15	A mitte-oben	168
T16	A oben	266
T17	A oben-versetzt	262

Die Thermoelemente befinden sich an den drei nachfolgenden Positionen im Raum **Abbildung 19**).

1. **Thermoelement A (TE A)** vor der inneren Tür (266 cm)
2. **Thermoelement Brenner (TE B)** über dem Kiesbettbrenner (258 cm)
3. **Thermoelement C (TE C)** rechts neben dem Fenster (250 cm)

Die Auswahl der Thermoelemente *A* und *C* erfolgt in den Ecken, um mögliche Temperatureinflüsse durch Luftströmungen, welche vor dem Fenster oder in der Mitte des Raumes herrschen könnten, zu minimieren. Thermoelement *B* befindet sich direkt über dem Kiesbettbrenner. So kann der Temperaturverlauf des Initialbrandes aufgelöst werden. Für die Temperaturmessung des Kiesbettbrenners wird das Thermoelement direkt über diesem ausgewertet. Alle Thermoelemente befinden sich in Deckennähe, um möglichst lange Temperaturen ohne direkten Kontakt zwischen Flamme und Thermoelement messen zu können.

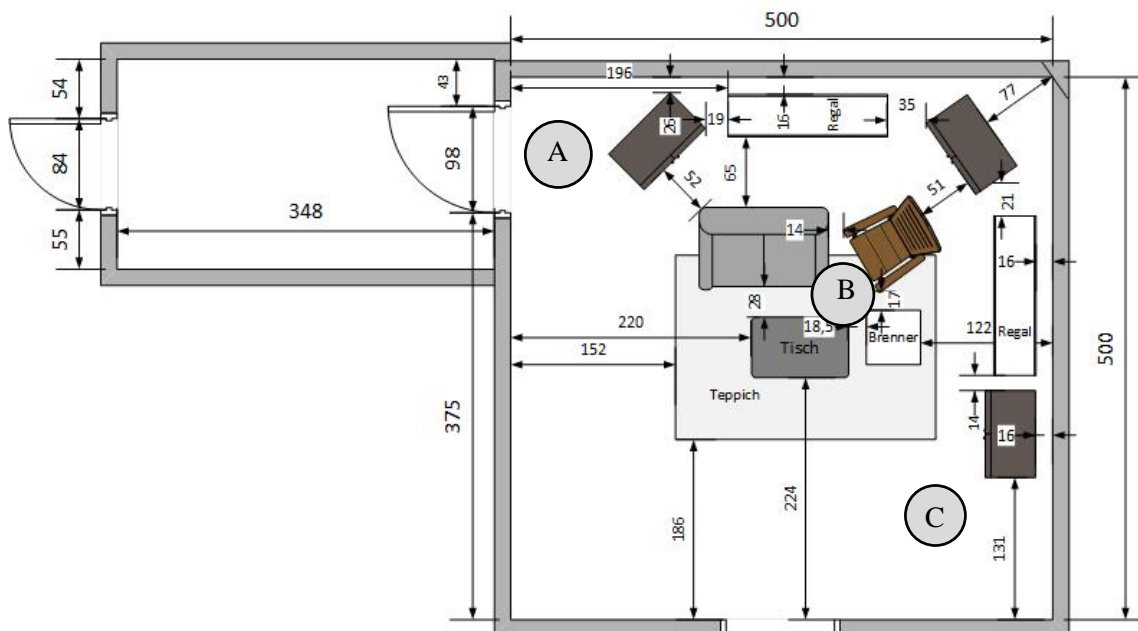


Abbildung 19 Positionen der Thermoelemente Großversuch 1 und 2

Die Position des als Initialbrand verwendeten Kiesbettbrenners ist in obiger **Abbildung 19** dargestellt. Mittig neben Sessel und Couchtisch in zuvor bestimmtem Abstand soll dieser Aufbau für reproduzierbare Ergebnisse sorgen. In der Mitte des Raumes befindet sich in einer Höhe von ca. 250 cm ein Kupferrohr. Über dieses Kupferrohr wird gemäß **Abbildung 20** Rauchgas für die Messung von O₂, CO₂ und CO angesaugt.

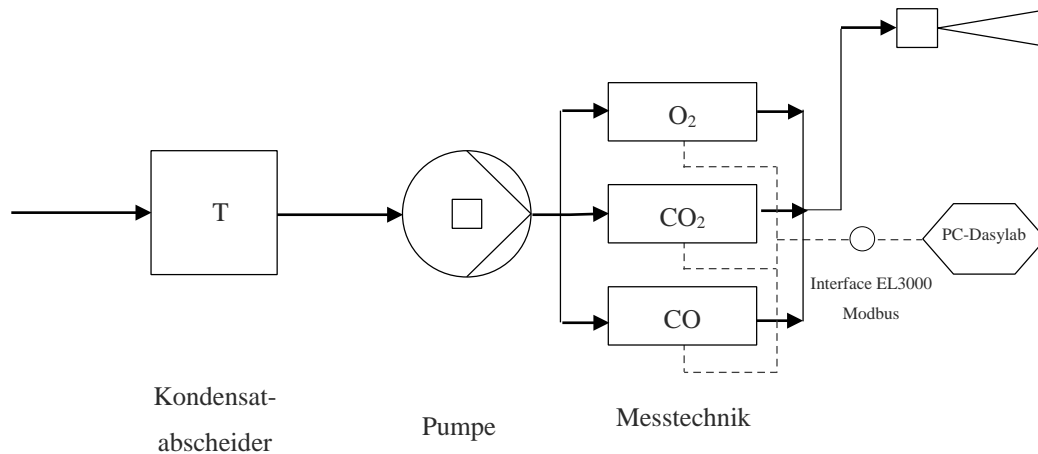


Abbildung 20 Fließschema Messtechnik zur Rauchgasmessung

Die nachfolgende **Tabelle 9** zeigt die dabei verwendeten Komponenten.

Tabelle 9 Auflistung der Technik für die Gasanalytik

Kondensatabscheider	ABB SCC-C
Pumpe	ABB SCC-F
Messtechnik	ABB EL 3000 Messsystem ABB Uras 26 ABB Magnos 206
Interface	ABB EL3000 Modbus

Ultra-Rot-Absorptions-Schreiber (URAS)

Die Gasmessung erfolgt mittels Nicht-Dispersiv-Infrarot/NDIR-Sensor. NDIR-Sensoren arbeiten im mittleren infraroten Spektralbereich zwischen etwa $2,5\mu\text{m}$ und $16\mu\text{m}$ (Tränkler und Reindl 2014, S. 1080). In diesem Bereich liegen die Rotations-Schwingungsbanden heteroatomiger Gase wie beispielsweise Kohlenstoffmonoxid. Heteroatomige Gase weisen ein individuelles Absorptionsspektrum auf. Mit Hilfe dieses charakteristischen Absorptionsspektrums lässt sich die Konzentration bekannter Gase bestimmen. Die Messung von Homoatomen wie O_2 oder H_2 ist nicht möglich. **Abbildung 21** zeigt das Funktionsschema eines Ultra-Rot-Absorptions-Schreibers (URAS). Der URAS beschreibt eine Bauart eines NDIR (Tränkler und Reindl 2014, S. 1080–1082).

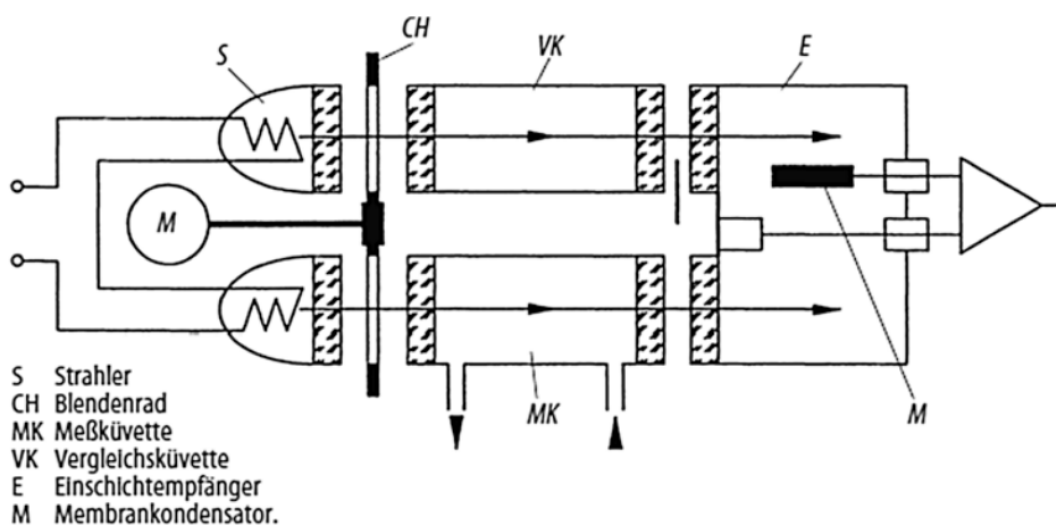


Abbildung 21 Funktionsschema URAS (Tränkler und Reindl 2014, S. 1081)

Infrarotstrahlung wird durch ein Blendenrad in zwei Strahlengänge moduliert. Anschließend durchtritt die Infrarotstrahlung eine mit Messgas und parallel eine mit Referenzgas (meist Stickstoff) gefüllte Küvette. Das Messgas absorbiert dabei im Gegensatz zum Referenzgas einen Teil der Infrarotstrahlung. Nach dem Durchlaufen der Küvetten treten beide Infrarotstrahlen in zwei pneumatisch voneinander getrennte Empfängerkammern ein. Die eintretende Strahlung wird in den Empfängerkammern absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Mit der Erwärmung geht eine Druckänderung einher, diese wird durch den Membrankondensator detektiert. Da das Gas in der Vergleichsküvette und den Empfängerkammern konstant ist, ist die absorbierte Energie lediglich von der Konzentration des Messgases abhängig (Tränkler und Reindl 2014, S. 1081–1082).

