

Brandversuche mit reproduzierbarer Brandentstehungsphase

Bachelorthesis Security & Safety Engineering

Erstellt von:

Florian Schoeps, Matrikelnummer: 25 18 18

Betreuung durch die Hochschule Furtwangen:

Erstbetreuer: **Prof. Dr. Stephan Lambotte**

Zweitbetreuer: **Julian Zehetner, M.Sc.**

Betreuung durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik:

Dr. rer. nat. Dietmar Schelb

Dennis Augustin, M.Sc.

Abgabedatum: 16.08.2019

Datum des Thesisvortrages: 08.07.2019

**Forschungsstelle für
Brandschutztechnik**



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe. Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Karlsruhe, 14.08.2019

Ort, Datum Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1. Einleitung	1
2. Ansatz	3
3. Grundlagen	4
3.1 Begriffsbestimmung	4
3.2 Verbrennung	5
3.3 Die Flamme	5
3.4 Brennstoffe	9
3.5 Zündfähigkeit	10
3.6 Wärmeübertragung	11
3.7 Heizwert/Brennwert/Wärmefreisetzung	15
3.8 Brandverlauf	18
3.9 Pyrolyse	20
3.10 Messtechnik	21
3.11 Brandraum der FFB	23
3.12 Kiesbettbrenner	25
3.13 Sandwichplatten	27
4. Definition reproduzierbare Brandentstehungsphase	28
5. Methode	28
6. Vorversuche	31
6.1 Methode der Vorversuche	31
6.2 Untersuchung des Initialbrandes	32
6.3 Untersuchung von Zündzeiten ausgewählter Probekörper	39
6.4 Zusammenfassende Diskussion der Vorversuche	43

7. Großversuche	46
7.1 Methode der Großversuche	46
7.2 Versuchsaufbau Großversuche	47
7.3 Ergebnisse Großversuch 1	50
7.4 Ergebnisse Großversuch 2	52
7.5 Auswertung Großversuch 1	53
7.6 Auswertung Großversuch 2	55
7.7 Vergleich Großversuch 1 und Großversuch 2	56
7.8 Zusammenfassende Diskussion der Großversuche.....	59
8. Abschließende Diskussion der Versuche	60
9. Fazit und Ausblick	62
Literaturverzeichnis	63

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
λ	Luftzahl	(-)
Re	Reynolds Zahl	(-)
\dot{q}	Spezifische Wärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{(Km)}$
a	Absorptionsgrad	[-]
ε	Emissionsgrad	[-]
T	Temperatur	K
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 K^4}$
$\lambda_{i\ max}$	Wellenlänge bei maximaler Intensität	μm
$d\Phi_b$	Strahlungsfluss	(-)
E	Bestrahlungsstärke	$\frac{W}{m}$
Q	Wärmemenge	J
m	Masse	kg
c	Spezifische Wärmekapazität	$\frac{J}{kg \cdot K}$
H_U	Heizwert	$\frac{kJ}{kg}$
H_O	Brennwert	$\frac{kJ}{kg}$
\dot{Q}_c	Brandleistung	MJ
\dot{m}	Abbrandrate	kg/m ² h
χ	Verbrennungseffektivität	(-)
A_f	Brandfläche	m ²
U_T	Thermospannung	μV
a_S	Seebeck-Koeffizient	$\mu V/K$

Abkürzungsverzeichnis

FFB	Forschungsstelle für Brandschutztechnik
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
TE	Thermoelement

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Flussdiagramm Ablauf der Arbeit (Eigene Darstellung 2019)	2
Abbildung 2 Ansatz der Arbeit (Eigene Darstellung 2019)	3
Abbildung 3 Verbrennungsdreieck bearbeitete Darstellung nach (Hallenschule 2016)	5
Abbildung 4 Unterscheidung Flammentypen und Ort der Mischung (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Lange ohne Datum) und (Watikha ohne Datum))	6
Abbildung 5 Vergleich laminarer- und turbulenter Strömungen (BitSign GmbH 2019)	8
Abbildung 6 Flammenlänge in Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit (Drysdale 2011, S. 116).....	9
Abbildung 7 Verschiebung der Wellenlänge in Abhängigkeit zur spektralspezifischen Intensität (Böckh und Wetzel 2014, S. 205).....	14
Abbildung 8 Einflussfaktoren auf das Raumwinkelement (Baehr und Stephan 2013, S. 624).....	15
Abbildung 9 Charakteristischer Brandverlauf eines Zimmerbrandes bei ausreichender Ventilation (Blumenstock, et al. 2016, S. 3)	18
Abbildung 10 Brandentstehungsphase (Frank 2019).....	19
Abbildung 11 Feuerübersprung (Frank 2019).....	19
Abbildung 12 Pyrolyse in Abhängigkeit zur Temperatur Eigene Abbildung nach (Joos 2006, S. 254 f.)	20
Abbildung 13 Pyrolyse eines Probenkörpers aus Schaumstoff (Frank 2019)	20
Abbildung 14 Funktionsprinzip Thermoelement (Ngongang 2016).....	21
Abbildung 15 Softwareanbindung Messtechnik Eigene Darstellung 2019).....	23
Abbildung 16 Grundriss Brandraum (eigene Darstellung, 2019).....	24
Abbildung 17 Foto Brandraum in der Halle (Eigene Darstellung 2019)	24
Abbildung 18 Skizze Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019).....	26
Abbildung 19 Foto Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019)	26
Abbildung 20 Foto Kiesbettbrenner in Betrieb (Eigene Darstellung 2019).....	26
Abbildung 21 Aufbau Sandwichplatten (Wiedemann 2007, S. 227).....	27
Abbildung 22 Flussdiagramm Gliederung Kapitel Vorversuche (Eigene Darstellung 2019)	29
Abbildung 23 Flussdiagramm Ablauf der Großversuche (Eigene Darstellung 2019)	30

Abbildung 24 Messvorrichtung Temperaturminimum Vorderseite (Eigene Darstellung 2019)	33
Abbildung 25 Messvorrichtung Temperaturminimum Detailansicht (Eigene Darstellung 2019)	33
Abbildung 26 Grundriss Brandraum mit Kiesbettbrenner, Vorversuch zur Bestimmung des Strahlungsminimums (Eigene Darstellung 2019)	33
Abbildung 27 Temperaturverlauf Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019)	34
Abbildung 28 Integrale Temperaturkurve Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019)	36
Abbildung 29 Diagramm Zündzeiten der Versuch 17 bis 20 (Eigene Darstellung 2019)	43
Abbildung 30 Foto Aufbau eines Möbelstücks (Eigene Darstellung 2019)	44
Abbildung 31 Skizze Aufbau eines Möbelstücks (Eigene Darstellung 2019)	44
Abbildung 32 Grundriss Brandraum mit Möbeln (Eigene Darstellung 2019)	48
Abbildung 33 Möblierter Brandraum vor der Zündung (N. Kazakov Karlsruhe 2019)	48
Abbildung 34 Positionen der Thermoelemente Großversuch 1 und 2 (Eigene Darstellung 2019)	50
Abbildung 35 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 1 (Eigene Darstellung 2019)	51
Abbildung 36 Brandraum nach dem Brandversuch (Eigene Darstellung 2019)	51
Abbildung 37 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 2 (Eigene Darstellung 2019)	52
Abbildung 38 Vergleich Temperaturkurven Kiesbettbrenner Versuch 1 und 2 (Eigene Darstellung 2019)	56
Abbildung 39 Vergleich Temperaturkurven Versuch 1 und 2 (Eigene Darstellung 2019)	57
Abbildung 40 Darstellung Addition der einzelnen Differenzen (Eigene Darstellung 2019)	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Arten von Verbrennungsprozessen (Warnatz et al. 2001, S. 7)	7
Tabelle 2 Wärmeleitfähigkeiten nach VDI (VDI 2013, S. 20).....	11
Tabelle 3 Einflussfaktoren Absorptionsneigung (Tabelle vom Verfasser 2019)	15
Tabelle 4 Energieträgerabhängige Umrechnungsfaktoren (DIN V 18599-1: 2018-09 2018, S. 83).....	16
Tabelle 5 Übersicht brennbarer Brandpyrolysegase (Kunkelmann Oktober 2010, S. 9).....	21
Tabelle 6 Gemessene Anfangs- und Maximaltemperaturen Kiesbettbrenner (Tabelle vom Verfasser 2019)	34
Tabelle 7 Gemessene Temperaturen zu bestimmten Zeitpunkten (Tabelle vom Verfasser 2019).....	35
Tabelle 8 Maximaltemperaturen und Umgebungstemperatur Versuch: Bestimmung Temperaturminimum (Tabelle vom Verfasser 2019)	35
Tabelle 9 Werte der Integrale der Temperaturkurve Kiesbettbrenner (Tabelle vom Verfasser 2019).....	36
Tabelle 10 Standardabweichungen der Temperaturen an bestimmten Zeitpunkten (Tabelle vom Verfasser 2019)	37
Tabelle 11 Auf 21°C korrigierte Maximaltemperaturen und Umgebungstemperatur Versuch: Bestimmung Temperaturminimum (Tabelle vom Verfasser 2019).....	38
Tabelle 12 Auflistung der Probekörper (Tabelle vom Verfasser 2019).....	40
Tabelle 13 Ergebnisse Bestimmung der Zündneigung (Tabelle vom Verfasser 2019)	41
Tabelle 14 Mobiliar Brandraum (Tabelle vom Verfasser 2019).....	47
Tabelle 15 Auflistung aller Thermoelemente der Großversuche (Tabelle vom Verfasser 2019).....	49
Tabelle 16 Zuordnung Mobiliar zu Gruppen (Tabelle vom Verfasser 2019).....	53
Tabelle 17 Umrechnung Brennwerte zu Heizwerte der Gruppen (Tabelle vom Verfasser 2019).....	54
Tabelle 18 Phänomene Großversuch 1 (Tabelle vom Verfasser 2019)	54
Tabelle 19 Phänomene Großversuch 2 (Tabelle vom Verfasser 2019)	55
Tabelle 20 Zeitlicher Vergleich Phänomene Großversuch 1 und 2 (Tabelle vom Verfasser 2019).....	58

1. Einleitung

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) werden im Rahmen von Forschungsprojekten Brandversuche durchgeführt. Unter anderem wird für die Untersuchung von Weiterentwicklungen in den Bereichen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes der Brandverlauf bei Zimmerbränden untersucht. Der Brandverlauf gliedert sich in vier Phasen: Brandentstehungsphase, Flashover, Vollbrand und abklingender Brand. Die erste dieser Phasen beinhaltet den Verlauf von der Brandentstehung bis hin zum sogenannten Flashover (J. Blumenstock, D. Schelb, J. Kunkelmann, D. Max 2016, S. 3 ff.). Der Initialbrand wurde bei bisherigen Brandversuchen auf verschiedene Arten realisiert. Beispielsweise wurde bei einigen Versuchen beliebig gefaltetes Papier entzündet. Bei anderen Versuchen wurden die den Brand auslösenden Initialbrände mit kleinen Poolfeuern in Möbeln ausgeführt (Menzel 2016, S. 7).

Es zeigte sich, dass die Brandentstehungsphasen dabei auch bei weitgehend gleichen Bedingungen unterschiedlich verliefen. Die nicht reproduzierbaren Brandentstehungsphasen hatten zur Folge, dass die Versuche schwer zu interpretieren waren und oft keine eindeutigen Ergebnisse lieferten.

Ziel der Bachelorthesis ist es, für die Forschungsstelle für Brandschutztechnik zu definieren, bis zu welcher Abweichung Brandentstehungsphasen als reproduzierbar anzusehen sind.

Dafür wird zunächst durch Vorversuche eine mögliche Initialbrandvariante hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit untersucht sowie Zündzeiten ausgewählter Möbelstücke ermittelt.

Anschließend werden für die Untersuchung von Abweichungen bei Brandentstehungsphasen zwei Zimmerbrände unter gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Die Temperaturverläufe beider Versuche werden erfasst und ausgewertet.

Die Thesis gliedert sich dabei wie Folgt (**Abbildung 1**):

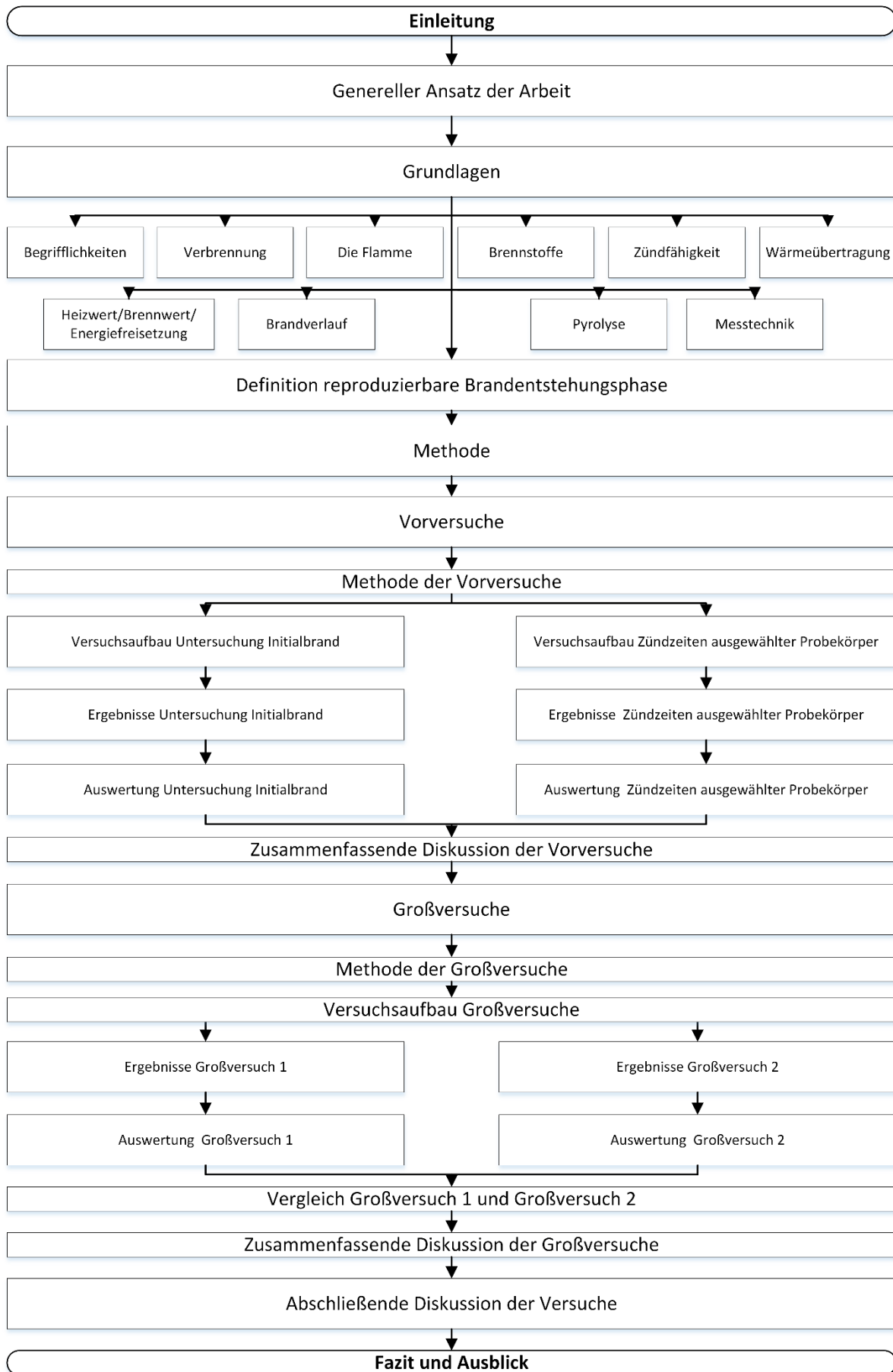


Abbildung 1 Flussdiagramm Ablauf der Arbeit (Eigene Darstellung 2019)

2. Ansatz

Die Untersuchung folgt dem allgemeinen wissenschaftlichen und grundlegenden Ansatz, dass Brandentstehungsphasen bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen reproduzierbar sind.

Auf Grund ihres Einflusses auf das Brandverhalten, werden als relevante Rahmenbedingungen dabei der Versuchsraum, die Ventilation, die Brandlast und der Initialbrand betrachtet (**Abbildung 2**). Die Einflüsse der Ventilation und der Brandlast werden im **Kapitel 3 Grundlagen** näher erläutert. Die Geometrie und Größe des Versuchsraumes haben insbesondere auf die Ventilation einen Einfluss. Der Initialbrand ist bei den Rahmenbedingungen von besonderer Relevanz, da durch ihn, dem System die erste Energie von außen zugeführt wird.

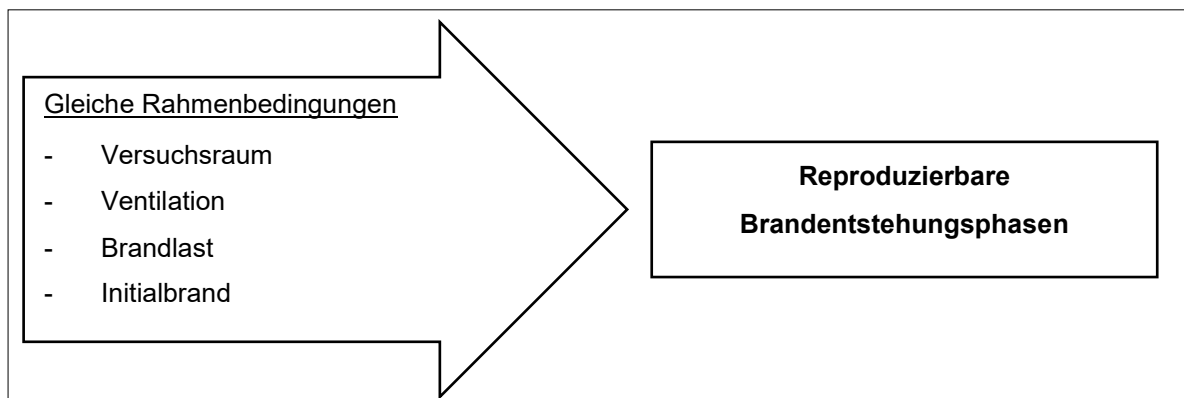


Abbildung 2 Ansatz der Arbeit (Eigene Darstellung 2019)

Die für die Überprüfung des Ansatzes und die Beantwortung der Kernfrage, dieser Arbeit, notwendigen Grundlagen sind im folgenden Kapitel enthalten.

3. Grundlagen

Dieses Kapitel beinhaltet für die Arbeit relevante technische und theoretische Grundlagen aus den Bereichen Verbrennung, Brandverlauf, Brandrauch und Messtechnik. Außerdem werden der verwendete Kiesbettbrenner und der Brandraum beschrieben.

3.1 Begriffsbestimmung

Im folgenden Kapitel werden bestimmte, in der Arbeit verwendete Begriffe beschrieben.

