

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

**Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei
Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicher-
stellung des abwehrenden Brandschutzes**

Teil V: Experimentelle Untersuchungen

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

222

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

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

Forschungsbericht Nr. 222

**Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei
Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstel-
lung des abwehrenden Brandschutzes**

Teil 5: Experimentelle Untersuchungen

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

September 2024

FA. Nr. 251 (01/2021)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: <p style="text-align: center;">222</p>	Titel des Berichtes: Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes Teil V: Experimentelle Untersuchungen		ISSN: <p style="text-align: center;">0170-0060</p>
Autoren: Dipl.-Ing. Dominique Max		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 251 (01/2021)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und – Senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehr-angelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: September 2024			
Seitenzahl: 31	Bilder: 28	Tabellen: 4	Literaturverweise: 8
<p>Der vorliegende Bericht beschreibt zwei Versuchsreihen mit quadratischen, gasbetriebenen Kiesbettbrennern, die für die Validierung von Rechenmethoden herangezogen werden können.</p> <p>Es wurden Versuche im Freien (freie Flamme) und in einem ca. 25 m² großen Brandraum mit den gleichen Brennern durchgeführt. Es kamen zwei Kiesbettbrenner mit Seitenlängen von 0,3 m und 0,5 m zum Einsatz. Die Wärmefreisetzungsraten wurden variiert zwischen 50 kW und 250 kW mit dem Ziel ein möglichst breites Spektrum abzudecken. Im Brandraum wurde ein Referenzkörper aus Beton an die Decke des Brandraums angebracht.</p> <p>In den Versuchen wurde die Flammenlänge anhand der Videoaufnahmen ausgewertet, die Plumetemperaturen mit Thermoelementen, die Wärmestrahlung mit Gesamtwärmeflussaufnehmern und Radiometer und die Rauchschichthöhe mit Hilfe einer verfahrbaren Sonde bestimmt. Die Versuche zeigten eine gute Reproduzierbarkeit. Auch die eingesetzten Referenzkörper zeigten hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften eine gute Reproduzierbarkeit. Die Messungen der Wärmestrahlung mit unterschiedlichen Messmethoden lieferten übereinstimmende Ergebnisse.</p> <p>Die Ergebnisse wurden für die Plumetemperatur und Flammenhöhe aus der Literatur bekannten empirischen Gleichungen gegenübergestellt. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung. Bei der Plumetemperatur im Brandraum wurden systematische Abweichungen festgestellt.</p>			
Schlagwörter: Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Flammenhöhe, Plumetemperatur Bauteiltemperatur, Validierung, Brände			

Inhaltsverzeichnis

BERICHTSKENNBLATT	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	X
FORMELVERZEICHNIS	XI
1 EINLEITUNG	1
2 VERSUCHE	2
2.1 Brandraum	2
2.1.1 Brenner	4
2.1.2 Betonwürfel	4
2.1.3 Messgeräte	6
2.1.3.1 Temperaturen	6
2.1.3.2 Geschwindigkeit	6
2.1.3.3 Gaskonzentrationen	7
2.1.4 Wärmestrahlung	7
2.1.5 Flammenlänge	9
2.2 Freie Flamme	10
3 FLAMMENLÄNGE	11
4 WÄRMESTRAHLUNG	15
5 PLUMETEMPERATUR	19
6 RAUCHSCHICHTTEMPERATUR UND -HÖHE	23

7	STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN	26
8	BAUTEILTEMPERATUR	28
9	SCHLUSSFOLGERUNG/FAZIT	31
	LITERATURVERZEICHNIS	32
	ANHANG	33
ANHANG 1.	ÜBERSICHT VERSUCHE BRANDRAUM	34
ANHANG 2.	ÜBERSICHT VERSUCHE FREIE FLAMME	35
ANHANG 3.	MESSINSTRUMENTE UND MESSSTELLEN IM BRANDRAUM	36

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau Brandraum Schnitt	3
Abbildung 2: Versuchsaufbau Brandraum Grundriss.....	3
Abbildung 3: Skizze Kiesbettbrenner	4
Abbildung 4: Betonwürfel Thermoelementpositionen.....	5
Abbildung 5: Untersicht der Decke mit eingebrachtem Versuchskörper	6
Abbildung 6 links: Schwarzkörperofen; rechts: Kalibrierkurve	8
Abbildung 7 Gegenüberstellung links: Realbild; Rechts: Grauskalenbild mit Auswertung der Flammenlänge [6].....	9
Abbildung 8: Versuchsaufbau <i>freie Flamme</i> ; links: Prinzipskizze; rechts; Thermoelementkette und Höhenlage der Messtellen	10
Abbildung 9 Momentaufnahme <i>freie Flamme</i> mit unterschiedlichen Brennern und Wärmefreisetzungsraten	11
Abbildung 10 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für <i>freie Flamme</i> für $D=0,3$ m und $Q=50, 100$ und 150 kW.....	12
Abbildung 11 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für <i>freie Flamme</i> für $D=0,5$ m und $Q=200$ und 250 kW	13
Abbildung 12 Gegenüberstellung Auswertung Flammenlänge mit (oben) und ohne (unten) Ablösung (detachment) für die <i>freie Flamme</i> mit Mittelwert und Maximalwerten und der Korrelation nach Heskestad für $D=0,3$ m und $0,5$ m und $Q=50, 100, 150, 200$ und 250 kW	14
Abbildung 13 Gegenüberstellung der gemessenen Gesamtwärmeströme und Wärmefreisetzungsrate für die <i>freie Flamme</i> mit konstanter Position bezogen auf den Kiesbettbrenner	15
Abbildung 14 Gegenüberstellung gemessene Wärmeströme Radiometer (radiative flux) und Gesamtwärmestrom (total heat flux) für die <i>freie Flamme</i> für $D=0,3$ m und $Q=100, 150$ und 200 kW.....	16
Abbildung 15 Gesamtwärmeströme für Wärmeflussaufnehmer WFA 2-4 für $Q=50,100,150,200$ und 250 kW bei $D=0,3$ und $0,5$ m im <i>Brandraum</i>	17

Abbildung 16 Vergleich gemessene Wärmeströme bei <i>freier Flamme</i> und im <i>Brandraum</i> bei einem Abstand von 2,6 m und einer Höhe von 1,3 m bezogen auf den Boden für $D=0,3$ m und $Q=50,100,150,200$	18
Abbildung 17 Gemessene Gesamtwärmeströme neben Referenzprobekörper WFA 1 für $Q=50,100,150,200$ und 250 kW bei $D=0,3$ und 0,5 m im <i>Brandraum</i>	19
Abbildung 18 Gegenüberstellung gemessene Temperatur in der Plumemittelachse für die <i>freie Flamme</i> in Abhängigkeit der Raumhöhe z für $Q=100, 150, 200$ und 250 kW	21
Abbildung 19 gemessene Temperatur Plumemittelachse im <i>Brandraum</i> für $D=0,5$ m und $Q=200$ bzw. 250 kW	22
Abbildung 20 links: Momentaufnahme nach Versuchsende; rechts: Temperaturen TE-Ecke für $D=0,5$ m und $Q=200$ im <i>Brandraum</i>	23
Abbildung 21 zeitlicher Verlauf der Gaskonzentrationen für CO, CO ₂ und O ₂ in Versuch V12 für $D=0,5$ und $Q=250$ kW im <i>Brandraum</i>	24
Abbildung 22 zeitlich gemittelte Gaskonzentration für CO ₂ und O ₂ in Abhängigkeit der Höhe z für $D=0,3$ m und $D=0,5$ und $Q=50, 100, 150, 200$ kW im <i>Brandraum</i>	24
Abbildung 23 zeitlich gemittelte Temperaturen in der Ecke über die Höhe des Raumes z im <i>Brandraum</i>	25
Abbildung 24 Gemessene Druckdifferenz Bi-Di 3 unterhalb des Referenzkörpers im <i>Brandraum</i>	26
Abbildung 25 links: Differenzdruck [Pa] und rechts: Temperatur [K] aufgetragen über die Höhe der Fensteröffnung im <i>Brandraum</i>	27
Abbildung 26 Geschwindigkeiten [m/sec] im Fenster abgeleitet aus Differenzdrücken bezogen auf die Wärmefreisetzungsrates im <i>Brandraum</i>	28
Abbildung 27 Temperaturmessung in K im Probekörper für $D=0,5$ m und $Q=200$ im <i>Brandraum</i>	29
Abbildung 28 Temperaturerhöhung im Probekörper (T 2-4) über sechs Versuche bei $D=0,5$ m und $Q=200$ kW.....	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zusammenstellung der Ergebnisse für die ermittelten mittleren Flammenlängen bei der <i>freien Flamme</i> mit L_o (oben) und ohne L_u (unten) Ablösung sowie die Flammenlänge nach Korrelation L alle Werte in [cm] sowie die Brennerseitenlänge D in [m] und die Wärmefreisetzungsrate Q [kW].....	15
---	----

Abkürzungsverzeichnis

BiDi	Bidirektionale Sonde
MFC	Mass flow controller
TE	Thermoelement
TE-Kette	Thermoelementkette
WFA	Wärmeflussaufnehmer

Formelverzeichnis

χ_r	Energieverlust aufgrund von Wärmestrahlung [-]
D	Durchmesser in m
D^*	Charakteristischer Branddurchmesser
g	Erdbeschleunigung
H	Raumhöhe bzw. Höhe des Radiometers
H_{ui}	unterer Heizwert
L	Flammenlänge in cm
\overline{L}_o	obere Flammenlänge (mit Ablösung-detachment) in cm
\overline{L}_u	untere Flammenlänge (ohne Ablösung-without detachment) in cm
\dot{Q}	Gesamte Wärmefreisetzungsrate KW bzw. MW
\dot{Q}_c	Konvektiver Anteil der Wärmefreisetzungsrate KW bzw. MW
\dot{Q}_r	strahlungsspezifischer Anteil der Wärmefreisetzungsrate KW bzw. MW
\dot{Q}^*	Froude-Zahl
ρ_∞	Dichte der Umgebungsluft in kg/m ³
ρ_{tr}	Dichte des trockenen Betonmaterials in kg/m ³
s	Geschwindigkeit (absolut)
σ	Stefan-Boltzmann Konstante
T	absolute Temperatur
T_g	Gastemperatur in °C bzw. K

T_o	Schichttemperatur der heißen Schicht in °C
T_s	Oberflächentemperatur in °C bzw. K
T_w	Wassertemperatur der WFA
x	Ort auf x-Koordinate
Z_i, z_{int}	Schichthöhe

1 Einleitung

Die Validierung von Modellen ist ein zentraler Bestandteil, um die Zuverlässigkeit der Modelle und deren Ergebnisse beurteilen zu können. Insbesondere bei der Beurteilung brandschutztechnischer Fragestellungen ist in der Regel für die zur Beurteilung stehende Situation nicht durch Validierungsversuche abzubilden. Daher bedient man sich vereinfachter Modelle die sich beispielsweise auf charakteristische Größen eines Brandes, wie die Brandstärke oder den Durchmesser der Brandfläche zurückführen lassen. Neben den Einflussfaktoren, die den Brand charakterisieren wird das Brandgeschehen bei Bränden in Räumen von der Umgebung beeinflusst z.B. der Ventilation eines Brandes.

Im vorliegenden Forschungsbericht wurden zwei Versuchsreihen entwickelt und durchgeführt, die für die Validierung von Rechenmethoden herangezogen werden können. Dabei werden sowohl die Eigenschaften des Brenners variiert und die Umgebungsbedingungen zwischen einer freien Flamme und derselben Flamme in einem Raum gegenübergestellt.

Eine Versuchsreihe wurde in einem in die Brandversuchshalle eingestellten Brandraum durchgeführt. Die zweite Versuchsreihe wurde außerhalb des Brandraumes ebenso in der Brandversuchshalle durchgeführt und soll eine freie Flamme ohne Beeinflussung durch Umfassungswände charakterisieren.

2 Versuche

Die Brandversuche wurden in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführt. Die Brandversuchshalle ist ca. 450 m² groß und hat eine lichte Raumhöhe von ca. 12,50 m und ist an eine Rauchgasreinigungsanlage angeschlossen. Die Absaugstellen der Rauchgasreinigungsanlage befinden sich in Deckenhöhe. Des Weiteren befinden sich auf beiden Seiten auf Bodenhöhe Zuluftflächen, über die eine natürliche Nachströmung von Frischluft sichergestellt wird.

Üblicherweise werden Phänomene oder auch Beziehungen zwischen Kenngrößen auf dimensionslose Kennzahlen zurückgeführt. Bei Bränden handelt es sich um auftriebsbehaftete Strömungen, die durch Dichtegradienten hervorgerufen werden. Daher beziehen sich einige Korrelationen auf die froudeähnliche Kennzahl Q_D^* .

