



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Wasser-Umwelt-Bau-Sicherheit

**Experimentelle Untersuchung des zeitlichen Temperaturverlaufes und
Wärmedurchgangs von Türen bei einseitiger Temperaturbeaufschlagung,
konkret bei Bränden in geschlossenen Räumen**

Bachelorarbeit

von

Christoph Menzel

Matrikelnummer: 20122422

Studiengang Sicherheit und Gefahrenabwehr

Aufgabensteller: Prof. Dr.- Ing. Björn Kampmeier

Betreuer: Dipl. Ing. Ilian Dinkov

September 2016



Forschungsstelle für
Brandschutztechnik



Aufgabenstellung der Bachelorarbeit

für Herrn Christoph Menzel

Matrikelnummer: 20122422

Thema: Experimentelle Untersuchung des zeitlichen Temperaturverlaufs und Wärmedurchgangs von Türen bei einseitiger Temperaturbeaufschlagung konkret bei Bränden in geschlossenen Räumen.

Bei Wohnungsbränden gilt ein festgelegter Ablaufplan des Angriffstrupps der Feuerwehr. Dieser beinhaltet auch das Aufspüren eines Brandes und das Abschätzen des Gefährdungspotentials in der betreffenden Wohneinheit. Hierzu dient der sogenannte Handrückentest, um an der jeweiligen Zimmertür herauszufinden, ob in dem dahinterliegenden Raum der Brandherd liegt. Dabei spielt die Türfüllung und -struktur für den Wärmedurchgang eine große Rolle.

Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Brandverhaltens sowie der Wärmedurchgang von zwei handelsüblichen Holztüren mit unterschiedlichen Füllungen und einer Stahltür.

Die Arbeit soll in folgenden Teilschritten durchgeführt werden:

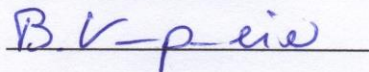
- 1) Einführung in Wärmeübertragungsmechanismen von Bränden, sowie eine Literaturrecherche über Türen, Türfüllungen und deren Materialien.
- 2) Aufbau eines Versuchsstandes, Kalibrierung der Messtechnik und die Bestimmung der notwendigen Versuchsrandbedingungen.
- 3) Experimentelle Untersuchung des Brandverhaltens und Wärmedurchgangs von zwei unterschiedlichen handelsüblichen Holztüren und einer Stahltür mittels folgender Wärmeübertragungsmechanismen:
 - a) Heißluftgebläse (reine Konvektion)
 - b) Thermischer Strahler (reine Wärmestrahlung)
 - c) Gasbrenner (Kiesbettbrenner, realitätsnahe Brandbelastung)
- 4) Vergleich der Versuchsergebnisse mit einem Wohnzimmervollbrand.
- 5) Diskussion und Bewertung der Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Arbeit sind in schriftlicher und digitaler Form abzugeben. Die Arbeit beinhaltet die Erstellung eines A0-Posters zu den Ergebnissen.

Beginn der Arbeit: 01.07.2016

Abgabe der Arbeit: 23.09.2016

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. B. Kampmeier



Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Ilian Dinkov

Unterschrift verantwortlicher Hochschullehrer

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Name: _____

Ort, Datum _____

Unterschrift: _____

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse	I
Gleichungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	V
Diagrammverzeichnis	VI
1. Zielsetzung und Motivation	1
2. Grundlagen	2
2.1 Brände	2
2.1.1 Physikalische Eigenschaften	2
2.1.2 Einsatztaktische Vorgehensweise der Feuerwehr	5
2.1.3 Wärmetransportmechanismen bei Bränden	6
2.1.4 Beflammungsarten	6
2.2 Türen	8
2.2.1 Türfüllungen und deren Materialien	8
2.2.2 Innentüren Oberfläche sowie Flammschutzmittel	9
2.2.3 Prüfmethode von Bauteilen und Baustoffen	15
2.3 Grundlagen der Wärmeübertragung	18
2.3.1 Konvektion	18
2.3.2 Wärmestrahlung	18
2.3.3 Wärmeleitung	20
2.3.3.1 stationäre Wärmeleitung	21
2.3.3.2 instationäre Wärmeleitung	22
3. Versuchsaufbau	24
3.1 Versuchsaufbau: Wärmeerzeuger und Messtechnik	24
3.1.1 Versuchsstände	24
3.1.2 Wärmequellen	26
3.1.3 Messtechnik und Kalibrierung	26
3.2 Probestücke	30
3.2.1 Holztür mit Wabenfüllung	30
3.2.2 Holztür mit Röhrenspaneinlage	30
3.2.3 Stahltür	31

4. Versuche	32
4.1 Reproduzierbarkeit der Versuche	34
4.2 Versuchsergebnisse	37
4.2.1 Wabenfüllung	38
4.2.1.1 Heißluftgebläse	38
4.2.1.2 Thermischer Strahler	39
4.2.1.3 Kiesbettbrenner	40
4.2.1.4 Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten	42
4.2.2 Röhrenspaneinlage	43
4.2.2.1 Heißluftgebläse	43
4.2.2.2 Thermischer Strahler	44
4.2.2.3 Kiesbettbrenner	45
4.2.2.4 Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten	47
4.2.3 Stahltür	48
4.2.3.1 Heißluftgebläse	48
4.2.3.2 Thermischer Strahler	49
4.2.3.3 Kiesbettbrenner	50
4.2.3.4 Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten	51
4.3 Wohnzimmerbrand	52
4.3.1 Versuchsergebnisse	54
5. Vergleich der Ergebnisse	63
6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	67
7. Fazit und Ausblick	74
7.1 Fazit für die Forschung und deren Ausblick	74
7.2 Fazit für die Feuerwehr	75
8. Anhang	77
Literaturverzeichnis	78

Verzeichnisse

Gleichungsverzeichnis

(GLEICHUNG 1)	3
(GLEICHUNG 2)	6
(GLEICHUNG 3)	19
(GLEICHUNG 4)	19
(GLEICHUNG 5)	20
(GLEICHUNG 6)	20
(GLEICHUNG 7)	21
(GLEICHUNG 8)	21
(GLEICHUNG 9)	21
(GLEICHUNG 10)	21
(GLEICHUNG 11)	21
(GLEICHUNG 12)	22
(GLEICHUNG 13)	22
(GLEICHUNG 14)	22
(GLEICHUNG 15)	23
(GLEICHUNG 16)	23
(GLEICHUNG 17)	27
(GLEICHUNG 18)	28
(GLEICHUNG 19)	54
(GLEICHUNG 20)	67
(GLEICHUNG 21)	67

(REAKTIONSGLEICHUNG 1)	13
(REAKTIONSGLEICHUNG 2)	13
(REAKTIONSGLEICHUNG 3)	13
(REAKTIONSGLEICHUNG 4)	13
(REAKTIONSGLEICHUNG 5)	13
(REAKTIONSGLEICHUNG 6)	13

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: BRANDDREIECK NACH H.W. EMMONS [5]	2
ABBILDUNG 2: BRANDVERLAUFSKURVE EINES NATÜRLICHEN FEUERS ÜBER DIE ZEIT [7]	4
ABBILDUNG 3: GEOMETRISCHE DARSTELLUNG DER BEFLAMMUNGSARTEN [10]	7
ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER RÖHRENSPANSTEGSTREIFEN [11]	8
ABBILDUNG 5: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER VOLLSPAN FÜLLUNG [11]	8
ABBILDUNG 6: STABVERLEIMTE HOLZTÜR [12]	9
ABBILDUNG 7: SCHICHTVERLEIMTE HOLZTÜR [12]	9
ABBILDUNG 8: SCHEMATISCHER AUFBAU EINER FURNIEROBERFLÄCHE [14]	10
ABBILDUNG 9: BEISPIELHAFT DARSTELLUNG UNTERSCHIEDLICHER DEKORFOLIEN [15]	10
ABBILDUNG 10: AUFBAU EINER LACKIERTEN TÜROBERFLÄCHE MIT UV- GEHÄRTETEM LACK [14]	11
ABBILDUNG 11: SCHEMATISCHER AUFBAU EINER CPL-OBERFLÄCHE [16]	11
ABBILDUNG 12: UNTERSCHIEDLICHEN SCHICHTEN EINER HPL-TÜR [14]	12
ABBILDUNG 13: EINHEITSTEMPERATURZEITKURVE [21]	16
ABBILDUNG 14: AUSSCHNITT DES WELLENSPEKTRUMS ELEKTROMAGNETISCHER STRAHLUNG [25]	18
ABBILDUNG 15: DARSTELLUNG DER REFLEKTION IN EINEM SCHWARZEN KÖRPER [27]	19
ABBILDUNG 16: EBENE PLATTE DER DICKE S MIT OBERFLÄCHENTEMPERATUREN UND BEIDSEITIGEM WÄRMEÜBERGANG [29]	21
ABBILDUNG 17: INSTATIONÄRE AUFHEIZUNG EINER HALBUNENDLICHEN PLATTE ($T_1 < T_2 < T_3$) [23]	22
ABBILDUNG 18: SKIZZE DES VERSUCHSSTANDES MIT HEIßLUFTGEBLÄSE	25
ABBILDUNG 19: SKIZZE DES VERSUCHSSTANDES MIT DER STRAHLWAND	25
ABBILDUNG 20: SKIZZE DES VERSUCHSSTANDES IM BRANDRAUM MIT DEN KIESBETTBRENNERN	25
ABBILDUNG 21: HEIßLUFTGEBLÄSE	26
ABBILDUNG 22: THERMISCHER STRAHLER	26
ABBILDUNG 23: KIESBETTBRENNER	26
ABBILDUNG 24: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES THERMOELEMENTS [32]	27
ABBILDUNG 25: WÄRMEFLUSSAUFNEHMER DES TYPUS GARDON GAUGE MIT WASSER-KOPPLUNG	27
ABBILDUNG 26: BILD DER DREI-PERLENSONDE	28
ABBILDUNG 27: SCREENSHOT DER DATENERFASSUNG ÜBER DAS MESSPROGRAMMS DASYLAB [36]	29
ABBILDUNG 28: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER TÜR MIT WABENFÜLLUNG [11]	30
ABBILDUNG 29: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER INNENTÜR MIT RÖHRENSPANEINLAGE [11]	31
ABBILDUNG 30: BILD DER VERWENDETEN STAHLTÜR MAßE: 80 CM X 80 CM	31
ABBILDUNG 31: BILD DES INNENLEBENS DER STAHLTÜR, TÜRLATTENTIEFE 4 CM	31
ABBILDUNG 32: SCREENSHOT MESSPROGRAMM DASYLAB, THERMOELEMENTE FLAMMENZUGEWANDTE SEITE	32

Verzeichnisse

ABBILDUNG 33: SCREENSHOT MESSPROGRAMM DASYLAB, THERMOELEMENTE FLAMMENABGEWANDTE SEITE	32
ABBILDUNG 34: SCHEMATISCHE SKIZZE DER TÜRBLATTSTÄRKE, ANORDNUNG DER THERMOELEMENTE IM INNEREN DER TÜR	33
ABBILDUNG 35: VERSUCH 18, T1- T9, WABENFÜLLUNG, FLAMMENZUGGEWANDTE SEITE, KIESBETTBRENNER	34
ABBILDUNG 36: VERSUCH 19, T1- T9, WABENFÜLLUNG, FLAMMENZUGGEWANDTE SEITE, KIESBETTBRENNER	34
ABBILDUNG 37: VERSUCH 18, T10-18, WABENFÜLLUNG, FLAMMENABGEWANDTE SEITE, KIESBETTBRENNER.....	35
ABBILDUNG 38: VERSUCH 19, T10- T18, WABENFÜLLUNG, FLAMMENABGEWANDTE SEITE, KIESBETTBRENNER	35
ABBILDUNG 39:VERSUCH 18, T19- T21, WABENFÜLLUNG, KIESBETTBRENNER	36
ABBILDUNG 40: VERSUCH 19, T19- T21, WABENFÜLLUNG, KIESBETTBRENNER	36
ABBILDUNG 41: ANORDNUNG DER THERMOELEMENTE FLAMMENZUGGEWANDTE SEITE	37
ABBILDUNG 42: ANORDNUNG DER THERMOELEMENTE FLAMMENABGEWANDTE SEITE.....	37
ABBILDUNG 43: VERSUCHSBILD, HEIßLUFTGEBLÄSE UND WABENFÜLLUNG.....	38
ABBILDUNG 44: VERSUCHSBILD, SRAHLWAND UND WABENFÜLLUNG	39
ABBILDUNG 45: VERSUCHSBILD, KIESBETTBRENNER UND WABENFÜLLUNG	41
ABBILDUNG 46: ZWEIDIMENSIONALE, INTERPOLIERTE DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG NACH 30 MINUTEN, WABENFÜLLUNG, BESTRAHLTE SEITE	42
ABBILDUNG 47: ZWEIDIMENSIONALE, INTERPOLIERTE DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG NACH 30 MINUTEN, WABENFÜLLUNG, RÜCKSEITE	42
ABBILDUNG 48: VERSUCHSBILD, HEIßLUFTGEBLÄSE UND RÖHRENSPANEINLAGE.....	43
ABBILDUNG 49: VERSUCHSBILD, THERMISCHER STRAHLER UND RÖHRENSPANEINLAGE	44
ABBILDUNG 50: VERSUCHSBILD DER KIESBETTBRENNER MIT EINER GESAMTLEISTUNG VON 200 KW	45
ABBILDUNG 51: ZWEIDIMENSIONALE, INTERPOLIERTE DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG NACH 30 MINUTEN, RÖHRENSPANEINLAGE, BESTRAHLTE SEIT	47
ABBILDUNG 52: ZWEIDIMENSIONALE, INTERPOLIERTE DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG NACH 30 MINUTEN, RÖHRENSPANEINLAGE, RÜCKSEITE.....	47
ABBILDUNG 53: VERSUCHSBILD, HEIßLUFTGEBLÄSE UND STAHLTÜR	48
ABBILDUNG 54: VERSUCHSBILD, THERMISCHER STRAHLER UND STAHLTÜR	49
ABBILDUNG 55: VERSUCHSBILD, KIESBETTBRENNER UND STAHLTÜR.....	50
ABBILDUNG 56: ZWEIDIMENSIONALE DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG NACH 30 MINUTEN, STAHLTÜR, BESTRAHLTE SEITE	51
ABBILDUNG 57: ZWEIDIMENSIONALE DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG NACH 30 MINUTEN, STAHLTÜR, RÜCKSEITE	51
ABBILDUNG 58: SKIZZENHAFTES DARSTELLUNG DES WOHNZIMMER VERSUCHSRAUMES	52
ABBILDUNG 59: GEÄNDERTE ANORDNUNG DER THERMOELEMENTE FÜR DEN GROßBRANDVERSUCH	53
ABBILDUNG 60:ENTZÜNDUNG DER MÖBEL T = 0 SEKUNDEN	57

Verzeichnisse

ABBILDUNG 61: VOLLBRAND DER WOHNWAND NACH 5:20 MIN.	57
ABBILDUNG 62: ENTZÜNDUNG DER COUCH NACH 9 MIN.	57
ABBILDUNG 63: ENTZÜNDUNG DER UMLIEGENDEN MÖBEL NACH 10:25 MIN.	57
ABBILDUNG 64: UNVOLLSTÄNDIGE VERBRENNUNG DURCH DAS BRENNENDE SOFA NACH 13 MINUTEN	57
ABBILDUNG 65: DURCHBRAND DER TÜR NACH 14 MINUTEN	57
ABBILDUNG 66: ZERSTÖRUNG DES TÜRBLATTES UND ERNEUTER SAUERSTOFFEINTRITT IN DEN BRANDRAUM NACH 16 MINUTEN	58
ABBILDUNG 67: RAUCHGASDURCHZÜNDUNG AUFGRUND FRISCHLUFTZUFUHR NACH 16:52 MINUTEN	58
ABBILDUNG 68: VERGLEICH DER TÜREN, HEIßLUFTGEBLÄSE, BESTRAHLTE SEITE	64
ABBILDUNG 69: VERGLEICH DER TÜREN, HEIßLUFTGEBLÄSE, RÜCKSEITE	64
ABBILDUNG 70: VERGLEICH DER TÜREN, THERMISCHER STRAHLER, BESTRAHLTE SEITE	65
ABBILDUNG 71: VERGLEICH DER TÜREN, THERMISCHER STRAHLER, RÜCKSEITE	65
ABBILDUNG 72: VERGLEICH DER TÜREN, KIESBETTBRENNER, BESTRAHLTE SEITE	66
ABBILDUNG 73: VERGLEICH DER TÜREN, KIESBETTBRENNER, RÜCKSEITE	66
ABBILDUNG 74: BESTRAHLUNGSSTÄRKEN UNTERSCHIEDLICHER MATERIALIEN.....	77

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: FESTER BRENNSTOFF [9] 6

TABELLE 2: FLÜSSIGER BRENNSTOFF [9] 7

TABELLE 3: GASFÖRMIGER BRENNSTOFF, DIREKTER ENERGIEEINTRAG [9] 7

TABELLE 4: ÜBERBLICK VON FLAMMSCHUTZMITTELN [17]..... 14

TABELLE 5: EINTEILUNG DER FEUERWIDERSTANDSKLASSEN [20] 15

TABELLE 6: ÜBERSICHT DER UNTERSCHIEDLICHEN BAUSTOFFKLASSEN [20] 16

TABELLE 7: TEMPERATURLEITZAHLEN UNTERSCHIEDLICHER STOFFE 23

TABELLE 8: HEIZWERTE UNTERSCHIEDLICHER MATERIALIEN 54

TABELLE 9, ERRECHNETE WÄRMEFREISETZUNGSRATE 54

TABELLE 10: VERGLEICH DER TEMPERATUREN, KIESBETTBRENNER UND WOHNZIMMERBRAND 62

TABELLE 11: ZEITLICHE ERHÖHUNG DER TEMPERATUR AUF DER RÜCKSEITE VON 1°C UND 5 °C..... 63

TABELLE 12: ÜBERSICHT DER UNTERSCHIEDLICHEN WÄRMELEITFÄHIGKEITSKOEFFIZIENTEN [9] 67

TABELLE 13: BERECHNETE WÄRMESTRÖME DER DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHE 67

TABELLE 14:, ERRECHNETE THERMISCHE WIDERSTÄNDE, EINDIMENSIONALE BETRACHTUNG 77

Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 1: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, HEIßLUFTGEBLÄSE / WABENFÜLLUNG	38
DIAGRAMM 2: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, HEIßLUFTGEBLÄSE/ WABENFÜLLUNG	38
DIAGRAMM 3: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, THERMISCHER STRAHLER / WABENFÜLLUNG	39
DIAGRAMM 4: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, THERMISCHER STRAHLER / WABENFÜLLUNG	39
DIAGRAMM 5: TEMPERATURVERLÄUFE ÜBER DER FLAMME IM BRANDVERSUCHSRAUM.....	40
DIAGRAMM 6 :TEMPERATURVERTEILUNG IM RAUM	40
DIAGRAMM 7: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG MESSERGEBNISSES DER VORDERSEITE, KIESBETTBRENNER / WABENFÜLLUNG	41
DIAGRAMM 8: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, KIESBETTBRENNER / WABENFÜLLUNG	41
DIAGRAMM 9: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, RÖHRENSPANEINLAGE / HEIßLUFTGEBLÄSE ..	43
DIAGRAMM 10: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, RÖHRENSPANEINLAGE / HEIßLUFTGEBLÄSE	44
DIAGRAMM 11: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, RÖHRENSPANEINLAGE / THERMISCHER STRAHLER	44
DIAGRAMM 12: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, RÖHRENSPANEINLAGE / THERMISCHER STRAHLER	45
DIAGRAMM 13: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, RÖHRENSPANEINLAGE / KIESBETTBRENNER	45
DIAGRAMM 14: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, RÖHRENSPANEINLAGE / GASBRENNER.....	46
DIAGRAMM 15: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, STAHLTÜR / HEIßLUFTGEBLÄSE	48
DIAGRAMM 16: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, STAHLTÜR / HEIßLUFTGEBLÄSE.....	48
DIAGRAMM 17 ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, STAHLTÜR/ THERMISCHER STRAHLER	49
DIAGRAMM 18: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, STAHLTÜR / THERMISCHER STRAHLER	49
DIAGRAMM 19: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER VORDERSEITE, STAHLTÜR / KIESBETTBRENNER	50
DIAGRAMM 20: ZEITLICHE TEMPERATURVERTEILUNG DER RÜCKSEITE, STAHLTÜR / KIESBETTBRENNER	50
DIAGRAMM 21: MESSUNG DER ABGASTEMPERATUREN , 5 CM UNTERHALB DER DECKE	55
DIAGRAMM 22: ERGEBNIS DER RAUCHGASMESSUNG	56
DIAGRAMM 23: ZEITLICHER TEMPERATURVERLAUF DES WOHNZIMMERBRAND, FLAMMENZUGEWANDTE SEITE.....	58
DIAGRAMM 24: ZEITLICHER TEMPERATURVERLAUF WOHNZIMMERBRAND, RÜCKSEITE	59
DIAGRAMM 25: ZEITLICHER TEMPERATURVERLAUF WOHNZIMMERBRAND, ELEMENTE IN DER TÜR	59
DIAGRAMM 26: ENTSTEHUNGSBRANDPHASE WOHNZIMMERBRAND, FLAMMENZUGEWANDTE SEITE.....	60
DIAGRAMM 27: ENTSTEHUNGSBRANDPHASE WOHNZIMMERBRAND, FLAMMENABGEWANDTE SEITE.....	61
DIAGRAMM 28: ENTSTEHUNGSBRANDPHASE WOHNZIMMERBRAND, INNENLIEGENDE THERMOELEMENTE	61
DIAGRAMM 29: TEMPERATURVERLÄUFE IN DER TÜR, WABENFÜLLUNG UND HEIßLUFTGEBLÄSE	68
DIAGRAMM 30: KORRIGIERTE GASTEMPERATUR UND TEMPERATURVERLÄUFE IN DER TÜR, WABENFÜLLUNG UND THERMISCHER STRAHLER	69

Verzeichnisse

DIAGRAMM 31: TEMPERATURVERLÄUFE IN DER TÜR, WABENFÜLLUNG UND GASBRENNER.....	69
DIAGRAMM 32: TEMPERATURVERLAUF IN DER TÜR, RÖHRENSPANEINLAGE UND HEIßLUFTGEBLÄSE	70
DIAGRAMM 33: KORRIGIERTE GASTEMPERATUR UND TEMPERATURVERLAUF IN DER TÜR, RÖHRENSPANEINLAGE UND THERMISCHER STRAHLER.....	71
DIAGRAMM 34, TEMPERATURVERLAUF IN DER TÜR, RÖHRENSPANEINLAGE UND GASBRENNER	71
DIAGRAMM 35: TEMPERATURVERLAUF IN DER TÜR, STAHLTÜR UND HEIßLUFTGEBLÄSE	72
DIAGRAMM 36: KORRIGIERTE GASTEMPERATUR UND TEMPERATURVERLAUF IN DER TÜR, STAHLTÜR UND THERMISCHER STRAHLER	72
DIAGRAMM 37: TEMPERATURVERLAUF IN DER TÜR, STAHLTÜR UND GASBRENNER	73

1. Zielsetzung und Motivation

In Baden-Württemberg ergaben sich 2014, 124.031 Einsätze für Berufs-, Werk-, und Freiwillige Feuerwehren. Davon waren 18.230 Brandeinsätze zu verzeichnen [1].

Mittlerweile geht man in Deutschland von 200.000 Wohnungsbränden pro Jahr aus. Hierfür gilt ein festgelegter Ablaufplan des Angriffstrupps der Feuerwehr. Dieser beinhaltet neben dem Aufspüren und der Bekämpfung des Brandes auch das Abschätzen der Gefährdungspotentiale in den betreffenden Wohneinheiten [2]. Das taktische Vorgehen der Feuerwehr wird in Kapitel 2.1.2 detaillierter aufgeführt.

Bei unklarem Brandort dient der Handrückentest der Feuerwehr schnellstmöglich herauszufinden welcher Raum bereits am Brandgeschehen teilnimmt. Bei diesem Test wird der Handrücken auf der äußeren Türblattoberfläche von unten nach oben geführt. Wird dabei eine erhöhte Temperatur festgestellt, kann dies als Hinweis auf einen Brand im dahinter liegenden Raum gewertet werden.

Bezüglich der Brandausbreitung ist anzunehmen, dass die Türfüllung und -struktur für den Wärmedurchgang eine wichtige Rolle spielt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des zeitlichen Temperaturverhaltens und des Wärmedurchganges von 2 handelsüblichen Holztüren mit einer Wabenfüllungen, einer Röhrenspaneinlage sowie einer Stahltür im Realmaßstab. Hierzu werden die Komponenten einer Flamme in Konvektion und Strahlung aufgeteilt und im Einzelnen untersucht. Beide Wärmetransportmechanismen werden bei weiteren Versuchen in Form von zwei Kiesbettbrennern wieder zusammengeführt.

Diese Ergebnisse werden weiterhin mit einem Wohnzimmervollbrand im Realmaßstab verglichen.

Des Weiteren können die gewonnenen Ergebnisse als Randbedingungen für numerische Brand – und Rauchgassimulationen verwendet werden.

Inhalt und Aufbau

Die Aufteilung der Arbeit gliedert sich in 7 Kapitel.

Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 verbrennungstechnische Grundlagen, Grundlagen der Wärmeübertragung sowie die Einsatztaktische Vorgehensweise der Feuerwehr behandelt.

Kapitel 3 befasst sich mit der Vorstellung der verwendeten Wärmeerzeuger, Probestücke und Messtechniken.

Die durchgeführten Versuche werden in Kapitel 4 näher erläutert und die gewonnenen Ergebnisse dargestellt. In Kapitel 5 erfolgt deren Vergleich.

Die letzten beiden Kapitel befassen sich mit der Bewertung und Diskussion der Ergebnisse sowie einem forschungsorientierten und einem feuerwehrtechnischen Fazit.

2. Grundlagen

2. Grundlagen

2.1 Brände

Das folgende Kapitel widmet sich den Grundlagen einer Verbrennung beziehungsweise eines Brandes. Diese werden durch die physikalischen Eigenschaften einer Verbrennung, den technischen Grundlagen im Feuerwehreinsatz, die bei einem Brand vorhandenen Wärmetransportmechanismen und verschiedenen Beflammungsarten dargestellt.

2.1.1 Physikalische Eigenschaften

Die schnelle, sich selbst unterhaltende Oxidation von Brennstoffen unter Abgabe von Wärme und Licht wird im Allgemeinen als Verbrennung betitelt. Hierbei handelt es sich um eine exotherme Reaktion. Das Gebiet in dem schwerpunktmäßig die chemische Umsetzung stattfindet wird als Flamme bezeichnet. Diese kann stark in Ihrer Struktur, Größe und der Temperatur variieren, bedingt durch die tatsächliche Umsetzung die sich in ihr abspielt. Als Brand benennt man ein unerwünschtes Schadfeuer [3].

Für eine Zündung müssen zusätzlich zu dem richtigen Mischungsverhältnis drei weitere Voraussetzungen erfüllt sein:

- Vorhandensein von brennbarem Stoff (Flüssig, Fest oder Gasförmig)
- Vorhandensein eines Oxidationsmittels
- Eine Zündquelle, die in der Lage ist das brennbare System zu entzünden [4].

Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zeigt Abbildung 1.

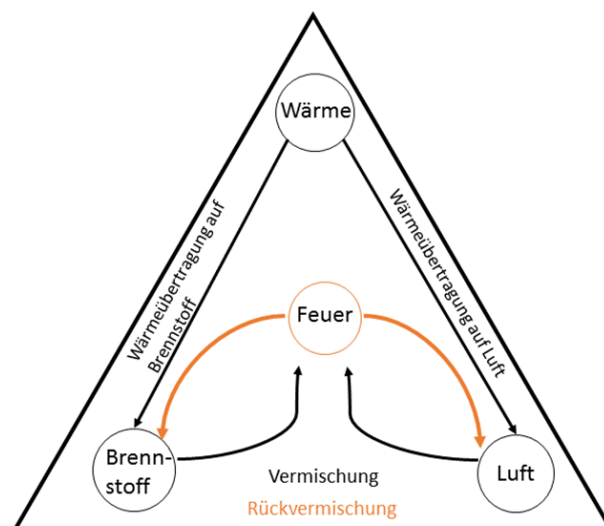


Abbildung 1: Branddreieck nach H.W. Emmons [5]

2. Grundlagen

Die drei dargestellten Komponenten können durch eine Vielzahl von Variablen beeinflusst werden. Folglich sind Brände als äußerst komplex zu beschreiben.

- Wärme kann durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung zugeführt werden. Wichtig für die Aufrechterhaltung eines Brandes sind Temperatur, Intensität und Einwirkungsdauer der Wärmezufuhr.
- Der als Oxidationsmittel genutzte Sauerstoff muss durch ausreichende Ventilation dem Brand zugeführt werden.
- Die Art des Brennstoffes beeinflusst den Brand vielfältig. Einige Brennstoffe sind im Vergleich mit technischen Feuern inhomogen und verbrennen dadurch nicht optimal [5].

Zur Einleitung eines Verbrennungsvorganges muss dem Gemisch aus Brennstoff und Oxidationsmittel, Energie in Form von Wärme zugeführt werden. Zu erwähnen ist hierbei, dass es sich um eine externe Energiequelle, wie z.B. Streichhölzer, Feuerzeug oder auch einen elektrischen Funken handelt. In Folge dessen bilden sich reaktionsfreudige Radikale welche ihrerseits für die Aufrechterhaltung der Verbrennung verantwortlich sind.

λ_L ist dabei die sogenannte Luftzahl und beschreibt den dimensionslosen Quotienten zwischen der zur Verfügung stehenden Luftmasse $m_{\text{verfügbar}}$ und die für die stöchiometrische Verbrennung benötigte Luftmasse $m_{\text{benötigt}}$. Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$\lambda_L = \frac{m_{\text{verfügbar}}}{m_{\text{benötigt}}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Ein Brennstoff-Luftgemisch ist nur dann zündfähig, wenn dessen Zusammensetzung zwischen der oberen und der unteren Zündgrenze liegt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des zu verbrennenden Stoffes. Gemische, bei denen mehr Luft als Brennstoff vorhanden ist, werden als mager oder überventiliert ($\lambda_L > 1$), beziehungsweise bei Vorhandensein von mehr Brennstoff als Luft, fett oder unterventiliert ($\lambda_L < 1$) bezeichnet. Beispiele für unterventilierte Brände können Keller- und Wohnungsbrände sein.

Eine optimale vollständige Verbrennung stellt sich theoretisch bei $\lambda_L \approx 1$ ein. Luft und Brennstoff können in der Realität nie so ideal vermischt werden, dass die stöchiometrische Luftmenge zur vollständigen Verbrennung ausreicht. In technisch erzeugten oder vorgemischten Flammen ist dies allerdings sehr gut zu realisieren [6].

Flammen können weiterhin auch in ihrem Strömungszustand beziehungsweise in ihrem Mischungszustand unterschieden werden:

- Strömungszustand: laminar oder turbulent
- Mischungszustand: vorgemischt oder nicht vorgemischt, Verteilung durch Diffusion

2. Grundlagen

In Abbildung 2 wird ein Brand in seine vier Kernphasen unterteilt [7].

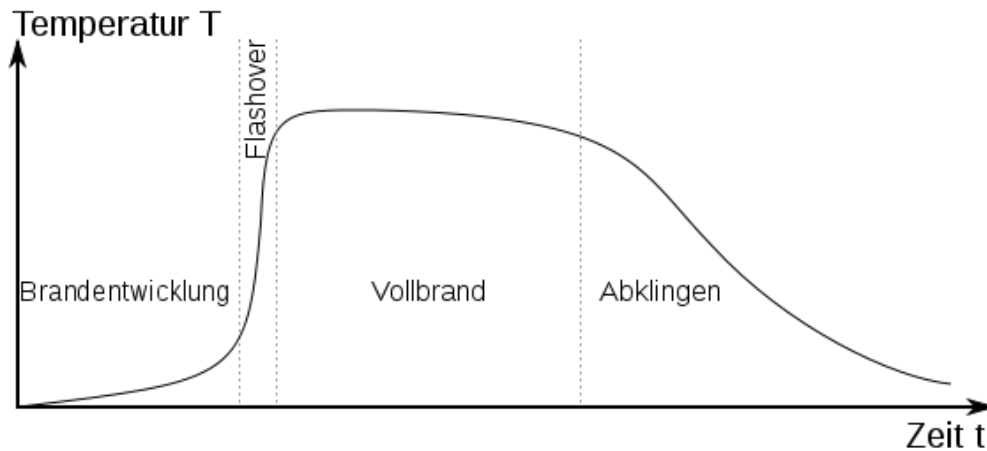


Abbildung 2: Brandverlaufskurve eines natürlichen Feuers über die Zeit [7]

Ein Brand lässt sich durch eine Diffusionsflamme (vgl. 2.1.3) beschreiben, die in der Brandentwicklungsphase eine laminare Strömung aufweist. Diese Phase kann im Allgemeinen über mehrere Stunden andauern. Gründe hierfür können eine geringe Wärmefreisetzung, geringe Temperaturen sowie eine lokale Beschränkung des Brandes auf den Bereich der Zündquelle sein. Den Übergang zum Vollbrand kennzeichnet ein steiler Temperaturgradient in der dargestellten Brandverlaufskurve. Kommt es in einem geschlossenen Raum zu einem bereits erloschenen Brand, können durch vorhergehend hohe Temperaturen weiterhin brennbare Pyrolysegase im Raum vorhanden sein. Öffnet nun zum Beispiel ein Feuerwehrmann den Brandraum, strömt Sauerstoff in den Raum hinein. Die verbliebenen Gase bilden nun mit dem zugeführten Sauerstoff ein zündfähiges Gemisch. In Verbindung mit vorhandenen Zündquellen (typischerweise kleinere Oberflächenbrände oder Glutnester) kann es unter Umständen zu einer lebensgefährlichen explosionsartigen Rauchgasdurchzündung kommen.

Die anschließende Vollbrandphase wird durch sehr hohe Temperaturen, einem hohen Wärmestrahlungsanteil (vgl. 2.3.2) sowie einem turbulenten Flammenbild charakterisiert. Gleichzeitig kann sich durch ein ausgewogenes Verhältnis von Brennstoff zu Luft, ein stationärer Zustand einstellen.

In der abklingenden Brandphase kommt es zu einem Temperaturabfall, welcher auf das Ablöschen des Brandes zurückgeführt werden kann. Dieser Effekt kann weiterhin auch durch den Verbrauch des Luftsauerstoffes sowie den Verbrauch der Brandlast beschrieben werden [3].

2. Grundlagen

2.1.2 Einsatztaktische Vorgehensweise der Feuerwehr

Einsätze der Feuerwehr verlaufen nach bestimmten einsatztechnischen Grundsätzen. Neben der richtigen taktischen Entscheidung des Einsatzleiters ist der Einsatzerfolg im Wesentlichen von der Vorgehensweise der einzelnen Trupps abhängig. Diese müssen bei der Ausführung ihres Auftrages selbstständig die erforderlichen Maßnahmen fachlich richtig durchführen, weitere Umstände und Einzelheiten der Örtlichkeit erfassen und situativ ihr Vorgehen anpassen.

