
Die Entwicklung eines praxisorientierten Ansatzes
zur Brandherdmodellierung mit Star-CCM+ im
Rahmen von Problemen des Brandschutz-
ingenieurwesens durch Vergleiche von
Simulationsergebnissen mit experimentellen
Messungen

Florian Arnaschus

Studiengang Hazard Control an der HAW Hamburg

Mat.Nr.: 1952526

1. Gutachter:

Prof. Dr. Marc Schütte

marc.schuette@haw-hamburg.de



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

2. Gutachter:

M. Sc. Andreas Müller

mueller@hk-brandschutz.de

HALFKANN 
KIRCHNER
Die Marke im Brandschutz

Abstract

This bachelor thesis investigates the CFD (Computational Fluid Dynamics)-program Star-CCM+ on the feasibility of fire source modelling and for relevance and efficiency for the daily project business. Thereby two real fire tests are simulated. The first is an experiment by Bernard J. McCaffrey, who analysed the effects of purely buoyant diffusion flames. The second test is a fire test by the MFPA Leipzig, which took place in a box-shaped building and, amongst others, researched the interplay of the flame with the flow rate and the temperatures of the inlet and outlet air.

The McCaffrey test conduces to find the ideal adjustment for realistic results. These realisations are used for the simulation of the MFPA Leipzig experiment.

A volumetric heat source and two combustion models, EBU (Eddy Break-Up) and PPDF (Presumed Probability Density Function), are used and diversified. For the combustion models a mass flow controls the inlet of the fuel.

The results show in the area above the flame slightly higher values of temperature with the volumetric heat source, even though the heat release rate is reduced on the proportion of radiation of about twenty percent. On greater heights the flow rate differs more.

The combustion models show greater variations of the temperature, especially near the flame, which are much higher than aspired. The flow rate is higher as well.

The results of the MFPA Leipzig simulations show good accordance with the temperatures, even though they are higher near the ceiling and chimneys and lower near the ground. Only the flow speeds show extensive aberrances.

As a summary, good conformity of the simulations can be attested, although some areas show aberrances because of the required simplifications of the simulations.

Inhalt

Formelverzeichnis	III
1. Problembeschreibung / Motivation	4
1.1. Einleitung	4
1.2. Beschreibung von CFD-Modellen	4
1.3. Beschreibung und Vorteile von Star-CCM+	5
1.4. Ziel der Arbeit	6
2. Beschreibung der relevanten Verbrennungsphänomene	8
3. Vorgehensweise / Methodik	15
3.1. Eddy Break-Up (EBU) Modell	16
3.2. Presumed Probability Density Function (PPDF) Modell	17
4. Untersuchungsprogramm	18
4.1. Begründung der Auswahl der Experimente	18
4.2. McCaffrey-Experiment	18
4.3. Brandversuch MFPA Leipzig	20
4.4. Darstellung der Modellierung in Star-CCM+	23
4.4.1. McCaffrey-Experiment	24
4.4.2. Brandversuch MFPA Leipzig	29
5. Auswertung der Berechnungsergebnisse	34
5.1. Ergebnisse McCaffrey	34
5.1.1. VHS	34
5.1.2. EBU	38
5.1.3. PPDF	40
5.2. Ergebnisse MFPA Leipzig	42
5.2.1. VHS	42
5.2.2. EBU	49
5.2.3. PPDF	54
6. Diskussion	60
6.1. Fehlerdiskussion / Abweichungen	60
6.2. Fazit	62
7. Literatur	63
8. Abbildungen	64
Anlagen	i

Formelverzeichnis

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
\dot{Q}	Wärmestrom	kW
\dot{q}'''	spezifischer Wärmestrom	kW/m ³
A	Fläche	m ²
h	Höhe	m
t	Zeit	s
H_u	Heizwert	kWs/kg
z	Abstand	m
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
T	Temperatur	°K
k	Wärmeleitfähigkeit	W/(m*K)
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
γ_s	Rußausbeute	g/g
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_s	Rußdichte	kg/m ³
CRR	chemische Wärmefreisetzung	kW
ΔT	Temperaturveränderung	°C
$H_{f,i}^0$	Standardbildungsenthalpie des jeweiligen Stoffes	J/mol
M	molare Masse	kg/mol
w	Geschwindigkeit	m/s
ω_n	Massenanteil des jeweiligen Stoffes	
$pS_{EBU / PPDF}$	passiver Skalar für das EBU-/PPDF-Modell	
η	Exponent der Mittelachsbeziehung	
C	Auftriebskonstante	
r	stöchiometrisches Luft-/ Brennstoffverhältnis	

1. Problembeschreibung / Motivation

1.1. Einleitung

Die Möglichkeiten im Hoch- und Tiefbau nehmen mit dem Fortschritt der Technik immer weiter zu. Die Gebäude werden größer, höher, weit verzweigter, mit komplexeren Funktionen und dementsprechend auch höheren Anforderungen. Aufkommende Fragen, ob diese Anforderungen zur Sicherheit der sich dort befindenden Menschen genügend beachtet werden, können mit den für die jeweiligen Bundesländer bestehenden Bauordnungen immer weniger erfüllt werden. Aus diesem Grund wird in der Allgemeinheit das Verlangen nach Wegen zu einer alternativen theoretischen Überprüfung größer.

Eine Antwort auf diese Probleme können Simulationsprogramme für numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics - CFD) sein. Sie sollen strömungsmechanische Schwierigkeiten approximativ mit numerischen Mitteln lösen. Es ist dadurch möglich geplante, wie auch bereits bestehende Gebäude zu modellieren und dort einen Brand zu simulieren. So können durchgeführte oder beabsichtigte Maßnahmen für die bestehenden Schutzziele auf ihre Tauglichkeit überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Auch ist es möglich, durch diese Simulationen Problemstellen innerhalb des Gebäudes zu identifizieren, sodass diese möglichst frühzeitig, noch in der Planungsphase geändert werden können.

In dem Bereich Brandschutz selber stellt FDS (Fire Dynamics Simulator) das bekannteste Simulationsprogramm für Brände dar. Die erste Version wurde im Jahr 2000 veröffentlicht und hat sich seitdem in seinem Bereich als das für diese Zwecke meist benutzte CFD-Programm etabliert.

Jedoch wandert der Fokus von den speziell für den Brandschutz entwickelten Simulationsprogrammen hin zu den allgemeinen CFD-Programmen, wie zum Beispiel Star-CCM+, die eine größere Wahl an Möglichkeiten zur Simulation von Strömungsmechaniken besitzen. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieses Programms auf Relevanz, sowie auf Effizienz für das alltägliche Projektgeschäft dargestellt.

1.2. Beschreibung von CFD-Modellen

CFD-Modelle werden in vielen verschiedenen Bereichen des Ingenieurwesens eingesetzt. Sie sind sehr hilfreich zur Beantwortung von Fragen unter anderem zu Oberflächentemperaturen,

Gaszusammensetzungen und -konzentration, Wärmeflüsse durch Strahlung und Konvektion oder Brandausbreitungen (Schneider 2009, S. 112). Die Modelle basieren auf einer zeitabhängigen, dreidimensionalen Lösung der grundlegenden Erhaltungsgesetze. Der relevante Bereich des Realobjekts wird geometrisch maßstabsgetreu mit seinen Wänden und Öffnungen nachgebildet. Somit entsteht ein Volumen welches in kleinere Untervolumina (Zellen) unterteilt wird. In jeder dieser Zellen gelten dabei die Grundgleichungen von Masse, Impuls und Energieerhaltung. Die physikalischen und chemischen Vorgänge werden ausgewählt, die Strömungseigenschaften definiert und die Bedingungen der Grenzflächen festgelegt. Wenn diese Vorbedingungen stehen, können Näherungen von Strömungen in jeder einzelnen Zelle für vorher definierte Zeitschritte mithilfe von Strömungs- und algebraischen Gleichungen berechnet werden. Die zugeführten Werte, sowie die berechneten Näherungen können anschließend zwei- oder dreidimensional in verschiedener Art und Weise dargestellt und ausgewertet werden (Karlsson & Quientiere 1999, S. 269).

Im Bereich des Brandschutzes bereits bekannte und verwendete CFD-Programme sind unter anderem FDS (Fire Dynamics Simulator), JASMINE oder FLUENT (Schneider 2009, S. 114).

1.3. Beschreibung und Vorteile von Star-CCM+

Star-CCM+ ist ein Werkzeug, welches zur allgemeinen Berechnung von numerischen Strömungsmechaniken verwendet wird. Es besteht aus einem Bündel von Komponenten, das zusammen eine große Bandbreite an Anforderung für die Modellierung erfüllt. So beinhaltet es unter anderem 3D-CAD, welches der Modellierung der Geometrie dient, Werkzeuge zur Bereinigung und Glättung von Oberflächen und verschiedene Turbulenzmodelle (CD-adapco 2013, S. 5).

Es ist dafür geeignet, große Modelle darzustellen, sowie sie schnell und effizient zu bearbeiten. Durch das Paket an einzelnen Komponenten, die das Programm mit sich bringt, ist es möglich mit einfachen Mitteln Einstellungen und Änderungen vorzunehmen, sowie diese auf ihre Wirkung zu überprüfen.

Die bereits in Abschnitt 1.2. benannten CFD-Programme beinhalten jedes für sich unterschiedliche Strahlungs-, Verbrennungs- und Turbulenzmodelle, die für die Simulation verwendet werden können. Folgend wird Star-CCM+ beispielhaft anhand von Turbulenzmodellen den anderen CFD-Programmen gegenübergestellt und verglichen.

Tabelle 1: Übersicht der Turbulenzmodelle (Schneider 2009, S. 114)

Turbulenzmodell	FDS	JASMINE	FLUENT	STAR-CCM+
DNS	ja	Nein	ja	ja
LES	ja	Nein	ja	ja
RANS	nein	ja (Standard zwei Gleichungen k- ϵ Modell)	ja	ja
DES	nein	Nein	nein	ja

Die Tabelle 1 von Schneider, die um Star-CCM+ erweitert worden ist, zeigt, dass nur FLUENT und Star-CCM+ die drei Turbulenzmodelle DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation) und RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) verwenden, welche bei der Berechnung von numerischen Strömungsmechaniken etabliert sind (Schneider 2009, S. 114). Zusätzlich beinhaltet STAR-CCM+ noch das Modell DES (Detached Eddy Simulation), welches aus einer Kombination der RANS- und LES-Modelle besteht (CD-adapco 2013, S. 3241).

Neben den Turbulenzmodellen unterscheiden sich die einzelnen CFD-Programme ebenso bei den Strahlungs- und Verbrennungsmodellen. STAR-CCM+ bietet dabei eigens modifizierte Strahlungsmodelle, die in dieser Form bei keinem anderen Rechenprogramm zur Verfügung stehen.

Auch bei den Verbrennungsmodellen unterscheiden sich die jeweiligen Programme erheblich. Während FDS und JASMINE nur eine geringe Zahl von Verbrennungsmodellen beinhalten, kann bei FLUENT und STAR-CCM+ auf eine große Auswahl zurückgegriffen und somit je nach Situation spezieller ausgewählt werden (Schneider 2009, S. 116).

Es ist aber gleichzeitig anzumerken, dass Rechenergebnisse zwischen den verschiedenen Programmen auch bei gleichen Berechnungsmodellen aufgrund unter anderem unterschiedlicher physikalischer Inhalte abweichen können (ebd.).

Im Abschnitt 3. sind die in Star-CCM+ vorhandenen Verbrennungsmodelle aufgelistet.

1.4. Ziel der Arbeit

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, ist Star-CCM+ im Bereich Brandschutz noch neu in der Anwendung. Das führt zu der Notwendigkeit, die passenden Verbrennungsmodelle auf Alltagstauglichkeit zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Dies geschieht zum einen mit der Nachberechnung und Simulierung des McCaffrey Experiments, sowie eines

Brandversuches der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt (MFPA)
Leipzig, die im Abschnitt 4 beschrieben sind.

2. Beschreibung der relevanten Verbrennungsphänomene

Damit ein Brand überhaupt erst entstehen kann, müssen vier Voraussetzungen vorhanden sein: Genügend Sauerstoff, ein brennbarer Stoff, Wärme und das alles im richtigen Mengenverhältnis (siehe Abb.1).



Abb. 1: Brandvoraussetzungen. Verfügbar unter <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Verbrennungsdreieck.svg> (Stand 09.01.13)

Sobald dieses richtige Mengenverhältnis besteht, entzündet sich das Gemisch und eine Verbrennungsreaktion wird in Gang gesetzt.

Nach Schneider (2009) kann ein Brand in vier Phasen unterteilt werden, die sich in den Temperaturen und den Entwicklungsgeschwindigkeiten unterscheiden. Diese vier Phasen sind folgend in Abbildung 2 dargestellt (S. 207).

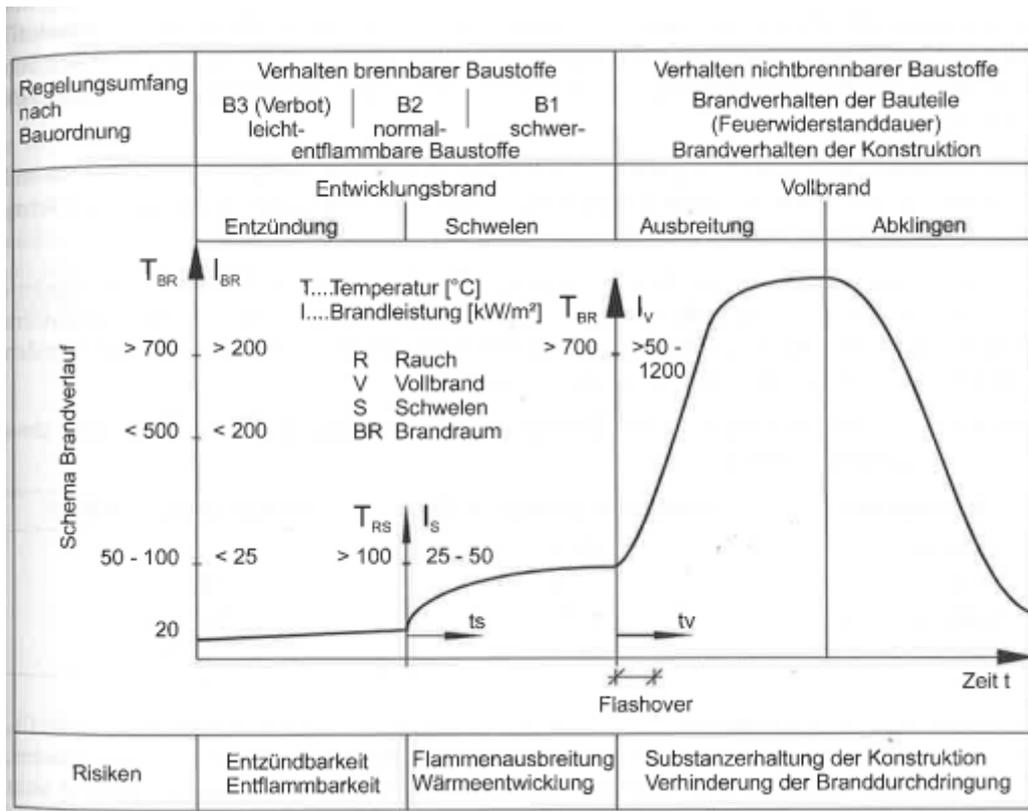


Abb. 2: Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers nach Schneider, 2009, S. 207.

Die Entzündungsphase ist von einer niedrigen durchschnittlichen Temperatur und Brandleistung des Brandraumes gezeichnet. Nach der Entzündung entsteht unter Umständen ein Schwelbrand, der sich über Minuten bis Stunden ausbreitet und gleichzeitig den Raum aufheizt. Sobald sich der Schwelbrand genug ausgebreitet hat und Temperaturen von ca. 500 bis 600 °C unterhalb der Decke erreicht sind, geht dieser (mit einem Flash-Over) in einen vollentwickelten Brand über. Hier sind die größten Temperaturen und Brandleistungen zu messen. Sobald der Brand die vorhandenen Brandlasten und/oder den Sauerstoff verbraucht hat, klingt er wieder ab und erlischt gegebenenfalls von selbst (Schneider 2009, S. 208).

Für eine Brandreaktion müssen flüssige Brennstoffe erst in eine Gasform umgewandelt werden. Da diese Umwandlung viel Energie benötigt, sind daran große Wärmemengen beteiligt, was zur Verdampfung der Oberfläche der Flüssigkeiten führt (Schneider 2009, S. 220). Bei festen Brennstoffen hingegen ist dafür Pyrolyse nötig um Erzeugnisse zu erhalten, die ein ausreichend geringes molekulares Gewicht haben, um sich von der Oberfläche des brennbaren Stoffes zu verflüchtigen und in die Flamme einzutreten. Dafür ist jedoch deutlich mehr Energie als bei flüssigen Brennstoffen nötig, sodass eine höhere Temperatur auf der Oberfläche des Feststoffes herrschen muss (Drysdale 1998, S. 2).

Es gibt eine Vielzahl an Brennstoffen, von einfachen Kohlenwasserstoffen bis hin zu Feststoffen mit einem hohen Molekulargewicht und großer chemischer Komplexität. Alle Brennstoffe brennen unter bestimmten Bedingungen, dabei reagieren sie mit dem Sauerstoff in der Luft. Durch diese Entzündung entstehen Verbrennungsprodukte und weitere Wärme.

Um Feuerphänomene verstehen zu können, sind Grundlagen von verschiedenen Teilgebieten der Physik nötig, unter anderem die Wärmeübertragung (Drysdale 1998, S. 35).

Es existieren nach Karlsson und Quientiere (1999) drei grundlegende Mechanismen von Wärmeübertragung: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung (S. 6).

Die Wärmeleitung beschreibt die Wärmeübertragung in und durch Feststoffe (Drysdale 1998, S. 35). Konvektion ist der Austausch von Wärme zwischen Gasen oder Flüssigkeiten und Feststoffen (Schneider 2009, S. 30). Bei der Strahlung ist die Besonderheit, dass sich im Gegensatz zur Ableitung und Konvektion kein Medium in Verbindung befinden muss. Vielmehr ist sie die Übertragung von Energie über elektromagnetische Wellen (Schneider 2009, S. 37) und dominiert bei der Übertragung von Wärme über 400 °C wie zum Beispiel bei Bränden (Drysdale 1998, S. 59). Aus diesem Grund wird folgend weiter auf die Wärmestrahlung eingegangen.

Dysdrale (1998) beschreibt, dass ab einer Temperatur von 550 °C die Wärmestrahlung optisch sichtbar durch ein rotes Glühen wird, welches sich bei weiterer Temperaturerhöhung des Körpers farblich verändert und somit aufgrund der Farbe stets ein grober Bereich über die Temperaturhöhe angegeben werden kann (S. 59).

Eine Verbrennung kann nach Drysdale in brandlastgesteuert und ventilationsgesteuert unterschieden werden, wobei r dabei das stöchiometrische Luft-/Brennstoffverhältnis darstellt (Drysdale 1998, S. 394).

Formel 1: Brandlastgesteuerter Brand

$$\frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_{Brandlast}} > r$$

Der brandlastgesteuerte Brand ist nach Formel 1 von einem Mangel an Brandlast $\dot{m}_{Brandlast}$ und einem Überschuss an Sauerstoff \dot{m}_{Luft} gekennzeichnet. Dieser wird allgemein im Vergleich als weniger schwerwiegend angesehen, da der Überschuss an Luft die Temperatur mildert (ebd.).