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird das Infrarot-Analysemodul Uras 26 der Firma ABB mit der Messkomponente Kohlenstoffdioxid CO_2 und der Messkomponente Kohlenstoffmonoxid CO verwendet. Das Uras 26 ist in das Messsystem EL 3000 der Firma ABB eingebunden.

Magnetomechanischer Sauerstoff-Analysator

Magnetomechanische Sauerstoff-Analysatoren nutzen für die Erfassung von Sauerstoff die magnetische Suszeptibilitätsmessung. Magnetische Suszeptibilität beschreibt die Magnetisierbarkeit von Substanzen in externen Magnetfeldern.

Das Sauerstoffmolekül besitzt im Gegensatz zu den meisten anderen Gasen eine positive Suszeptibilität. Es tendiert also dazu, in ein Magnetfeld gezogen zu werden (Tränkler und Reindl 2014, S. 1113).

Für die Messung der Suszeptibilität wird ein hantelförmiger Probekörper mit einer negativen Suszeptibilität zwischen den Polen eines Permanentmagneten aufgehängt. Der Probekörper tendiert dazu, aus dem inhomogenen Magnetfeld zu wandern. Die Auslenkung des Probekörpers ist abhängig von der Sauerstoffkonzentration zwischen den Polschuhen. Sie wird durch ein optisches Abtastsystem erfasst und mit einem der Auslenkung entgegengesetzten Drehmoment kompensiert.

Der für die Kompensation benötigte Strom ist dabei direkt proportional zur Sauerstoffkonzentration (Tränkler und Reindl 2014, S. 113–114).

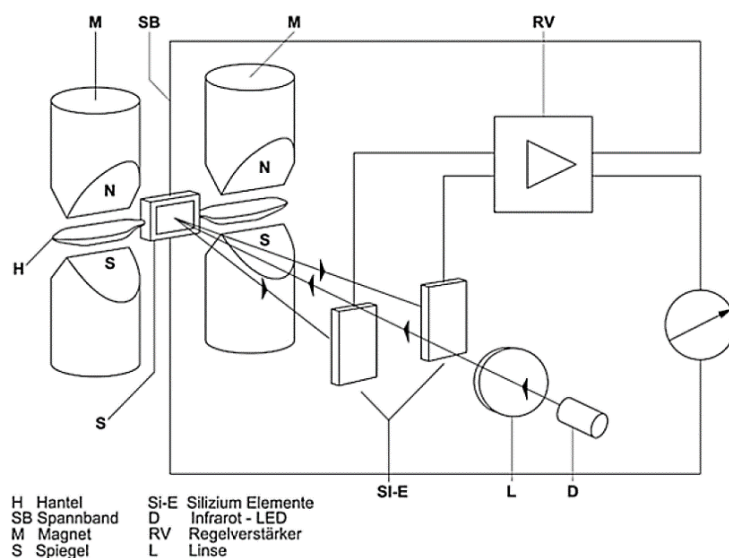


Abbildung 22 Funktionsschema magnetomechanischer Sauerstoffanalysator (Tränkler und Reindl 2014, S. 113–114).

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Sauerstoff/ O_2 -Messungen wird der Sauerstoff-Analysator Magnos 206 der Firma ABB verwendet. Der Analysator ist in das Messsystem EL 3000 der Firma ABB eingebunden.

4.1.1 Höhenverstellbare Probenahmesonde

Um Konzentrationen verschiedener Gase in verschiedenen Höhen messen zu können, wurde für die Versuche eine höhenverstellbare Probenahmesonde konstruiert. Über eine Steuerungseinheit können stufenlos verschiedene Höhen angefahren werden. Die aktuelle Position der Probenahmesonde wird im Messprogramm angezeigt. Für die Positionsbestimmung wird ein Drehpotentiometer genutzt. Die ausgegebene Spannung wird durch das Messprogramm in die Höhe umgerechnet. Der genaue Aufbau der Schaltung ist dem Schaltplan (**Abbildung 23**) zu entnehmen.

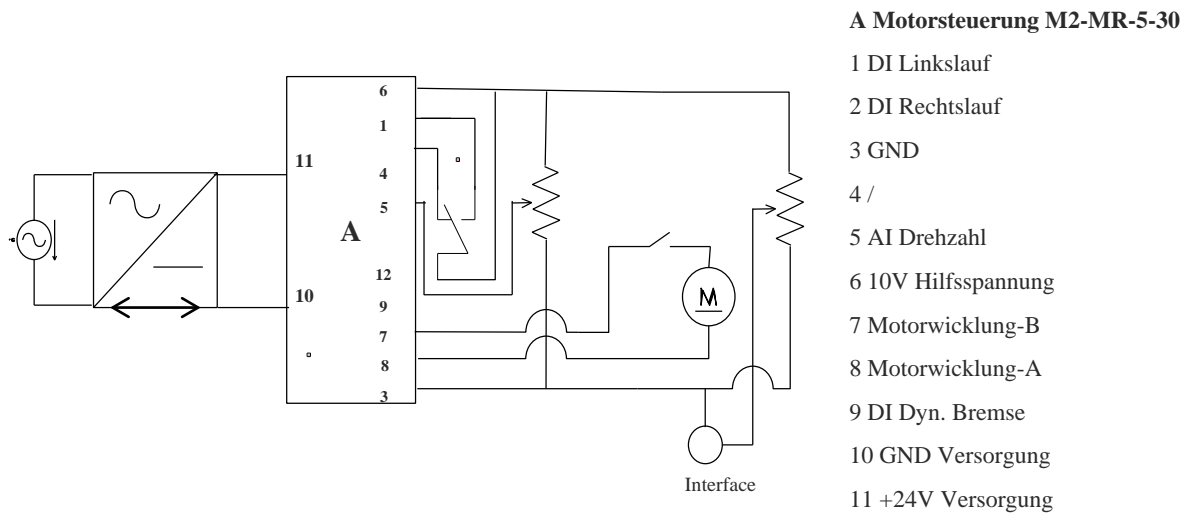


Abbildung 23 Schaltplan höhenverstellbare Probenahmesonde

Die höhenverstellbare Probenahmesonde (**Abbildung 24**) besteht aus einem festen Gestell und einem beweglichen Schlitten, an dem der Gas Ansaugschlauch befestigt ist. Der Schlitten ist durch eine Kette mit einem Elektromotor verbunden.

Durch den Vorwärts- und Rückwärtslauf des Motors kann die Höhe justiert werden. Der genaue Aufbau des Gestells ist auf **Abbildung 24** dargestellt. Der anfahrbare Messbereich beträgt 2 m.



Abbildung 24 Höhenverstellbare Probenahmesonde auf dem Dach des Versuchsraumes

4.1.2 Messung Cyanwasserstoff HCN

Bei Großversuch 1 wird für die Messung von HCN am Fenster ebenfalls Rauchgas mit Hilfe eines Gasprobennehmers angesaugt. Zur Konzentrationsbestimmung wird das Rauchgas über eine beheizte Entnahmesonde durch zwei hintereinandergeschaltete Gaswaschflaschen geleitet. Die Cyanid-Verbindungen werden in Gegenwart von Kupfer(I)-Ionen mit Salzsäure bei Siedetemperatur zersetzt. Der ausgetriebene Cyanwasserstoff wird in Natriumhydroxid-Lösung absorbiert (Anhang Protokoll DEKRA). Die Brenndauer des Kiesbettbrenners beträgt 13 min. Die Entzündung des Brenners erfolgt manuell mit einem Gasbrenner. In den Brandverlauf wird bis zum vollständigen Abbrand nicht eingegriffen, ein Ablöschen findet **nicht** statt.

5 Versuchsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Versuchsergebnisse der Großversuche vorgestellt und beschrieben.

5.1 Ergebnisse Großversuch 1

Für Versuch 1 zeigt **Abbildung 25** die Temperaturverläufe der Thermoelemente „TE B“ in Rot, „TE C“ in Blau und „TE A“ in Gelb. Außerdem ist das Gewicht des Brandgutes in Schwarz dargestellt. Das Diagramm zeigt den Ausschnitt von der Zündung (0 min) bis zu Minute 50. In dieser Zeit wurde eine Maximaltemperatur von 1063 °C (TE A) gemessen. Durch den Abbrand fand in dieser Zeit eine Massenabnahme um 258,2 kg statt. **Abbildung 27** zeigt den Brandraum nach dem Versuch.

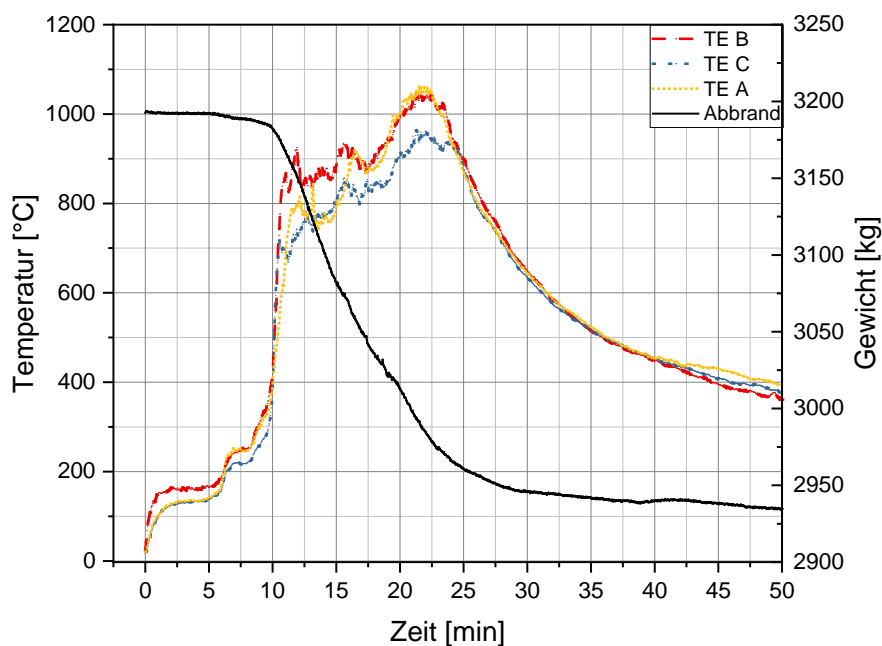


Abbildung 25 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 1

Die **Abbildung 26** zeigt den Verlauf der Konzentrationen von CO in Rot, CO₂ in Schwarz und O₂ in Blau jeweils in Vol.-% sowie den Temperaturverlauf des TE B in °C unter der Decke. Für CO wurde ein Maximalwert von 6 Vol.-% gemessen. Der Maximalwert von CO₂ betrug 21 Vol.-%. Die Sauerstoffkonzentration sank auf einen Minimalwert von 0,2 Vol.-%.