3.1.1 Initialbrand

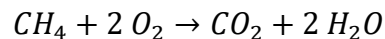
Als Initialbrand wird im Folgenden der Brand bezeichnet, der direkt nach dem Entzünden besteht. Die weitere Brandausbreitung während der Brandentstehungsphase (**Kapitel 3.8 Brandverlauf**) findet ausgehend von diesem Brand statt. In der Realität entspräche, am Beispiel eines Brandausbruchs in einem Papierkorb erklärt, der Initialbrand dem brennenden Papierkorb. In der vorliegenden Arbeit wird der Initialbrand durch den in **Kapitel 3.12 Kiesbettbrenner** beschriebenen Kiesbettbrenner realisiert.

3.1.2 Möbel moderner Bauart

Als Möbel moderner Bauart werden im folgenden Möbelstücke in Plattenbauweise aus Spanplatten, Hartfaserplatten und aus so genannten Sandwichplatten (**Kapitel 3.13 Sandwichplatten**) mit Kunststoffeinfassungen (Kantenumleimer) bezeichnet. Grundsätzlich gilt für diese Möbel, dass sie aus vielen verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften und Strukturen aufgebaut sind.

3.2 Verbrennung

Als Verbrennung wird die schnelle, sich selbst erhaltende Oxidation von Brennstoffen bezeichnet (Joos 2006, S. 9). Da bei dieser Reaktion Energie in Form von Licht und Wärme freigesetzt wird, bezeichnet man sie als exotherme Reaktion. Ein einfaches und zweckmäßiges Beispiel für eine solche Reaktion ist die vollständige Verbrennung von Methan (CH_4) (Joos 2006, S. 9) (Kurzweil 2015, S. 11).



Für das Stattfinden einer Verbrennung müssen die Komponenten Brennstoff und Sauerstoff im richtigen (stöchiometrischen) Mengenverhältnis zueinander vorliegen. Außerdem muss eine dem entsprechende Zündquelle vorhanden sein. Das Zusammenspiel der drei Komponenten wird häufig in Form eines sogenannten Verbrennungsdreiecks dargestellt (Kurzweil 2015, S. 128).



Abbildung 3 Verbrennungsdreieck bearbeitete Darstellung nach (Hallenschule 2016)

3.3 Die Flamme

Als Flamme wird bei einer Verbrennung der Bereich, in dem die eigentliche chemische Umsetzung stattfindet, bezeichnet. Die Form, Farbe, Struktur, Temperatur, Geschwindigkeit und Größe der Flamme ist dabei variabel und hängt vom Brennstoff, der Versorgung mit Sauerstoff und von physikalischen Bedingungen ab (Joos 2006, S. 9).

3.3.1 Flammtypen

Die Einteilung von Flammen ist auf Grundlage vieler Eigenschaften möglich, häufig wird zwischen vier verschiedenen Flammentypen unterschieden (Warnatz, Maas & Dibble 2001, S. 5).

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

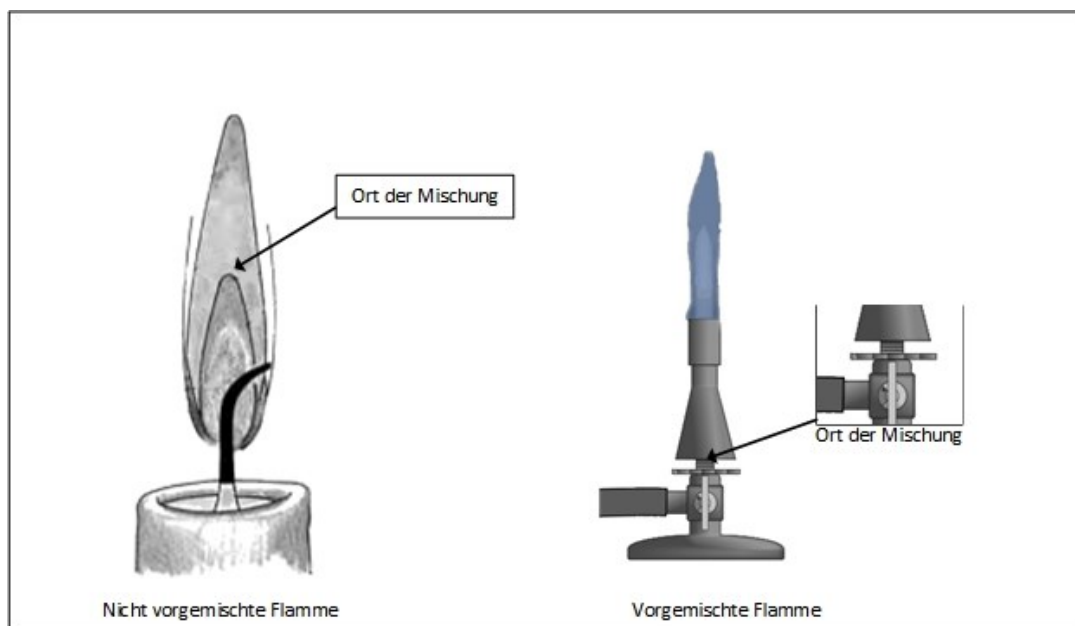


Abbildung 4 Unterscheidung Flammentypen und Ort der Mischung (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Lange ohne Datum) und (Watikha ohne Datum))

Vormischflamme

Bei einer Vormischflamme sind Brennstoff und Oxidationsmittel bereits vor der Verbrennung homogen gemischt (**Abbildung 4**). Durch das dabei vorliegende Gleichgewicht wird die Verbrennung als stöchiometrisch bezeichnet. Ist im Verhältnis zum Oxidationsmittel zu viel Brennstoff vorhanden, bezeichnet man die Verbrennung als **fett**, im umgekehrten Fall als **mager** (**Tabelle 1**) (Warnatz et al. 2001, S. 5 f.).

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

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

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

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

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

Nicht vorgemischte Flamme

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

3.3.2 Turbulente und laminare Strömungen (im Folgenden für Rohrströmungen)/ Flammen

Laminare Strömungen finden wie auf **Abbildung 5** oben zu sehen in geradlinigen, parallelen, schichtförmigen Bahnen ohne Quervermischungen statt.

Mit Hilfe der Reynolds Zahl $[Re]$ lässt sich rechnerisch auf Basis des Verhältnisses zwischen Trägheits- und Zähigkeitskräften abschätzen, ob eine turbulente Strömung vorliegt. Nach Spurk und Aksel bildet die Zahl $Re = 2300$ den Grenzwert, ab dem eine Strömung zunehmend instationär also turbulent wird.

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

Dabei ist die Dichte $[\rho] = \frac{kg}{m^3}$ die Strömungsgeschwindigkeit $[U] = \frac{m}{s}$, die charakteristische Länge $[L] = m$, die dynamische Viskosität $[\eta] = \frac{kg}{ms}$ und kinematische Viskosität $[\nu] (\nu = \eta/\rho) = \frac{m^2}{s}$ (Herwig 2000, S. 175).

Diese Gleichung zeigt, dass bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten laminare und bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten sogenannte turbulente Strömungszustände vorliegen. Bei einer turbulenten Strömung verlaufen die Bahnen wirbelhaft und die Strömungsgrößen verhalten sich stochastisch (Spurk und Aksel 2010, S. 221 f.). Dieses Phänomen lässt sich am besten bei einer Rohrströmung (**Abbildung 5**) erkennen.

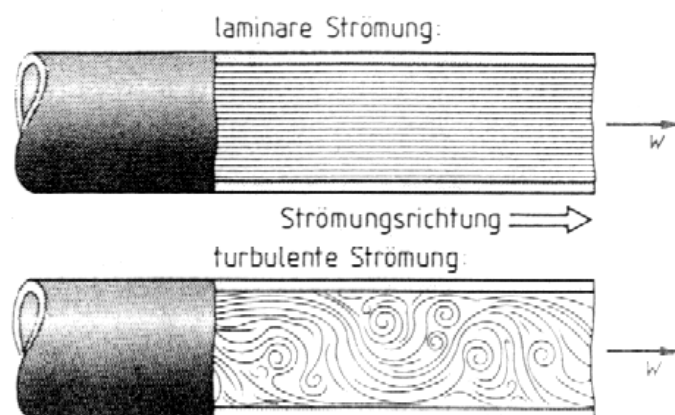


Abbildung 5 Vergleich laminarer- und turbulenter Strömungen (BitSign GmbH 2019)

Bei laminaren Flammen findet die Strömung in geradlinigen parallelen Bahnen statt. Eine Bunsenbrennerflamme ist unter bestimmten Bedingungen (Luftzufuhr offen, Gasstrom hoch) ein gutes Beispiel für eine solche Flamme.

Turbulente Flammenfronten weisen lokal gekrümmte und gestreckte laminare Flammen auf, das lokale Geschwindigkeitsfeld schwankt um einen Mittelwert (Joos 2006, S. 335–336). Die Verbrennung erfolgt in einem turbulenten Strömungsfeld. Otto-Motoren und stationäre Gasturbinen sind typische Beispiele dafür (Warnatz et al. 2001, 5 ff.).

Die Flammenlänge ist bedingt abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Sie nimmt mit steigender Geschwindigkeit bis zum Übergang zur Turbulenz zu. Die Turbulenz führt dazu, dass die Vermischung mit der Luft und die Brennstoffzufuhr gleich schnell werden. Da damit Konzentrationsunterschiede perfekt rückvermischt werden wird die Flammenlänge unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit (**Abbildung 6**) (Joos 2006, S. 331 f.).

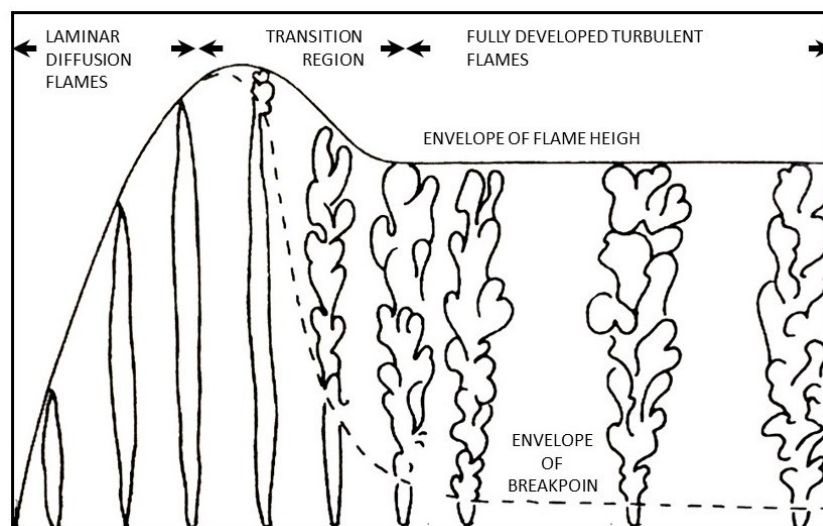


Abbildung 6 Flammenlänge in Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit (Drysdale 2011, S. 116)

3.4 Brennstoffe

Brennstoffe lassen sich grundsätzlich hinsichtlich ihres Aggregatzustandes in fest, flüssig und gasförmig unterteilen. Darüber hinaus sind sie jedoch sehr vielseitig. Sie reichen von einfachen gasförmigen Kohlenwasserstoffen, bis hin zu chemisch komplexen Feststoffen. Alle haben jedoch gemeinsam, dass die Umsetzung in Form einer Verbrennung nur im gasförmigen Zustand stattfindet (Drysdale 2011, S. 2).

Flüssigkeiten erreichen diesen gasförmigen Zustand in der Regel durch Verdampfung an der Oberfläche.

Um bei Feststoffen das Verdampfen der Oberfläche zu erreichen sind Prozesse wie chemische Zersetzung oder Pyrolyse notwendig (Drysdale 2011, S. 2). Da diese Prozesse mehr Energie brauchen, benötigen feste Brennstoffe höhere Oberflächentemperaturen als flüssige Brennstoffe, um diese Prozesse zu starten. Eine Ausnahme bilden Feststoffe, die von der festen direkt in die Gasphase übergehen (Drysdale 2011, S. 2).

3.5 Zündfähigkeit

Liegt ein Gemisch aus Oxidationsmittel und Brennstoff vor, kann bei richtigem Mischungsverhältnis durch die Zuführung von Energie in Form von Wärme der Verbrennungsvorgang gestartet werden. Dabei spielen die Zündgrenzen, die Zündtemperatur und die Mindestzündenergie eine Rolle (Joos 2006, 218,228). Zündgrenzen werden in die obere - und die untere Zündgrenze unterschieden. Innerhalb dieser Grenzen liegt ein zündfähiges Brennstoff-Luftgemisch vor. Der Wert dieser Zündgrenzen hängt von der Art des Brennstoffs und des Oxidationsmittels, der Temperatur, des Drucks und der Art der Zündung ab. Die Zündgrenzen definieren Konzentrationsverhältnisse von Brennstoff und Oxidationsmittel innerhalb derer eine Zündung stattfinden kann (Joos 2006, S. 218 ff.).

Die Zündtemperatur ist die Temperatur, bei der, bei einem Brennstoff-Luftgemisch eine sich selbsterhaltende exotherme Reaktion stattfinden kann. Sie beschreibt damit also die Temperatur, bei der sich ein zündfähiges Gemisch selbst entzündet und verbrennt (Kurzweil 2015, S. 128) (Joos 2006, S. 220). Die Zündtemperatur von Propan in einer Luftatmosphäre liegt beispielsweise bei Umgebungsdruck bei 470°C (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) ohne Datum).

Die Mindestzündenergie ist die Mindestenergie der Zündung eines Gemisches. Unterhalb dieser Aktivierungsenergie findet keine Verbrennung statt. Durch die Struktur turbulenter Flammen muss für deren Zündung eine höherer Mindestzündenergie als bei laminaren Flammen vorhanden sein (Joos 2006, S. 225).

3.6 Wärmeübertragung

Wird Energie von außen in Form von Wärme in ein System eingebracht oder von einem System abgegeben, geschieht das durch Wärmeübertragung. Dieser Prozess lässt sich in die drei Transportarten Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung gliedern.

3.6.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt den Energietransport innerhalb von Stoffen. Der Transport findet dabei gemäß des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik abhängig vom Medium durch Atome, Moleküle, Elektronen oder Photonen auf Grund einer Temperaturdifferenz von der wärmeren zur kälteren Seite statt (Böckh und Wetzel 2014, S. 17).

Die spezifische Wärmestromdichte $[\dot{q}] = \frac{W}{m^2}$ ist bei isotropen Materialien und einem lokalen Temperaturgradienten $[\frac{\partial T}{\partial x}] = \frac{K}{m}$ in Richtung der Ortskoordinate x lediglich von der Wärmeleitfähigkeit $[\lambda] = \frac{W}{(Km)}$ des Stoffes abhängig und berechnet sich wie folgt:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Die Wärmeleitfähigkeit $[\lambda]$ ist in der Regel bei Festkörpern am größten, bei Flüssigkeiten im mittleren Bereich und bei Gasen besonders klein. Die **Tabelle 2** zeigt exemplarisch einige Wärmeleitfähigkeiten (VDI 2013, S. 19 f.).

Tabelle 2 Wärmeleitfähigkeiten nach VDI (VDI 2013, S. 20)

Medium	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{W}{(Km)}$
Kupfer	≈ 395
Wasser (flüssig)	$\approx 0,6$
Luft	$\approx 0,0246$

3.6.2 Konvektion

Konvektion bezeichnet den Wärmetransport in einem strömenden Medium. Zusätzlich zur Wärmeleitung kommt dabei der Transport von Enthalpie (innere Energie + Volumenarbeit) und kinetischer Energie hinzu.

Bei diesem Transport ist der konvektive Wärmeübergang, welcher zwischen dem strömenden und dem ruhenden Medium, beispielsweise einer Wand, stattfindet, von besonderer Bedeutung (VDI 2013, S. 20 f.). Der Wärmeübergangskoeffizient $[\alpha] = \frac{W}{(m^2K)}$ ist in Abhängigkeit von der Gestalt des Geschwindigkeits- und Temperaturprofils wie folgt definiert (VDI 2013, S. 20 f.).

$$\alpha = -\lambda \frac{\frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0}}{T_{Wand} - T_{Fluid}}$$

$T_{Wand} - T_{Fluid} = \text{Temperaturdifferenz } (\Delta T) [T_{Wand} - T_{Fluid}] = K$

$\lambda = \text{Wärmeleitfähigkeit des Fluides } [\lambda] = Wm^{-1}K^{-1}$

$\frac{\partial T}{\partial y} = \text{Lokaler Temperaturgradient in Richtung der Ortskoordinate } y \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{K}{m}$

3.6.3 Wärmestrahlung (im Folgenden für punktförmige Strahler)

Die Wärmestrahlung bezeichnet die Wärmeübertragung zwischen zwei Körpern mittels elektromagnetischer Wellen (Böckh und Wetzel 2014, S. 203). Treffen die elektromagnetischen Wellen auf ein Objekt werden sie reflektiert $[\rho]$, durchgelassen $[\tau]$ oder absorbiert (Absorptionsgrad $[a]$). Für diese Anteile gilt summiert (Böckh und Wetzel 2014, S. 203 f.):

$$a + \rho + \tau = 1$$

Die spezifische Wärmestromdichte $[\dot{q}]$ kann über das Stefan-Boltzmann-Gesetz mit Hilfe der Stefan-Boltzmann-Konstante $[\sigma]$ berechnet werden (Baehr und Stephan 2013, S. 29).

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

$\varepsilon = \text{Emissionsgrad } [-]$

$T = \text{Temperatur der abstrahlenden Körpers } [T] = K$

$\sigma = \text{Stefan-Boltzmann-Konstante: } 5,67 \cdot 10^{-8} [\sigma] = \frac{W}{m^2 K^4}$

Die Neigung eines Körpers Strahlung zu emittieren wird durch den Emissionsgrad angegeben. Dabei gilt gemäß dem Kirchhoff'schen Gesetz (Böckh und Wetzel 2014, S. 204 ff.):

$$\varepsilon = a$$

Der hemisphärische Gesamtabsorptionsgrad, welcher Strahlungen aller Wellenlängen zusammenfasst, setzt sich aus dem absorbierten Teil des gesamten Strahlungsflusses [$d\Phi_{b,abs}$], und dem gesamten Strahlungsfluss [$d\Phi_b$] wie folgt zusammen:

$$a = \frac{d\Phi_{b,abs}}{d\Phi_b}$$

Die Werte für a liegen dabei Zwischen 1 (totale Absorption) und 0 (alle auftreffenden Strahlen werden reflektiert).

Das Absorptionsverhalten eines Körpers ist somit nicht nur von Materialeigenschaften, wie der Rauigkeit oder Farbe abhängig. Auch die Richtungs- und Wellenlängenverteilung der einfallenden Strahlung ist von Bedeutung (Baehr und Stephan 2013, S. 632 ff.).