Formel 2: Ventilationsgesteuerter Brand

$$\frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_{Brandlast}} < r$$

Ein ventilationsgesteuerter Brand nach Formel 2 besitzt hingegen einen Überschuss an brennbarem Stoff, jedoch gleichzeitig einen Mangel an Sauerstoff (Drysdale 1998, S. 395).

Flüssigkeiten und Feststoffe brennen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, mit einer leuchtend gelben Flamme. Diese werden durch kohlehaltige Partikel hervorgerufen, welche als „Ruß“ bezeichnet werden, die in der Flamme entstehen, bei unvollständiger Verbrennung die Flammenspitze verlassen und Rauch bilden. Die Rußpartikel nehmen ihrerseits Wärme von der Flamme auf. Somit kann aus diesem Vorgang geschlossen werden, dass eine Flamme eine geringere Durchschnittstemperatur besitzt, je rußhaltiger sie ist (Drysdale 1998, S. 77).

Dieser Ruß wiederum spielt eine wichtige Rolle in der Entwicklung von Feuer, da sich die heißen Gase während der Wachstumsphase unter der Decke sammeln, dabei nach unten in die kühleren Bereiche strahlen und den Ausbruch eines vollentwickelten Brandes verstärken (Drysdale 1998, S. 79).

Jeder Brennstoff besitzt einen unterschiedlichen Anteil an Rußausbeute, der bei einer unvollständigen Verbrennung entsteht. Dieser Anteil wird beeinflusst von dem Faktor, ob es sich um einen gut belüfteten oder um einen ventilationsgesteuerten Brand handelt. Ventilationsgesteuerte Brände haben in der Regel einen höheren Faktor, der in die Rußentstehung eingeht (Karlsson, Quintiere 1999, S.230).

Die gasförmigen Brennstoffe können vor der Verbrennung mit Sauerstoff vorgemischt sein oder sich erst in der Verbrennungszone vermischen. Vorgemischte Flammen sind von einer hohen Verbrennungsrate durch die Reaktionskinetik bei der Oxidierung gekennzeichnet.

Sie können jedoch nur brennen oder sich entzünden, wenn sich die Bestandteile des Gemischs in definierten Bereichen befinden. Diese werden als untere und obere Zündgrenze bezeichnet (Drysdale 1998, S. 83).

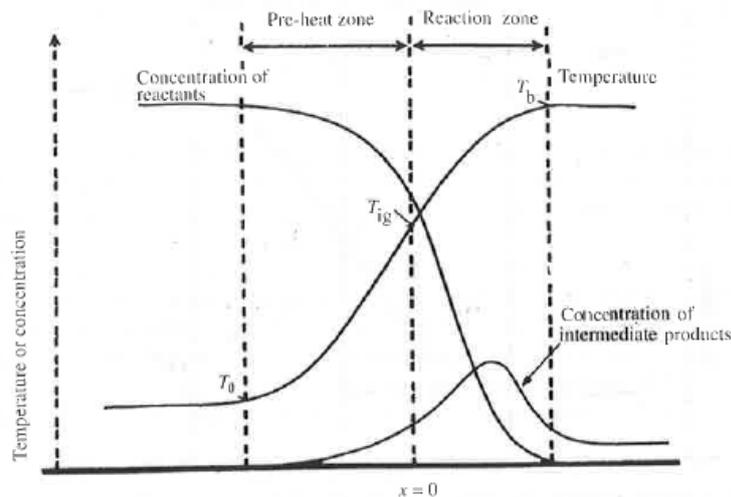


Abb. 3: Temperatur- und Konzentrationsprofile bei einer Verbrennung (Drysdale 1998, S. 99)

Das einfachste Beispiel einer vorgemischten Flamme ist ein Bunsenbrenner mit einer vollständig geöffneten Einströmungsluke. Eine solche Flamme kann, wie in Abbildung 3 zu sehen, in drei Zonen unterteilt werden:

- 1) eine Vorheiz-Zone in der sich die noch unverbrannten Gase bis zur Zündungstemperatur erwärmen,
- 2) die Reaktionszone, in der der größte Teil der Verbrennung stattfindet,
- 3) die Region über der Flamme, in der hohe Temperaturen herrschen und radikale Rekombination stattfindet (Drysdale 1998, S. 98).

Eine nichtvorgemischte Flamme, auch Diffusionsflamme genannt, hat die Besonderheit, dass der Brennstoff und das Oxidationsmittel zunächst noch getrennt sind und sich erst in der Verbrennungszone mischen. Bei niedrigen Durchflussgeschwindigkeiten entsteht eine laminare Flamme, bei hohen Durchflussgeschwindigkeiten bekommt die Flamme eine turbulente Eigenschaft (Yeoh & Yuen 2009, S. 136).

Laminare Flammen sind gekennzeichnet durch eine Reynolds-Zahl unter ~ 2000 . Durch Scherkräfte entsteht eine Instabilität im Gasstrom, welche zu einem ‚Flackern‘ führt. Im laminaren Bereich wächst die Größe der Flamme im Verhältnis zur Quadratwurzel der volumetrischen Durchflussgeschwindigkeit des Brennstoffes (Drysdale 1998, S. 123).

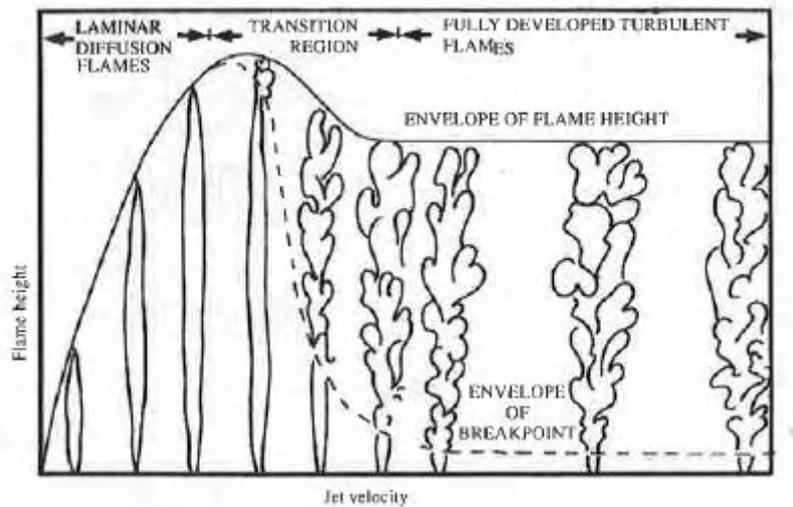


Abb. 4: Entwicklung der Flammenhöhe in Relation zur Strahlgeschwindigkeit (Drysdale 1998, S. 128)

Abbildung 4 zeigt, dass ab einer bestimmten Flussgeschwindigkeit Turbulenzen an der Flammenspitze entstehen. Die Flamme verliert mit dem Anstieg der Ausströmungsgeschwindigkeit des Brennstoffs an Höhe, bis zu einem nahezu stabilen Punkt. Die turbulente Flamme bildet sich bei einer Reynolds-Zahl über 2000 (Drysdale 1998, S. 128).

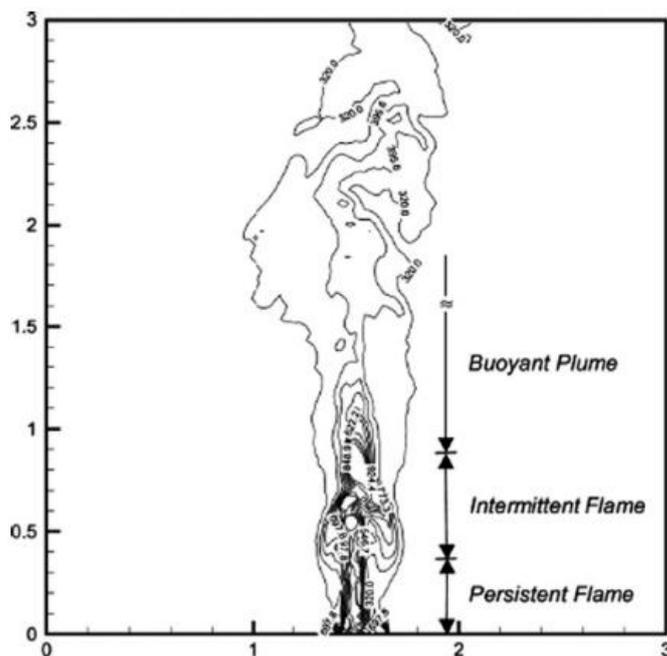


Abb. 5: 3-Zonen Flammenstruktur nach Cox and Chitty und McCaffrey (Yeoh & Yuen 2009, S. 9)

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, kann die entstehende turbulente Flamme, auch als Feuer-Plume bezeichnet, in drei Zonen unterteilt werden: Beständige Flamme (Persistent Flame),

unregelmäßige Flamme (Intermittent Flame) und Abgasfahne (Buoyant Plume) (Karlsson & Quientiere 1999, S. 52).

Dichteunterschiede aufgrund von Temperaturgefällen innerhalb und außerhalb der Flamme führen zu einer Auftriebskraft, in der die weniger dichten Fluide hochsteigen.

Durch dieses Aufsteigen kann aus der Umgebung Luft nachströmen, welche die Verbrennung unterstützt, jedoch gleichzeitig auch die Erzeugnisse vom Feuer über der Flamme abkühlt und dadurch abschwächt. Diese Abschwächung führt wiederum zu einem Anstieg von Rauchvolumina, welche durch das Feuer erzeugt werden (Drysdale 1998, S. 149).

3. Vorgehensweise / Methodik

Als Möglichkeit zur Brandherdmodellierung dient eine volumetrische Wärmequelle oder Verbrennungsmodelle.

Das Prinzip der volumetrischen Wärmequelle (VHS - von Volumetric Heat Source) besteht darin, dass eine vorher festgelegte konstante Menge an Wärme an einem bestimmten Punkt im zu betrachtenden Bereich freigesetzt wird. Dabei finden jedoch keine chemische Reaktionen und somit auch keine Verbrennung statt.

Dies ist die simpelste Form einer Brandherddefinition, entfernt sich jedoch von ihrer Struktur her von einem Realbrand mit den unterschiedlichen Wechselwirkungen bezüglich Sauerstoffangebot und Lage der Verbrennungszone, die in Kapitel 2.2 beschrieben sind.

Bei den Verbrennungsmodellen hingegen strömt an einer vorgegebenen Stelle der Brennstoff in den zu betrachtenden Bereich ein und entzündet sich mit den Oxidationsmitteln. Hieraus entsteht eine Verbrennungsreaktion, die wiederum Energie an die Umgebung abgibt.

In den Untersuchungen wird jeweils ein instationärer Prozess voreingestellt. Das bedeutet, dass sich die Gegebenheiten zu jedem Zeitschritt ändern können. Somit können sich die Zustände in dem Berechnungsgitter an die jeweiligen Veränderungen anpassen und neue Voraussetzungen für den nächsten Zeitschritt stellen. Innerhalb dieser Zeitschritte können wiederum innere Schritte eingestellt werden, die ein Ineinanderfließen der Lösungen erleichtern (cd-adapco 2013, S. 2708).

In Star-CCM+ Version 8.06 sind gemäß des Benutzerhandbuchs folgende Verbrennungsmodelle implementiert (CD-adapco 2013, S. 3705):

- Eddy Break-Up (EBU) models
- The Premixed Eddy Break-Up model
- The Surface Chemistry model
- Homogeneous Reactor models
- Turbulence-chemistry interactions (TCI)
- The Coherent Flame model (CFM)
- The Partially-Premixed Coherent Flame Model (PCFM)
- Presumed Probability Density Function (PPDF) models

- The Progress Variable model (PVM)
- The Thickened Flame model
- Nox model
- Fuel Nox model
- Coal Combustion modeling
- Soot modeling
- Particle Reaction modeling

Bei einem Austausch mit den Fachmitarbeitern von cd-adapco und einer Vorbetrachtung der zu erwartenden Ergebnisse wurde entschieden, dass das EBU Modell sowie das PPDF Modell für die geplanten Berechnungen am geeignetsten erscheinen. Aus diesem Grund werden diese beiden Modelle ausgewählt und auf Anwendbarkeit überprüft

3.1. Eddy Break-Up (EBU) Modell

Das EBU-Verbrennungsmodell zeichnet einzelne Durchschnittskonzentrationen von Stoffen im Berechnungsgitter über Transportgleichungen auf. Die Reaktionsgeschwindigkeiten, welche in diesen Gleichungen verwendet werden, werden als Funktionen aus der durchschnittlichen Stoffgeschwindigkeit, Turbulenzeigenschaften und, je nach Modell, der Temperatur berechnet. Gleichzeitig wird eine durchschnittliche Enthalpiegleichung errechnet. Durch die Berechnung der Enthalpie- und Stoffkonzentrationsgleichung kann dann die durchschnittliche Temperatur, Dichte und Viskosität ermittelt werden.

Die verschiedenen chemischen Reaktionen werden vorher manuell festgelegt. Jede dieser Reaktionen verläuft mit einer eigenen Geschwindigkeit. Das hier verwendete Standard EBU-Modell zeichnet sich dadurch aus, dass diese Reaktionsgeschwindigkeit ausschließlich durch die benötigte Zeit für die turbulente Vermischung bestimmt wird (CD-adapco 2013, S. 3713ff). Es hängt somit von der Geschwindigkeit der Mikrovermischungen ab. Es kann jedoch nicht die Effekte der begrenzten Reaktionsgeschwindigkeit quantitativ bestimmen (Guo et. al. 2003, S. 1091-1101).

3.2. Presumed Probability Density Function (PPDF) Modell

Das PPDF-Modell simuliert nicht-vorgemischte Verbrennungsprozesse von Diffusionsflammen. In turbulenten Reaktionsströmen besitzen die Brennstoff- und Sauerstoffkonzentrationen einen messbaren Wert, der in der Flammenzone an unterschiedlichen Punkten variiert. Diese Methode beschreibt statistisch zusammen mit der Erhaltungsgleichung das Turbulenzgebiet, welches die fluide Strömung reguliert (Yeoh & Yuen 2009, S.179).

Es werden einige parameterische Variablen wie der durchschnittliche Mischungsanteil im Berechnungsgitter aufgezeichnet. Aus diesen Variablen können die durchschnittliche Stoffkonzentration, Temperatur und Dichte als Funktionen ermittelt werden. In dem hier verwendeten PPDF-Modell werden nicht-adiabatische Zustände angenommen, was bedeutet, dass es zu Wärmeverlusten durch Abstrahlung kommen kann. Ebenso wird eine spezielle Variante des idealen Gasmodells verwendet, welches lokale Dichtewerte aus einer PPDF-Nachschlagetabelle benutzt. Diese Tabelle enthält alle Informationen über chemische Stoffe und Reaktionen, die für PPDF-Gleichgewichtstabellen benötigt werden (CD-adapco 2013, S. 3815ff).

Das PPDF-Modell zeichnet sich dadurch aus, dass es nicht die Berechnung der ganzen Dichtefunktions-Gleichung (PDF von engl. Probability Density Function) benötigt. Somit kann es auf komplexe Ingenieursabläufe angewendet werden (Guo et. al. 2003, S. 1091ff).

4. Untersuchungsprogramm

4.1. Begründung der Auswahl der Experimente

Zur Untersuchung der Möglichkeiten der Brandherdmodellierung mit Star-CCM+ anhand von Realbrandversuchen wurden zwei Experimente ausgewählt. Zum einen handelt es sich um eine Untersuchung von Diffusionsflammen von McCaffrey, auf die sich aufgrund ihrer durch den Versuch abgeleiteten Plumeformeln in den folgenden Jahren und auch heutzutage noch häufig bezogen wird. Dieser Versuch stellt die Wärme- bzw. Verbrennungsquelle in den Mittelpunkt und dient als Ansatz für die Untersuchung des Brandversuchs der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig), der sich aufgrund seiner ausführlich aufgezeichneten Geometriedaten, inklusive Messpunkte, und Messergebnissen zur Überprüfung auf Reproduzierbarkeit mit CFD-Programmen anbietet. In diesem Versuch werden auf die Verbrennungsquelle äußere Einflüsse unter anderem in Form von Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturerhöhungen einwirken.

4.2. McCaffrey-Experiment

Im Oktober 1979 wurde der Abschlussbericht von Bernard J. McCaffrey mit dem Titel „Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results“ veröffentlicht. Dieser untersucht die bis dato noch weitestgehend unbekanntenen Auswirkungen von frei brennenden Feuern wie zum Beispiel an einem Becken voll brennbarer Flüssigkeit oder polymeren Platten.

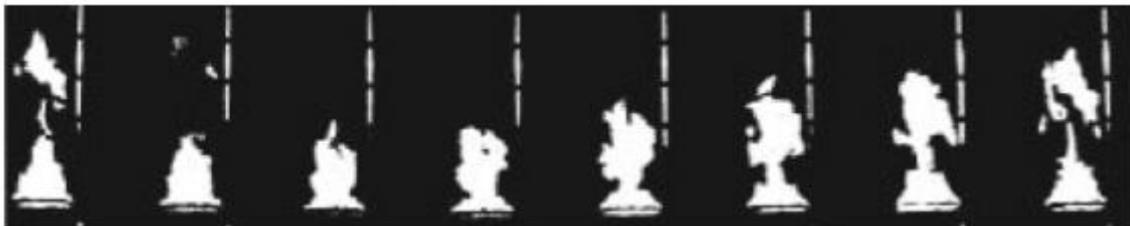


Abb. 6: Flammenbewegungen im McCaffrey-Experiment (Yeoh & Yuen 2009, S. 415)

Diese werden im Gegensatz zu Verbrennungssystemen mit einspritzendem Brennstoff erheblich durch Auftriebskraft beherrscht und zeigen, wie in Abbildung 6 zu sehen ist stark flackernde Eigenschaften. Der Bereich von Interesse ist dabei besonders das Nahfeld mit den hohen Beschleunigungen. Bis dahin wurden Strahlung, die Größe der Verbrennungszonen

und Flammenlänge, Luftmitführung, Vermischung und andere physikalisch-chemische Eigenschaften nicht gut erfasst. Dieser Mangel an Verständnis soll durch dieses Experiment verringert werden und gleichzeitig die Brauchbarkeit der bereits erarbeiteten Ergebnisse erweitert werden (McCaffrey 1979, S. 2).

Der Brenner verwendet Methan mit verschiedenen Einstellstärken und wird auf eine feuerfesten 0,09 m² große Halterung errichtet. Er hat einer Höhe von 0,75 m über der Bodenfläche und steht unter einer Abzugshaube. Die Messinstrumente werden exakt über dem Mittelpunkt des Brenners platziert.

Die Geschwindigkeit oberhalb der Flamme im Bereich der Abgasfahne wird mit einer doppeltgerichteten Drucksonde gemessen, welche die Druckunterschiede der flackernden Grobstruktur mittelt. Das zugehörige Manometer mittelt wiederum bis zu 100 Sekunden, was für eine stationäre Messung ausreichend ist.

Die Temperatur wird mit großen Thermoelementen gemessen und gemittelt.

Einige Probleme treten bei dieser Herangehensweise auf, so führen die hohen Temperaturen zu einem Herabsinken der Reynolds-Zahl der Strömung im Bereich von wenigen hundert.

Ebenso führen das Pulsieren und die Turbulenzen zu Fehlern bei der Geschwindigkeitsmessung mit den Drucksonden.

Zum Schluss können Fehler bei den Thermoelementen aufgrund von Strahlung von den Thermoelementen durch das Gas in die Umgebung auftreten, was dazu führt, dass im Zentrum der Flamme niedrigere Temperaturen und im Gegensatz am Rand höhere Temperaturen gemessen werden, als diese in Wirklichkeit auftreten (McCaffrey 1979, S. 4).