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g D^*} D^{*2}} \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei ist jeweils ρ_∞ die Dichte, c_p die spezifische Wärmekapazität und T_∞ die Temperatur der Umgebungsluft. Der Durchmesser D^* ist dabei der Durchmesser eines flächenäquivalenten Kreises der quadratischen Brenner. Die beschriebenen Versuche sollen eine möglichst große Bandbreite dieser Kennzahl abbilden.

2.1 Brandraum

Es wurden im Brandraum 21 Versuche mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Eine Übersicht ist in Anhang 1 zu finden. Die Bandbreite der Versuche liegt zwischen 0,51 und 3,67 für Q_D^* .

Der in die Brandversuchshalle eingestellte Brandraum ist ca. 5,3 m lang und breit mit einer Grundfläche von ca. 25 m². An der Front befindet sich eine Fensteröffnung mit einer Brüstungshöhe von ca. 1,20 m gemessen vom Boden des Brandraumes bei einer Höhe von ca. 1,1 m. Das Fenster war in allen Versuchen über die gesamte Versuchsdauer geöffnet. Eine Tür befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite der Seitenwand und wurde in allen Versuchen geschlossen gehalten. Die Ventilation des Brandes erfolgte vorwiegend über das Fenster.

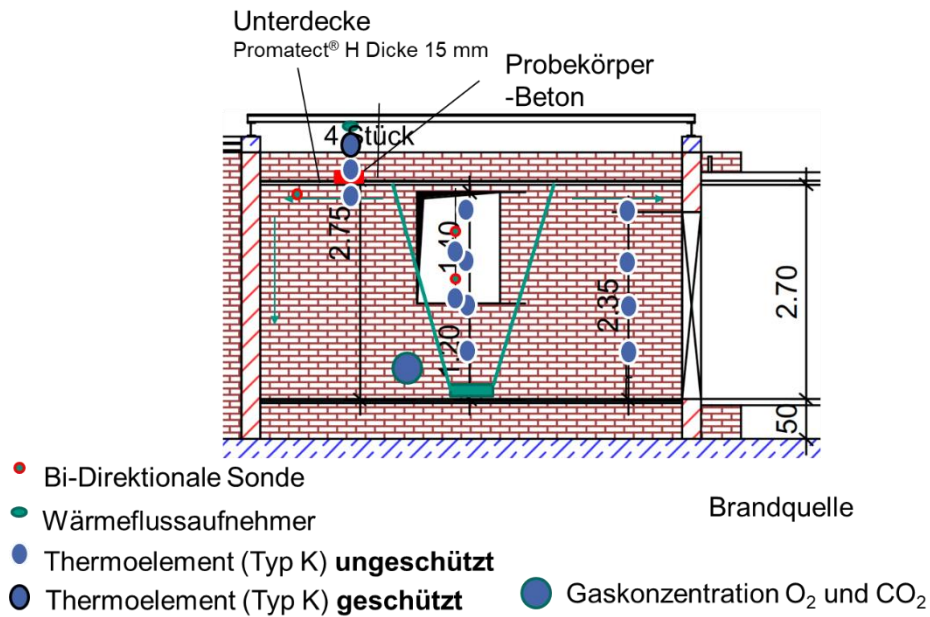


Abbildung 1: Versuchsaufbau Brandraum Schnitt

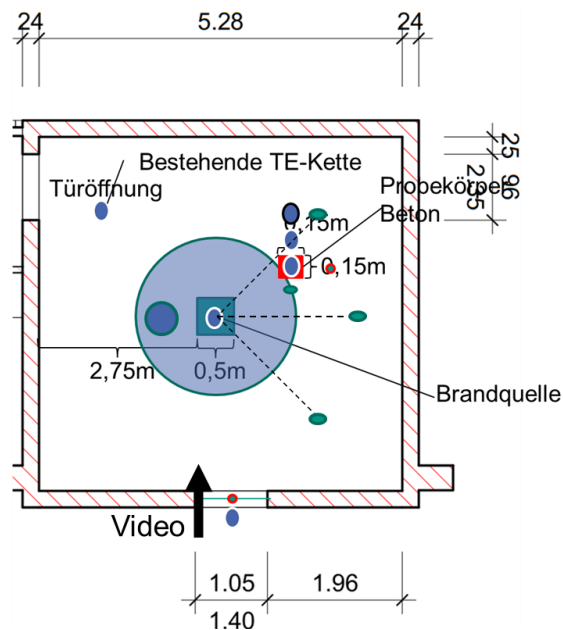


Abbildung 2: Versuchsaufbau Brandraum Grundriss

Der Boden des Brandraumes besteht aus einem Stahlrahmen der frei schwingend auf vier Messaufnehmern gelagert und mit Feuerschutzplatten belegt ist. Zwischen den Seiten des Bodens und den Umfassungswänden ist ein Spalt von wenigen Zentimetern vorhanden.

Die Umfassungswände bestehen aus Mauerwerk mit Hochlochziegeln in einer Stärke von 24 cm. Diese sind innenseitig zweilagig mit Feuerschutzplatten belegt. Dabei sind

die Feuerschutzplatten in der ersten Lage stumpf gestoßen und durch Karosserie-scheiben befestigt.

Wie der Boden besteht die Decke aus einem Stahlrahmen, der mit Feuerschutzplatten ausgestattet ist. Die Decke kann in ihrer Höhe verändert werden in den hier beschriebenen Versuchen wurde die Deckenhöhe auf 2,75 m eingestellt und innerhalb der Versuchsreihen nicht mehr verändert.

2.1.1 Brenner

Als Brandquelle wurden zwei gasbetriebener Kiesbettbrenner mit Seitenlängen D von 0,5 m bzw. 0,3 m verwendet. Diese Brandquelle wurde aufgrund der vergleichsweisen geringen Einflussgrößen und der einfachen Handhabung gewählt mit dem Ziel möglichst reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Als Brennstoff kam ein übliches Propan-Butan-Gemisch mit einer Zusammensetzung gemäß DIN 51 622 95 Prozent Propan und 5 Prozent Butan mit einem nominellen unteren Heizwert H_u von 46 440 kJ/kg zur Anwendung. Die Brenner wurden im Diffusionsbetrieb eingesetzt. In der Zuleitung wurde lediglich das Brenngas eingebracht. Im Kiesbett wird die Strömung verlangsamt, vermischt und verteilt.

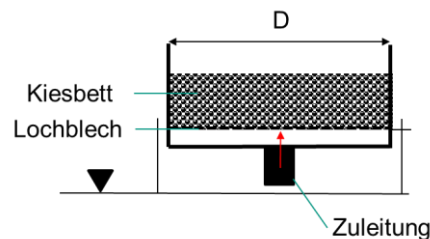


Abbildung 3: Skizze Kiesbettbrenner

Die Korngrößenverteilung des Kiesbetts wurde in Anlehnung an DIN EN 12620:2008-07 bestimmt [1]. Demnach besteht das Kiesbett aus einer Körnung mit Korngrößen zwischen 11,2 mm und 2,8 mm.

2.1.2 Betonwürfel

An der Decke wurden verschiedene Betonwürfel eingebracht. Diese quadratischen Würfel mit einer Seitenlänge von 15 cm sind mit Thermoelementen Typ K bei der Herstellung der Würfel ausgestattet worden. Neben den Thermoelementen wurden auch Haken für die Befestigung im Brandversuch eingebracht.

Die Positionen der Thermoelemente wurden so gewählt, dass möglichst viel Informationen über das Erwärmungsverhalten der Körper gewonnen werden können. In Anlehnung an die DIN 18230-2 die für eine bemessungsrelevante Temperatur eines Baustoffes bzw. Bauteils die Tiefe von 3,5 cm heranzieht, wurde ein Thermoelement in einer entsprechenden Tiefe platziert. Neben dieser Messstelle sind Messstellen in der Mitte des Betonkörpers angeordnet worden.

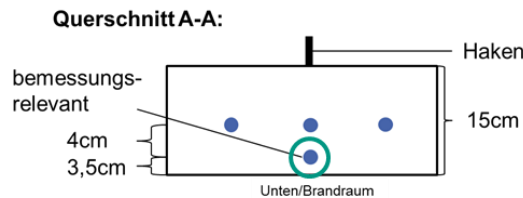


Abbildung 4: Betonwürfel Thermoelementpositionen

Die Versuchskörper wurden an der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe angefertigt. Es wurden 12 Versuchskörper mit identischer Rezeptur angefertigt.

Die Versuchskörper bzw. Referenzkörper sind nach Herstellung in einer Klimakammer konditioniert worden und es wurden an drei Versuchskörpern die Trockenrohddichte in Anlehnung an DIN EN 12390-7:2009-07 bestimmt [2]. Die Würfel hatten bei Erreichen des Ausgleichszustandes (Masseänderung kleiner 0,2 M.-% innerhalb von 24 h) eine mittlere Dichte von $2\,150\text{ kg/m}^3$. Nachdem die Würfel konditioniert wurden, sind die Würfel luftdicht mit Folie eingepackt und bis zum Versuch verwahrt worden.

Die Festbetoneigenschaften wurden nach DIN 12390-3:2009-07 an weiteren drei Würfeln bestimmt [2]. Dabei ergab sich eine mittlere Druckfestigkeit des Betons von ca. $32,7\text{ N/mm}^2$.

In der Decke des Brandraumes wurde ein $15 \times 15\text{ cm}$ großes Loch für die Einbringung des Würfels vorgesehen. Der Würfel wurde vor Versuchsbeginn so an der Decke platziert, dass die Unterseite des Würfels bündig mit der Decke abschließt. Neben dem Würfel wurde ein Wärmeflussaufnehmer (WFA) angebracht.

Unterhalb des Betonwürfels wurde ein Thermoelement Typ K mit der Spitze auf die Würfelunterseite gebogen.

Unterhalb des Würfels wurde eine Bi-Direktionale Sonde auf einem Stativ angebracht dabei war die Sonde rechtwinklig zum Würfel und in Richtung der Mitte des Brandraumes bzw. zum Brand gerichtet.

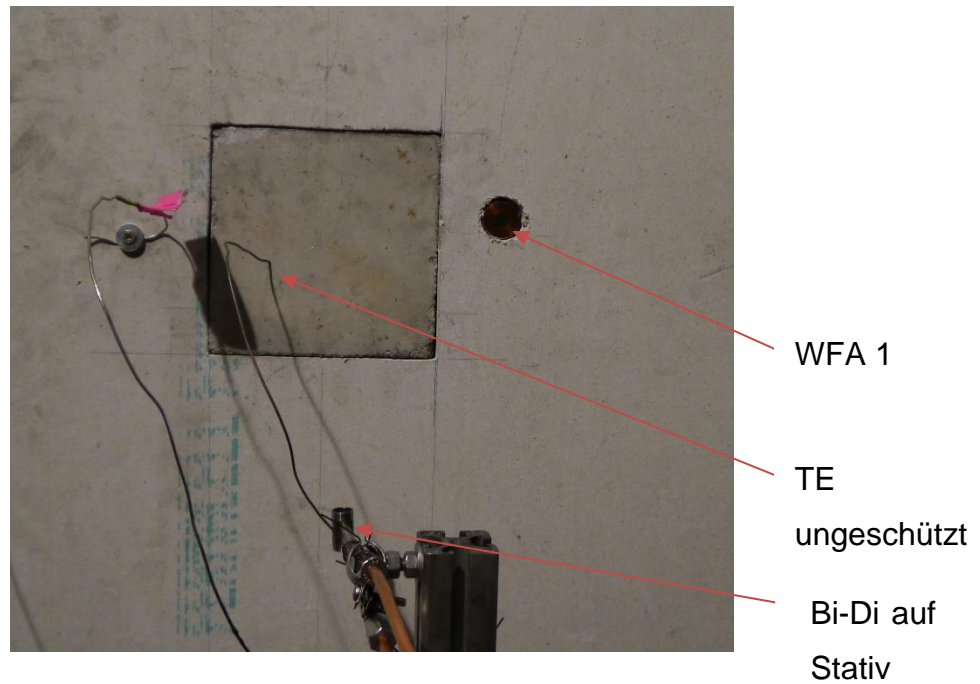


Abbildung 5: Untersicht der Decke mit eingebrachtem Versuchskörper

2.1.3 Messgeräte

Eine Übersicht der Messgeräte im Brandraum ist in Anhang 3 zu finden.