Zu den schwierigsten Aufgaben unter Atemschutz zählt mitunter die Orientierung in einem unbekanntem Gebäude, da diese oft eine hohe Rauch- und Wärmebelastung aufweisen. Unter Berücksichtigung des Eigenschutzes erschwert dies die Suche und das Auffinden von vermissten Personen und/oder des Brandherdes erheblich. Eine einheitliche Vorgehensweise gibt es nicht, da jeder Einsatz individuell verläuft. Grundlagen bieten allerdings Regeln aus den jeweiligen Feuerwehrdienstvorschriften (FwDV). So bezieht sich die FwDV 1 auf die Grundtätigkeiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz. In der FwDV 3 findet sich der Arbeitsablauf eines Lösch- und Hilfeleistungseinsatzes für eine Staffel, Gruppe oder im Zug. Für den Innenangriff unter Atemschutz legt die FwDV 7 besondere Einsatzgrundsätze fest. Die wichtigsten sind unter anderem:

- Der Atemschutzgeräteträger ist für seine Sicherheit eigenverantwortlich.
- Unter Atemschutzgeräteträgern wird immer im Trupp (ein Truppführer und mindestens ein Truppmann) vorgegangen.
- Der Trupp bleibt im Einsatz als Einheit zusammen und tritt auch gemeinsam den Rückweg an.

Ist der Trupp in der entsprechenden Wohneinheit angekommen beginnt er damit, je nach Einsatzauftrag, die Räume nach vermissten Personen abzusuchen, beziehungsweise direkt mit dem Aufsuchen des Brandherdes. Ist der Brandraum nicht durch eine geöffnete Tür oder austretenden Rauch erkennbar beginnt somit die Suche. Die meist angewandte Methode ist der Handrückentest. Hierbei wird der Handrücken von unten nach oben am Türblatt entlang geführt. Ist auf der Oberfläche eine erhöhte Temperatur zu vernehmen, kann dies ein Hinweis auf den Brandraum sein. Ist eine Tür, die in den Brandraum führt, erkannt ist das weitere einsatztaktische Vorgehen gegebenenfalls mit dem Einsatzleiter abzuklären. Ein Kontrollblick in den Brandraum dient dem Trupp zur Lageerkundung und zur besseren Einschätzung des Gefährdungspotentials [8]. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass die Türoberfläche sowie die Füllung in der Tür eine wichtige Rolle für den Wärmetransport einnimmt. Dies wird in der vorliegenden Arbeit näher untersucht.

2. Grundlagen

2.1.3 Wärmetransportmechanismen bei Bränden

Bei einem Wohnungsbrand kommt es meist zu einer Entzündung fester Brennstoffe. Dabei spricht die Feuerwehr von Kleidungs- oder Möbelstücken. In der Entstehungsbrandphase weist die, in dem Fall vorhandene, Diffusionsflamme eine laminare und langsame Strömung auf. Diese ist auf die geringere Zündungsfläche zurückzuführen. Der benötigte Sauerstoff diffundiert über den Rand der Flamme in ihr Inneres. Im Flammenkern kommt deutlich weniger Sauerstoff an weshalb nur ein gewisser Teil verbrannt werden kann. Weiterhin wird die Diffusionsflamme durch die erhöhte Produktion von Pyrolysegasen und einem hohen Strahlungsanteil charakterisiert.

Während der Brandausbreitung steigt die Strömungsgeschwindigkeit der Flamme an und entwickelt sich zu einem turbulenten Flammenbild. Durch die schnellere Verbrennung wird mehr Rauchgas gebildet. Das hat zur Folge, dass ab diesem Zeitpunkt Wärme nicht nur über Strahlung sondern auch vermehrt über Konvektion übertragen wird. Hierbei spricht man von der Konzentrationsänderungen durch Geschwindigkeitsgradienten. Zur Klassifizierung des Strömungszustandes wird die dimensionslose Reynolds-Zahl genutzt. Sie ist gegeben durch:

$$Re = \frac{c * D}{\nu} \quad \text{(Gleichung 2)}$$

Mit c = Strömungsgeschwindigkeit, D = charakteristische Länge, ν = kinematische Viskosität.

Von einer turbulenten Strömung spricht man, wenn $Re > 2000$ bis 2300 entspricht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wärmestrahlung sowie die Konvektion bei einem Brand den größten Anteil des Wärmetransportes ausmacht. Dies ist auch der Grund für die Aufteilung in Strahlung und Konvektion während den durchgeführten Versuchen.

2.1.4 Beflammungsarten

Zur Untersuchung der Probestücke auf ihren zeitlichen Wärmedurchgang, wird die Wahl von geeigneten thermischen Belastungssystemen notwendig. Diese sind zum Teil in entsprechenden Normen festgelegt und verfügen über Vor- und Nachteile die in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt werden. Hierbei unterscheiden sich die Belastungsarten vor allem in der Form des Wärmeintrags.

Fester Brennstoff	Vorteile	Nachteile
Holzkrippe	<ul style="list-style-type: none">- Gut lagerbar- Geringe Gefahr einer ungewollten Entzündung- Geeignet für Versuche im Großmaßstab	<ul style="list-style-type: none">- Stark rußende Flamme- Zur Zündung wird ein Brandbeschleuniger benötigt- Wärmefreisetzungsrate ist von der Branddauer abhängig

Tabelle 1: Fester Brennstoff [9]

2. Grundlagen

Flüssiger Brennstoff	Vorteile	Nachteile
Poolfeuer	<ul style="list-style-type: none"> - Bei Verwendung von Ethanol sehr Rußarm - Gleichmäßige Verteilung der Brandlast - Zeitlich konstante Wärmefreisetzungsrate - Geeignet für Versuche im Großmaßstab 	<ul style="list-style-type: none"> - Hochentzündlich → potentiell gefährlich

Tabelle 2: Flüssiger Brennstoff [9]

Gasförmige Brennstoffe	Vorteile	Nachteile
Poolfeuer Wasser und Gas	<ul style="list-style-type: none"> - Gleichmäßige Verteilung der Brandlast - Geeignet für Versuche im Großmaßstab 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwendiger Auf- und Abbau
Einzelgasbrenner	<ul style="list-style-type: none"> - Einfach im Aufbau - Bei mehreren Brennern auch geeignet für Großversuche 	<ul style="list-style-type: none"> - Punktuelle Brandlast - Hohe Austrittsgeschwindigkeit des Gases
Direkter Energieeintrag		
Strahlwand	<ul style="list-style-type: none"> - Reine Wärmestrahlung 	<ul style="list-style-type: none"> - Großer Gasverbrauch - Erschwerter Aufbau
Heißluftgebläse	<ul style="list-style-type: none"> - Reine Konvektion - Schneller Aufbau - Wenig Platz benötigt 	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Austrittsfläche - Höhere Temperaturen ab 100°C sind schwierig zu erreichen

Tabelle 3: Gasförmiger Brennstoff, direkter Energieeintrag [9]

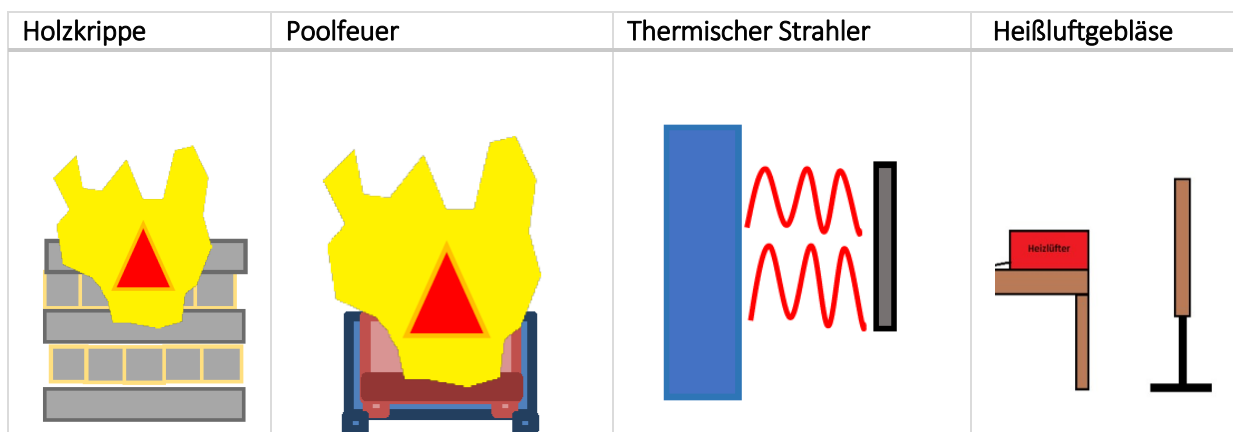


Abbildung 3: Geometrische Darstellung der Beflammungsarten [10]

2. Grundlagen

Die Wahl der Beflammungsart hängt von dem nachzustellenden Brandverlauf ab. Somit sind technisch aufwendige Methoden üblicherweise nicht sinnvoll.

In der vorliegenden Arbeit wurden für die einzelnen Wärmeübertragungsmechanismen bei Bränden ein thermischer Strahler (Wärmestrahlung) und ein Heißluftgebläse (reine Konvektion) gewählt. Um eine bessere Vergleichsmöglichkeit zu erhalten, wurden als dritte Beflammungsart zwei Kiesbettbrenner ausgewählt. Die verwendeten Wärmequellen werden in Kapitel 3.1.2 näher beschrieben.

2.2 Türen

Im nachfolgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Türfüllungen sowie Türoberflächen näher erläutert.

2.2.1 Türfüllungen und deren Materialien

Der Türaufbau einer Innentür wird als Innenleben oder auch als Mittellage bezeichnet und beschreibt die Füllung, die sich zwischen den sichtbaren Decklagen befindet. Diese entscheidet maßgeblich über Qualität, Stabilität, Schallschutz, Wärmedämmung sowie das Gewicht des Türblattes.

Die einfachste Variante einer Holztürfüllung ist ein wabenförmig angeordneter Karton. Diese Mittellage wird in Kapitel 3.2.1 anhand der verwendeten Probestücke detaillierter erklärt.

Die nächst höhere Qualitätsstufe ist eine Tür mit einer Röhrenspanstegstreifen-Einlage. Zwischen den Decklagen werden Stege aus Röhrenspanplatten in regelmäßigem Abstand verlegt. Die Komplexität des Türaufbaues wird als einfach beschrieben und bietet nur einen geringen Schallschutz. Das Gewicht dieser Tür beträgt ca. 12 kg/m^2 .

Eine qualitativ höherwertige Türfüllung stellt die Röhrenspaneinlage dar. Diese Füllung wird bei den Probestücken in Kapitel 3.2.2 erläutert.

Bezugnehmend auf Stabilität sowie einen hohen Komfort an Schallschutz bietet ein Innenleben aus Vollspan. Die Füllung besteht aus einer durchgehenden Spanplatte ohne Bohrungen (Abbildung 5). Diese Tür ist mit ihren 23 kg/m^2 deutlich schwerer als die vorher genannten.

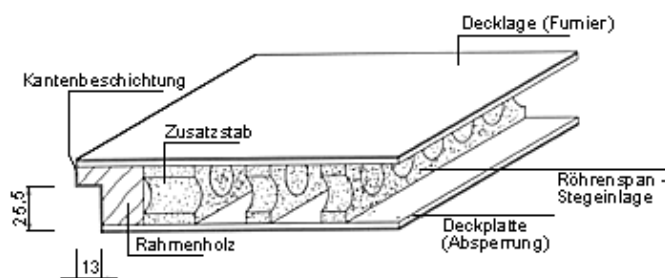


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Röhrenspanstegstreifen [11]

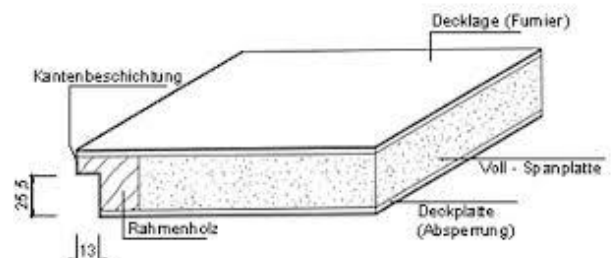


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Vollspan Füllung [11]

2. Grundlagen

Eine weitere Alternative zu der Füllung mit einer Spanplatte sind Massivholz-Rahmentüren. Hierbei werden mehrere Rahmenteile zu einem Rahmen gefertigt. In die entstehenden Zwischenräume werden Füllungen aus Holz oder auch Glas eingesetzt. Bezüglich der Holzeinlagen unterscheidet man zwischen stab- und schichtverleimten Rahmentüren. Bei stabverleimten Elementen wird massives Echtholz stabförmig miteinander verleimt. Eine Decklage oder eine Furnierschicht (siehe Kapitel 2.2.2) wird nicht aufgebracht. Das feinstreifige Erscheinungsbild der Stäbe charakterisiert das Design dieser Tür. Das Gewicht beträgt je nach Holzart ca. 23 kg/m^2 und weist eine mittlere Stabilität sowie einen mittleren Schallschutz auf.

Schichtverleimte Holztüren bestehen zwischen den Decklagen aus verleimten massivsten Stabhölzern. Sie bietet je nach Ausführung, durchschnittlich ab 23 kg/m^2 , eine sehr hohe Stabilität und einen sehr guten Schallschutz [11].



Abbildung 6: stabverleimte Holztür [12]



Abbildung 7: schichtverleimte Holztür [12]

2.2.2 Innentüren Oberfläche sowie Flammschutzmittel

Neben dem Innenleben jeder Holztür gilt es auch deren Oberfläche zu bewerten. Es gibt Türen mit unterschiedlichem Furnierdesign sowie Türen mit Motivbeklebungen. Farbe und Material können ebenfalls auf verschiedenste Weise kombiniert werden. Allerdings ist die Optik nicht zu verwechseln mit der Oberfläche. Diese spielt im Gegensatz zur Oberfläche lediglich eine untergeordnete Rolle.

Nachfolgend werden alle gängigen Türoberflächen sowie deren Verbindung zu Flammschutzmitteln dargestellt.

2. Grundlagen

Furnier Oberfläche

Die edelste Variante ist eine Tür mit einem Echtholz furnier. Wie in Abbildung 8 dargestellt besteht die Außenhaut aus vielen dünnen Holzschichten, die aus einem Baumstamm herausgeschnitten sind. Jede Furniertür ist somit ein Unikat, da Maserungen sowie Wuchs eines jeden Holzes einzigartig sind. Furnierte Türblätter bedürfen besonderer Sensibilität sowohl bei der Holz auswahl als auch bei der Herstellung. Um der Oberfläche einen Schutz vor Beschädigungen und Schmutz zu verleihen, werden Furniertüren mit Lacken, Wachsen oder Ölen veredelt [13].

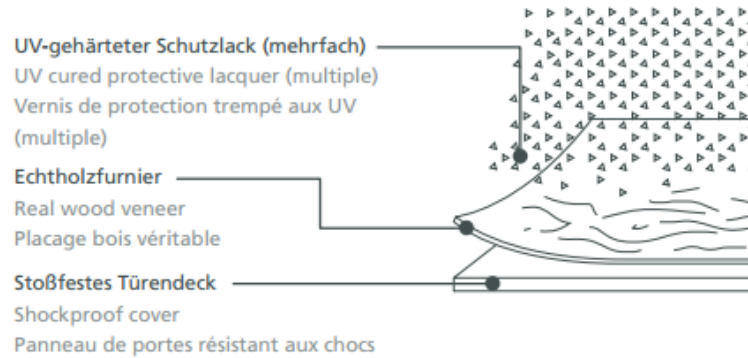


Abbildung 8: Schematischer Aufbau einer Furnieroberfläche [14]

Dekor Oberfläche

Eine Alternative zum Echtholz bieten Türen mit einer Dekorfolie wie sie beispielhaft in Abbildung 9 aufgezeigt werden. Dekore sind naturgetreue Holznachbildungen, Fantasiedekore (beispielsweise Marmor- oder Granitfolie) aus Kunststoff, welche direkt auf das Türblatt gepresst und mit einem Schutzlack versehen werden. Sie zeichnen sich durch Farb- und Lichtbeständigkeit oder attraktive Oberflächen aus. Allerdings weisen diese Folien nur eine sehr geringe Widerstandsfähigkeit auf [13].



Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung unterschiedlicher Dekorfolien [15]

2. Grundlagen

Lackierte Türen

Hierbei handelt es sich um die Kombination aus eigener Wunschfarbe mit dem Schutz einer Furniertür. Ermöglicht wird dies durch moderne Walz- und Spritzverfahren mit UV härtenden und umweltschonenden Lacken. Die Hersteller gewährleisten eine robuste Oberfläche, die als langlebig und pflegeleicht gilt [13].

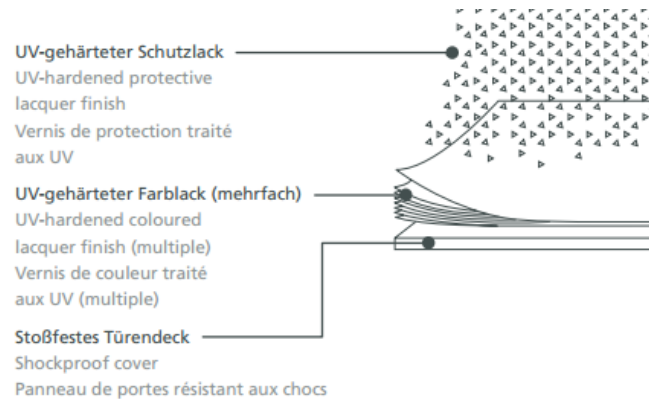


Abbildung 10: Aufbau einer lackierten Türoberfläche mit UV- gehärtetem Lack [14]

Continuous Pressure Laminate Schichtstoff

Continuous Pressure Laminate (CPL) steht für ein Laminat welches aus dem kontinuierlichen Verpressen von mehreren Lagen Papier mit härtendem Melamin-Kunstharz entsteht (Abbildung 11). Die Oberfläche wird zusätzlich mit einem Schutzfilm aus Melaminharz versehen. Dadurch wird sie extrem belastbar und ist deutlich abrieb-, kratz- und stoßfester gegenüber anderen Oberflächen. Weiterhin gelten diese Oberflächen als lichtecht, lösungsmittel- und hitzebeständig, wischfest und pflegeleicht. CPL-Oberflächen gibt es in verschiedenen Dekoren und Farben sowie in allen gängigen Holzoptiken [13].

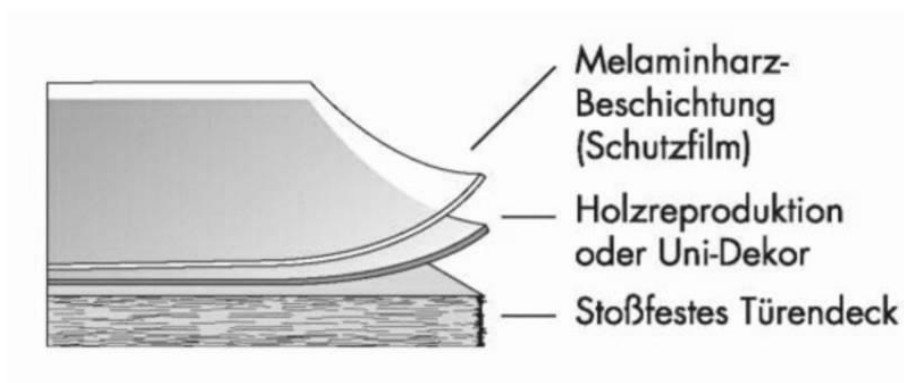


Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer CPL-Oberfläche [16]

2. Grundlagen

High Pressure Laminate Schichtstoff

Die in Abbildung 12 dargestellten High Pressure Laminate (HPL) Türen sind selbst härtesten Anforderungen gewachsen und werden überwiegend in Gebäuden mit intensiver Nutzung (Kindergärten, Schulen, Krankenhäuser) eingesetzt. HPL Oberflächen bezeichnet ein Laminat welches durch ein Hochdruck-Verpressungs-Verfahren aus mehreren Lagen Papier und härtendem Kunstharz entsteht.

Durch den hohen Pressdruck entsteht eine glatte und porenfreie Oberfläche. Zusätzlich wird diese mit einem Schutzfilm aus Melaminharz versiegelt. Melamin zählt zu den halogenierten Flammschutzmitteln welche im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben werden.

Als Alternative zur glatten Oberfläche gibt es die Möglichkeit durch ein Prägeblech eine Oberflächenstruktur aufzutragen. Türen mit HPL Oberflächen sind überaus strapazierfähig, kratz- und stoßfest, schmutzempfindlich sowie resistent gegen haushaltsübliche chemische Reiniger. Des Weiteren hinterlassen siedendes Wasser, feuchte und trockene Hitze keine Spuren [13].

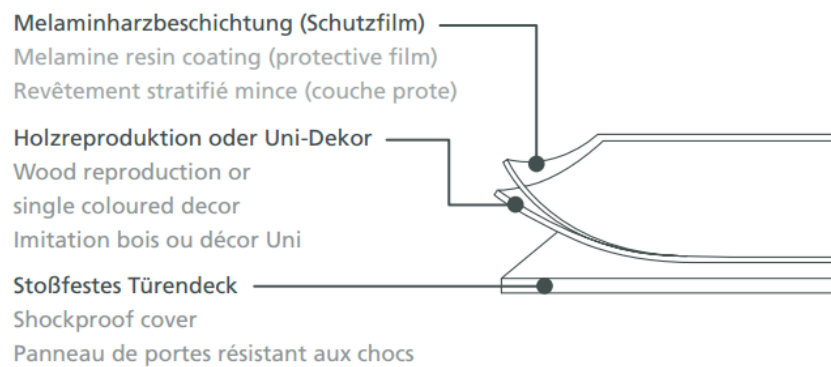


Abbildung 12: Unterschiedlichen Schichten einer HPL-Tür [14]

Flammschutzmittel

Flammschutzmittel sind Stoffe welche die Entstehung sowie die Ausbreitung von Bränden einschränken, verlangsamen oder verhindern sollen. Anwendung finden sie überall dort, wo sich potentielle Brandlasten, wie z.B. Möbel aus Kunststoffen und/oder Holz, Textilien, Teppiche oder Wohnungsinnentüren befinden. Ein weiterer Anwendungsbereich ist auch die Erfüllung von brandschutztechnischen Anforderungen von Werkstoffen und Bauteilen. Die Wirkungsweise von Flammschutzmitteln lässt sich in physikalische und chemische Prinzipien unterteilen. [17]

In der chemischen Wirkungsweise unterscheidet man in Fest- und Gasphase. Bei der Festphase bildet sich eine Schutzschicht von verkohltem Material um den Körper aus. Dadurch wird ein weiterer Zutritt von Sauerstoff und Wärme verhindert.

2. Grundlagen

Die Gasphase bezieht sich auf die Unterbindung von Pyrolysegasen durch eine Radikalkettenreaktion. Diese wird in 3 Teilreaktionen durchgeführt.

So wird bei der Startreaktion, am Beispiel eines Halogenmoleküls, das Molekül in zwei Halogenradikale gespalten.



In der darauffolgenden Kettenreaktion reagiert das Halogenradikal mit dem Kohlenwasserstoff $R - H$ zu Halogenwasserstoff $X - H$. Die verbliebene Kohlenwasserstoffkette R wird dadurch zu einem Alkylradikal $R \cdot$.



Das Alkylradikal greift nun ein weiteres Halogenmolekül an und spaltet es homolytisch auf. Das Radikal bindet sich nun mit einem Halogenatom über eine Kohlenstoff- Halogenverbindung und ein weiteres Halogenradikal $X \cdot$; sowie ein Halogenalkan $R - X$ entsteht.



Treffen bei der *Abbruchreaktion* zwei Radikale aufeinander, bildet sich dadurch eine Atombindung.



Durch die in der Abbruchreaktion entstandene Atomverbindung enthält die Reaktion keine weiteren Radikale und verlangsamt somit die Verbrennung.

Die meistgenutzten Radikale sind die $H \cdot$ und $OH \cdot$ Radikale (Aluminium- sowie Magnesiumhydroxid) [18].

Bei der physikalischen Wirkungsweise unterscheidet man folgende Effekte:

- Kühlung: Durch den Energieverbrauch der endothermen Zersetzung wird das Material von dem zur Verdampfung gebrachten gebundenen Wassers gekühlt.
- Bei anorganischen Flammenschutzmitteln, z.B. roter Phosphor, bildet dieser eine Schicht aus Phosphor- und Polyphosphorsäuren auf der Oberfläche aus und lässt diese aufquellen. Daraus bildet sich eine isolierende Schicht und schützt somit das Material vor erneutem Sauerstoffzutritt.
- Verdünnung der brennbaren Gase durch inerte Substanzen. Zu den Inertgasen gehören z.B. Stickstoff und sämtliche Edelgase (Helium, Neon, Argon, Xenon, Radon) [17].

2. Grundlagen

Die nachfolgende Tabelle bietet einen Überblick von Wirkprinzipien, Effizienz und Anwendungsbereiche der vier Hauptgruppen:

- Halogenierte Flammschutzmittel
- Anorganische Flammschutzmittel
- Stickstoffbasierte Flammschutzmittel
- Organophosphor – Flammschutzmittel

	Halogenierte Flammschutzmittel	Anorganische Flammschutzmittel	Stickstoffbasierte Flammschutzmittel	Organophosphor Flammschutzmittel
Wirkprinzip	chemisch	physikalisch	chemisch/ physikalisch	chemisch/ physikalisch
Effizienz	+	0	+	+
Anwendungsbereich	Kunststoffe	Kunststoffe		

Tabelle 4: Überblick von Flammschutzmitteln [17]

Die Flammschutzmittel werden des Weiteren in ihre Anwendungsmethoden klassifiziert:

- Additive Flammschutzmittel: Die Brandhemmer werden in die brennbaren Stoffe als Zusatzstoff eingearbeitet.
- Reaktive Flammschutzmittel: Die Substanzen sind selbst Bestandteil der Materialien.
- Inhärenter Flammschutz: Das Material selbst hat eine brandhemmende Wirkung.
- Coating: Der Brandhemmer wird von außen als Beschichtung in Form von Lacken und Harzen aufgetragen.

Für die vorliegende Arbeit sind die halogenierten Flammschutzmittel von Bedeutung, da die Türen mit einem Melaminharz (stickstoffbasierte Brandhemmer) versiegelt sind.

Melamin zersetzt sich bei 350 °C und reagiert zu hochtoxischen Produkten wie Cyanwasserstoff (Blausäure – HCN), Ammoniak und sonstige nitrose Gase, die bereits in kleinen Dosen letal wirken [16] [19].

2. Grundlagen

2.2.3 Prüfmethoden von Bauteilen und Baustoffen

Die Klassifizierung des Brandverhaltens von Bauteilen und Baustoffen wird durch die Norm DIN 4102-2 geregelt. Bauteile werden entsprechend ihrer Feuerwiderstandsdauer in verschiedene Feuerwiderstandsklassen eingeteilt. Diese erhalten den Kennbuchstaben F und eine Zahl, welche die bei der Prüfung ermittelte Feuerwiderstandsdauer in Minuten angibt.

Feuerwiderstandsklasse	Feuerwiderstandsdauer in Minuten
F 30	≥ 30
F 60	≥ 60
F 90	≥ 90
F 120	≥ 120
F 180	≥ 180

Tabelle 5: Einteilung der Feuerwiderstandsklassen [20]

Bestimmte Bauteile, bei deren Prüfung besondere Prüfungsbedingungen und Beurteilungskriterien angewendet wurden, erhalten einen speziellen Kennbuchstaben. Unterschieden wird in:

- *I* für Installationskanäle
- *K* für Lüftungsklappen
- *L* für Lüftungsleitungen
- *W* für nicht tragende Außenwände
- *T* für Feuerabschlüsse (Türen, Tore und Klappen)

Dadurch ergeben sich Bezeichnungen für Feuerwiderstandsklassen wie z.B. T 90 für eine Brandschutztür mit einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten.

Bei der Einteilung unterscheidet man folgendermaßen:

Nachweis mit Brandversuch

Die Feuerwiderstandsklasse von Bauteilen muss durch ein Prüfungszeugnis, welches auf den Grundlagen der Norm 4102-2 beruht, nachgewiesen werden. Maßgebend für die Einstufung ist das ungünstigste Ergebnis der Prüfung von mindestens zwei Probekörpern zu wählen.

2. Grundlagen

Nachweis ohne Brandversuch

Die in DIN 4102 Teil 4 aufgeführten Bauteile (Beton-, und Stahlbetonbauteile) sind nach DIN 4102 Teil 1 in folgende Feuerwiderstandsklassen einzuteilen:

Baustoffklasse	Bauaufsichtliche Benennung
A	Nichtbrennbare Baustoffe
A1	ohne brennbare Anteile
A2	mit brennbaren Anteilen
B	Brennbare Baustoffe
B1	Schwerentflammbare Baustoffe
B2	Normalentflammbare Baustoffe
B3	Leichtentflammbare Baustoffe

Tabelle 6: Übersicht der unterschiedlichen Baustoffklassen [20]

Bei der Prüfung von raumabschließenden Bauteilen, darf sich die Anfangstemperatur auf der feuerabgewandten Seite während einer Beflammungsdauer von mindestens 30, 60, 90, 120 oder 180 Minuten nicht um mehr als 140 K erhöhen. Weiterhin muss das Probestück einen Flammendurchgang während der gesamten Prüfdauer verhindern.

Die Prüfeinrichtungen sollen sich in geschlossenen Räumen befinden und eine Raumtemperatur von 25 °C nicht überschreiten. Während den Versuchen sind mindestens zwei Probekörper der Prüfung zu unterziehen. Diese müssen in Ihren Abmessungen, ihrer Konstruktion, ihrem Werkstoff sowie ihrer Ausführungs- und Einbauart der praktischen Anwendung entsprechen. Raumabschließende Bauteile mit asymmetrischem Aufbau sind auf ihrer ungünstigsten Seite dem Feuer auszusetzen.

Der Brandraum ist mit Heizöl EL (nach DIN 51603-1) oder Dieselmotortreibstoff (nach DIN 51601) zu beflammen. Während des Brandversuches muss die mittlere Temperatur im Brandraum nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) ansteigen.

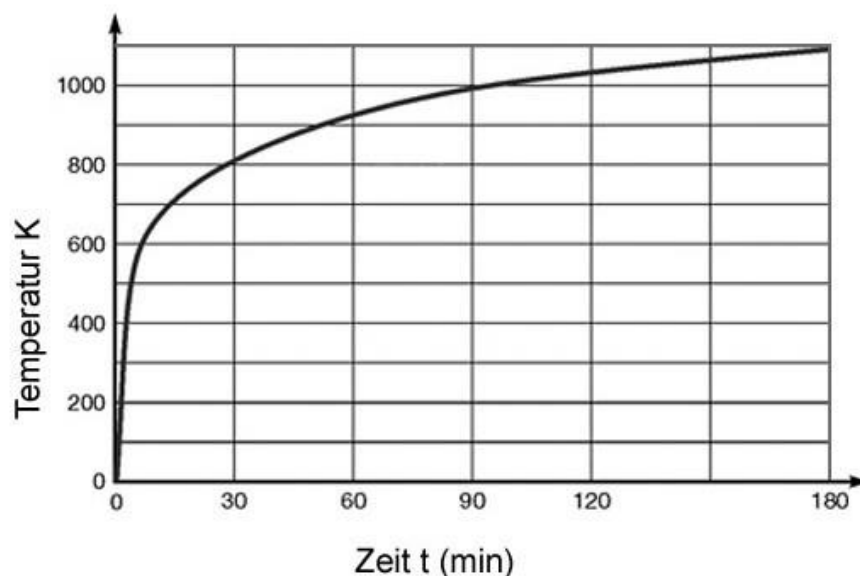


Abbildung 13: Einheitstemperaturzeitkurve [21]

2. Grundlagen

Nach den ersten 5 Minuten dürfen die Abweichungen der mittleren Temperatur im Brandraum $\pm 100 \text{ K}$ nicht übersteigen. Bei raumabschließenden Bauteilen sind die Oberflächentemperaturen auf der feuerabgewandten Seite zu messen. Hierbei muss ein Mittelwert aus mindestens 5 Messstellen gebildet werden, wobei sich eine Messstelle im Mittelpunkt befinden muss.

Um beurteilen zu können, ob der Raumabschluss gewahrt wurde, ist ein sogenannter Wattebauschttest durchzuführen. Hierzu ist ein etwa 100 mm x 100 mm großer und etwa 20 mm dicker Wattebausch in ca. 20 mm – 22 mm Entfernung an die ungünstigsten Stellen (Risse oder Spalten) jeweils 30 Sekunden anzuhalten. Der Raumabschluss gilt als nicht mehr gewahrt, wenn es zu einer Entzündung des Wattebausches kommt. Eine bräunliche oder schwarze Verfärbung des Bausches wird nicht als Entzündung gewertet.

Über die Durchführung und Ergebnisse der Prüfung ist ein Prüfzeugnis anzufertigen. Dies beinhaltet unter Hinweis der Norm 4102-2 unter anderem:

- Beschreibung und Zeichnung der Probekörper, Angaben zum Baustoff und deren Baustoffklasse nach DIN 4102-1
- Angaben über den Einbau der Probekörper und der Prüfung (Einbau- und Belastungsart, Lage und Anzahl der Thermoelemente, verwendeter Brennstoff sowie Druck und Temperaturen im und um den Prüfstand)
- Temperaturmessergebnisse in der Brandkammer sowie in und an den Probekörpern (Einzel- und Mittelwerte)
- Durch Löschwasser verursachte Zerstörung
- Beobachtungen über Rauchentwicklung, Feststellung entzündbarer Gase und Nachbrennzeit des Probekörpers während des Versuches
- Messergebnisse von Neben- und Sonderversuchen

Die Gültigkeit eines jeden Prüfzeugnisses ist auf 5 Jahre begrenzt und kann auf Antrag verlängert werden [22].

Diese Prüfungen sind wichtig um einen einheitlichen Schutz in Gebäuden gewährleisten zu können. Durch eine gute Feuerbeständigkeit sowie Wärmedämmung könnte es sich für Feuerwehren als schwierig erweisen einen Brand im dahinterliegenden Raum zu erkennen, da Brandschutztüren von außen nicht gekennzeichnet sind.

2. Grundlagen

2.3 Grundlagen der Wärmeübertragung

Das nachfolgende Kapitel befasst sich mit den Grundlagen der Wärmeübertragung. Hierbei wird in Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung unterschieden. Diese Übertragungsmechanismen sind bei einem Brand vorhanden und bedürfen in dieser Arbeit einer besonderen Betrachtungsweise.

2.3.1 Konvektion

Konvektion beschreibt den Wärmetransport durch Geschwindigkeitsgradienten. Somit bewegen sich thermisch geladene Teilchen durch Stoffströme im Fluid. Ursachen für die Strömung können unterschiedliche Kräfte, wie z.B. die Schwerkraft oder Kräfte von Druck-, Dichte-, Temperatur- oder Konzentrationsunterschieden sein. Grundlegend kann die Konvektion in zwei Arten unterschieden werden [23]:

Freie Konvektion

Die freie Konvektion ergibt sich aus der Dichteänderung von Stoffen. So besitzt ein bestimmter Stoff mit einer höheren Temperatur eine geringere Dichte als derselbe Stoff mit einer geringeren Temperatur [23].

Erzwungene Konvektion

Als eine erzwungene Konvektion wird eine von außen aufgebrachte Strömung bezeichnet. Diese kann durch Wind oder auch durch einen Lüfter entstehen [24].

Für die vorliegende Arbeit wird somit eine erzwungene Konvektion angenommen.

2.3.2 Wärmestrahlung

Jeder Körper emittiert in Abhängigkeit seiner Temperatur elektromagnetische Strahlungen. Zur Klassifizierung der Strahlung wird diese gemäß ihrer physikalischen Eigenschaft, in Abhängigkeit der Frequenz, in Wellenbereiche aufgeteilt. So bezeichnet man Strahlung im Wellenbereich von 0,1 – 100 μm üblicherweise als Wärmestrahlung. Infrarotstrahlung wird im Wellenbereich von 0,8 – 360 μm angegeben.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die unterschiedlichen Wellenbereiche.