Durch das Experiment können wurden einige Gleichungen abgeleitet, die als Grundlage für Vergleiche zwischen den McCaffrey Simulations- und den experimentellen Ergebnissen dienen. Die Geschwindigkeiten und Temperaturen im Abstand z lassen sich wie folgt mit Formel 3 und 4 berechnen:

Formel 3: McCaffrey-Formel zur Geschwindigkeit

$$u_0 = \dot{Q}^{\frac{1}{5}} * k * \left(\frac{z}{\dot{Q}^{\frac{2}{5}}} \right)^{\eta}$$

Formel 4: McCaffrey-Formel zur Temperatur

$$\Delta T = \frac{T}{(2 * g)} * \left(\frac{k}{C} \right)^2 * \left(\frac{z}{\dot{Q}^{\frac{2}{5}}} \right)^{2\eta-1}$$

Dabei sind die Parameter zur Berechnung der Geschwindigkeit und Temperatur im Feuer und der Plume nach (McCaffrey 1979, S. 8):

Tabelle 2: Parameter für McCaffrey-Formeln

Bereich	$\frac{z}{\dot{Q}^{\frac{2}{5}}}$ $\left[\frac{m}{kW^{\frac{2}{5}}} \right]$	k	η	C
Flamme	< 0,08	$6,8 \frac{m^{\frac{1}{2}}}{s}$	$\frac{1}{2}$	0,9
Intermittend	0,08-0,20	$1,9 \frac{m}{kW^{\frac{1}{5}} * s}$	0	0,9
Plume	>0,20	$1,1 \frac{m^{\frac{4}{3}}}{kW^{\frac{1}{3}} * s}$	$-\frac{1}{3}$	0,9

Somit werden je nach Verhältnis der Höhe zur Wärmefreisetzung, wie in Abbildung 5 dargestellt, unterschiedliche Parameter zur Berechnung der Temperatur und Geschwindigkeit eingesetzt.

Nach der Überprüfung des McCaffrey-Experiments werden die erlangten Kenntnisse im folgenden Versuch angewandt.

4.3. Brandversuch MFPA Leipzig

Zwischen Mai und Juni 2003 haben an der MFPA Leipzig vier Brandversuche stattgefunden. Diese wurden in einem ca. 10 m hohen, ca. 8,2 m langen und 6,2 m breiten Bauwerk durchgeführt.

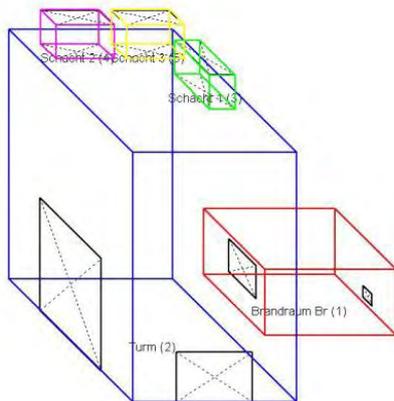


Abb. 7: Geometrie des Versuchsstandes (Kurz 2004, S. 70)

Wie Abbildung 7 zeigt, besteht das Bauwerk aus einem großen Turm in Form eines Quaders, daran angeschlossen ist ein kleinerer Brandraum, der jedoch für diese Untersuchung nicht betrachtet wird. Oberhalb des Versuchsraumes befinden sich drei Schlote, von denen jedoch nur Schlot 1 und Schlot 3 geöffnet werden. Schlot 1 und 3 sind jeweils 1,0 m breit und 1,0 m hoch und 2,5 m bzw. 2,3 m lang. Als Zuluftöffnungen sind zwei Tore vorhanden. Das große Tor ist 4 m breit und 4,5 m hoch und das kleine Tor ist 3 m breit und 2 m hoch. Es wird jedoch ausschließlich das kleine Tor für den Versuch verwendet.

Die Wände des Turms bestehen aus Porenbeton mit einer Dicke von 0,4 m und die Decke enthält Stahlbeton. In Abbildung 8 ist eine Außenaufnahme des Versuchsstandes zu sehen.



Abb. 8: Versuchsstand MFPA Leipzig (Kurz 2004, S. 69)

Als Brennstoff wird Isopropanol verwendet, welcher bei 20 °C Zimmertemperatur im flüssigen Zustand ist.

Der in dieser Arbeit relevante Versuch 3 wurde am 22.05.2003 durchgeführt (Kurz 2004, S. 73).

Zur Messung der Temperaturen werden fünf Messbäume (A-E) im betrachteten Bereich aufgestellt. Diese besitzen je acht Messpunkte, die übereinander in unterschiedlicher Höhe installiert sind. Der niedrigste Messpunkt sitzt auf der Höhe von 2 m über dem Erdboden, der höchste befindet sich auf Höhe 9 m. Die restlichen Messpunkte verteilen sich auf die jeweiligen vollen Meter. Die genauen Maße der einzelnen Bereiche und die Orte der jeweiligen Messpunkte sind im Anhang aufgeführt.

Für den Versuch 3 werden zwei Stahlwannen mit einer Brandfläche von 2x 0,5 m² mittig in dem Turm aufgestellt. Als Brennstoff wird Isopropanol mit einer Gesamtmasse von 20 kg verwendet, welches einen Heizwert von 32000 kJ/kg und eine Brennzeit von 630 Sekunden besitzt. Es herrscht ein leichter Wind von 1,1-2,1 m/s aus der Richtung Ost bis Südost und eine Umgebungstemperatur von 18,7 °C (ebd.).

4.4. Darstellung der Modellierung in Star-CCM+

Für die Darstellung in Star-CCM+ wird jeweils der Realbrandversuch nachgebildet. Dabei werden zunächst die jeweiligen Wände und Grenzen gezogen. In der Abbildung 9 wird dieses Vorgehen anhand der Geometrie des MFPA Leipzig Versuchs beschrieben.

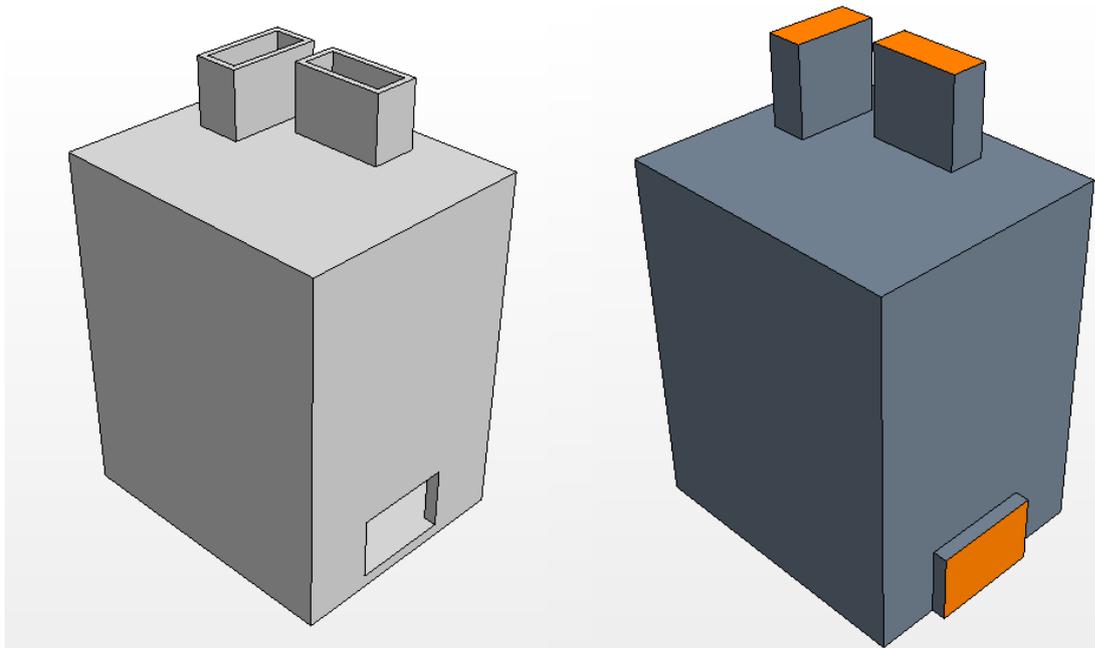


Abb. 9: Vergleich der Wände (links) und dem Innenvolumen (rechts)

Die Abbildung 9 zeigt im linken Bereich diese Wände. Die Öffnungen werden ebenfalls mit in die Geometrie integriert. Aus dieser wird darauf ein Innenvolumen erzeugt, welches auf der rechten Seite der Abbildung zu sehen ist. Die in der Abbildung blau gekennzeichneten Grenzen sind dabei als adiabatische Wände eingestellt. Somit ist kein Energieaustausch durch die Wände möglich. Die orange gekennzeichneten Öffnungen sind in dieser Arbeit als Druckdurchlässe definiert, sodass Ströme hindurchfließen können. Innerhalb des Volumens ist ein Brenner mit einer Masseneintrittsöffnung. Hier wird bei den Verbrennungsmodellen der Brennstoff in das Volumen eintreten, wie in späteren Abschnitten noch näher erklärt wird.

4.4.1. McCaffrey-Experiment

Das durch McCaffrey durchgeführte Experiment wird in einem 6 m langen, 6 m breiten und 8 m hohen Raum nachgebildet, wie in Abbildung 10 zu sehen ist.

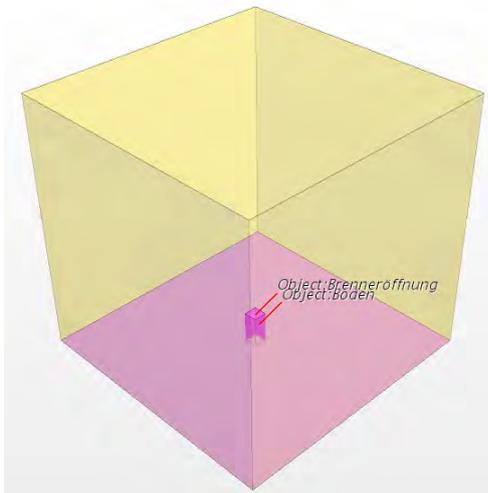


Abb. 10: Beschreibung der einzelnen Bestandteile in der McCaffrey-Simulation

Der für die Simulation relevante Bereich innerhalb des Raumes besteht je nach Gittergröße aus ca. 1.000.000-6.000.000 polyedrische Zellen. In der Mitte des Raumes befindet sich ein Block mit einer Grundfläche von 0,09 m² und einer Höhe von 0,75 m. Dieser simuliert den Brenner in dem Experiment. Dort strömt bei der Betrachtung der EBU- und PPDF-Verbrennung der Brennstoff in den zu messenden Bereich ein, mischt sich mit Sauerstoff, welches als Oxidationsmittel verwendet wird und entzündet sich.

4.4.1.1.Ermittlung des idealen Set-Ups mit VHS

Die physikalischen Zustände werden eingestellt, wobei das Reynold-Averaged Navier-Stokes Turbulenzmodell für turbulente Strömungen verwendet wird.

Zur Ermittlung des idealen Set-Ups werden zuerst unterschiedliche Gittergrößen bei einer festgelegten spezifischen Wärmefreisetzung auf ihre Nutzbarkeit untersucht. Hierbei soll geprüft werden inwieweit sich eine Variation der Gittergröße auf die Ergebnisse auswirkt. Angestrebt wird eine möglichst grobe Gitterstruktur, die gleichzeitig zu vernachlässigbaren Einbußen in ihrer Ergebnisqualität führt. Sobald die ideale Gittergröße ermittelt wurde, wird die spezifische Wärmefreisetzung variiert und mit den Ergebnissen des McCaffrey-Experiments verglichen. Angestrebt wird eine Wärmefreisetzung von 57,5 kW.

Formel 5: Berechnung der Quellhöhe für die Wärmefreisetzung

$$h = \frac{\dot{Q}}{\dot{q}''' * A_{Brandquelle}}$$

Die Veränderung der Wärmefreisetzungsrates über die Zeit wird mithilfe von Variationen in der Quellhöhe realisiert, welche mit Formel 5 berechnet werden können. Für \dot{q}''' werden unterschiedliche spezifische Wärmeströme angenommen, die Brandquelle besitzt eine Fläche von 0,09 m².

Die von der Quelle erzeugte Wärme wird vollständig an ihre Umgebung abgegeben. Das führt zu einer zu untersuchenden Parametervariation, einer Reduzierung der Wärmefreisetzungsrates unter Berücksichtigung eines Verlustanteils, welcher durch direkte Flammenstrahlung an die Umgebung abgegeben wird. Dieser wird mit einem Faktor von 0,8 gewählt.

Hieraus ergeben sich Höhen, die folgend in Tabelle 3 aufgelistet sind.

Tabelle 3: Quellhöhen der jeweiligen Wärmefreisetzungsrates bei 46 kW und 57,5 kW

spezifische Wärmefreisetzungsrates in kW/m ³	Höhen bei 46 kW in m	Höhen bei 57 kW in m
1.000	0,506	0,633
1.200	0,422	0,528
1.500	0,338	0,422
1.700	0,298	0,373
1.800	0,282	0,352

Die Einstellungen, bei denen sich die Ergebnisse dem McCaffrey-Experiment am besten annähern, werden bei der Integration der Verbrennungsmodelle verwendet.

Nachfolgend wird tabellarisch eine Übersicht des Set-Ups für die Untersuchung mit der Volumetric Heat Source dargestellt.

Tabelle 4: McCaffrey Set-Up VHS

Allgemein	
Maße Brandraum	Länge 6 m, Breite 6 m, Höhe 8 m
Anzahl der Zellen bei Zellengröße	
0,03 m	5.980.218 Zellen
0,05 m	2.279.950 Zellen
0,075 m (0,05 cm an der Quelle der Wärmefreisetzung)	992.395 Zellen
Zellenform	Polyeder
Fluid	Luft
Oberfläche Brenner	0,09 m ²
Höhe Brenner	0,75 m
angestrebte Wärmefreisetzung	57,5 kW
Turbulenzmodell	RANS, Standard K-Epsilon Low-Re
Set-Up	
Verbrennungsmodell	Ohne, VHS
Iterationsschritte	5
Delta Time Solverschritte	1 s

**4.4.1.2. Anwendung des idealen Set-Ups auf
und PPDF**

EBU

Sobald die Versuche mit der Volumetric Heat Source erfolgreich sind, werden ein EBU-Verbrennungsmodell und anschließend ein PPDF-Modell in die Untersuchung integriert. Dabei dient nun statt einer gleichmäßigen Wärmefreisetzung die Oberfläche auf dem Brennerblock als Einlassöffnung für den Brennstoff. Der Massenstrom wird, wie folgend in Formel 6 aufgeführt, aus dem Heizwert des Brennstoffes, welcher in diesem Fall Methan ist, und des angestrebten Wertes für die Wärmefreisetzung berechnet.

Formel 6: Berechnung des Massenstroms

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{Hu}$$

Bei einer Wärmefreisetzung von $\dot{Q} = 57,5 \text{ kW}$ und des Heizwertes $Hu = 49320 \text{ kW s/kg}$ ergibt das einen Massenstrom $\dot{m} = 0,00116 \text{ kg/s}$. Der berechnete Massenstrom führt jedoch aufgrund von überlagernden Diffusionseffekten zu Wärmefreisetzungen von ca. 160 kW, sodass der Massenstrom soweit reduziert wird, bis ca. 57,5 kW erreicht werden.

In dem EBU-Versuch kann die chemische Wärmefreisetzung direkt über einen Plot ausgelesen werden. Dieses ist jedoch bei der Berechnung mit dem PPDF-Modell nicht möglich. Aus diesem Grund muss ein anderer Ansatz zur Feststellung der chemischen Wärmefreisetzung und somit zur Berechnung des idealen Massenstroms gewählt werden. Dieses wird mit einer Feldfunktion durchgeführt, in die die Formel 7 eingefügt wird.

Formel 7: Berechnung der chemischen Wärmefreisetzung für das PPDF-Modell

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{H_{f,i}^0}{M} * \rho * \omega_i * [w, A] \right)$$

Hierbei müssen sowohl alle Öffnungen, als auch jeder dort vorhandene Stoff mit integriert werden um eine Varianz der Stoffe darstellen zu können.

Feldfunktionen ermöglichen den Zugriff und die Betrachtung von Skalaren oder Vektoren in simulierten Bereichen. Diese sind vom System voreingestellt oder können vom Benutzer selbständig modifiziert werden (CD-adapco 2013 S. 5743).

Die Berechnung der Rußproduktion erfolgt für das EBU-Modell über zwei Feldfunktionen mit einem passiven Skalar. Passive Skalare sind dimensionslose Variable, die Fluiden oder Partikeln zugeordnet sind. Wie der Name „passiv“ schon andeutet, beeinflussen sie dabei aber nicht die physikalischen Eigenschaften der Simulation.

Formel 8: Berechnung des passiven Skalars für das EBU-Modell

$$pS_{EBU} = \frac{CRR * \gamma_s}{Hu * \rho}$$

Mit Formel 8 wird der passive Skalar für das EBU-Modell berechnet, welcher folgend in Formel 9 eingesetzt wird, um die Rußdichte zu bestimmen.

Formel 9: Berechnung der Rußdichte für das EBU-Modell

$$\rho_s = pS_{EBU / PPDF} * \rho$$

Für die Berechnung der Rußproduktion mit dem PPDF-Modell erfolgt ein Ansatz über den jeweiligen Massenstrom an der Brennstoffeinlassöffnung, welcher mit Formel 10 ermittelt wird.

Formel 10: Berechnung des passiven Skalar für das PPDF-Modell

$pS_{PPDF} = \dot{m} * \gamma_s$

Dieser passive Skalar wird wiederum mit der Umgebungsdichte multipliziert und somit kann die Rußdichte mit Formel 9 errechnet werden.

Die physikalischen Zustände werden nach Anleitung im Star-CCM+ Handbuch für die Verbrennung mit dem EBU-Modell eingestellt und für die eigenen Untersuchungen modifiziert (CD-adapco 2013, S. 9572ff). Veränderungen gegenüber des VHS-Set-Ups werden nachfolgend tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5: McCaffrey Set-Up EBU / PPDF

Set-Up	
Verbrennungsmodell	Standard EBU / Non-Adiabatic PPDF Equilibrium
Brennstoff	CH4 (Methan)
Massenstrom	9,2*10 ⁻⁴ kg/s
Stoffzusammensetzung Luft	23,3 % O ₂ , 76,7 % N ₂

4.4.2. Brandversuch MFPA Leipzig

Für die Brandsimulation der Brandversuchs Nummer 3 im MFPA Leipzig wird der Turm mit Schlot 1 und 3, sowie dem Tor als Zuluftöffnung maßstabsgetreu modelliert.