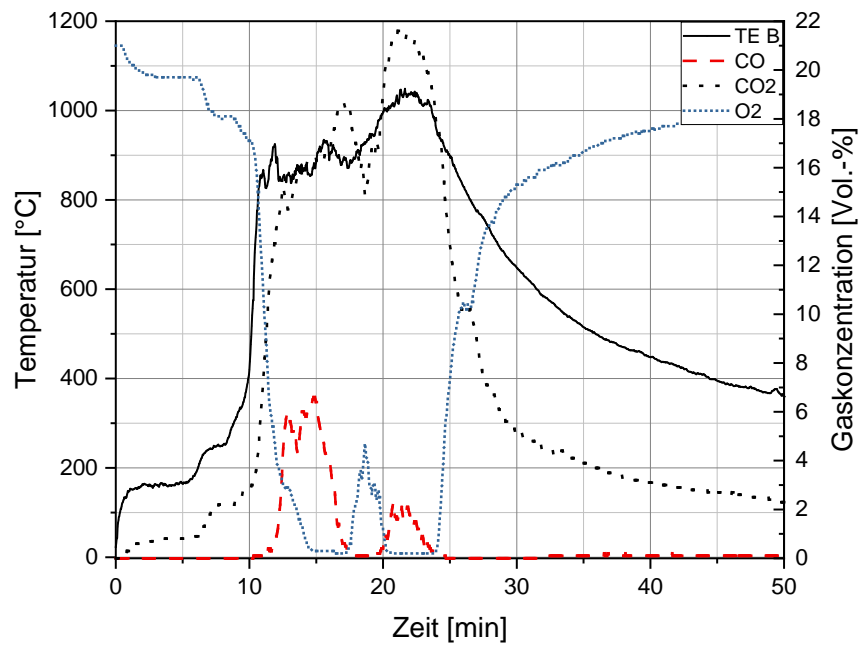


Abbildung 26 Gaskonzentrationen und Temperatur Großversuch 1

Über den Zeitraum 5. Versuchsminute bis 36. Versuchsminuten nach der Zündung wurde eine Massenkonzentration von $38,9 \text{ mg/m}^3$ HCN gemessen.



Abbildung 27 Brandraum nach dem Brandversuch

5.2 Ergebnisse Großversuch 2

Für Versuch 2 zeigt **Abbildung 28** die Temperaturverläufe der Thermoelemente „TE B“ in Rot, „TE C“ in Blau und „TE A“ in Gelb. Außerdem ist das Gewicht des Brandgutes in Schwarz dargestellt. Das Diagramm zeigt den Ausschnitt von der Zündung (0 min) bis zu Minute 50. In dieser Zeit wurde eine Maximaltemperatur von 1095 °C (Brenner oben) gemessen. Durch den Abbrand fand in dieser Zeit eine Massenabnahme um 237,8 kg statt.

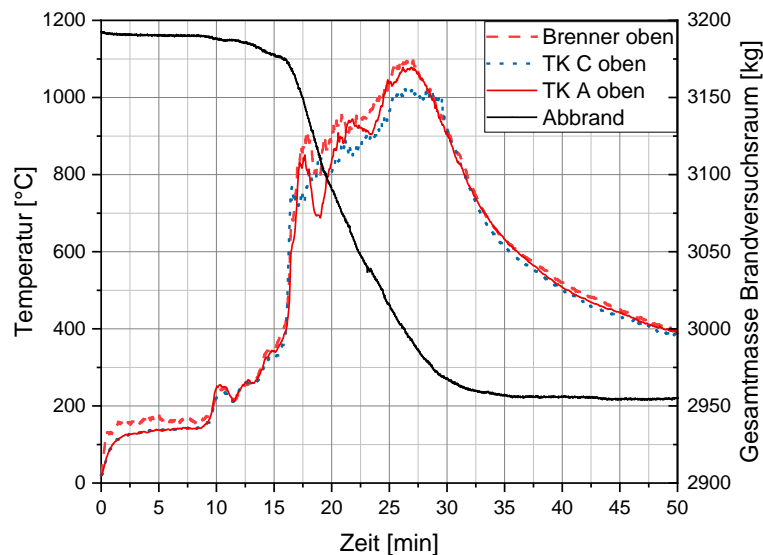


Abbildung 28 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 2

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Konzentrationen von CO in Rot, CO₂ in Schwarz und O₂ in Blau jeweils in Vol.-% sowie den Temperaturverlauf des TE B in °C unter der Decke. Die Gaskonzentrationen wurden in verschiedenen Höhen gemessen. Die Position der Probenahmesonde ist in dem Diagramm in Grau als Profil der gefahrenen Höhenkurve dargestellt. Für CO wurde ein Maximalwert von 9,1 Vol.-% gemessen. Der Maximalwert von CO₂ betrug 17,5 Vol.-%. Die Sauerstoffkonzentration sank auf einen Minimalwert von 0,6 Vol.-%.

Damit wurden als Funktion des Brandverlaufes und der Höhe die Hauptrauchgasprodukte ermittelt. Dies kann zukünftigen numerischen Simulationen als Randbedingung dienen und Indizien über Verhaltensweisen im Brandfall liefern.

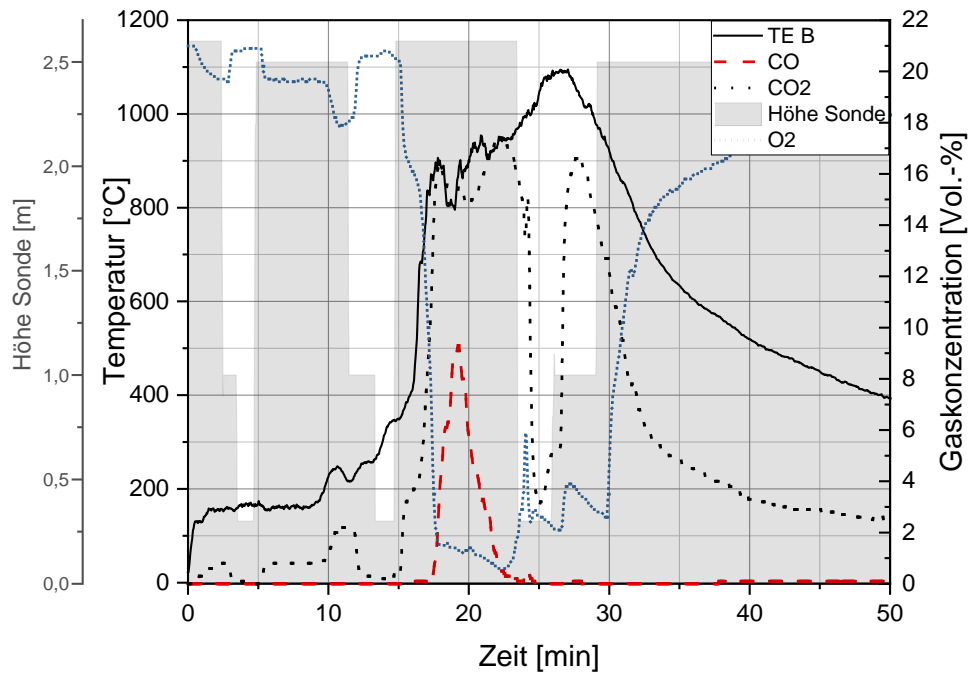


Abbildung 29 Gaskonzentrationen in Abhängigkeit zur Höhe Versuch 2

5.3 Ergebnisse Großversuch 3

Für Versuch 3 zeigt **Abbildung 30** die Temperaturverläufe der Thermoelemente „TE B“ in Rot, „TE C“ in Blau und „TE A“ in Gelb. Das Gewicht des Brandgutes ist in Schwarz dargestellt. Das Diagramm zeigt beim dritten Versuch aufgrund der im Vergleich zu den anderen Versuchen wesentlich längeren Zeitspanne zwischen Entzünden des Kiesbettbrenners und der Vollbrandphase den Ausschnitt von der Zündung (0 min) bis zu Minute 100. In dieser Zeit wurde eine Maximaltemperatur von 1058 °C (TE A) gemessen. Durch den Abbrand fand in dieser Zeit eine Massenabnahme um 261,0 kg statt. **Abbildung 32** zeigt den eindrucksvollen Blick durch das Fenster des Brandraumes während des Versuchs. Hier gut zu sehen die im Vollbrand stehende Kommode.