Die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist dabei von der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers abhängig. Es gilt gemäß des Wien'schen Verschiebungsgesetzes:

$$\lambda_{i\ max} = \frac{2898\ \mu\text{m}\ K}{T}$$

$\lambda_{i\ max}$: Wellenlänge bei maximaler Intensität [$\lambda_{i\ max}$] = μm

T : Absolute Temperatur des strahlenden Körpers [T] = K

Das Maximum der Strahlungsintensität verschiebt sich mit steigender Temperatur (**Abbildung 7**) zu immer kleineren Wellenlängen (Böckh und Wetzels 2014, S. 205 f.). Es lassen sich somit über die Temperatur eines Strahlers Rückschlüsse auf die Wellenlänge der Wärmestrahlung ziehen.

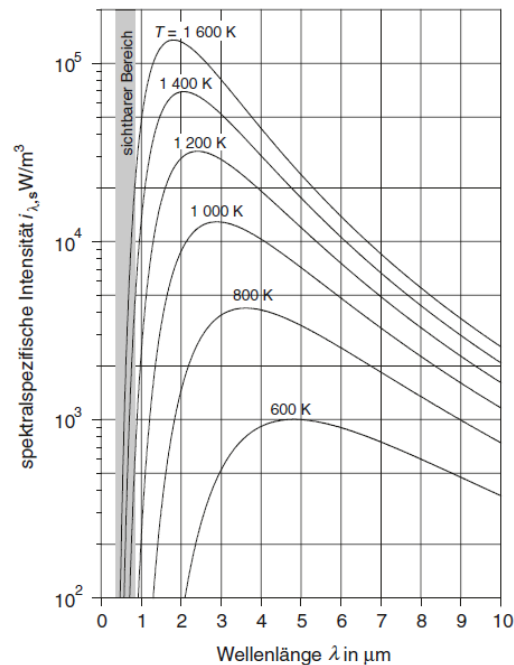


Abbildung 7 Verschiebung der Wellenlänge in Abhängigkeit zur spektralspezifischen Intensität (Böckh und Wetzels 2014, S. 205)

Trifft der Strahlungsfluss $[d\Phi_b]$ auf die Oberfläche eines Körpers wird die gesamte, durch die Strahlung zugeführte Wärmestromdichte $[\dot{q}]$ über alle Wellenlängen und Raumwinkel mittels der Bestrahlungsstärke $[E]$ erfasst. E setzt sich dabei wie folgt zusammen (Baehr und Stephan 2013, S. 632):

$$E = \frac{d\Phi_b}{dA}$$

$E =$ Bestrahlungsstärke $[E] = \text{Wm}^{-2}$

Das Flächenelement $[dA]$ ist gleich dem Raumwinkelelement. Dessen Größe ist definiert durch (Baehr und Stephan 2013, S. 623 f.):

$$dA = (\sin \beta d\beta d\varphi)r^2$$

Und somit abhängig vom Polarwinkel $[\beta]$ und dem Abstand $[r]$.

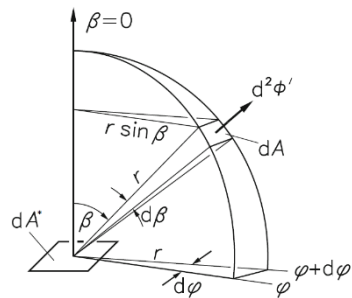


Abbildung 8 Einflussfaktoren auf das Raumwinkелеlement (Baehr und Stephan 2013, S. 624)

Damit kann also gezeigt werden, dass die Absorptionsneigung eines Körpers unter anderem von den in **Tabelle 3** aufgeführten Einflussfaktoren abhängig ist. Da der absorbierte Teil der Strahlung in innere Energie umgewandelt wird, ist diese entscheidend für die Erwärmung des Körpers.

Tabelle 3 Einflussfaktoren Absorptionsneigung (Tabelle vom Verfasser 2019)

• Wärmestromdichte	• Geometrie des Strahlers
• Temperatur des Strahlers	• Abstand zum Strahler
• Winkel zum Strahler	• Wellenlänge
• Hemisphärischer Gesamtabsorptionsgrad	

3.7 Heizwert/Brennwert/Wärmefreisetzung

In diesem Kapitel werden der Heizwert, der Brennwert und die Berechnung der Wärmefreisetzung beschrieben.

3.7.1 Wärmemenge

Die Wärmemenge $[Q] = W_s = J$ beschreibt den Energiegehalt. Sie ist für die Betrachtung von Reaktionsänderungen abhängig von der Masse $[m] = \text{kg}$, der Temperaturänderung $[\Delta T] = K$ bzw. der Temperaturdifferenz zwischen dem Siedepunkt und dem Gefrierpunkt von Wasser $[\Delta \vartheta] = K$, welche unter Normalbedingungen mit $\Delta \vartheta = 100K$ definiert ist. Die spezifische Wärmekapazität $[c] = \frac{J}{\text{kg} \cdot K}$ ist als Materialeigenschaft ebenfalls von Bedeutung (Werner 2004, 40,63).

Die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck ist für gebräuchliche Stoffe tabelliert und nur in erster Näherung konstant.

Im Allgemeinen ist sie stark abhängig von der Temperatur. Die Wärmemenge berechnet sich wie folgt (Werner 2004, S. 40):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta \vartheta$$

3.7.2 Heizwert

Für die Brandlastberechnung ist der Heizwert $[H_U] = \frac{kJ}{kg}$ eine sinnvolle Größe. Dieser beschreibt die beim Verbrennungsvorgang freiwerdende Wärmemenge $[Q_{ver}] = kJ$ in Abhängigkeit zur Masse $[m_{ver}] = kg$ des verbrannten Stoffes. Er berechnet sich wie folgt (Werner 2004, S. 42):

$$H_U = \frac{Q_{ver}}{m_{ver}}$$

Bei der Berechnung des Heizwertes wird davon ausgegangen, dass bei der Verbrennung freiwerdendes Wasser als Dampf vorliegt (Werner 2004, S. 42).

3.7.3 Brennwert

Bei der Berechnung des Brennwertes $[H_O] = \frac{kJ}{kg}$ wird im Gegensatz zum Heizwert davon ausgegangen, dass freiwerdendes Wasser bereits kondensiert ist (Werner 2004, S. 42), (DIN 1304-1:1994-03 1994, S. 11). Die freiwerdende Wärmemenge ist beim Brennwert durch die miteinbezogene Kondensationswärme (bei gleichen Bedingungen und Stoffen mit Wasserstoff) somit höher als beim Heizwert.

Der Brennwert kann durch die Addition des Heizwertes mit der Verdampfungswärme von Wasser $44,016 \text{ kJ/mol} = 2242 \text{ kJ/kg}$ berechnet werden (Kurzweil 2015, S. 127).

Für diese Methode muss die Menge des freiwerdenden Wassers bekannt sein.

Alternativ dazu stellt die DIN V 18599-1 Umrechnungsfaktoren für ausgewählte Energieträger zur Verfügung (**Tabelle 4**). Mit diesen Faktoren lassen sich Heizwerte in Brennwerte umrechnen (DIN V 18599-1: 2018-09 2018, S. 83).

Tabelle 4 Energieträgerabhängige Umrechnungsfaktoren (DIN V 18599-1: 2018-09 2018, S. 83)

Energieträger	Umrechnungsfaktor Heizwert in Brennwert
Holz	1,08
Erdgas, Biogas	1,11
Heizöl, Bioöl	1,06

3.7.4 Wärmefreisetzung

Die Wärmefreisetzungsrage (auch Brandleistung oder Energiefreisetzung) eines Brandes von Feststoffen oder Flüssigkeiten wird wie folgt berechnet (Schneider und Hegger 2007, S. 155):

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \times H_U \times \chi \times A_f$$

Wobei gilt:

\dot{Q}_c Wärmefreisetzungsrage [\dot{Q}_c] = MJ/h

\dot{m} Abbrandrate [\dot{m}] = kg/m²h

H_U Heizwert [H_U] = MJ/kg

χ Verbrennungseffektivität bei unvollständiger Verbrennung [χ] =(-)

A_f Brandfläche [A_f] = m²

Da bei der vorliegenden Arbeit nachfolgend der gesamte Brandverlauf Betrachtung findet und die Wärmefreisetzung zu bestimmten Zeitpunkten aufgrund fehlender Information über das Brandgut (relevant für den Heizwert) nicht bestimmbar ist, wird die Wärmefreisetzung und nicht die Wärmefreisetzungsrage verwendet. Die Wärmefreisetzung wird wie folgt vereinfacht berechnet. Die Brandfläche wird als konstant angenommen und die Zeit wird nicht betrachtet, ebenso wird angenommen dass die Verbrennungseffektivität von 1 (vollständige Verbrennung) vorliegt. Daraus ergibt sich die Formel:

$$Q = H_U \times m$$

Wobei gilt:

Q Wärmefreisetzung [Q] = MJ

m Abbrand (Massenabnahme) [m] = kg und

H_U Heizwert [H_U] = MJ/kg

3.8 Brandverlauf

Raumvolumen, Brandentwicklung, Brandlast, Temperatur und die Ventilationsbedingungen beeinflussen den Brandverlauf. Ist im Brandraum ausreichend Sauerstoff vorhanden und wird der Brand durch die vorhandene Brandlast limitiert, 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 (Blumenstock et al. 2016, S. 3).

Ist weniger Sauerstoff als benötigt im Raum vorhanden, bezeichnet man den Brand als ventilationsgesteuert. Da in diesem Fall der Sauerstoff für einen vollständigen Abbrand fehlt, sind die Temperaturen dabei deutlich niedriger. Der Anteil an Nebenprodukten wie CO und Pyrolysegasen ist hingegen deutlich höher (Blumenstock et al. 2016, S. 3). Es ist zu beachten, dass sich wie auf der **Abbildung 9** zu sehen, die Ventilationsbedingungen während des Brandverlaufs ändern können.

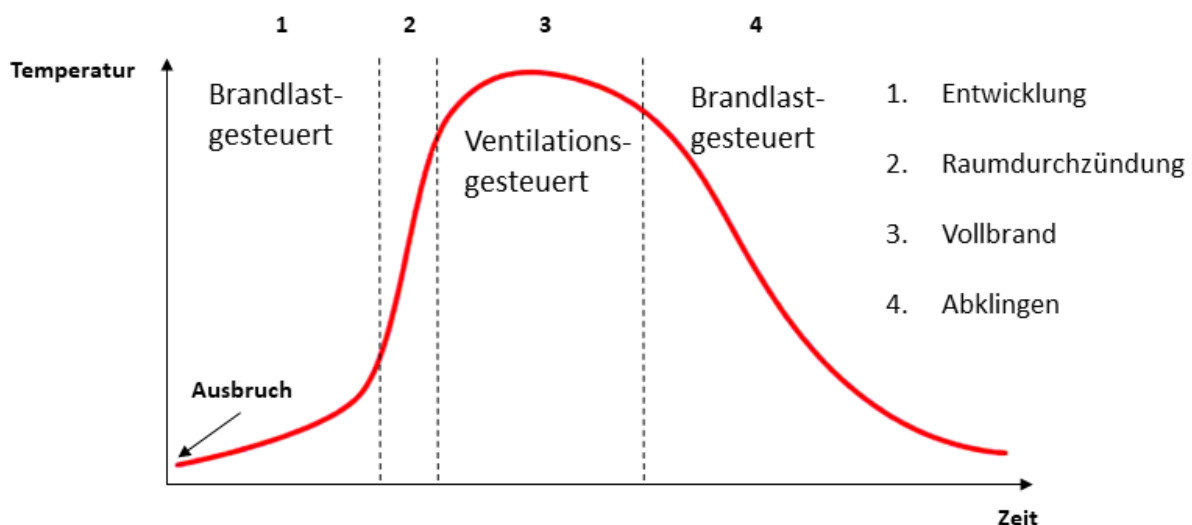


Abbildung 9 Charakteristischer Brandverlauf eines Zimmerbrandes bei ausreichender Ventilation (Blumenstock, et al. 2016, S. 3)

3.8.1 Brandentstehungsphase (Nr. 1)

Ist nach Brandausbruch ausreichend Brennstoff und Ventilation vorhanden, entwickelt sich der Brand über den Flashover zum Vollbrand. Bis zu diesem steigt die Wärmefreisetzungsrates kontinuierlich an. Der Raum, sowie die sich darin befindlichen Objekte werden thermisch aufbereitet und die Pyrolyse beginnt.

Da die Dauer dieser ersten Phase die Zeit der Selbstrettung begrenzt, ist sie für die Sicherheit von Personen entscheidend. Abhängig unter anderem von der Größe, Struktur und Einrichtung des Brandraumes kann sie von wenigen Sekunden, bis hin zu sehr langen Zeitspannen dauern (Drysdale 2011, S. 293 f.) (Blumenstock et al. 2016, S. 4).

3.8.2 Flashover (Nr. 2)

Im Anschluss zur Brandentstehungsphase **Abbildung 10** kommt es bei ausreichender kontinuierlicher Ventilation ab einer Temperatur von 600 °C (Rauchschicht) zum Flashover, auch Raumdurchzündung oder Feuerübersprung **Abbildung 11** genannt. Dabei entzünden sich schlagartig, innerhalb weniger Sekunden, alle brennbaren Gegenstände im Raum. Der Flashover stellt den Übergang vom ventilations- zum brandlastgesteuerten Brand dar (Blumenstock, et al. 2016, S. 5 ff.).



Abbildung 10 Brandentstehungsphase (Frank 2019)



Abbildung 11 Feuerübersprung (Frank 2019)

3.8.3 Vollbrand (Nr.3)

Der Vollbrand schließt an den Flashover an. In dieser Phase stehen alle Brennstoffe im Raum in Flammen. Durch den hohen Sauerstoffbedarf des Brandes, ist der zur Verfügung stehende Sauerstoff ausschlaggebend für den Brandverlauf. Der Brand wird also als ventilationsgesteuert bezeichnet (Blumenstock et al. 2016, S. 4).

3.8.4 Abklingen (Nr.4)

Die letzte Phase eines Brandes wird als Abklingphase bezeichnet. Zu dieser Phase kommt es, wenn Sauerstoff oder Brennstoff in nicht mehr ausreichender Menge vorhanden sind um eine Verbrennung aufrecht zu erhalten. Die Folge ist, dass die Brandraumtemperatur sinkt und der Brand abklingt (Blumenstock et al. 2016, S. 5).

3.9 Pyrolyse

Die Pyrolyse bezeichnet die thermische Zersetzung von Feststoffen bei deutlich unterstöchiometrischem Luftangebot (λ gegen 0) und kann in die primäre und sekundäre Pyrolyse aufgeteilt werden. Im Folgenden wird die Pyrolyse am Beispiel der Kohle beschrieben.

Während der primären Pyrolyse (bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen ab ca. 300 °C) werden schwache Brücken in der makromolekularen Struktur aufgebrochen (**Abbildung 12**). Neben der Umwandlung in Koks und Teer werden dabei Entgasungsprodukte in Form kurzkettiger Kohlenwasserstoffe wie z.B. CH_4 , C_2H_6 etc. und Gasen wie H_2 , CO und CO_2 frei (Joos 2006, S. 255).

Bei weiterer Aufheizung, der sekundären Pyrolyse, können die Teere in niedermolekulare Kohlenwasserstoffe aufgebrochen werden. Aufgrund der höheren Temperaturen werden im zweiten Schritt auch stärkere Bindungen aufgespalten. Dabei entstehen weitere flüchtige Gase und Koks (Joos 2006, S. 254 f.).

Auf der **Abbildung 13** ist die Pyrolyse eines Probenkörpers (umkreist) in Folge eines Brandes zu erkennen.

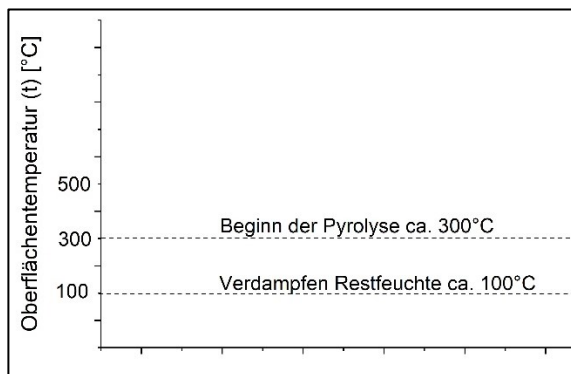


Abbildung 12 Pyrolyse in Abhängigkeit zur Temperatur Eigene Abbildung nach (Joos 2006, S. 254 f.)



Abbildung 13 Pyrolyse eines Probenkörpers aus Schaumstoff (Frank 2019)

Es wird also deutlich, dass die Pyrolyseprodukte neben der Stoffzusammensetzung im Wesentlichen auch von der vorherrschenden Temperatur abhängig sind. Des Weiteren zeigt sich, dass viele der freiwerdenden Gase brennbar sind. Hierzu sind einige Beispiele brennbarer Pyrolyseprodukte in der folgenden **Tabelle 5** aufgelistet.

Tabelle 5 Übersicht brennbarer Brandpyrolysegase (Kunkelmann Oktober 2010, S. 9)

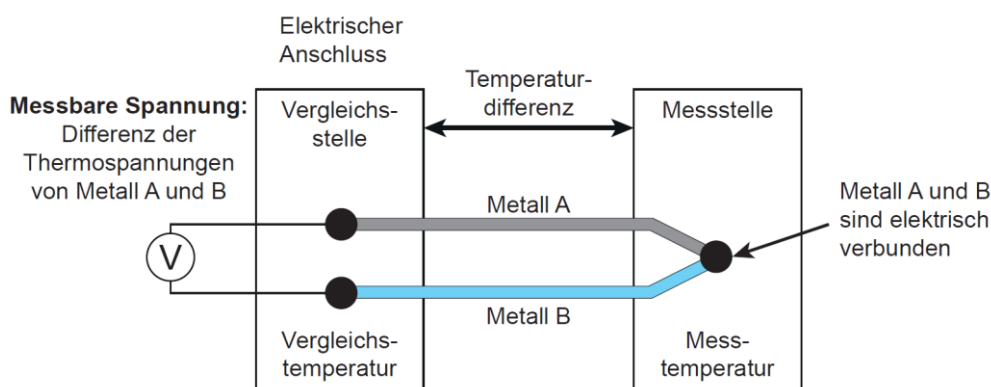
Pyrolysegas	Explosionsgrenze in Vol.-%		Zündtemperatur in °C
	untere	obere	
Kohlenmonoxid (CO)	10,9	76,0	605
Methan (CH ₄)	4,4	16,5	595
Acetylen (C ₂ H ₂)	2,4	88,0	325
Ethan (C ₂ H ₆)	2,7	16,0	515
Hexan (C ₆ H ₁₄)	1,0	7,4	240

3.10 Messtechnik

Mit unterschiedlicher Messtechnik werden die Temperatur und das Gewicht gemessen. In diesem Kapitel wird die verwendete Messtechnik beschrieben.