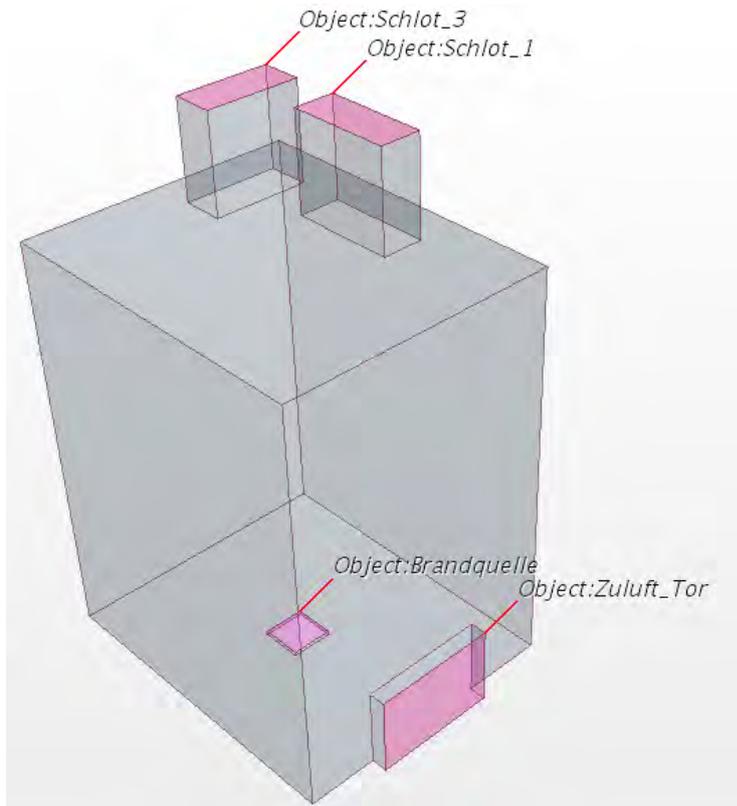


Abb. 11: Beschreibung der einzelnen Bestandteile in der MFPA Leipzig-Simulation

Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, wird das im zu betrachtenden Bereich entstandene Volumen in gleichmäßig verteilte polyedrische Zellen unterteilt. Ein 0,1 m hoher Block mit 10 m² wurde in der Mitte des Turms platziert, der als Brenner fungiert. Wie im McCaffrey Experiment strömt der gasförmige Brennstoff in den zu betrachtenden Bereich ein und wird dabei entzündet.

Zuerst wurden die Simulationen mit Propan als Brennstoff berechnet, um grundlegende fehlerhafte Einstellungen bei den Modellen und der Geometrie ausschließen zu können. Propan dient dabei als Testbrennstoff, weil die Erkenntnisse über diesen Stoff viel untersucht und weitreichend sind. Sobald die Ergebnisse im Rahmen und nachvollziehbar waren, wurde Isopropanol für Propan eingesetzt, welches sich maßgeblich unterscheidet. Die Berechnungen werden somit vollständig mit Isopropanol durchgeführt. Problematisch ist dabei, dass Isopropanol nicht in der von Star-CCM+ mitgelieferten Datenbank vorhanden ist. Auch ist

Isopropanol im Gegensatz zu Propan bei Zimmertemperatur im flüssigen Zustand, aus diesem Grund sind in den weit verbreiteten Datenbanken wie unter anderem Burcat's Thermodynamic Data (garfield.chem.elte.hu 2006) fast ausschließlich die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Stoffes im flüssigen Zustand zu finden. Diese unterscheiden sich zu der gasförmigen Phase erheblich und sind dementsprechend hier nicht anwendbar.

Nach intensiver Eigenrecherche wurde jedoch die Quelle, der in der Star-CCM+ Datenbank aufgelisteten Stoffe, gefunden (sandia.gov 2014). Hier findet sich auch eine Auflistung der Eigenschaften von Isopropanol im gasförmigen Zustand, welche direkt in Star-CCM+ eingefügt und somit ohne Modifizierung zur Verwendung verfügbar sind. Es wird sich folgend auf die Werte in dieser Datenbank bezogen und aufgrund der standardmäßigen Verwendung in Star-CCM+ davon ausgegangen, dass diese auch realistische Werte beinhalten.

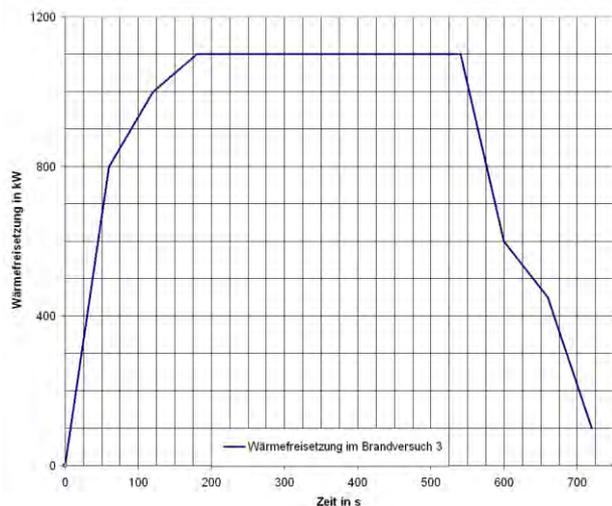


Abb. 12: Wärmefreisetzung nach Dipl.-Ing. E. Wilk

Wie in Abbildung 12 zu sehen, variiert die Wärmefreisetzung zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Die Deckenöffnungen und das Tor werden als Druckaustritt eingestellt, damit ein Druckausgleich und somit Luftströmungen entstehen können.

4.4.2.1. Simulierung mit idealen VHS Set-Up

Wie schon bei der McCaffrey-Untersuchung wird auch bei dem MFPA Leipzig Versuch zunächst eine Volumetric Heat Source auf dem Brenner platziert. Hierbei dienen wiederum die Werte des Realbrandversuchs mit einer Wärmefreisetzung von maximal 1100 kW aus der folgenden Tabelle 6 als Maßstab.

Die Ergebnisse aus dem McCaffrey-Experiment mit einer volumetrischen Wärmequelle werden hierbei als Ansatz für die weitere Untersuchung verwendet. Die ideale spezifische Wärmefreisetzung von 1.800 kW/m^3 wird gewählt und mit Formel (5) die Quellhöhen zur jeweiligen Zeit berechnet. Diese Quellhöhen sind folgend aufgeführt.

Tabelle 6: Höhen der volumetrischen Quelle zur Wärmefreisetzung

Wärmefreisetzung in kW	Höhe der volumetrischen Quelle in m	
	ohne Reduktion	mit Reduktion (20%)
800	0,566	0,453
1000	0,708	0,566
1100	0,778	0,622
650	0,425	0,34
400	0,318	0,255
100	0,071	0,0566

Die Wärmeleistung wird erneut einmal vollständig an ihre Umgebung abgegeben und einmal um den Anteil für die direkte Flammenstrahlung um 20% reduziert. Zusätzlich werden zwei unterschiedliche Gittergrößen verwendet und auf Unterschiede in ihren Ergebnissen ausgewertet.

Es werden prinzipiell in Star-CCM+ die gleichen Einstellungen für die volumetrische Wärmequelle gewählt wie bei dem McCaffrey-Experiment, jedoch wird die Quelle der Wärmefreisetzung durch die Höhe der Brenners von 0,1 m im Vergleich niedriger angesetzt. Auch wird die Gittergröße den Maßen angepasst.

Eine Übersicht des Set-Ups ist folgend in Tabelle 7 zu sehen.

Tabelle 7: MFPA Leipzig Set-Up VHS

Allgemein	
Maße Brandraum	Länge 8,2 m, Breite 6,2 m, Höhe 10 m
Maße der Öffnungen	Schlot 1: Länge 2,5 m, Breite 1 m, Höhe 1 m Schlot 3: Länge 2,3 m, Breite 1 m, Höhe 1 m Tor: Breite 3 m, Höhe 2,5 m
Anzahl der Zellen bei Zellengröße	
0,12 m	1.160.000 Zellen
0,2 m	270.000 Zellen
Zellenform	Polyeder
Fluid	Luft
Umgebungstemperatur	18,7 °C
berechnete Zeit	750 s
angestrebte Wärmefreisetzung	max. 1.100 kW/m ³
Turbulenzmodell	RANS, Standard K-Epsilon Low-Re
Set-Up	
Verbrennungsmodell	keins, nur punktuelle Wärmefreisetzung
Quellhöhen	Siehe Tabelle 6

4.4.2.2. Anwendung des idealen Set-Ups auf EBU und PPDF

Die Ergebnisse der Untersuchung mit VHS werden auf die Berechnungen mit den Verbrennungsmodellen angewendet.

Tabelle 8: Brennstofffreisetzung im Turm

Zeit in s	Wärmefreisetzungsrate in kW	EBU eingestellter Massenstrom in kg/s	PPDF eingestellter Massenstrom in kg/s
0	0	0	0
60	800	0,0212	0,02606
120	1.000	0,0268	0,03257
180-540	1.100	0,0295	0,0358
600	600	0,0161	0,01954
660	450	0,0121	0,01466
720	100	0,0027	0,003257
750	0	0	0

Wie in Tabelle 8 zu sehen, wird in dem Brandversuch 3 mit Isopropanol nach den Brandergebnissen von dem Herrn Dipl.-Ing. E. Wilk vom Brandschutz Consult aus Leipzig eine maximale Wärme von 1100 kW freigesetzt. Das entspricht bei einem Heizwert von 30,7 MJ/kg einem Massenstrom von 0,0358 kg/s. Da jedoch bei vorherigen Tests beim EBU-Modell zum Vorschein kam, dass dieser Massenstromwert in der Berechnung zu einer im Vergleich zu hohen Wärmefreisetzung führt, wird der Massenstrom soweit gesenkt bis die 1100 kW erreicht werden. Dieses führt beim EBU-Modell zu einem eingestellten Wert von 0,0295 kg/s, der nach Tabelle 7 ab 180 s vollständig erreicht wird und ab 540 Sekunden wieder absinkt. Beim PPDF-Modell hingegen wird der Massenstrom nicht reduziert.

Tabelle 9: MFPA Leipzig Set-Up EBU / PPDF

Set-Up	
Wärmefreisetzungsmodell	Standard EBU
Brennstoff	C ₃ H ₈ O (Isopropanol)
Massenstrom	Siehe Tabelle 8
Stoffzusammensetzung Luft	23,3 O ₂ , 76,7 N ₂

5. Auswertung der Berechnungsergebnisse

5.1. Ergebnisse McCaffrey

Aufgrund der gleichmäßigen Geometrie sind die Grafiken in dieser Untersuchung ausschließlich mit einem Schnitt in der X-Achse dargestellt. Es wurden 100 Messpunkte in gleichmäßigen Abständen mittig über der Brandquelle platziert, die die Temperaturen ab einer Höhe von 0,05 m bis 5,2 m messen.

5.1.1. VHS

Zuerst werden als Einstieg und grobe Einstufung der Berechnungsergebnisse unterschiedliche Wärmefreisetzungsraten, sowie unterschiedliche Gittergrößen bei einer Wärmeabgabe ohne Reduzierung um den Flammstrahlungsanteil untersucht. Angestrebt werden hierbei ca. 57,5 kW an Wärmefreisetzung.

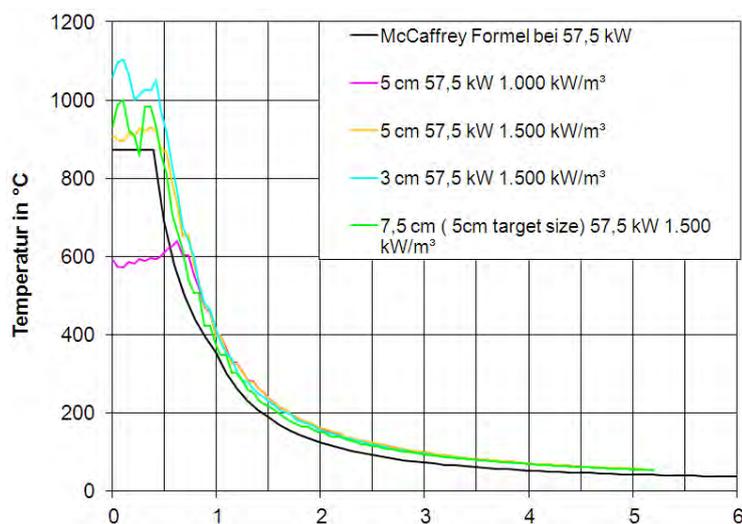


Abb. 13: McCaffrey – VHS Temperaturenvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion

Es ist in Abbildung 13 zu erkennen, dass die Temperaturwerte bei einer Gittergröße von 5 cm und einer Wärmefreisetzungsrate von 1000 kW/m³ wenige Zentimeter über dem Brennerblock mit über 250 °C den mit der McCaffrey-Formel errechneten Wert unterschreitet. Bei einer Höhe von ca. 0,60 m schneiden sich die beiden Linien, doch während die McCaffrey-Kennlinie stark absinkt, bleibt der Wert der Linie bei 1000 kW/m³ relativ konstant und sinkt erst verzögert im gleichen Maße ab. Es ist dabei jedoch zu bemerken, dass die Linie dauerhaft ca. 20 °C über der McCaffrey Formel bleibt. Durch die niedrigeren Temperaturen nahe der Quelle sind die Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls in diesem Bereich niedriger als bei den Formelwerten, wie man in Abbildung 14 sehen kann. Die Geschwindigkeitskurve hat

einen flacheren Anstieg und erreicht auch nur eine Höhe von maximal 4,1 m/s im Vergleich zur Höhe von 4,3 m/s nach den McCaffrey Formelwerten. Bei einer Höhe von 1,2 m schneiden sich wiederum beide Kennlinien, wobei die Linie bei einer 5 cm Gittergröße und 1000 kW/m³ abflacht und sich immer weiter von den Formelwerten entfernt.

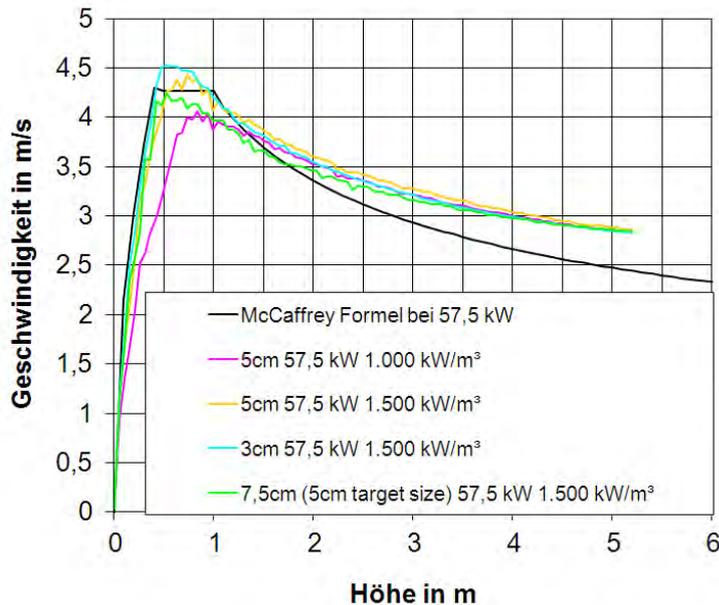


Abb. 14: McCaffrey – VHS Geschwindigkeitsvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion

Aus diesen Erkenntnissen wurden nötige Änderungen in der Wärmefreisetzungsrate sichtbar. Die Wärmefreisetzungsraten der folgenden Berechnungen wurden um 50% auf 1500 kW/m³ erhöht.

Die nachstehenden Berechnungen zeigen eine Annäherung an die Formelwerte, wobei der Wert bei einer Gittergröße von 3 cm am weitesten heraussticht. Die Werte bei 5 cm und 7,5 cm (mit einem target size an der volumetrischen Wärmequelle von 5 cm) stimmen mit den Formelwerten am besten überein, wobei die Werte bei der Gittergröße von 7,5 cm jedoch im Bereich VHS stark schwankt. Ab einer Höhe von ca. 0,75 m gleichen sich die Messergebnisse an, sodass es ab hier keine Unterschiede mehr macht, ob eine spezifische Wärmefreisetzungsrate von 1000 kW/m³ oder 1500 kW/m³ vorliegt. Auch bei den Strömungsgeschwindigkeiten zeigt sich ab einer Höhe von ca. 1,2 m eine Angleichung der berechneten Ergebnisse und somit auch eine Entfernung von den Formelwerten. Dieses führt zu der Erkenntnis, dass die spezifische Wärmefreisetzungsrate ab einem gewissen Punkt nebensächlich ist. Ebenso ist zu erkennen, dass eine Gittergröße im Bereich der VHS von 7,5 cm zu grob für eine Berechnung ist, da die (nicht enthaltenen) Temperatur und Geschwindigkeitswerte bei 7,5 cm weit niedriger sind als bei 5 cm und trotz der Verringerung

auf der Gittergröße von 5 cm lokal innerhalb der volumetrischen Wärmequelle es immer noch zu stark schwankenden Ergebnisse führt. Aus diesem Grund wird sich folgend auf eine geringere Gittergröße fokussiert.

Als nächstes werden verschiedene Wärmefreisetzungsraten mit einer Reduktion um den Strahlungsanteil simuliert.

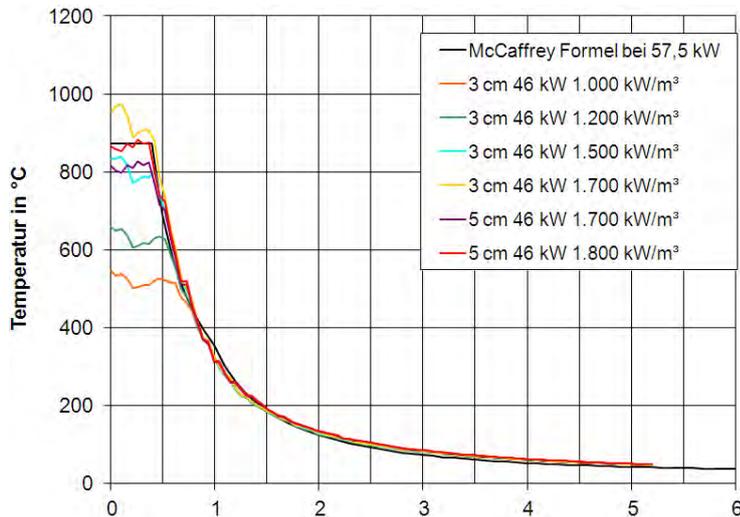


Abb. 15: McCaffrey – VHS Temperaturvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion

Es wird sich zu Beginn auf eine Gittergröße von 3 cm beschränkt. Abbildung 15 zeigt ab einer Höhe von ca. 0,5-0,75 m eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Formelwerten. Um eine Aussage über die Abweichungen bei Gitteränderungen machen zu können, wird abermals eine Gittergröße von 5 cm gewählt und berechnet. Auch hier zeigt sich zwar in geringer Höhe eine Abweichung im Vergleich zur gleichen Wärmefreisetzungsrate mit 3 cm, ab einer Höhe von ca. 0,5 m überschneiden sich die Kurven jedoch wieder und unterscheiden sich nur noch minimal. Die Werte bei einer Gittergröße von 5 cm und 1.800 kW/m³ zeigen hierbei über die gesamte Höhe die besten Annäherungen an den Formelwerten.

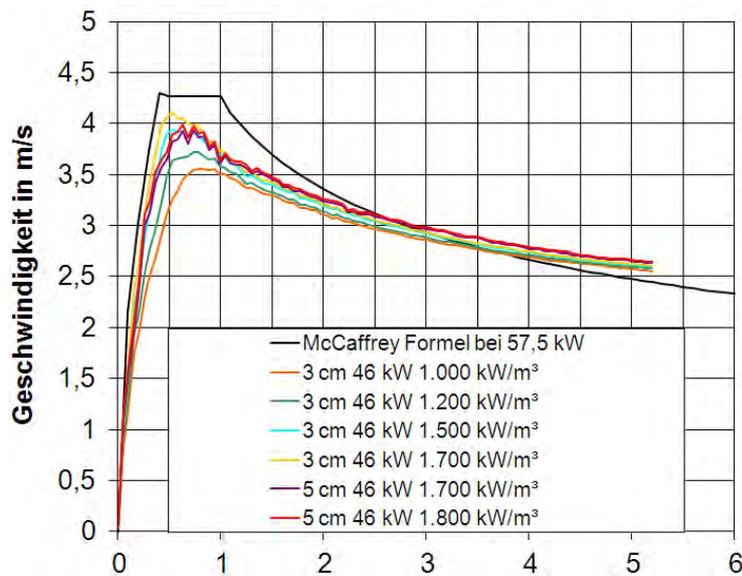


Abb. 16: McCaffrey – VHS Geschwindigkeitsvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion

Bei dem Vergleich der Geschwindigkeiten in Abbildung 16 zeigt sich, dass die Formelwerte in Höhe 0,5 bis 1 m nicht erreicht werden können. Die simulierten Geschwindigkeiten liegen mindestens 0,5 m/s unterhalb der Werte von McCaffrey. Es zeigt sich jedoch, dass in Höhen von 2 bis 5 m die Werte näher an den Formelergebnissen liegen als bei den Werten ohne Reduktion um den Strahlungsanteil.