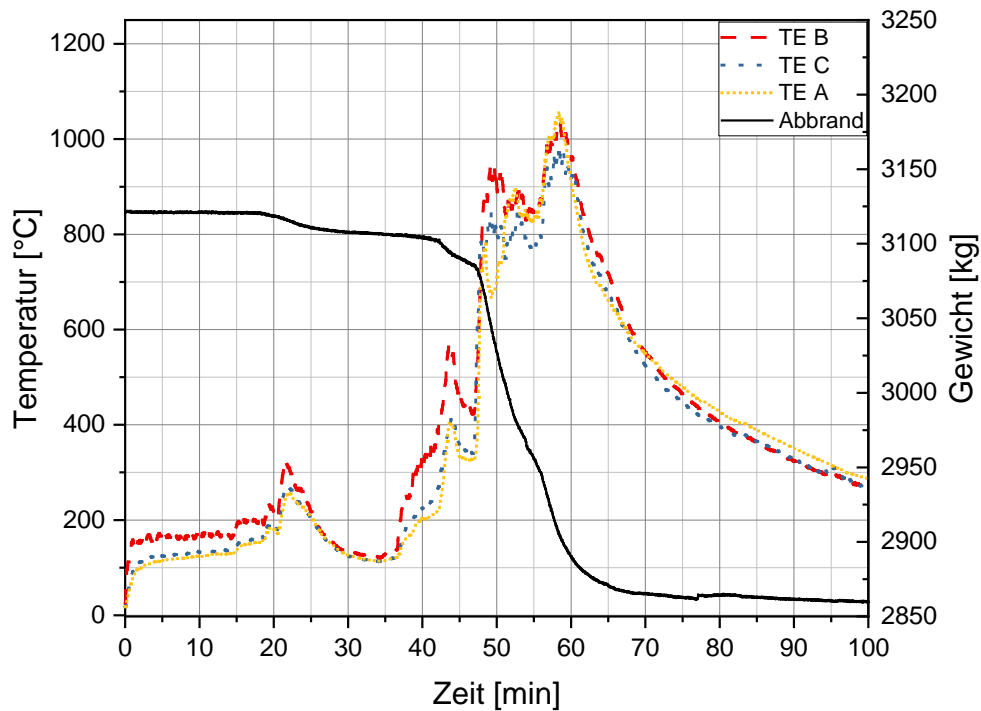


Abbildung 30 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 3

Die **Abbildung 31** zeigt den Verlauf der Konzentrationen von CO in Rot, CO₂ in Schwarz und O₂ in Blau jeweils in Vol.-% sowie den Temperaturverlauf des TE B in °C unter der Decke. Für CO wurde ein Maximalwert von 7,0 Vol.-% gemessen. Der Maximalwert von CO₂ betrug 21,7 Vol.-%. Die Sauerstoffkonzentration sank auf einen Minimalwert von 0,0 Vol.-%.

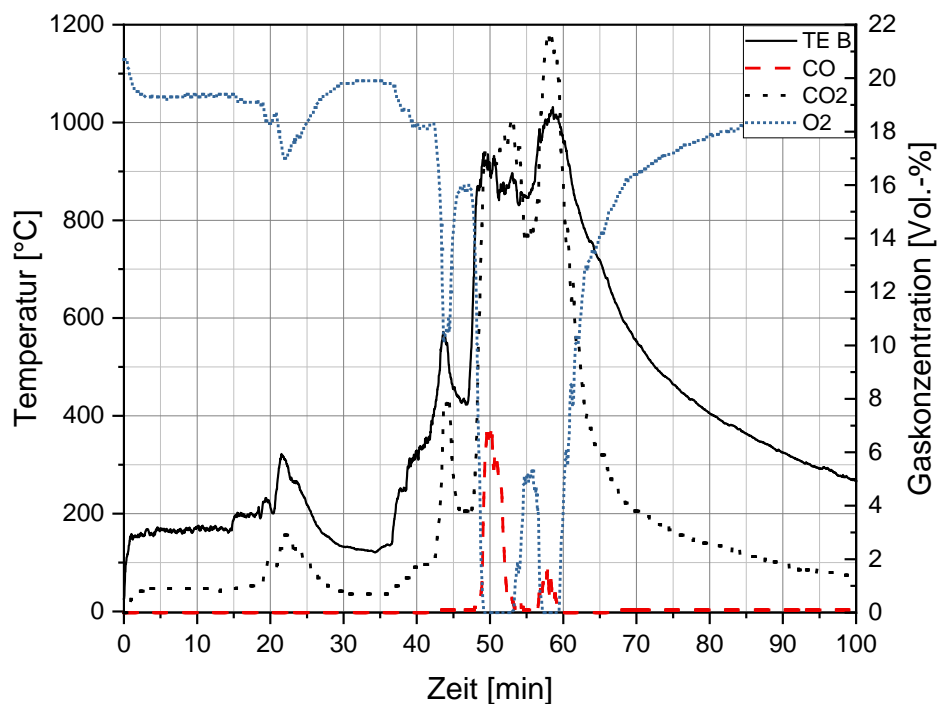


Abbildung 31 Gaskonzentrationen Großversuch 3



Abbildung 32 Blick durch das Fenster des Versuchsraumes bei Großversuch 3

6 Auswertung der Großversuche

Im Folgenden zunächst die Auswertung der Großversuche.

6.1 Auswertung Großversuch 1

Betrachten wir zunächst den ersten Großversuch in Form der in Kapitel 3 beschriebenen Versuche.

6.1.1 Wärmefreisetzung

Über die Massenabnahme und die Heizwerte einzelner Materialien wird die Wärmefreisetzung von der Zündung bis zur Minute 50 abgeschätzt.

Für die Abschätzung werden kalorimetrisch bestimmte Brennwerte aus einer vorangegangenen Untersuchung in approximierete Heizwerte umgerechnet. Dafür werden auf Basis der Daten aus **Tabelle 11** jeweils 10 % vom Brennwert abgezogen.

Für die Berechnung werden die Möbel in die Gruppen *Polyurethane*, *Textile Möbelstücke* und *Span* eingeteilt. Die Zuordnung zu den Gruppen und die Masse der Möbelstücke zeigt die nachfolgende **Tabelle 10**.

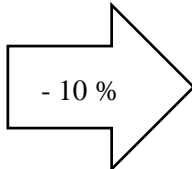
Tabelle 10 Zuordnung Mobiliar zu Gruppen

Möbelstück	Gewicht
Polyurethane	
Sofa	8,7 kg (17,42 kg / 2)*
Sessel	13,4 kg
Textile Möbelstücke	
Teppich	5,8 kg
Span	
Tisch	8,9 kg
2 x Regal	117,4 kg (je 58,7 kg)
2 x Kommode	117,8 kg (je 58,9 kg)
Kommode klein	35,2 kg

* Für das Sofa wird aufgrund des hohen Metallanteils angenommen, dass nur 50 % der Gesamtmasse aus Polyurethanen bestehen

Tabelle 11 zeigt die Brennwerte der einzelnen Gruppen und die daraus berechneten Heizwerte.

Tabelle 11 Umrechnung Brennwerte zu Heizwerte der Gruppen

Gruppe	Brennwert		Heizwert	
Polyurethane	27,5 MJ/kg			24,75 MJ/kg
Textile Möbelstücke	32,05 MJ/kg			28,85 MJ/kg
Span	18,05 MJ/kg			16,24 MJ/kg

Die einzelnen Heizwerte werden auf Basis ihres Anteils an der Gesamtmasse wie folgt zu einem mittleren gewichtsspezifischen Heizwert zusammengefasst:

$$\frac{(24,75 \frac{MJ}{kg} \times 22,1 kg + 28,85 \frac{MJ}{kg} \times 5,8 kg + 16,24 \frac{MJ}{kg} \times 279,3 kg)}{307,2 kg} \approx 17 \frac{MJ}{kg}$$

Mit einem mittleren Heizwert von 17 MJ/kg und der Massenabnahme wird die Wärmefreisetzung [Q] = MJ wie folgt abgeschätzt:

$$Q = H_U \times m$$

$$Q_{Großversuch\ 1} = 17 \frac{MJ}{kg} \times 258 kg$$

$$Q_{Großversuch\ 1} \approx 4410 MJ$$

6.1.2 Phänomene des beobachteten Brandverlaufes

Die nachfolgende **Tabelle 12** zeigt Phänomene des Brandverlaufs. Die Phänomene werden hierbei zeitlich eingeordnet und die Beurteilungsgrundlage genannt.

Tabelle 12 Phänomene Großversuch 1

Phänomen	Zeitpunkt	Beurteilungsgrundlage
Zündung des Sessels	ca. 5:30 min	Videoaufnahme
Vollbrand des Sessels	ca. 6:00 min	Videoaufnahme
Flashover	ca. 10:00 min	Erste Temperaturkurve überschreitet 500 °C
Ausschalten Brenner	ca. 13:00 min	aktives Eingreifen
Vollbrand	ca. 15:00 min	Erste Temperaturkurve überschreitet 800 °C
Abklingphase	ca. 35:30 min	Erste Temperaturkurve unterschreitet 500 °C

6.2 Auswertung Großversuch 2

Im Folgenden die Auswertung des zweiten Großversuchs nach Vorbild von Kapitel 6.1.

6.2.1 Wärmefreisetzung

Über die Massenabnahme und die Heizwerte einzelner Materialien wird die Wärmefreisetzung von der Zündung bis zur Minute 50 abgeschätzt. Für die Berechnung der Wärmefreisetzung wurde die Massenabnahme genutzt. Die Wärmefreisetzung berechnet sich demnach wie folgt:

$$Q = H_U \times m$$

$$Q_{\text{Großversuch 2}} = 17 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \times 238 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{Großversuch 2}} \approx 4060 \text{ MJ}$$

6.2.2 Phänomene des beobachteten Brandverlaufes

Die nachfolgende **Tabelle 13** zeigt Phänomene des Brandverlaufs. Die Phänomene werden zeitlich eingeordnet und die Beurteilungsgrundlage wird genannt.