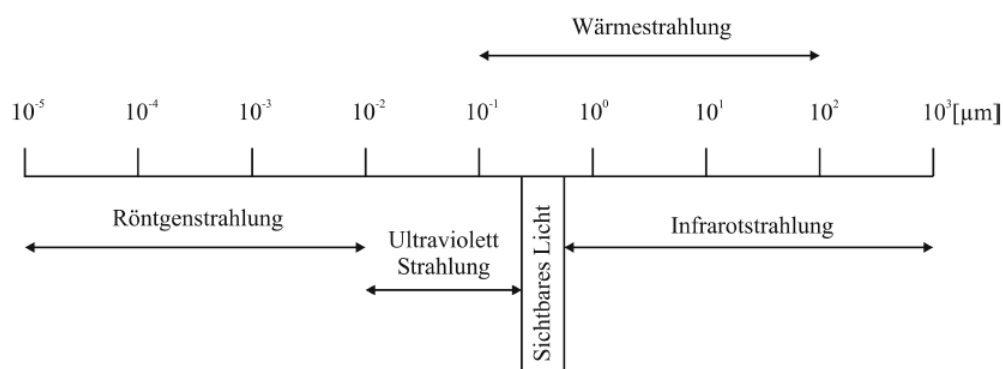


Abbildung 14: Ausschnitt des Wellenspektrums elektromagnetischer Strahlung [25]

2. Grundlagen

Im Gegensatz zur Wärmeübertragung durch Konvektion oder Wärmeleitung ist die Wärmestrahlung weder an ein Medium noch an eine Distanz gebunden. Die Übertragungsmechanismen unterscheiden sich somit grundlegend voneinander [23].

Strahlung entsteht aus der Umsetzung innerer Energie eines Moleküls. Entsprechend ihrer Freiheitsgrade setzen diese Moleküle durch Bewegung ihre Energie im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung frei. Die so emittierte Strahlung kann durch Absorption wieder zurück in innere Energie gewandelt werden. [26]

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

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8 \mu m * K}{T} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Dabei beschreibt λ_{max} die Wellenlänge, bei der die Intensität pro Wellenlängenintervall maximal ist und T die absolute Temperatur (K) der strahlenden Fläche. Das Strahlungsmaximum verschiebt sich dabei mit höheren Temperaturen zu kürzeren Wellenlängen [25].

Ein Körper der die gesamte auf ihn treffende Strahlung restlos absorbiert wird *schwarzer* Körper genannt. Praktisch lässt sich dieser Körper am besten durch einen Hohlraum realisieren, dessen inneren Wände mattschwarz sind und die gleichen Temperaturen aufweisen. Ein Strahl, der durch eine kleine Öffnung in diesen Raum trifft, würde dort vielfach reflektiert werden. In der nachfolgenden Abbildung wird dies schematisch dargestellt.

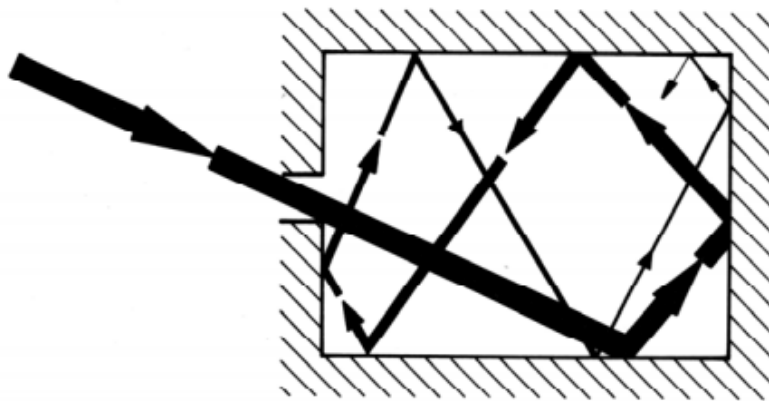


Abbildung 15: Darstellung der Reflexion in einem schwarzen Körper [27]

Im Gegensatz dazu steht der *natürliche* Körper. Dieser reflektiert nur einen bestimmten Teil der auftreffenden Strahlung oder lässt ihn hindurch. Die natürlichen Körper absorbieren und emittieren folglich einen kleineren Wärmestrom als der schwarze Körper.

$$\dot{q} = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (\text{Gleichung 4})$$

Dabei beschreibt \dot{q} die Wärmestromdichte, ε den Emissionsgrad mit $0 \leq \varepsilon \leq 1$ und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante mit $5,670367 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ [27].

2. Grundlagen

Der Emissionsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen abgegebener Strahlung eines Körpers und der abgegebenen Strahlung eines schwarzen Körpers. Für einen idealen schwarzen Körper gilt daher $\varepsilon = 1$. Trifft die von einem Körper emittierte Strahlung auf einen anderen Körper, so wird dieser über ein Flächenelement dA absorbiert. Daraus ergibt sich folgende Formel für den Wärmestrom:

$$d\dot{Q} = \alpha * \dot{q} * dA \quad (\text{Gleichung 5})$$

Darin ist α der sogenannte Absorptionskoeffizient. Dieser beschreibt, dass reale Körper nur einen bestimmten Anteil der auftreffenden Energie absorbieren und in innere Energie umwandeln können. Durch Gleichung 5 gilt für schwarze Körper erweitert $\varepsilon = \alpha = 1$. Für reale (graue) Körper gilt somit $0 \leq \alpha \leq 1$. Der Emissionsgrad von grauen Körpern ist wellenlängenunabhängig und nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz somit auch Temperaturunabhängig. [28]

2.3.3 Wärmeleitung

Zunächst wird die Wärmeleitung betrachtet, welche bei Feststoffen eine tragende Rolle spielt. Besitzt ein Körper zwei unterschiedliche Temperaturen, so wird sich nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, der vorhandene Temperaturunterschied im Laufe der Zeit ausgleichen. Dabei wird ein bestimmter Wärmestrom \dot{Q} immer von der wärmeren zur kälteren Stelle übergehen.

Durch das Fouriersche Gesetz lässt sich der Wärmestrom durch Wärmeleitung berechnen.

$$\dot{Q} = k * A * dT \quad (\text{Gleichung 6})$$

Dabei beschreibt k den Wärmedurchgangskoeffizienten in $\frac{W}{m^2 * K}$, A die Fläche in m^2 und dT die Temperaturdifferenz in K .

In Festkörpern breitet sich Wärme vorwiegend durch die Wärmeleitung aus. In Flüssigkeiten und Gasen tritt diese ebenfalls, jedoch nur in geringem Maße auf. Folglich wird Wärme in unterschiedlichen Materialien unterschiedlich geleitet [29].

Metalle sind zum Beispiel gute Wärmeleiter. Allgemein lässt sich sagen dass alle Materialien die eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen eine ebenso hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Der Grund für dieses Phänomen sind die freien Elektronen die neben elektrischen Ladungen auch Wärme transportieren.

Weiterhin wird in stationäre und instationäre Wärmeleitung unterschieden.

2. Grundlagen

2.3.3.1 stationäre Wärmeleitung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Methode der stationären Wärmeleitung am Beispiel einer einschichtigen Platte. Dabei stellt sich in einem wärmeleitenden Medium, bei zeitlich unveränderten thermischen Randbedingungen, nach anfänglichen Transienten (Einschwingvorgang bei der Signalgebung) ein konstanter Wärmestrom bzw. eine konstante Wärmeverteilung ein. Hierbei wird eine ebene Platte der Dicke s sowie den Oberflächentemperaturen T_{W1} und T_{W2} betrachtet. Diese vereinfachte Geometrie lässt sich auf die vorhandenen Probestücke übertragen und dient des Weiteren zur Auswertung der durchgeführten Versuche. Die Temperaturverteilung in der Platte hängt im Rahmen einer stationären und quasi- eindimensionalen Betrachtungsweise nur von der Ortskoordinate x im Bereich von $0 \leq x \leq s$ ab.

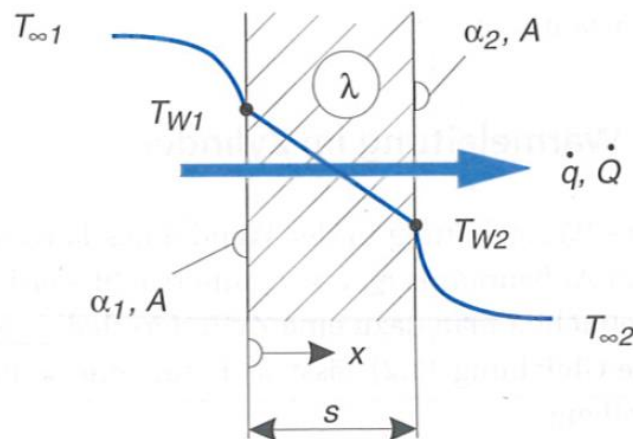


Abbildung 16: Ebene Platte der Dicke s mit Oberflächentemperaturen und beidseitigem Wärmeübergang [29]

Für diesen Bereich gilt:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (\text{Gleichung 7})$$

Durch weitere Integration erhält man:

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad (\dot{q}_x = \text{const}) \quad (\text{Gleichung 8})$$

$$T(x) = C_1x + C_2 \quad (\text{linearer Temperaturverlauf}) \quad (\text{Gleichung 9})$$

Wenn die Wandtemperaturen T_{W1} und T_{W2} bekannt sind können direkt die Integrationskonstanten C_1 sowie C_2 bestimmt werden.

$$T(0) = T_{W1} \quad \Rightarrow \quad C_2 = T_{W1} \quad (\text{Gleichung 10})$$

$$T(s) = T_{W2} \quad \Rightarrow \quad C_1 = \frac{T_{W2} - T_{W1}}{s} \quad (\text{Gleichung 11})$$

2. Grundlagen

Somit liegt in der Platte ein lineares Temperaturprofil sowie ein konstanter Wärmestrom bzw. Wärmefluss vor:

$$T(x) = T_{W1} + (T_{W2} - T_{W1}) * \frac{x}{s} \quad (\text{Gleichung 12})$$

$$\dot{q}_x = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{s} (T_{W1} - T_{W2}) \quad (\text{Gleichung 13})$$

$$\dot{Q} = A \dot{q}_x = A \frac{\lambda}{s} (T_{W1} - T_{W2}) \quad (\text{Gleichung 14})$$

Das Ergebnis aus Gleichung 12 liegt als empirischer Sachverhalt aus dem Fourier'schen Ansatz für die Wärmeleitung zugrunde. Im stationären Fall ist die Temperatur zeitlich konstant, da die Wärme im Körper nicht gespeichert werden kann. Daraus folgt, dass der Wärmestrom \dot{Q} (Gleichung 14) an der wärmebeaufschlagten Seite eintritt und über die kalte Seite die Platte wieder verlässt. [29]

2.3.3.2 instationäre Wärmeleitung

Unter instationärer Wärmeleitung wird die Erwärmung und Kühlung von Festkörpern beschrieben. Dieser Zustand liegt meistens bei technischen Wärmeübertragungsproblemen vor. In diesem Fall ist die Temperatur abhängig von der Zeit. Im Folgenden wird auch hier wieder eine ebene Platte mit homogenen Materialeigenschaften angenommen. Somit kann die Berechnung als eindimensional betrachtet werden.

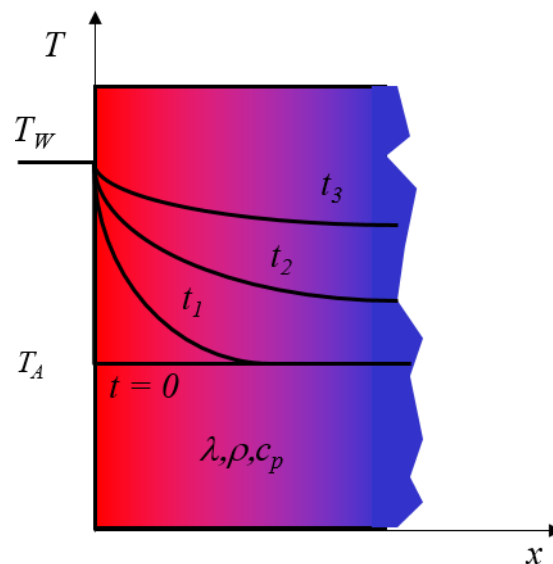


Abbildung 17: instationäre Aufheizung einer halbusendlichen Platte ($t_1 < t_2 < t_3$) [23]

An der linken Fläche wird zunächst eine örtlich konstante Temperatur T_A angelegt, die dann zum Zeitpunkt $t = 0$ sprunghaft auf T_W erhöht wird. Unter den getroffenen Voraussetzungen tritt als Folge und in Richtung des Temperaturgefälles ein Wärmefluss in x- Richtung auf [29].

2. Grundlagen

Hier gilt die 2. Fouriersche Differentialgleichung

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho * c_p} * \frac{d^2T}{dz^2} \quad (\text{Gleichung 15})$$

Der Term $\frac{\lambda}{\rho * c_p} = \alpha$ wird auch als Temperaturleitzahl bezeichnet. Einen Überblick über die Temperaturleitzahlen gibt nachfolgende Tabelle wieder.

Stoff	Temperaturleitzahl α in $10^{-6} \frac{m^2}{s}$
Luft (20°C, 0,1 MPa)	21,4
Wasser	0,143
Organische Flüssigkeiten	0,09- 0,1
Stein / Keramik	0,5 – 1,5
Glas	0,6-0,8
Metalle	0,5-100

Tabelle 7: Temperaturleitzahlen unterschiedlicher Stoffe

Unterschieden wird hierbei zwischen thermisch dünnen sowie thermisch dicken Körpern. Bei Ersterem kann die örtliche Temperaturdifferenz vernachlässigt werden, damit nur die zeitliche Temperaturänderung zu betrachten ist. Körper können als thermisch dünn bezeichnet werden, wenn die dimensionslose Biot- Zahl kleiner als 0,1 ist.

$$Bi = \frac{\alpha * \frac{s}{2}}{\lambda} \quad (\text{Gleichung 16})$$

Die Biot-Zahl kann physikalisch gedeutet werden als:

$$Bi = \frac{\text{übertragener Wärmestrom}}{\text{im Körper geleiteter Wärmestrom}}$$

und ist folglich mit der halben Körperdicke und der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpers definiert.

Bei thermisch dicken Körpern muss zusätzlich auch das Temperaturprofil im Körper berücksichtigt werden [27].

Alle Probestücke können in diesem Fall als thermisch dicke Körper angenommen werden.

3. Versuchsaufbau

3. Versuchsaufbau

Für das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der verschiedenen Türfüllungen anhand der unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen maßgebend. Somit wird in diesem Kapitel näher auf die Versuchsstände, Wärmequellen und Probestücke eingegangen.

3.1 Versuchsaufbau: Wärmeerzeuger und Messtechnik

Das folgende Kapitel befasst sich mit den genutzten Wärmeerzeugern, der verwendeten Messtechnik und deren Kalibrierung. Zu Beginn werden die Versuchsstände skizzenhaft dargestellt und erläutert.

3.1.1 Versuchsstände

In Abbildung 18 ist der Versuchsaufbau für das Heißluftgebläse dargestellt. Der Lüfter wurde mittig auf das Türblatt ausgerichtet und befand sich in einer Höhe von ca. 150 cm. Der Abstand von 20 cm zwischen Lüfter und Tür wurde so gewählt, damit sich alle angebrachten Thermoelemente in der austretenden Luftströmung befinden. Bei einem größeren Abstand wäre auf dem Türblatt eine zu geringe Konvektionsströmung für einen aussagekräftigen Versuch angekommen.

Der Abstand zwischen dem thermischen Strahler und dem Prüfkörper (Abbildung 19) beträgt 2 m und wurde so gewählt, dass ein Ergebnis des Strahlungsaufnehmers (vgl. 3.1.3) von $2 \frac{W}{cm^2}$ (vgl. Kapitel 8 Abbildung 74) auf der wärmezugewandten Seiten erreicht wurde. Weiterhin wurde durch diesen Abstand eine Selbstentzündung des Türausschnittes vermieden. Der Wert des Strahlungsaufnehmers entspricht gestrichenem und trockenem Holz. Grundlage hierfür war eine Untersuchung zur Wärmestrahlungsbelastung verschiedener Stoffe aus dem Jahr 1987. [30]

Der in Abbildung 20 dargestellte Versuchsraum weist eine Grundfläche von $8,64 m^2$ auf. Dieser besitzt nur einen Türausschnitt und kann mit einem Kellerraum ohne Fenster verglichen werden. Als Bedachung fanden mehrere Trapezbleche Verwendung, welche seitlich mit Dämmwolle abgedichtet wurden. Im Inneren des Brandraumes befanden sich zwei Kiesbettbrenner die mittig im Abstand von 2 m zum Türausschnitt aufgestellt wurden. Um die Temperaturen im Raum überwachen zu können wurden zusätzlich vier weitere Thermoelemente verwendet. Drei der Elemente befanden sich in einer Höhe von 50cm; 150 cm und 200 cm direkt über den Flammen. Ein weiteres Thermoelement befand sich mittig zwischen den Gasbrennern und dem Türausschnitt in einer Höhe von 200 cm.

Die Probestücke wurden von außen am Durchgang in den Brandraum angebracht und mit Keramikfaser Dämmwatte abgedichtet. Um einen vollständig geschlossenen Raum nachzustellen, wurde unter den Türausschnitten eine Promatplatte angebracht, angeschraubt und mit Keramikfaser abgedichtet um keine Wärmeverluste über undichte Stellen zu verzeichnen.

Während den Versuchen im Brandraum wurde die zentrale Absaugungsanlage mit einer Leistung von $50.000 Nm^3/h$ in Betrieb genommen.

3. Versuchsaufbau

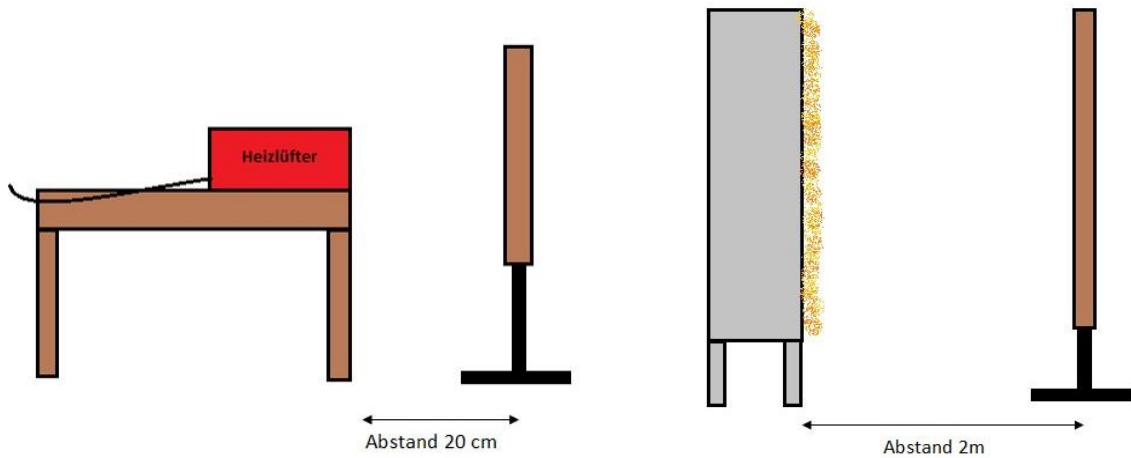


Abbildung 18: Skizze des Versuchsaufbaus mit Heißluftgebläse

Abbildung 19: Skizze des Versuchsaufbaus mit der Strahlwand

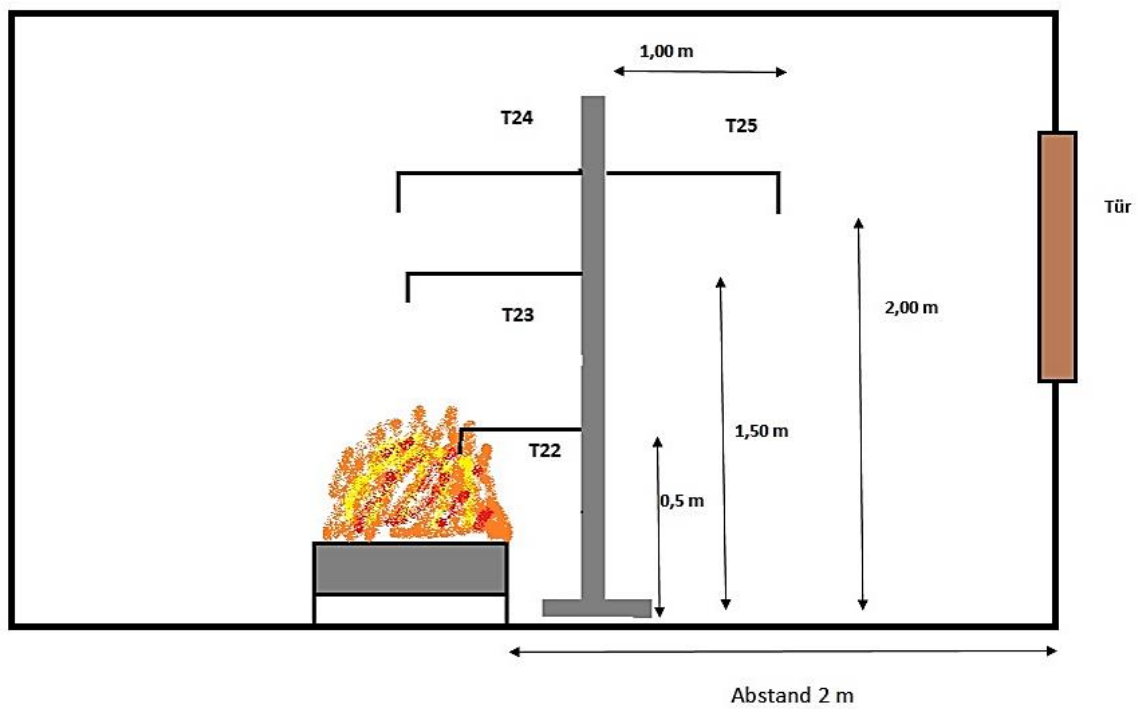


Abbildung 20: Skizze des Versuchsaufbaus im Brandraum mit den Kiesbettbrennern

3. Versuchsaufbau

3.1.2 Wärmequellen

In den nachfolgenden Abbildungen werden die genutzten Wärmequellen vorgestellt. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede zwischen dem Heißluftgebläse für Konvektion (Abbildung 21) und dem thermischen Strahler für die Wärmestrahlung (Abbildung 22). Als realitätsnahe Vergleichsmöglichkeit wurden zwei Kiesbettbrenner gewählt, die beide Komponenten, Konvektion und Wärmestrahlung in der Flamme vereinen.

Heißluftgebläse	Strahlwand	Kiesbettbrenner
<p>Der Lüfter besitzt eine Gehäuseabmessung von ca. 33 cm x 20 cm x 31 cm (L x B x H) und eine Austrittsfläche von $0,0156 \text{ m}^2$. Die maximale Leistung beträgt 1800 Watt.</p>	<p>Die Strahlungsfläche des thermischen Strahlers beträgt $1,163 \text{ m}^2$. Seine max. Leistung liegt bei einem Mischungsverhältnis von 10 m^3 Gas zu 250 m^3 Luft bei 80 KW pro m^2.</p>	<p>Die Abmaße eines Kiesbettbrenners betragen 50 cm x 50 cm.</p> <p>Während den Versuchen wurden zwei solcher Gasbrenner verwendet um einen Brandverlauf nachzustellen. In den ersten 15 Minuten wurde die Leistung von 50 KW auf 200 KW, in Abständen von 5 Minuten, erhöht. Anschließend wurde die Leistung weitere 15 Minuten konstant bei 200 KW gehalten.</p>
		
<p>Abbildung 21: Heißluftgebläse</p>	<p>Abbildung 22: Thermischer Strahler</p>	<p>Abbildung 23: Kiesbettbrenner</p>

3.1.3 Messtechnik und Kalibrierung

Thermoelemente

Ein Thermoelement ist ein Paar metallischer Leiter aus zwei unterschiedlichen Materialien. Diese sind am Ende miteinander verschweißt und aufgrund des thermoelektrischen Effektes zur Temperaturmessung geeignet. Für die Funktionsweise ist wichtig, dass die beiden Enden der zwei verschiedenen Leiter in engen Kontakt gebracht werden und sie sich somit zu einem Kreis zusammenschließen. Bringt man die Kontaktstellen auf unterschiedliche Temperaturen misst man bei geöffnetem Stromkreis die sogenannte Thermospannung, welche proportional zur Temperaturdifferenz ist [31] [32] .

3. Versuchsaufbau

Dieses Phänomen wird auch Seebeck - Effekt genannt.

$$U_{Seebeck} = k * \Delta T \quad (\text{Gleichung 17})$$

k – beschreibt den Seebeck – Koeffizienten bzw. die Thermokraft und besitzt je nach Material einen unterschiedlichen Wert. Während den Versuchsdurchführungen wurden Elemente vom Typ K verwendet, welche aus Nickel–Chrom (10% Chrom, 90 % Nickel) und Nickel bestehen. Die Maximaltemperatur die ein Typ K Element erreichen kann, beträgt 1200°C. Definiert sind sie allerdings bis 1370°C [32].

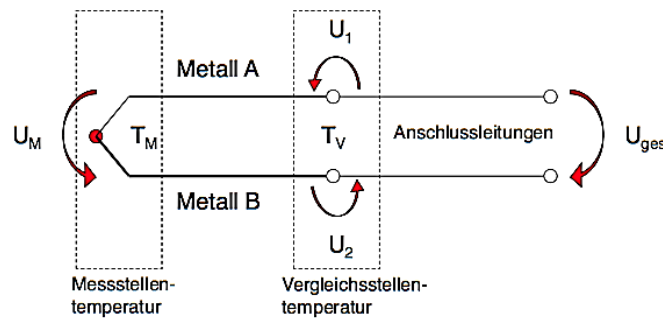


Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Thermoelements [32]

Strahlungsaufnehmer

Als Strahlungsaufnehmer wurde ein wassergekühltes Modell des Typs Gardon-Gauge der Firma Medtherm verwendet. Hierbei handelt es sich um ein spezielles Thermoelement welches sich im inneren eines Kupfergehäuses befindet. Dieses gibt über thermoelektrische Eigenschaften, mithilfe einer definierten Gehäuse-Wasserkühlung (14°C Wasser–Eintrittstemperatur), ein geeichtes Spannungssignal ab. Mittels Anpassung durch eine Eichkurve entspricht dies der Wärmestrahlung in $\frac{W}{cm^2}$. Das Element ist mit einem schwarzen Graphitlack beschichtet und weist einen Emissionsgrad von $> 0,99$ auf. Die Einstellung des Wasserdurchflusses erfolgte durch einen Schwebekörper-Durchflussmesser. Dieser wurde auf $20 \frac{l}{h}$ eingestellt. Durch die Oberflächenbeschichtung und die Konstruktion kann der Wert ohne Emissionsgradkorrektur über eine indirekte Messung übernommen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Temperaturgrenze des Körpers von 200 °C nicht überschritten wird. [33].

Durch Vorversuche und die Messung der Austrittstemperatur des Wassers konnte dies sichergestellt werden.

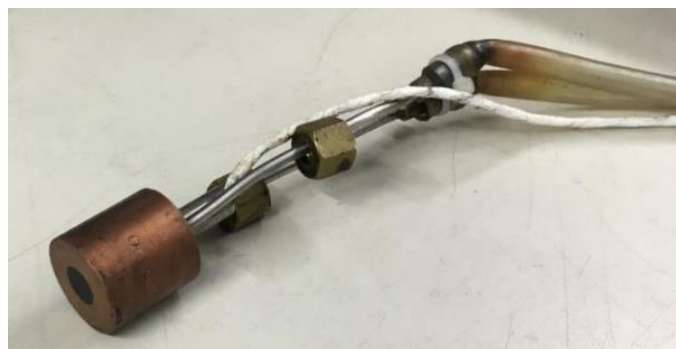


Abbildung 25: Wärmeflussaufnehmer des Typs Gardon Gauge mit Wasser-Kopplung

3. Versuchsaufbau

Drei-Perlensonde

Eine Mehr-Perlensonde wird zur Temperaturmessung in einer Umgebung verwendet, in welcher die Festkörperwärmestrahlung aufgrund ihrem hohen Strahlungsanteil eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. Daher wird für die reine Gastemperaturmessung zusätzlich eine Mehr-Perlensonde verwendet. Die Sonde besteht in der Regel aus Typ S Thermoelementen die an der Spitze Perlen ungleichen Durchmessers aufweisen. Die Elemente bestehen aus Platin 10%- Rhodium und Platin (Pt10%Rh-Pt). Platin wird als Bezugsmaterial für die Bestimmung der Thermokraft (siehe Erklärung Thermoelemente) per Definition gleich Null gesetzt. Aufgrund der großen Oberfläche und der unterschiedlichen Strahlungsabsorption können drei korrigierte Gastemperaturen gemessen werden [34].

Während den Versuchen mit dem thermischen Strahler wurde eine Drei-Perlensonde (Abbildung 26) zur Messung der korrigierten Gastemperatur eingesetzt. Die Perlen besitzen einen Durchmesser von $d_1 = 0,41 \text{ mm}$, $d_2 = 0,64 \text{ mm}$ und $d_3 = 0,98 \text{ mm}$.

Zur Berechnung der korrigierten Gastemperatur werden allerdings nur zwei Perlen verwendet (vgl. Gleichung 18). Hierbei handelt es sich um die Perlen mit dem kleinsten sowie dem größten Durchmesser. Die dritte Perle, mittleren Durchmessers, dient zur Überprüfung der berechneten Temperaturen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6 dargestellt.

$$T_G = \frac{T_{d_1} - T_{d_2}}{\frac{T_{d_2}^4 - T_w^4}{T_{d_1}^4 - T_w^4} * \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} - 1} + T_{d_1} \quad (\text{Gleichung 18})$$

Dabei bezeichnet T_w die Oberflächentemperatur der Tür auf der bestrahlten Seite, d_1 den Durchmesser der kleineren und d_2 den Durchmesser der größeren Perle [9].

Diese Thermoelemente sind geeignet für den dauerhaften Gebrauch in oxidierenden oder Schutzgas-Atmosphären bei Temperaturen bis 1600 °C. Des Weiteren weisen Elemente vom Typ S im Gegensatz zu Typ K Elementen einen erweiterten Temperaturbereich, schnelleres Ansprechverhalten sowie eine konstruktionsbedingte höhere Genauigkeit auf, sind allerdings weniger robust [35].



Abbildung 26: Bild der Drei-Perlensonde

3. Versuchsaufbau

Kalibrierung der Thermoelemente

Die Thermoelemente wurden einzeln in kochendes Wasser gehalten. Dadurch wird angenommen, dass die Wassertemperatur konstant 100 °C beträgt und somit eine Kalibrierung der Elemente durchgeführt werden konnte. Abweichungen wurden im Messprogramm DasyLab auf 100 °C angepasst sodass alle Elemente die gleiche Temperatur anzeigen.

Datenerfassung durch das Messprogramm DasyLab

In Abbildung 27 ist ein Screenshot der Datenerfassung des Messprogramms DasyLab grafisch dargestellt. Auf der linken Seite befinden sich die Türausschnitte mit den Anordnungen der Thermoelemente. Darunter werden die Temperaturverläufe in einem Temperatur-Zeit-Diagramm angezeigt. Zusätzlich wird rechts im Bild die Uhrzeit sowie die verstrichene Messzeit aufgezeigt. Das Messprogramm hat einen Zeitintervall von 1 Sekunde. Das bedeutet, dass jede Sekunde eine Messung erfolgt.

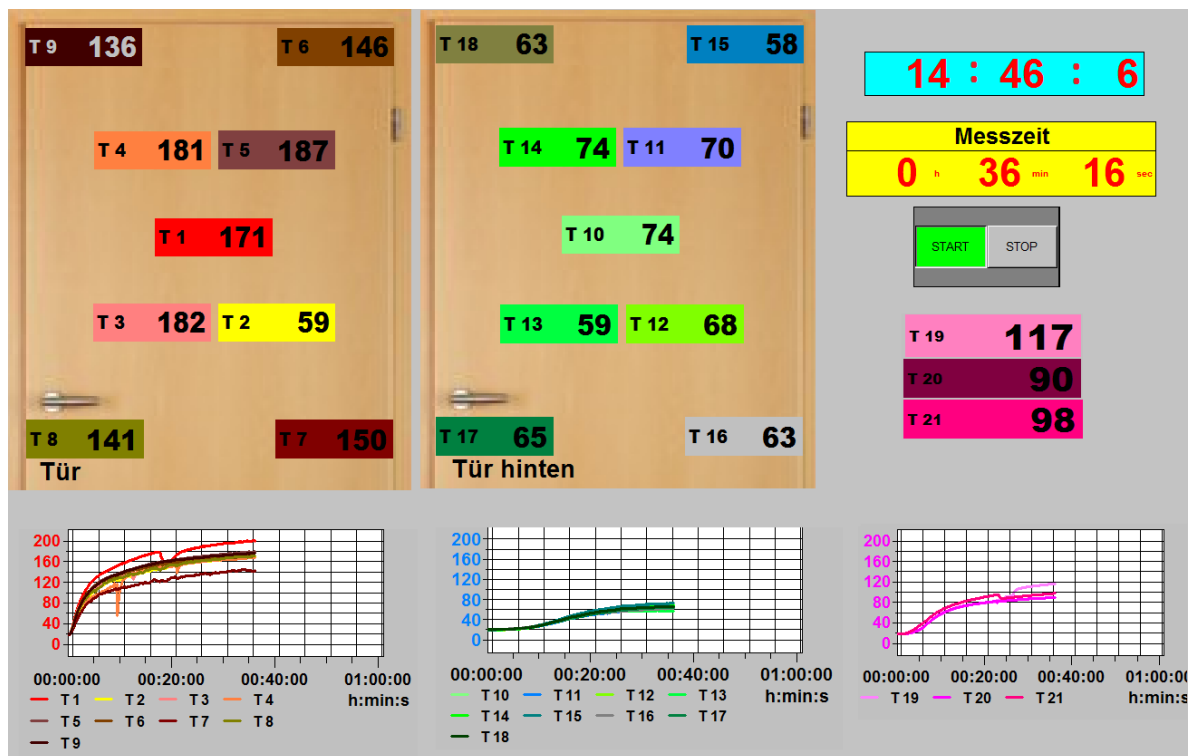


Abbildung 27: Screenshot der Datenerfassung über das Messprogramms DasyLab [36]

3. Versuchsaufbau

3.2 Probestücke

Der folgende Abschnitt befasst sich mit den verwendeten Probestücken. Hierbei handelt es sich um:

- eine Holztür mit einer Wabenfüllung
- eine Holztür mit einer Röhrenspaneinlage
- eine Stahltür mit einer Füllung aus Mineralwolle

Alle Türausschnitte besitzen eine Größe von 80 cm x 80 cm sowie eine Türblattstärke von 4 cm.

3.2.1 Holztür mit Wabenfüllung

Türblätter mit einer Wabenfüllung, in der Regel aus Kartonwaben, werden als besonders preisgünstige Türen innerhalb von Wohnungen eingesetzt. Die Wabeneinlage weist nur einen geringen Brand- sowie Schallschutz auf. Weiterhin kann schon eine geringe mechanische Belastung zum Bruch des Türblattes führen. Für ausreichend Stabilität sorgt ein umlaufendes Rahmenholz. Das Gewicht einer solchen Tür beschränkt sich auf ca. 8 kg/m^2 . Die Oberfläche des Probestückes besteht aus einer ca. 2 mm starken Pressspanplatte die mit einer Dekorfolie verpresst wurde [37].