3.10.1 Thermoelemente

Mit Thermoelementen (TE) erfolgt die Temperaturmessung auf Basis des Seebeck-Effektes. Dabei werden zwei unterschiedliche Metalle an zwei Stellen zu einem Leiterkreis miteinander verbunden. Ist an den zwei Verbindungspunkten (Messstelle und Vergleichsstelle) eine unterschiedliche Temperatur vorhanden kann die sog. Thermospannung gemessen werden (**Abbildung 14**). Die Thermospannung ist dabei proportional zum Temperaturunterschied beider Messstellen (Hering und Schönfelder 2012, 56,389).

**Abbildung 14** Funktionsprinzip Thermoelement (Ngongang 2016)

Die Temperatur an der Messstelle (T_S) lässt sich mittels folgender Gleichung mit Hilfe der Referenztemperatur an der Vergleichsstelle (T_{ref}), der gemessenen Thermospannung (U_T) und dem Seebeck-Koeffizient (a_S) berechnen (Hering und Schönfelder 2012, S. 389).

$$T_S = \frac{U_T + a_S T_{ref}}{a_S}$$

T_S Temperatur an der Messstelle [T_S] = K

T_{ref} Temperatur an der Vergleichsstelle [T_{ref}] = K

U_T Thermospannung [U_T] = μ V

a_S Seebeck-Koeffizient [a_S] = μ V/K

Für den Versuch werden Thermoelemente aus Nickelchrom und Nickel des Typ K, Klasse 1 verwendet. Deren Anwendungsbereich liegt zwischen -25°C und 1000°C wobei eine maximale Temperatur für festgelegte Grenzwertabweichungen von bis zu 1270°C möglich ist (Hering und Schönfelder 2012, S. 391).

Die Genauigkeit der Thermoelemente beträgt in einem Temperaturbereich von 40°C bis $1000^\circ\text{C} \pm 1,5^\circ\text{C}$ (Hering und Schönfelder 2012, S. 392).

Die Softwareanbindung der Thermoelemente ist in **Kapitel 3.10 Messtechnik** beschrieben.

3.10.2 Brandraumwaage

Für die Bestimmung der Masse, welche auf dem Boden des Brandraumes aufliegt, liegt der Boden des in **Kapitel 3.11 Brandraum der FFB** beschriebenen Brandraumes der FFB auf vier Druckkraftaufnehmern vom Typ C1/2 m der Firma HBM auf. Die Druckkraftaufnehmer mit einer max. Belastung von jeweils 2 t weisen eine Genauigkeit von $\pm 0,1 \%$ des Skalenwertes, also 2 kg pro Aufnehmer auf. Die vier Druckkraftaufnehmer sind mit einem Messverstärker Typ MGT 6-32 TA der Firma HBM verbunden: Die Softwareanbindung der Brandraumwaage ist in **Kapitel 3.10 Messtechnik** beschrieben.

3.10.3 Softwareanbindung der Messtechnik

Die Thermoelemente und die Brandraumwaage sind mit Anschlussleitungen an dem PC-Messsystem OMB-DAQ-56 mit dem Erweiterungsmodul OMB-PDQ2 der Firma Omega angeschlossen. Die Auswertung der Daten erfolgt mit der Datenerfassungs- und Datenverarbeitungssoftware DASYLab V. 13.0 der Firma Omega. Die Verbindung zwischen den Thermoelementen, der Brandraumwaage und der Software ist in **Abbildung 15** dargestellt

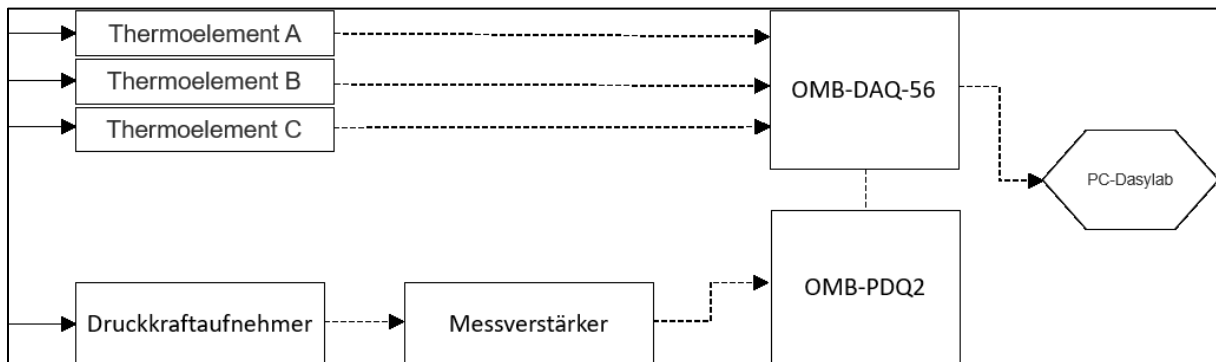


Abbildung 15 Softwareanbindung Messtechnik (Eigene Darstellung 2019)

3.11 Brandraum der FFB

Der Brandraum (Abbildung X) befindet sich in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik des KIT. Die Grundfläche des Brandraumes beträgt 25 m². Die Raumhöhe beträgt 2,70 m. Detaillierte Angaben sind dem Grundriss des Brandraumes in **Abbildung 16** zu entnehmen. Der Brandraum besitzt zwei Öffnungen. In östlicher Richtung ein Fenster mit den Maßen 1,0 m x 1,0 m (HxB) und südlich eine Tür mit den Maßen 2,35 m x 0,98 m (HxB). Der Boden des Raumes liegt auf einer Waage auf. Bei den im Folgenden beschriebenen Versuchen wird der Brandraum durch das Fenster belüftet. Die Tür ist während den Versuchen geschlossen. Die Lüftung der Halle erfolgt durch eine Deckenabsaugung mit einer Leistung von 30.000 Nm³/h.

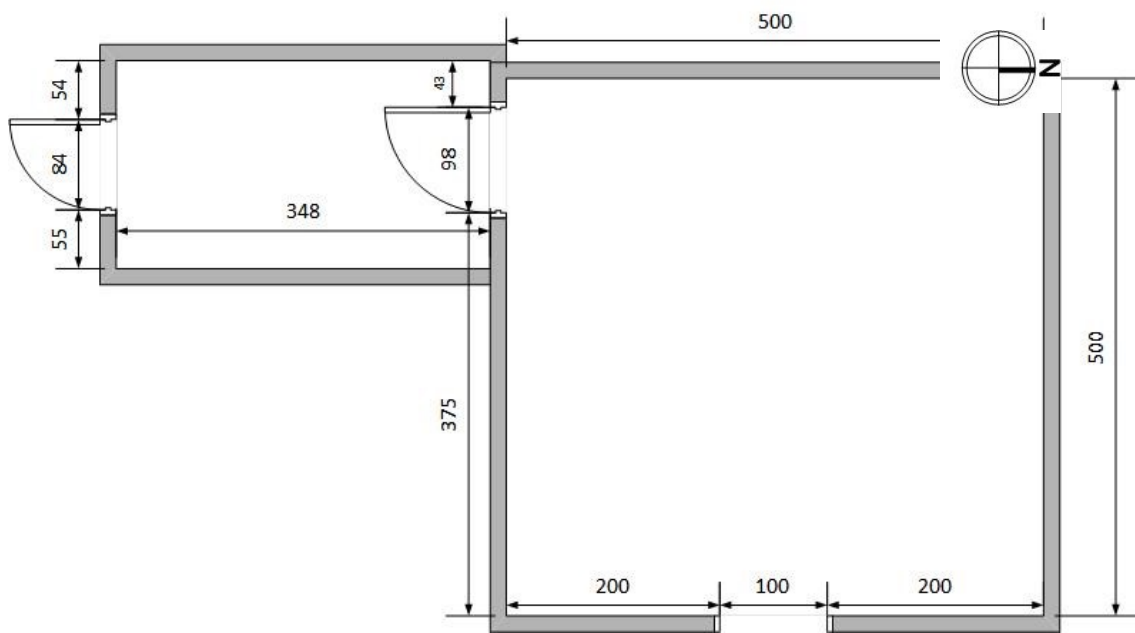


Abbildung 16 Grundriss Brandraum (eigene Darstellung, 2019)



Abbildung 17 Foto Brandraum in der Halle (Eigene Darstellung 2019)

3.12 Kiesbettbrenner

Der Initialbrand wird bei den nachfolgenden Versuchen mit einem Kiesbettbrenner realisiert. Die Auswahl des Kiesbettbrenners erfolgte aufgrund der folgenden Eigenschaften:

- Einstellbare Leistung
- Einfache Installation im Brandraum
- Hohe Temperaturbeständigkeit des Kiesbettbrenners

Der Kiesbettbrenner wird über zwei Anschlüsse an der Unterseite entweder mit Luft und Gas (vorgemischte Flamme) oder nur mit Gas (nicht vorgemischte Flamme) versorgt (**Abbildung 18, 19**). Das Gas bzw. das Gemisch durchströmt eine Kiesschicht in der es sich durchmischt und verteilt. Oberhalb der Kiesschicht brennt das Gemisch nach der Entzündung mit leuchtender, turbulenter Flamme (**Abbildung 20**). Die Leistung des Kiesbettbrenners wird über den Massendurchfluss des Gases eingestellt. Für die Regelung des Massendurchflusses wird der Massendurchflussregler FMA-2600A der Firma Omega verwendet. Die im Folgenden beschriebenen Versuche werden mit Propan nach DIN 51622 mit einem Heizwert von $12,8 \text{ kWh/m}^3$ durchgeführt (Werner 2004, S. 42) (DIN 51622: 1985-12 1985, S. 1).

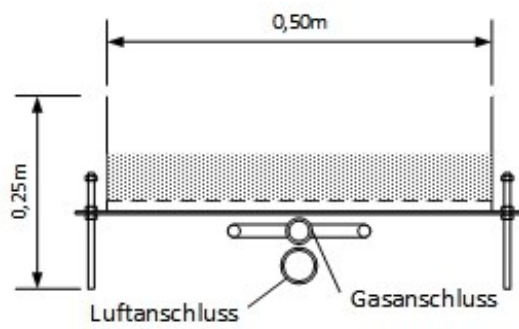


Abbildung 18 Skizze Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019)



Abbildung 19 Foto Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019)



Abbildung 20 Foto Kiesbettbrenner in Betrieb (Eigene Darstellung 2019)

3.13 Sandwichplatten

Sandwichplatten zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus drei Schichten bestehen. Zwei Deckschichten (a) und dem Kern (b) (**Abbildung 21**). 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 f.).

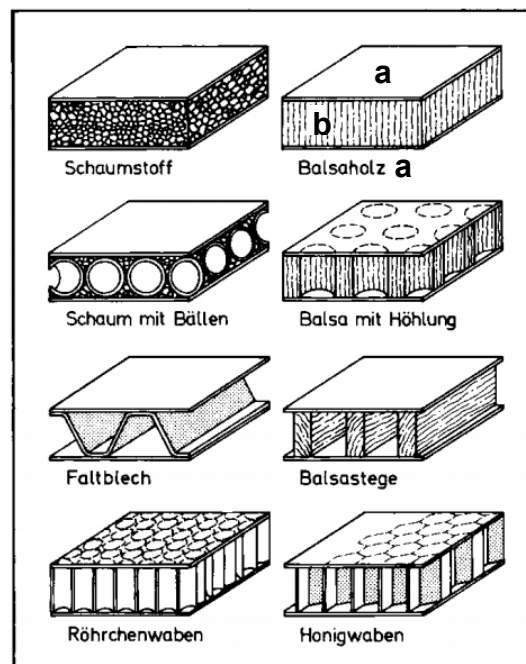


Abbildung 21 Aufbau Sandwichplatten (Wiedemann 2007, S. 227)

Im Anschluss, an die in diesem Kapitel vorgestellten Grundlagen, wird im nächsten Kapitel die reproduzierbare Brandentstehungsphase definiert.

4. Definition reproduzierbare Brandentstehungsphase

Um die Reproduzierbarkeit von Brandentstehungsphasen zu überprüfen wird der zeitliche Verlauf von Temperaturkurven untersucht. Die Zeit von der Zündung bis zum Flashover ist dabei das Beurteilungskriterium.

Auf der Basis von internen Qualitätsansprüchen wurde im Vorfeld der Arbeit festgelegt, dass zwischen den Versuchen eine maximale Abweichung von 15 % anzustreben ist.

Im nachfolgenden Kapitel wird die Methode für die Überprüfung des Ansatzes vorgestellt.

5. Methode

Für die empirische Überprüfung des in **Kapitel 2 Ansatz** dargestellten Ansatzes und schlussendlich zur Beantwortung der Kernfrage dieser Bachelorarbeit werden im ersten Schritt Vorversuche in kleinem Maßstab und im zweiten Schritt Großversuche durchgeführt.

Um bei den Versuchen gleichbleibende Rahmenbedingungen zu erreichen werden sowohl die Vorversuche als auch die Großversuche im selben Versuchsraum (**Kapitel 3.11 Brandraum der FFB**) unter gleichen Ventilationsbedingungen und mit gleicher Brandlast durchgeführt. Als Initialbrand wird ein im **Kapitel 3.12 Kiesbettbrenner** näher beschriebener Kiesbettbrenner mit einstellbarer Leistung verwendet. Im Gegensatz zu bisherigen Versuchen mit kleinen Initialbränden stellt der Kiesbettbrenner einen großen Initialbrand dar. Durch den großen thermischen Eintrag soll der störende Einfluss von kleineren Einflussfaktoren minimiert werden. Der große thermische Eintrag und die einstellbare Leistung sollen neben den gleichbleibenden Rahmenbedingungen für einen reproduzierbaren Entstehungsbrand sorgen.

Um das in **Kapitel 4 Definition reproduzierbare Brandentstehungsphase** festgelegte Beurteilungskriterium, die Zeit von der Entzündung bis zum Flashover anhand der Temperaturkurven zu ermitteln werden diese aufgezeichnet. Die Temperatur wird mit Thermoelementen (**Kapitel 3.10 Messtechnik**) gemessen.

Um die Wärmefreisetzung bestimmen zu können, wird zusätzlich die Massenabnahme mit einer Brandraumwaage (**Kapitel 3.10 Messtechnik**) gemessen. Die Messtechnik ist, wie in **Kapitel 3.10 Messtechnik** beschreiben, mit dem Messprogramm DasyLab verbunden.

Zur besseren Lesbarkeit der Arbeit werden die Versuche und die Großversuche zunächst in zwei verschiedenen Kapiteln betrachtet und anschließend zusammenfassend diskutiert. Das Kapitel Vorversuche gliedert sich dabei wie folgt (**Abbildung 22**):

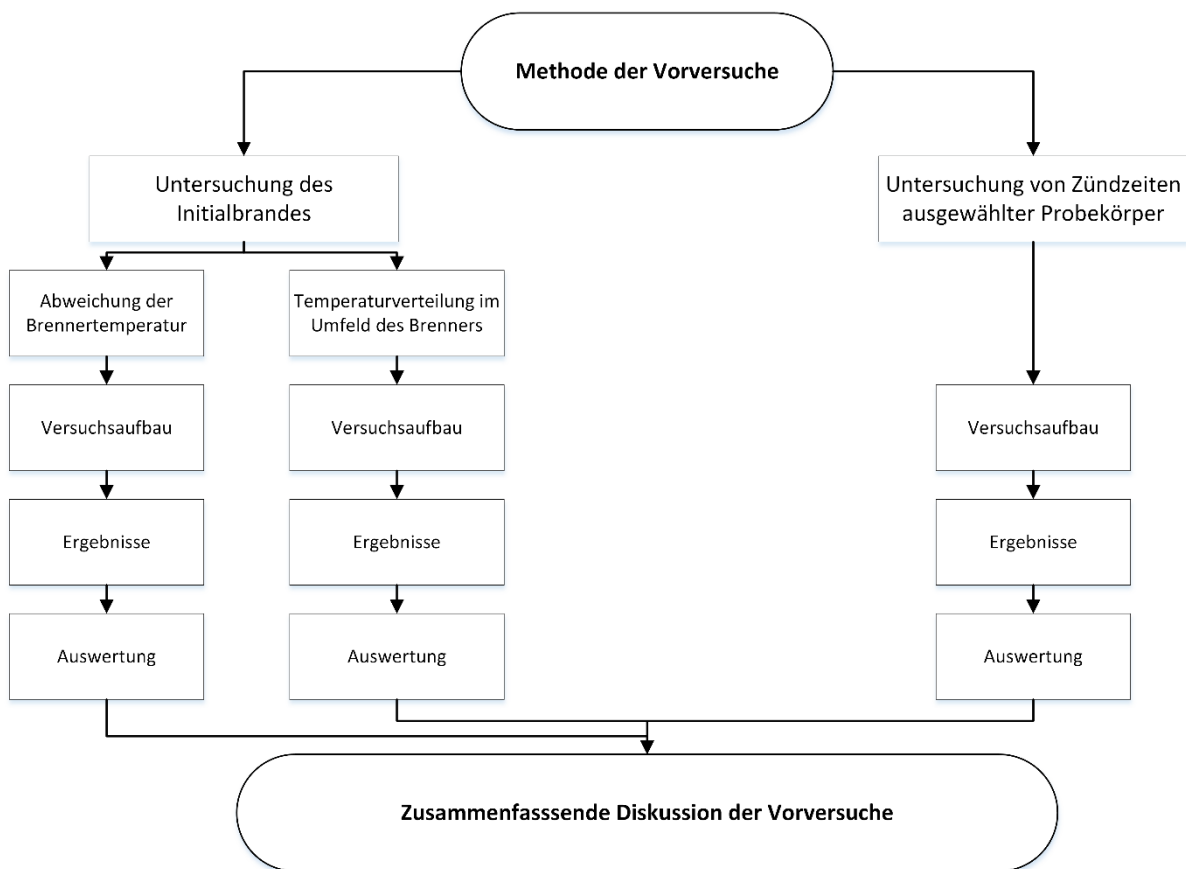


Abbildung 22 Flussdiagramm Gliederung Kapitel Vorversuche (Eigene Darstellung 2019)

Anschließend folgt das Kapitel Großversuche. Die Großversuche bauen dabei teilweise auf die Ergebnisse der Vorversuche auf (**Abbildung 23**).