Tabelle 13 Phänomene Großversuch 2

Phänomen	Zeitpunkt	Beurteilungsgrundlage
Zündung des Sessels	ca. 8:00 min	Videoaufnahme
Ausschalten Brenner	ca. 9:16 min	Videoaufnahme
Vollbrand des Sessels	ca. 9:22 min	Videoaufnahme
Flashover	ca. 16:00 min	Erste Temperaturkurve überschreitet 500 °C
Vollbrand	ca. 17:00 min	Erste Temperaturkurve überschreitet 800 °C
Abklingphase	ca. 40:00 min	Erste Temperaturkurve unterschreitet 500 °C

6.3 Auswertung Großversuch 3

Der dritte Brandversuch wurde unter den gleichen kontrollierbaren Rahmenbedingungen wie die anderen Brandversuche durchgeführt. Die Brenndauer des Kiesbettbrenners betrug somit 13 min. Im Gegensatz zu Brandversuch 1 befand sich der Raum zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht im Vollbrand, sondern in der frühen Brandentstehungsphase. Folgende möglichen Erklärungen für Unterschiede zwischen den ersten beiden Versuchen und dem dritten Versuch bestehen:

Ventilation

Vor dem dritten Brandversuch wurde aufgrund mechanischer Mängel und Gefahr beim Arbeiten der Boden des Brandraumes mit neuen Brandschutzplatten erneuert. Dabei wurden eingerissene Brandschutzplatten durch intakte getauscht. Bei den beiden vorangegangenen Brandversuchen waren die Bodenplatten von kleineren Rissen durchzogen. Bei den ersten beiden Brandversuchen wäre dadurch eine bessere Ventilation des Brandraumes denkbar.

Gegen diese Theorie sprechen allerdings die Sauerstoffkonzentrationsverläufe des ersten und des zweiten Brandversuchs. Ein grundsätzlich großer Unterschied im hinreichend großen Ausmaß im Vollbrandbereich ist nicht festzustellen.

Mobiliar

Für alle Versuche wurde dasselbe Mobiliar verwendet (Modell und Hersteller). Inwieweit der Hersteller die verwendeten Materialien, Produktionsverfahren oder Lagerbedingungen zwischen den einzelnen Versuchen jedoch verändert hat, konnte nicht nachvollzogen werden.

Wetter

Die Versuche wurden an unterschiedlichen Tagen und z.T. auch zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt und somit bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen durchgeführt. Die Außentemperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit an den Versuchstagen sind in **Tabelle 14** dargestellt. Eine Korrelation zwischen der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Dauer der Brandentstehungsphase ist nicht zu erkennen. Es bleibt diesbezüglich aber zu erwähnen, dass alle Versuche in der beheizten Brandversuchshalle durchgeführt wurden.

Tabelle 14 Temperaturen und relative Luftfeuchtigkeit an den Versuchstagen (Kachelmannwetter.de)

Datum	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchtigkeit [%]
21. Mai 2019 (Versuch 1)	13	99
24. Mai 2019 (Versuch 2)	22	51
25. November 2019 (Versuch 3)	7	91

Die Abweichung lässt sich damit zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschließend erklären. Da der Vollbrand bei diesem Brandversuch für weitere angegliederte Untersuchungen nötig war, wurde der Kiesbettbrenner erneut eingeschaltet. Im Folgenden die Auswertung des dritten Großversuchs im Detail.

6.3.1 Wärmefreisetzung

Über die Massenabnahme und die Heizwerte einzelner Materialien wird die Wärmefreisetzung von der Zündung bis zur Minute 100 abgeschätzt. Die Wärmefreisetzung berechnet sich demnach wie folgt:

$$Q = H_U \times m$$

$$Q_{\text{Großversuch 2}} = 17 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \times 261 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{Großversuch 2}} = 4437 \text{ MJ}$$

6.3.2 Phänomene des beobachteten Brandverlaufes

Die nachfolgende **Tabelle 15** zeigt Phänomene des beobachteten Brandverlaufes. Diese werden chronologisch eingeordnet und beurteilt.

Tabelle 15 Phänomene Großversuch 3

Phänomen	Zeitpunkt	Beurteilungsgrundlage
Ausschalten Brenner	13:00 min	Protokoll
Flashover	ca.43 min	Erste Temperaturkurve überschreitet 500 °C
Vollbrand	ca. 48 min	Erste Temperaturkurve überschreitet 800 °C
Abklingphase	ca. 71 min	Erste Temperaturkurve unterschreitet 500 °C

6.4 Vergleich Großversuche

Nachfolgend werden die Brandverläufe der Großversuche miteinander verglichen. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Brandentstehungsphasen und Initialbrandsituationen gelegt.

6.4.1 Kiesbettbrenner

Der Kiesbettbrenner wurde bei allen Versuchen als Initialbrand verwendet. **Abbildung 33** zeigt die Temperaturverläufe des Thermoelements (TE B), welches bei allen Versuchen auf einer Höhe von 258 cm direkt über dem Kiesbettbrenner in der Mitte des Raumes platziert war.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die drei Temperaturverläufe bis ca. 5:30 min nahezu identisch verlaufen. Zeitgleich mit der Zündung des Sessels bei Versuch 1 (5:30 min) steigt die Temperaturkurve des ersten Versuchs (rot) im Gegensatz zu der, des zweiten (blau) deutlich an.

Die Temperaturkurven der Versuche 2 und 3 verlaufen bis ca. 9 Minuten weiterhin nahezu identisch. Bei Minute 9 steigt die Temperaturkurve des zweiten Versuchs mit der Zündung des Sessels bei Minute 8 deutlich an.

Betrachtet man die Temperaturkurven, wird deutlich, dass der Kiesbettbrenner gleichbleibende Temperaturen aufweist. Abweichungen der Temperaturkurven treten erst bei der Beteiligung weiterer Brandlast auf. Diese verhält sich in jedem Versuch unterschiedlich und das Brandverlaufsbild deutlich inhomogen. Dies ist zunächst bemerkenswert, da Brandlast, Abstände, Initialbrandleistung und Ventilationsbedingungen in allen 3 Versuchen identisch waren. Eine Reproduzierbarkeit der Versuche ist damit offenkundig schwierig zu erzielen, trotz gleichbleibender Randbedingungen.

Ein großer Einfluss einer Vielzahl von Störparametern kann aufgrund des beschriebenen Versuchsaufbaus ausgeschlossen werden. Mögliche und denkbare existierende Störfaktoren wären:

- Feuchtigkeit des Materials durch Luftfeuchtigkeit bei der Lagerung
- Produktionsunterschiede des Herstellers (wenngleich eher unwahrscheinlich, da die Spezifikationen der verwendeten Mobiliargegenstände identisch sind)
- Ventilationsbedingungen durch Erneuerung der Bodenplatten

Alle genannten Punkte sind mit Vorsicht zu betrachten, da diese in der Theorie a) vergleichsweise unwahrscheinlich auftreten und b) die Auswirkung dieser Einflussfaktoren auf den konkreten Versuchsverlauf nicht abschätzbar ist. Eine Diskussion dieser Punkte ist damit nur auf Basis von Eventualitäten möglich.

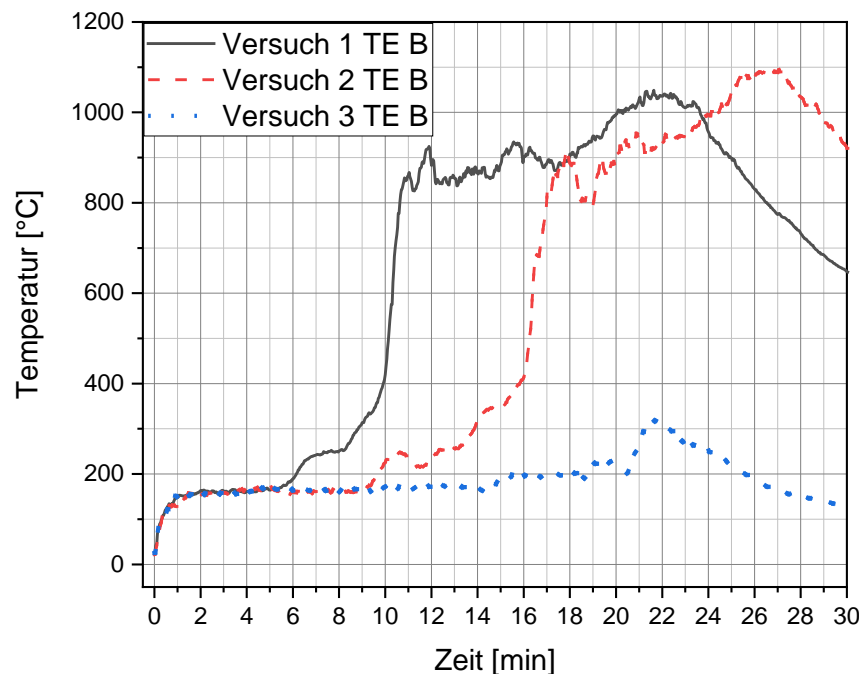


Abbildung 33 Vergleich Temperaturkurven Kiesbettbrenner Versuch 1, 2 und 3 (Eigene Darstellung 2019)

6.4.2 Vergleich der Temperaturverläufe

Abbildung 34 und **Abbildung 35** zeigen die zuvor bereits einzeln vorgestellten Temperaturkurven beider Großversuche zusammengefasst in einem Diagramm.

Die Temperaturkurven beider Versuche weisen zunächst und oberflächlich einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Es sind jedoch deutliche zeitliche Differenzen zwischen den beiden Großversuchen zu erkennen. Die erste Differenz zeigt sich bei der Zündung des Sessels, der bei Versuch 2 ca. 2:30 min später als bei Versuch 1 zündete.

Eine weitere beobachtbare signifikante Zeitdifferenz zeigt sich bei der Brenndauer des Kiesbettbrenners. Dieser wurde aufgrund eines technischen Fehlers beim zweiten Versuch 3:44 min früher als bei Versuch 1 ausgeschaltet.

Die dritte Differenz ist beim Zeitpunkt des Flashovers zu erkennen. Der Flashover erfolgt beim zweiten Versuch ca. 6:00 min später als beim ersten.