2.1.3.1 Temperaturen

Die Temperaturen in allen Versuchen wurden mit üblichen Mantelthermoelementen vom Typ K mit einem Durchmesser von 1,5 mm durchgeführt. Der Mantel besteht aus hochtemperaturbeständigem Edelstahl, der bis zu einer Temperatur von 1 300 °C eingesetzt werden kann. Die Legierungen bestehen aus Nickel-Chrom und Nickel.

Dieser Thermoelementtyp ist ein gängiger Typ im Bereich der Brandschutzforschung.

2.1.3.2 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Strömung wurde mit Bi-Direktionalen Sonden (Bi-Di) dokumentiert. Bi-Direktionale Sonden sind für Zwecke der Brandforschung gut geeignet, da sie bei kleinen Geschwindigkeiten gute Ergebnisse liefern und wenig anfällig sind bei schrägen Anströmungen [3]. Des Weiteren erlauben die Geräte die Messung in zwei Richtungen, was insbesondere bei der Strömung aus Öffnungen relevant ist, da die Strömung je nach Lage der neutralen Schicht in den Brandraum oder aus dem Brandraum gerichtet sein kann.

Dabei wird die Geschwindigkeit v über den gemessenen Differenzdruck Δp über eine empirische Korrelation bzw. einen empirischen Korrekturfaktor CF in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re bestimmt [3].

$$v = CF^{-1} \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad \text{Gl. 2}$$

$$\begin{aligned} CF = & 1,533 - 1,366 \times 10^{-3} Re + 1,688 \times 10^{-6} Re^2 & \text{Gl. 3} \\ & - 9,706 \times 10^{-10} Re^3 + 2,555 \times 10^{-13} Re^4 \\ & - 2,484 \times 10^{-17} Re^5 \end{aligned}$$

Dabei ergibt sich die Reynolds-Zahl aus dem Verhältnis der Geschwindigkeit v dem Durchmesser der Sonde D_p der Dichte ρ und der kinematischen Viskosität des Fluids μ .

$$Re = vD_p\rho/\mu \quad \text{Gl. 4}$$

Die Geschwindigkeit ergibt sich aus dem 10. Iterationsschritt. Für die Dichte und die kinematische Viskosität wurden die temperaturabhängigen Werte für Luft verwendet [4].

Neben der Bi-direktionalen Sonde wurde je ein Thermoelement angebracht. Die dort gemessenen Temperaturen wurden für die Bestimmung der (thermo-)physikalischen Größen verwendet.

2.1.3.3 Gaskonzentrationen

Ab dem Versuch V08 wurden die Gaskonzentrationen von Sauerstoff O_2 und CO_2 mit einer verfahrbaren Sonde auf bestimmten Höhen gemessen. Dabei wurde über ein Metallrohr Abgas zu einem Gaschromatographen geleitet. Auf jeder Höhenlage wurde mindesten 120 sec gemessen, um plausible Ergebnisse zu erzielen. Die Totzeit betrug circa 30 sec. Bei den Versuchen stellte sich augenscheinlich ein stationärer Zustand ein. Daher ist davon auszugehen, dass mit der gewählten Methodik die stationären Verhältnisse gut abgebildet werden.

2.1.4 Wärmestrahlung

Im Brandraum wurden mehrere Wärmeflussaufnehmer (WFA) und ein Radiometer verwendet. Die Wärmeflussaufnehmer nehmen dabei den Gesamtwärmestrom auf, der sich durch (Wärme-)Strahlung und Konvektion ergibt. Die Konvektion beschreibt dabei die stoffgebundene Abgabe bzw. Aufnahme von Wärme und hängt wesentlich von den Strömungsbedingungen ab.

Drei Wärmeflussaufnehmer (WFA 2-4) vom Typ Gordan-Gauge wurden in einer Höhe von ca. 1 m über dem Boden und in einem Abstand von 1,5 m von der Außenkante des Brenners installiert. Der Wärmeflussaufnehmer (WFA 1) an der Decke vom Typ Schmidt-Boelter wurde in einem Abstand von ca. 5 cm neben dem Würfel platziert.

Die Wärmeflussaufnehmer vom Typ Schmidt-Boelter sind luftgekühlt und mit einem nominellen Adsorptionsgrad von 0,94 ausgestattet.

Wärmeflussaufnehmer vom Typ Gordan-Gauge sind wassergekühlte und haben einen nominellen Absorptionsgrad von 0,92. Die Temperatur des Wassers wurde durch ein Thermoelement vom Typ K dokumentiert. Der Durchfluss des Wassers wurde mit drei Rotametern überwacht.

Gegen Ende der Versuchsreihe wurde neben den Gesamtwärmeflussaufnehmern auch ein Radiometer eingesetzt. Dieses Radiometer bestimmt aufgrund seiner Bauart bzw. seines Messprinzips den Wärmestrom aufgrund von Wärmestrahlung. Hierbei handelt es sich um ein Messinstrument, an dessen Eintrittsöffnung sich ein Drehrad befindet, welches die Öffnung in einer bestimmten Frequenz schließt oder freigibt. Die Öffnung wird mit Stickstoff gespült, um einen konvektiven Wärmeaustausch zu verhindern. Der Messkörper wird über konstant durchlaufendes Wasser auf einer konstanten Temperatur gehalten. Das Wasser wird mittels eines Chillers auf einer konstanten Temperatur gehalten. Vor der Messung wurde das Radiometer in einem Schwarzkörperofen kalibriert.

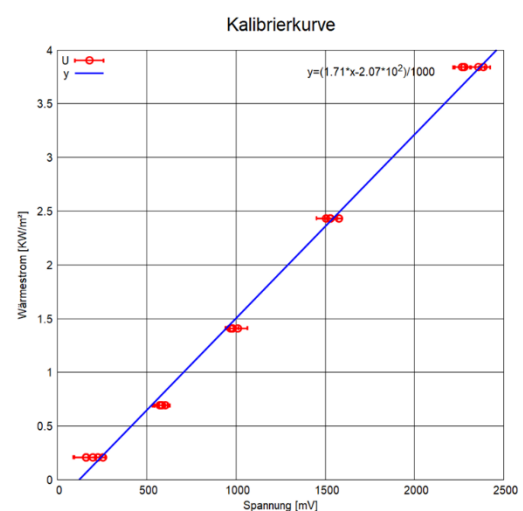
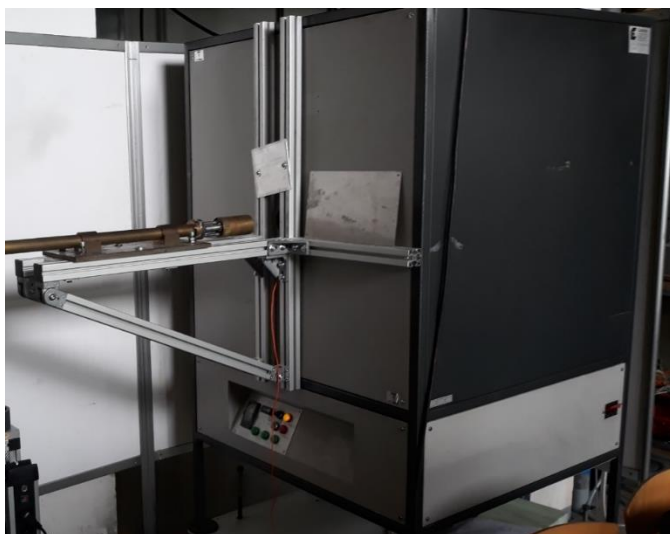


Abbildung 6 links: Schwarzkörperofen; rechts: Kalibrierkurve

Eine Prinzipdarstellung der Messungen ist in Abbildung 8 dargestellt.

2.1.5 Flammenlänge

Die Flammenlänge ist eine wesentliche Charakteristik eines Brandes. Sie beeinflusst beispielsweise das Strahlungsverhalten der Flamme oder die Temperaturverteilung oberhalb der Flamme.

Die Versuche wurden mit handelsüblichen Sicherheitskameras mit einer Auflösung 1280x720 bei einer Frequenz von 25 Bilder/sec aufgenommen.

Für die Auswertung der Flammenlängen wurde ein Matlab Algorithmus nach Dinkov [5] entwickelt. Dieser Algorithmus wandelt die Farben jedes Pixels eines Videobildes bestehend aus den Komplementärfarben Rot, Gelb und Blau zunächst in ein Grauskalenbild um. Um die Helligkeit der einzelnen Pixel ebenfalls zu berücksichtigen, wurden die Grauskalen mit folgender Gewichtung bestimmt.

$$G = 0.2989 * R + 0.5870 * G + 0.1140 * B \quad \text{Gl. 5}$$

Am Rande der Flamme befinden sich die größten Gradienten. Die erzeugten Bilder sind zweidimensional. Daher werden die Gradienten in x- und y-Richtung bestimmt. Die verwendeten Sobelgradienten berücksichtigen dabei die Werte der umliegenden Pixel ebenso.

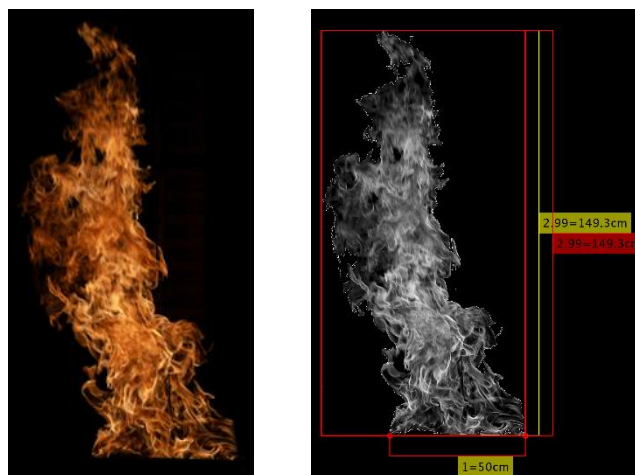


Abbildung 7 Gegenüberstellung links: Realbild; Rechts: Grauskalenbild mit Auswertung der Flammenlänge [6]

Der Algorithmus findet zusammenhängende Flächen, die durch die Maximalgradienten begrenzt werden. Dadurch können auch abhebende Flammenstrukturen erkannt werden. Es wird im Folgenden zwischen der Flammenlänge mit und ohne Ablösung (detachment) unterschieden. Eine weitergehende Beschreibung des Algorithmus ist in [5] zu finden.

2.2 Freie Flamme

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die Versuche außerhalb des Brandraumes in der Brandversuchshalle durchgeführt. Die Bandbreite der Versuche liegt zwischen 0,49 und 3,67 für Q_D^* . Eine Übersicht der durchgeführten Versuche ist in Anhang 2 zusammengestellt.

Der Aufbau der Messungen ist mit den Messungen im Brandraum vergleichbar. In Abbildung 8 ist die Prinzipskizze und die Lage der Thermoelemente im Zentrum des Brenners dargestellt.

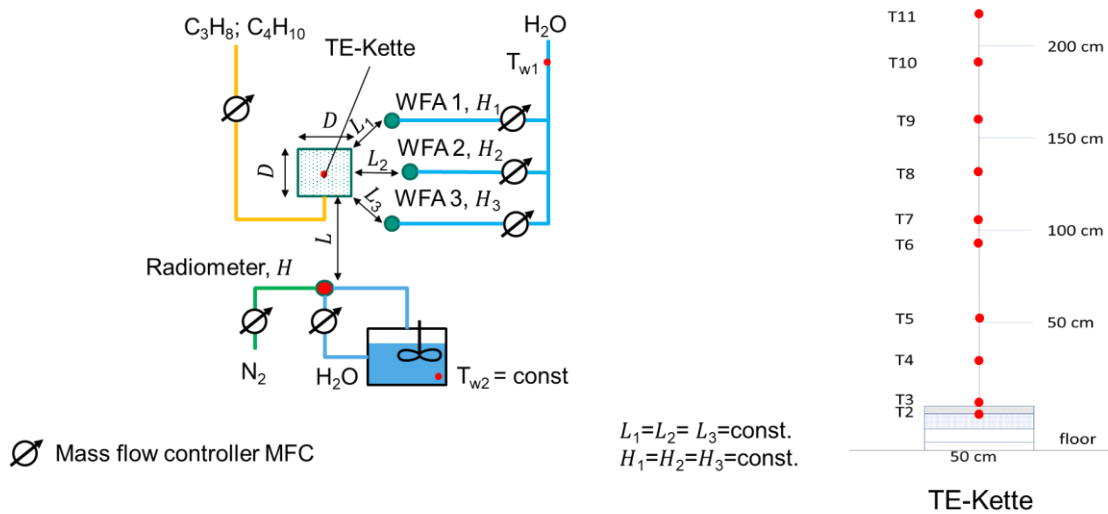


Abbildung 8: Versuchsaufbau *freie Flamme*; links: Prinzipskizze; rechts; Thermoelementkette und Höhenlage der Messtellen

Es wurden insgesamt 12 Versuche durchgeführt. Eine Übersicht ist in Anhang 2 zu finden. In Abbildung 9 sind Momentaufnahmen der freien Flamme bei den verwendeten Brennern mit unterschiedlicher Wärmefreisetzungsrate dargestellt.