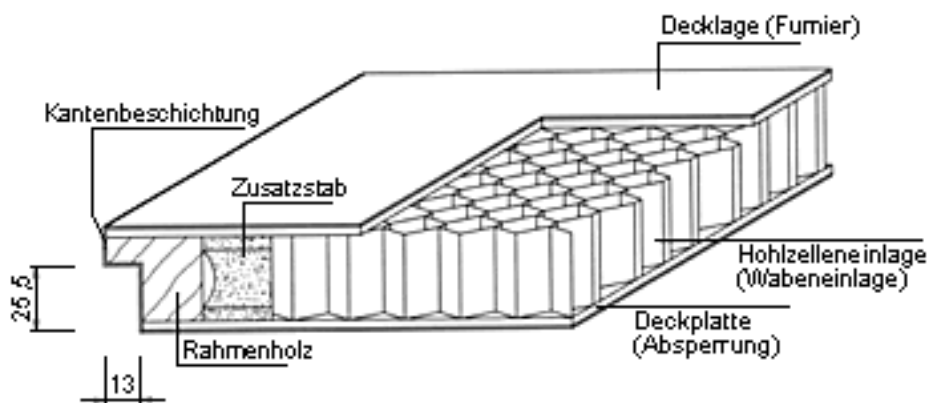


Abbildung 28: Schematische Darstellung einer Tür mit Wabenfüllung [11]

3.2.2 Holztür mit Röhrenspaneinlage

Die Steigerung zur Innentür mit Wabenfüllung ist eine Holztür mit einer Röhrenspaneinlage als Innenleben. Diese ist eine Mittellage, die aus einer durchgehenden Platte mit horizontal angeordneten Röhren besteht. Sie verleiht den Türen eine hohe Flächenstabilität sowie einen mittleren Brand- und Schallschutz. Des Weiteren lässt sie eine deutlich höhere mechanische Beanspruchung zu. Die Röhren sind waagrecht angeordnet und weisen einen Durchmesser von 2,5 cm auf. Der Abstand zwischen den einzelnen Röhren beträgt 1,7 cm. Das Gewicht dieser Tür beträgt ca. 15 kg/m^2 .

3. Versuchsaufbau

Diese Einlage findet sich in den meisten Haushalten wieder, da sie zur gehobenen Mittelklasse gezählt wird [12]. Die Oberfläche des Probestückes besteht aus einer aufgeleimten mitteldichten Holzfaserplatte (MDF Platte) die mit einer Decklage aus Furnierholz versehen wurde. Zu erwähnen ist, dass sich diese während den Versuchen mit dem thermischen Strahler sowie den Kiesbettbrennern ablöste.

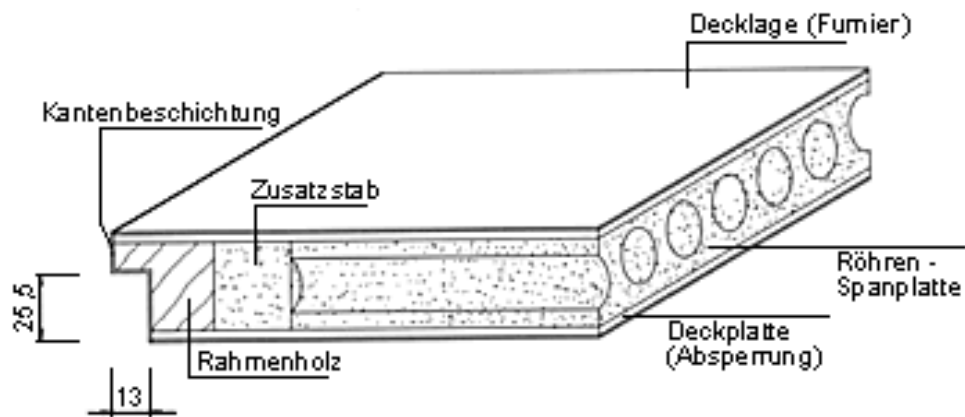


Abbildung 29: Schematische Darstellung einer Innentür mit Röhrenpaneinlage [11]

3.2.3 Stahltür

In Abbildung 30 ist der verwendete Stahltürausschnitt dargestellt. An der Tür befindet sich ein Türgriff der bei dem nachgestellten Wohnzimmerbrand Verwendung findet. Die Tür besitzt wie die Holztüren eine Stärke von 4 cm. Das Innenleben welches in Abbildung 31 dargestellt ist besteht aus 3,4 cm starker Mineralwolle. Umgeben ist diese von einer 0,3 cm dicken Schicht aus feuerverzinktem Feinblech.



Abbildung 30: Bild der verwendeten Stahltür Maße: 80 cm x 80 cm



Abbildung 31: Bild des Innenlebens der Stahltür, Türblatttiefe 4 cm

4. Versuche

4. Versuche

Um die Temperaturverteilung auf der flammenzugewandten – und der flammenabgewandten Seite, sowie in der Tür erfassen zu können, kamen während den Versuchen 21 Thermoelemente vom Typ K (vgl. Kapitel 3.1.3) zum Einsatz. Auf der flammenzugewandten Seite (vgl. Abbildung 32) befinden sich die Thermoelemente T1-T9, die von der Mitte aus im Uhrzeigersinn angeordnet sind. Die gleiche Anordnung befindet sich auf der Rückseite, beginnend mit T10, mit dem Uhrzeigersinn drehend bis T18 (Abbildung 33).

Die Abmessungen für T2-T4, dargestellt in Abbildung 32, und T11-T14 (Abbildung 33) betragen ab dem Mittelpunkt in der Horizontalen und in der Senkrechten jeweils 20 cm. Für T6-T9 und T15-T18 wurde ein Abstand von 30 cm ab dem Mittelpunkt gewählt. Diese Maßangaben beziehen sich auf die Versuche mit der Strahlwand sowie mit dem Kiesbettbrenner.

Für die Versuche mit dem Heizlüfter wurde eine kleinere Anordnung gewählt. Somit befinden sich T2-T4 und T11-T14 jeweils 6 cm vom Mittelpunkt (in x und y - Richtung) entfernt. Für T6-T9 und T15-T18 wurde vom Mittelpunkt ein Abstand von 20 cm, nach oben und unten bzw. nach links und nach rechts, gewählt. Der Grund hierfür war die kleinere Austrittsöffnung des Lüfters (vgl. Kapitel 3.1.2).

Die Anordnungen der Elemente, auf und in der Tür, werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine beispielhafte Darstellung der farblichen Hintergründe. Diese wurde in den Legenden der einzelnen Diagramme angepasst. Die Grafiken dienen des Weiteren zur Veranschaulichung der Elementpositionen auf der Türoberfläche.

Auf der bestrahlten- sowie auf der Rückseite sind die Elemente jeweils in der Draufsicht dargestellt. Dies bedeutet, dass diese nicht Deckungsgleich miteinander sind und dadurch die Rückseite gespiegelt zu betrachten ist.

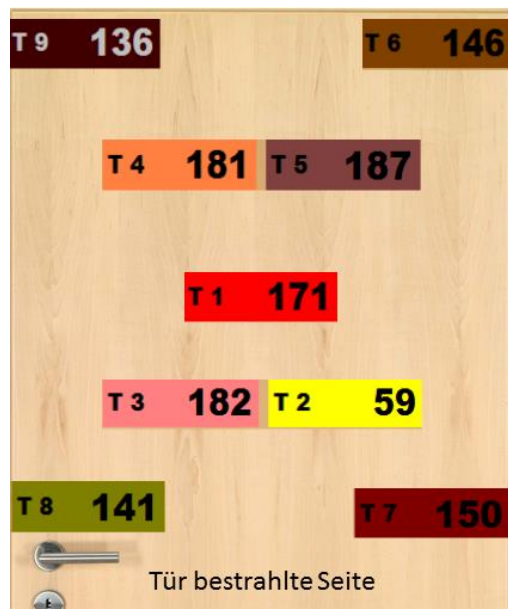


Abbildung 32: Screenshot Messprogramm DasyLab, Thermoelemente Flammenzugewandte Seite

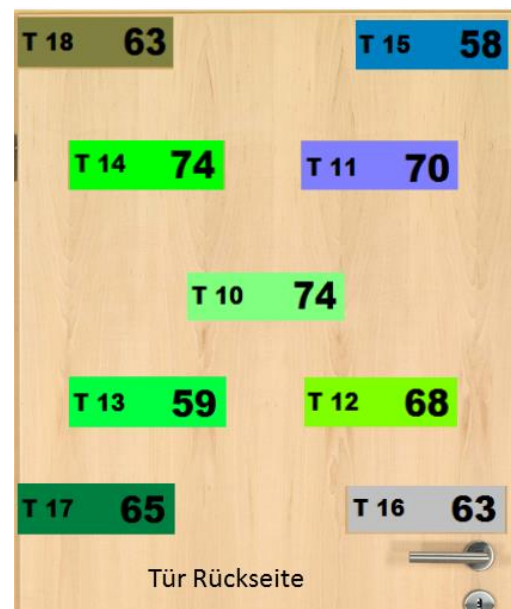


Abbildung 33: Screenshot Messprogramm DasyLab, Thermoelemente Flammenabgewandte Seite

4. Versuche

Um den Temperaturverlauf im Türinneren erfassen zu können, wurden wie in Abbildung 34 zu erkennen ist, drei Thermoelemente in der Tür angebracht. T19 befindet sich in der Rückwand der Strahler zugewandten Seite, T20 im Inneren der Tür und T21 auf der Oberflächeninnenseite der flammenabgewandten Seite.

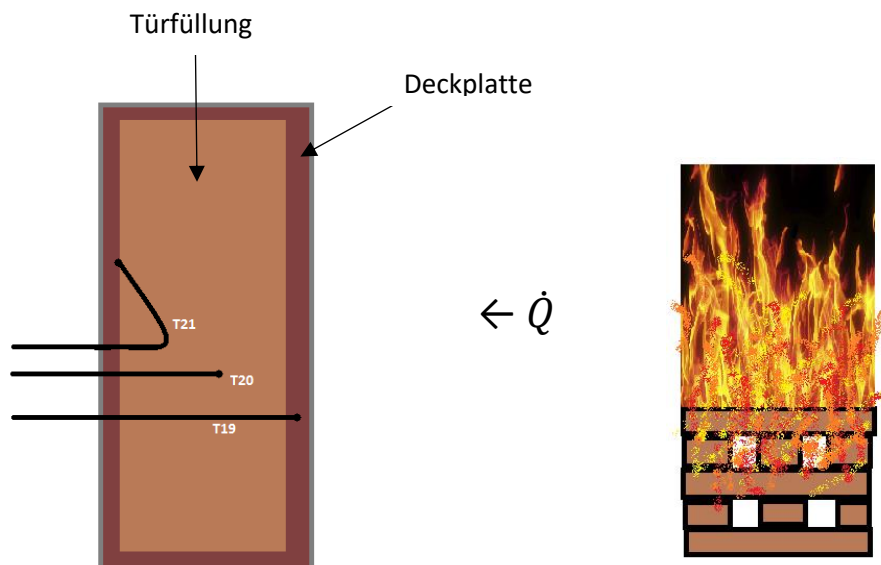


Abbildung 34: schematische Skizze der Türblattstärke, Anordnung der Thermoelemente im Inneren der Tür

4. Versuche

4.1 Reproduzierbarkeit der Versuche

Zur einfachen Abschätzung der Reproduzierbarkeit wurde jeder Versuch zweifach durchgeführt. Ausreißer können ziemlich sicher erfasst werden, ein Beweis für die Reproduzierbarkeit ist dies allerdings nicht.

Die nachfolgenden Abbildungen der Versuche V18 und V19 zeigen die Beflammung mit den Kiesbettbrennern und einer Tür mit Wabenfüllung. Zu erkennen ist, dass die Maximaltemperaturen auf der flammenzugewandten Seite bei beiden Versuchen zwischen 250 °C und 300 °C liegen. Eine Differenz wurde durch die Elemente T9 von 25,6°C erreicht.

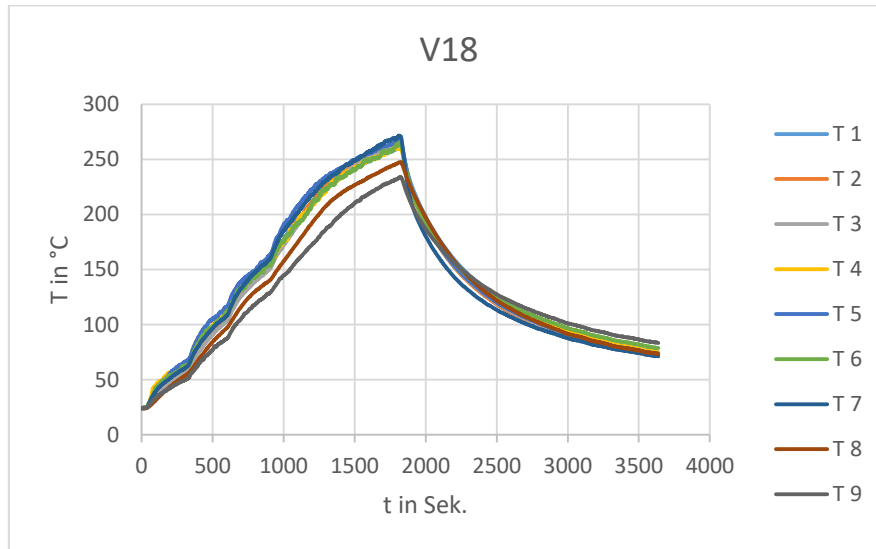


Abbildung 35: Versuch 18, T1- T9, Wabenfüllung, flammenzugewandte Seite, Kiesbettbrenner

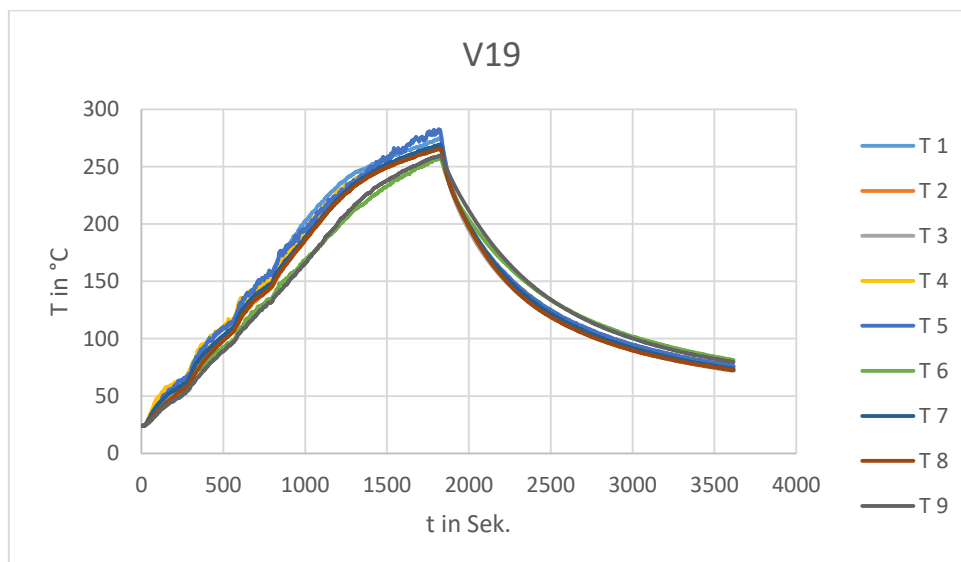


Abbildung 36: Versuch 19, T1- T9, Wabenfüllung, flammenzugewandte Seite, Kiesbettbrenner

4. Versuche

Auch auf der Rückseite ist eine ähnliche Temperaturverteilung beider Versuche zu erkennen. Die Maximaltemperatur die nach ca. 30 Minuten von T10 erreicht wurde beträgt zwischen ca. 95°C und 98°C. Bei Versuch 19 kam es zu Abweichungen der Elemente T12 und T13. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich die Elemente während des Versuches aus ihrer Verschraubung lösten und es somit zu keinem Oberflächenkontakt gekommen ist.

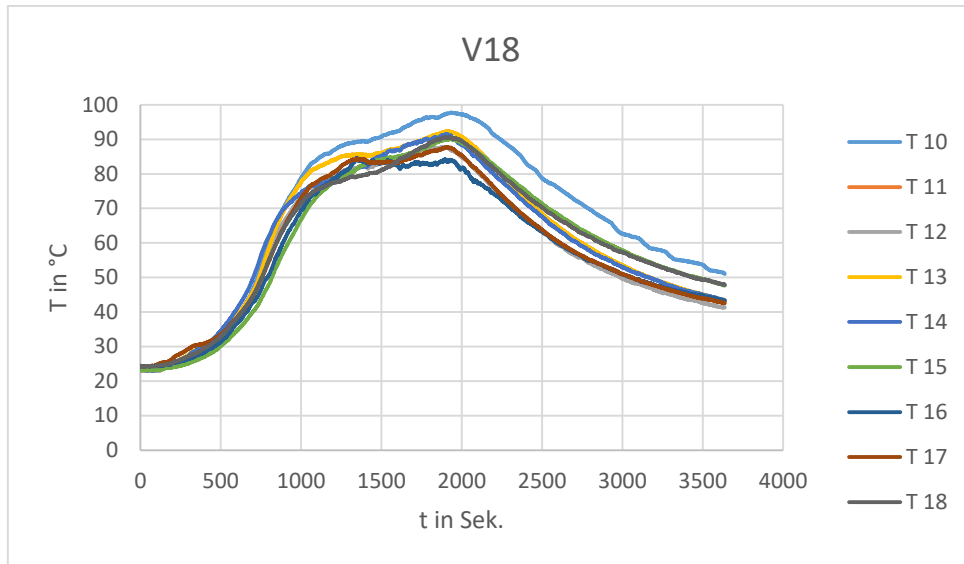


Abbildung 37: Versuch 18, T10-18, Wabenfüllung, flammenabgewandte Seite, Kiesbettbrenner

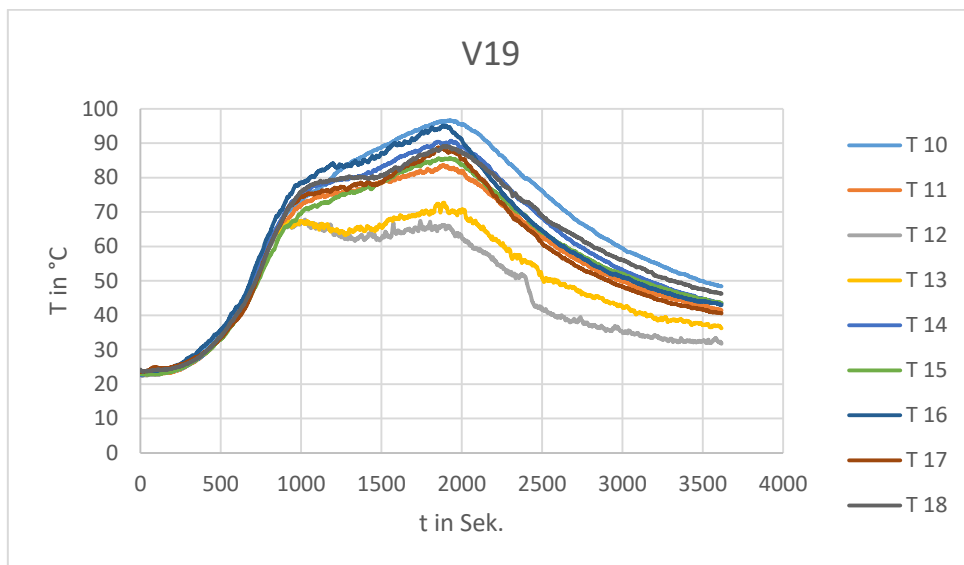


Abbildung 38: Versuch 19, T10- T18, Wabenfüllung, flammenabgewandte Seite, Kiesbettbrenner

4. Versuche

Die Abweichung des Elementes T20 in Versuch 19, welches sich in der Tür befindet, lässt sich durch ein Herausrutschen des Thermoelementes erklären.

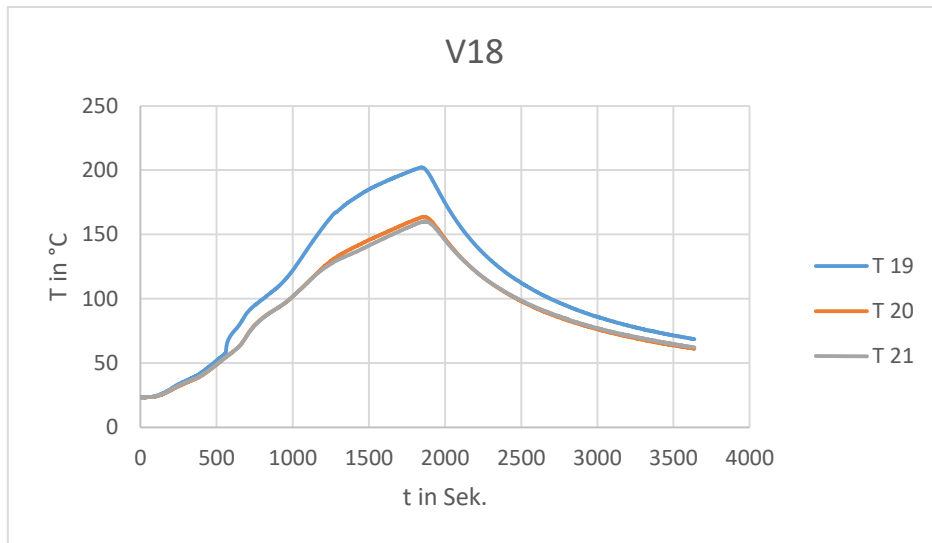


Abbildung 39: Versuch 18, T19- T21, Wabenfüllung, Kiesbettbrenner

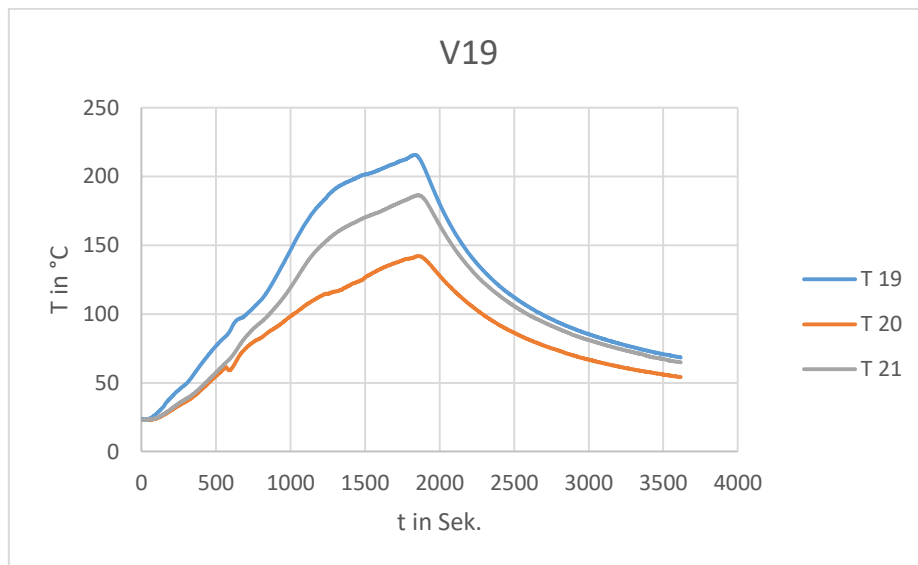


Abbildung 40: Versuch 19, T19- T21, Wabenfüllung, Kiesbettbrenner

Erwartet wurde eine gewisse Reproduzierbarkeit, da die Einflussgrößen als konstant angenommen werden können.

- Materialeigenschaften und Geometrie = const., da diese industriell hergestellt werden.
- Thermoelemente = const.
- Wärmeeintrag = const.

4. Versuche

4.2 Versuchsergebnisse

Aufgrund der Übersichtlichkeit wurden für die Darstellung der Ergebnisse jeweils 5 Thermoelemente pro Türseite ausgewählt. Hierbei handelt es sich um die Elemente T1, T2, T4, T7, und T9 auf der flammenzugewandten- sowie T10, T12, T14, T16 und T18 auf der flammenabgewandten Seite. Aus den Abbildung 41 und Abbildung 42 ist ein diagonaler Verlauf ersichtlich.



Abbildung 41: Anordnung der Thermoelemente flammenzugewandte Seite



Abbildung 42: Anordnung der Thermoelemente flammenabgewandte Seite

4. Versuche

4.2.1 Wabenfüllung

4.2.1.1 Heißluftgebläse

Auf der linken Diagrammseite sind über die y-Achse die erreichten Temperaturen zu entnehmen. Zusätzlich wird auf der waagrecht verlaufenden x-Achse die verstrichene Zeit in Sekunden dargestellt. Die Maximaltemperatur von 83,2°C wurde nach 34 Minuten (2040 Sekunden) durch T4 erreicht. T7 wird aufgrund seiner Position im unteren Bereich der Tür durch die entstehende Auftriebsströmung der Konvektion nicht erfasst und zeigt keine Temperaturänderung auf.

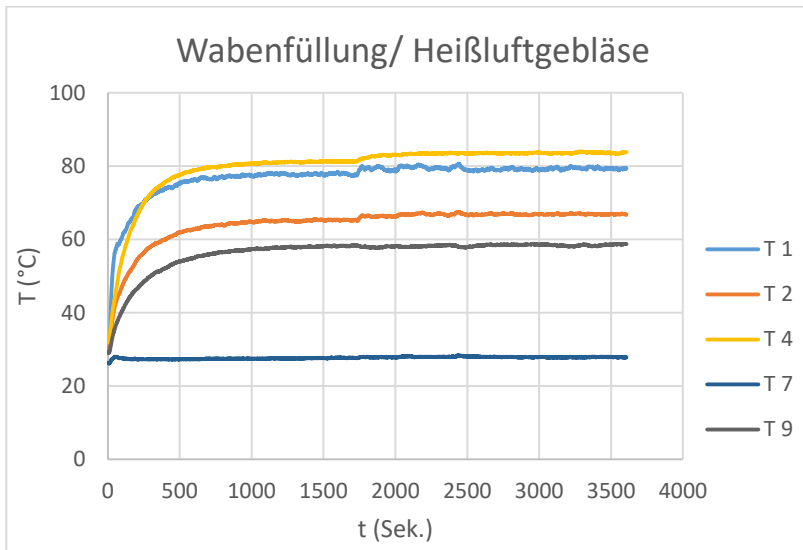


Diagramm 1: Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Heißluftgebläse / Wabenfüllung



Abbildung 43: Versuchsbild, Heißluftgebläse und Wabenfüllung

Diagramm 2 zeigt die Rückseite der Tür mit derselben Achsenanordnung. Zu erkennen ist, dass T12 und T16 aufgrund ihrer Position, nur einen geringen beziehungsweise keinen Anstieg der Temperatur verzeichnen und konstant zwischen 25 °C und 28 °C liegen. Nach 16 Minuten (1000 Sekunden) stellt sich bei T14, T10 und T18 die Maximaltemperatur von 40,2°C sowie 38,2°C ein. Die Temperaturen bleiben bis Versuchsende bei t = 1h konstant.

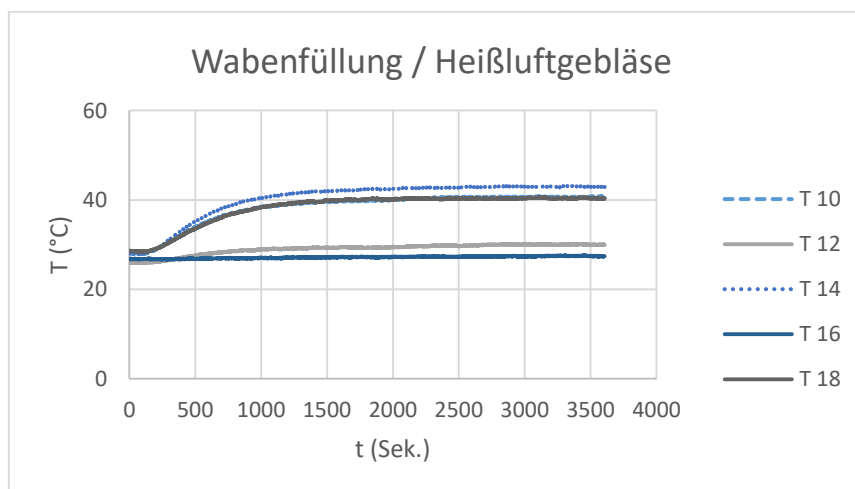


Diagramm 2: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Heißluftgebläse/ Wabenfüllung

4. Versuche

4.2.1.2 Thermischer Strahler

Das nachfolgende Diagramm stellt den Temperaturverlauf welcher mit dem thermischen Strahler erreicht wurde, dar. Hier ist zu erkennen, dass T1 mit 180°C der wärmste Messpunkt auf der bestrahlten Seite ist. Die Maximaltemperatur wurde nach 25 Minuten (1500 Sekunden) erreicht.

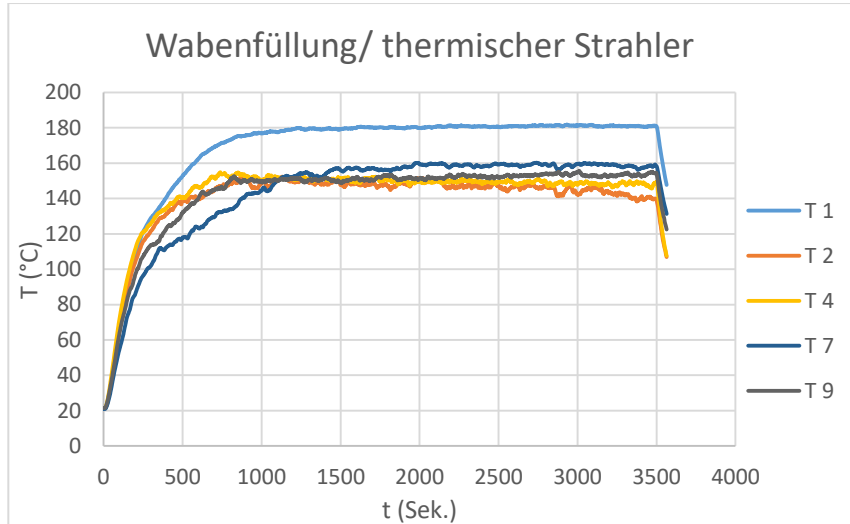


Diagramm 3: Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Thermischer Strahler / Wabenfüllung

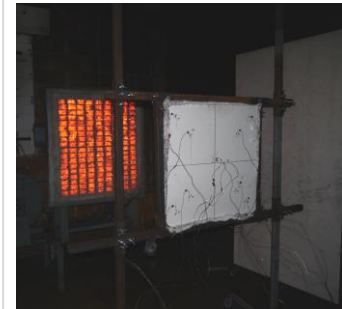


Abbildung 44: Versuchsbild, Strahlwand und Wabenfüllung

Die Maximaltemperatur wird nach einer Stunde Versuchszeit auf der Rückseite durch T14 mit 82,8 °C gemessen. Weiterhin erreichen zur gleichen Zeit T10 = 79,8°C und T18 = 75°C. Durch die auftreffende Strahlung ist nach 2 Minuten ein Temperaturanstieg ersichtlich. Nach 16 Minuten (1000 Sekunden) ist auf der Rückseite ein langsamerer Anstieg zu verzeichnen.

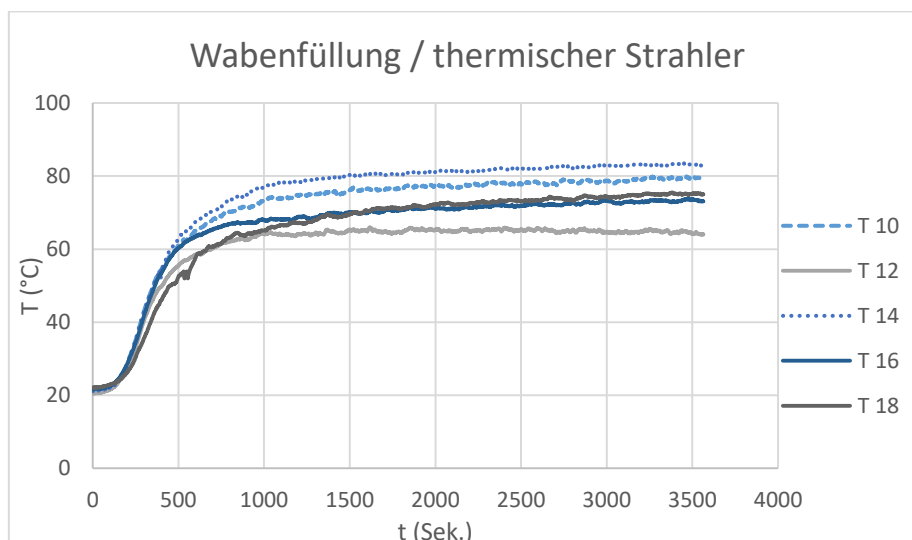


Diagramm 4: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Thermischer Strahler / Wabenfüllung

4. Versuche

4.2.1.3 Kiesbettbrenner

Während den Versuchen mit den Kiesbettbrennern wurden zusätzlich 3 Thermoelemente zur Abgastemperaturmessung im Raum sowie ein Thermoelement zur zeitlichen Temperaturentwicklung in der Flamme verwendet. T22 befindet sich 50 cm, T23 = 150 cm und T24 = 200cm über dem Boden. Zu erwähnen ist, dass sich T22 direkt in den Flammen befindet. Durch T25 wurde die Temperatur zwischen den Brennern und der Tür in einer Höhe von 200 cm gemessen (vgl. 3.1.1, Abbildung 20)

Die Temperaturverteilung war bei allen Versuchen im Brandraum ähnlich. Diese werden in den nachfolgenden Diagrammen 9 und 10 stellvertretend für alle Versuche mit den Kiesbettbrennern dargestellt.

Die Maximaltemperatur wurde nach 30 Minuten durch T22 in der Flamme mit 805,3°C erreicht. Die Elemente T23 und T24 zeigen in 150 cm und 200 cm Höhe eine Abgastemperatur von 320°C auf.

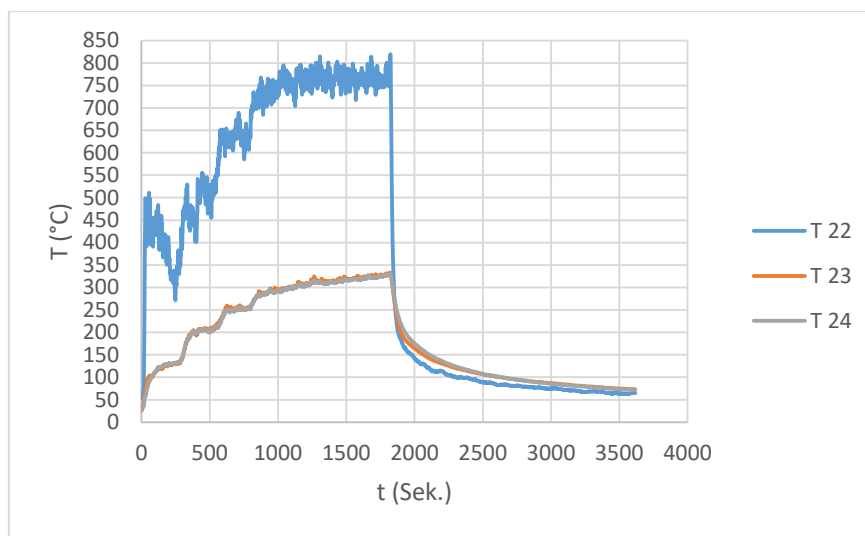


Diagramm 5: Temperaturverläufe über der Flamme im Brandversuchsraum

In Diagramm 6 lässt sich die Leistungserhöhung der Kiesbettbrenner anhand Messpunkt T25 in einer Höhe von 200 cm zwischen den Brennern und der Tür grafisch verdeutlichen. Beginnend mit 50 KW wurde alle 5 Minuten eine Erhöhung um weitere 50 KW vorgenommen. Nach Erreichen der Maximalleistung von 200 KW, wurde der Türausschnitt weitere 15 Minuten bei konstanter Leistung bestrahlt.