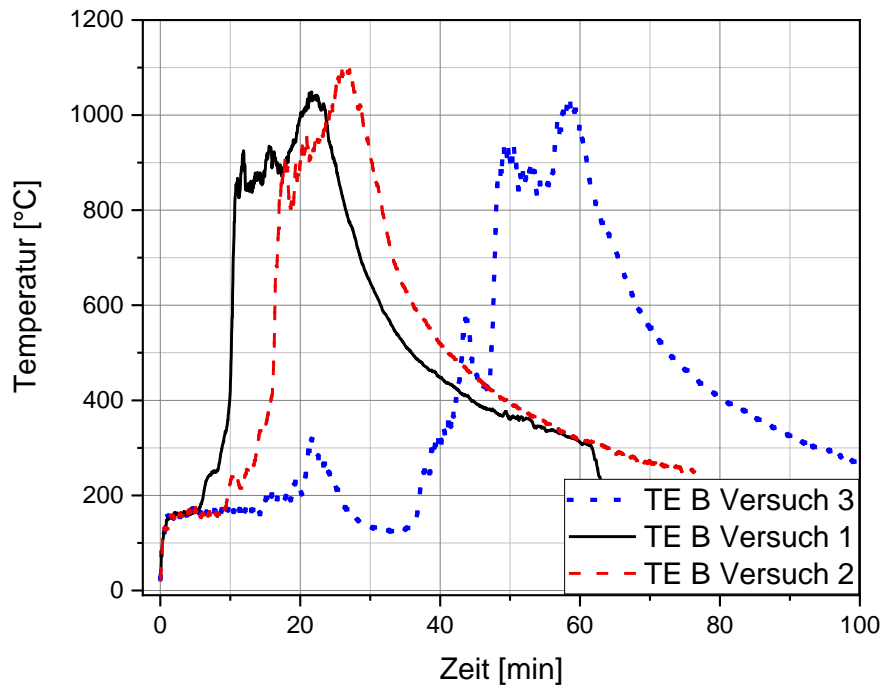


Abbildung 34 Vergleich Temperaturverläufe der drei Großversuche

In **Abbildung 34** zu erkennen: ein Vergleich der Deckentemperaturverläufe der Großversuche. Die zuvor beschriebenen Verhaltensweisen werden hier auf einen Blick dargestellt, daher auch die Bezugsgrößenänderung hin zu 100 min Versuchszeit. Die Verlaufsform im Vollbrandbereich ist erkennbar ähnlich. Der Verlauf unterscheidet sich jedoch hauptsächlich im unteren Versuchsdrittel, bis ca. 300 °C.

Für eine weitere Betrachtung sieht man in **Abbildung 35** einen direkten Vergleich der Versuche 1 und 2. Die Temperaturkurve von Versuch 2 ist dabei nach rechts verschoben. Zudem wird ein leicht höheres Temperaturmaximum erreicht. Das Verhalten ab Flashover sowie die Abklingphase sind gleichwohl weitgehend identisch. Erkennbar, ist auch der Zwischenanstieg bei 6 min (schwarze Kurve) vs. 9,5 min (rote Kurve).

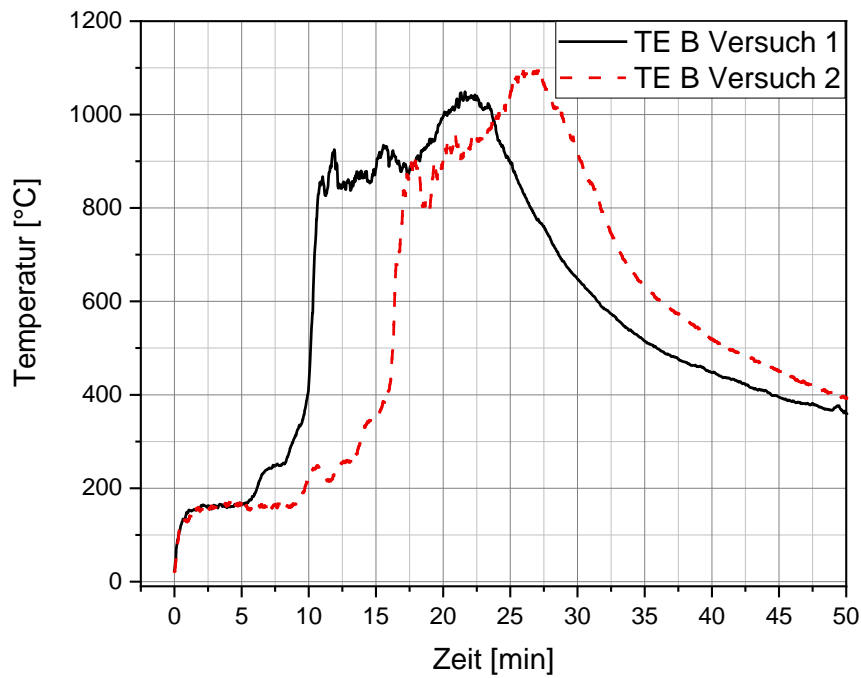


Abbildung 35 Vergleich Großversuche 1 und 2

Die nachfolgende **Abbildung 36** zeigt die Temperaturverläufe aller Brandversuche ab einer Grenztemperatur von ca. 600 °C und damit ab Beginn des Flashovers. Die Daten werden so dargestellt, dass bei allen Brandverläufen die Temperatur 600 °C den Zeitpunkt 0 min darstellt.

Diese Darstellung lässt den Vergleich der Vollbrandphasen aller Versuche zu. Es ist zu erkennen, dass die Maximaltemperaturen in einem vergleichbaren Temperaturbereich liegen. Die Form und das Profil der Temperaturkurven ist dabei — im Vollbrandbereich — offenkundig vergleichbar. Die Unterschiede im Brandverlauf sind also am größten im Entstehungsbrandbereich.

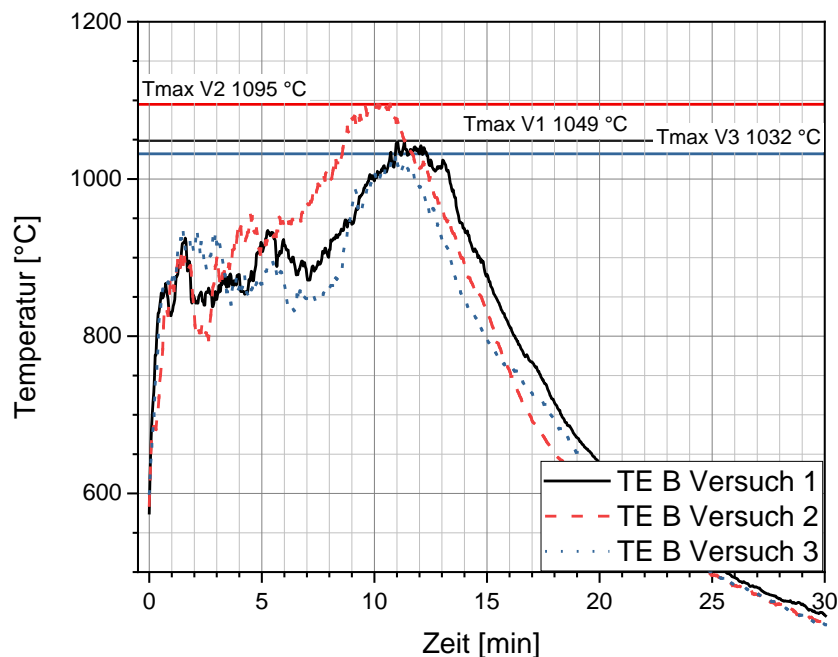


Abbildung 36 Vergleich der Temperaturverläufe ab 600°C

In **Tabelle 16** werden die Zeiten von Phänomenen der ersten beiden Versuche miteinander verglichen. Erkennbares Phänomen: identischer Verlaufsbeginn, jedoch bereits mit Zündung des Sessels deutlich erkennbarer Unterschied.

Tabelle 16 Zeitlicher Vergleich Phänomene Großversuch 1 und 2

Großversuch 1		Großversuch 2		Differenz
Zündung des Sessels	ca. 5:30 min	Zündung des Sessels	ca. 8:00 min	2:30 min (Nr.1)*
Zündung bis Vollbrand des Sessels	ca. 6:00 min	Zündung bis Vollbrand des Sessels	ca. 9:22 min	0:52 min
Flashover	ca. 10:00 min	Flashover	ca. 16:00 min	6:00 min (Nr.3)
Ausschalten Brenner	ca. 13:00 min	Ausschalten Brenner	ca. 9:16 min	3:44 min (Nr.2)

6.4.3 Vergleich Gaskonzentrationen

Die **Abbildung 37** und **Abbildung 39** zeigen die Verläufe der Gaskonzentrationen des ersten und des zweiten Großversuchs. Bei Großversuch 1 wurde der Brandrauch ca. 10 cm unter der Decke angesaugt. Bei Großversuch 2 wurden der Brandrauch mit der verfahrbaren Probenahmesonde auf verschiedenen Höhen angesaugt (in grau dargestellt). Um die Gaskonzentrationen auf den unterschiedlichen Höhen vergleichen zu können, wurden bei Großversuch 2 die Daten zwischen Minute 1 und Minute 7 (6 min) gelöscht. Grundsätzlich muss beim Vergleich der Gaskonzentrationen beachtet werden, dass die Bandverläufe eine hohe Ähnlichkeit aufweisen, jedoch nicht identisch verlaufen. Beim Vergleich der Kurven kann somit kein direkter Zusammenhang zwischen der Höhe auf der gemessen wurde und der Gaskonzentration vorausgesetzt werden. Die Vermischung scheint aufgrund der turbulenten Strömung hinreichend gut zu sein.

Vergleich CO – Konzentration

Abbildung 37 zeigt die CO-Konzentrationen. Während der Brandentstehungsphase konnte bei den beiden durchgeführten Brandversuchen kein CO nachgewiesen werden. Erst zu dem Zeitpunkt, an dem es zum Flashover kommt, ist ein leichter Anstieg von CO zu erkennen. Bei ca. 12 min beginnt die CO-Konzentration stark anzusteigen, bis sie bei Minute 13 ihr Maximum von 9,3 Vol.-% erreicht. Beim Vergleich mit der Sauerstoffkonzentration in **Abbildung 38** wird deutlich, dass zu diesem Zeitpunkt die O₂-Konzentration den Wert von 6 Vol.-% unterschreitet und schnell weiter auf nahezu 0 Vol.-% sinkt. Die beiden Spitzenwerte der CO-Konzentration sind immer dann zu erkennen, wenn die Sauerstoffkonzentration auf ihrem Minimum ist.