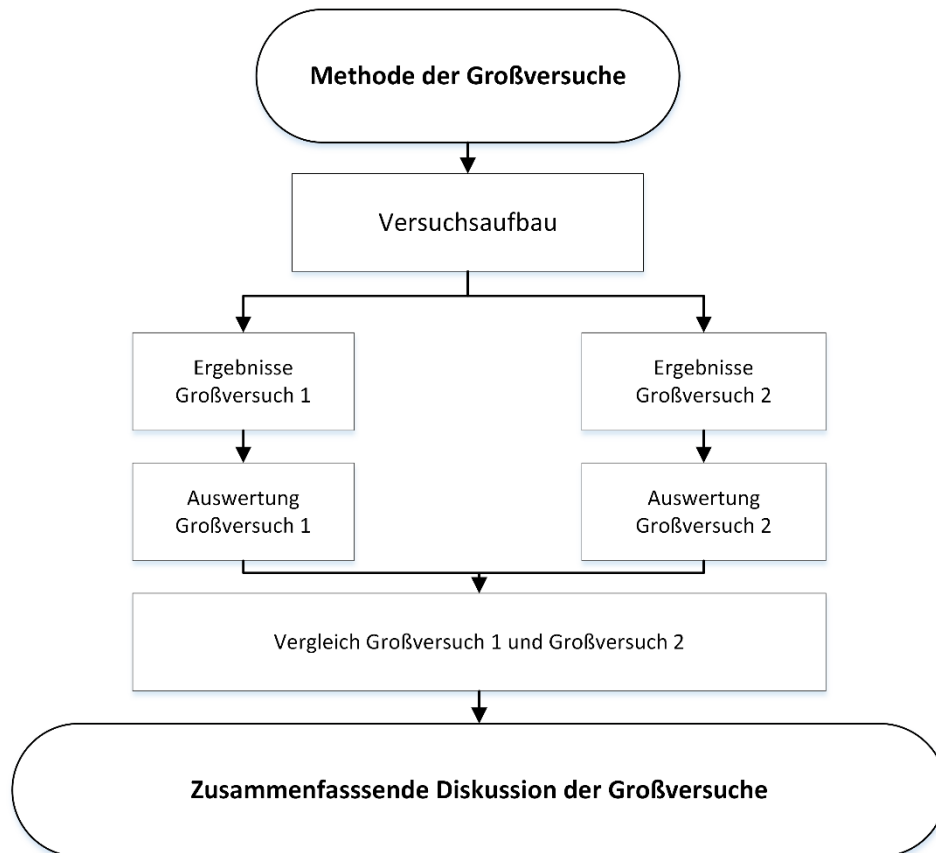


Abbildung 23 Flussdiagramm Ablauf der Großversuche (Eigene Darstellung 2019)

6. Vorversuche

In diesem Kapitel werden die Vorversuche und deren Ergebnisse vorgestellt.

Das Kapitel gliedert sich dabei in:

- Methode Vorversuche
- Versuchsaufbau Untersuchung des Initialbrandes
 - Ergebnisse Untersuchung Initialbrand
 - Auswertung Untersuchung Initialbrand
- Versuchsaufbau Untersuchung Zündzeiten ausgewählter Probekörper
 - Ergebnisse Untersuchung Zündzeiten ausgewählter Probekörper
 - Auswertung Untersuchung Zündzeiten ausgewählter Probekörper
- Zusammenfassende Diskussion der Vorversuche

6.1 Methode der Vorversuche

Durch Vorversuche sollen der Initialbrand und ausgewählte Probekörper hinsichtlich ihres Brandverhaltens untersucht werden. Ziel ist es, zu ermitteln ob die Temperatur im Umfeld des Initialbrandes gleichmäßig verteilt ist und ob dessen Leistung gleichbleibend, also reproduzierbar ist. Des Weiteren werden die Zündzeiten ausgewählter Probekörper bestimmt. Es werden dafür jeweils mindestens zwei gleiche Probekörper unter gleichen Bedingungen untersucht. Dadurch sollen auftretende Differenzen bei den Zeiten bis zur Entzündung der Probe bestimmt werden. Die Ergebnisse fließen in die Beurteilung der Reproduzierbarkeit von Brandentstehungsphasen und die Anordnung der Möbel bei den Großversuchen ein

6.1.1 Untersuchung Initialbrand

Sowohl für die Vorversuche als auch für die Großversuche wird ein Kiesbettbrenner (**Kapitel 3.12 Kiesbettbrenner**) als Initialbrand verwendet. Bei mehreren Versuchen wird die Temperatur oberhalb der Flamme gemessen. Anschließend werden die Integrale der einzelnen Temperaturkurven sowie die Standardabweichungen an bestimmten Zeitpunkten ermittelt. Anhand der ermittelten Werte wird beurteilt, wie gleichmäßig die Verbrennung bei verschiedenen Versuchen abläuft. Außerdem wird die Temperatur im Umfeld des Brenners gemessen und überprüft, ob die Temperaturverteilung gleichmäßig ist.

6.1.2 Untersuchung Zündzeiten ausgewählter Probekörper

Im zweiten Teil der Vorversuche werden verschiedene Probekörper (mindestens zwei je Probe) im Umfeld des Kiesbettbrenners platziert. Anschließend wird der Brenner entzündet und die Zeit bis zur Entzündung der Probe gemessen.

6.2 Untersuchung des Initialbrandes

Nachfolgend wird die Untersuchung des Initialbrandes beschrieben.

6.2.1 Versuchsaufbau Untersuchung des Initialbrandes

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau für die Untersuchung des Initialbrandes beschrieben.

Abweichungen der Brennertemperatur

Um Abweichungen der Brennertemperatur zwischen verschiedenen Versuchen unter gleichen Bedingungen zu ermitteln wird der Kiesbettbrenner in der Mitte des in **Kapitel 3.11 Brandraum der FFB** beschriebenen Versuchsraumes platziert und mit einer über den Massendurchfluss und den Heizwert ermittelte Leistung von 141,8 kW betrieben. 12 cm unterhalb der Decke, an der Position des Kiesbettbrenners wird die Temperatur mit einem Thermoelement des Typ K (**Kapitel 3.10 Messtechnik**) gemessen. Das Thermoelement befindet sich dabei nicht in der Flamme sondern direkt darüber.

Zwischen den einzelnen Versuchen wird der Raum mit einem mobilen Ventilator belüftet und abgekühlt.

Temperaturverteilung im Umfeld des Kiesbettbrenners

Auch die Versuche zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Umfeld des Brenners werden in dem in **Kapitel 3.11 Brandraum der FFB** beschriebenen Brandraum durchgeführt.

Für die Temperaturmessung wird eine dafür entwickelte Messvorrichtung verwendet. Die Messvorrichtung (**Abbildung 24, 25**) 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 des Typ K (**Kapitel 3.10 Messtechnik**). Die Thermoelemente berühren mit den Spitzen die Brandschutzplatte. Die Werte des ungeschützten Thermoelementes sind bei der Auswertung ausschlaggebend.

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

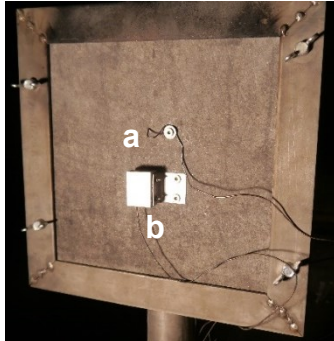


Abbildung 24 Messvorrichtung Temperaturminimum Vorderseite (Eigene Darstellung 2019)

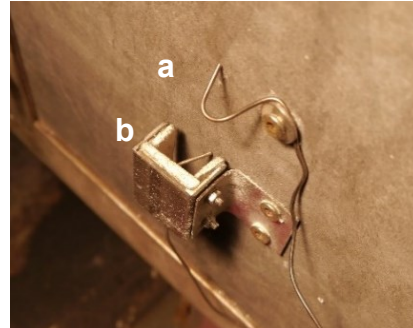


Abbildung 25 Messvorrichtung Temperaturminimum Detailansicht (Eigene Darstellung 2019)

Wie auf **Abbildung 26** 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 118,1 kW betrieben. Die Brenndauer betrug bei allen Versuchen 4 min.

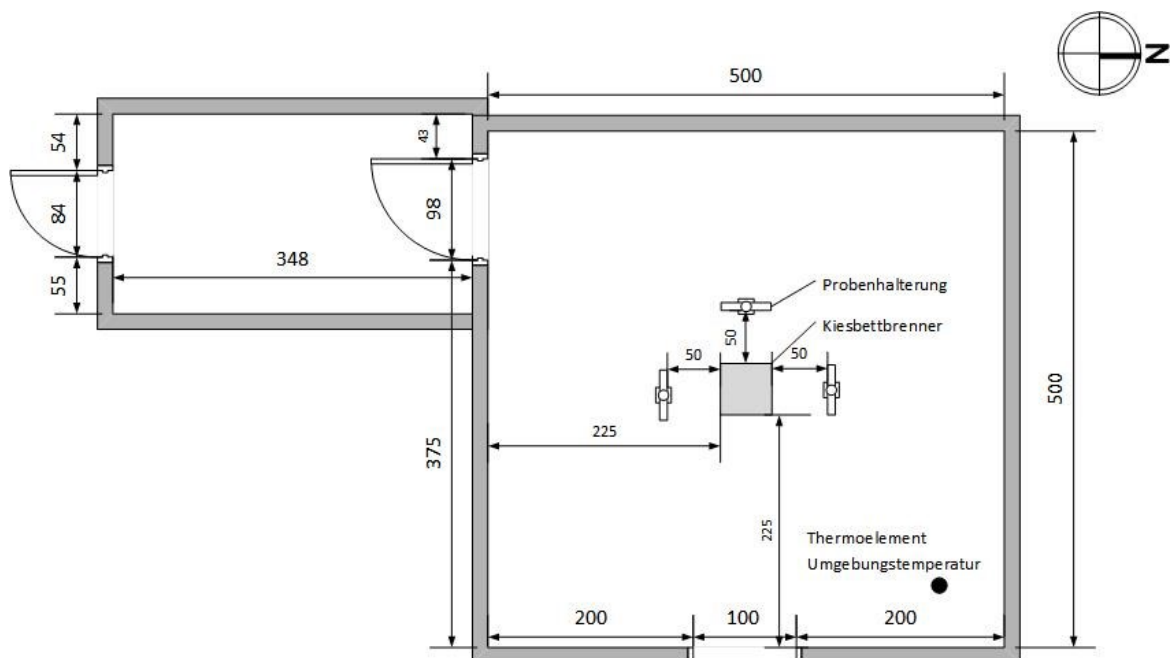


Abbildung 26 Grundriss Brandraum mit Kiesbettbrenner, Vorversuch zur Bestimmung des Strahlungsminimums (Eigene Darstellung 2019)

6.2.2 Ergebnisse Untersuchung Initialbrand

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung des Initialbrandes vorgestellt.

Ergebnisse Abweichungen der Brenntemperatur

Die **Abbildung 27** zeigt die Temperaturkurven des Thermoelementes oberhalb des Kiesbettbrenners.

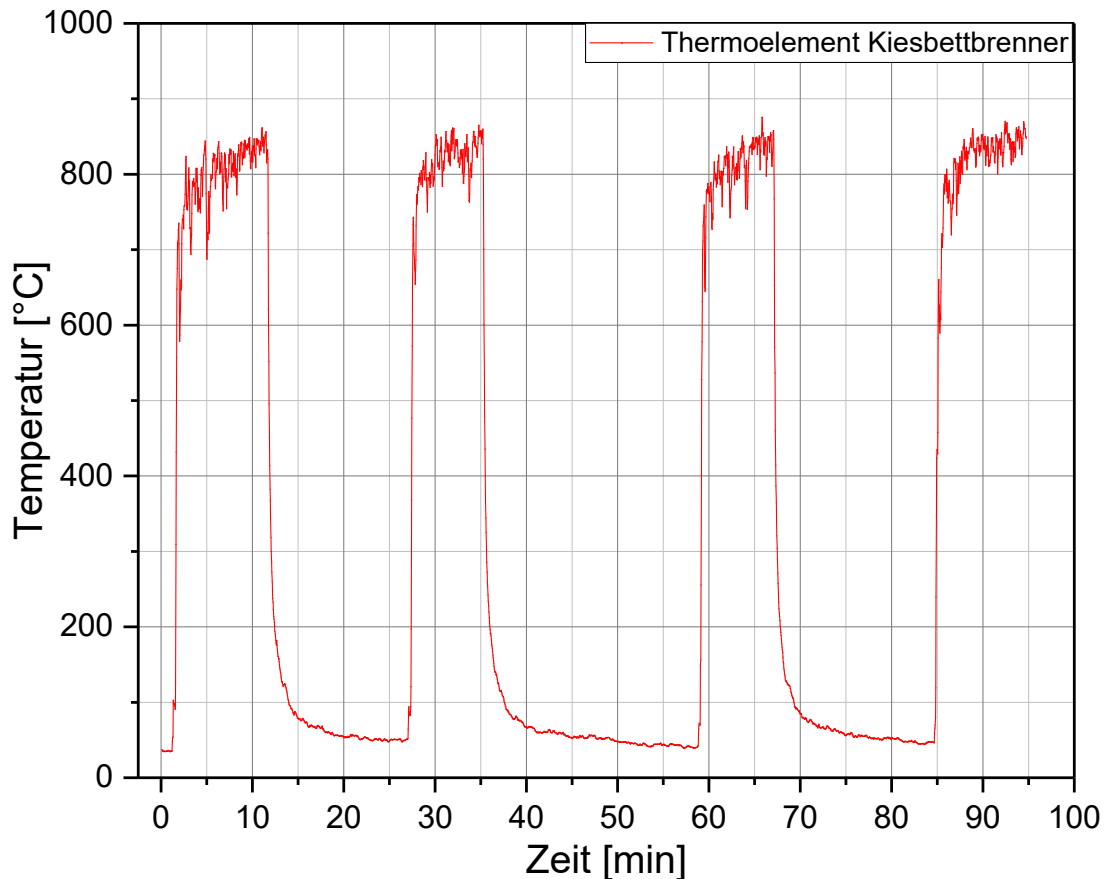


Abbildung 27 Temperaturverlauf Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019)

Die gemessenen Temperaturen zum Zeitpunkt der Zündung des Kiesbettbrenners sowie die gemessenen Maximaltemperaturen der Versuche sind in **Tabelle 6** aufgeführt.

Tabelle 6 Gemessene Anfangs- und Maximaltemperaturen Kiesbettbrenner (Tabelle vom Verfasser 2019)

Versuchsnummer	Temperatur zum Zeitpunkt der Zündung	Maximaltemperatur
1	30,0 °C	861,8 °C
2	47,7 °C	865,4 °C
3	40,2 °C	875,7 °C
4	46,5 °C	870,0 °C

Versuchsnummern von links nach rechts

Die nachfolgende **Tabelle 7** zeigt des Weiteren Temperaturen zu bestimmten Zeitpunkten (3 min, 5 min, 8 min).

Tabelle 7 Gemessene Temperaturen zu bestimmten Zeitpunkten (Tabelle vom Verfasser 2019)

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
3 min	768,1 °C	838,8 °C	821,4 °C	826,4 °C
5 min	835,5 °C	861,0 °C	808,7 °C	832,8 °C
8 min	844,7 °C	856,4 °C	811,6 °C	845,7 °C

Ergebnisse Temperaturverteilung im Umfeld des Brenners

In der nachfolgenden **Tabelle 8** werden die gemessenen Maximaltemperaturen der einzelnen Thermoelemente an der Probe sowie die Umgebungstemperaturen bei der Zündung des Brenners abgebildet.

Tabelle 8 Maximaltemperaturen und Umgebungstemperatur Versuch: Bestimmung Temperaturminimum (Tabelle vom Verfasser 2019)

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

6.2.3 Auswertung Untersuchung Initialbrand

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung des Initialbrandes ausgewertet.

Auswertung Abweichungen der Brennertemperatur

Um Abweichungen der Brennertemperatur zwischen vier Versuchen, die unter gleichen Bedingungen durchgeführt wurden zu ermitteln, wurden zunächst die Integrale der Temperaturkurven (**Abbildung 28**) berechnet und verglichen. Die untere Grenze auf der X-Achse bildete jeweils der Zeitpunkt der Entzündung. Die obere Grenze auf der X-Achse bildete jeweils der Zeitpunkt der Entzündung + 8 min. Die Dauer von 8 min wurde gewählt, da die Temperaturen des Kiesbettbrenners im Zuge der Vorversuche mit Probekörpern gemessen wurden. Die kürzeste Zeitspanne bis zur Entzündung des Probekörpers betrug dabei ca. 8 min. **Abbildung 28** zeigt den Bereich der Integrale, **Tabelle 9** deren Werte.

Da die Messwerte in Grad Celsius erhoben wurden und diese Einheit als in der Brandschutzforschung gängig angesehen werden kann, erfolgt die Auswertung ebenfalls in Grad Celsius.

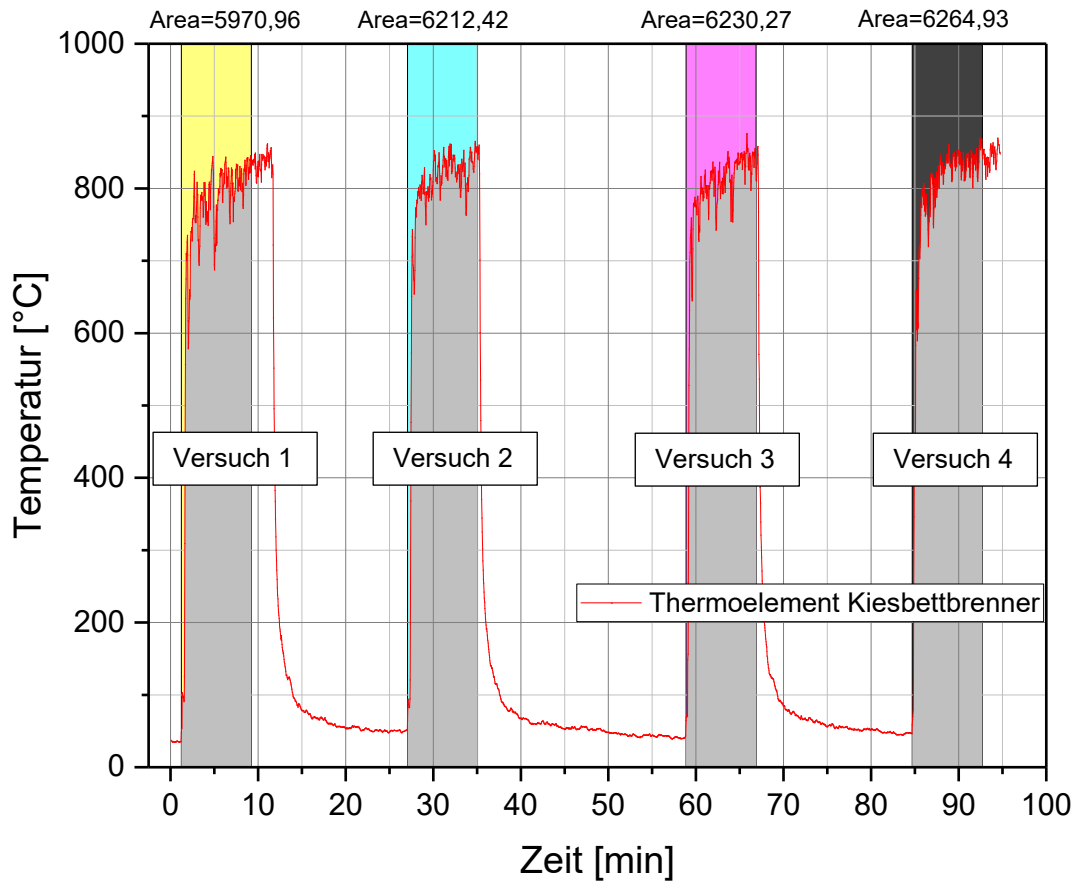


Abbildung 28 Integrale Temperaturkurve Kiesbettbrenner (Eigene Darstellung 2019)

Die Integrale weisen eine Streuung um den Mittelwert von ca. 2 % auf.