Abbildung 9 Momentaufnahme *freie Flamme* mit unterschiedlichen Brennern und Wärmefreisetzungsraten

3 Flammenlänge

Die erzeugten Diffusionsflammen flackern. Dadurch schwankt auch die Höhe der Flamme. In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Ergebnisse der Auswertung der Videoaufnahmen als Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für mehrere Versuche dargestellt.

Die gezeigte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung folgt einer Normalverteilung.

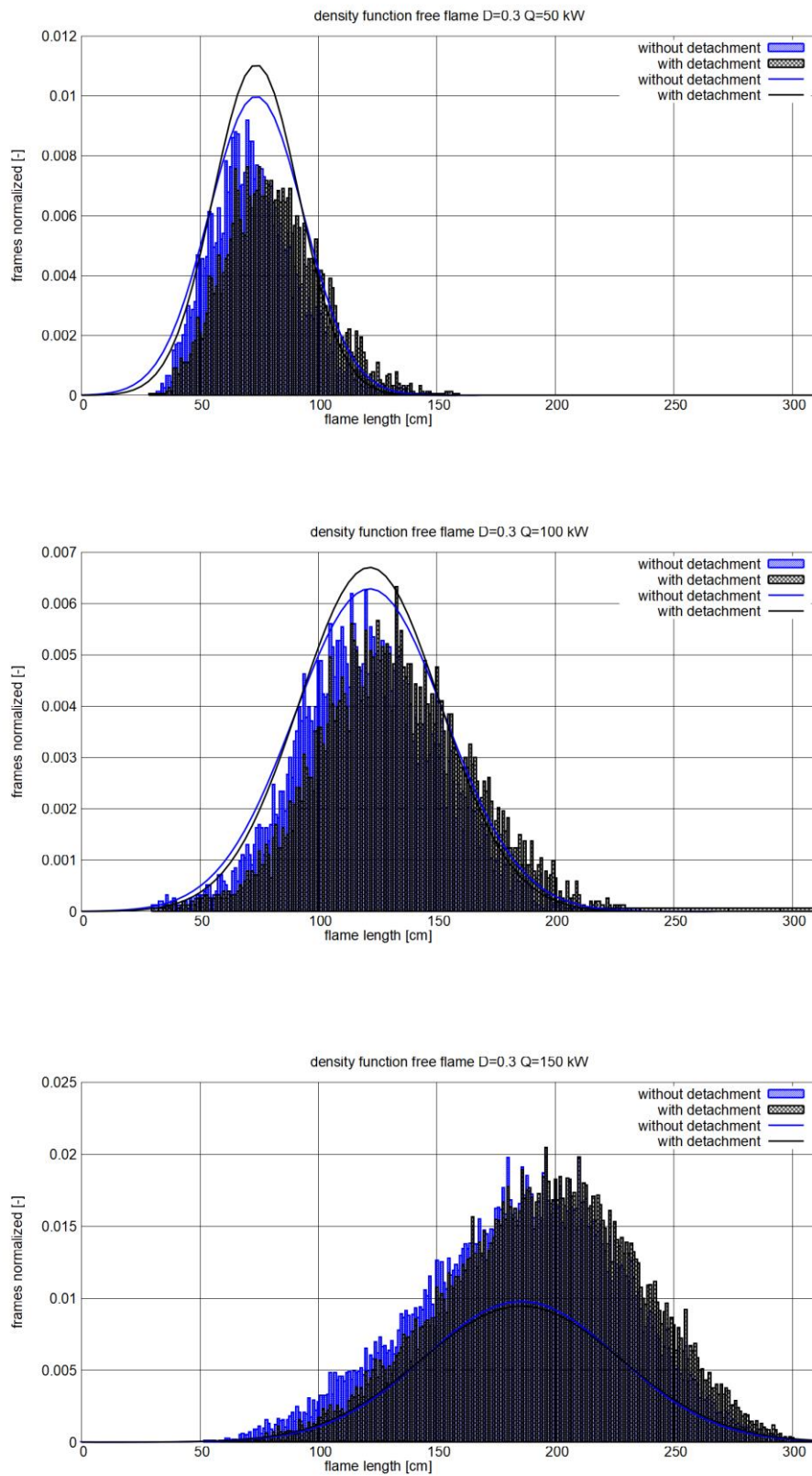


Abbildung 10 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für *freie Flamme* für $D=0,3$ m und $Q=50, 100$ und 150 kW

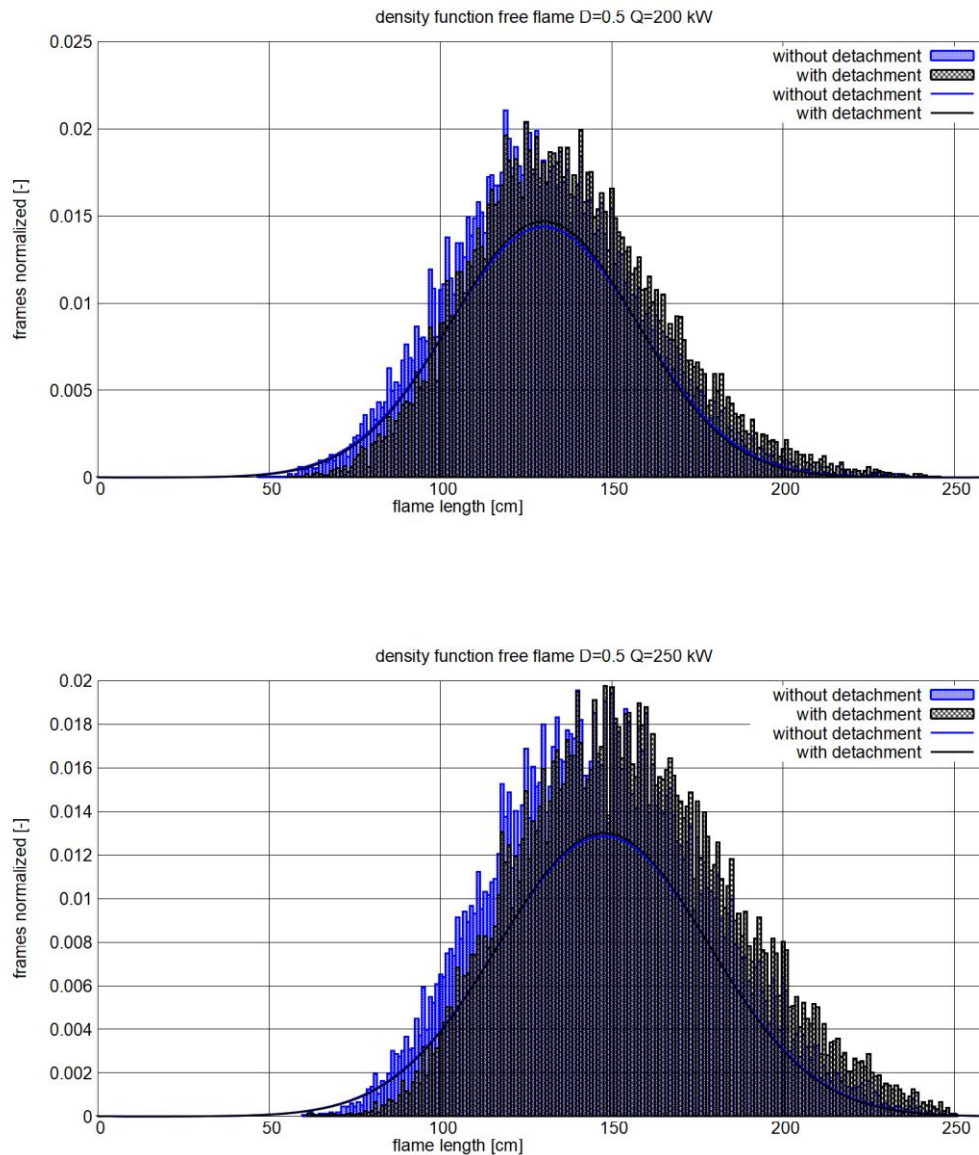


Abbildung 11 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für *freie Flamme* für $D=0,5$ m und $Q=200$ und 250 kW

Die ausgewerteten Flammenlängen für die Versuche $D=0,3$ m und $Q=150$ und 200 kW ergeben deutlich zu hohe Werte für die Flammenlänge. Es wurden Flammenlängen ausgewertet, die größer als der gewählte Bildausschnitt waren. Die Vermutung liegt daher nahe, dass für diese Versuche der Bildausschnitt zu klein gewählt wurde.

Für die Flammenlänge gibt es mehrere empirische Gleichungen. Die meisten sind an Experimenten mit freien Flammen mit runden Brandquellen und flüssigen Brennstoffen bestimmt worden. Eine übliche empirische Beziehung die eine gute Übereinstimmung

über eine große Bandbreite zur Verfügung stellt [7] ist die Gleichung nach Heskestad [7].

$$\frac{L}{D} = -1.02 + 3.7Q_D^{*2/5} \quad \text{Gl. 6}$$

In Abbildung 12 werden die Ergebnisse der Auswertung der Korrelation nach Heskestad gegenübergestellt.

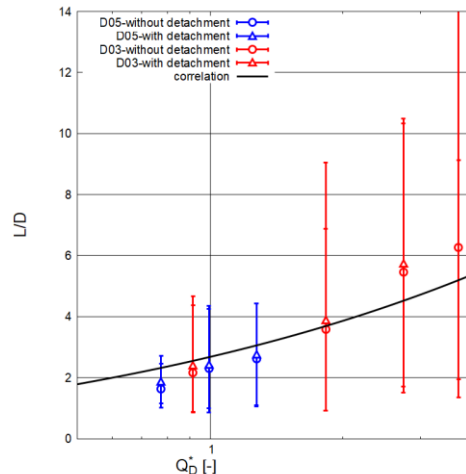


Abbildung 12 Gegenüberstellung Auswertung Flammenlänge mit (oben) und ohne (unten) Ablösung (detachment) für die *freie Flamme* mit Mittelwert und Maximalwerten und der Korrelation nach Heskestad für $D=0,3$ m und $0,5$ m und $\dot{Q}=50, 100, 150, 200$ und 250 kW

Die Mittelwerte mit Ablösung \overline{L}_o sind sehr nahe an der Korrelation und bilden auch den Trend gut ab. Das lässt zum einen darauf schließen, dass die Ergebnisse der Auswertung plausibel sind. Zum anderen, dass die Korrelation für den verwendeten Brenner und Brennstoff angewendet werden kann. Die größten Abweichungen sind bei den Versuchen $D=0,3$ m und $Q=150$ und 200 kW festzustellen. Diese sind mutmaßlich systematisch bedingt (s. o.).

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Auswertung mit dem beschriebenen Algorithmus zusammengestellt und den entsprechenden Werten die sich aus der Korrelation nach Heskestad (Gl. 6) ergeben.

Tabelle 1 Zusammenstellung der Ergebnisse für die ermittelten mittleren Flammenlängen bei der *freien Flamme* mit \bar{L}_o (oben) und ohne \bar{L}_u (unten) Ablösung sowie die Flammenlänge nach Korrelation L alle Werte in [cm] sowie die Brennerseitenlänge D in [m] und die Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} [kW]

D	\dot{Q}	\bar{L}_o	\bar{L}_u	L		D	\dot{Q}	\bar{L}_o	\bar{L}_u	L
0,3	50	81	73	75		0,5	150	104	91	109
	100	131	121	111			200	136	130	129
	150	195	186	136			250	155	147	147
	200	220	212	156						

4 Wärmestrahlung

Neben dem Transport der freigesetzten Energie durch Konvektion wird auch über Wärmestrahlung Energie übertragen. Wie bereits beschrieben sind hierzu in den Versuchen unterschiedliche Messinstrumente verwendet worden.

In Abbildung 13 sind für die freie Flamme bei unterschiedlichen Wärmefreisetzungsraten die gemessenen Gesamtwärmeströme dargestellt. In der Abbildung werden lediglich die drei im Halbkreis angeordneten Wärmeflussaufnehmer (WFA) dargestellt.