Beim zweiten Brandversuch wurde während der zweiten Vollbrandphase die CO-Konzentration nicht unter der Decke, sondern in Bodennähe gemessen. Die Konzentration ist dort im Vergleich zum ersten Versuch unter der Decke deutlich niedriger. Mit dem Steigen der Sauerstoffkonzentration sinkt die CO-Konzentration nach der zweiten Vollbrandphase wieder auf 0 Vol.-%. Bis zu Minute 50 übersteigt sie den Wert von 0,2 Vol.-% nicht mehr.

Für die bessere Einordnung der gemessenen Werte sind in **Tabelle 17** gemäß GESTIS für den Menschen potentiell letale Kombinationen aus CO-Konzentration und Expositionsdauer dargestellt.

Tabelle 17 Potentiell letale Kombinationen aus Expositionsdauer und CO-Konzentration (GESTIS)

Expositionsdauer	Konzentration
2 min	40000 ppm (4 Vol.-%)
5 min	16000 ppm (1,6 Vol.-%)
10 min	8000 ppm (0,8 Vol.-%)

Vergleich Sauerstoffkonzentration

Die Sauerstoffkonzentration ist auf **Abbildung 38** dargestellt. Während der Brandentstehungsphase wurde bei Versuch 1 an der Decke eine niedrigere Sauerstoffkonzentration als bei Versuch 2 in Bodennähe gemessen. Mit dem Steigen der Temperaturkurve beim Flashover sinkt leicht verzögert die Sauerstoffkonzentration bei beiden Versuchen bis nahezu 0 Vol.-% ab. Auf diesem Niveau bleibt die Sauerstoffkonzentration, bis bei ca. 17 min die Sauerstoffkonzentration wieder ansteigt. Kurz nachdem die Sauerstoffkonzentration ansteigt, steigt bei beiden Versuchen die Temperatur auf ihr Maximum in der zweiten Vollbrandphase an. Mit dem Anstieg der Temperatur sinkt die Sauerstoffkonzentration abermals auf ca. 0 Vol.-%. Mit sinkender Temperatur steigt die Sauerstoffkonzentration bis zur Minute 50 wieder auf ca. 19 Vol.-% an. Zur besseren Einordnung gibt die nachfolgende **Tabelle 18** einen Überblick über die physiologische Wirkung Sauerstoffreduzierter Atmosphären.

Tabelle 18 Physiologische Wirkung von Sauerstoffreduzierter Atmosphäre z. B. in (GIT Sicherheit + Management 2004)

O₂-Konzentration	Symptome
21 %	Keine (Normalkonzentration)
15 %	Kein sofortiger Effekt
14 %	Ermüdung, Nachlassen der Urteilskraft
10 %	Schwindel, Gefühl von Atemlosigkeit, beschleunigte Atemfrequenz
7 %	Verwirrungszustand
5 %	Minimum zum Erhalt der Vitalfunktionen
2 % - 3 %	Tod innerhalb 1 Minute

Vergleich CO₂ – Konzentration

Abbildung 39 zeigt die CO₂-Konzentration, es ist zu erkennen, dass der Verlauf der CO₂-Konzentration nahezu zeitgleich dem der Temperaturkurve folgt. Mit steigender Temperatur steigt auch die CO₂-Konzentration. Beim Vergleich der CO₂-Konzentrationen beider Versuche ist an den Zeiträumen, an denen sich die Probenahmesonde beim zweiten Versuch in Bodennähe befindet zu erkennen, dass die CO₂-Konzentration in geringerer Höhe abnimmt. Besonders deutlich ist das während des Vollbrandes.