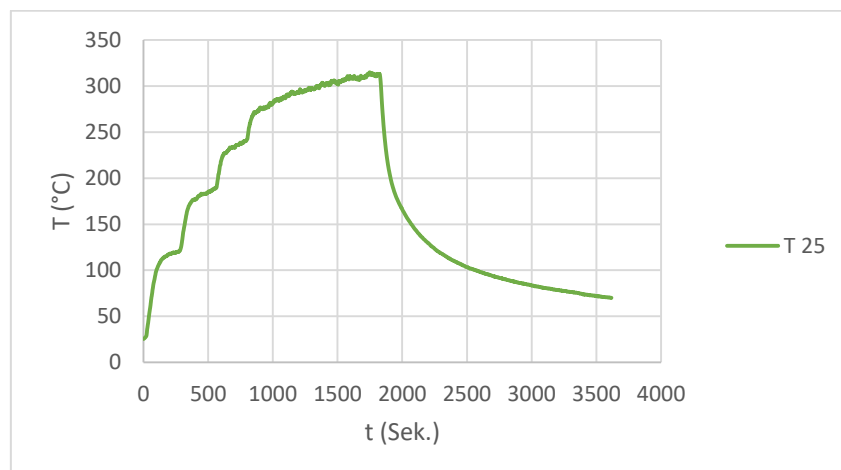


Diagramm 6 :Temperaturverteilung im Raum

4. Versuche

In Diagramm 7 ist ein stetiger Temperaturanstieg erkennbar. Die Maximaltemperaturen der hier aufgeführten Elemente liegen alle zwischen 260°C und 270°C. Die Ergebnisse wurden am Versuchsende nach 30 Minuten (1800 Sekunden) erreicht. Lediglich T9 weist eine geringere Temperaturerhöhung auf. Dies kann auf die thermischen Verwirbelungen an der Decke und die somit entstehende Abkühlung der Rauchgase zurückzuführen sein.

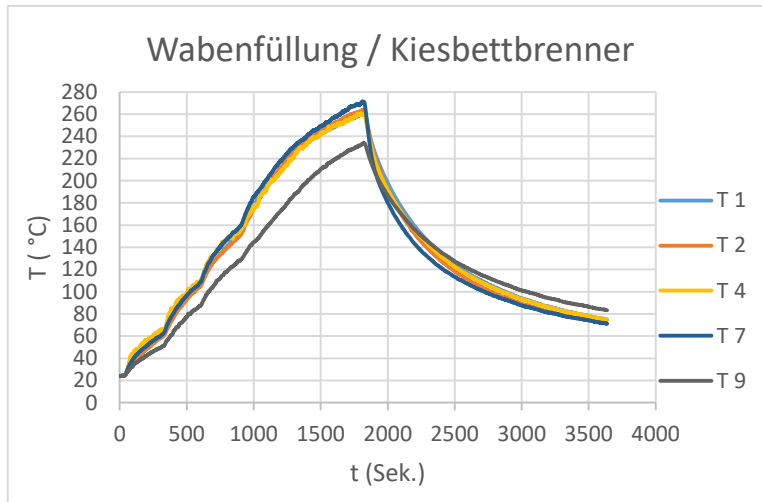


Diagramm 7: Zeitliche Temperaturverteilung Messergebnisse der Vorderseite, Kiesbettbrenner / Wabenfüllung



Abbildung 45: Versuchsbild, Kiesbettbrenner und Wabenfüllung

Auf der Rückseite ist zu erkennen, dass es zwischen der 8. Minuten und 16. Minute zu einem steilen Temperaturanstieg kommt. T10 erreicht nach 33 Minuten (2000 Sekunden) die maximale Temperatur von 97,7 °C. Zu erwähnen ist hier, dass die Brenner nach 30 Minuten (1800 Sekunden) abgeschaltet wurden.

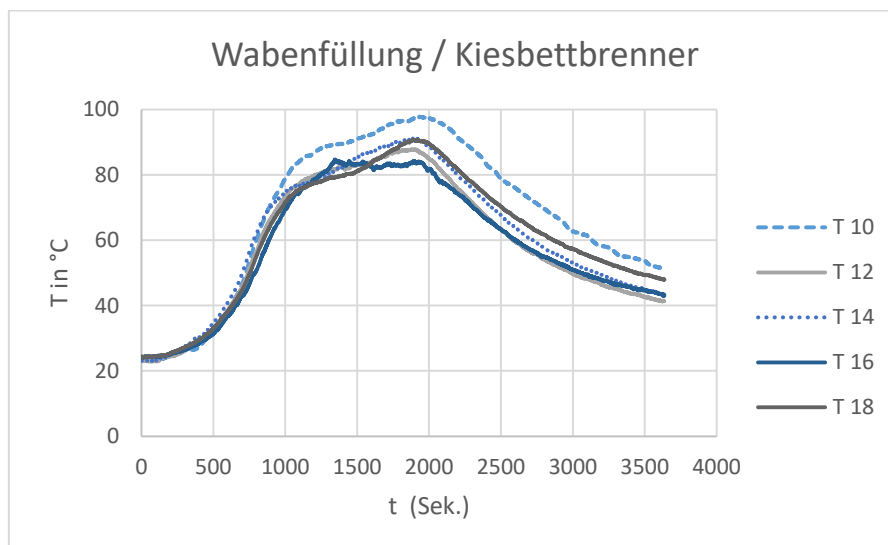


Diagramm 8: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Kiesbettbrenner / Wabenfüllung

4. Versuche

4.2.1.4 Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten

Zur genaueren Auswertung der Ergebnisse wurden durch das Programm Tecplot360, zweidimensionale Darstellungen erstellt. Tecplot360 ist eine gängige Auswertungs- und Visualisierungs-Software. Durch Triangulation einzelner Messpunkte werden diese zu einem Gitternetz verbunden. Zur Erstellung eines solchen Temperaturverlaufes benötigt man die Messkoordinaten sowie die dort herrschenden Temperaturen zu einem bestimmten Zeitpunkt.

In den Abbildung 46 und Abbildung 47 werden die Temperaturverteilungen der Holztür mit Wabenfüllung auf der bestrahlten Seite sowie der Rückseite aufgezeigt. Neben jeder Darstellung zeigt die links angeordnete Legende die unterschiedlichen Temperaturskalen in °C an

Beginnend mit Abbildung 46 wird auf der linken Seite der Versuch mit dem Heißluftgebläse dargestellt. Die warme Luft wurde senkrecht zur Tür aufgetragen, wodurch ein sichtbarer thermischer Auftrieb zu erkennen ist. Das Maximum liegt grafisch gesehen im oberen Bereich und beträgt 81°C. Die mittlere Darstellung bezieht sich auf den Versuch mit dem thermischen Strahler. Hier ist ein diagonaler Temperaturverlauf mit einer Maximaltemperatur von 183 °C zu verzeichnen. In der rechten Grafik ist der Versuch des Kiesbettbrenners dargestellt. Die homogene Temperaturverteilung im Raum überträgt sich hierbei auf die komplette Türoberfläche der flammenzugewandten Seite. Der in der linken oberen Ecke aufgezeigte Temperaturunterschied beträgt 8°C.

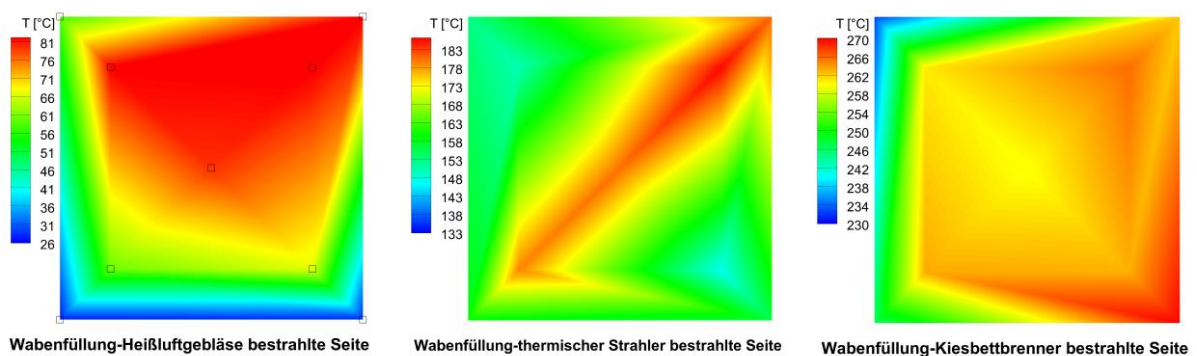


Abbildung 46: Zweidimensionale, interpolierte Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten, Wabenfüllung, bestrahlte Seite

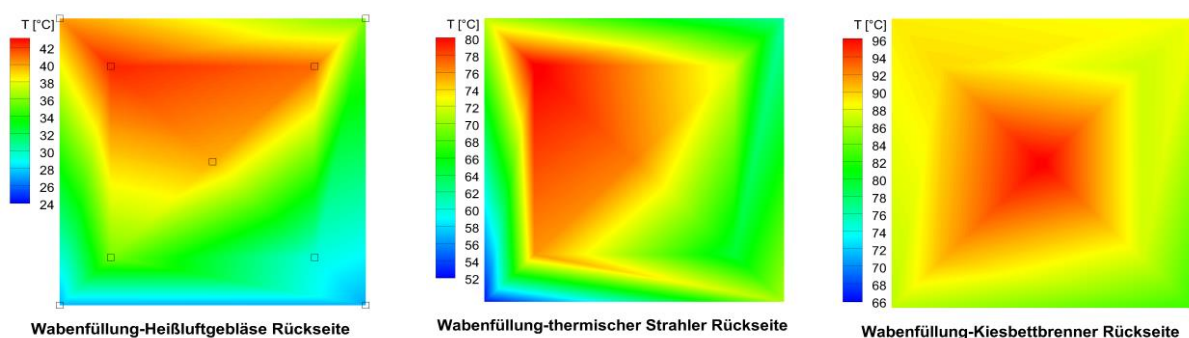


Abbildung 47: Zweidimensionale, interpolierte Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten, Wabenfüllung, Rückseite

4. Versuche

In der linken Grafik ist auf der Rückseite der thermische Auftrieb auf der Türoberfläche erkennbar. Der untere Bereich des Türausschnittes ist somit deutlich kühler welcher durch den blauen Farbverlauf gekennzeichnet ist. Die Maximaltemperatur, im Bild links oben dargestellt, beträgt 42°C

Die mittlere Grafik zeigt die Türrückseite des Versuches mit dem thermischen Strahler. Die Maximaltemperatur beträgt im oberen Bereich 80°C . Zu erkennen ist weiterhin eine inhomogene Temperaturverteilung.

Im rechten Bild beträgt die Maximaltemperatur der Wabenfüllung in der Mitte 96°C . Deutlich wird hier wieder eine homogene Temperaturverteilung welche aus der gleichmäßigen Temperaturverteilung aus dem Brandraum hervorgeht.

4.2.2 Röhrenspaneinlage

Die nachfolgenden Diagramme stellen die Versuche mit der Röhrenspaneinlage dar.

4.2.2.1 Heißluftgebläse

In Diagramm 9 ist zu erkennen, dass es bei den Elementen T1, T2 und T4 aufgrund der erzwungenen Konvektion zu einem großen Temperaturgradienten in den ersten 8 Minuten (500 Sekunden) kommt. Nach weiteren 8 Minuten stellt sich bei diesen Elementen eine nahezu konstante Wärmeverteilung zwischen 73°C und 78°C ein. Die Maximaltemperatur von 83°C wurde nach 44 Minuten (2640 Sekunden) durch T1 erreicht. T7 sowie T9 können hier als Ausreißer gewertet werden, da diese aufgrund ihrer Positionen nur gering von der Konvektionsströmung erfasst wurden.

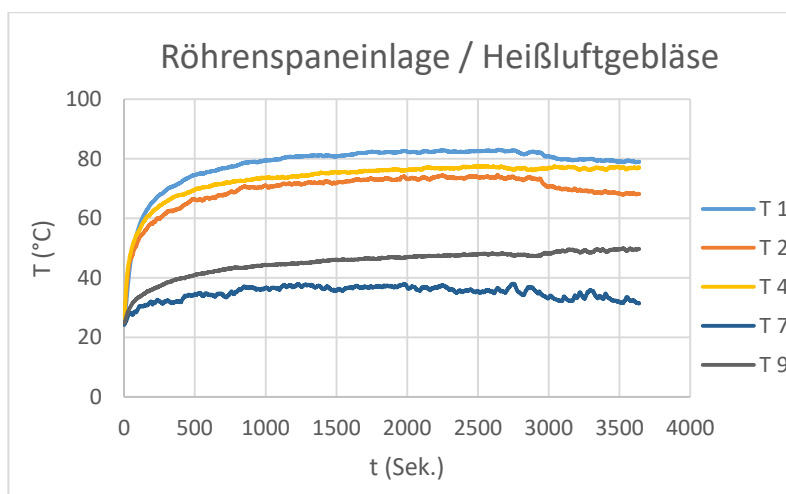


Diagramm 9: Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Röhrenspaneinlage / Heißluftgebläse

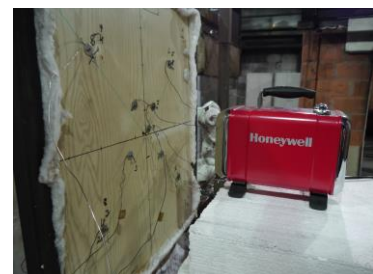


Abbildung 48: Versuchsbild, Heißluftgebläse und Röhrenspaneinlage

4. Versuche

Nach einer anfänglich konstanten Temperaturverteilung kann nach 8 Minuten (500 Sekunden) eine Erhöhung der Elemente T10, T12, T14 und T18 aufgezeichnet werden. T10 erreicht nach 33 Minuten (2000 Sekunden) einen stationären Zustand welcher mit der Maximaltemperatur von 41.2 °C gekennzeichnet ist. T16 zeigt durch seine Position und den entstehenden thermischen Auftrieb keine Temperaturerhöhung auf.

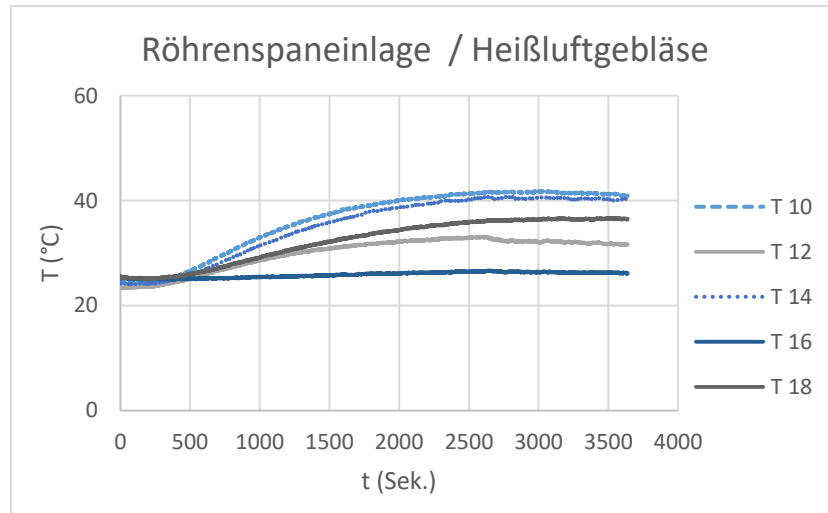


Diagramm 10: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Röhrenspaneinlage / Heißluftgebläse

4.2.2.2 Thermischer Strahler

In Diagramm 11 ist ein gleichmäßiger Anstieg zu verzeichnen, welcher nach 41 Minuten (2500 Sekunden) einen nahezu stationären Zustand erreicht. Die Maximaltemperatur wird von T1 und T4 mit 180°C dargestellt. T9 erreicht nach 50 Minuten (3000 Sekunden) seine Höchsttemperatur von 176,4 °C. Bei T7 ist anhand seiner Position davon auszugehen, dass durch die auftretende Auftriebsströmung eine geringere Temperaturzunahme aufgezeichnet wurde.

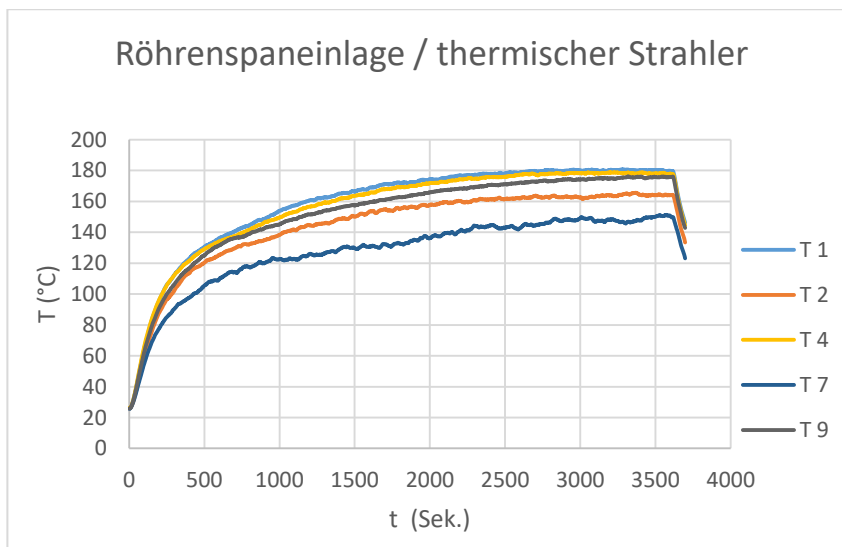


Diagramm 11: Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Röhrenspaneinlage / Thermischer Strahler



Abbildung 49: Versuchsbild, Thermischer Strahler und Röhrenspaneinlage

4. Versuche

Nach anfänglich langsamer Erwärmung ist aus Diagramm 12, nach 8 Minuten (500 Sekunden) ein stärkerer Temperaturanstieg der Elemente T10, T12 und T16 zu verzeichnen. Dieser wird durch die schwarze Verfärbung der flammenzugewandten Seite und der somit höheren Absorption des Energieeintrages begründet. Dieser flacht nach ≈ 1500 Sekunden grafisch gesehen ab und erreicht nach 50 Minuten (3000 Sekunden) zusammen mit T18 ein Plateau. Die maximal gemessene Temperatur wurde im Mittelpunkt des Probestückes von T10, mit $82,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Die Abweichungen der anderen Elemente umfassen nach 50 Minuten Messzeit lediglich $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

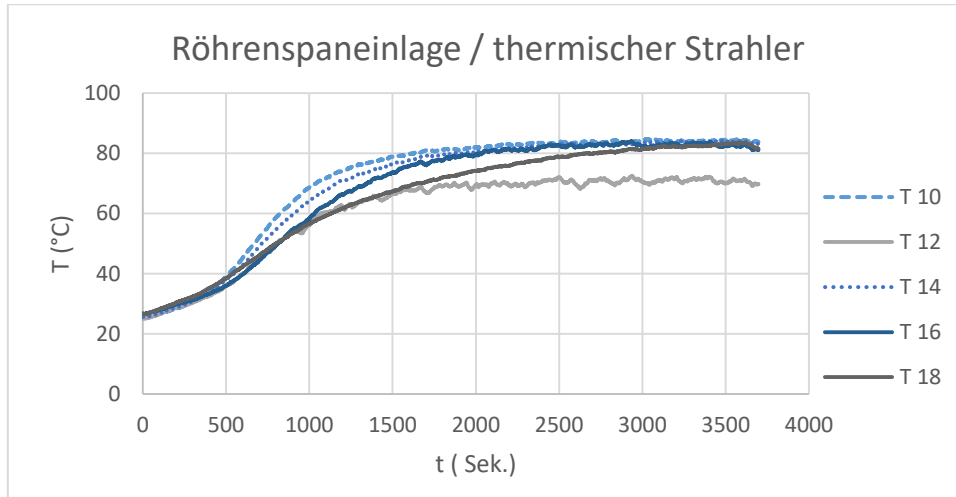


Diagramm 12: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Röhrenspaneinlage / Thermischer Strahler

4.2.2.3 Kiesbettbrenner

Auch bei dieser Türfüllung ist die Leistungserhöhung in den ersten 16 Minuten (1000 Sekunden) deutlich zu erkennen. Nach 1800 Sekunden zeigen T1 = $238,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, T2 = $243,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und T4 = $241,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ an. Die Maximaltemperatur erreicht hierbei links über dem Mittelpunkt T2.

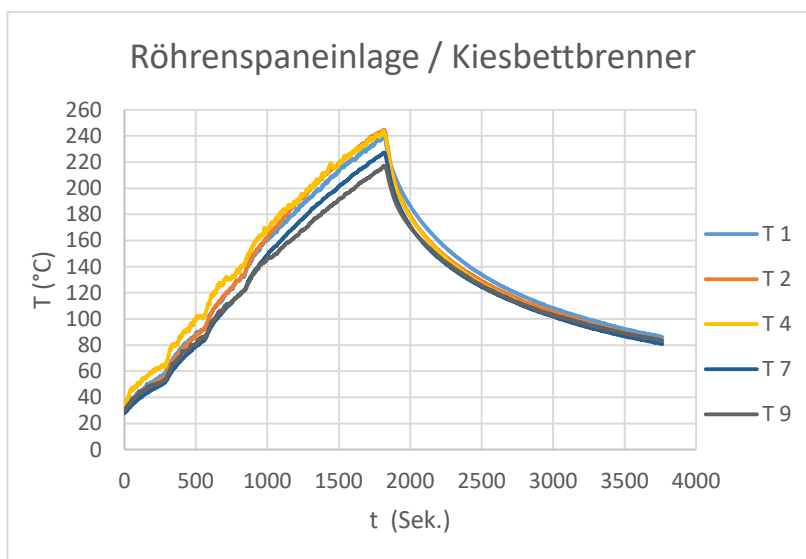


Diagramm 13: Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Röhrenspaneinlage / Kiesbettbrenner



Abbildung 50: Versuchsbild der Kiesbettbrenner mit einer Gesamtleistung von 200 kW

4. Versuche

Aus Diagramm 14 kann man erkennen, dass es zu einer verzögerten Wärmeleitung durch die Tür kommt. T18 beginnt mit einem schnellen Wärmeanstieg. Die weiteren Elemente steigen nach 13 Minuten (800 Sekunden) kontinuierlich an. Auch bei diesem Versuch wurden die Brenner nach 30 Minuten (1800 Sekunden) abgeschaltet. Die gemessenen Temperaturen betragen zu diesem Zeitpunkt für T10 = 68,8°C, T12 = 69,2°C, T14 = 59,5 °C, T16 = 70,9°C und T18 = 59,7°C. Die Maximalwerte wurden allerdings erst nach 34 Minuten mit T10 = 73°C, T12 = 71,6°C, T14 = 61°C, T16 = 73,2°C sowie T18 = 61,7°C erreicht.

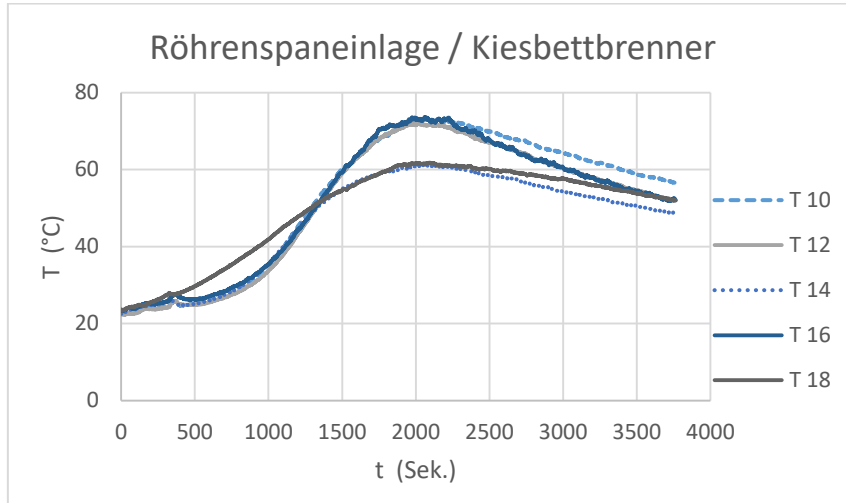


Diagramm 14: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Röhrenspaneinlage / Gasbrenner

4. Versuche

4.2.2.4 Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten

Auf der linken Seite wird in Abbildung 51 der Versuch mit dem Heißluftgebläse dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Bereich der durch die Konvektion erfasst wurde. Dieser weist eine Maximaltemperatur von ca. 80 °C auf. Im unteren Bildbereich ist keine Temperaturerhöhung zur Umgebungstemperatur zu verzeichnen.

In der mittleren Grafik ist durch die höhere Temperatur, eine nach oben umgelenkte Temperaturverteilung zu erkennen. Das Maximum beträgt hierbei 172°C. Der untere Bereich misst eine Temperatur von ca. 150°C.

Die rechte Grafik zeigt den Versuch im geschlossenen Raum mit den Kiesbettbrennern. Aufgrund der homogenen Temperaturverteilung ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung auf der Türoberfläche zu erkennen. Die Maximaltemperatur beträgt im linken unteren Bereich 243°C. Im Vergleich hierzu weist der obere rechte Bereich eine Temperatur von 233°C auf.

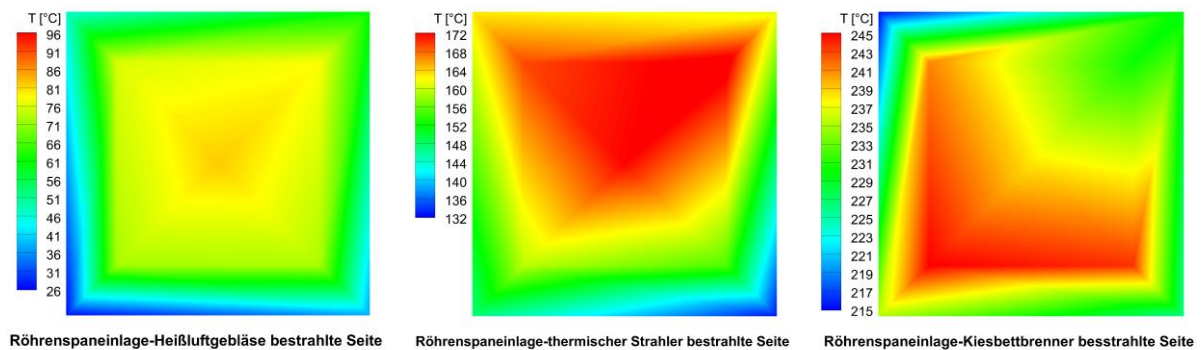


Abbildung 51: Zweidimensionale, interpolierte Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten, Röhrenspaneinlage, bestrahlte Seite

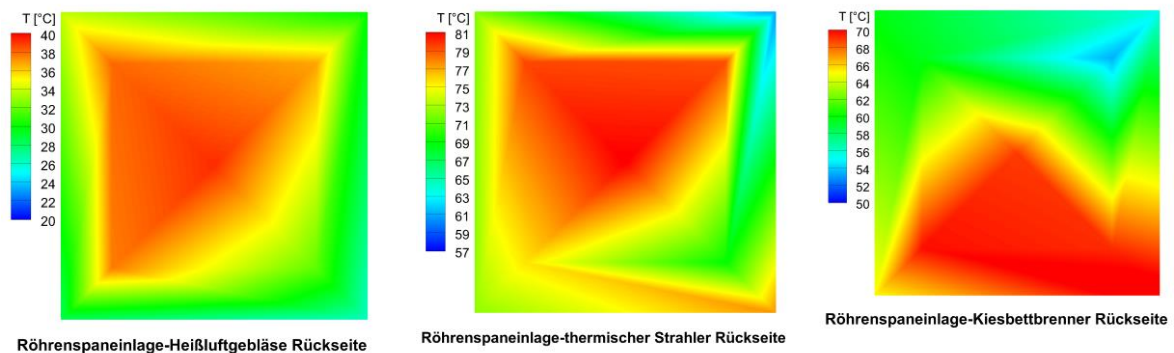


Abbildung 52: Zweidimensionale, interpolierte Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten, Röhrenspaneinlage, Rückseite

Aus Abbildung 52 sind die Messergebnisse auf der Rückseite der getesteten Röhrenspaneinlage in zweidimensionaler Ansicht ersichtlich. Anhand der linken Grafik lässt sich eine homogene Temperaturverteilung erkennen. Nach 30 Minuten wurde mittig eine Temperatur von 38 °C erreicht. Eine ähnliche Verteilung ist mit dem thermischen Strahler grafisch erfasst. Das Maximum liegt in der Mitte bei 80°C. Aus beiden Grafiken ist eine umgelenkte Auftriebsströmung zu erkennen. Auf der Rückseite des dritten Versuches mit den Kiesbettbrennern wurde die Maximaltemperatur von 70 °C in der unteren Hälfte erreicht. Der Temperaturunterschied zum oberen Bereich beträgt hierbei 8°C.

4. Versuche

4.2.3 Stahltür

Dieses Kapitel befasst sich mit den Messergebnissen welche aus den Versuchen mit der Stahltür entstanden sind.

4.2.3.1 Heißluftgebläse

Bei diesem Versuch stellte sich eine sehr unterschiedliche Temperaturverteilung ein. Ein stationärer Zustand wird nach 16 Minuten erreicht und durch die Maximaltemperatur von $T_1 = 88,2^\circ\text{C}$ dargestellt. Weiterhin wurden durch $T_4 = 83,3^\circ\text{C}$, $T_2 = 71,6^\circ\text{C}$ und $T_9 = 60,1^\circ\text{C}$ aufgezeichnet. T_7 wurde durch seine Position nur geringfügig von der auftreffenden Konvektion erfasst und weist eine minimale Temperaturerhöhung von 10°C auf.

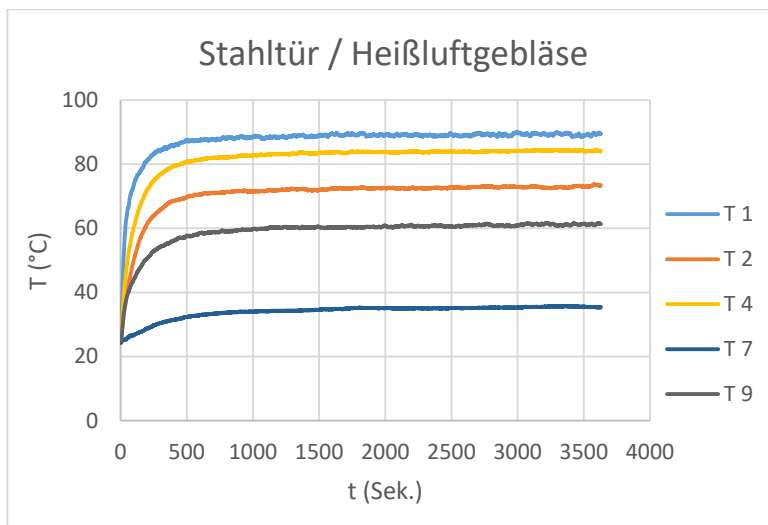


Diagramm 15: Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Stahltür / Heißluftgebläse



Abbildung 53: Versuchsbild, Heißluftgebläse und Stahltür

Auf der Rückseite ist nur eine minimale Temperaturerhöhung zu verzeichnen. Die Anfangstemperatur zu Versuchsbeginn betrug 25°C . Nach eine Stunde Versuchszeit wurden folgende Temperaturen für $T_{10} = 28,5^\circ\text{C}$, $T_{12} = 27,3^\circ\text{C}$, $T_{14} = 28,3^\circ\text{C}$, $T_{16} = 27,4^\circ\text{C}$ und $T_{18} = 29,6^\circ\text{C}$ gemessen. Aufgrund der großen Temperaturdifferenz zur Vorderseite lassen sich gute Isoliereigenschaften der Mineralwolle erkennen.

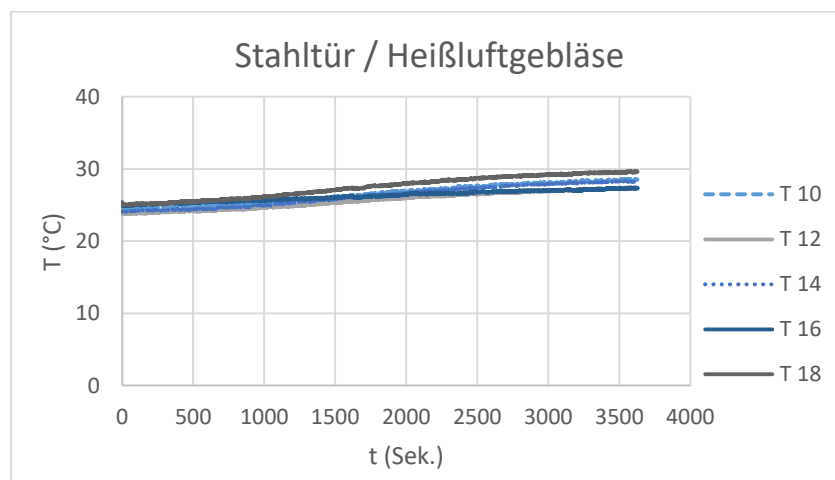


Diagramm 16: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Stahltür / Heißluftgebläse

4. Versuche

4.2.3.2 Thermischer Strahler

Nach einem steilen und gleichmäßigen Anstieg erreicht T1 nach 25 Minuten (1500 Sekunden) seine Maximaltemperatur von 210,4°C. Gleichzeitig erreichen T2 = 193,5 °C, T4 = 202,7°C, T7 = 179,4 °C und T9 = 208,4°C. Ab diesem Zeitpunkt stellt sich ein stationärer Zustand auf der Oberfläche ein, welcher grafisch mit einem Plateau dargestellt wird.

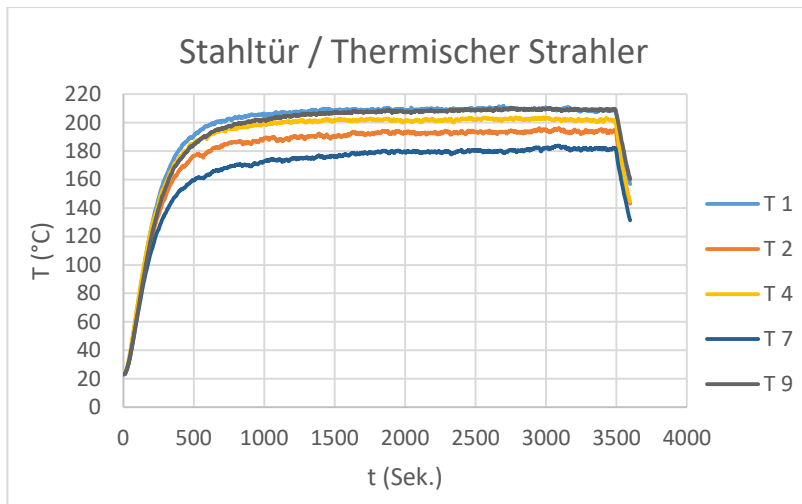


Diagramm 17 Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Stahltür/ Thermischer Strahler



Abbildung 54: Versuchsbild, thermischer Strahler und Stahltür

Auf der Rückseite ist ein gleichmäßiger Temperaturanstieg zu verzeichnen. Zu sehen ist, dass T16 nach einer Stunde Versuchszeit eine Temperatur von 78,1°C erreicht. T18 weist eine Temperatur von 70,3°C auf. Des Weiteren wurden durch T14 = 62,5°C, T10 = 55,8°C, und T12 = 52°C gemessen.