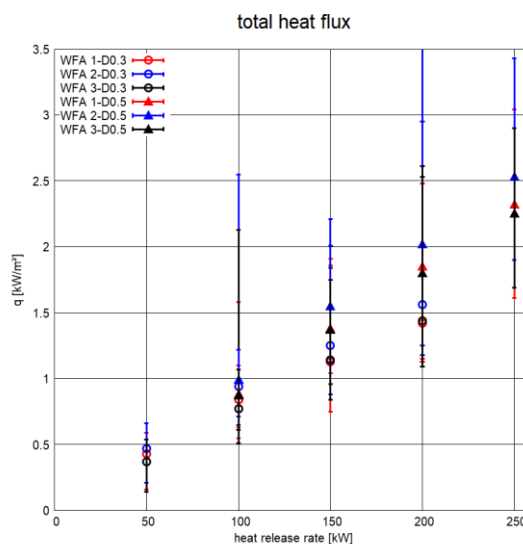


Abbildung 13 Gegenüberstellung der gemessenen Gesamtwärmeströme und Wärmefreisetzungsrate für die *freie Flamme* mit konstanter Position bezogen auf den Kiesbettbrenner

Es ist zu erkennen, dass sich die gemessenen Wärmeströme bei gleicher Wärmefreisetzungsrate in einem ähnlichen Bereich befinden. Insbesondere die Wärmeströme der WFA 1 und 3, die in einem Winkel von ca. 45 Grad bezogen auf die Mittelachse angeordnet waren zeigen eine gute Übereinstimmung. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass die untersuchten Flammen (im Freien) nicht stark in ihrer Lage schwanken. Eine seitliche Beeinflussung beispielsweise durch einen Luftzug kann nicht unterstellt werden. Der WFA 2 in der Mittelachse zeigt eine deutlich größere gemessene Wärmestrahlung. Dies lässt sich auf den geringeren Abstand bezogen auf den Mittelpunkt des Brenners erklären. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Anstieg der gemessenen Wärmeströme mit steigender Wärmefreisetzungsrate bei den Brennern mit größerem Durchmesser ($D=0,5\text{m}$) steiler ist, verglichen mit den Wärmeströmen des kleineren Brenners. Hier spielt die Flammengeometrie eine wesentliche Rolle. Der Austausch von Wärmestrahlung zwischen zwei (strahlenden) Oberflächen basiert auf deren Größe und geometrischen Beziehung zueinander. Einen Eindruck der unterschiedlichen Flammenstrukturen ist in Abbildung 9 zu gewinnen.

Neben den Gesamtwärmeflussaufnehmern wurde auch ein Radiometer zur Messung der Wärmestrahlung verwendet (vgl. oben). Das Radiometer wurde im Gegensatz zu den WFA hinsichtlich ihrer Höhe und dem Abstand zum Brenner in den letzten Versuchen geändert. In Abbildung 14 ist eine Gegenüberstellung der Werte bezogen auf den Abstand dargestellt.

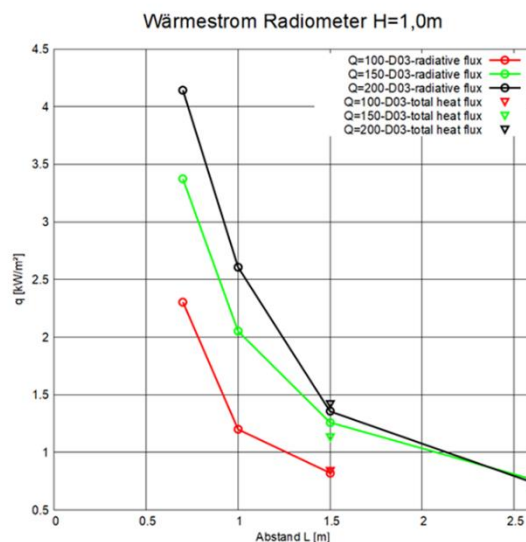


Abbildung 14 Gegenüberstellung gemessene Wärmeströme Radiometer (radiative flux) und Gesamtwärmestrom (total heat flux) für die *freie Flamme* für $D=0,3\text{ m}$ und $Q=100, 150$ und 200 kW

Bei einem Abstand von 1,5 m weichen die mit dem Radiometer gemessenen Werte von den gemessenen Gesamtwärmeströmen kaum ab. Dies ist erstens ein Indiz dafür, dass die gemessenen Gesamtwärmeströme durch Wärmestrahlung dominiert werden. Konvektive Wärmeströme spielen in diesem Fall keine Rolle. Des Weiteren lässt die Übereinstimmung zweier unabhängiger Messverfahren den Rückschluss zu, dass die mit den beiden Messverfahren gemessenen Wärmeströme plausibel sind.

Der Gesamtwärmestrom der WFA zur Aufnahme der Flammenstrahlung im Brandraum WA2-4 ist in Abbildung 15 dargestellt.

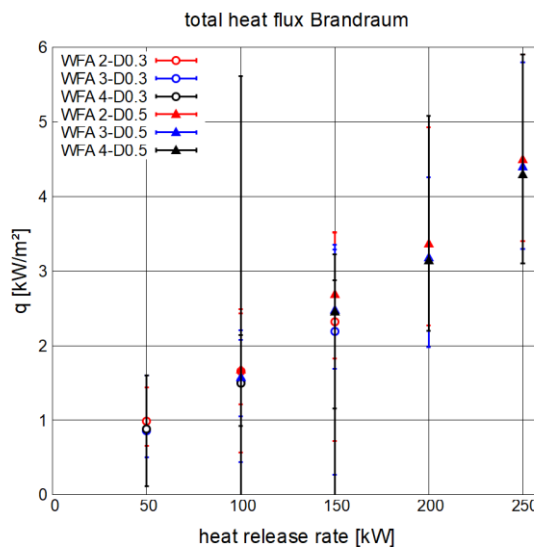


Abbildung 15 Gesamtwärmeströme für Wärmeflussaufnehmer WFA 2-4 für $Q=50, 100, 150, 200$ und 250 kW bei $D=0,3$ und $0,5$ m im *Brandraum*

Vergleicht man die Werte der gemessenen Wärmeströme für die freie Flamme (Abbildung 13) und im Brandraum (Abbildung 15) fällt auf, dass die Wärmeströme im Brandraum um ca. den Faktor 2 größer sind.

Da die WFA im Brandraum Gesamtwärmeströme messen sind die gemessenen Werte sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlung beeinflusst. Eine Quantifizierung und Gegenüberstellung der Strahlung erfolgt mit Hilfe des eingesetzten Radiometers. In Abbildung 16 werden die gemessenen Wärmeströme im Brandraum und im freien verglichen. Dabei ist der Abstand (2,6 m) und Höhe (1,3 m) bezogen auf den Fußboden zwischen Brenner und Radiometer in beiden Fällen gleich.

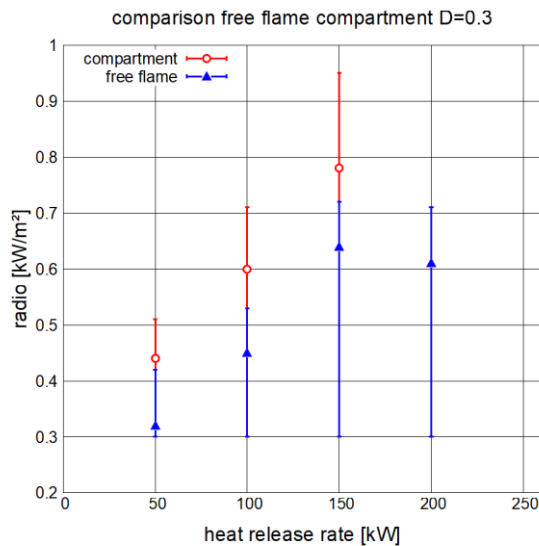


Abbildung 16 Vergleich gemessene Wärmeströme bei *freier Flamme* und im *Brandraum* bei einem Abstand von 2,6 m und einer Höhe von 1,3 m bezogen auf den Boden für $D=0,3$ m und $Q=50,100,150,200$

Die Differenz zwischen den beiden Messreihen beträgt ca. Faktor 1,2. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die gegenüber den Versuchen der freien Flamme zusätzlichen Strahlung der Heißgasschicht und der umgebenden Bauteile. Dies ist auch bei den WFA zu beobachten jedoch mit einer größeren Differenz (Faktor 2). Dies kann neben dem zusätzlichen konvektiven Wärmeübergang auch daraus resultieren, dass die WFA Strahlung von allen umgebenden Bauteilen erhalten. Das Radiometer hingegen, welches in der Fensteröffnung platziert wurde lediglich Strahlung der Bauteile erhielt, die im Sichtfeld des Radiometers liegen. Der Anteil der Wärmestrahlung bestehend aus Gasstrahlung und Rückstrahlung der Bauteile mit einem Faktor von ca. 1,5 erscheint realistisch. Zur Validierung können weitere numerische Untersuchungen dienen.

In Abbildung 17 werden die gemessenen Gesamtwärmeströme neben dem Referenzprobekörper dargestellt.

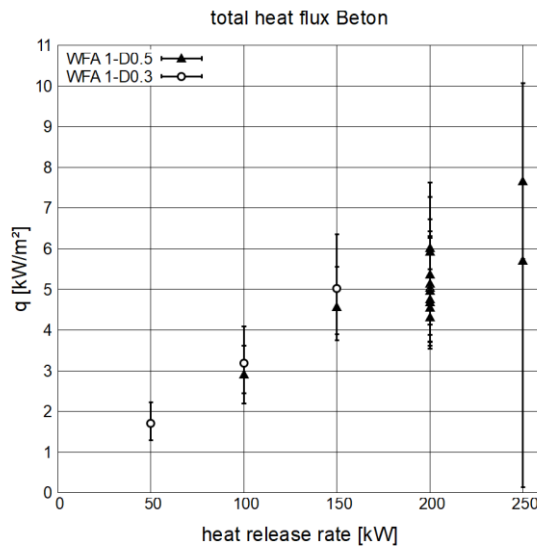


Abbildung 17 Gemessene Gesamtwärmeströme neben Referenzprobekörper WFA 1 für $Q=50,100,150,200$ und 250 kW bei $D=0,3$ und $0,5$ m im *Brandraum*

5 Plumetemperatur

Die Temperatur in der Mittelachse des Brandes ist für die Beurteilung des Brandes eine wesentliche Größe. Der Plume ist dabei charakterisiert durch die Flamme und die stromabwärts über die Höhe den Temperaturen der heißen Rauchgase [7]. Über die Seitenflächen des Plumes wird Umgebungsluft in den Plume eingebracht und mit den Rauchgasen vermischt. Durch die Einmischung ändert sich über die Höhe die Rauchgastemperatur. Dieser Effekt kann über empirische Gleichungen abgeschätzt werden. Ein Verfahren wurde durch Heskestad [7] beschrieben.

Für dieses Verfahren ist es zunächst erforderlich abzuschätzen, wie groß der Anteil der umgesetzten Energie ist, der durch Konvektion also durch die heißen Rauchgase abtransportiert wird. Hierfür wird folgende Gleichung verwendet [8].

$$\dot{Q}_c = (1 - \chi_r) \cdot \dot{Q} \quad \text{Gl. 7}$$

Dabei können für χ_r Werte aus der Literatur verwendet werden. Beyler [8] gibt eine Übersicht über experimentell bestimmte Werte an. Für Propan werden Werte zwischen 0,3 und 0,32 genannt. Die Werte für Butan liegen in einem ähnlichen Bereich zwischen 0,3 und 0,37. Für die weiteren Betrachtungen wurde ein Wert von 0,3 zugrunde gelegt.

Die Temperaturerhöhung in der Mittelachse des Plumes ergibt sich aus der folgenden Gleichung.

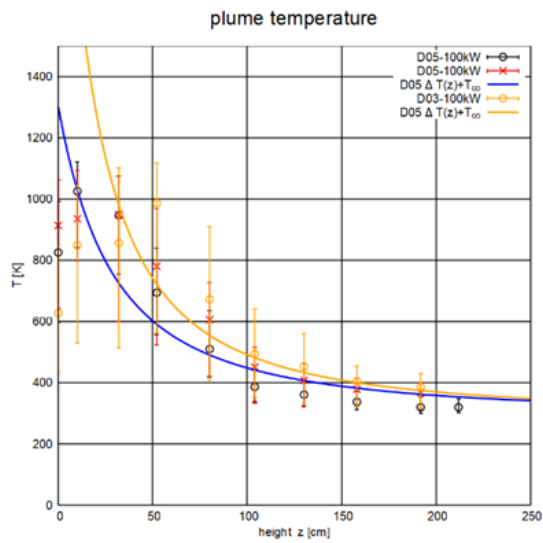
$$\Delta T = 9.1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{2/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \quad \text{Gl. 8}$$

Dabei wird das Konzept des virtuellen Ursprungs aufgegriffen, welcher in Abhängigkeit der Wärmefreisetzungsrate und des Branddurchmessers und gemäß nachfolgender Gleichung bestimmt wird.