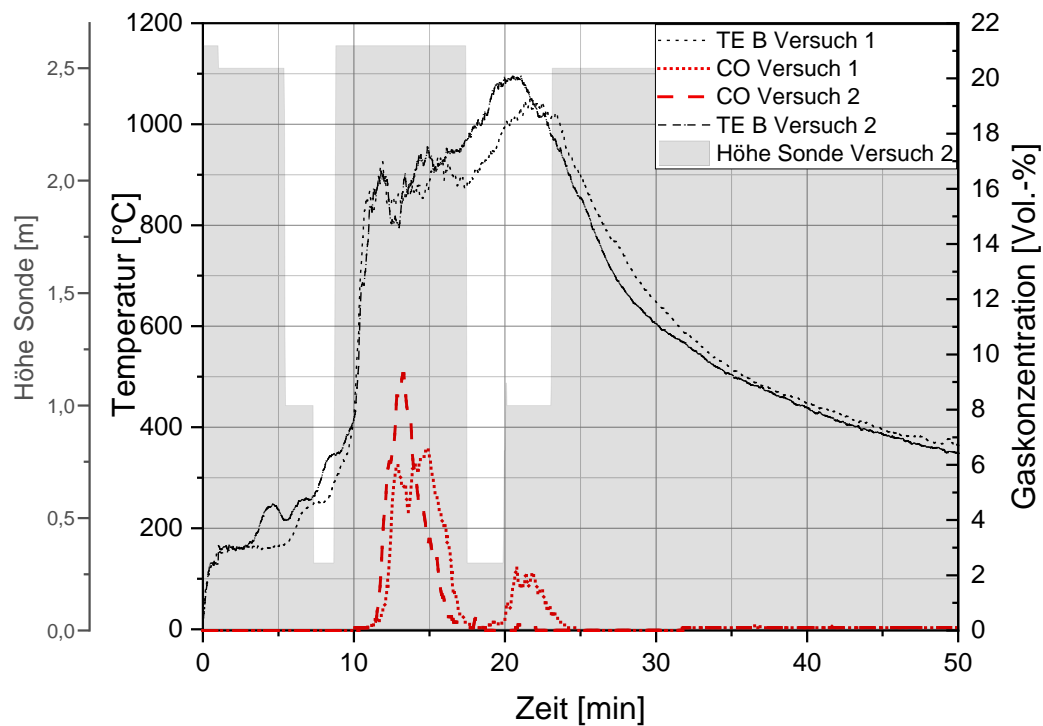


Abbildung 37 V1 und V2 CO Vergleich

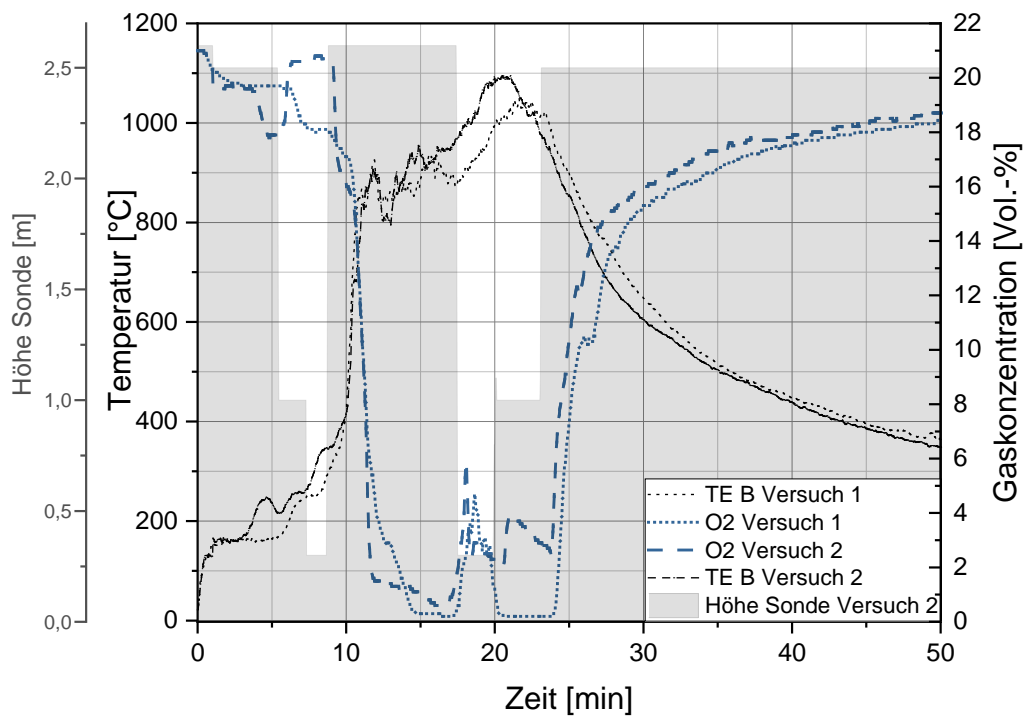


Abbildung 38 V1 und V2 O₂-Vergleich

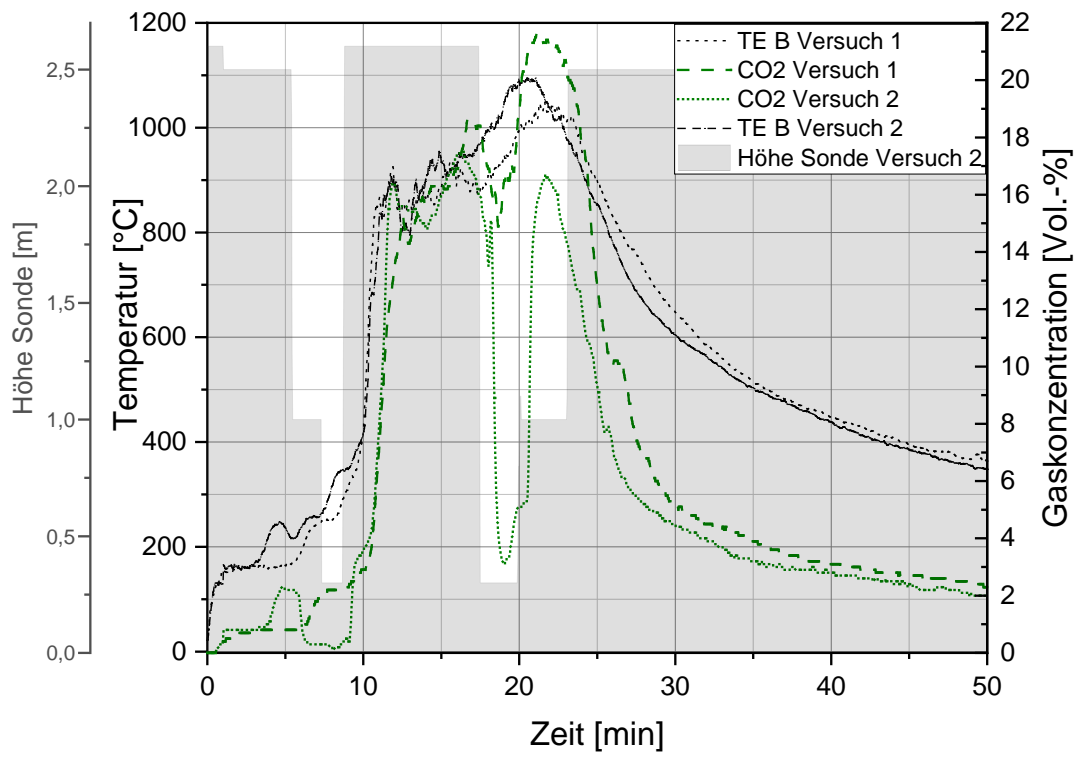


Abbildung 39 V1 und V2 CO2-Vergleich

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Vergleich der Temperaturkurven des Kiesbettbrenners bei Versuch 1 und Versuch 2 zeigt, dass bis zum Einfluss der Mobiliarbrandlast beide Temperaturkurven nahezu identisch verlaufen. Dieses Ergebnis stützt die Theorie der Vorversuche, dass der Kiesbettbrenner einen gleichbleibenden und reproduzierbaren Initialbrand darstellt.

Durch ein Steuerungsproblem unterschied sich die Brenndauer des Kiesbettbrenners bei den Versuchen jedoch um 3:44 min. Beim ersten Versuch erlosch der Kiesbettbrenner, als sich der Raum bereits im Vollbrand befand. Beim zweiten Versuch erlosch er hingegen während der Brandentstehungsphase, bereits kurz vor dem Vollbrand des Sessels.

Ab dem Zeitpunkt, an dem sich neben dem Kiesbettbrenner weitere Brandlast entzündet, zeigen die Temperaturkurven beider Brandverläufe deutliche zeitliche Differenzen. Der Sessel, dessen Zündzeiten bei den Vorversuchen lediglich eine Differenz kleiner als eine Minute aufwies, zündete beim zweiten Großversuch 2:30 min später als beim ersten. Die größte Differenz von 6 min zeigt sich zwischen den beiden Flashover-Phasen. Es wird vermutet, dass sich die vorherigen kleineren Differenzen im Rahmen einer Fehlerfortpflanzung zu dieser Differenz addieren.

Der Versuchsablauf von Versuch 3 hingegen legt — trotz identischer Randbedingungen und detaillierter Vorbereitung — nahe, dass im Entstehungsbrandbereich bereits kleinste Unterschiede, vor allem der Umweltbedingungen, zu großen Änderungen in der Gesamtversuchszeit führen können. Mögliche bereits diskutierte Einflussfaktoren der unterschiedlichen Brandphasen sind in **Tabelle 19** dargestellt.

Tabelle 19 mögliche Einflussfaktoren der unterschiedlichen Brandphasen

Entstehungsbrand	Vollbrand
Material	Ventilationsbedingungen
Standort relativ zu Initialbrand	Materialauswahl
Initialbrandleistung	
Umgebungsbedingungen	
Initialbrandform	
Ventilationsbedingungen	
...	

Eine reproduzierbare Darstellung der Brandentstehungsphase in einem Vergleichsszenario identischer Brandlast und Zündbedingungen erscheint auf Grundlage der vorliegenden Versuchsreihe schwer umsetzbar.

Literaturverzeichnis

Andreas Heilos (2002): Spektrale Analyse der Strahlungswechselwirkung in Kohlenstoffatomen. KIT, Karlsruhe.

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) (2006): Arbeitsplatzgrenzwerte. TRGS 900. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS).

Brandschutzforschung der Länder (2019): Forschungsbericht 203. Unter Mitarbeit von Dennis Augustin. Hg. v. Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Karlsruhe.

Christoph Menzel (2016): Experimentelle Untersuchung des zeitlichen Temperaturverhaltens von Türen, konkret bei Bränden in geschlossenen Räumen. Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2016.

Norm 14011:2018-01: DIN 14011:2018-01, Feuerwehrwesen_ - Begriffe.

DiNunno, Philip J. (2016): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. NFPA National Fire Protection Association. New York: Springer-Verlag New York; Springer.

Drysdale, D. (1998): An Introduction to Fire Dynamics: John Wiley & Sons.

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

Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2013): VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).

GESTIS: CO-Konzentrationen. Unter Mitarbeit von GESTIS. 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 03.02.2020.

GIT Sicherheit + Management (2004): O2 Exposition. In: *GIT Sicherheit+Management*, 04.04.2004 (13 Heft 4), S. 80.

Helmutz Tietze (1978): Strahlungsverhalten von Gas und Ölflammen. Dissertation. Universität Fridericiana, Karlsruhe.

J. Blumenstock, D. Schelb, J. Kunkelmann, D. Max (2016): Maßnahmen zur Optimierung der Einsatztaktik bei Bränden in Räumen ohne direkten Zugang ins Freie. Forschungsbericht Nr. 181. Teil 1. Hg. v. Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik (181).

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.

Lohs, Karlheinz; Elstner, Peter; Stephan, Ursula (2008): Fachlexikon Toxikologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

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.

Oliver Brunn: Modellierung des dreidimensionalen Strahlungsaustausches in Verbrennungsräumen mit der Monte Carlo Methode. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Tränkler, Hans-Rolf; Reindl, Leo (2014): Sensortechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (2014): VfdB Sammelband, S. 18–19.

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

Wiedemann, Johannes (2007): Leichtbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

4. Zusammenstellung der Messergebnisse und Diskussion

4.1 Messergebnisse

Messdatum		21.05.2019
Start Messung	[hh:mm]	13:16
Ende Messung	[hh:mm]	13:57
Messdauer	[hh:mm]	00:41
Luftdruck	[hPa]	999
Sauerstoffgehalt	[Vol.-%]	21,0
Cyanwasserstoff - Massenkonzentrationen und Massenströme		
Temperatur Gasuhr	[°C]	16,0
Teilgas, Betrieb	[l]	65,4
Teilgas, norm	[l]	61,6
Analysen	[mg/Pr.]	2,40
Massenkonzentration	[mg/m ³]	38,9 ^{*)}
Massenstrom	[g/h]	0,0 ^{**)}
Messunsicherheit	[%]	Ca. 10–12

^{*)} Grenzwert TA Luft: 3 mg/m³ bzw. 15 g/h

^{**)} Massenstrom wegen fehlender normkonformer Messstelle bzw. hoher Brandlast nicht messbar

Da der Brandversuch zum Zeitpunkt der Emissionsmessung bestimmungsgemäß durchgeführt wurde, können die Messergebnisse als plausibel eingeschätzt werden.

Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die genannte Anlage. Eine auszugsweise Vervielfältigung des Prüfberichts darf nur nach schriftlicher Genehmigung des Prüfinstituts erfolgen.

Karlsruhe, 17.07.2019
STE-am

DEKRA Automobil GmbH
Industrie, Bau und Immobilien

Der stellv. fachlich Verantwortliche



Hans Steiner, Dipl.-Ing. (FH)

Bericht Nr.: 12686/421600/2498/555005973

Diskontinuierliche Probenahme - Stoffe	
Auftraggeber:	KIT
Projektnummer:	555005973
Standort:	Brandversuchsanlage Neureuth
Anlage	Raumbrand mit -Möbeln
Messstelle:	außerhalb Fenster
Messtermin:	21.05.2019

Messung Nr.:		1	2	3	5	6
Start Messung	[hh:mm]	13:16				
Ende Messung	[hh:mm]	13:57				
Messdauer	[hh:mm]	00:41				
Luftdruck	[hPa]	999				
Sauerstoffgehalt	[Vol.-%]	21,0				
Cyanwasserstoff - Massenkonzentrationen und Massenströme						
Temperatur Gasuhr	[°C]	16,0				
Teilgas, Betrieb	[l]	65,4				
Teilgas, norm	[l]	61,6				
Analysen	[mg/Pr.]	2,40				
Massenkonzentration	[mg/m ³]	38,9	<i>Grenzwert TA Luft 3 mg/m³</i>			
Massenkonz., *EB	[mg/m ³]					
Massenstrom	[g/h]	0,0				
- Massenkonzentrationen und Massenströme						
Temperatur Gasuhr	[°C]					
Teilgas, Betrieb	[l]					
Teilgas, norm	[l]					
Analysen	[mg/Pr.]					
Massenkonzentration	[mg/m ³]					
Massenkonz., *EB	[mg/m ³]					
Massenstrom	[g/h]					
- Massenkonzentrationen und Massenströme						
Temperatur Gasuhr	[°C]					
Teilgas, Betrieb	[l]					
Teilgas, norm	[l]					
Analysen	[mg/Pr.]					
Massenkonzentration	[mg/m ³]					
Massenkonz., *EB	[mg/m ³]					
Massenstrom	[g/h]					

Die Massenströme beziehen sich auf einen ermittelten Volumenstrom (norm, trocken) von 1 m³/h