Es kann somit festgestellt werden, dass zum einen die Ergebnisse mit Reduktion sich näher an den Formelwerten befinden und zum anderen, dass ab dem relevanten Bereich über der volumetrischen Wärmequelle im Bereich von 3 bis 5 m die Werte unabhängig von der Gittergröße sind. Auch ist in diesem Versuch ab einer bestimmten Entfernung vom Boden die Höhe der Wärmefreisetzung nicht relevant.

5.1.2. EBU

Bei den verschiedenen Simulationen mit den Verbrennungsmodellen zeigte sich schnell, dass einige Anpassungen an den Turbulenzmodellen durchgeführt werden mussten, die folgend in Tabelle 10 aufgelistet sind.

Tabelle 10: Modifizierung der Turbulenzmodelle

Turbulenzmodell	Einstellung
Standard-K-Epsilon Low-Re	1st Order
Segregated Flow	2nd Order
Segregated Fluid Enthalpy	2nd Order
Segregated Species	2nd Order

Die übrigen Eigenschaften wurden standardmäßig übernommen.

Bei dem in Kapitel 4.4.1.2. berechneten Massenstrom zeigte sich bei einer Gittergröße von 5 cm zum einen eine zu hohe chemische Wärmefreisetzungsrate von ca. 67 kW, sowie zum anderen auch im Vergleich zu den mit der McCaffrey-Formel berechneten Werten zu hohe Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten. Aus diesem Grund wurde, wie schon bei den Versuchen mit der volumetrischen Wärmequelle eine Reduktion des Massenstroms um einen Strahlungsanteil von 20 % auf $9,2 \cdot 10^{-4}$ kg/s durchgeführt. Durch diese Reduktion wurde bei einer Gittergröße von 5 cm eine chemische Wärmefreisetzungsrate von 56 kW erreicht, die folgende Ergebnisse liefern.

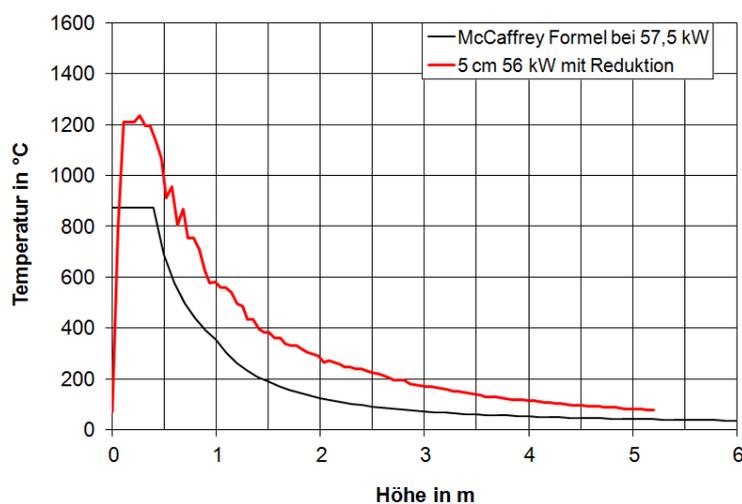


Abb. 17: McCaffrey - EBU Temperaturvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion

Trotz der Reduktion um 20 % sind, wie in Abbildung 17 zu sehen, weiterhin durchgehend zu hohe Temperaturen im Vergleich zu den Formelwerten zu messen. Es werden in dem Flammenbereich Spitzenwerte über 1200 °C erreicht und übersteigen somit die Werte mit der McCaffrey-Formel um ca. 370 °C. Ab einer Höhe von ca. 0,4 m sinken die Temperaturen im berechneten Fall wie auch bei den Formelwerten hinab, jedoch bleiben die berechneten Temperaturen bis zu einer Höhe von 3 m um mindesten 100 °C zu hoch und nähern sich erst in größeren Höhen wieder an. Gleichzeitig kann jedoch auch festgestellt werden, dass die Temperaturkurve sich ähnlich wie die der Formelwerte zunächst stark absinkt und oberhalb des Flambereichs wieder abflacht.

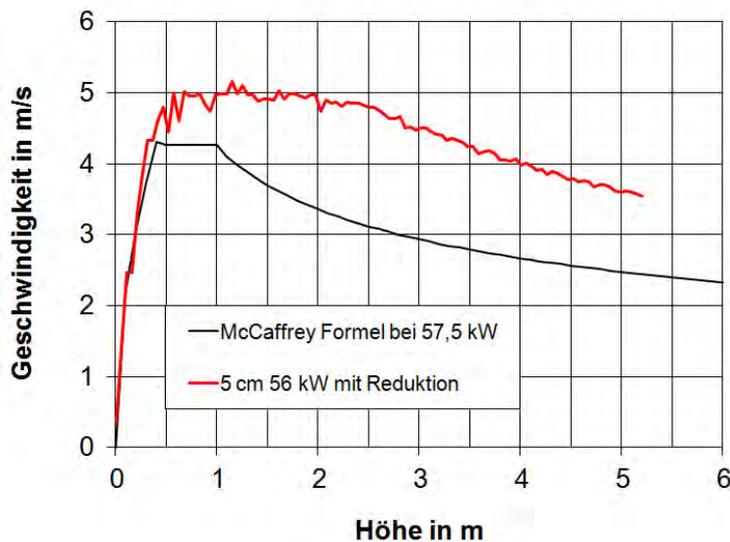


Abb. 18: EBU Geschwindigkeitsvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion

Auch die Strömungsgeschwindigkeiten in und oberhalb des Flambereichs übersteigen die Formelwerte. Abbildung 18 zeigt, dass die Geschwindigkeiten nach McCaffrey im Flambereich konstant bei ca. 4,3 m/s liegen und im unregelmäßigen, sowie im Plumbereich, wiederum zuerst stark absinken und danach abflachen. Bei den von Star-CCM+ berechneten Werten jedoch zeigen sich diese Eigenschaften kaum. Es werden Geschwindigkeiten von über 5 m/s erreicht, die bis zu einer Höhe von 2 m gering schwanken und in größeren Höhen nahezu linear wieder absinken. Eine Kurve wie bei den Formelwerten zeigt sich nicht. Die abweichenden Strömungsgeschwindigkeiten lassen sich durch die hohen Temperaturen erklären, die in Abbildung 17 dargestellt sind.

5.1.3. PPDF

Bei den Berechnungen mit dem PPDF-Verbrennungsmodell wurden die Modifizierungen der Turbulenzmodelle aus dem EBU-Versuch übernommen und angewendet. Bei der Überprüfung der Wärmefreisetzung mit dem gleichen Massenstrom zeigen sich jedoch Unterschiede. Während der Massenstrom beim EBU-Modell verringert werden musste um eine angenäherte Wärmefreisetzung von 57,5 kW zu erreichen, stimmte der berechnete Wert bei dem PPDF-Modell gut überein, sodass er direkt für eine Wärmefreisetzung von 57,5 kW übernommen werden konnte. Auch in den Ergebnissen zeigen sich erhebliche Unterschiede, wie in den folgenden Abbildungen 19 und 20 dargestellt.

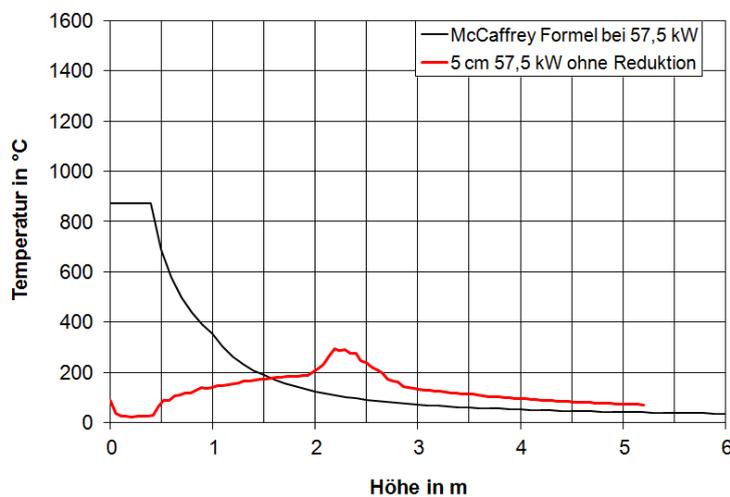


Abb. 19: McCaffrey - PPDF Temperaturvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion

Eine Verbrennung direkt an der Brennstoffeintrittsöffnung findet nicht statt. Stattdessen beginnt die Verbrennung ab einer Höhe von ca. 0,5 m, steigt dort nahezu linear bis 2 m auf 200 °C und erreicht in Höhe von ca. 2,3 m seinen Maximalwert von ca. 290 °C. Im Vergleich zu den Formelwerten beträgt dieser Maximalwert nur ein Drittel des angestrebten Wertes von ca. 873 °C. Auch die Temperaturkurve ähnelt in keiner Weise der nach McCaffrey.

Dies lässt sich auf eine instabile Rechnung zurückführen, welche ein unphysikalisches Verbrennungsbild zeigt.

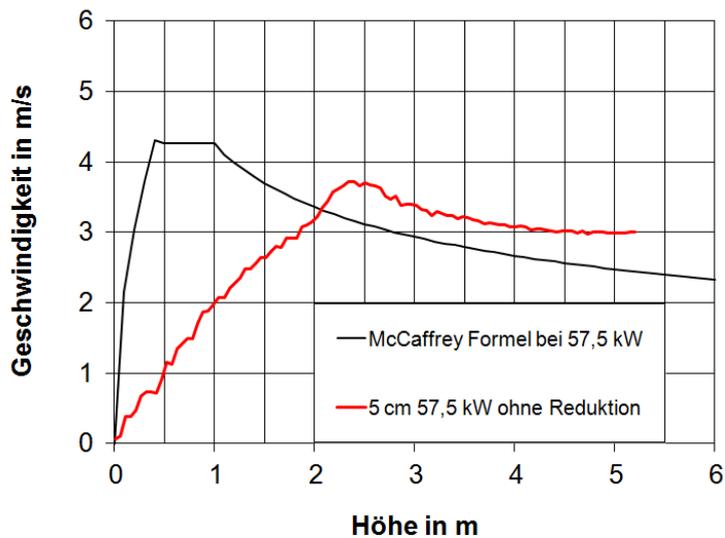


Abb. 20: PPDF Geschwindigkeitsvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion

Bei den Strömungsgeschwindigkeiten bietet sich ein ähnliches Bild. Die Geschwindigkeiten erhöhen sich linear auf bis zu 3,7 m/s in 2,3 m Höhe und nähert sich zumindest vom Wert her an den angestrebten Wert von 4,3 m/s an. Die Abbildung 20 zeigt jedoch, dass dieser Maximalwert und somit auch die Flamme stark verschoben ist und nicht, wie erwartet, direkt an der Eintrittsöffnung abbrennt. Der Brennstoff scheint sich über einen größeren Bereich zu verteilen und zu verbrennen, sodass sich keine Temperaturen, und resultierend keine entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten, entwickeln können, die sich den Formelwerten nach McCaffrey annähern.

5.2. Ergebnisse MFPA Leipzig

Zur Darstellung der Ergebnisse wurde für die Temperatur und der chemischen Wärmefreisetzung der relevante Bereich im Mittelpunkt in X-Achse geschnitten. Für die Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten wurden, neben dem bereits genannten Schnitt in der X-Achse, zentral die Y-Achse und die Z-Achse in Höhe 1,2 m, 5,0 m und 10,1 m geschnitten. Zur Messung der Luftein- bzw. -ausströmung wurde jeweils ein Schnitt in den Schloten und im Tor eingestellt. Es befinden sich sechs gleichmäßig auf einer Ebene verteilte Messpunkte in jedem Schlot und im Tor, über die ein Mittelwert zur gemessenen Temperatur gebildet wird.

5.2.1. VHS

Aufgrund der guten Übereinstimmungen bei den Temperaturwerten in der McCaffrey-Untersuchung mit einer Wärmefreisetzungsrate von 1.800 kW/m^3 bei einer Reduktion um den Strahlungsanteil von 20% wird dieser Wert als Ansatz für die Untersuchung des MFPA Leipzig Versuchs mit einer volumetrischen Wärmequelle genommen. Hieraus lassen sich die Quellhöhen zur jeweiligen Zeit berechnen, die in Tabelle 6 auf Seite 30 aufgeführt sind.

5.2.1.1. Temperaturen

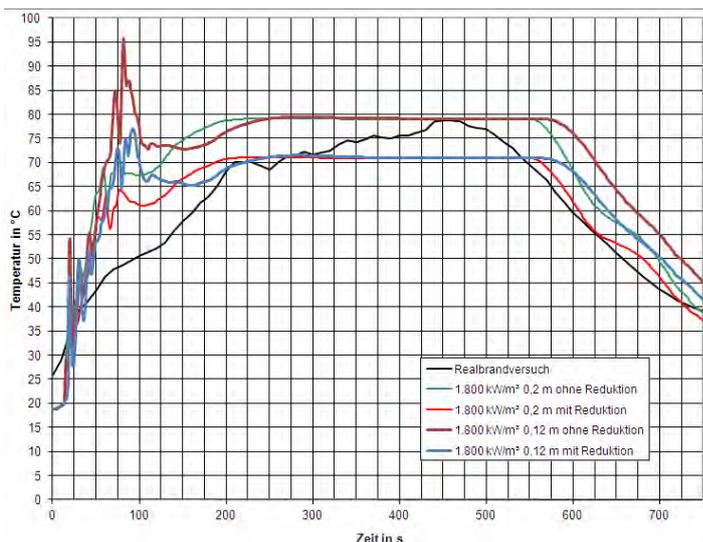


Abb. 21: MFPA Leipzig – VHS Temperaturen 0,1 m unter der Decke

Abbildung 21 lässt erkennen, dass die Temperaturen im Realbrandversuch erst ab ca. 440 s ihren maximalen Wert erreichen und nach kurzzeitigem Erreichen ihres Maximums bis zum

Ende der betrachteten Zeit auf ca. 40 °C absinken. Zu keiner Zeit bleiben die Temperaturen jedoch konstant, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sich betrachtete Bereich bei gleicher Wärmefreisetzung sich immer weiter aufheizen würde. Dass dieses nicht geschieht, liegt an der Verringerung der Wärmefreisetzung ab 540 s.

Im Vergleich dazu steigen die Werte in den Berechnungen steiler auf und erreichen schon ab 225 s ihr Maximum, welches sie bis zur Reduktion der Wärmefreisetzung ab 540 s beibehalten, was an der konstanten Wärmefreisetzung liegt.

Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse bei 1.800 kW/m³ ohne Reduktion um den Strahlungsanteil im Vergleich zu den Ergebnissen des Realbrandversuchs gleichwertige Temperaturen liefern, wohingegen die Temperaturen mit Reduktion ca. 10 °C niedriger angesiedelt sind.

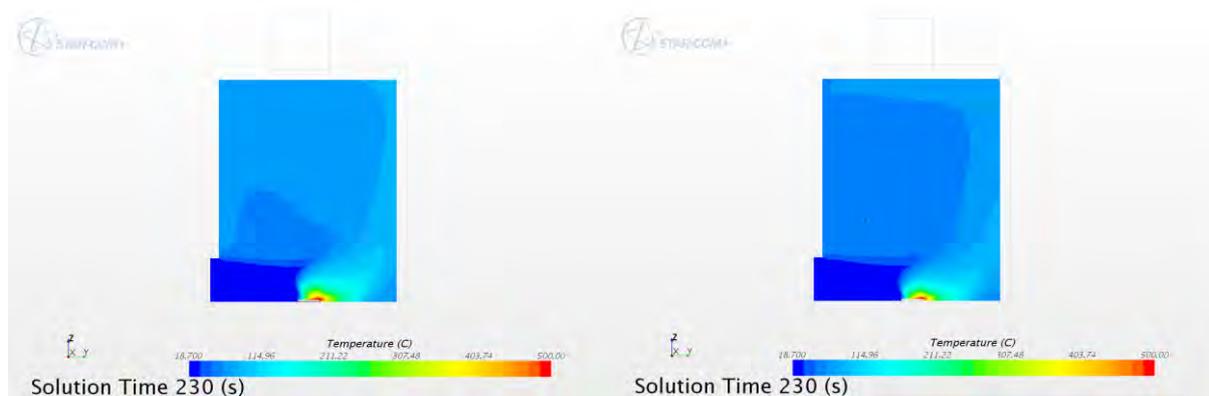


Abb. 22: MFPA Leipzig - VHS Temperaturen ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) nach 230 s

Diese Ergebnisse zeigt auch ein Vergleich der Schnitte im betrachteten Bereich durch die X-Achse in der Abbildung 22, in denen zu sehen ist, dass der Bereich ohne Reduktion im Umfeld des Brenners höhere Temperaturwerte anzeigt und sich diese über den ganzen Raum bis zur Zuluftöffnung erstrecken.

Auch bei den Temperaturen, die in den Schlotöffnungen gemessen werden, lassen sich ähnliche Ergebnisse aufweisen. Die folgende Abbildung 23 zeigt die Maximaltemperaturen in den jeweiligen Schloten.

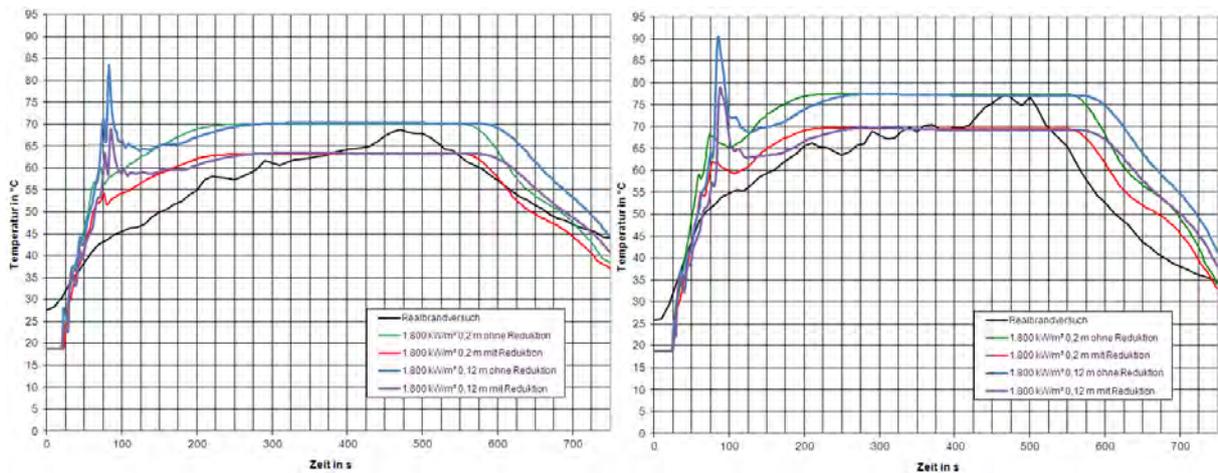


Abb. 23: MFPA Leipzig - VHS Temperaturen in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)

Genau wie bei den Ergebnissen, die 0,1 m unterhalb der Decke gemessen wurden, nähern sich die Werte von der Berechnung ohne Reduktion stärker an die Ergebnisse des Realbrandversuchs an als mit Reduktion. Schlot 1 weist bei den Berechnungsergebnissen ohne Reduktion Unterschiede von wenigen Graden auf und zeigt nach 470 s im Schlot 3 nahezu exakte Werte.