Tabelle 9 Werte der Integrale der Temperaturkurve Kiesbettbrenner (Tabelle vom Verfasser 2019)

Versuchsnummer	Integral
1	5970,96
2	6212,42
3	6230,27
4	6264,93

Versuchsnummern von links nach rechts

Des Weiteren wurden bei allen Versuchen an drei bestimmten Zeitpunkten (3 min, 5 min, 8 min) die Standardabweichungen der Temperatur bestimmt. Die **Tabelle 10** zeigt die Ergebnisse der Berechnung.

Tabelle 10 Standardabweichungen der Temperaturen an bestimmten Zeitpunkten (Tabelle vom Verfasser 2019)

Versuchsnummer	Standardabweichung
1	34,2 °C
2	9,8 °C
3	5,4 °C
4	8,0 °C

Die Standardabweichungen (**Tabelle 10**) der Versuche 2-4 liegen nah beieinander und weichen nur gering voneinander ab (ca. 4 °C). Die Standardabweichung der Temperaturen des ersten Versuchs ist mit 34,2 °C höher. Betrachtet man bei Versuch 1 die Temperatur zum Zeitpunkt 3 min fällt auf, dass diese mit 768,1 °C niedriger ist als bei den anderen Versuchen zum selben Zeitpunkt. Bei der Betrachtung der Temperaturkurve zu diesem Zeitpunkt (X-Koordinate 4,23333) ist ein Ausschlag nach unten zu erkennen. Des Weiteren war zu Beginn des ersten Versuchs das Kiesbett kalt und wurde aufgrund der Verbrennung erst während des Versuches erwärmt. Da die weiteren Versuche 2 bis 4 nach einer kurzen Abkühlungsphase des Raumes nacheinander durchgeführt wurden, wies das Kiesbett bei diesen bereits eine erhöhte Anfangstemperatur auf. Die höhere Temperatur des Kiesbetts könnte zur Stabilisation der gemessenen Temperatur über dem Brenner beigetragen haben.

Die Auswertung der Integrale findet unter der Einbeziehung aller Messwerte des betrachteten Zeitraums statt. Bei der Auswertung der Temperaturen an festgelegten Zeitpunkten hingegen werden jeweils nur drei Werte betrachtet. Die Auswertung der Integrale ist daher ausschlaggebend. Die Werte der Auswertung zu bestimmten Zeitpunkten stützen deren Ergebnisse jedoch.

Auf Basis der Ergebnisse wird von einer gleichbleibenden Leistung des Kiesbettbrenners ausgegangen.

Auswertung Temperaturverteilung im Umfeld des Brenners

Zum Zeitpunkt der Zündung des Brenners herrschten unterschiedliche Umgebungstemperaturen. Um deren Einfluss bei der Auswertung der Ergebnisse zu berücksichtigen sind die Anfangstemperaturen sowie die Werte mit- und ohne Strahlungsschutz auf eine Anfangstemperatur von 21 °C korrigiert worden. Die korrigierten Werte sowie die Korrekturfaktoren sind in **Tabelle 11** abgebildet.

Tabelle 11 Auf 21°C korrigierte Maximaltemperaturen und Umgebungstemperatur Versuch: Bestimmung Temperaturminimum (Tabelle vom Verfasser 2019)

Versuchsnummer	T _{Umgebung} (Bei Zündung des Brenners)	T _{max. TE a} (ohne Strahlungsschutz)	T _{max. TE b} (mit Strahlungsschutz)
1 Norden	21,0 °C	87,2 °C (83,1 °C + 4,1 °C)	53,8 °C (49,7 °C + 4,1 °C)
2 Westen	21,0 °C	95,8 °C	60,6 °C
3 Süden	21,0 °C	89,1 °C (90,1 °C – 1 °C)	60,0 °C (61,0 °C - 1 °C)

Die korrigierten Werte der **Tabelle 11** zeigen eine maximale Abweichung von ca. 10 %. Unter der Berücksichtigung von Ungenauigkeiten bei den Messungen und da in jeder Richtung nur eine Messung durchgeführt wurde, kann auf Basis der erhobenen Werte davon ausgegangen werden, dass die Temperatur im Umfeld des Brenners gleichmäßig verteilt ist.

6.3 Untersuchung von Zündzeiten ausgewählter Probekörper

Nachfolgend wird die Untersuchung der Zündzeiten ausgewählter Probekörper beschrieben.

6.3.1 Versuchsaufbau Untersuchung von Zündzeiten ausgewählter

Probekörper

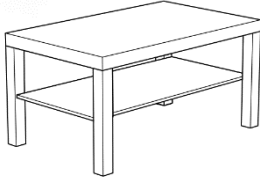
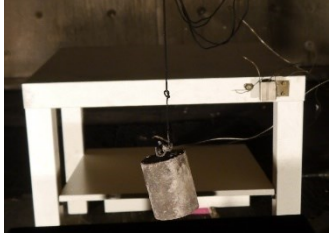


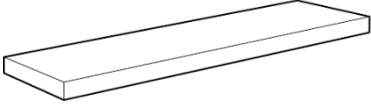



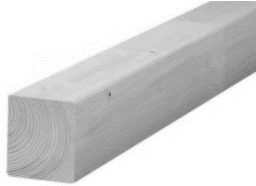

Zur Bestimmung der Zündneigung ausgewählter Probekörper wird der Kiesbettbrenner an identischer Position, wie bei den Versuchen zur Bestimmung der Temperaturverteilung, platziert. Die Probekörper werden in einem Abstand von 15 cm bis 20 cm in nördlicher Richtung zum Kiesbettbrenner platziert. Der Kiesbettbrenner wird mit einer Leistung von 118 kW bzw. 141 kW betrieben. Je Probekörper werden dem brennenden Kiesbettbrenner mindestens zwei identische Proben bis zu deren Entzündung oder bis maximal 15 Minuten ausgesetzt. Die Zeit bis zur Entzündung (Flamme auf Oberfläche des getesteten Probekörpers sichtbar) wird bestimmt.

Der Zeitpunkt der Entzündung wird optisch ermittelt. Um einen Referenzwert hinsichtlich der Abweichung von Zündzeiten zu erhalten, wird eine Versuchsreihe mit unbehandeltem Holz annähernd gleicher Holzfeuchte durchgeführt.

Die einzelnen Probekörper sind in der nachfolgenden **Tabelle 12** aufgelistet.

Im **Kapitel 6.3.2 Ergebnisse Untersuchung Zündzeiten ausgewählter Probekörper** wird in **Tabelle 13** ein Bezug zwischen der Entfernung zum Kiesbettbrenner, der Brennerleistung und den Probekörpern hergestellt.

Tabelle 12 Auflistung der Probekörper (Tabelle vom Verfasser 2019)

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

Um die Beeinflussung der einzelnen Versuche untereinander möglichst klein zu halten, lag zwischen den Versuchen eine Zeitspanne von mindestens 20 Minuten. Zudem wurde der Brandraum nach jedem Versuch mit einem mobilen Ventilator belüftet.

6.3.2 Ergebnisse Untersuchung von Zündzeiten ausgewählter

Probekörper

Die **Tabelle 13** zeigt die gemessene Zeit von der Entzündung des Brenners bis zur Entzündung der Probe in Abhängigkeit vom Probekörper, der Entfernung zum Brenner und der Brennerleistung. Zwischen den Versuchen 9 und 11 wurde die Leistung des Kiesbettbrenners von 118,1 kW auf 141,8 kW gesteigert.

Tabelle 13 Ergebnisse Bestimmung der Zündneigung (Tabelle vom Verfasser 2019)

Versuchsnummer	Probekörper	Entfernung zum Brenner	Leistung Kiesbettbrenner (berechnet)	Zeit bis zur Entzündung
7	Couchtisch halbiert	20cm	118,1 kW	6:50 min
8	Couchtisch halbiert	20cm	118,1 kW	–**
9	Regal	20cm	118,1 kW	7:25 min
11	Regal	20cm	141,8 kW	14:33 min
12	Wandregal	16cm	141,8 kW	7:30 min
13	Wandregal	16cm	141,8 kW	6:30 min
14	Sessel halbiert	20cm	141,8 kW	57sec
15	Sessel halbiert	20cm	141,8 kW	1:02 min
16	Holz (8,4%)*	20cm	141,8 kW	–**
17	Holz (8,0%)*	15cm	141,8 kW	8:05 min
18	Holz (7,7%)*	15cm	141,8 kW	7:08 min
19	Holz (7,6%)*	15cm	141,8 kW	5:50 min
20	Holz (7,7%)*	15cm	141,8 kW	7:39 min

*Unmittelbar vor den Versuch 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

6.3.3 Auswertung Untersuchung von Zündzeiten ausgewählter

Probekörper

Die ersten Versuche der Versuchsreihe, die Versuche 7 und 8 wurden mit einem halbierten Couchtisch als Probekörper durchgeführt. Die Zeit bis zur Entzündung des Probekörpers, im Folgenden als Zündzeit bezeichnet, betrug bei Versuch 7, 6:50 min. Der Versuch 8 wurde nach 15 min ohne Entzündung abgebrochen. Die Differenz zwischen den Zündzeiten beträgt damit mindestens 8:10 min.

Zwischen den Versuchen 9 und 11 wurde die Brennerleistung mit dem Ziel, eine schnellere Entzündung der Probekörper zu erreichen von 118,1 kW auf 141,8 kW angepasst. Das Regal zündet bei Versuch 11 trotz der höheren Brennerleistung 7:08 min. später als bei Versuch 9.

Die Versuche 12 und 13 Wandregal wurde mit konstanter Brennerleistung durchgeführt. Die Differenz der Zündzeiten betrug dabei 1:00 min.

Die Differenz der Zündzeiten der Versuche 14 und 15 mit halbiertem Sessel betrug 0:05 min.

Versuch 16 wurde mit dem Probekörper Holz in einer Entfernung von 20 cm zwischen Brenner und Probekörper durchgeführt. Bis zur Grenze von 15 min zündete die Probe nicht. Die Versuche 17 bis 20 wurden daher mit einer kleineren Distanz von 15 cm zwischen Brenner und Probe durchgeführt. Die Differenz zwischen der kürzesten und der längsten Zündzeit betrug bei den Versuchen 2:15 min. Die maximale prozentuale Abweichung vom Mittelwert (7,18 min) betrug bei diesen Versuchen ca. 13%.

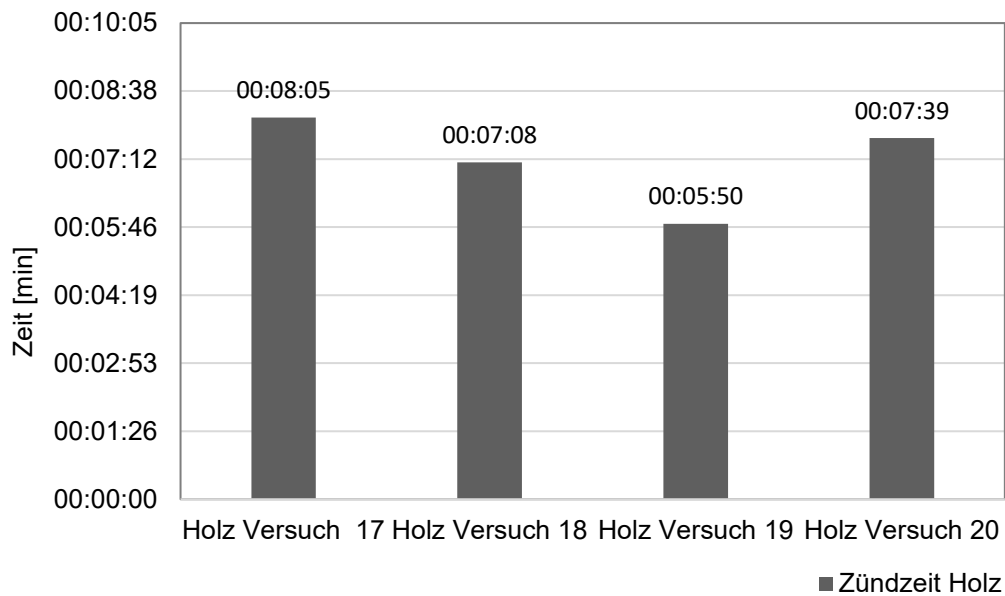


Abbildung 29 Diagramm Zündzeiten der Versuch 17 bis 20 (Eigene Darstellung 2019)

Die obenstehende **Abbildung 29** zeigt die unterschiedlichen Zündzeiten bei den Versuchen 17 bis 20.

6.4 Zusammenfassende Diskussion der Vorversuche

Bei der Durchführung der Vorversuche wurden alle kontrollierbaren Einflussfaktoren konstant gehalten.

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

Aufgrund der gleichen Rahmenbedingungen wurde lediglich mit geringen Abweichungen der Zündzeiten gerechnet. Die Ergebnisse der Vorversuche zeigen jedoch 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 Differenzen der Zündzeiten bei den Versuchen 12,13 und 14,15 sind neben derer der Versuche mit Holz am geringsten.

Abgesehen vom Holz, zeigen die für die Versuche verwendeten Möbel moderner Bauart einen komplexen Aufbau (**Kapitel 3.1 Begriffsbestimmung**).



Abbildung 30 Foto Aufbau eines Möbelstücks
(Eigene Darstellung 2019)

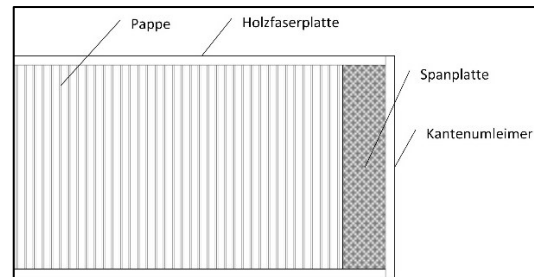


Abbildung 31 Skizze Aufbau eines Möbelstücks
(Eigene Darstellung 2019)

Wie auf den **Abbildungen 30 und 31** zu sehen, besteht die äußerste Schicht der verwendeten Sandwichplatten (**Kapitel 3.13 Sandwichplatten**) an der Ober- und Unterseite aus einer lackierten Holzfaserplatte. 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.

Der komplexe Aufbau der Möbel aus verschiedenen Materialien und die nicht brennenden Kantenumleimer könnten zu einem wesentlichen Teil ursächlich für unterschiedliche Zündzeiten sein. Für diese Theorie sprechen auch die kleineren Differenzen der Zündzeiten bei den Versuchen mit dem Sessel und dem Holz (**Tabelle 13**).

Die Probekörper stellen im Gegensatz zu den oben genannten kontrollierbaren Einflussfaktoren vermutlich den größten schwer kontrollierbaren Einflussfaktor auf die Zündzeit dar.

Holz gleicher Geometrie und Feuchte (Differenz kleiner 1%) wurde als 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.

Unterschiedliche Lagerbedingungen (trocken/feucht) könnten sich ebenfalls auf die Zündzeiten auswirken. Um das zu kompensieren wurde nach Möglichkeit für beide Versuche ein Möbelstück, welches im Vorhinein halbiert wurde verwendet.

Die oben beschriebene Komplexität vieler Probekörper, die konstante Brennerleistung, die geringe Abweichung der Integrale der Temperaturkurven des Brenners sowie die geringe 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 Probekörper für die unterschiedlichen Zündzeiten verantwortlich sind.

Um hierbei zu einem abschließenden Ergebnis zu kommen, müssen weitere Versuche mit Probekörpern durchgeführt werden. Ein sinnvoller Ansatz hierfür könnte sein, eine weitere Untersuchung der Differenzen bei den Zündzeiten von Möbelstücken durchzuführen. Als Zündquelle bei den Versuchen anstelle des Kiesbettbrenners jedoch eine einstellbare, genau definierte Strahlungsquelle (z.B. Keramikstrahler) zu verwenden und die Ergebnisse mit denen dieser Versuchsreihe zu vergleichen.

Nach der Durchführung und Diskussion der Vorversuche folgen im nächsten Kapitel die Großversuche.

7. Großversuche

In diesem Kapitel werden die Großversuche und deren Ergebnisse vorgestellt.

Das Kapitel gliedert sich dabei in:

- Methode Großversuche
- Versuchsaufbau Großversuche
- Ergebnisse Großversuch 1
- Ergebnisse Großversuch 2
- Auswertung Großversuch 1
- Auswertung Großversuch 2
- Vergleich Großversuch 1 und Großversuch 2
- Zusammenfassende Diskussion der Großversuche

Die erhobenen Daten sowie ein Videozuschnitt der Großversuche befinden sich auf der beigefügten CD.

7.1 Methode der Großversuche

Durch die Durchführung von zwei Zimmerbränden unter identischen Bedingungen sollen Abweichungen der Temperaturkurven im Bereich der Brandentstehungsphasen ermittelt werden. Dafür werden beide Zimmerbrände mit den gleichen äußeren Rahmenbedingungen, gleicher Brandlast (Art und Masse), und gleichem Initialbrand durchgeführt. Messtechnisch wird die Temperatur sowie die Massenabnahme erfasst.

In Verbindung mit den Vorversuchen soll im Detail untersucht werden, bis zu welcher prozentualen Abweichung Brandentstehungsphasen bei Großversuchen als reproduzierbar angesehen werden können. Im Zuge dessen soll überprüft werden, ob die angestrebte Abweichung von 15 % als realistisch anzusehen ist.

7.2 Versuchsaufbau Großversuche

Da zwei Zimmerbrände unter identischen Bedingungen durchgeführt werden, ist auch der im Folgenden beschriebene Versuchsaufbau für beide Zimmerbrände identisch. Die Zimmerbrände werden in dem in **Kapitel 3.11 Brandraum der FFB** beschriebenen Brandraum unter den genannten Rahmenbedingungen durchgeführt. Der Brandraum ist mit ca. 316 kg Mobiliar bestückt. Das Mobiliar besteht aus:

Tabelle 14 Mobiliar Brandraum (Tabelle vom Verfasser 2019)

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

Die Möbel sind bei beiden Versuchen gemäß dem Plan (**Abbildung 32**) angeordnet. Der Sessel ist aufgrund der kleinen Differenz zwischen den Zündzeiten bei den Vorversuchen (**Tabelle 13**) 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.