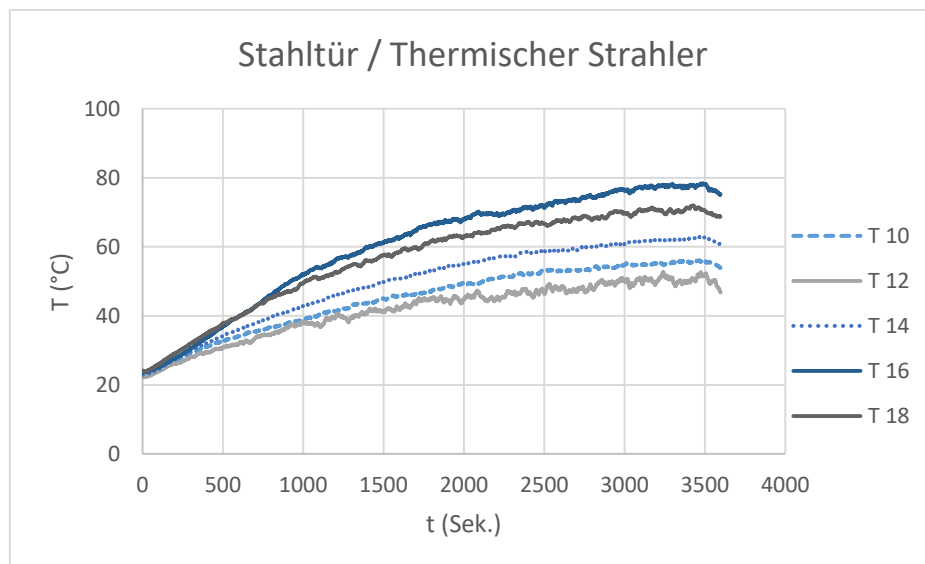


Diagramm 18: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Stahltür / Thermischer Strahler

4. Versuche

4.2.3.3 Kiesbettbrennerbrenner

In Diagramm 19 ist der Temperaturverlauf des Versuches mit der Stahltür und des Kiesbettbrenners abgebildet. Die schnelle Erhöhung von T2 lässt sich auf die Verflüchtigung der Wärmeleitpaste die an der Elementenspitze angebracht wurde, zurückführen. Da es somit zu keinem Oberflächenkontakt kommt, wird stattdessen die Gastemperatur vor der Tür gemessen. T1, T4 und T7 erreichen nach 30 Minuten (1800 Sekunden) ihre Maximaltemperatur von 277,1°C und 275,3°C. Die Temperatur von T9 beträgt zu diesem Zeitpunkt 254,7°C.

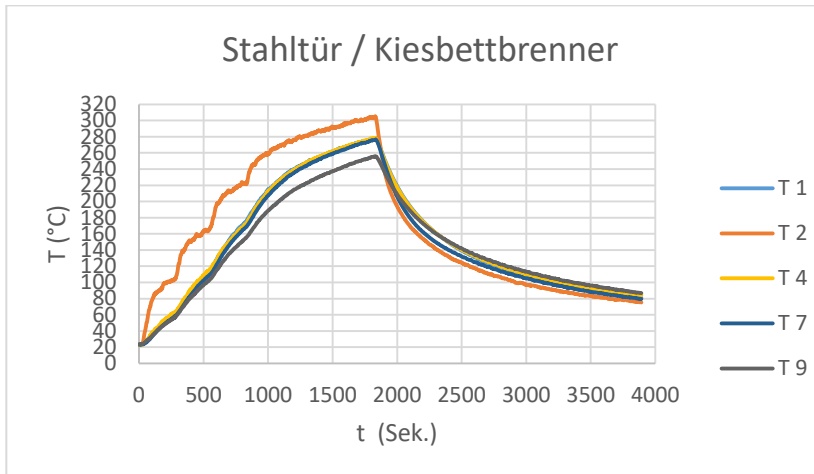


Diagramm 19: Zeitliche Temperaturverteilung der Vorderseite, Stahltür / Kiesbettbrenner



Abbildung 55: Versuchsbild, Kiesbettbrenner und Stahltür

Auf der Rückseite kommt es mit T16 zu einem Phänomen, welches nur bei der Stahltür aufgetreten ist. Aufgrund der isolierenden Wirkung der Mineralwolle erfolgt die Wärmeleitung nur durch den Stahl. Dies begründet sich durch die hohe Masse der Tür weshalb eine langsame Wärmeleitung durch die Tür stattfindet. Auch in diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die Maximaltemperaturen erst nach Abschalten des Brenners bei 2200 Sekunden (ca. 37 Minuten) durch T12 mit 57,2°C erreicht wird. Die weitere Temperaturverteilung stellt sich nach 2500 Sekunden (ca. 42 Minuten) folgendermaßen ein: T10 = 50,0°C, T18 = 48,7°C und T14 = 42,6°C.

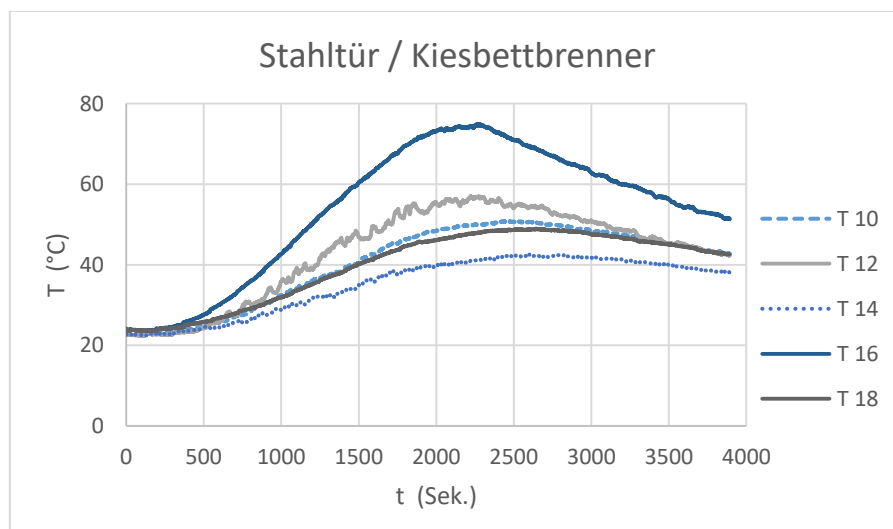


Diagramm 20: Zeitliche Temperaturverteilung der Rückseite, Stahltür / Kiesbettbrenner

4. Versuche

4.2.3.4 Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten

In den folgenden Abbildungen werden die Versuchsergebnisse mit der Stahltür dargestellt. Die linke Grafik zeigt deutlich den Bereich der durch das Heißluftgebläse erfasst wurde. Somit lässt sich auch hier eine umgelenkte Auftriebsströmung erkennen. Durch den thermischen Strahler wurde die aufgetragene Strahlung nach oben abgeführt. Die Maximaltemperatur beträgt in der Mitte sowie am oberen Rand 205°C bis 209°C.

Während des Versuches im geschlossenen Raum kam es aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit der Stahltür zu einer ungewöhnlichen Temperaturverteilung auf der flammenzugewandten Seite. Wie in der rechten Grafik dargestellt, ist eine Temperaturerhöhung im unteren Bereich des Ausschnittes aufgetreten. Die maximal gemessene Temperatur im rechten unteren Eck beträgt 300°C bis 305°C. Die flächenbezogene mittlere Temperatur weist 280 °C auf.

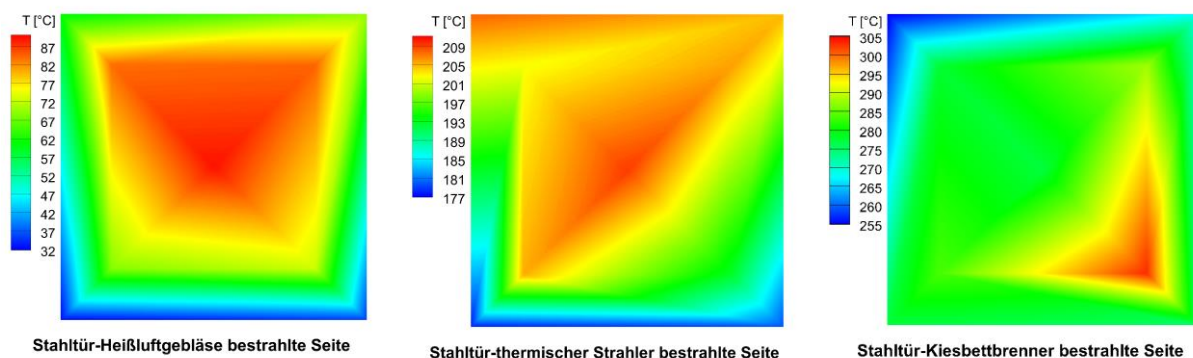


Abbildung 56: Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten, Stahltür, bestrahlte Seite

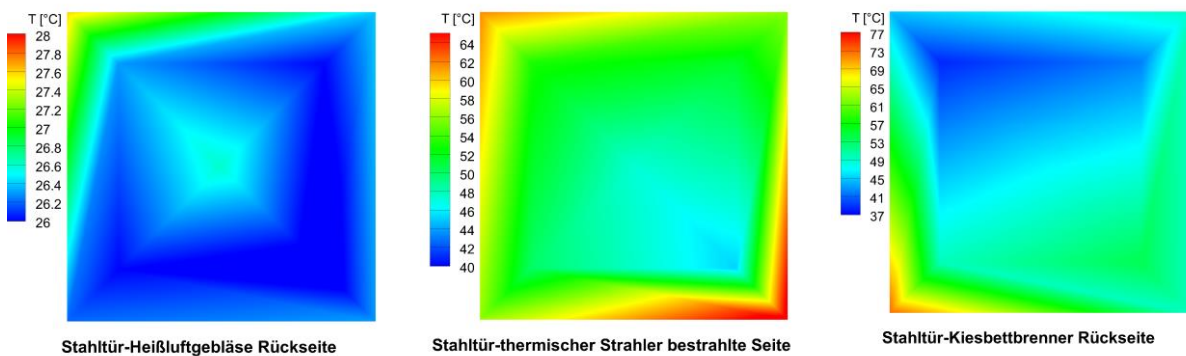


Abbildung 57: Zweidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung nach 30 Minuten, Stahltür, Rückseite

Durch die hohe Isolierfähigkeit der Dämmwolle ist in der linken Grafik auf der Rückseite keine nennenswert große Temperaturerhöhung festzustellen. Hierbei handelt es sich im Mittelpunkt um 0,6°C sowie im oberen linken Bereich um 1,4°C. In der mittleren Grafik ist eine homogene Temperaturverteilung festzustellen. Einzig die umlaufende Rahmenkonstruktion der Stahltür erhitzt sich aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Stahles. Bei dem Versuch der Kiesbettbrenner kam es auf der Rückseite im unteren Bereich zu einer Temperaturerhöhung. Hierbei wird die Wärme über die Stahlschicht von der Vorderseite auf die Rückseite umgeleitet. Im oberen Bereich der Tür kommt es aufgrund der guten Isoliereigenschaft der Füllung nur zu einer geringen Temperaturerhöhung auf ca. 45°C.

4. Versuche

4.3 Wohnzimmerbrand

Das nachfolgende Kapitel befasst sich mit der Versuchsdurchführung sowie und Auswertung eines nachgestellten Wohnzimmerbrandes. Hierbei werden der Versuchsstand, die verwendete Messtechnik, die geänderte Anzahl und Anordnung der Thermoelemente sowie die verwendeten Möbelstücke erläutert. Die Motivation für diesen Versuch besteht darin, sich einem realen Brandverlauf sowie einer realen Brandausbreitung, anzunähern.

In Abbildung 58 wird der Wohnzimmerbrandraum skizzenhaft dargestellt. In dem ca. 25 m^2 großen Raum befinden sich 6 Möbelstücke. Hierbei handelt es sich um:

- Möbelstück 1: zwei Komponenten einer Massivholzwohnwand
- Möbelstück 2: ein Stoffsofa
- Möbelstück 3: ein Couchtisch
- Möbelstück 4: zwei Holzstühle
- Möbelstück 5 : eine weitere Komponente der Wohnwand
- Möbelstück 6 : zwei Kommoden

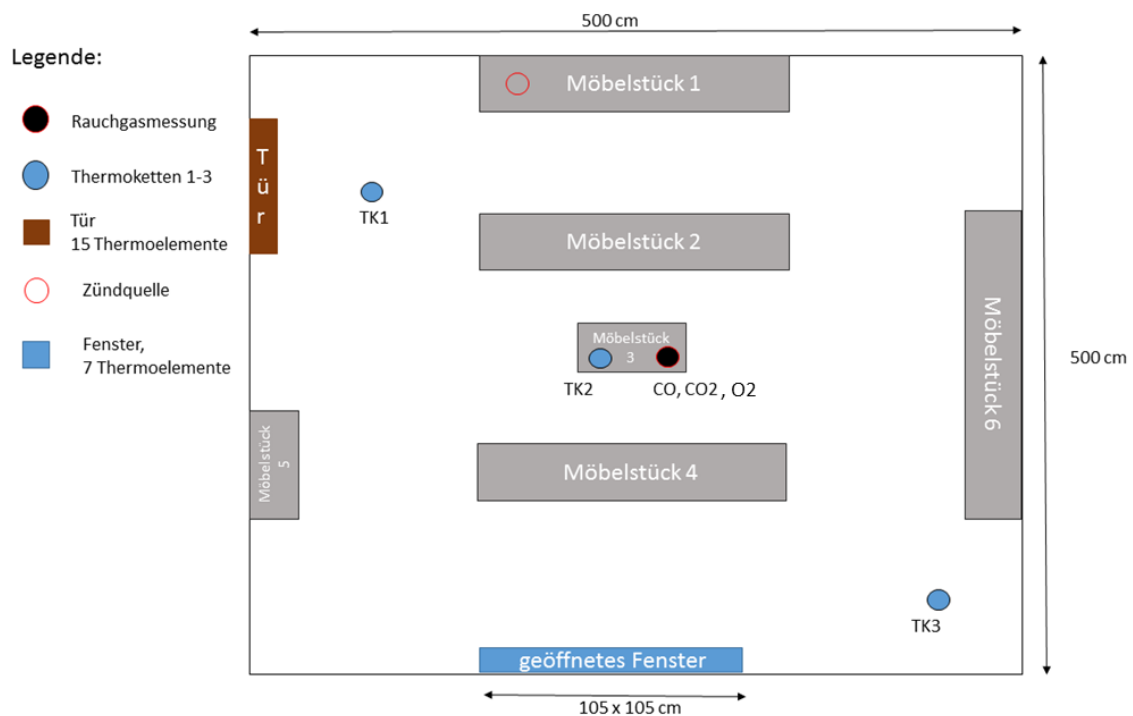


Abbildung 58: Skizzenhafte Darstellung des Wohnzimmer Versuchsraumes

Die Zündung findet durch einen mit Papier gefüllten Schuhkarton statt, welcher sich in der Wohnwand befindet. Als Probestück wird eine Holztür mit Röhrenspaneinlage (vgl.3.2.2) verwendet. An und in dieser Tür wurden 13 Temperaturmessstellen angebracht. Die Türgriffe wurden mit 2 weiteren Thermoelementen ausgestattet. Im Raum selbst befinden sich zwei Thermoelementketten á 3 Thermoelementen mit einem Höhenprofil von 100 cm, 150 cm und 263 cm (5 cm unter der Decke) über dem Boden.

4. Versuche

Die erste Thermokette befindet sich mittig zwischen der Tür und dem Brandherd. Eine zweite ist in der Raummitte angebracht. Weiterhin befindet sich eine Kette mit 2 Elementen, in einer Höhe von 100 cm und 263 cm über dem Boden. Diese befindet sich rechts unten im Bild. Durch die Anordnung entsteht ein diagonaler Verlauf der Messstellen im Raum.

Für die über Möbelstück 3 angebrachte Rauchgassonde wurde ein Kupferrohr mit einem Innendurchmesser von 3mm gewählt. Das Rauchgas wird über die Sonde mittels einer dahinter geschalteten Pumpe angesaugt. Der Durchfluss wurde durch einen Schwebekörper-Durchflussmesser auf 0,7 l/min eingestellt. Weitergeleitet durch eine Trockensäule mit Silica-Gel-Kugeln strömt das Gas in einen Messturm. In diesem sind ein *ABB Uras* für die Messung von O_2 und des CO -Gehaltes sowie ein *Emerson Binol* für die Messung von CO_2 in Serie geschaltet.

Die gemessenen Werte wurden anschließend über das Messprogramm DasyLab ausgewertet und in einem Excel Diagramm abgespeichert.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die geänderte Anordnung der Thermoelemente auf der Türoberfläche. Während dieses Versuches wurde eine ganze Tür der Größe 198,5 cm x 86 cm verwendet. T1 und T6 befinden sich horizontal 43 cm vom Rand und 49,5 cm von der oberen Kante entfernt. Die Elemente T2-T5 und T7-T10 sind mit dem Uhrzeigersinn drehend in Abständen von 30 cm in x- und y- Richtung angeordnet. Diese Abbildung zeigt jeweils die Draufsicht auf die Tür. Die Wahl der Anordnung begründet sich durch den entstehenden thermischen Auftrieb. Somit kann angenommen werden, dass die untere Hälfte der Tür niedrigere Temperaturen aufweist. Die Elemente T11, T12 und T13 befindet sich auf Höhe des Thermoelements 6 in der Tür. Hier wurde die gleiche Anbringung wie für die zuvor durchgeführten Versuche (vgl. Abbildung 34) gewählt.



Abbildung 59: geänderte Anordnung der Thermoelemente für den Großbrandversuch

4. Versuche

Die nachfolgende Tabelle bietet einen Überblick von Heizwerten unterschiedlicher Materialien. Gegenübergestellt werden hierbei die unteren Heizwerte, welche mit einem Kalorimeter gemessen wurden [38], sowie deren Literaturwerte [39]. Hieraus lässt sich nur ein geringer Unterschied erkennen.

Stoff	Zusatz	H _u in MJ/kg [38]	H _u in MJ/kg Literaturwerte [39]
2-Sitzer Sofa		31,4	31,4
Spanholz	Späne	16,7	19,2
Massivholz	Fichte	18,2	20

Tabelle 8: Heizwerte unterschiedlicher Materialien

Der errechnete mittlere untere Heizwert $\overline{H_u}$ beträgt für die verwendeten Möbelstücke 18,91 MJ/kg. Aus der folgenden Gleichung lässt sich die Wärmefreisetzung über die Zeit errechnen, welche in Tabelle 9 aufgezeigt werden.

$$\text{Wärmefreisetzung} = \overline{H_u} * \frac{dm}{dt} \quad (\text{Gleichung 19})$$

Die betrachtete Massenabnahme bezieht sich auf die Zeitpunkte zwischen der 9.Minute und der 10.Minute, 11. Minute und 12.Minute, 16. Minute und 17.Minute, 20.Minute und 21.Minute sowie zwischen der 30.Minute und 31. Minute nach Versuchsbeginn. Die entstandene Wärmefreisetzung wird in nachfolgender Tabelle präsentiert.

Zeit zwischen	Massenabnahme kg/min.	Wärmefreisetzung in MJ
9. und 10. Minute	6	1,9
11. und 12. Minute	17	5,4
16. und 17. Minute	26	8,2
20. und 21. Minute	24	7,6
30. und 31. Minute	18	5,7

Tabelle 9, Errechnete Wärmefreisetzungsrates

Hieraus ist zu erkennen, dass es zwischen der 16.Minute und 17. Minute zu der höchsten Wärmefreisetzung im Brandraum kam.

4.3.1 Versuchsergebnisse

Im nachfolgenden Diagramm werden die gemessenen Abgastemperaturen in einer Höhe von 263 cm (5 cm unterhalb der Decke)dargestellt. Die Positionen der Thermoelementketten können aus Abbildung 58 entnommen werden. Durch die herrschenden Temperaturen im Brandraum kann ein komplexer Brandverlauf angenommen werden der zu Beginn zwischen der 4.Minuten und der 6.Minute den größten Temperaturgradienten aufweist. Hierbei werden die Maximaltemperaturen von 1051 °C in der Raummitte, sowie von 1041 °C in der rechten unteren Ecke, nach 23 Minuten verzeichnet. Die grau hinterlegten Bereiche weisen die Entstehungsbrand- sowie die Vollbrandphase auf. In der rechten Diagrammseite wird die Abkühlungsphase durch das Ablöschen dargestellt.

4. Versuche

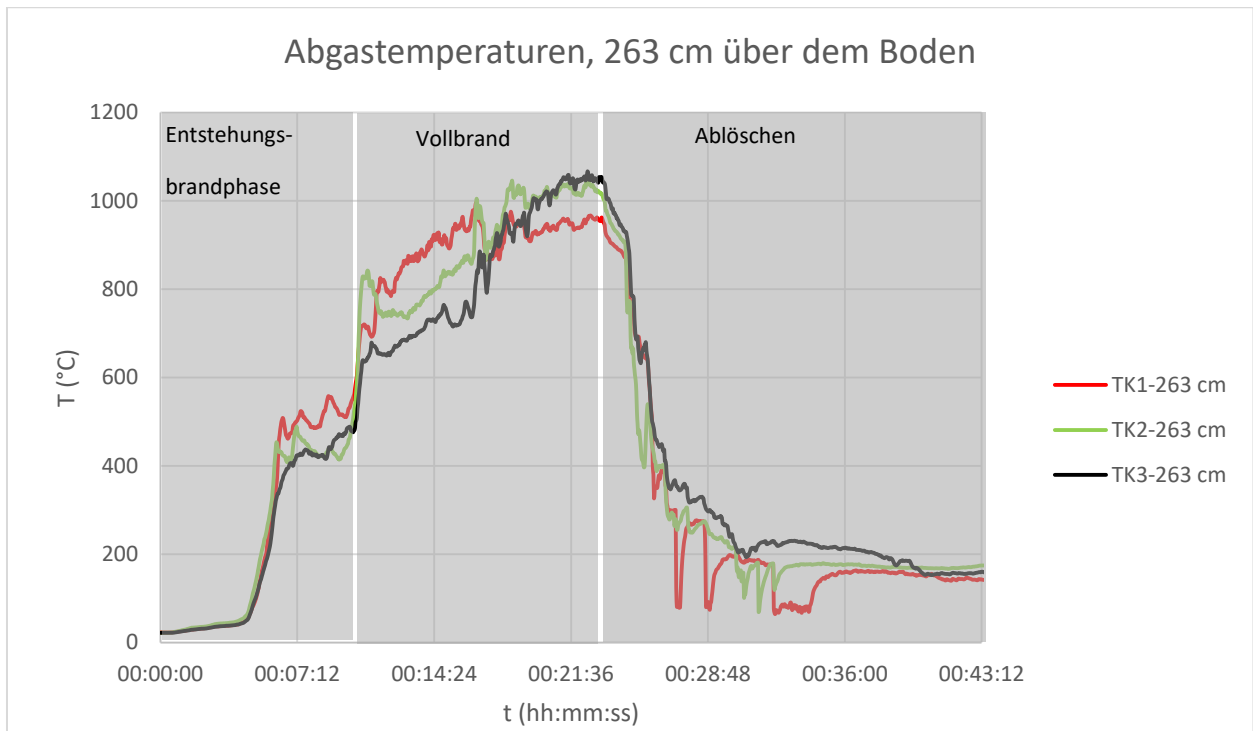


Diagramm 21: Messung der Abgastemperaturen , 5 cm unterhalb der Decke

Der Temperaturverlauf und die dabei auftretenden Phänomene werden im Folgenden, mit der dazugehörigen Abgaskonzentration näher erläutert.

In Diagramm 22 werden die Konzentrationen von O_2 , CO und CO_2 , welche über die Versuchsdauer von 40 Minuten in 263 cm Höhe gemessen wurden, näher betrachtet. Zusätzlich wird aus der Thermoelementkette mittig im Raum der Temperaturverlauf mit dem gleichen Höhenprofil hinzugefügt. Die grau hinterlegten Balken weisen wichtige Zeitpunkte während des Versuches auf. Hierbei handelt es sich um:

- (1): die Entzündung der Couch nach 9 Minuten (Abbildung 62)
- (2): die Entzündung der umliegenden Möbelstücke durch heiße Abgase nach 10:25 Minuten (Abbildung 63)
- (3): die Rauchgasdurchzündung aus dem Fenster nach 16:52 Minuten (Abbildung 67)

Auf der linken Achse werden die Konzentrationsänderungen in Volumenprozent über die Zeit aufgetragen. Durch die rechts dargestellte Temperaturskala, kann für das Thermoelement in 263 cm Höhe, der Temperaturverlauf im Raum nachverfolgt werden.

4. Versuche

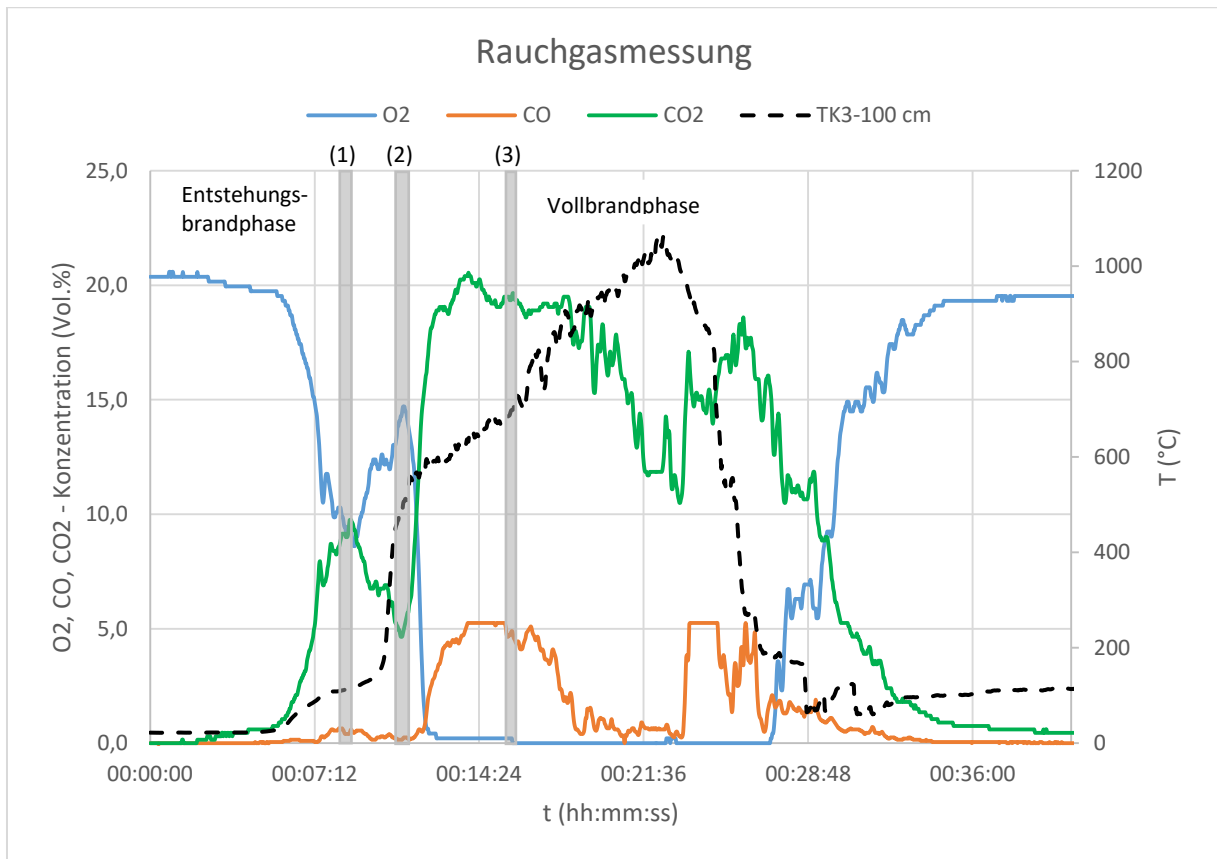


Diagramm 22: Ergebnis der Rauchgasmessung

Die Entstehungsbrandphase wird in den ersten 7 Minuten durch den maximalen Temperaturgradienten auf ca. 500°C charakterisiert. Gleichzeitig kommt es zu einer Verringerung des Sauerstoffgehaltes auf 10 Volumenprozent sowie einer Erhöhung von Kohlenstoffdioxid auf 8 Volumenprozent. Durch eine weitere Temperaturzunahme auf 850°C, wird nach 9 Minuten die Entzündung des Sofas dokumentiert. Weiterhin kommt es nach 10:25 Minuten zur Entzündung der Möbelstücke die in unmittelbarer Nähe um das Sofa aufgebaut waren. Wichtig zu erwähnen ist, dass sich die Möbelstücke alleine durch die heißen Abgase im Raum selbst entzündeten. Dies wird durch den (2). grauen Balken in Diagramm 22 sowie in Abbildung 62 und Abbildung 63 dargestellt.

Durch den deutlichen Abfall des Sauerstoffgehaltes auf 0 Volumenprozent und den hohen herrschenden Temperaturen kommt es nach 12 Minuten zu einer schnellen Erhöhung von Kohlenstoffmonoxid. Die Konzentration weist einen konstanten Wert über 4 Minuten von 5,3 Vol. % auf. Zeitgleich erreicht die CO₂ Konzentration ihr Maximum von 20,4 Vol. %. Im weiteren Brandverlauf kommt es aufgrund des fehlenden Sauerstoffes nach 13 Minuten zu einer unvollständigen Verbrennung, welche durch Abbildung 64 aufgezeigt wird. Zusätzlich kommt es an der Decke zu einer Temperaturerhöhung von 857,4 °C.

Nach 14 Minuten kommt es zum Durchbrand der Tür das aus Abbildung 65 hervorgeht. Nach weiteren zwei Minuten wurde die Tür vollständig zerstört und fiel in den Brandraum hinein. Durch den frisch einströmenden Sauerstoff kommt es wie in Abbildung 67 dargestellt, zu einer Rauchgasdurchzündung sowie zum anschließenden Vollbrand des Wohnzimmers. Zu diesem Zeitpunkt kann in Diagramm 22 keine Sauerstofferrhöhung festgestellt werden, da das Verhältnis von einströmender zu benötigter Luftmenge ausgeglichen ist. Dabei kann eine Temperatur von 988,4°C verzeichnet werden. Gleichzeitig kam es zu einem Abfall der CO₂- sowie der CO- Konzentration.

4. Versuche

Nach 22 Minuten kommt es in 263 cm zur maximal gemessenen Temperatur von 1041 °C. Durch die nach 23 Minuten eingeleiteten Löschmaßnahmen ist eine gleichmäßige Temperaturabnahme zu verzeichnen. Gleichzeitig kommt es aufgrund der sinkenden Temperaturen zu einem Anstieg der CO und der CO_2 Konzentration. Durch das Ablöschen des Brandraumes ist nach 26 Minuten wieder eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes im Brandraum festzustellen, welche nach weiteren drei Minuten eine Höhere Konzentration gegenüber CO_2 und CO aufweist.



Abbildung 60: Entzündung der Möbel t = 0 Sekunden



Abbildung 61: Vollbrand der Wohnwand nach 5:20 Min.



Abbildung 62: Entzündung der Couch nach 9 Min.



Abbildung 63: Entzündung der umliegenden Möbel nach 10:25 Min.



Abbildung 64: Unvollständige Verbrennung durch das brennende Sofa nach 13 Minuten



Abbildung 65: Durchbrand der Tür nach 14 Minuten

4. Versuche

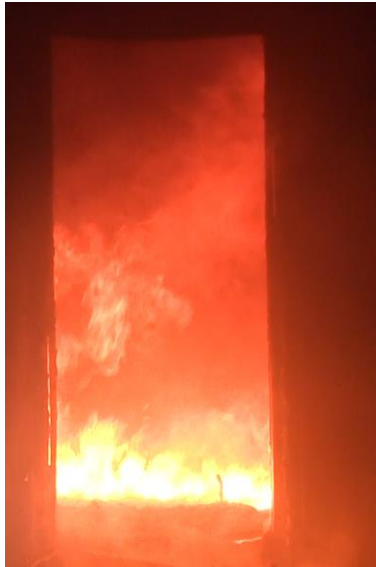


Abbildung 66: Zerstörung des Türblattes und erneuter Sauerstoffeintritt in den Brandraum nach 16 Minuten



Abbildung 67: Rauchgasdurchzündung aufgrund Frischluftzufuhr nach 16:52 Minuten

Für die Darstellung der Versuchsergebnisse wurde ebenfalls ein diagonaler Verlauf der verwendeten Thermoelemente ausgewählt. Hierbei handelt es sich auf der flammenzugewandten Türseite um T1, T2 und T4. Für die flammenabgewandte Seite werden die Thermoelemente T6, T7 und T9 dargestellt. Die nachfolgenden drei Diagramme zeigen die Temperaturverlaufskurven über die Zeit an. Da es 16 Minuten nach der Zündung, zur Zerstörung der Tür kam, wird für die Auswertung nur diese Zeitspanne betrachtet (vgl. Diagramm 26, Diagramm 27 und Diagramm 28).