Die im Realbrandversuch vorhandenen Messbäume A, B und C hingegen zeigen besonders in den niedrigen Höhenbereichen starke Abweichungen zu den berechneten Temperaturen, wie folgend in den Abbildungen 24 bis 26 zu sehen ist.

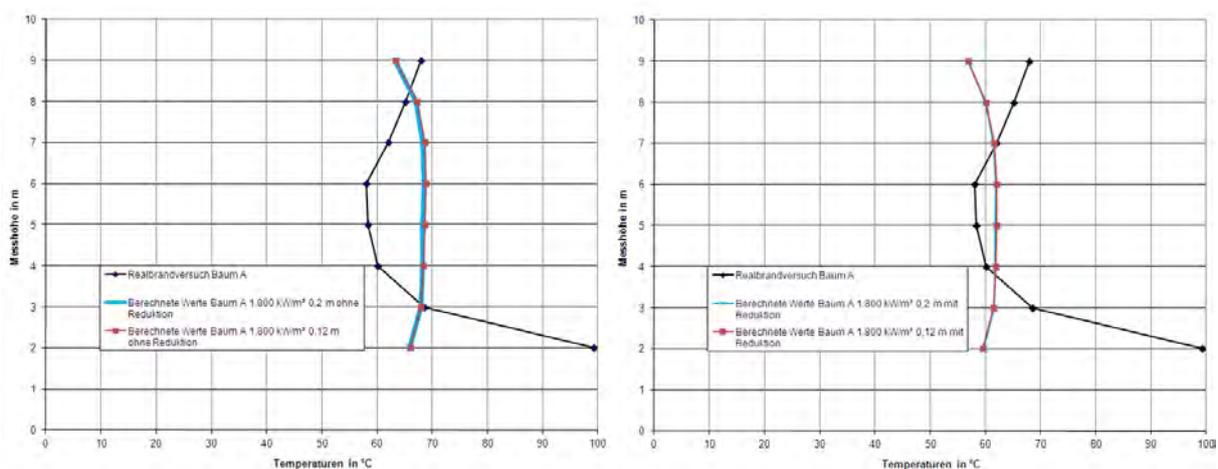


Abb. 24: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum A ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) bei 300 - 500 s

Am Messbaum A sind im Vergleich zu Messbaum B und C die Temperaturunterschiede am größten. Während der Realbrandversuch am Messpunkt in 2 m Höhe durchschnittlich über 100 °C misst, werden in der gleichen Höhe nur ca. 66 °C in den Simulationen ohne Reduktion

erreicht. Bei 3 m stimmen die Temperaturen gut überein, jedoch sinken die im Realbrandversuch gemessenen Temperaturen in den Höhen von 3 bis 6 m, während die Berechnungen relativ konstante Werte anzeigen. Die Differenzen liegen hier bei um die 10 °C. Bei ca. 8 m stimmen die Daten wieder überein und überschneiden sich.

Die Temperaturwerte der Berechnungen mit Reduktion zeigen nahezu gleiche Ergebnisse wie die Berechnungen ohne Reduktion, jedoch liegen sie dauerhaft ca. 6 bis 7 °C niedriger.

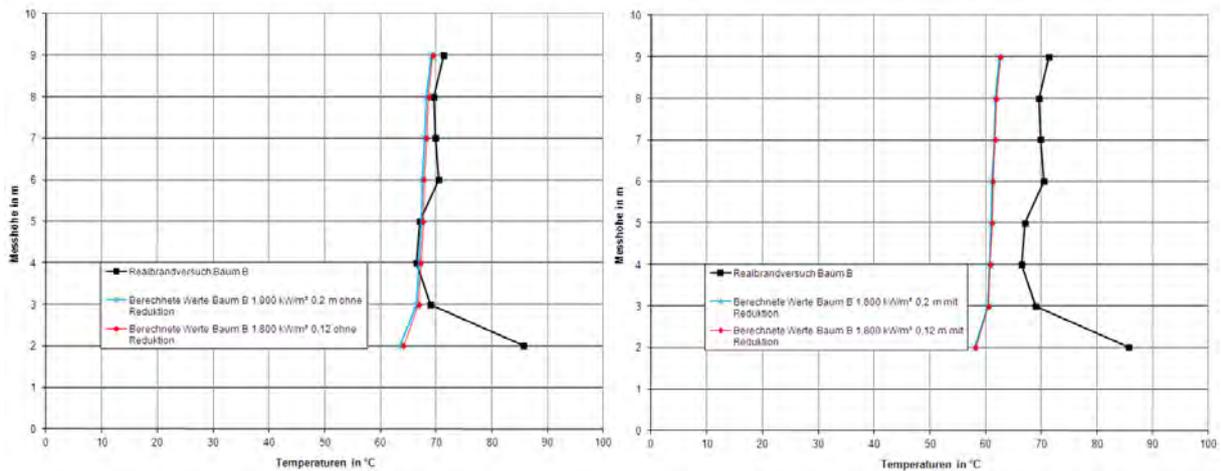


Abb. 25: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum B ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) bei 300 - 500 s

Auch am Messbaum B unterscheiden sich die Daten des Realbrandversuchs von den Berechnungen auf 2 m Höhe erheblich. Hier werden Unterschiede von 33 bis 40 °C gemessen. Ab einer Höhe von 3 m stimmen die Werte der Berechnung ohne Reduktion jedoch gut mit den Realbrandwerten überein und unterscheiden sich nur um 1 bis 2 °C. Die Temperaturen der Berechnungen mit Reduktion liegen wiederum um 6 bis 7 °C niedriger.

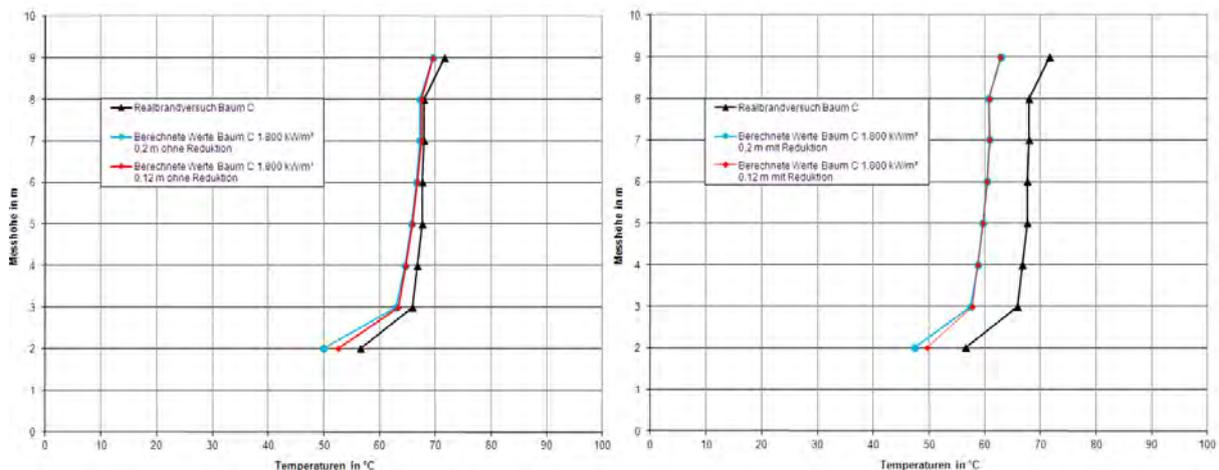


Abb. 26: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum C ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) bei 300 - 500 s

Am Messbaum C zeigen sich die besten Ergebnisse. Hier liegen die Unterschiede in 2 m Höhe bei 4 bis 6 °C und nähern sich in größerer Höhe weiter an. Auch liegen die Berechnungen ohne und mit Reduktion im Vergleich zu den anderen Messbäumen näher beieinander und unterscheiden sich nur um maximal 6 °C

Aus diesen Ergebnissen können zwei Punkte gefolgert werden. Zum einen liegen die Ergebnisse mit den Berechnungen ohne Reduktion mit den Werten des Realbrandversuchs bis auf einzelne Ausnahmen nur um wenige Grade auseinander und liefern dementsprechend bessere Resultate als mit Reduktion.

Zum anderen zeigen die Temperaturen, dass es im stationären Zustand im Bereich 300 bis 500 s vernachlässigbare Unterschiede bei den zwei unterschiedlichen Gittergrößen gibt. Somit kann zumindest in dem Gitterbereich von 0,12 m bis 0,2 m daraus geschlossen werden, dass die Temperaturwerte unabhängig von der Gittergröße sind.

5.2.1.2.Strömungsgeschwindigkeiten

In Höhe der Wärmefreisetzungquelle werden nach ca. 50 Sekunden Spitzengeschwindigkeiten von ungefähr 7 m/s erreicht, die folgend in Abbildung 27 dargestellt sind. Nach dieser 50 Sekunden steigen die Turbulenzen an den Öffnungen, sodass mehr Luft in den Raum ein- bzw. ausströmt. Dieser Effekt drückt die freigesetzte Wärme gegen die gegenüberliegende Wand und lässt dort die Temperaturen und somit auch die Strömungsgeschwindigkeiten sinken.

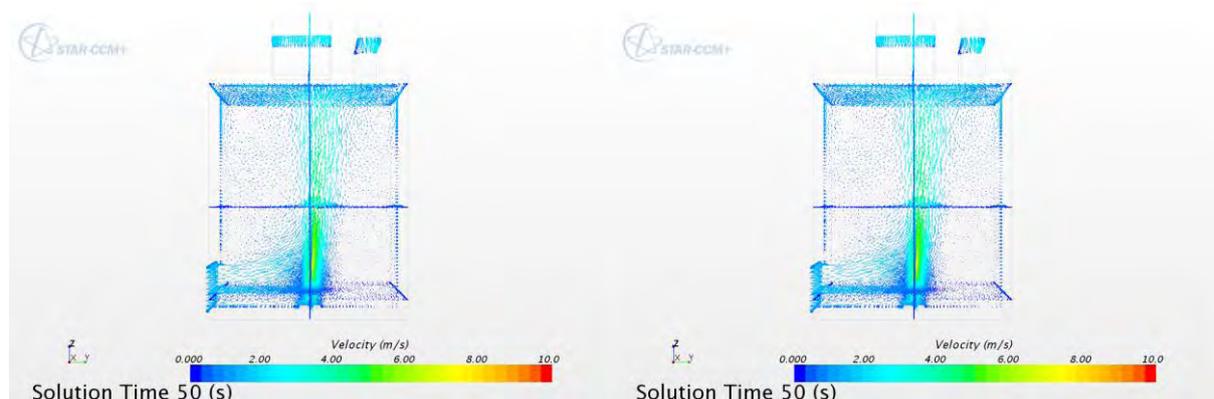


Abb. 27: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) nach 50 s

In den Schloten 1 und 3 und im Zulufttor erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten genau wie bei den Temperaturen nach ca. 230 s ihr Maximum und bleiben bis zur Verringerung der

Wärmezufuhr konstant auf dem Wert. Hierbei lassen sich bei der Berechnung zwischen 230 s und 540 s durchschnittlich Geschwindigkeiten bis zu 6,6 m/s im Schlot 3, 5,3 m/s im Schlot 1 und 3,7 m/s im Zulufttor messen, wie folgend in den Abbildungen 28 und 29 zu sehen ist. Da keine Tabelle für die Werte des Realbrandversuchs vorhanden war, wurden diese mithilfe einer Abbildung aus der Diplomarbeit von M. Kurz grob ermittelt [8].

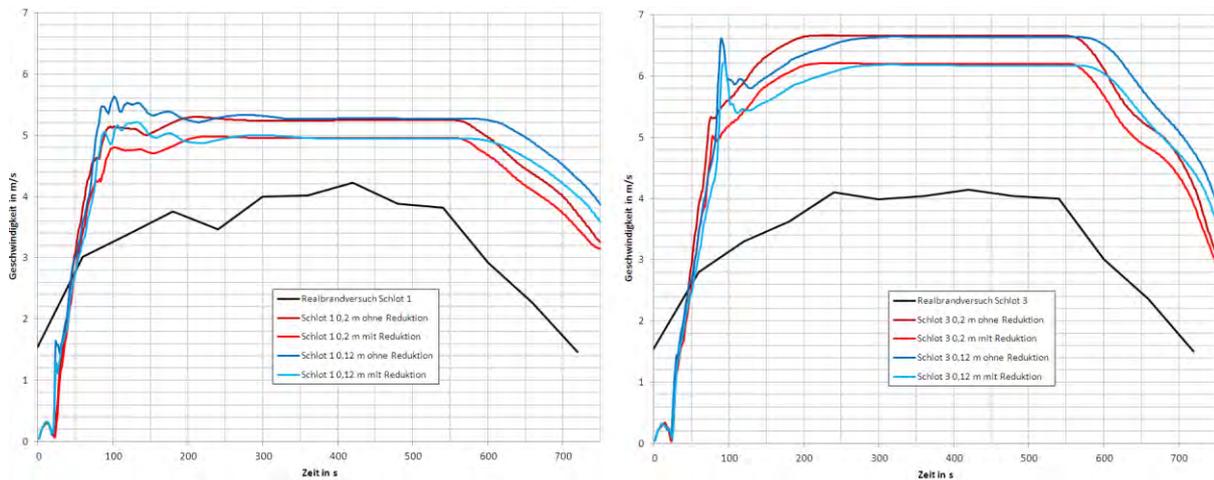


Abb. 28: MFPA Leipzig - VHS Strömungsgeschwindigkeiten in den Schloten 1 und 3

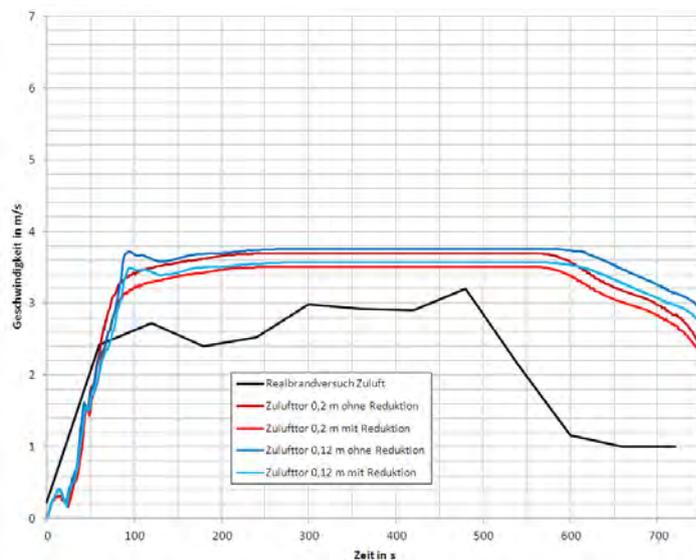


Abb. 29: MFPA Leipzig - VHS Strömungsgeschwindigkeiten im Zulufttor

Es zeigt sich deutlich eine Abweichung der berechneten Ergebnisse zu den Messwerten im Realbrandversuch. Die größte Abweichung findet sich an der Zuluftöffnung nach 600 s. Hier wurden in der Berechnung noch Geschwindigkeiten von 5,6 bis 6,1 m/s festgestellt, im Brandversuch sind die Geschwindigkeiten jedoch schon auf 1 m/s gesunken. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die rechnerisch ermittelten Werte ab 50 Sekunden dauerhaft um

mindestens 1 m/s über den gemessenen Werten liegen, wobei Schlot 1 näher gelegene Werte aufweist als Schlot 3.

Die Kurven bei einer Gittergröße von 0,12 m weisen im Vergleich zu 0,2 m vor dem Bereich des stationären Zustands alle mehr oder weniger starke Schwankungen auf. Besonders im Schlot 3 zeigt sich der Unterschied deutlich, da die Strömungsgeschwindigkeiten bei 0,12 m um bis zu 1,5 m/s ansteigt und sofort wieder fällt, während die Kurve bei 0,2 m fast gleichmäßig in ihren stationären Zustand wechselt.

5.2.2. EBU

Als Grundlage dienen die eingestellten Modelle, welche auch im McCaffrey-Versuch verwendet werden, sowie die in Kapitel 4.4.2.2. berechneten Brennstoffmassenströme. Da sich in vorherigen Versuchen gezeigt hat, dass eine Reduktion der spezifischen Wärmefreisetzungsrate um den Strahlungsanteil zur Temperaturanpassung in diesem Fall nicht notwendig ist, werden die 1100 kW vollständig angestrebt. .

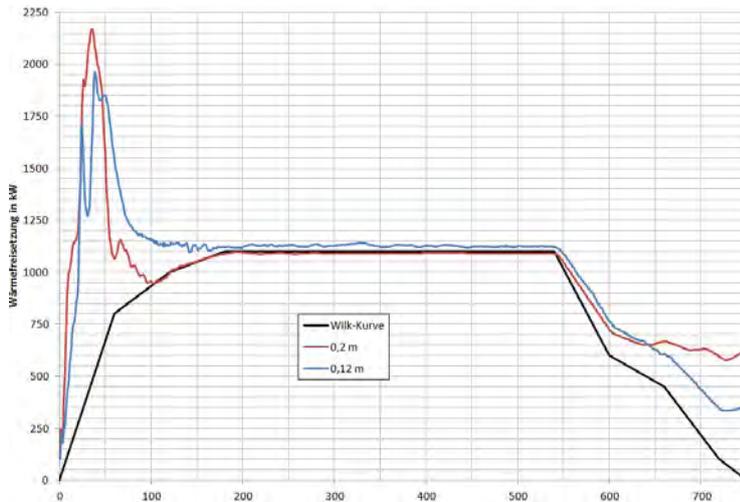


Abb. 30: MFPA Leipzig – EBU Wärmefreisetzungen

Abbildung 30 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungen zu den verschiedenen Gittergrößen. Hierbei lässt sich erkennen, dass zu Beginn der Berechnungen kurzzeitig ca. das Doppelte an angestrebter Brandleistung freigesetzt wird. Dabei pendeln sich die Werte bei 0,2 m schneller ein und stimmen im stationären Zustand sehr gut überein. Die Werte bei 0,12 m pendeln sich erst nach ca. 175 s ein, bleiben jedoch dauerhaft leicht über dem angestrebten Wert. Bei Verringerung des Brennstoffmassenstroms nach 540 s sinken die Kurven der Berechnungen nur leicht verzögert, nach ca. 600 s flacht die Kurve bei 0,2 m ab, entfernt sich von der Wilk-Kurve und liegt nach 750 s bei ca. 620 kW, während die Kurve bei 0,12 m nach 750 s eine Wärmefreisetzung von ca. 370 kW erreicht.