Die **Abbildung 33** zeigt den möblierten Brandraum vor der Zündung.

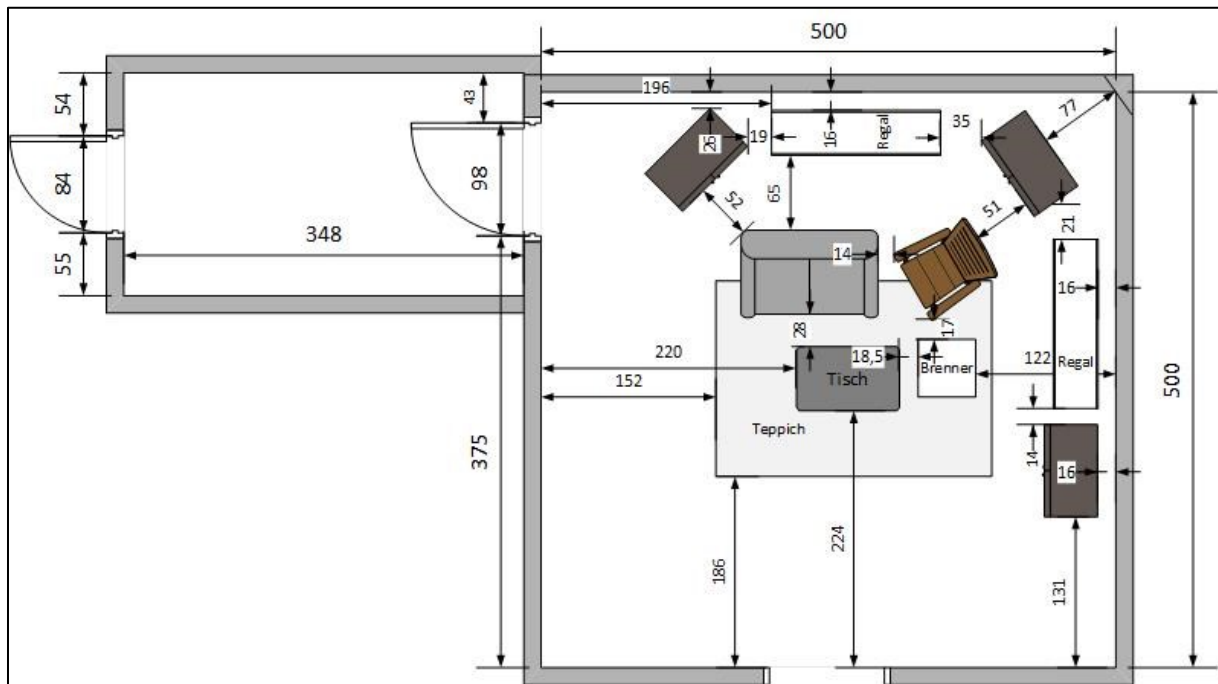


Abbildung 32 Grundriss Brandraum mit Möbeln (Eigene Darstellung 2019)



Abbildung 33 Möblierter Brandraum vor der Zündung (N. Kazakov Karlsruhe 2019)

Zur Bestimmung des Abbrandes liegt der Boden auf einer Waage (**Kapitel 3.10 Messtechnik**) auf. Die Temperatur wird mit 17 Thermoelementen (**Tabelle 15**) des Typ K (**Kapitel 3.10 Messtechnik**) gemessen.

Tabelle 15 Auflistung aller Thermoelemente der Großversuche (Tabelle vom Verfasser 2019)

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

Sowohl die Waage als auch die Thermoelemente sind, wie (**Kapitel 3.10 Messtechnik**) zu entnehmen, mit dem Messprogramm DasyLab verbunden.

Aufgrund des Umfangs der Arbeit werden nur 3 der 17 Thermoelemente ausgewertet. Die Thermoelemente befinden sich an den drei nachfolgenden Positionen im Raum (**Abbildung 34**).

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 „Thermoelement A“ und „Thermoelement C“ erfolgt in den Ecken um mögliche Temperatureinflüsse durch Luftströmungen, welche vor dem Fenster oder in der Mitte des Raumes herrschen könnten zu minimieren. 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.

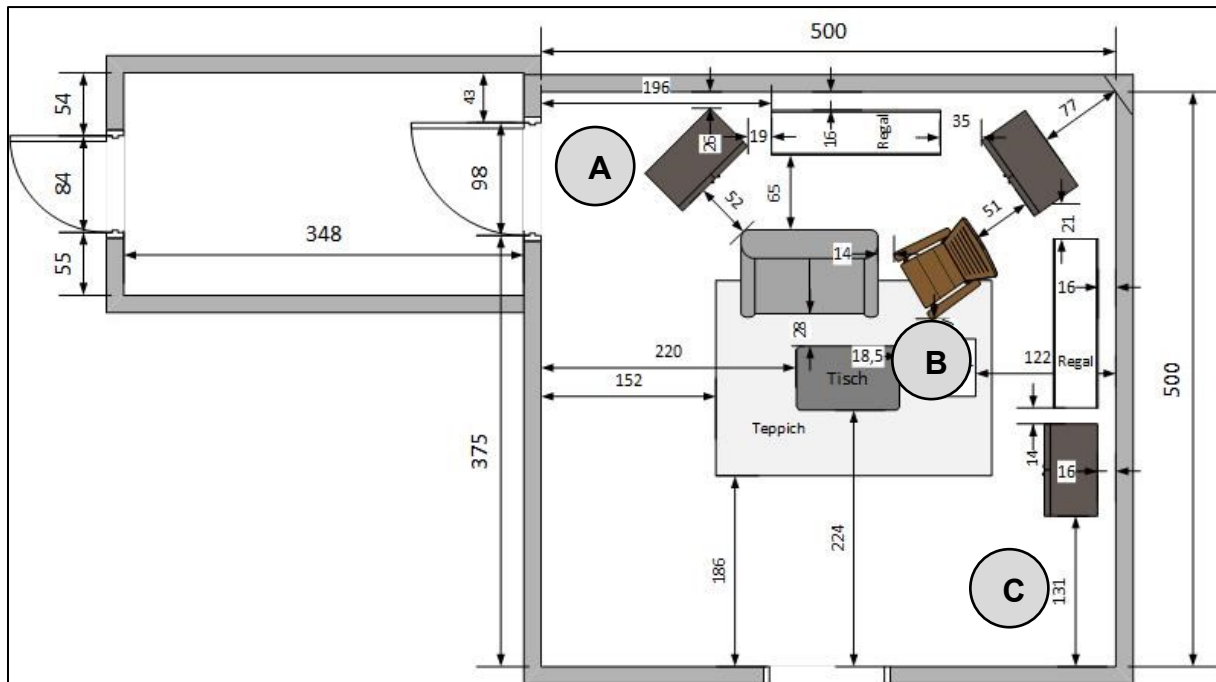


Abbildung 34 Positionen der Thermoelemente Großversuch 1 und 2 (Eigene Darstellung 2019)

Als Initialbrand wird ein Kiesbettbrenner verwendet. Der Kiesbettbrenner wird mit einer Leistung von 141,8 kW betrieben. Die genaue Position des Kiesbettbrenners ist in **Abbildung 32** dargestellt. Die Brenndauer des Kiesbettbrenners beträgt 13 min. Die Entzündung des Brenners erfolgt manuell mit einem Gasbrenner. Der Brandraum wird anschließend sofort verlassen und die Tür geschlossen. In den Brandverlauf wird bis zum vollständigen Abbrand nicht eingegriffen.

7.3 Ergebnisse Großversuch 1

Für Versuch 1 zeigt **Abbildung 35** 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 36** zeigt den Brandraum nach dem Versuch.

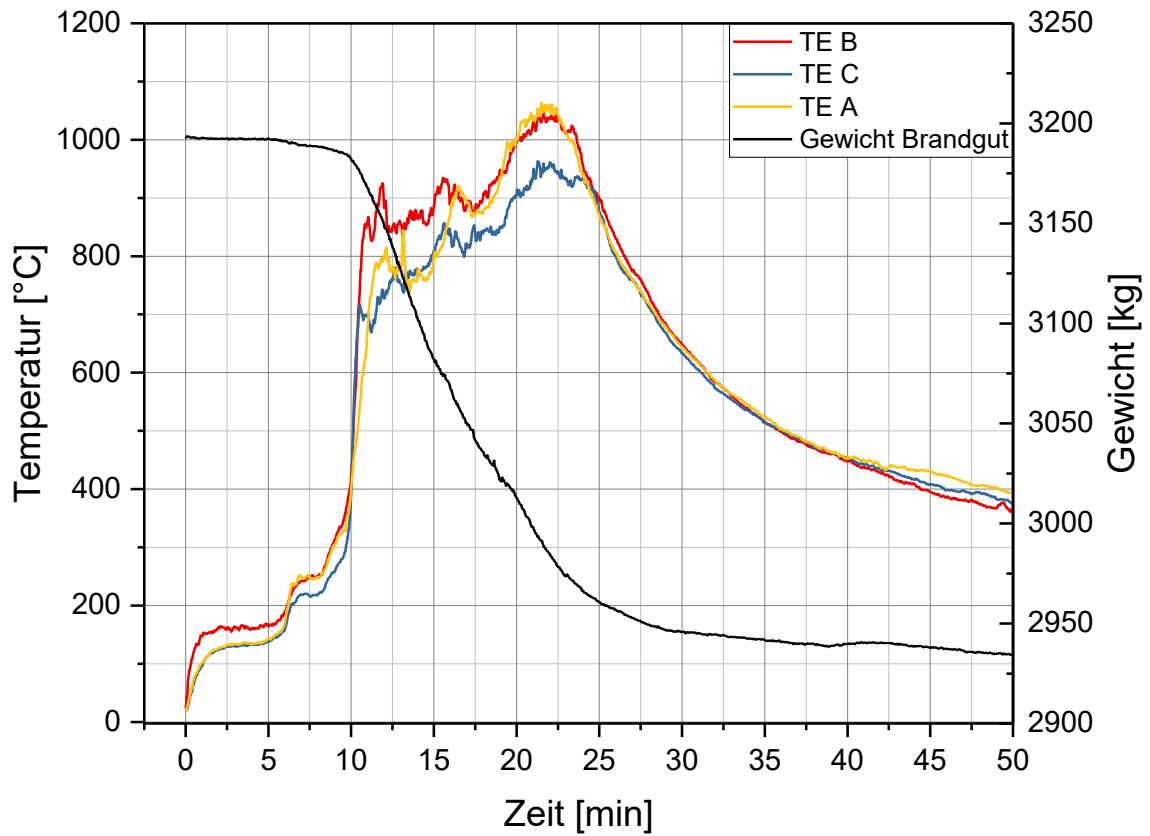


Abbildung 35 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 1 (Eigene Darstellung 2019)



Abbildung 36 Brandraum nach dem Brandversuch (Eigene Darstellung 2019)

7.4 Ergebnisse Großversuch 2

Für Versuch 2 zeigt **Abbildung 37** 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 (TE A) gemessen. Durch den Abbrand fand in dieser Zeit eine Massenabnahme um 237,8 kg statt.

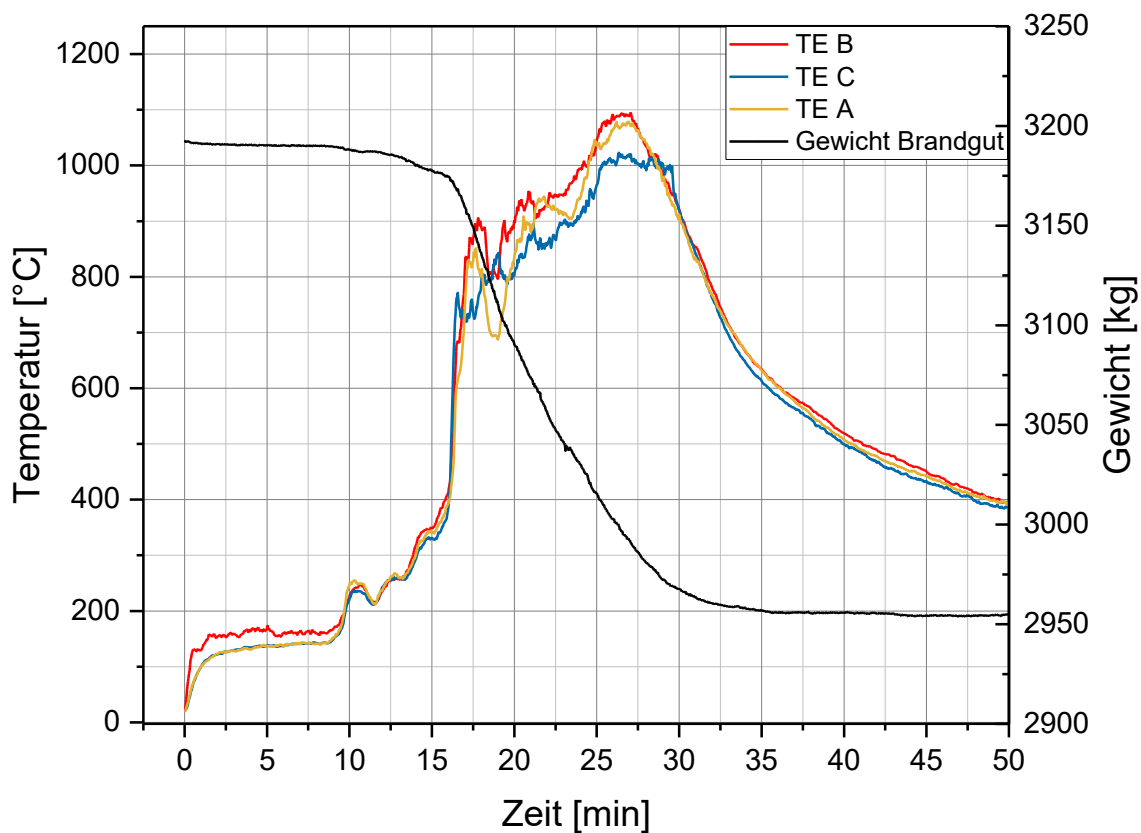


Abbildung 37 Temperaturkurven, Abbrand Großversuch 2 (Eigene Darstellung 2019)

7.5 Auswertung Großversuch 1

Im Folgenden zunächst die Auswertung des ersten Großversuchs.

7.5.1 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 (Augustin 2016, S. 35). Dafür werden auf Basis der Daten aus **Tabelle 4** im Kapitel **3.7 Heizwert/Brennwert/Wärmefreisetzung** 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 16**.

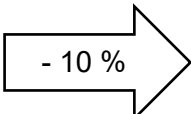
Tabelle 16 Zuordnung Mobiliar zu Gruppen (Tabelle vom Verfasser 2019)

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

Die **Tabelle 17** zeigt die Brennwerte der einzelnen Gruppen und die daraus berechneten Heizwerte. (Augustin 2016, S. 35)

Tabelle 17 Umrechnung Brennwerte zu Heizwerte der Gruppen (Tabelle vom Verfasser 2019)

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:

$$\frac{(24,75 \frac{MJ}{kg} \times 22,1 kg + 28,85 \frac{MJ}{kg} \times 5,8 kg + 16,24 \frac{MJ}{kg} \times 279,3 kg)}{307,2 kg} = 17,09 \frac{MJ}{kg}$$

Mit dem mittleren Heizwert von 17,09 MJ/kg und der Massenabnahme wird die Wärmefreisetzung $[Q] = MJ$ wie folgt abgeschätzt (**Kapitel 3.7**

Heizwert/Brennwert/Wärmefreisetzung):

$$Q = H_U \times m$$

$$Q_{\text{Großversuch 1}} = 17,09 \frac{MJ}{kg} \times 258,2 kg$$

$$Q_{\text{Großversuch 1}} = 4412,6 MJ$$

Die geschätzte Wärmefreisetzung des Großversuchs 2 beträgt 4412,6 MJ.

7.5.2 Phänomene des Brandverlaufs

Die nachfolgende **Tabelle 18** zeigt Phänomene des Brandverlaufs. Die Phänomene werden zeitlich eingeordnet und die Beurteilungsgrundlage wird genannt.

Tabelle 18 Phänomene Großversuch 1 (Tabelle vom Verfasser 2019)

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

7.6 Auswertung Großversuch 2

Im Folgenden die Auswertung des zweiten Großversuchs.

7.6.1 Wärmefreisetzung

Über die Massenabnahme und die Heizwerte einzelner Materialien wird die Wärmefreisetzung von der Zündung bis zur Minute 50 abgeschätzt. Die Rechnung ist dabei identisch zu der aus **Kapitel 7.5 Auswertung Großversuch 1**.

Nur die Massenabnahme ist bei der Berechnung der Wärmefreisetzung des zweiten Großversuchs verändert. Die Wärmefreisetzung berechnet sich demnach wie folgt:

$$Q = H_U \times m$$

$$Q_{\text{Großversuch 2}} = 17,09 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \times 237,8 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{Großversuch 2}} = 4064 \text{ MJ}$$

Die geschätzte Wärmefreisetzung des Großversuchs 2 beträgt 4064 MJ.

7.6.2 Phänomene des Brandverlaufs

Die nachfolgende **Tabelle 19** zeigt Phänomene des Brandverlaufs. Die Phänomene werden zeitlich eingeordnet und die Beurteilungsgrundlage wird genannt.

Tabelle 19 Phänomene Großversuch 2 (Tabelle vom Verfasser 2019)

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

7.7 Vergleich Großversuch 1 und Großversuch 2

Nachfolgend werden die Brandentstehungsphasen beider Großversuche miteinander verglichen.

7.7.1 Kiesbettbrenner

Der Kiesbettbrenner wurde bei beiden Versuchen als Initialbrand verwendet.

Abbildung 38 zeigt die Temperaturverläufe des Thermoelements (TE B), welches bei beiden Versuchen auf einer Höhe von 258 cm direkt über dem Kiesbettbrenner platziert war. Es ist deutlich zu erkennen, dass beide 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.