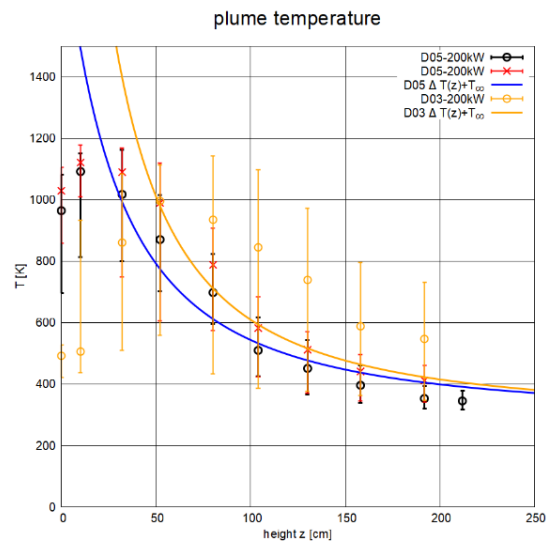
$$\frac{z_0}{D} = -1.02 + 0.083 \frac{\dot{Q}_c^{2/5}}{D} \quad \text{Gl. 9}$$

Die Temperatur ergibt sich somit durch Addition der Temperaturerhöhung nach Gleichung 8 mit der Umgebungstemperatur.

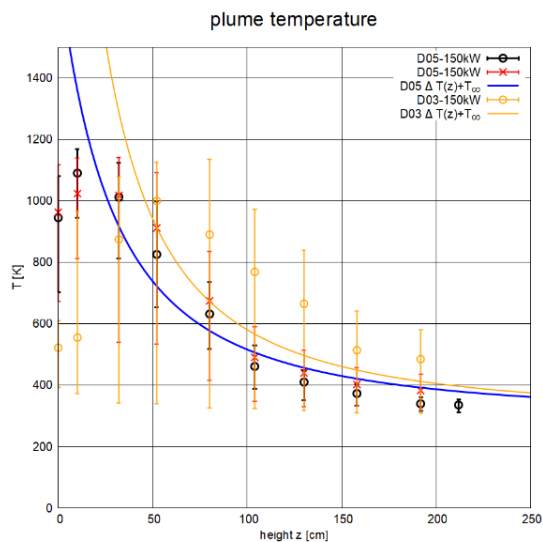
Im Falle der freien Flamme waren die Umgebungstemperaturen während der Versuche annähernd konstant. In Abbildung 18 werden die gemessenen Temperaturen der Korrelation gegenübergestellt.



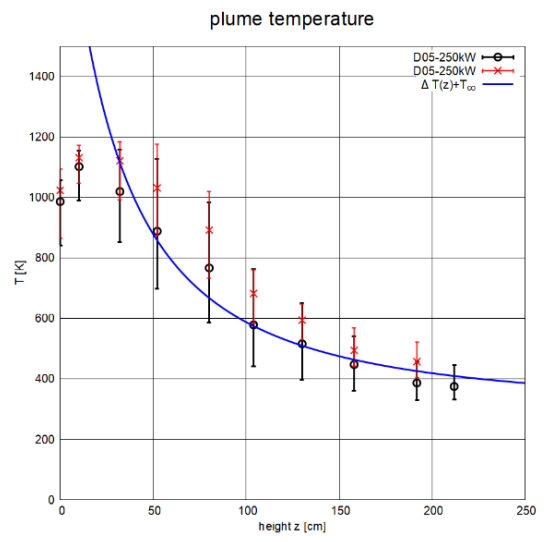
$\dot{Q}=100 \text{ kW}$



$\dot{Q}=200 \text{ kW}$



$\dot{Q}=150 \text{ kW}$



$\dot{Q}=250 \text{ kW}$

Abbildung 18 Gegenüberstellung gemessene Temperatur in der Plumemittelachse für die *freie Flamme* in Abhängigkeit der Raumhöhe z für $\dot{Q}=100, 150, 200$ und 250 kW

In den meisten Fällen folgen die gemessenen Mittelwerte dem Trend der Korrelation gut. Dabei ist zu beobachten, dass mit zunehmender Höhe die Abweichungen kleiner werden. Innerhalb der Flamme hat die Korrelation keine Gültigkeit [7] bzw. liefert hier deutlich zu kleine Werte. Dies ist auch der Grund warum für die Versuche mit $D=0,3$ und $\dot{Q}=150$ bzw. 200 kW und für $D=0,5$ und $\dot{Q}=250 \text{ kW}$ zum Teil große Abweichungen bestehen. Die Momentaufnahme Abbildung 9 lässt erahnen, dass es sich hier um sehr

langgezogene Flammenbilder handelt und daher die Gültigkeit der Korrelation für die betrachteten Höhen in Frage zu stellen sind.

Die weitgehende Übereinstimmung der Werte mit der Korrelation ist auch ein Hinweis auf die Plausibilität des verwendeten Beiwertes χ_r .

Im Brandraum wurde für die Bestimmung der Umgebungstemperatur die mittlere Schichttemperatur der unteren Schicht (vgl. Abschnitt 6) herangezogen.

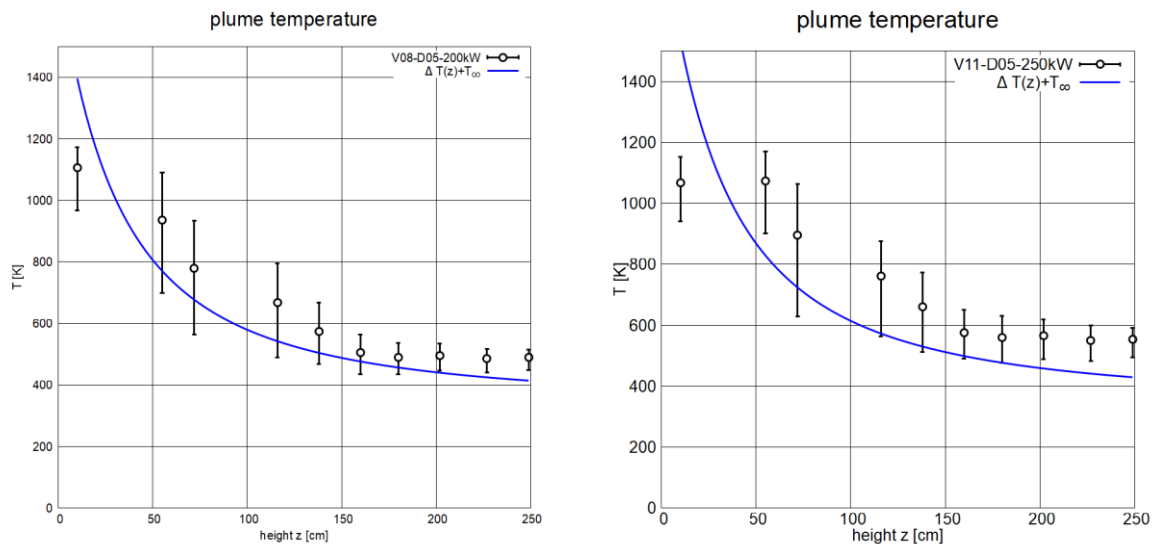


Abbildung 19 gemessene Temperatur Plumemittelachse im *Brandraum* für $D=0,5\text{m}$ und $\dot{Q}=200$ bzw. 250 kW

In Abbildung 19 sind beispielhaft gemessene Temperaturen im Brandraum den Ergebnissen der Korrelation gegenübergestellt. Die Korrelation unterschätzt in beiden Fällen die gemessenen Temperaturen. Die mittlere Flammenhöhe \bar{L}_o beträgt für die entsprechenden Wärmefreisetzungsraten 135 cm (V08) und 150 cm (V11) (vgl. Tabelle 1). In den Bereichen, die von der Korrelation unterschätzt werden, sind somit im Flammenbereich und damit ursächlich für die Abweichung.

Die Rauchsichthöhe beträgt bei dem Versuch V08 ca. $1,55$ m (vgl. Abschnitt 6) und bei Versuch 11 in einer vergleichbaren Höhe. Innerhalb der Rauchsicht folgen die Temperaturen der Korrelation nicht mehr, sie bleiben annähernd konstant und mit zunehmender Höhe wird die Abweichung zur Korrelation größer. Das kann damit erklärt werden, dass das in den Plume einströmende Rauchgas eine höhere Temperatur hat verglichen mit der raucharmen Schicht.

6 Rauchschichttemperatur und -höhe

Die Rauchschichthöhe und die Rauchschichttemperaturen sind weitere zentrale Kenngrößen für die Beurteilung von Bränden.

In den Versuchen hat sich eine Schichtung eingestellt. Dies lässt sich zum einen an den Ablagerungen der Rußpartikel nach Versuchsende erkennen aber auch an den Temperaturen die sich in der Ecke (Richtung Tür) zeigten. In Abbildung 20 ist eine Momentaufnahme nach Versuchsende und die mittleren Temperaturen dargestellt.

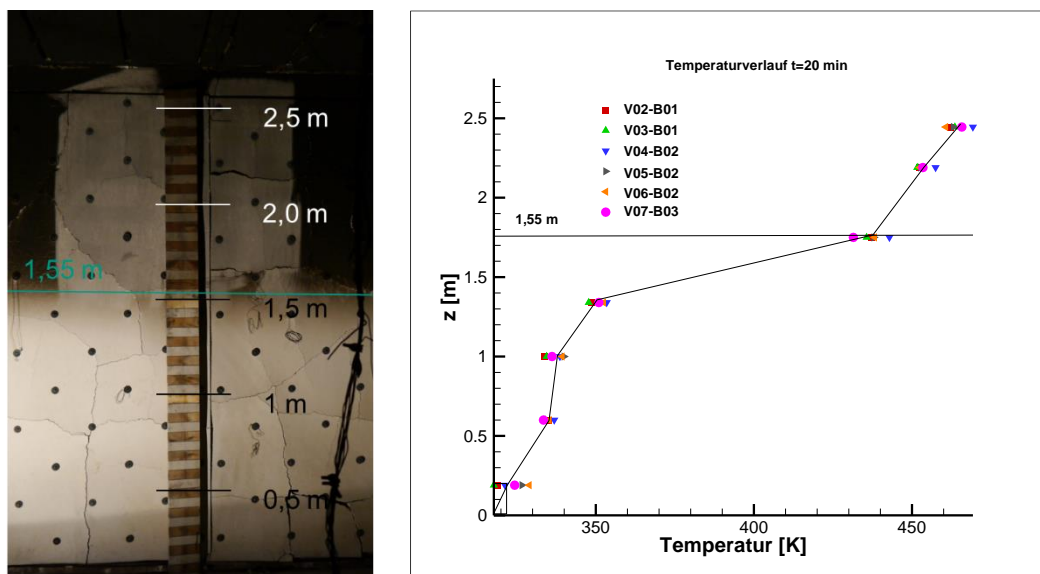


Abbildung 20 links: Momentaufnahme nach Versuchsende; rechts: Temperaturen TE-Ecke für $D=0,5$ m und $\dot{Q}=200$ im *Brandraum*

Die mittleren Temperaturen über mehrere Versuche zeigen die gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse.

Über die eingesetzte verfahrbare Sonde wurden auch Rückschlüsse auf die Schichtung der Rauchgase gewonnen. Abbildung 21 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Gaskonzentrationen für Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂) und Sauerstoff (O₂). In diesem Versuch wurde die Höhe der Sonde konstant unterhalb der Decke gehalten.