5.2.2.1. Temperaturen

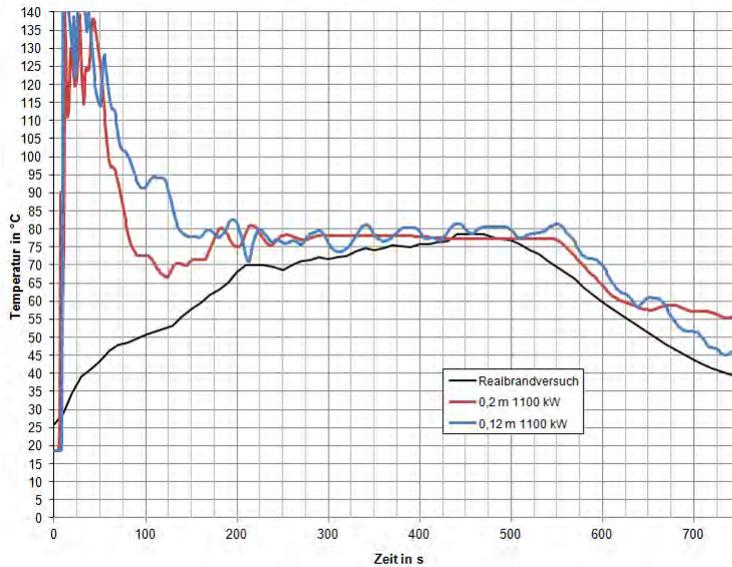


Abb. 31: MFPA Leipzig – EBU Temperaturen 0,1 m unter der Decke

Die Abbildung 31 zeigt, dass die Temperaturen zu Beginn der Berechnung mit dem EBU-Verbrennungsmodell bei einer Gittergröße von 0,2 m kurzzeitig auf ca. 140 °C und bei 0,12 m sogar auf ca. 370 °C schnellen, welches grafisch jedoch nicht integriert wurde. Das liegt an der Entstehung einer Flamme, die nach wenigen berechneten Sekunden ein Vielfaches an Höhe erreicht, die sie im stationären Zustand besitzt. Nach dieser Hochphase verringert sich die Flamme wieder und erreicht nach ca. 200 s den Bereich ihrer stationären Temperatur. Hier ist deutlich zu sehen, dass dabei die Temperaturwerte bei einer Gittergröße von 0,2 m auf einem Niveau bleiben, während die Werte bei 0,12 m auch im angestrebten stationären Zustand weiterhin um denselben Bereich mit ca. 5 °C schwanken.

Die im Realbrandversuch gemessenen Temperaturen überschneiden sich nach ca. 450 s und nähern sich auf bis zu 2 °C an.

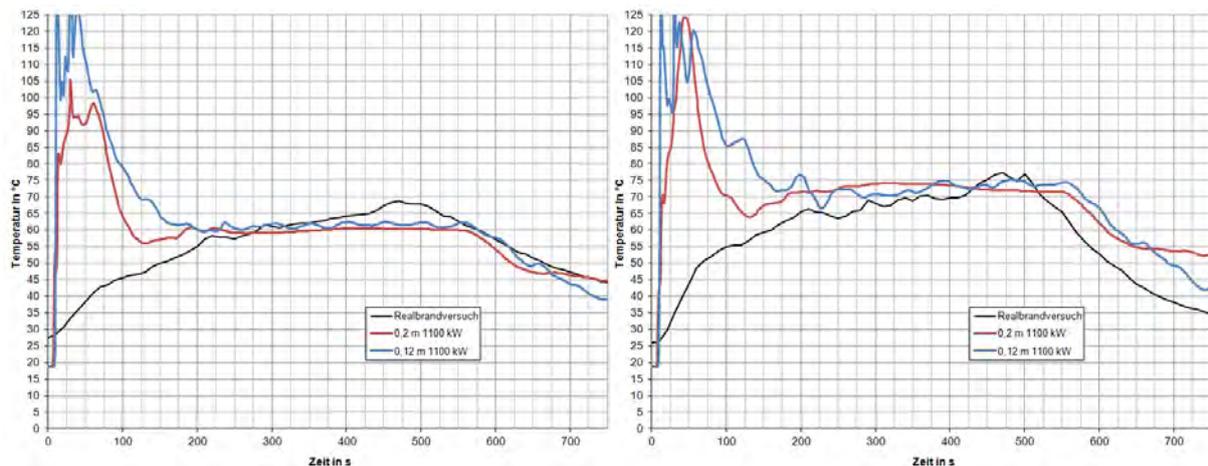


Abb. 32: MFPA Leipzig - EBU Temperaturen in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)

Bei den Schloten 1 und 3, wie in Abbildung 32 zu sehen, erreichen die berechneten Werte die im Realbrandversuch gemessenen Temperaturen nicht. Im Schlot 1 liegen die Temperaturen der Berechnungen bis zu 10 °C unter den gemessenen und im Schlot 3 um die Hälfte bei 5 °C. Diese Feststellungen lassen sich auch auf die einzelnen Messbäume übertragen, die folgend in Abbildung 33 und 34 dargestellt sind.

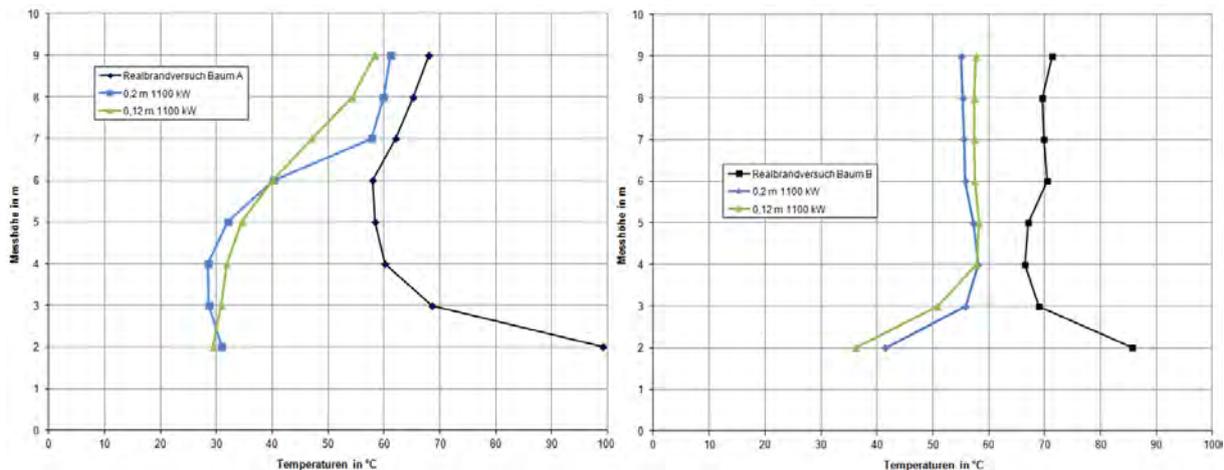


Abb. 33: MFPA Leipzig - EBU Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen an den Messbäumen A (links) und B (rechts) bei 300 - 500 s

Am Messbaum A zeigen sich große Diskrepanzen, die sich erst ab dem Messpunkt in 7 m Höhe entscheidend verringern. Wie schon im VHS-Versuch beschrieben, werden in 2 m Höhe die durchschnittlich höchsten Temperaturen gemessen, während die Berechnungen nur ca. 15 °C über der ursprünglichen Temperatur liegen. Auch zeigen sich hier Unterschiede zwischen den Berechnungen der Gittergrößen mit 0,2 m und 0,12 m. Die Simulation mit 0,2 m weist stärkere Unterschiede in den Höhen in Form einer S-Kurve auf, wobei die Temperaturen im Vergleich zu seinen Nachbarpunkten nicht so stark variieren.

Am Messbaum B hingegen ähneln sich die Werte der Berechnungen mit unterschiedlichen Gittergrößen und weichen nur von wenigen Graden ab. Im Vergleich zum Realbrandversuch sind die Werte aber in 2 m Höhe um mindestens 40 °C niedriger und nähern sich in 4 m Höhe auf bis zu 8 °C an.

Wie Abbildung 34 darstellt, stimmt die Form der berechneten Temperaturen an den einzelnen Messpunkten mit der Form der Werte vom Realbrandversuch gut überein, sind jedoch dauerhaft um mindestens 16 °C zu niedrig.

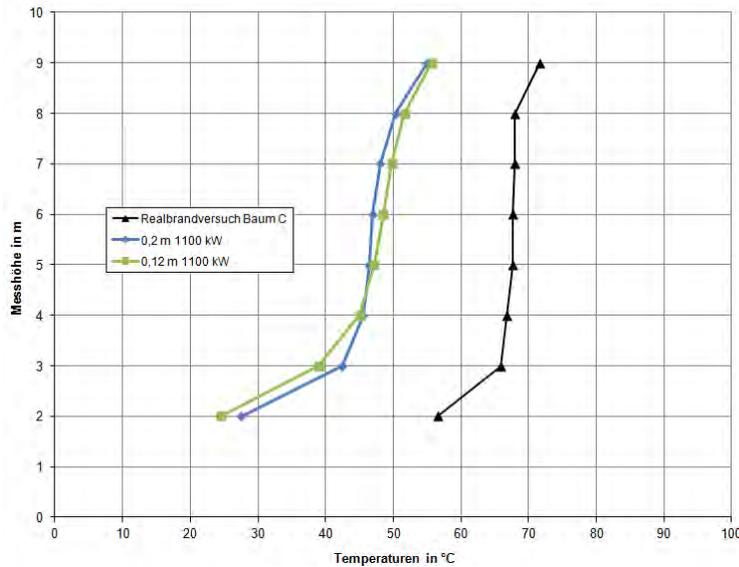


Abb. 34: MFPA Leipzig - EBU Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum C bei 300 - 500 s

Auch hier zeigt sich wie schon im Versuch mit der volumetrischen Wärmequelle, dass eine Erhöhung der Gittergröße von 0,12 m auf 0,2 m vernachlässigbare Auswirkungen auf die Ergebnisse hat.

5.2.2.2.Strömungsgeschwindigkeiten

Zu Beginn der Berechnung zeigen sich analog zu den Temperaturentwicklungen bei der Gittergröße von 0,12 m starke Schwankungen bis auf 8 m/s, die jedoch nach Erreichen der Spitze sofort wieder absinken.

Wie folgend auf den Abbildungen 35 und 36 zu sehen ist, unterscheiden sich die Geschwindigkeiten bei den unterschiedlichen Gittergrößen im Schlot 3 und im Zulufttor kaum. Im Schlot 3 ist aber bei 0,12 m eine deutlich größere Schwankung um den Bereich von ca. 6 m/s zu erkennen. Im Zulufttor ist eine vergleichbare Schwankung nicht zu messen.

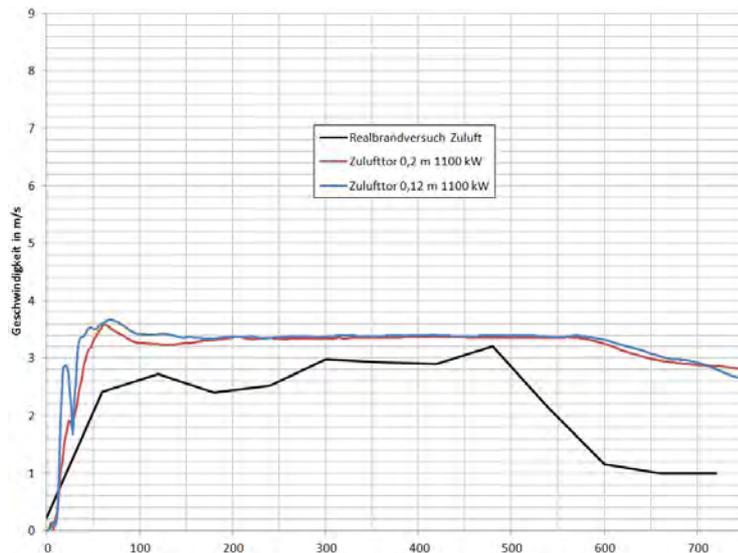


Abb. 35: MFPA Leipzig - EBU Geschwindigkeiten im Zulufttor

Während sich im Zulufttor die Geschwindigkeiten in den Berechnungen im stationären Bereich zu den gemessenen Werten des Referenzversuchs um 0,1 bis 0,5 m/s unterscheiden, sind die Abstände in den Schloten höher. Hier sind Unterschiede von bis zu 2 m/s erkennbar.

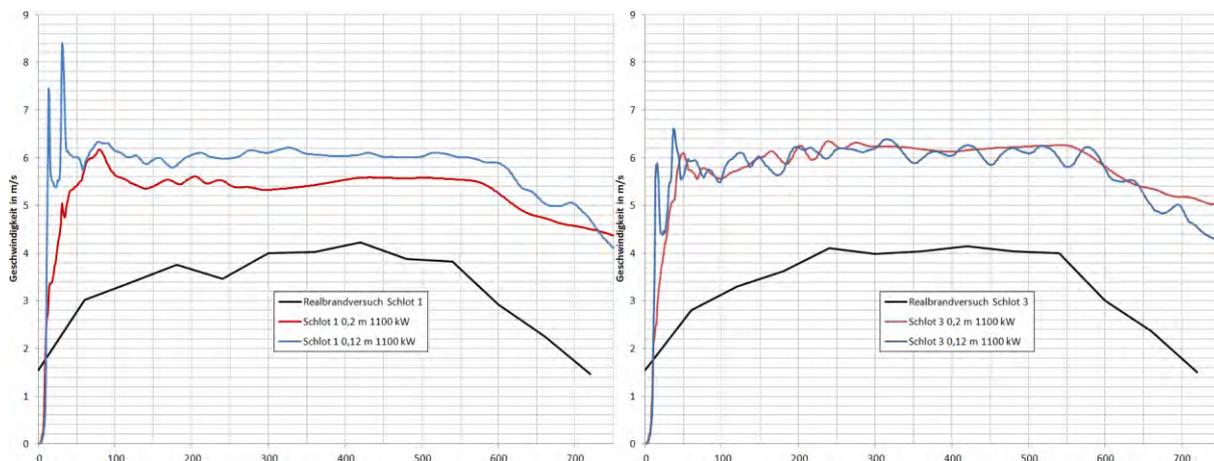


Abb. 36: MFPA Leipzig - EBU Geschwindigkeiten in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)

Eine Besonderheit ist im Schlot 1 festzustellen. Hier stimmen die Ergebnisse der Berechnungen mit den verschiedenen Gittergrößen nicht überein und weichen bis zu 0,8 m/s voneinander ab.

Bei dieser Abweichung muss davon ausgegangen werden, dass es sich um einen Fehler im Set-Up handelt, da die Geschwindigkeiten in den anderen Öffnungen bei den unterschiedlichen Gittergrößen gut übereinstimmen.

5.2.3. PPDF

Wie auch in McCaffrey-Untersuchung wird in dem Leipziger-Versuch aufgrund guter Übereinstimmungen in der Wärmefreisetzung der berechnete Massenstrom für den jeweiligen Zeitpunkt ohne Reduktion übernommen.

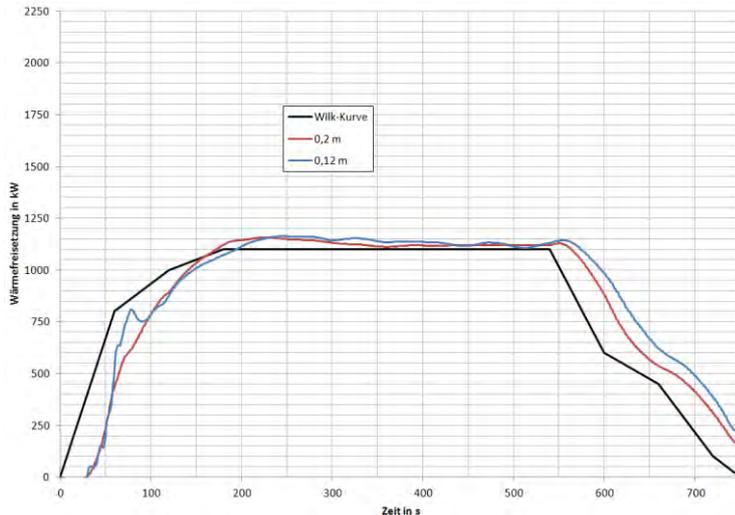


Abb. 37: MFPA Leipzig - PPDF Wärmefreisetzungen

Die Abbildung 37 stellt die Wärmefreisetzungen bei den jeweils eingestellten Massenströmen dar. Hierbei ist ersichtlich, dass die Berechnung bei einer Gittergröße von 0,12 m, wie auch bei der EBU-Untersuchung, eine gewisse Zeit zum Einpendeln benötigen, die jedoch vergleichsweise geringer ausfällt. In den ersten Sekunden werden negative Werte bei der Wärmefreisetzung angezeigt, die aufgrund der Bilanz entstehen, welche ausschließlich über die Öffnungen berechnet wird. Somit kommt es hier zu einem Zeitversatz, der sich über die komplette Berechnung zieht. Die Wärmefreisetzung ist bei der Steigung nach 30 s bei 0,12 m unruhiger als bei 0,2 m. Nach ca. 165 s bzw. 192 s übertreffen die Berechnungen die Wilk-Kurve und nähern sich in der folgenden Berechnungszeit wieder an. Nach 540 s steigen die Wärmefreisetzungen beider Berechnungen trotz Verringerung des Massenstroms kurzzeitig an und sinken dann stark bis auf ca. 145 °C bei 0,2 m und ca. 215 °C bei 0,12 m.

5.2.3.1. Temperaturen

Im Vergleich zu den Versuchen mit einer volumetrischen Wärmequelle und dem EBU-Modell, kommt es bei den Temperaturen in den PPDF-Berechnungen zu größeren Unterschieden, wie Abbildung 38 erkennen lässt.

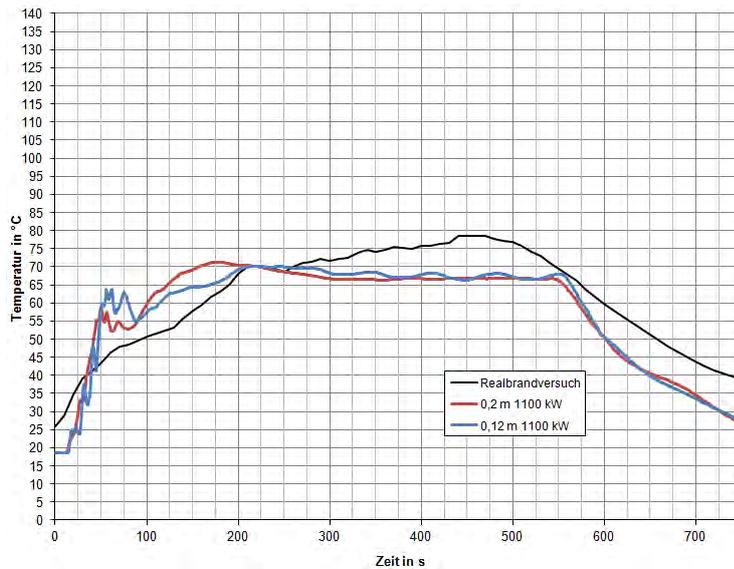


Abb. 38: MFPA Leipzig – PPDF Temperaturen 0,1 m unter der Decke

Während die Temperaturen in den Berechnungen stark steigen, erreichen sie nach ca. 180 s ihre Spitzentemperatur und sinken in den folgenden Sekunden auf einen Wert von ca. 67 °C ab. Somit unterschreiten diese die im Realbrandversuch gemessenen Temperaturen im stationären Zustand um bis zu 11 °C. Dabei ist auch schon wie bei den EBU-Berechnungen zu sehen, dass die Werte bei einer Gittergröße von 0,2 m stabiler sind als bei 0,12 m, welche leicht um bis zu 2 °C schwanken.

In den jeweiligen Schloten 1 und 3 hingegen ähneln sich die Ergebnisse. Abbildung 39 zeigt, dass im Schlot 1 die Berechnungsergebnisse wiederum unter den gemessenen maximalen Werten des Realbrandversuchs liegen. Dabei liegt der Temperaturunterschied nach 475 s bei bis zu 9 °C bei 0,2 m und 5 °C bei 0,12 m. Beim Schlot 3 weichen die berechneten Werte stärker von den Referenztemperaturen ab und betragen bis zu 15 °C.