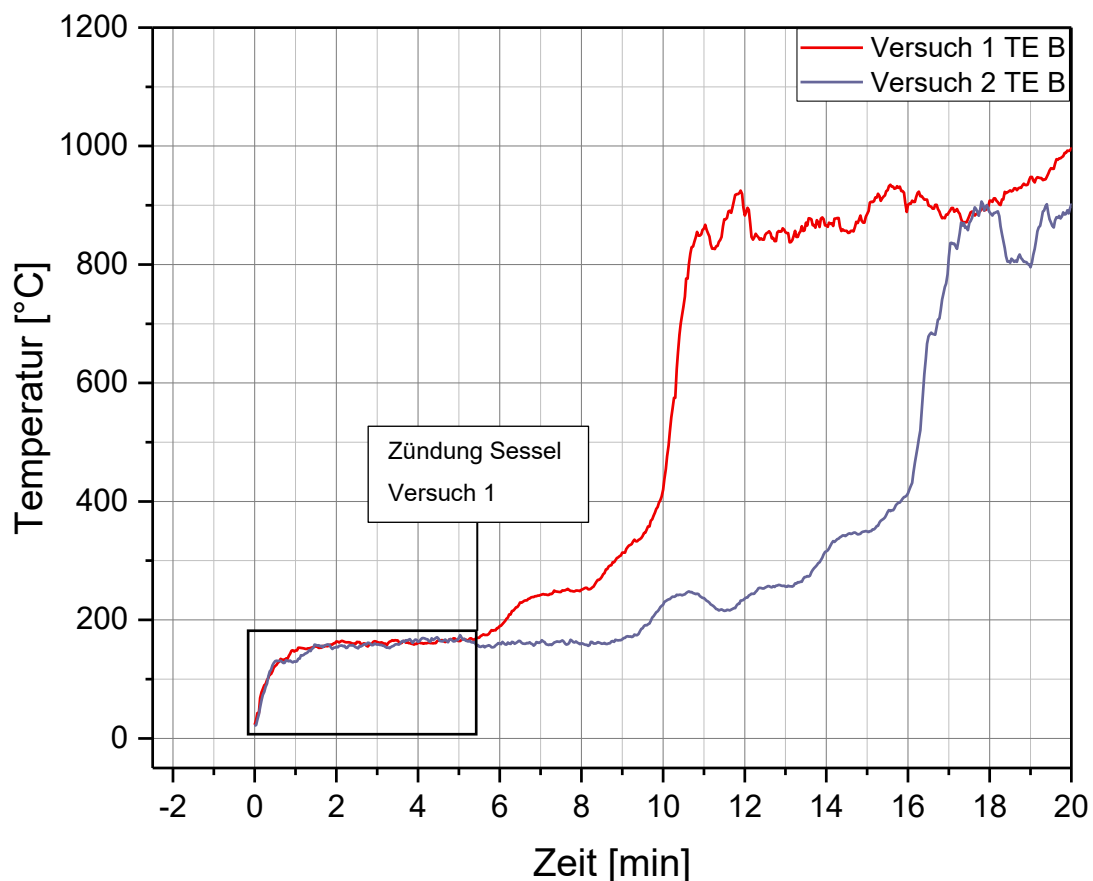


Abbildung 38 Vergleich Temperaturkurven Kiesbettbrenner Versuch 1 und 2 (Eigene Darstellung 2019)

7.7.2 Vergleich der Temperaturverläufe

Abbildung 39 zeigt die in den **Kapiteln 7.3 - und 7.4** Ergebnisse Großversuch 1 und 2 bereits einzeln vorgestellten Temperaturkurven beider Großversuche zusammengefasst in einem Diagramm.

Die Temperaturkurven des ersten Versuchs sind in Rot und Blau dargestellt. Die Temperaturkurven des Zweiten Versuches in Schwarz und Lila.

Die Temperaturkurven beider Versuche weisen 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 Differenz zeigt sich bei der Brenndauer des Kiesbettbrenners. Dieser wurde aufgrund eines 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.

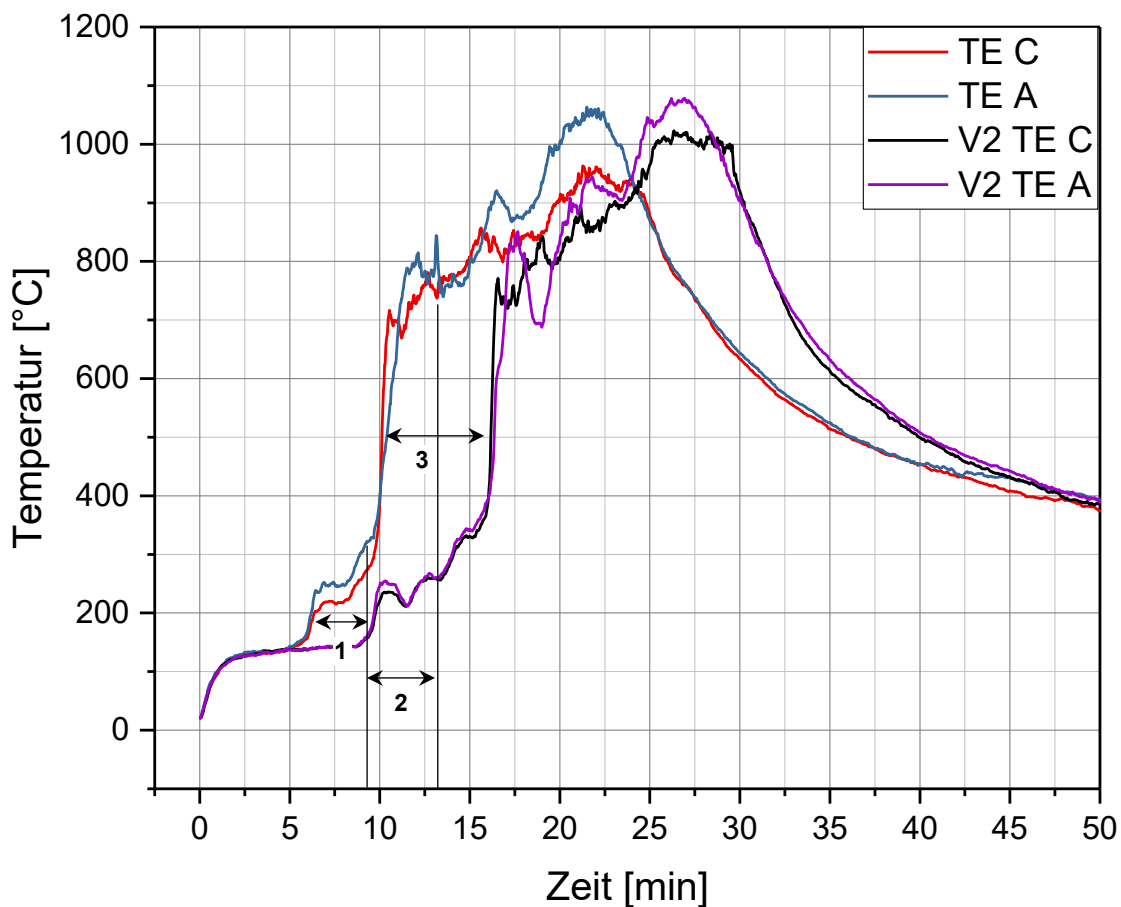


Abbildung 39 Vergleich Temperaturkurven Versuch 1 und 2 (Eigene Darstellung 2019)

In **Tabelle 20** werden die Zeiten von Phänomenen beider Versuche miteinander verglichen.

Tabelle 20 Zeitlicher Vergleich Phänomene Großversuch 1 und 2 (Tabelle vom Verfasser 2019)

Großversuch 1		Großversuch 2		Differenz
Phänomen	Zeit	Phänomen	Zeit	
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)*

* Nummer auf **Abbildung 39**

Aufgrund der Fragestellung der Arbeit wird auf weitere Differenzen nach dem Zeitpunkt des Flashovers nicht eingegangen.

7.8 Zusammenfassende Diskussion der Großversuche

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

Durch einen Fehler bei der Steuerung 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. Da in dieser Phase der Brand erst relativ schwach entwickelt war, wird davon ausgegangen, dass der plötzliche Wegfall von 141,8 kW den Brandverlauf stark beeinflusste.

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, wie auf **Abbildung 40** zu sehen, im Rahmen einer Fehlerfortpflanzung grob zu dieser großen Differenz addierten.

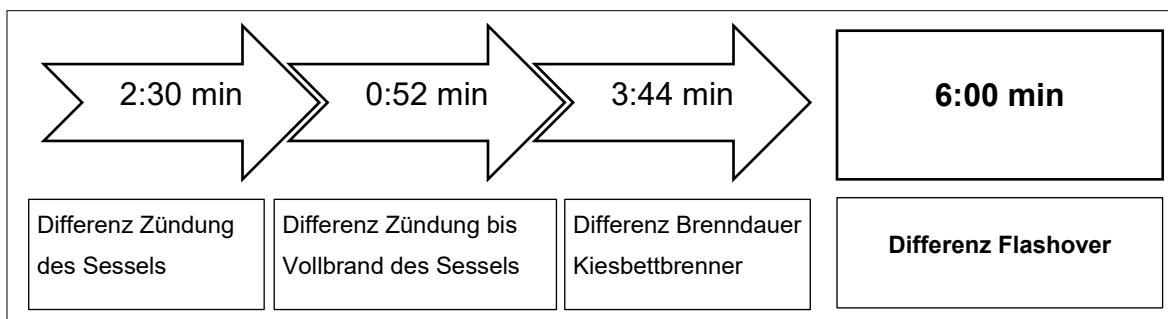


Abbildung 40 Darstellung Addition der einzelnen Differenzen (Eigene Darstellung 2019)

8. Abschließende Diskussion der Versuche

Nach der Durchführung der Vor- und der Großversuche zeichnet sich folgendes Bild:

Die Brandentstehungsphasen der Großversuche, genauer die Zeiten von der Entzündung bis zum Flashover, weisen deutliche Differenzen auf. Der Flashover erfolgte beim zweiten Großversuch 6 min später als bei Großversuch 1. Die Dauer der Brandentstehungsphase unterschied sich also um 6 min. Wie in **Kapitel 7.8 Zusammenfassende Diskussion der Großversuche** bereits beschrieben, kann davon ausgegangen werden dass sich die Differenz im Rahmen einer Fehlerfortpflanzung durch die Addition kleinerer Differenzen ergab.

Aufgrund dieser Differenzen wiesen die Brandentstehungsphasen der Großversuche eine maximale Abweichung von 60 % auf. Das Ziel einer maximalen Abweichung von 15 % konnte im Rahmen der Versuche also nicht erreicht werden.

Bereits die Vorversuche zeigten sehr unterschiedliche Zündzeiten bei gleichen Möbelstücke die unter den gleichen Rahmenbedingungen untersucht wurden. Das setzte sich auch bei den Großversuchen fort. Der Sessel, dessen Zündzeiten bei den Vorversuchen nur eine geringe Differenz aufwiesen, zündete hingegen beim zweiten Großversuch deutlich später als beim ersten. Es wird daher vermutet, dass das verwendete Mobiliar durch seine komplexe Beschaffenheit keine gleichbleibenden Eigenschaften hinsichtlich seines Brandverhaltens aufweist.

Die im Rahmen der Vorversuche gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Reproduzierbarkeit des Initialbrandes zeigten eine Abweichung der Integrale von nur ca. 2% um den Mittelwert (**Kapitel 6.2 Untersuchung des Initialbrandes**). Auch die Auswertung der Temperaturkurven des Kiesbettbrenners beider Großversuche zeigte, dass die Temperaturverläufe bis zum Einfluss anderer Brandlast nahezu identisch waren. Auf der Basis dieser Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass der Kiesbettbrenner eine reproduzierbare Zündquelle darstellt.

Die unterschiedliche Brenndauer des Kiesbettbrenners bei den Großversuchen hatte vermutlich jedoch einen großen Einfluss auf den Brandverlauf.

Zur Beantwortung der Frage welche maximale Abweichung für Brandentstehungsphasen realistisch ist, wird die zeitliche Differenz der Brenndauer des Kiesbettbrenners von der Differenz zwischen den Flashover-Phasen beider Versuche abgezogen. Da die Brenndauer des Kiesbettbrenners einfach beeinflusst werden kann, ist diese Subtraktion für die Beantwortung der Frage problemlos möglich. Die maximale Abweichung beträgt nach dieser Korrektur noch ca. 23 %.

Die weiteren Differenzen, welche bei den Zündzeiten des Sessels auftraten, lassen sich so jedoch nicht korrigieren. Zur Verringerung dieser Differenzen könnten andere Brandlasten, mit gleichmäßigeren Zündzeiten im direkten Umfeld des Brenners platziert werden. Für deren Auswahl und für die genauere Bestimmung einer realistischen Abweichung für reproduzierbare Brandentstehungsphasen müssen jedoch weitere Versuche durchgeführt werden.

Auf Basis der vorliegenden Arbeit erscheint eine maximale Abweichung von ca. 20 % für reproduzierbare Brandentstehungsphasen als realistisch.

9. Fazit und Ausblick

Für die FFB des KIT wurde untersucht, welche Abweichungen bei reproduzierbaren Brandentstehungsphasen zu erwarten sind. Hierfür gliedert sich die Arbeit in drei wesentliche Teile. Die Untersuchung des Initialbrandes, die Untersuchung von Zündzeiten ausgewählter Probekörper und die Untersuchung des Brandverlaufs bei zwei Großversuchen.

Die Untersuchung des Kiesbettbrenners als Initialbrand zeigte, dass sowohl die Temperatur des Kiesbettbrenners bei verschiedenen Versuchen als auch die Temperaturverteilung im Umfeld des Brenners gleichmäßig war. Die Untersuchung der Zündzeiten ausgewählter Probekörper zeigte hingegen, dass die Zeiten bis zur Entzündung, bei gleichen Möbelstücken unter gleichen Bedingungen teilweise stark voneinander abwichen. Die Unberechenbarkeit der Zündzeiten des verwendeten Mobiliars zeigte sich auch bei den durchgeführten Großversuchen. Deren Temperaturverlaufskurven zeigten bis zum Flashover deutliche Abweichungen. So konnte bei den durchgeführten Versuchen die erhoffte maximale Abweichung von 15 % nicht erreicht werden. Eine maximale Abweichung von ca. 20 % erscheint nach der abschließenden Diskussion der Versuche jedoch realistisch.

Für die abschließende Klärung der Frage, ob reproduzierbare Brandentstehungsphasen mit einer Abweichung von 15 % möglich sind bzw. welche prozentuale Abweichung realistisch ist, müssen weitere Versuche durchgeführt werden. Dabei müssen einerseits weitere Versuche zum Brandverhalten von modernem Mobiliar durchgeführt werden. Wobei insbesondere die Zeiten bis zur Entzündung von Möbelstücken sowie die Zeiten von der Zündung bis zum Vollbrand der Möbelstücke untersucht werden sollten. Außerdem muss zur Untersuchung der Brandentstehungsphasen bei Großversuchen mindestens ein weiterer Großversuch mit gleicher Brenndauer des Kiesbettbrenners durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit bilden eine erste Grundlage für die weitere Untersuchung zu dem Thema reproduzierbare Brandentstehungsphasen

Literaturverzeichnis

- Augustin, D. (2016). *Grundlagenuntersuchung zu Schadstoffemissionen und Temperaturverteilung bei Entstehungsbränden im Labormaßstab*. Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. VBT.
- Baehr, H., Stephan, K. (2013). *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- BitSign GmbH (2019). SHKwissen - das umfangreiche SHK-Lexikon. Hg. v. BitSign GmbH. Online verfügbar unter <https://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/Images/laminar-turbolent-MFink.jpg>.
- Blumenstock, J., Schelb, D., Kunkelmann J., Max, D. (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).
- Böckh, P., Wetzel, T. (2014). *Wärmeübertragung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- DIN 1304-1:1994-03. (1994, März). *Formelzeichen; Allgemeine Formelzeichen*.
- DIN 51622:1985-12.(1985, Dezember). *Flüssiggase; Propan, Propen, Butan, Buten und deren Gemische; Anforderungen*.
- DIN V 18599-1:2018-09. (2018, September). *Energetische Bewertung von Gebäuden_ - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung_ - Teil_1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*.

- Drysdale, D. (2011). An Introduction to Fire Dynamics. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Frank, P. (2019). Phasen eines Brandes, 2019.
- Hallenschule (2016). November 2016. Hg. v. Hallenschule, Grundschulverband mit Teilstandort in Ohle. Online verfügbar unter <http://hallenschule.de/wp-content/uploads/2016/12/Verbrennungsdreieck.png>.
- Hering, E., Schönfelder, G. (2012). Sensoren in Wissenschaft und Technik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Herwig, H. (2000). Wärmeübertragung A-Z. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). (ohne Datum). GESTIS-Stoffdatenbank. Wasserstoff. Hg. v. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). Online verfügbar unter http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu, zuletzt geprüft am 07.03.2019.
- Joos, F. (2006). Technische Verbrennung: Springer Berlin Heidelberg.
- Kunkelmann, J. (Oktober 2010). Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen - Teil 1. Forschungsbericht Nr. 149. Hg. v. Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik (149).
- Kurzweil, P. (2015). Chemie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Lange, G. (ohne Datum). Feuer und Flamme. Universität Rostock Institut für Chemie. Online verfügbar unter https://www.didaktik.chemie.uni-rostock.de/fileadmin/uni-rostock/Alle_MNF/Chemie_Didaktik/Forschung/Sekundarstufe_I/6._Feuer_und_Flamme.pdf.
- Menzel, C. (2016). Experimentelle Untersuchung des zeitlichen Temperaturverlaufes und Wärmedurchgangs von Türen bei einseitiger Temperaturbeaufschlagung, konkret bei Bränden in geschlossenen Räumen. Bachelorarbeit. Otto-von Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg. Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik. Online verfügbar unter <https://www.ffb.kit.edu/download/Waermedurchgang%20durch%20Tueren%20bei%20Braenden,%20Bachelorarbeit%20Christoph%20Menzel,%20Sept.%202016.pdf>.
- Kazakov, N. Karlsruhe. (2019). Brandraum FFB vor der Entzündung, 2019.
- Ngongang, A. (2016). Infrarot-Array-Sensoren auf Basis von Thermoelementen. Hg. v. Hüthig GmbH. Online verfügbar unter <https://www.all-electronics.de/infrarot-array-sensoren-auf-basis-von-thermoelementen/>.
- Schneider, U., Hegger, Th. (2007). Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz. 5. Aufl. Renningen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, 531). Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3007821&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- Spurk, J., Aksel, N. (2010). Strömungslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- VDI (2013). VDI-Wärmeatlas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. W. (2001). Verbrennung. Berlin, Heidelberg:
Springer Berlin Heidelberg.

Watikha (ohne Datum). Bunsenbrenner Flamme Gasbrenner Brenner ClipArt -
Bunsen Brenner. Hg. v. kisspng. Online verfügbar unter
<https://banner2.kisspng.com/20180525/qoi/kisspng-bunsen-burner-flame-gas-burner-brenner-clip-art-bunsen-burner-5b0875dba5b970.6931782715272811156788.jpg>.

Werner, U. J. (2004). Bautechnischer Brandschutz. Basel: Birkhäuser Basel.

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

Datenträger

Bachelorthesis Brandversuche mit reproduzierbarer Brandentstehungsphase
(Ordner)

1. Rohdaten (Ordner)
 - a) Brandraum Messdaten Tag 1
 - b) Brandraum Messdaten Tag 2
2. Bearbeitete Daten (Ordner)
 - a) Auswertung der Brennerdaten
 - b) Bearbeitete Daten der Großversuche
3. Bachelorthesis Brandversuche mit reproduzierbarer Brandentstehungsphase
4. Präsentation Thesisvortrag
5. Videozuschnitt der Großversuche