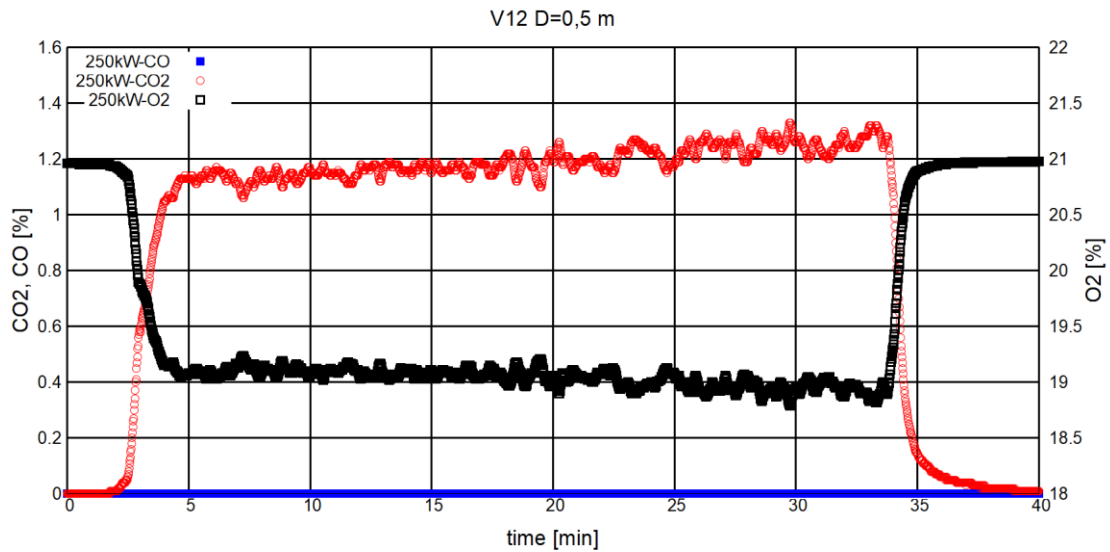


Abbildung 21 zeitlicher Verlauf der Gaskonzentrationen für CO, CO₂ und O₂ in Versuch V12 für D=0,5 und $\dot{Q}=250$ kW im *Brandraum*

Die CO₂-Konzentration steigt zu Versuchsbeginn steil an. Gleichzeitig sinkt erwartbar die O₂-Konzentration. Mit zunehmender Versuchsdauer steigt auch die CO₂-Konzentration leicht an. Die gemessene CO-Konzentration war bei allen Versuchen unterhalb der messtechnischen Nachweisgrenze und werden im Weiteren nicht berücksichtigt. Die geringen CO Konzentrationen sind ein Hinweis auf die vollständige Umsetzung des Brenngases und die hinreichende Ventilation des Brandes (brandlastgesteuert).

In Abbildung 22 ist ein Verlauf der Gaskonzentration über die Raumhöhe dargestellt.

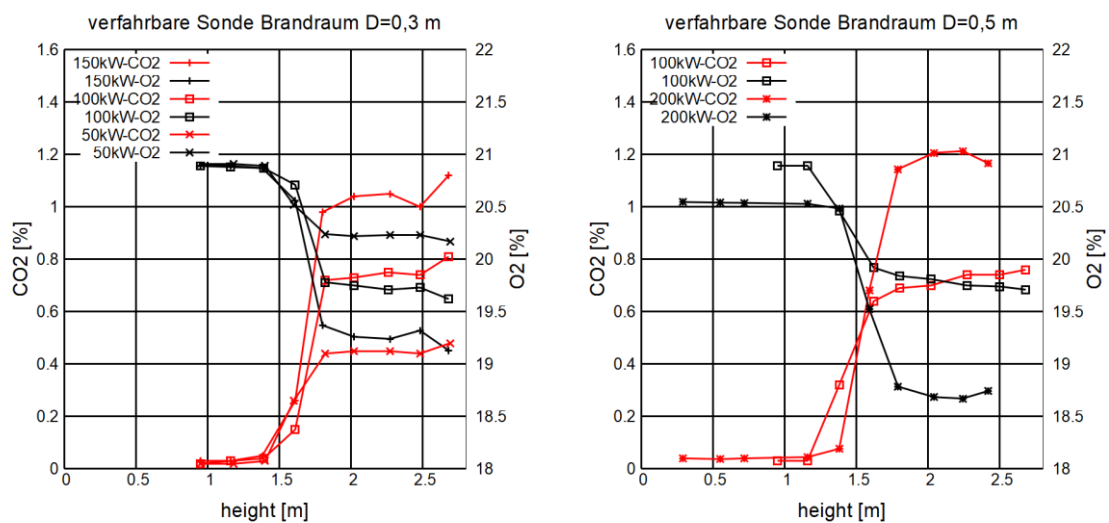


Abbildung 22 zeitlich gemittelte Gaskonzentration für CO₂ und O₂ in Abhängigkeit der Höhe z für D=0,3 m und D=0,5 und $\dot{Q}=50, 100, 150, 200$ kW im *Brandraum*

Die gemessenen Konzentrationen sind innerhalb der Schichten, raucharme Schicht und Rauchgasschicht als homogen zu betrachten. Es ist ein Übergangsbereich zwischen ca. 1,4 m und 1,8 m erkennbar. In diesem Bereich ca. 0,4 m großen Bereich befindet sich die Schichtgrenze. Im Versuch war zu beobachten, dass diese Grenze zeitlich und räumlich schwankt. Diese Schwankungen sind mutmaßlich auf die Schwankungen und das Flackern der Flamme zurückzuführen. Mit zunehmender Wärmefreisetzungsrate steigt auch die CO₂-Konzentration.

Aus den gezeigten Verläufen der Temperaturen, der sichtbaren Rauchablagerungen an den Brandrauminnenwänden und den Verläufen der Gaskonzentration ergibt sich für die Versuche mit $D=0,5$ m und $\dot{Q}=200$ eine Rauchschichtgrenze bei ca. 1,55 m.

Die Rauchschichttemperatur wurde an der Messkette in der Ecke (Richtung Tür) ermittelt. In Abbildung 23 werden die gemittelten Temperaturen (zwischen Versuchsminute 10 und 30) für mehrere Versuche gezeigt.

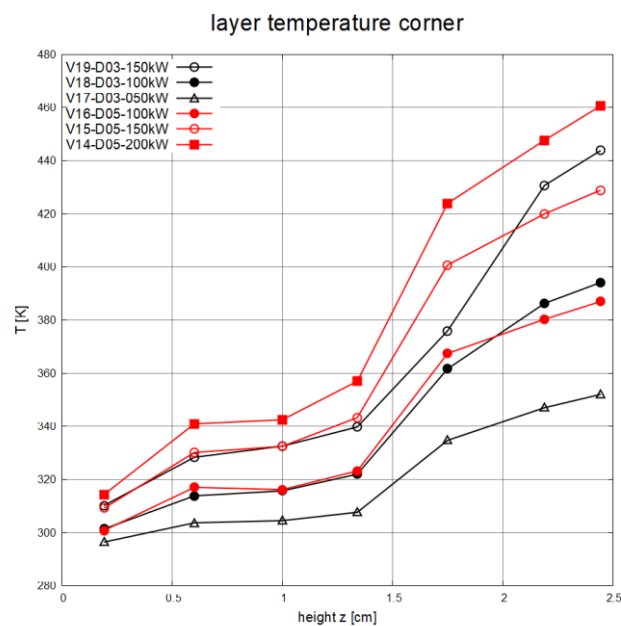


Abbildung 23 zeitlich gemittelte Temperaturen in der Ecke über die Höhe des Raumes z im *Brandraum*

Die Temperaturverläufe deuten auf eine ähnliche Rauchschichthöhe über alle Versuche. Das ist vor allem auf die Höhe des Sturzes des Fensters zurückzuführen. Die Rauchschichttemperaturen aber auch die Temperaturen der raucharmen Schicht steigen mit zunehmender Wärmefreisetzungsrate.

7 Strömungsgeschwindigkeiten

In Abbildung 24 werden die gemessenen mittleren Differenzdrücke unterhalb des Probekörpers dargestellt.

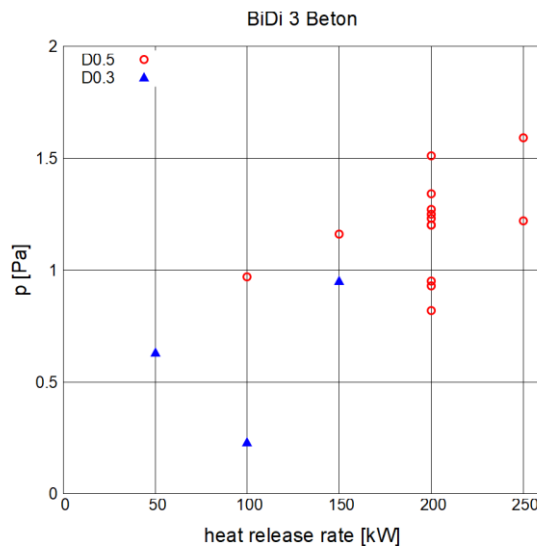


Abbildung 24 Gemessene Druckdifferenz Bi-Di 3 unterhalb des Referenzkörpers *im Brandraum*

Die Werte bei einer Wärmefreisetzungsrate von 200 kW streuen aufgrund der für diesen Fall umfangreichen Versuchsanzahl deutlich. Es lässt sich jedoch auch bei den anderen Versuchen kein signifikanter Trend erkennen. Obwohl die eingesetzten bi-direktionalen Sonden nicht sensitiv gegenüber seitlicher Anströmung sind, liegt an dieser Stelle vermutlich ein sehr diffuses Strömungsfeld vor. Eine gerichtete, zeitlich konstante Strömung ist sehr wahrscheinlich nicht vorhanden.

In Abbildung 25 werden die gemessenen Differenzdrücke und die entsprechenden Temperaturen an der Stelle gegenübergestellt.

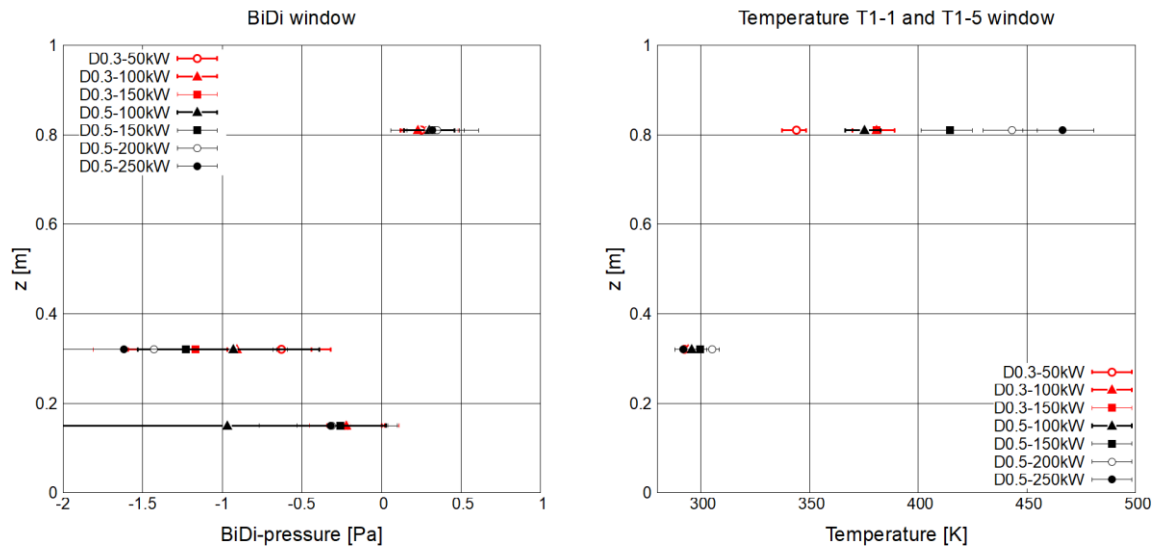


Abbildung 25 links: Differenzdruck [Pa] und rechts: Temperatur [K] aufgetragen über die Höhe der Fensteröffnung *im Brandraum*

Der gemessene Differenzdruck steigt mit zunehmender Höhe des Fensters. Die Messwerte bilden die erwartete Strömungsrichtung gut ab. Im oberen Teil strömt heißes Rauchgas aus dem Brandraum, im unteren Teil des Fensters strömt frische Außenluft nach. Um ein besseres Bild von dem Strömungsprofil innerhalb der Öffnung zu bekommen wurde nachträglich eine bidirektionale Sonde (Bi-Di 4) auf einer Höhe von 15 cm oberhalb der Brüstung angebracht. Die dort gemessenen Differenzdrücke sind entgegen der Vermutung deutlich höher bei gleichzeitig größeren Bandbreiten. Die Messung wird an dieser Stelle stärker von den der Brüstung bzw. von der Laibung des Fensters beeinflusst, als dies bei den weiteren Messpunkten der Fall ist. Eine lineare Druckverteilung innerhalb der Öffnung ist dennoch anzunehmen. Der Nullpunkt der Druckverteilung liegt dabei nahe an der Rauchschtichtgrenze. Die Brüstungshöhe liegt bei ungefähr 1,2 m. Der Nullpunkt liegt bei ungefähr 0,7 m bzw. 1,9 m bezogen auf den Boden des Brandraumes und ist damit im Bereich der Grenzschicht oder leicht darüber.

In Abbildung 26 werden für die Messstellen im Fenster die aus den Differenzdrücken abgeleiteten (vgl. 2.1.3.2) Geschwindigkeiten dargestellt.