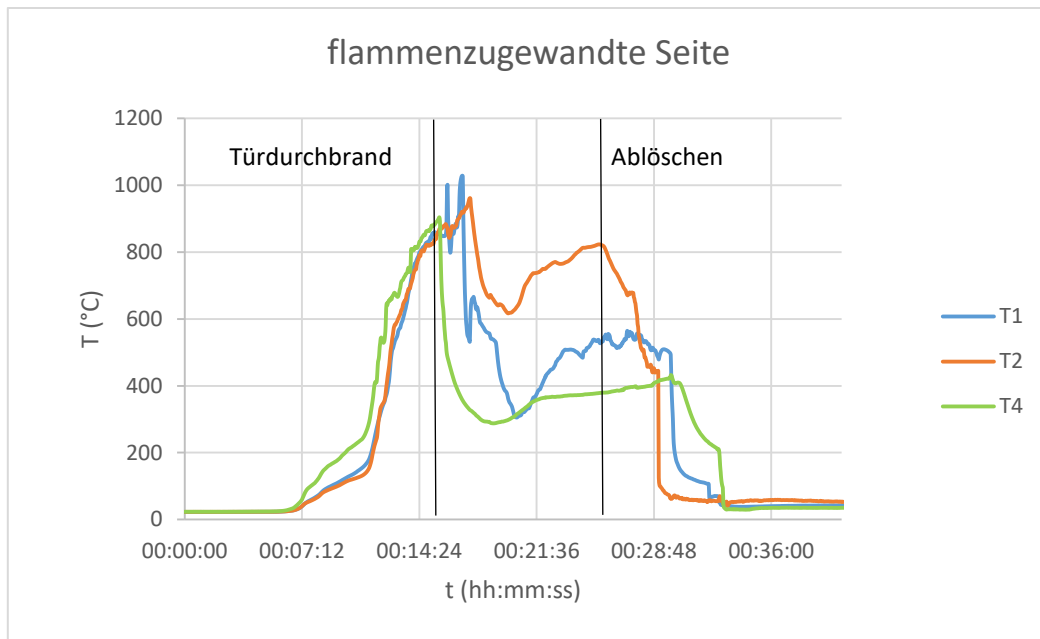


Diagramm 23: Zeitlicher Temperaturverlauf des Wohnzimmerbrand, flammenzugewandte Seite

4. Versuche

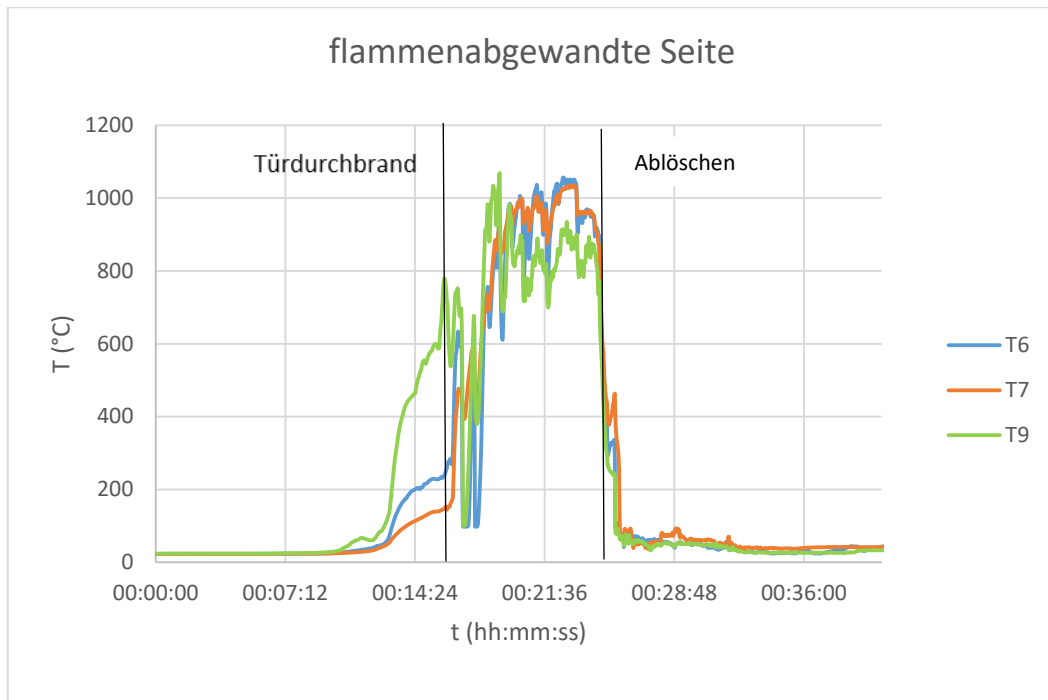


Diagramm 24: Zeitlicher Temperaturverlauf Wohnzimmerbrand, Rückseite

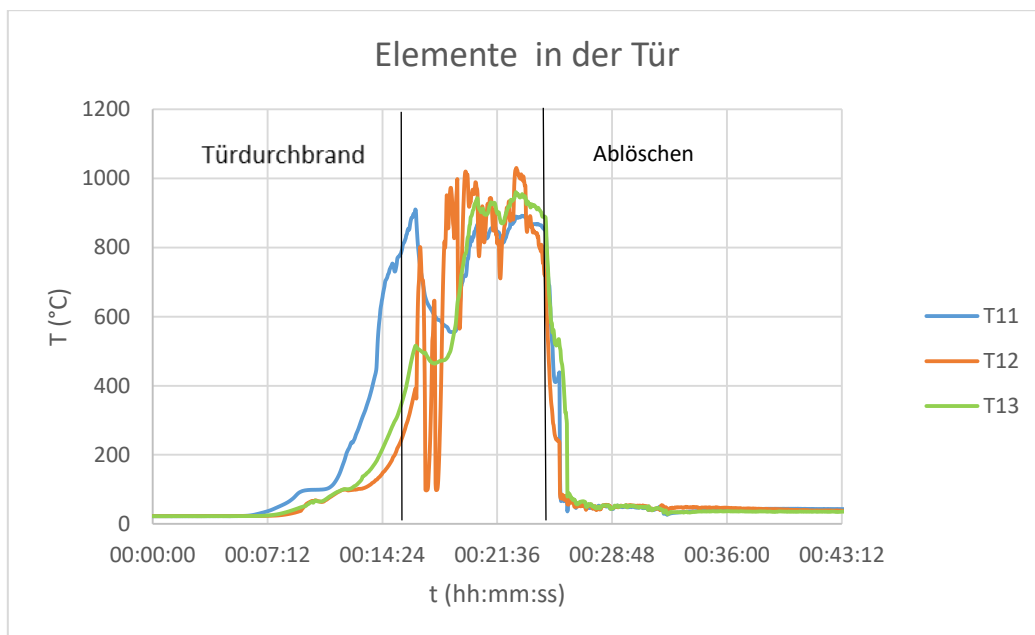


Diagramm 25: Zeitlicher Temperaturverlauf Wohnzimmerbrand, Elemente in der Tür

Für die Auswertung des durchgeführten Wohnzimmerbrandes kommt es zu einer näheren Betrachtung der ersten 16 Minuten. Die nachfolgenden Diagramme weisen einen kürzeren Zeitverlauf durch die waagrecht angeordnete x- Achse auf. Dies begründet sich durch die Entzündung und die somit vollständige Zerstörung des Türblattes.

4. Versuche

In Diagramm 26 wird der Temperaturverlauf der Entstehungsbrandphase auf der flammenzugewandten Seite der Tür grafisch dargestellt. Hierbei ist in den ersten 5 Minuten eine konstante Temperatur von 24°C zu erkennen. Eine Erhöhung tritt erstmalig nach 6:46 Minuten in Erscheinung und weist nach 8:38 Minuten durch $T_4 = 159,7^\circ\text{C}$ sowie $T_1 = T_2 = 87,4^\circ\text{C}$ eine Zunahme auf. In den nachfolgenden drei Minuten kommt es zur Entzündung der Couch sowie einer daneben angeordneten Komponente der Wohnwand. Dadurch entsteht nach 11:31 Minuten eine weitere Temperaturerhöhung auf $T_4 = 333,64^\circ\text{C}$, $T_1 = 203,5^\circ\text{C}$ und $T_2 = 196,3^\circ\text{C}$. Da ab diesem Zeitpunkt alle Möbelstücke im Raum am Brandgeschehen teilnehmen kann bis kurz vor der Zerstörung der Tür ein weiterer Temperaturanstieg verzeichnet werden. Hierbei handelt es sich nach 14 Minuten um $T_4 = 875^\circ\text{C}$, $T_1 = 865,3^\circ\text{C}$ und $T_2 = 859,6^\circ\text{C}$.

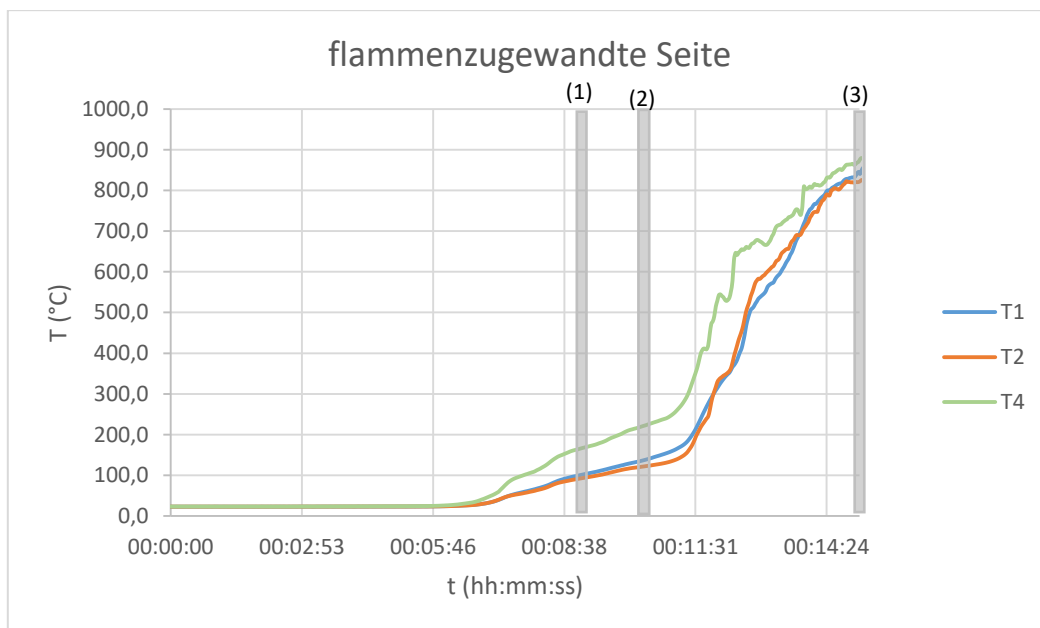


Diagramm 26: Entstehungsbrandphase Wohnzimmerbrand, flammenzugewandte Seite

Im nachfolgenden Diagramm 27 wird der Temperaturverlauf auf der flammenabgewandten Seite der Tür betrachtet. Deutlich zu erkennen ist die gleichbleibende Temperatur von 25°C während den ersten 8 Minuten. Auf der flammenabgewandten Türseite ergibt sich nach 10:42 Minuten eine Temperaturerhöhung auf der Oberfläche. Hierbei handelt es sich um $T_9 = 48,3^\circ\text{C}$, $T_6 = T_7 = 27,2^\circ\text{C}$. Nach der Entzündung des Sofas und den umliegenden Möbelstücken wird nach 12 Minuten auch auf der Rückseite eine Temperaturzunahme verzeichnet. Gemessen wurden für $T_9 = 77,1^\circ\text{C}$, $T_6 = T_7 = 51,7^\circ\text{C}$. Ab diesem Zeitpunkt kam es zu einem steilen Temperaturanstieg durch T_9 . Die Ursache sind heiße Rauchgase, die durch den oberen Spalt zwischen Türzarge und Türblatt aus dem Brandraum gedrückt wurden. Nach 14:41 Minuten werden von $T_9 = 463,61^\circ\text{C}$, $T_6 = 201,2^\circ\text{C}$ und $T_7 = 116,6^\circ\text{C}$ gemessen.

4. Versuche

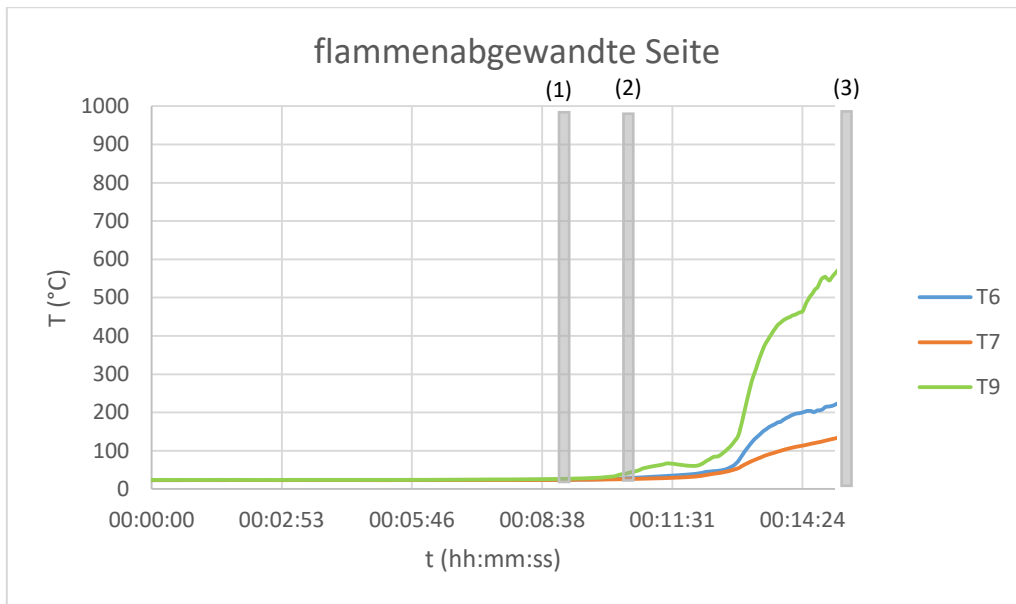


Diagramm 27: Entstehungsbrandphase Wohnzimmerbrand, flammenabgewandte Seite

Die Temperaturverläufe in der Tür werden durch die Thermoelemente T11, T12 und T13 aufgezeichnet und in Diagramm 28 grafisch dargestellt. Hierbei ist nach 5 Minuten keine Erhöhung im Inneren zu erkennen und somit eine konstante Temperatur von 22,7°C vorhanden. Durch die Temperaturzunahme der Vorderseite wird auch im Inneren nach 6:46 Minuten ein Temperaturanstieg verzeichnet. Dieser erreicht nach 8:38 auf der Rückseite der flammenzugewandten Seite durch T11 eine Temperatur von 38,8°C. Zur gleichen Zeit werden durch T13 = 40,5°C und T12 = 39,8°C erreicht. Nach 11:31 Minuten und dem somit verbundenen Vollbrand im Raum, ist eine schnelle Temperaturerhöhung durch T11 wahrzunehmen. Ab 14:00 Minuten kommt es zu einem weiteren steilen Anstieg von T11. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt die Tür auf der flammenzugewandten Seite bereits gebrannt hat und sich somit das Element in den Flammen befand. Die nach 14 Minuten gemessene Temperatur beträgt T11 = 4343,25 °C, T13 = 195 °C und T12 = 128,7 °C.

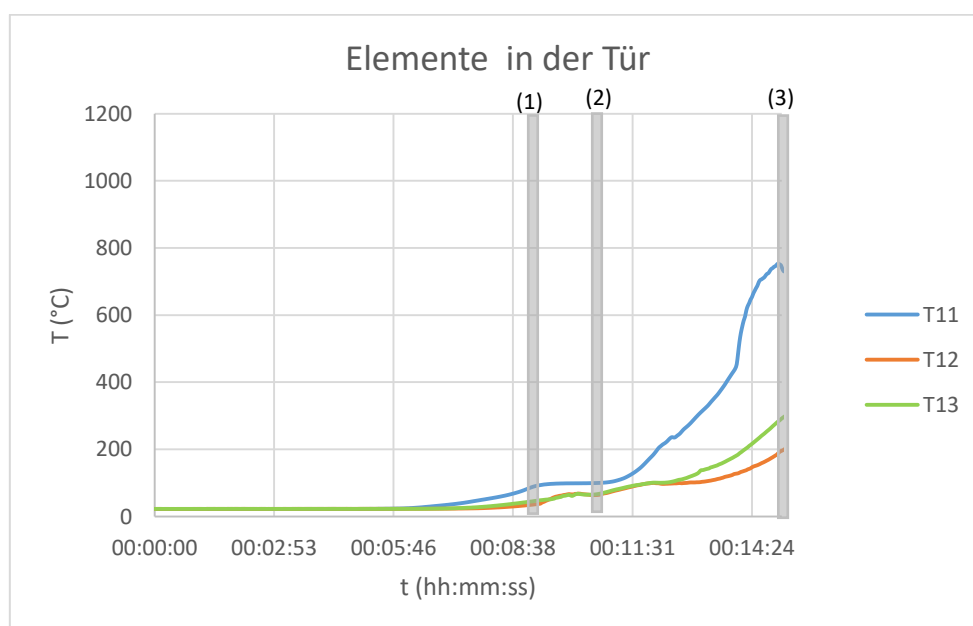


Diagramm 28: Entstehungsbrandphase Wohnzimmerbrand, Innenliegende Thermoelemente

4. Versuche

Vergleich der Kiesbettbrenner und dem Wohnzimmerbrand

Die nachfolgende Tabelle dient als Vergleich zwischen dem Versuch mit dem Kiesbettbrenner sowie dem vorher beschriebenen Wohnzimmerbrand. Betrachtet wird, ob die definierte thermische Belastung durch die Kiesbettbrenner einem realen Entstehungsbrandverlauf entspricht. Dies konnte durch den Wohnzimmerbrand belegt werden. Zum Zeitpunkt der Zündung, wurden bei beiden Versuchen die gleichen Temperaturen auf der flammenzugewandten Seite und der flammenabgewandten Seite gemessen. Weiterhin wurde bei beiden Versuchen nach 10 Minuten sowie nach 11 Minuten ein Delta von 1°C auf der flammenabgewandten Seite verzeichnet. Ein Unterschied von 22°C zeigt die Rückseite der Röhrenspaneinlage im Versuch der Kiesbettbrenner bei 250°C auf. Begründet werden kann dies durch die längere Einwirkungsdauer der Wärme auf das Türblatt. Zu erwähnen ist, dass die Maximaltemperatur von 250°C nach 30 Minuten und somit dem Ende der Messzeit erreicht wurde.

	Wohnzimmerbrand		Kiesbettbrenner 200 KW Leistung	
	Tür Vorne	Tür hinten	Tür vorne	Tür hinten
Zündung	24,0°C	23,5°C	24°C	23,5°C
Übergang zum Vollbrand nach 10 Minuten	127°C	25°C	127°C	26°C
Vollbrand Nach 11 Minuten	160	30	160	31

Vollbrand bei einer Temperatur von 250 °C	250 °C t = 11:42 Minuten	40°C	250°C t = 30 Minuten	62 °C
Kurz vor Rauchgasdurchzündung und Türabbrand	831 °C T = 16 Minuten	215 °C	/	/

Tabelle 10: Vergleich der Temperaturen, Kiesbettbrenner und Wohnzimmerbrand

5. Vergleich der Ergebnisse

5. Vergleich der Ergebnisse

Für die nachfolgenden Vergleiche wird in Tabelle 11 die zeitliche Temperaturerhöhung um 1°C beziehungsweise um 5°C auf der wärmeabgewandten Seite der durchgeführten Versuche dargestellt. Es lässt sich ein deutlicher Unterschied bezüglich der verschiedenen Türfüllungen sowie der Wärmequellen erkennen.

	Heißluftgebläse Erhöhung um 1 °C / 5 °C	Thermischer Strahler Erhöhung um 1°C / 5°C	Kiesbettbrenner Erhöhung um 1°C / 5°C
Wabenfüllung	03:31 Min./ 07:19 Min.	01:38 Min./ 03:01 Min.	03:18 Min./ 07:00 Min.
Röhrenspaneinlage	06:17 Min./ 11:53 Min.	01:32 Min./ 04:55 Min.	02:22 Min./ 12:16 Min.
Stahltür	16:28 Min./ > 1 h	01:15 Min./ 04:09 Min.	06:00 Min./ 12:57 Min.

Tabelle 11: Zeitliche Erhöhung der Temperatur auf der Rückseite von 1°C und 5 °C

Für eine detailliertere Auswertung, der gewonnenen Ergebnisse, wurden durch das Programm TecPlot360 (vgl. Kapitel 4.2.1.4) die unterschiedlichen Türfüllungen anhand einer Wärmequelle grafisch dargestellt und miteinander verglichen. Die Temperaturskalen wurden in diesen Abbildungen angeglichen um eine bessere Vergleichsmöglichkeit zu erhalten. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 30 Minuten nach Versuchsbeginn gewählt.

5. Vergleich der Ergebnisse

Heißluftgebläse

In Abbildung 68 und Abbildung 69 werden die verschiedenen Türfüllungen anhand des Heißluftgebläses miteinander verglichen.

Zu sehen ist auf der linken Seite die grafische Darstellung der Versuche mit dem Heißluftgebläse. Durch die geringe Austrittsfläche des Lüfters werden in der Mitte die höchsten Temperaturen erreicht. Anbei lässt sich eine umgelenkte Auftriebsströmung erkennen. Aufgrund des ähnlich ankommenden Wärmestromes auf den Türen stellt sich auch bei der Röhrenspaneinlage kein großer Temperaturunterschied ein. Die Stahltür in der rechten Grafik erhitzt sich durch die aufgetragene Konvektionsströmung in der Mitte auf 85°C.

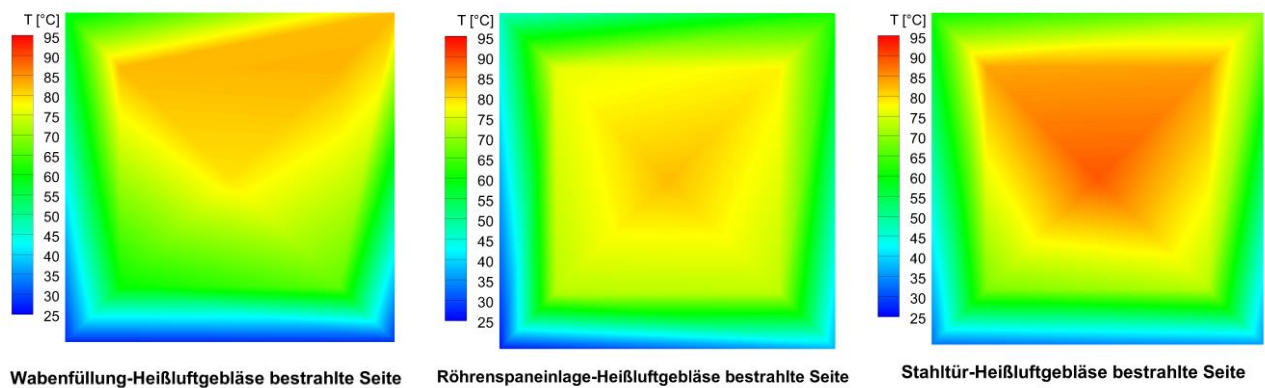


Abbildung 68: Vergleich der Türen, Heißluftgebläse, bestrahlte Seite

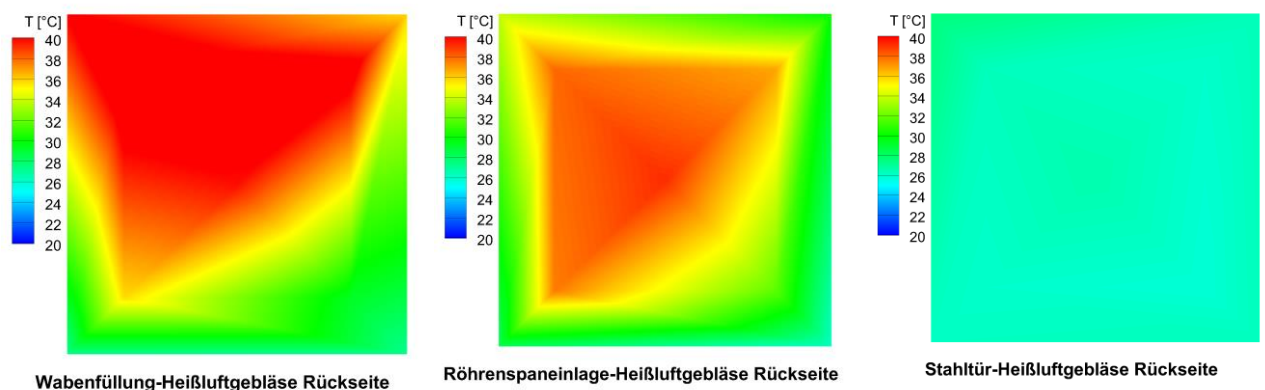


Abbildung 69: Vergleich der Türen, Heißluftgebläse, Rückseite

Die links in Abbildung 69 dargestellte Tür mit Wabenfüllung zeigt im oberen Bereich die spezifische Maximaltemperatur von 40°C auf. Weiterhin ist eine thermische Auftriebsströmung zu erkennen.

In der mittleren Grafik erreicht die Rückseite der Röhrenspaneinlage eine Maximaltemperatur von 38°C. Zu erkennen ist eine nahezu homogene Temperaturverteilung.

In der rechten Grafik ist die Rückseite der Stahltür dargestellt. Durch die Isolierschicht aus Mineralwolle ist bei den Versuchen mit dem Heißluftgebläse nur ein sehr geringer Wärmedurchgang zu verzeichnen. Die Maximaltemperatur auf der Rückseite unterscheidet sich nur um 4°C zur Umgebungstemperatur von 22°C (vgl. Tabelle 11).

5. Vergleich der Ergebnisse

Thermischer Strahler

Durch Abbildung 70 wird deutlich, dass die beiden verwendeten Holztüren (links und Mitte) eine geringere Wärmeleitfähigkeit gegenüber der in der rechten Grafik dargestellten Tür aufweisen. Dies begründet sich durch das verbesserte Absorptions- sowie Reflektionsvermögen der Stahltür. Somit erreichen die Türen mit Wabenfüllung und Röhrenspaneinlage auf der bestrahlten Seite Temperaturen von 180°C-190°C. Die Oberfläche der Stahltür weist aufgrund ihrer Wärmeleitfähigkeit und die verbesserte Aufnahme von thermischer Strahlung die spezifische Maximaltemperatur von 210°C auf.

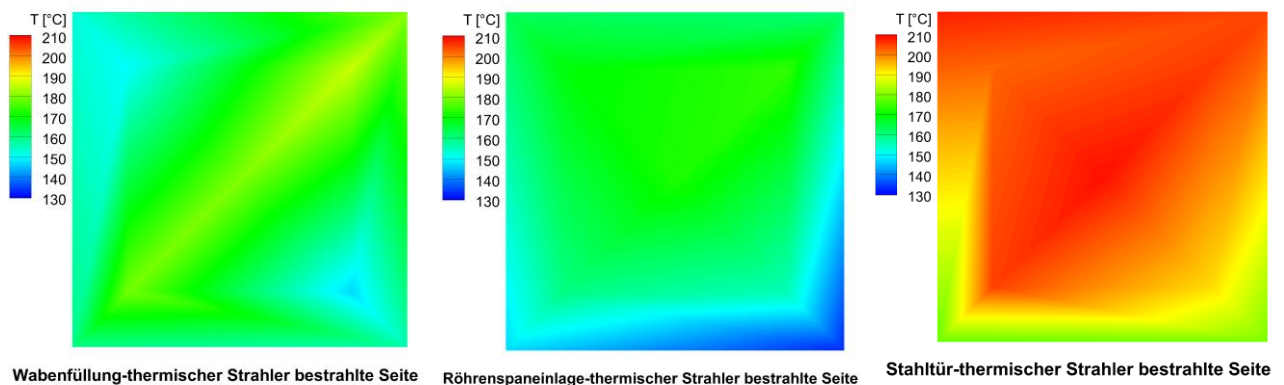


Abbildung 70: Vergleich der Türen, thermischer Strahler, bestrahlte Seite

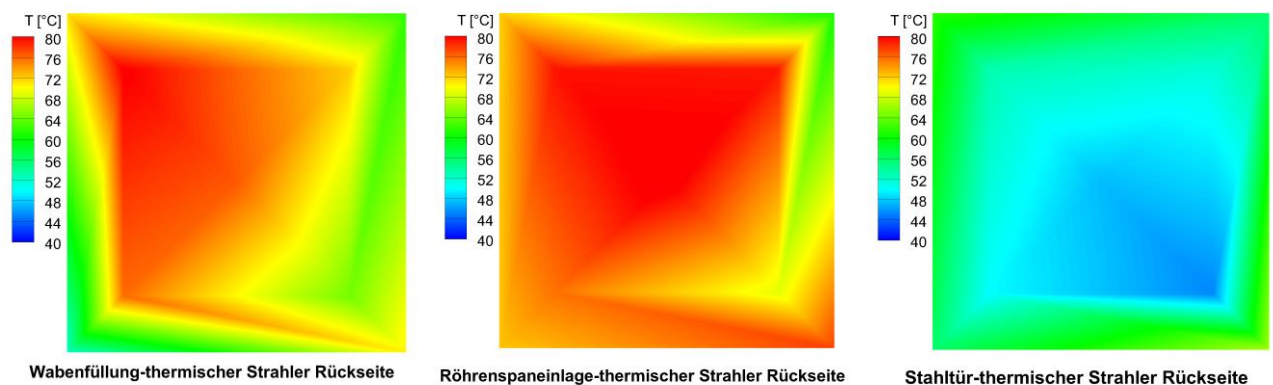


Abbildung 71: Vergleich der Türen, thermischer Strahler, Rückseite

Bei der Betrachtung der Türen mit Wabenfüllung und der Röhrenspaneinlage lässt sich erkennen, dass sich bei beiden Versuchen eine homogene Temperaturverteilung auf der Rückseite einstellt. Die Maximaltemperaturen werden in beiden Fällen von 80°C erreicht. In der mittleren Grafik wird zusätzlich die spezifische Maximaltemperatur erreicht. Im Vergleich hierzu weist die Rückseite der Stahltür den niedrigsten Temperaturbereich auf. Bei allen drei Versuchen durch die Strahlwand lässt sich eine thermische Auftriebsströmung erkennen.

5. Vergleich der Ergebnisse

Kiesbettbrenner

Die abgebildeten Holztüren weisen nach 30 Minuten eine ähnlich homogene Temperaturverteilung auf. Dies ist auf die homogene Temperaturverteilung im Raum zurückzuführen. Die maximal erreichten Temperaturen betragen hierbei zwischen 230°C und 270°C. Bei der rechts dargestellten Stahltür zeichnet sich eine Erwärmung im unteren Bereich der Türoberfläche ab. Aufgrund der hohen Isolierwirkung wird die Wärme nicht durch die innenliegende Mineralwolle sondern über die umlaufenden Rahmenteile auf die Rückseite geleitet. Hierbei wurde die Maximaltemperatur von 300 °C in der rechten unteren Ecke gemessen.

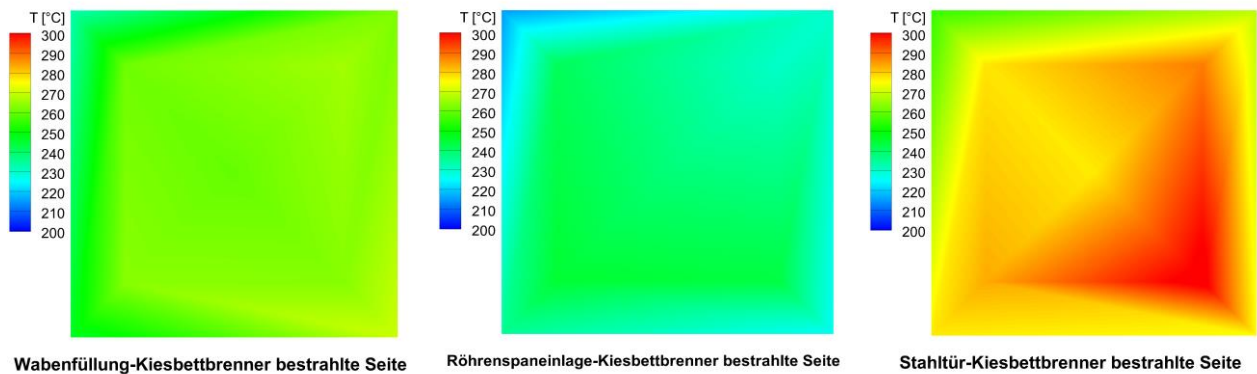


Abbildung 72: Vergleich der Türen, Kiesbettbrenner, bestrahlte Seite

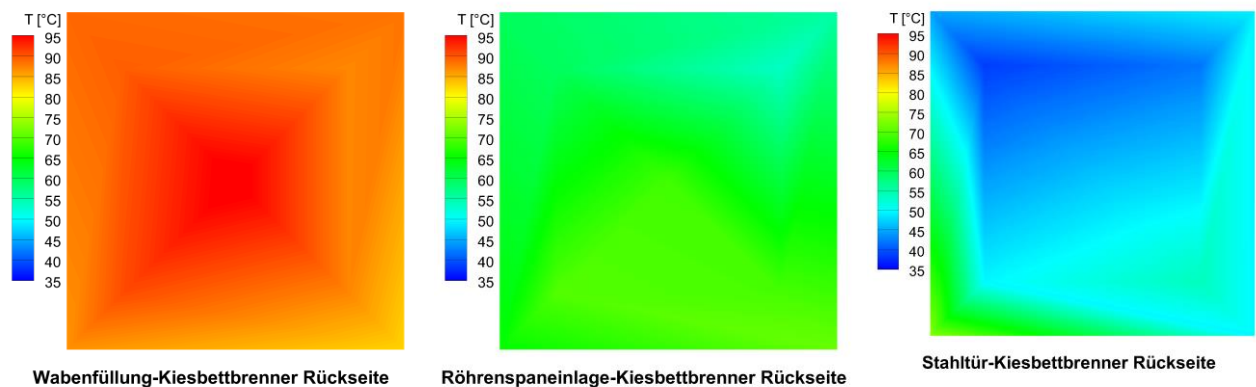


Abbildung 73: Vergleich der Türen, Kiesbettbrenner, Rückseite

Die Temperaturverteilung auf der Rückseite lässt sich durch die verschiedenen Schichten der Füllungen beschreiben. Zu sehen ist auf der linken Seite die Wabenfüllung welche mehr Luft als Kartonmaterial aufweist. Dabei wird die Wärme hier gut durch das Innenleben geleitet. Auf der Rückseite stellt sich nach 30 Minuten eine Maximaltemperatur von 95°C ein.

In der Mitte wird durch die gleichmäßigere Schichtung aus Holz und Luft eine niedrigere Temperaturverteilung festgestellt. Die Temperaturen bewegen sich im Bereich von 55°C bis 75 °C.

Die rechts in Abbildung 73 dargestellte Grafik weist nur eine geringfügige Temperaturerhöhung von 15°C auf. Im unteren Bereich kommt es zu einer Zunahme der Temperatur. Dies ist auf die Wärmeleitung über die Stahlmantelung zurückzuführen.

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Für die Auswertung der gewonnenen Ergebnisse wurde für jede Tür mit unterschiedlicher Wärmequelle, der Wärmestrom \dot{Q} errechnet. Hierfür wurde folgende Gleichung verwendet:

$$\dot{Q} = \frac{A * (\vartheta_1 - \vartheta_{n+1})}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n}} \quad (\text{Gleichung 20})$$

A beschreibt die Fläche der Probestücke mit $0,64 \text{ m}^2$, ϑ_1 die Temperatur der bestrahlten Seite, ϑ_{n+1} die Temperatur auf der Rückseite, s_n die verschiedenen Schichtdicken der unterschiedlichen Materialien der Türen und λ_n die Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{m \cdot K}$. Die Ergebnisse werden in Tabelle 13 präsentiert.

Da die verwendeten Holztüren unterschiedliche Schichten ungleichen Materials aufweisen, wurden für λ_n verschiedene Werte zur Berechnung angenommen. Diese Angaben werden aus Tabelle 12 entnommen und beziehen sich auf eine Temperatur von 100°C und einen Druck von 1 Bar. Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt in Tabelle 13.

λ in $\frac{W}{m \cdot K}$.	Material
0,17	Hartfaserplatte (Holz)
0,13	Pressspan
60	feuerverzinktes Feinblech
0,03139	Luft
0,040	Mineralwolle

Tabelle 12: Übersicht der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten [9]

	Wabenfüllung	Röhrenspaneinlage	Stahltür
Heißluftgebläse	22 W	30 W	47 W
thermischer Strahler	57 W	64 W	121 W
Kiesbettbrenner	91 W	120 W	165 W

Tabelle 13: berechnete Wärmeströme der durchgeführten Versuche

Weiterhin wurde für die genutzten Probestücke der thermische Widerstand R_{th} berechnet. Dieser ergibt sich aus:

$$R_{th} = \frac{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n}}{A} \quad (\text{Gleichung 21})$$

A beschreibt die Fläche in m^2 , s_n die Schichtdicke der unterschiedlichen Materialien und λ_n die Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{m \cdot K}$.

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Aufgrund der eindimensionalen Betrachtungsweise kann der thermische Widerstand nur für eine Richtung bestimmt werden. Um eine detailliertere Aussagen treffen zu können, muss weiterhin die spezifische Wärmekapazität der unterschiedlichen Materialien berücksichtigt werden.

Zur Berechnung der thermischen Widerstände wurden für die unterschiedlichen Schichten der Türfüllung die in Tabelle 12 aufgeführten Werte für λ_n angenommen. Die Ergebnisse der eindimensionalen Betrachtung sind im Anhang unter Tabelle 14 einzusehen.

Temperaturverteilung in der Tür

In den nachfolgenden Abbildungen sind die entstandenen Temperaturverläufe der einzelnen Versuche dargestellt. Die Anordnung der Innenliegenden Thermoelemente ist aus Abbildung 34 ersichtlich. Die dargestellten Werte zeigen die Temperaturverläufe, welche 30 Minuten nach Versuchsbeginn gemessen wurden.

Wabenfüllung / Heißluftgebläse

Zu sehen ist in diesem Diagramm der Temperaturverlauf in der Tür mit Wabenfüllung welche mit Konvektion getestet wurde. Durch die innenliegende Mischschicht aus Luft und Karton kann von einem inhomogenen Temperaturverlauf ausgegangen werden, welcher eine Temperaturdifferenz von 40 °C aufweist.