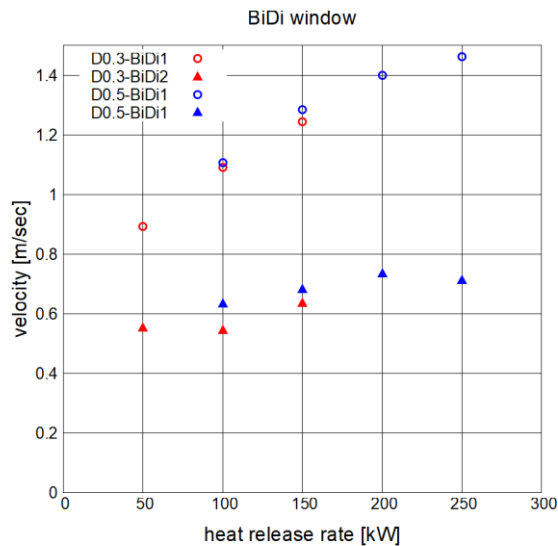


Abbildung 26 Geschwindigkeiten [m/sec] im Fenster abgeleitet aus Differenzdrücken bezogen auf die Wärmefreisetzungsrates *im Brandraum*

Mit zunehmender Wärmefreisetzungsrates steigen auch die Geschwindigkeiten der aus bzw. einströmenden Masseströme. Ein erhöhter Umsatz brennbarer Gase benötigt zur Verbrennung mehr Frischluft und produziert gleichzeitig mehr Abgase. Die Ergebnisse sind daher erwartbar. Mit Hilfe der gemessenen Temperaturen und der Annahme einem annähernd linearen Verlauf der Geschwindigkeiten innerhalb des Fensters lassen sich Rückschlüsse auf die Masseströme ziehen. Diese können wiederum mit Ingenieurmethoden verglichen werden.

8 Bauteiltemperatur

Für baupraktische Fragestellungen ist die Bauteiltemperatur von zentralem Interesse. Die Erhöhung der Bauteiltemperatur wird durch die unterschiedlichen Übertragungsmechanismen für Wärme beeinflusst, die Wärmestrahlung durch die Flamme und Heißgasschicht und der konvektiven Wärmeübertragung aber auch durch die Wärmeleitung innerhalb des Bauteils.

In Abbildung 28 werden die gemessenen Temperaturen im Referenzbauteil während des Versuches und in der Abkühlphase nach dem Versuch dargestellt.

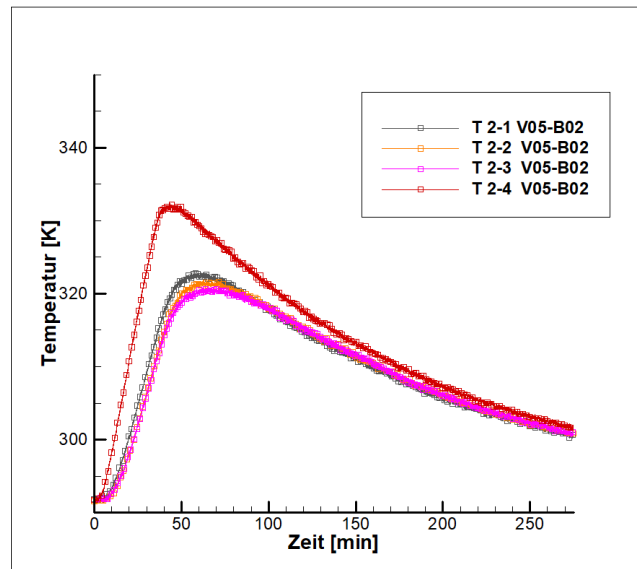


Abbildung 27 Temperaturmessung in K im Probekörper für $D=0,5$ m und $\dot{Q}=200$ im Brandraum

Die Temperaturen in der Mitte des Referenzkörpers (T2-1 bis T2-3) zeigen ein sehr ähnliches Erwärmungsverhalten auf. Dies kann als Indiz dafür gelten, dass die Erwärmung des Probekörpers sehr gleichmäßig erfolgt. Es sind nur geringe Unterschiede festzustellen. Der Probekörper ragte auf der Rückseite der Decke ins Freie. Dadurch kann über fünf Seiten des Würfels Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Die gemessenen Unterschiede spielen für die weiteren Betrachtungen nur eine untergeordnete Rolle.

In Abbildung 28 sind die Temperaturerhöhungen für mehrere Versuche dargestellt.

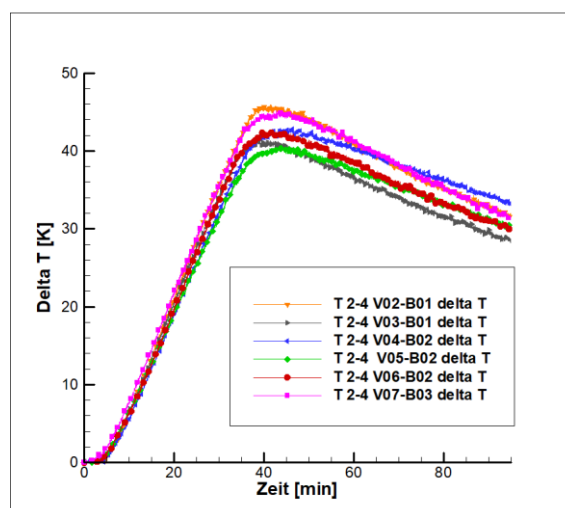


Abbildung 28 Temperaturerhöhung im Probekörper (T 2-4) über sechs Versuche bei $D=0,5$ m und $Q=200$ kW

Die Temperaturerhöhungen sind im Bereich des Temperaturanstieges fast identisch. Das ist ein Hinweis auf die gute Reproduzierbarkeit der Versuche. Weiterhin lässt darauf schließen, dass identischen bauphysikalischen Werte der unterschiedlichen Probekörper ähnlich sind und die Herstellung der Körper für die gezeigten Untersuchungen hinreichend genau waren.

9 Schlussfolgerung/Fazit

Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, die eine gute Reproduzierbarkeit aufweisen. Sie sind für die Validierung von Ingenieurmethoden im Brandschutz entsprechend geeignet.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit empirischen Gleichungen hinsichtlich der Flammenlänge und der Plumetemperatur wurde durchgeführt. Es zeigten sich gute Übereinstimmungen aber auch erklärbare Abweichungen. Bei der Plumetemperatur können diese Abweichungen zu einer Anpassung des empirischen Modells für die Einmischung in der Rauchgasschicht führen. Hierzu sind weitere Untersuchungen hilfreich.

Die Anzahl der Versuche ist im Vergleich zu der großen Anzahl an Einflussparametern überschaubar. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde eine möglichst große Anzahl an Versuchen durchgeführt. Bei manchen Konfigurationen wurde lediglich ein Versuch durchgeführt. Die gewonnen Datengrundlage sollte möglichst mit weiteren Versuchen vergrößert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, „Prüfbericht-19 11 063 32 0714- Bestimmung der Korngrößenverteilung,“ Karlsruhe, 2020.
- [2] Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, „Prüfbericht- 19 20 56 0361- Herstellung von Probekörpern aus Beton, Frisch- und Festbetoneigenschaften,“ Karlsruhe, 2019.
- [3] B. J. McCaffrey und G. Heskestad, „A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application,“ *Combustion and Flame*, pp. 125-127, 1976.
- [4] M. J. Hurley, „Appendix-Table A.23 Thermophysical property values for gases at standard atmospheric pressure,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering-5. Edition*, New York, Heidelberg, Dordrecht London, Springer, 2016, p. 3426.
- [5] I. Dinkov, J. H. Braun und D. Schelb, „Hydrogen in the Natural Gas Network- Relevance for Existing Fire Precautions,“ *Fire*, Bd. 7, Nr. 189, pp. 1-18, 2024.
- [6] D. Max, J. Braun, I. Dinkov und D. Trimis, „Flame Length Measurement in Compartment Fires with Image Analysis“. *European Combustion Meeting Neapel*.
- [7] G. Heskestad, „Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4. Auflage*, Quincy, National Fire Protection Association, 2008, pp. 2-1 - 2-20.
- [8] C. Beyler, „Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, heidelberg, Dordrecht, london, Springer, 2016, pp. 2591-2663.

Anhang

ANHANG 1.	ÜBERSICHT VERSUCHE BRANDRAUM	34
ANHANG 2.	ÜBERSICHT VERSUCHE FREIE FLAMME	35
ANHANG 3.	MESSINSTRUMENTE UND MESSSTELLEN IM BRANDRAUM	36

Anhang 1. Übersicht Versuche Brandraum

Versuch	Würfel	Brandstärke [kW]	D [m]	Q_D^* [-]
V01-B01	Nr. 1	200	0,5	1,02
V02-B01	Nr. 1	200	0,5	1,02
V03-B01	Nr. 1	200	0,5	1,02
V04-B02	Nr. 2	200	0,5	1,02
V05-B02	Nr. 2	200	0,5	1,02
V06-B02	Nr. 2	200	0,5	1,02
V07-B03	Nr. 3	200	0,5	1,02
V08-B03	Nr. 3	200	0,5	1,02
V09-B03	Nr. 3	200	0,5	1,02
V10-B04	Nr. 4	200	0,5	1,02
V11-B04	Nr. 4	250	0,5	1,28
V12-B04	Nr. 4	250	0,5	1,28
V13-B04	Nr. 4	250	0,5	1,28
V14-B05	Nr. 5	200	0,5	1,02
V15-B05	Nr. 5	150	0,5	0,76
V16-B05	Nr. 5	100	0,5	0,51
V17-B05	Nr. 5	50	0,3	0,91
V18-B05	Nr. 5	100	0,3	1,83
V19-B05	Nr. 5	150	0,3	2,75
V20-B05	Nr. 5	100	0,3	1,83
V21-B05	Nr. 5	200	0,3	3,67

Anhang 2. Übersicht Versuche freie Flamme

Versuch	Brandstärke [kW]	D [m]	Q_D^* [-]
V01	100	0,5	0,496
V02	150	0,5	0,774
V03	200	0,5	0,993
V04	250	0,5	1,274
V05	100	0,5	0,509
V06	150	0,5	0,764
V07	200	0,5	1,019
V08	250	0,5	1,274
V09	50	0,3	0,914
V10	100	0,3	1,828
V11	200	0,3	3,657
V12	150	0,3	2,743

Anhang 3. Messinstrumente und Messstellen im Brandraum

Name	Beschreibung	Name	Beschreibung
T 1-1	Im Fenster 0,32 m oberhalb Brüstung	T 5-1	Ecke (Höhe ¹ 2,45 m)
T 1-5	Im Fenster 0,81 m oberhalb Brüstung	T 5-3	Ecke (Höhe 2,19 m)
		T 5-5	Ecke (Höhe 1,75 m)
T 2-1	Im Betonkörper in der Mitte	T 5-7	Ecke (Höhe 1,34 m)
T 2-2	Im Betonkörper in der Mitte	T 5-9	Ecke (Höhe 1,0 m)
T 2-3	Im Betonkörper in der Mitte	T 5-12	Ecke (Höhe 0,6 m)
T 2-4	Im Betonkörper Referenztemperatur (3,5 cm oberhalb der Oberfläche)	T 5-14	Ecke (Höhe 0,19 m)
T 4-1	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 2,49 m)	TE G-3	Unter Betonkörper
T 4-2	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 2,49 m)		
T 4-3	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 2,27 m)	Bi-Di-1	Im Fenster 0,32 m oberhalb Brüstung
T 4-4	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 2,02 m)	Bi-Di-2	Im Fenster 0,81 m oberhalb Brüstung
T 4-5	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 1,80 m)	Bi-Di-4	Im Fenster 0,15 m oberhalb Brüstung
T 4-6	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 1,60 m)		
T 4-7	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 1,38 m)	Bi-Di-3	Unter Betonkörper 0,05 m unterhalb Betonkörper
T 4-8	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 1,16 m)		
T 4-9	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 0,95 m)	WA-1	WFA 0,05 m neben Betonkörper
T 4-10	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 0,72 m)		
T 4-11	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 0,55 m)	WA-2	WFA 1,0 m vom Brennerrand entfernt
T 4-12	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 0,28 m)	WA-3	WFA 1,0 m vom Brennerrand entfernt
T 4-13	Oberhalb des Brenners (Höhe ² 0,1 m)	WA-4	WFA 1,0 m vom Brennerrand entfernt

¹ Gemessen vom Brandraumboden

² Gemessen von der Kiesbettoberfläche

H i n w e i s

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

<http://www.ffb.kit.edu/>

und des

**Instituts der Feuerwehr (IdF)
am Institut für Brand und Katastrophenschutz (IBK) Heyrothsberge**

<https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/forschung-idf/publikationen/>
eingesehen werden.