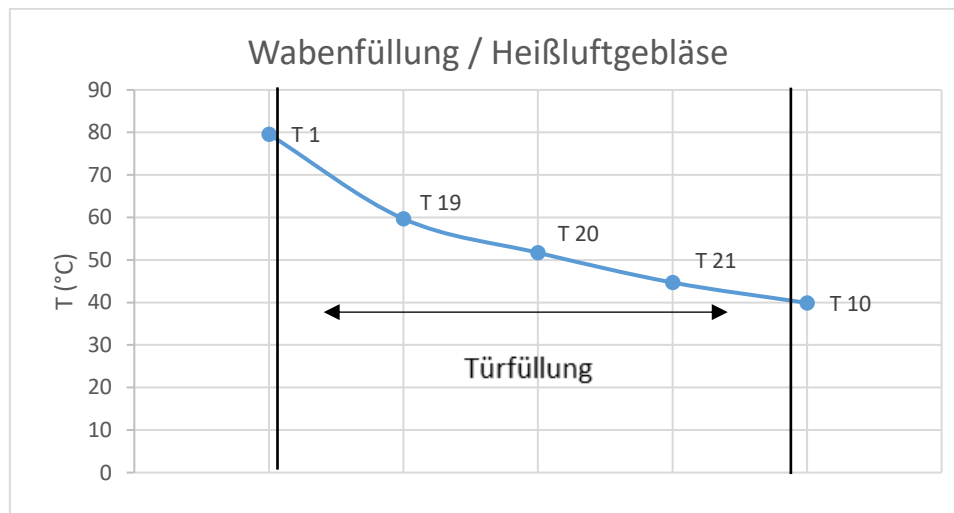


Diagramm 29: Temperaturverläufe in der Tür, Wabenfüllung und Heißluftgebläse

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Wabenfüllung / thermischer Strahler

Die berechnete und korrigierte Gastemperatur beträgt bei diesem Versuch 119,1°C. Zu erkennen ist, dass die Wärmestrahlung eine große Rolle für die Wärmeübertragung spielt. T1 weist gegenüber der verwendeten Drei-Perlen-Sonde eine Temperaturdifferenz von +40 °C auf. Nach dem Eindringen in die Holzschicht wird die auftreffende Wärme gut durch die Holzplatte abgeführt. Dies wird durch die gesunkene Temperatur von T19 belegt. Zwischen T19 und T21 stellt sich durch die Mischschicht von Luft und Kartonwaben ein inhomogener Verlauf ein. Dieser sinkt weiter ab, da die Wärme durch die Rückseite transportiert wird und eine Temperatur von 79°C erreicht.

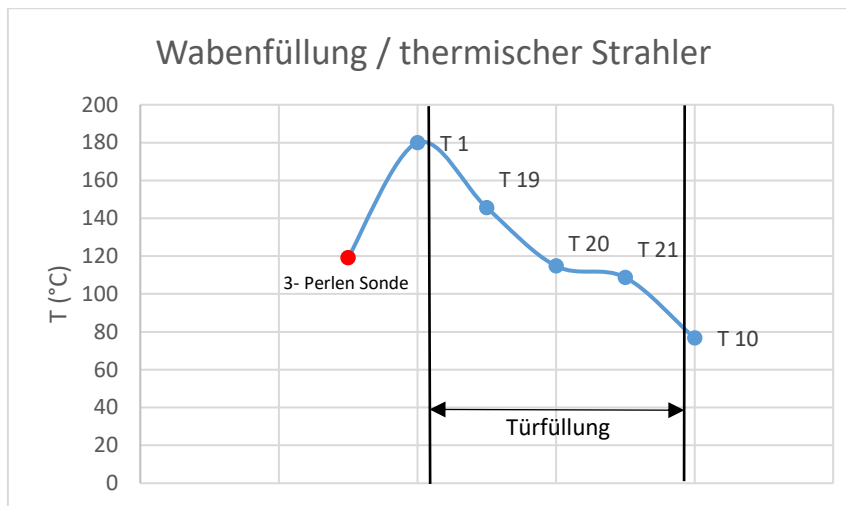


Diagramm 30: korrigierte Gastemperatur und Temperaturverläufe in der Tür, Wabenfüllung und thermischer Strahler

Wabenfüllung / Kiesbettbrenner

Bei dem nachgestellten Brandversuch mit den Kiesbettbrennern ist sowie bei dem Versuch des thermischen Strahlers ein inhomogener Verlauf der Tür mit Wabenfüllung festzustellen. Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt beträgt 160°C. Durch die Türfüllung und die dort herrschende Mischschicht ist bei T21 eine geringe Temperaturerhöhung zu erkennen. Dies kann durch das Anliegen der Thermoelements Spitze auf der Kartonstruktur der Füllung zu erklären sein.

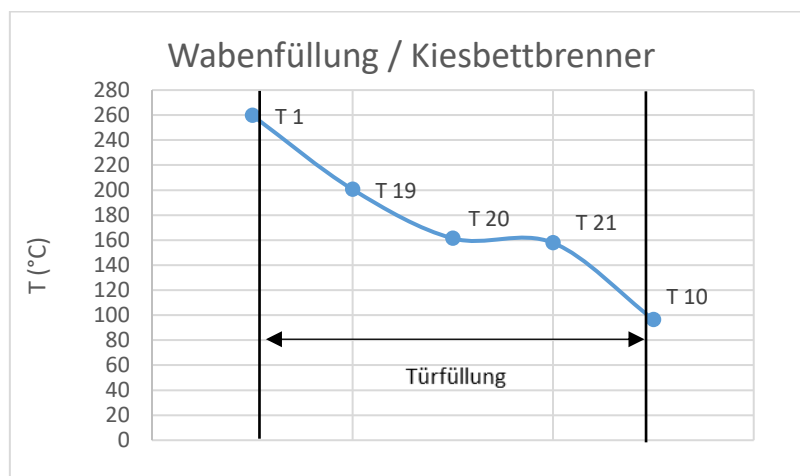


Diagramm 31: Temperaturverläufe in der Tür, Wabenfüllung und Gasbrenner

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Die nun folgenden Diagramme beziehen sich auf die Versuche mit der Röhrenspaneinlage als Innenlage. Diese weist eine dichtere Füllung aus Pressspan auf. Die waagrecht angeordneten Zylinder in der Tür bestehen aus Luft.

Röhrenspaneinlage / Heißluftgebläse

In Diagramm 32 zeigt sich der Temperaturverlauf durch die Tür mit einer Röhrenspaneinlage, welche mit einem Heißluftgebläse untersucht wurde. Zu erkennen ist, dass die auftreffende Wärme durch die Decklage abgeleitet wird. Dies wird durch T19 auf der innenliegenden Rückseite der bestrahlten Seite dargestellt. Die Temperaturmessstelle weist eine Temperaturdifferenz von 20°C auf. Im weiteren Verlauf befindet sich zwischen T19 und T21 eine Mischschicht aus Pressspan und Luft. Gekennzeichnet wird dies durch einen inhomogenen Temperaturabfall. Zwischen T20 und T21 ist weiterhin eine geringe Temperaturänderung zu erkennen, da sich hier T20 in der isolierenden Luftschicht befindet. Somit wird die Wärme über die Holzsegmente der Tür auf die innenliegende, wärmeabgewandte Seite geleitet. Durch die Decklage auf der Rückseite ist eine weitere Temperaturdifferenz von ca. 10°C wahrzunehmen.

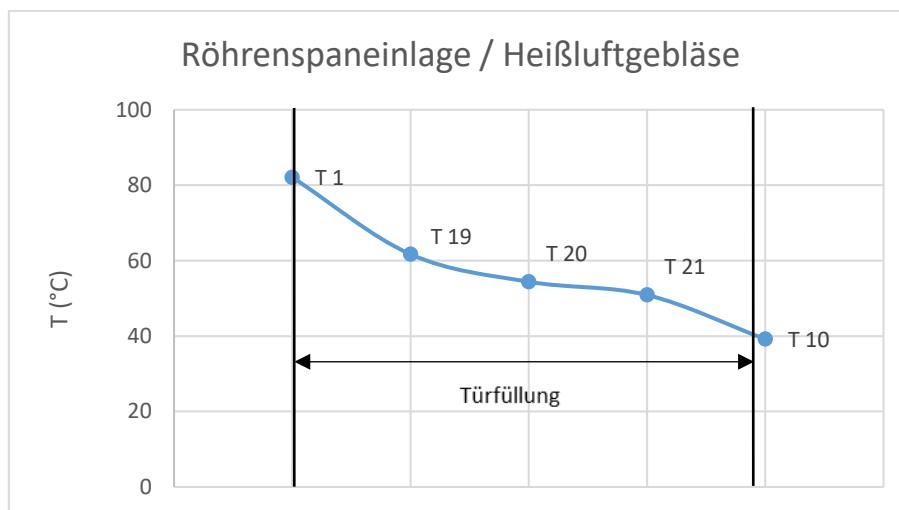


Diagramm 32: Temperaturverlauf in der Tür, Röhrenspaneinlage und Heißluftgebläse

Röhrenspaneinlage / thermischer Strahler

In Diagramm 33 beträgt die korrigierte Gastemperatur, welche mit der Drei-Perlensonde gemessen wurde, 99,9°C. Zwischen korrigierter und unkorrigierter Oberflächentemperatur ergibt sich eine Differenz von +72,1°C. Der Verlauf in der Tür ähnelt dem vorher beschriebenen Verlauf durch Konvektion. Die durch T1 gemessene Temperatur beträgt 172°C. Durch die Deckplatte stellt sich eine gemessene Differenz von 34,6°C ein.

Betrachtet man die Mischschicht aus Pressspan und Luft so ist auch hier ein inhomogener Verlauf zu erkennen. Der Temperaturunterschied zwischen T20 und T21 beträgt lediglich 5°C. Durch die Deckplatte auf der Rückseite findet eine weitere Temperaturabnahme von 25,8°C statt.

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

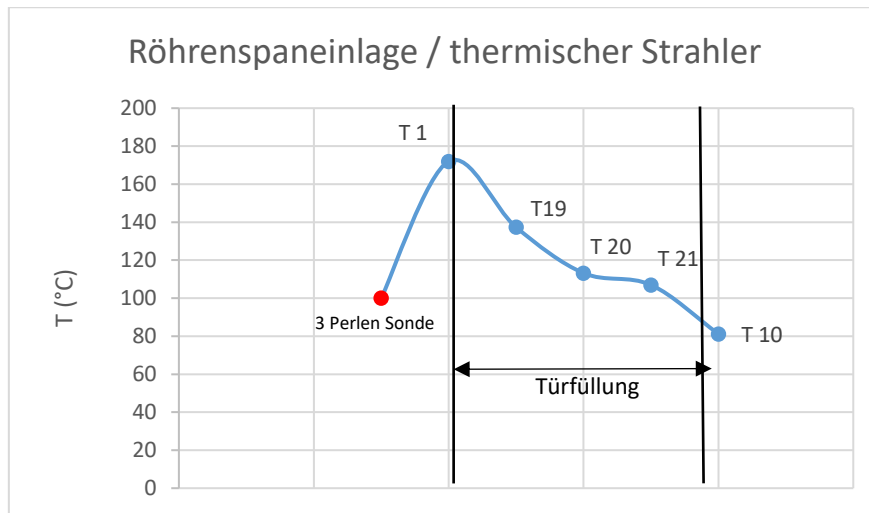


Diagramm 33: korrigierte Gastemperatur und Temperaturverlauf in der Tür, Röhrenspaneinlage und Thermischer Strahler

Röhrenspaneinlage / Kiesbettbrenner

Im folgenden Diagramm wird der Temperaturverlauf der Röhrenspaneinlage und dem Kiesbettbrenner dargestellt. Hier wurde gegenüber den Versuchen mit Konvektion und reiner Strahlung eine deutlich höhere Temperatur erreicht. Das Maximum, dargestellt durch T1 beträgt nach 30 Minuten 238,2°C. Nach der Deckplatte kommt es zu einem Temperaturabfall, welcher von T19 im inneren mit 157,1°C gemessen wurde. Weiterhin ist dem Diagramm eine kontinuierliche Temperaturverringerung zu entnehmen. Auf der Rückseite wurde durch T10 eine Temperatur von 68,8°C gemessen. Somit kann eine Temperaturdifferenz von insgesamt 169,4°C verzeichnet werden.

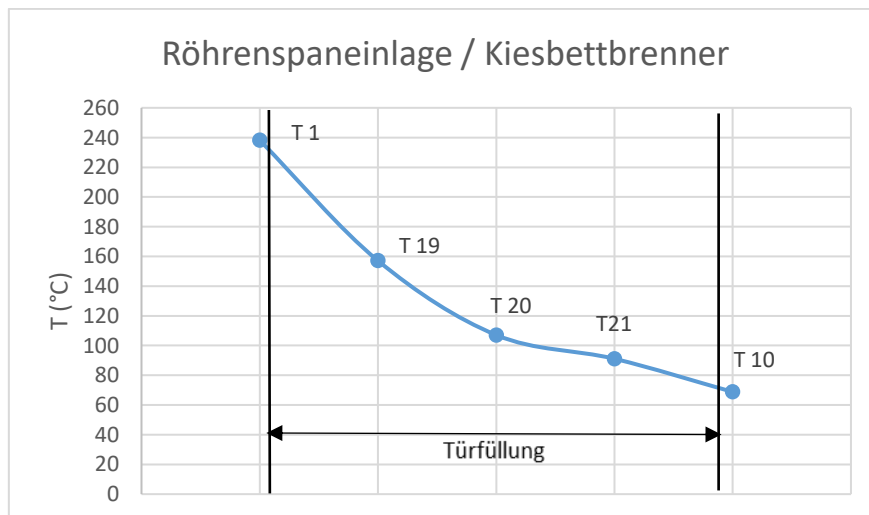


Diagramm 34, Temperaturverlauf in der Tür, Röhrenspaneinlage und Gasbrenner

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Stahltür / Heißluftgebläse

Aus diesem Temperaturverlauf ist die Maximaltemperatur, welche durch T1 = 89,2°C gemessen wurde, dargestellt. T19 sowie T20 weisen eine lineare Temperaturabkühlung auf. Dies ist auf die, durch den Stahl abgeführte Wärme sowie die Isoliereigenschaft der Mineralwolle zurückzuführen. Auf der Innenseite der Rückseite wird durch T21 eine Temperaturzunahme aufgezeichnet. Danach findet durch die 3mm dicke Stahlschicht eine Abkühlung des Temperaturgradienten statt. Die Differenz zwischen bestrahlter Seite und Rückseite der Stahltür beträgt 62,6°C.

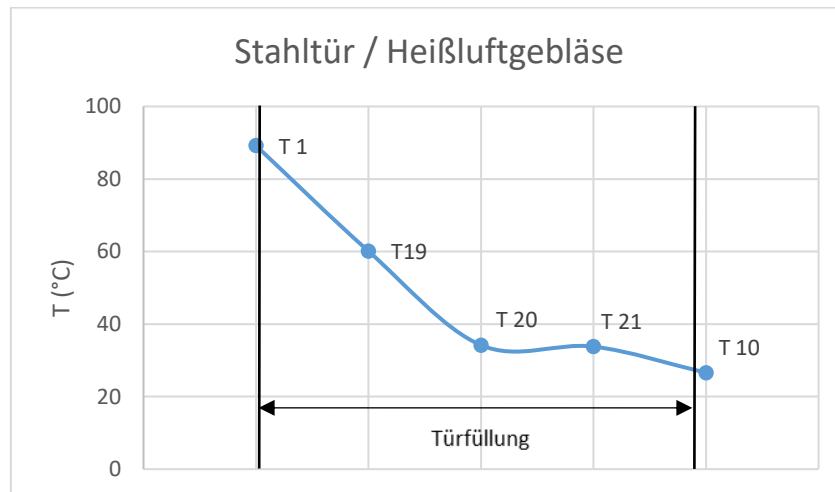


Diagramm 35: Temperaturverlauf in der Tür, Stahltür und Heißluftgebläse

Stahltür / thermischer Strahler

Die korrigierte Gastemperatur der Drei-Perlensonde beträgt 96,9°C. Gegenüber der unkorrigierten Oberflächentemperatur mit 209,1°C, welche durch T1 gemessen wird, stellt sich ein Delta von 112,2°C ein. Auch durch den thermischen Strahler ist ein ähnlicher Temperaturverlauf wie durch die reine Konvektion ersichtlich. Die mit T19 ermittelte Temperatur von 178,3°C zeigt einen Wärmeverlust durch die Deckplatte von 30,8 °C auf. Weiterhin kommt es in der Füllung aus Mineralwolle zu einer linearen Abkühlung, welche zwischen den Messstelle T19 und T20 auftritt. Die Temperaturerhöhung auf 85°C auf der innenliegenden Seite der Rückwand ist ein weiterer Beweis für die gute Wärmeleitfähigkeit von Stahl. Die Temperaturmessung durch Thermoelement 10 ergab nach 30 Minuten 47,3°C.

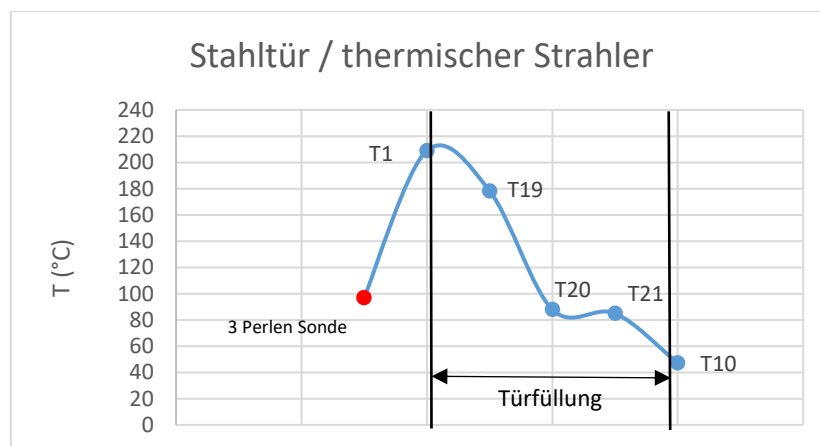


Diagramm 36: korrigierte Gastemperatur und Temperaturverlauf in der Tür, Stahltür und Thermischer Strahler

6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Stahltür / Kiesbettbrenner

Diagramm 37 zeigt die Auswertung des Temperaturverlaufes welcher mit den Kiesbettbrennern erzeugt wurde. Durch einen großen Temperaturgradienten, die gute Wärmeleitfähigkeit des Stahles sowie die gut isolierende Wirkung der Mineralwolle ist ein linearer Temperaturverlauf zu erkennen. Die maximale Oberflächentemperatur beträgt hierbei 277,1°C. T21 und T10 weisen eine identische Temperatur von 57,1°C auf. Nach 30 Minuten stellt sich eine Differenz von 220°C ein.

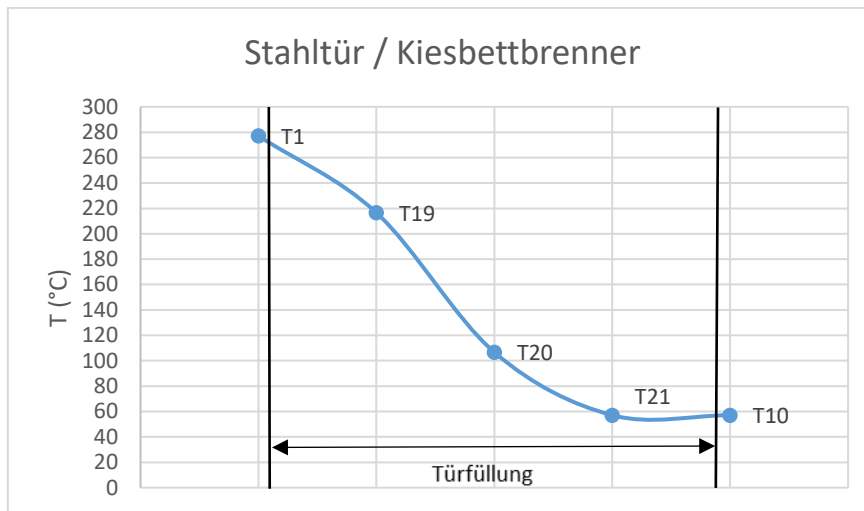


Diagramm 37: Temperaturverlauf in der Tür, Stahltür und Gasbrenner

7. Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des zeitlichen Temperaturverlaufes zweier handelsüblichen Holztüren und einer Stahltür während eines Brandes. Die Holztüren wurden anhand ihrer unterschiedlichen Türfüllung in Form einer Karton-Wabenfüllung sowie einer Röhrenspaneinlage ausgewählt. Die Stahltür wies eine Füllung aus Mineralwolle auf. Die Türen wurden mit reiner Konvektion, thermischer Strahlung sowie durch zwei Kiesbettbrenner, getestet. Aufgrund der unterschiedlichen Innenleben wurden unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Nachfolgend wird in ein forschungsorientiertes sowie in ein feuerwehrtechnisches Fazit unterschieden.

7.1 Fazit für die Forschung und deren Ausblick

Die grundlegenden Wärmeübertragungsmechanismen eines Brandes bestehen aus Konvektion und thermischer Strahlung. Für die vorliegende Arbeit wurden diese Wärmeströme getrennt und in Form eines Heißluftgebläses (Konvektion) und eines thermischen Strahlers als Energiequellen umgesetzt. Diese unterscheiden sich maßgeblich in ihrer Größe und die damit verbundenen Temperaturen auf der wärmezugewandten Seite. Als weitere Vergleichsmöglichkeit wurden zwei gasbefeuerte Kiesbettbrenner verwendet. Hierbei wurden beide Komponenten wieder in einer Flamme zusammengeführt. Durch diese soll eine brandähnliche Wärmebelastung dargestellt werden. Zuvor wurden geeignete Versuchsstände aufgebaut und die Kalibrierung der Messtechnik vorgenommen. Die in Tabelle 13 (vgl. Kapitel 6) aufgeführten Wärmeströme durch die Tür belegen, dass die thermische Strahlung eine wichtige Rolle als Wärmetransportmedium darstellt. Die Konvektion weist hierbei geringere Temperaturen bei den Versuchen auf. Betrachtet man die entstehenden Wärmeströme der Kiesbettbrenner, ist eine Summierung aus Konvektion und thermischer Strahlung zu erkennen. Weiterhin unterscheiden sich die Wärmeströme anhand der verwendeten Türfüllungen. Dies ist auch auf die unterschiedlich wirkende Isolierung der Türfüllungen zurückzuführen. Der anschließend durchgeführte Realbrand eines nachgestellten Wohnzimmers weist einen ähnlichen Temperaturverlauf der Entstehungsbrandphase gegenüber den Kiesbettbrenner-Versuchen auf. Zu erwähnen ist, dass es durch die definierte Leistung der Kiesbettbrenner zu einem langsameren Verlauf gegenüber des Realbrandes kommt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Türart beziehungsweise deren Füllung aber auch die zeitlichen Brandverläufe und deren spezifischen Leistungen, einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperaturverteilung der Tür sowie deren Wärmeübertragungsverhalten darstellt.

Die gewonnenen Versuchsergebnisse können zukünftig für brandschutztechnische dreidimensionale numerische Simulationen verwendet werden. Somit lässt sich eine detailgetreue Brandausbreitung in geschlossenen Räumen sowie das Verhalten von heißen Abgasströmen darstellen. Weiterhin können durch die Simulation Realbrandversuche mit unterschiedlichen Einflüssen von Ventilationszuständen sowie deren Brandverläufe realisiert werden.

7. Fazit und Ausblick

7.2 Fazit für die Feuerwehr

Die erhaltenen Ergebnisse sind ebenso für Feuerwehren im Brandeinsatz von Nutzen, da sie Rückschlüsse auf die Aktualität des Handrückentests (vgl. 2.1.2) ermöglichen. Die auftretende Temperaturdifferenz zwischen der flammenzugewandten- und der flammenabgewandten Türseite ist abhängig von folgenden Einflussgrößen:

- Art und Menge der Brandlast
- der Initialbrandlast
- Wärmefreisetzungsrate / spezifische Leistung und der daraus entstehenden Brandausbreitungsgeschwindigkeit
- Dauer der Entstehungsbrandphase
- Position der Brandlast im Raum

Diese Einflussgrößen sind miteinander gekoppelt und definieren einen möglichen Zeitraum für die Durchführung des Handrückentests. Durch den in Tabelle 10 getroffenen Vergleich der Entstehungsbrandphasen lässt sich ein ähnlicher Temperatur-Zeit-Verlauf erkennen. Durch die unterschiedlich andauernde Wärmefreisetzung kommt es allerdings zu zeitlichen Unterschieden ab einer Temperatur von 250°C. Bei dem Versuch der Kiesbettbrenner wurden diese Temperaturen erst nach 30 minütiger Beflammung erreicht. Auf der Rückseite wurde durch die längere Temperatureinwirkung eine Temperaturerhöhung auf 62°C gemessen. Im Vergleich hierzu konnte während dem Wohnzimmerbrand nach 11:42 Minuten eine Erhöhung auf 40 °C verzeichnet werden. Kommt es zu einem Brand über einen längeren Zeitraum so ist durchaus eine Erhöhung der Tür auf der flammenabgewandten Seite zu erkennen. Betrachtet man den in dieser Arbeit durchgeführten Wohnzimmerbrand so kommt es in kurzer Zeit zu einer schnellen Brandausbreitung. Diese wurde über die imitierte Flamme sowie die Abgasdurchzündung auf den Möbelstücken hervorgerufen. Allgemein lässt sich sagen, dass selbst bei starken Bränden eine Mindestdauer nötig ist um eine Temperaturerhöhung durch die Tür zu erkennen. Durch den nach 12 Minuten durchgeführte Handrückentest konnte keine Temperaturerhöhung auf der flammenabgewandten Seite vernommen werden. Somit wurde der Übergang zum Vollbrand nach 11 Minuten nicht direkt auf die Türückseite übertragen. Zu erwähnen ist, dass zu diesem Zeitpunkt auf der flammenzugewandten Seite eine Oberflächentemperatur von 500°C gemessen wurde. Hierbei ist ein Grenzfall zu verzeichnen, da nach 13 Minuten die Rückseite eine Temperaturerhöhung auf 194°C aufweist. Zusätzlich zu den oben aufgeführten Einflussgrößen auf die Türtemperaturen ist die Wärmeübertragung in der Tür von weiteren Türeigenschaften abhängig. Diese können durch folgende Aspekte verdeutlicht werden.

- Art des Materials auf der Flammenzugewandten Seite
- Wurden die Türoberflächen mit Flammschutzmitteln versiegelt?
- Art der Füllung (ein- oder mehrschichtige Füllung)
- Inhomogener oder homogener Aufbau der Füllung
- Stärke der vorhandenen Füllung / Isolierschicht

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Temperaturverhalten einer Tür abhängig ist von den Einflussgrößen im Brandraum sowie den aufgeführten Türeigenschaften.

7. Fazit und Ausblick

Durch die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren der Bundesrepublik Deutschland (AGBF Bund) wird eine Hilfsfrist von 9 Minuten bis 11 Minuten, nach der Branderkennung, für den Erstangriff im Feuerwehreinsatz angestrebt. Kommt es zu einem lang andauernden Brandverlauf, so kann der Handrückentest anhand der gewonnenen zeitlichen Erkenntnisse durchaus funktionieren. Da die Feuerwehr in der Regel während der Brandentstehungsphase am Einsatzort eintrifft, weist dieser jedoch in dieser Phase einige Unsicherheiten auf.

8. Anhang

Stoffe	Bestrahlungsstärke in W/cm ²	
	Selbst- entzündung	Fremd- entzündung
Ungestrichenes dunkles Holz (ofentrocken)	3,4	1,3
Gestrichenes Holz (trocken)		1,7 bis 2,5
Sperrholz		1,7
Ungestrichene poröse Holzfaserplatte	2,5	1,1
Ungestrichene harte Holzfaserplatte		1,3
Duroplastischer Kunststoff	8,4	
Textilien (allgemein)	3,4	
Baumwollgewebe	2,4	1,3

Abbildung 74: Bestrahlungsstärken unterschiedlicher Materialien

	Wabenfüllung	Röhrenspaneinlage	Mineralwolle
Thermische Widerstände in $\frac{K}{W}$	1,74	1,41	1,32

Tabelle 14: Errechnete thermische Widerstände, eindimensionale Betrachtung

Literaturverzeichnis

- [1] „www.baden-wuerttemberg.de,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-im/intern/dateien/pdf/AuswertungFeuerwehrstatistik2014.pdf>. [Zugriff am 3 Juli 2016].
- [2] „www.openpr.de,“ April 2010. [Online]. Available: <http://www.openpr.de/news/416632/IFS-200-000-Wohnungsbraende-im-Jahr-haeufigste-Ursache-Haushaltsgeraete.html>. [Zugriff am 03 Juli 2016].
- [3] Franz Joos, Technische Verbrennung, Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen, Springer Verlag, 2006.
- [4] PD.Dr.-Ing. Marcus. Marx, *Vorlesungsskript Brand- und Explosionsschutz Kapitel 1*, OVGU Magdeburg, 2014.
- [5] Jürgen. Troitzsch, Brandverhalten von Kunststoffen, Hanser Fachbuchverlag, 1982.
- [6] Prof. Dr. Eckehard Specht, *Verbrennungstechnik Kapitel 1*, Otto von Guericke Universität Magdeburg.
- [7] Dougal. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd Edition, Wiley Verlag, 2011.
- [8] Landesfeuerweherschule Baden Württemberg, Ausbildung der Freiwilligen Feuerwehr zum Truppführer, Bruchsal: Neckar-Verlag, 2016.
- [9] in *VDS Tagungsband* , 2015.
- [10] Dr. Ing. Olaf. Riese, Autor, *Brandrauchversuche: Überblick über die Verfahren Poolfeuer versus Gasbrenner*. [Performance]. 2015.
- [11] „www.baumarkt.de,“ [Online]. Available: <http://www.baumarkt.de/nxs/565///baumarkt/schablone1/Innentueren-und-ihr-unterschiedliches-Innenleben>. [Zugriff am 7 Juli 2016].
- [12] „www.deinetuer.de,“ [Online]. Available: https://www.deinetuer.de/opencmsblog?blog_identifier=option_tueren_und_zargen. [Zugriff am 19 Juli 2016].
- [13] „www.bau-wiki.de,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.bau-wiki.de/tuer-und-torwiki/tueren/holzwerkstofftueren/oberflaechenmaterial/>. [Zugriff am 13 Juli 2016].
- [14] „www.westag-getalit.de,“ 2015. [Online]. Available: http://www.westag-getalit.de/uploads/media/wrt-prospekt_oberflaechen_2015_low.pdf#page=46. [Zugriff am 14 Juli 2016].
- [15] „www.holz-mandt.de,“ 2016. [Online]. Available: http://www.holz-mandt.de/typo3temp/_processed_/csm_Zimmertueren_ISL_2015_1_MS_9ee621dc55.jpg. [Zugriff am 19 Juli 2016].

Literaturverzeichnis

- [16] „www.bau-wiki.de,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.bau-wiki.de/tuer-und-torwiki/tueren/holzwerkstofftueren/oberflaechenmaterial/cpl-schichtstoff/>.
- [17] „www.flameretardants-online.com,“ [Online]. Available: <http://www.flameretardants-online.com/web/de/106/84575cb4764b9030e1338c8cfd52c9a2.htm>. [Zugriff am 14 Juli 2016].
- [18] „www.chemie.de,“ [Online]. Available: http://www.chemie.de/lexikon/Radikalische_Substitution.html. [Zugriff am 14 Juli 2016].
- [19] „www.chemie.de,“ 1997-2016. [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/Flammschutzmittel.html>. [Zugriff am 15 Juli 2016].
- [20] *Din 4102- 1*, Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [21] „www.baunetzwissen.de,“ [Online]. Available: http://www.baunetzwissen.de/glossarbegriffe/Brandschutz-Einheitstemperaturzeitkurve-ETK-_3176775.html. [Zugriff am 29 Juli 2016].
- [22] *Din 4102-2*, Berlin: Beuth Verlag, 1977.
- [23] Prof.Dr.-Ing. Henning. Bockhorn, *Wärme und Stoffübertragung*, Engler- Bunte- Institut/ Bereich verbrennungstechnik am KIT, 2005.
- [24] Dieter. Meschede, in *Gerthsen Physik*, Springer - Verlag, 2010, p. 1162.
- [25] Oliver. Brunn, *Modellierung des dreidimensionalen Strahlungswärmeaustauschs in Verbrennungsräumen mittels Monte Carlo Methode*, 2007.
- [26] Andreas. Heilos, „Spektrale Analyse der Strahlungswechselwirkung in Kohlenstoffatomen,“ KIT karlsruhe, 2002.
- [27] Prof.Dr.-Ing. Eckerhard. Specht, *Vorlesungsskript: Wärme- und Stoffübertragung*, Otto von Guericke Universität Magdeburg.
- [28] Verein. deutscher. Ingenieure, VDI- Wärmeatlas, VDI- Verlag, 1994.
- [29] Wolfgang. Polifke und Jan. Kopitz, *Wärmeübertragung; Grundlagen, analytische und numerische Methoden*, Pearson Studium, 2011.
- [30] Dr. Ing. P. Seeger, „Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion bei Bränden in Flüssigkeitslagern,“ *VFDB Magazin*, 1987.
- [31] „FH-Dortmund,“ [Online]. Available: http://ln.iuk.fh-dortmund.de/~gebhard/STA/vortraege/Thermoelemente__Feldmann.pdf. [Zugriff am 7 Juli 2016].
- [32] Prof. Dr. -Ing. Jörg. Auge, „Vorlesungsskript Mess - und Regeltechnik, Kapitel 5,“ Hochschule Magdeburg Stendal, 2013.
- [33] John. W. Schaefer, Mitchell R. Wool, „Measurement of Convective and radiatike Heat Fluxes at the Surface of an Ablative Material,“ 1969/1970.

Literaturverzeichnis

- „www.wika.com,“ März 2014. [Online]. Available:
[34] http://www.wika.com.ar/upload/DS_IN0023_D_51411.pdf. [Zugriff am 18 Juli 2016].
- [35] „www.jumo.net,“ 1 Juli 2009. [Online]. Available:
http://www.jumo.net/media/PDFs/Support_Download/FAQ/Temperature_measurement/Aufbau_und_Anwendung_von_Thermoelementen.pdf. [Zugriff am 06 08 2016].
- [36] „dasylab.de,“ 2003-2016. [Online]. Available:
<http://www.measx.com/content/content.php?action=opendoc&sid=544&kat=quicklink&rcid=6&langset=de>.
- [37] „www.bauwion.de,“ [Online]. Available: <https://www.bauwion.de/begriffe/holztuerblatt-wabenfuellung>. [Zugriff am 7 Juli 2016].
- [38] Jan. Braun, „Grundlagenuntersuchung zu Schadstoffemissionen und Rauchdichte bei Entstehungsbränden,“ Forschungsstelle für Brandschutztechnik, KIT, 2016.
- [39] Prof.Dr.-Ing. Gert. Beilicke, Bautechnischer Brandschutz, Brandlastberechnung, Leipzig: BBV Beilicke Brandschutz Verlag, 2010.
- [40] „DIN EN 60617,“ [Online]. [Zugriff am 5 Juli 2016].
- [41] „www.chemie.de,“ [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/Melamin.html>. [Zugriff am 15 Juli 2016].
- [42] Heribert Stroppe, Physik für Studenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften, Otto von Guericke Universität Magdeburg: Fachbuchverlag Leipzig im Carl hanser Verlag, 2003.