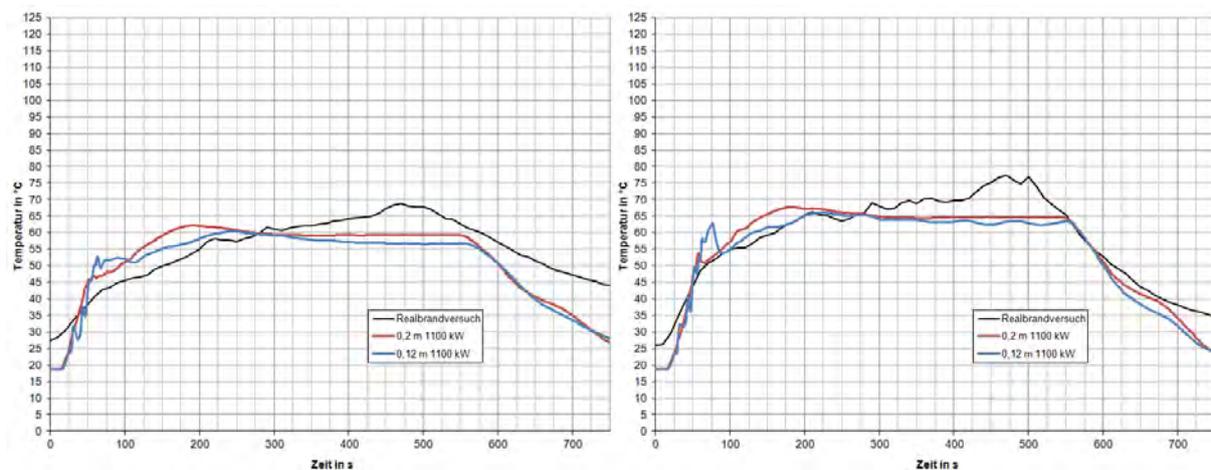


Abb. 39: MFPA Leipzig - PPDF Temperaturen in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)

Bei den Messbäumen A und B zeigen sich teilweise große Unterschiede. Wie schon bei den Vergleichen mit einer volumetrischen Wärmequelle und dem EBU-Modell sind die Temperaturen auf einer Höhe von 2 m von den Referenztemperaturen weit entfernt und unterscheiden sich, wie in Abbildung 40 zu sehen ist, am Messbaum A somit um ca. 50 °C. Die Temperaturen in den bei 0,2 m steigen bei 3-4 m leicht an, sinken jedoch in größeren Höhen wieder auf ca. 51 °C ab. Bei 0,12 m steigt die Temperatur bei 3 m auf ca. 56 °C und bleibt auch in größeren Höhen konstant. In 9 m Höhe ähneln sich die Temperaturwerte bei den Berechnungen mit beiden Gittergrößen wieder und haben zu den Werten aus dem Realbrandversuch auf 5 m Höhe die geringste Abweichung von mindestens 7 °C bei 0,2 m und 3 °C bei 0,12 m

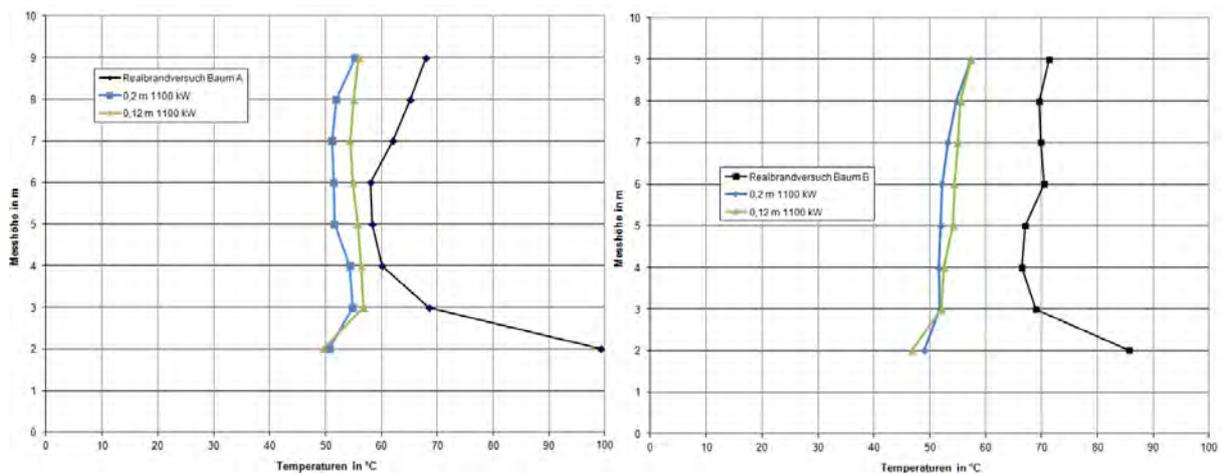


Abb. 40: MFPA Leipzig - PPDF Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen an den Messbäumen A (links) und B (rechts) bei 300 - 500 s

Am Messbaum B hingegen bleiben die Temperaturunterschiede zum Realbrandversuch ab 3 m Höhe fast konstant bei ca. 15 °C und weichen nur auf der Höhe von 2 m stärker mit einem Temperaturunterschied von ca. 35 bis 40 °C ab.

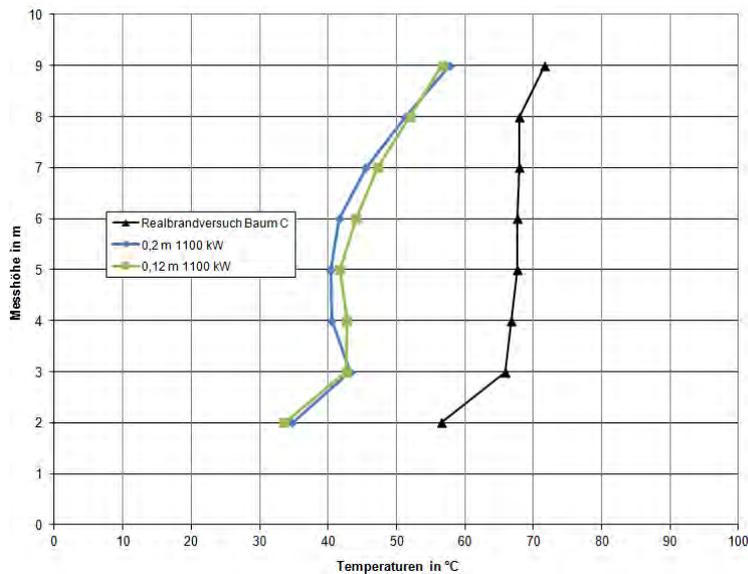


Abb. 41: MFPA Leipzig - PPDF Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum C bei 300 - 500 s

Wie Abbildung 41 zeigt, steigen die Temperaturen am Messbaum C bei beiden unterschiedlichen Gittergrößen zwischen 2 m und 3 m wie auch beim Realbrandversuch stark an, jedoch sinken die Temperaturen bei 0,2 m ab 4 m wieder und steigen daraufhin dauerhaft an. Bei 0,12 m zeigt sich die Schwankung nur in einem schwächeren Maß.

Wie schon eingangs in diesem Kapitel erwähnt, weisen die Ergebnisse mit den verschiedenen Gittergrößen besonders auf 2 m Höhe und am Messbaum C starke Abweichungen auf. Die Temperaturen 0,1 m unter der Decke sind fast durchgängig zu niedrig und unterscheiden sich zu den EBU- und VHS-Ergebnissen stärker von den Referenztemperaturen.

5.2.3.2. Strömungsgeschwindigkeiten

Im Vergleich zu der vorherigen Untersuchung mit dem EBU-Verbrennungsmodell gibt es zu Beginn der Berechnung keine größeren Schwankungen in den Strömungsgeschwindigkeiten, wie in Abbildung 42 zu sehen ist. Nur im Schlot 1 steigen die Geschwindigkeiten auf bis zu 5,5 m/s und erreichen erst nach ca. 340 s einen stabilen Zustand. Hierbei zeigen sich im stationären Zustand bei den unterschiedlichen Gittergrößen ähnlich hohe Geschwindigkeiten, die von den gemessenen Werten um durchschnittlich 1,1 m/s bis 1,3 m/s abweichen.

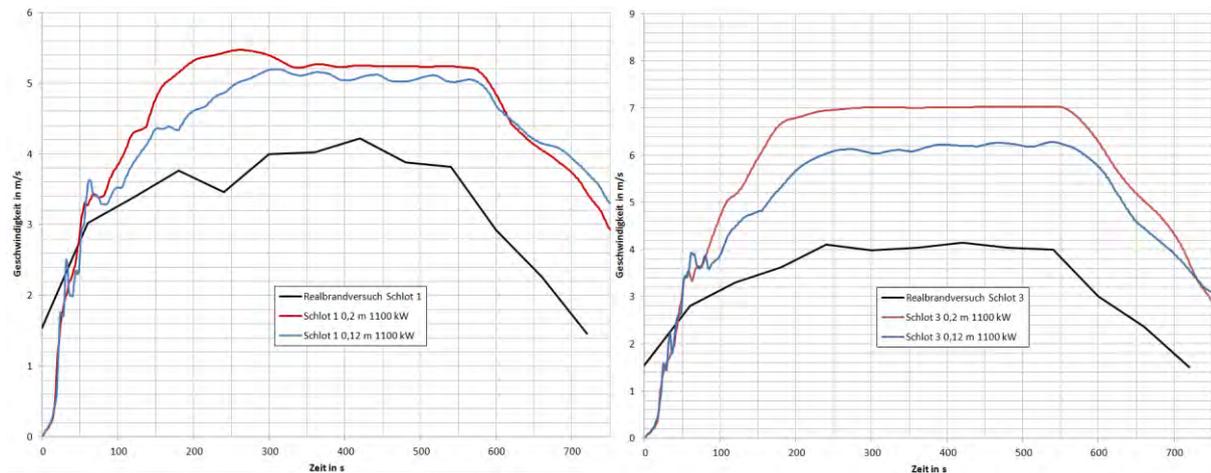


Abb. 42: MFPA Leipzig - PPDF Geschwindigkeiten in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)

Im Schlot 3 hingegen unterscheiden sich die Strömungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Gittergrößen. Hier sind untereinander Abweichungen von durchschnittlich 0,8 m/s zu messen. Auch zu den Geschwindigkeitswerten des Realbrandversuchs sind großen Entfernungen von durchschnittlich 2 m/s bzw. 2,8 m/s.

Im Gegensatz dazu stimmen die Strömungsgeschwindigkeiten am Zulufttor, wie in Abbildung 43 zu sehen ist, gut mit den Referenzwerten vom Realbrandversuch überein. Zu Beginn der Berechnung liegen die berechneten Geschwindigkeiten unter den Vergleichswerten und übertreffen diese erst nach ca. 100 s. Ab dem Punkt sind die Werte dauerhaft höher. Nach 480 s betragen die Abweichungen nur noch 0,05 m/s, vergrößern sich nach dieser Annäherung jedoch wieder. Nach Verringerung des Brennstoffmassenstroms sinken die Geschwindigkeiten vergleichbar langsam auf einen Wert von ca. 2 m/s bis 2,1 m/s.

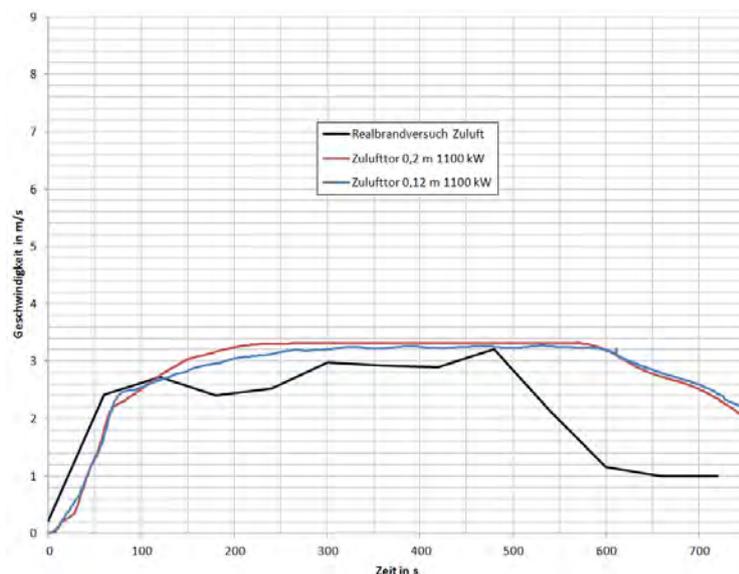


Abb. 43: MFPA Leipzig - PPDF Geschwindigkeiten im Zulufttor

Die großen Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeiten bei der VHS-, sowie auch bei der EBU- und PPDF-Berechnung werden bei der Fehlerdiskussion im Abschnitt 5.3 noch einmal diskutiert.

6. Diskussion

Grundlegende Vergleiche der Berechnungen mit den Realbrandversuchen wurden in den vorangehenden Ergebnissen schon vorgenommen. Aus diesem Grund wird sich auf eine Fehlerdiskussion und möglichen Abweichungen sowie eines Fazits am Ende beschränkt.

6.1. Fehlerdiskussion / Abweichungen

Eine effektive Simulierung von Real(brand)versuchen bedeutet stets, dass Einbußen in der Komplexität des Vorgangs hingenommen werden müssen, damit es im alltäglichen Geschäft von Ingenieur- und Sachverständigenunternehmen eine Verwendung finden kann. Aus diesem Grund ist es nötig, dass die Berechnungen simplifiziert werden, damit sich die Berechnungszeit auf ein akzeptables Maß verringert. Diese Vereinfachung bedeutet aber auch, dass sich die Ergebnisse von den realen Werten unterscheiden können, wie man es in dieser Arbeit an vielen Stellen sehen kann.

Desweiteren wurde unter anderem während der Recherche zum chemischen Stoff Isopropanol festgestellt, dass es viele verschiedene Stoffdatenbanken gibt, deren Stoffe oft aufgrund unterschiedlicher Ansätze abweichende chemische oder physikalische Eigenschaften besitzen. Diese Ungleichheit kann ebenfalls zu verschiedenen Ergebnissen und im Extremfall auch zu falschen Schlüssen führen.

Allgemein waren in beiden Untersuchungen die Strömungsgeschwindigkeiten, bei McCaffrey über der Flamme und beim MFPA Leipzig Versuch in den Schloten, sowie im Zulufttor zu hoch. Diese Abweichungen lassen sich auf die gemessenen Temperaturen zurückführen, die ebenfalls in den betroffenen Bereichen zu hoch waren und dementsprechend der Grund für die Geschwindigkeitsdifferenzen sein könnten.

Im Realbrandversuch der MFPA Leipzig kam es zu einigen weiteren Abweichungen.

Es wurden vor dem Versuch fünf Messbäume mit Sensoren symmetrisch im Raum aufgestellt (siehe Anlage), die die Temperaturen an den jeweiligen Höhepunkten messen sollten. Als Grundlage dienten die Temperaturergebnisse, die Kurz in seiner Diplomarbeit (Kurz 2003, S. 2) von Wilk erhalten hat. In der Diplomarbeit werden die Ergebnisse jedoch nur im Zusammenhang eines Zonenmodells betrachtet, das von einem symmetrischen Raum ausgeht. Bei der Betrachtung sind somit die Messbäume A bis C ausreichend, da bei einer Symmetrie auf D und E geschlossen werden kann.

In dieser Arbeit wird jedoch ein Feldmodell verwendet, das diese Symmetrie nicht beachtet, sondern sich auf die realistische Anordnung stützt. Da die Schlotte 1 und 3 unsymmetrisch angeordnet sind, entstehen im betrachteten Bereich Rotationsturbulenzen, in der gegebenenfalls die durch die Wärme- oder Brandquelle entstandenen Temperaturen weggedrückt werden und sich an anderer Stelle sammeln. Diese Asymmetrie kann zu Ungleichgewichten an den Messstellen führen, bei denen an den Messbäumen A und B abweichende Werte festgestellt werden können. Da die Temperaturergebnisse der Messbäume D und E jedoch fehlen, kann das nicht überprüft werden.

Auch wurde eine Windgeschwindigkeit im Realbrandversuch in der Diplomarbeit von Kurz (2003) notiert, bei der jedoch nicht klar bestimmt werden konnte, inwiefern und wo sie zu tragen kommt (Kurz 2003, S. 73). Aus diesem Grund wurde sie, trotz einer Gefahr der Ergebnisverfälschung, in der Berechnung nicht beachtet.

Die (chemische) Wärmefreisetzungskurve wurde in den jeweiligen Versuchen nach den Vorgaben von Wilk vorgenommen. Es besteht jedoch die Vermutung, dass diese Kurve nicht die wirkliche Wärmefreisetzung exakt wiedergibt, da vergleichbare experimentelle Messungen von Lachenbränden in ähnlichem Maßstab einen Anstieg der Brandleistung zeigen. Aufgrund von fehlenden genaueren Daten musste jedoch auf diese Vorgehensweise zurückgegriffen werden.

Die Ergebnisse des Leipziger Brandversuchs zeigen auch bei den Temperaturwerten unterhalb der Decke und in den Schloten diese Tendenz ohne konstanten Verlauf nach ca. 300 s, wie es die Berechnungen ergeben. Die Temperaturen wären mit einer längeren Wärme- oder Massenfreesetzung nach 540 s weiterhin gestiegen und hätten ein viel höhere Werte erreicht. Dies lässt sich mit dem Abbrandverhalten einer fortlaufenden Erwärmung der Flüssigkeitslache begründen.

Bei der Berechnung mit einem Verbrennungsmodell stellt sich heraus, dass es sich bei Einstellung des Brennstoffes per Massenstromeinlass nicht verhindern lässt, dass der Brennstoff in den betrachteten Bereich freigesetzt wird, auch wenn der Massenstrom auf null gesetzt wird. Somit kann keine Einstellung betrachtet werden, wie sie sich bei einem Brand mit einer linearen Verringerung des Brennstoffes bis zur Abschaltung ergeben würde.

Dieser Effekt kann in Bezug auf die Ergebnisse nicht abschließend bewertet werden.

6.2. Fazit

Die Ergebnisse zeigten, besonders bei hohen Wärmefreisetzung, sowohl bei der volumetrischen Wärmequelle, als auch bei den Verbrennungsmodellen eine gute Übereinstimmung mit den Realbrandversuchen. Starke Abweichungen finden sich bei der Berechnung mit Verbrennungsmodellen und kleinen Wärmefreisetzung, da die Diffusion des Brennstoffes zu Verfälschungen führt, wie es schon in Abschnitt 6.1. beschrieben wurde.

Bei dem PPDF-Verbrennungsmodell hat sich herausgestellt, dass sich Simulationen merklich schneller berechnen lassen. Auch zeigen sich zu Beginn der Berechnungen keine starken Schwankungen, wie sie bei den Berechnungen mit dem EBU-Modell vorgekommen sind. Gleichzeitig gab es bei dem PPDF-Modell aber auch die größten Schwierigkeiten bei der Einstellung des richtigen Turbulenzmodells, sowie bei der Berechnung der chemischen Wärmefreisetzung mit einem festgelegten Massenstromeintritt.

Unter Beachtung aller Abweichungen, kann aufgrund der in dieser Arbeit erlangten Kenntnisse bei Anwendung des idealen Set-Ups eine grundsätzliche Eignung des Simulationsprogrammes Star-CCM+ zur Brandherdmodellierung bestätigt werden.

7. Literatur

CD-adapco (2013). *User Guide STAR-CCM+ Version 8.06*. Benutzerhandbuch.

Drysdale D. (1998). *An introduction to Fire Dynamics. Third Edition*. West Sussex: John Wiley & Sons.

Karlsson B., Quientiere J. G. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press Inc.

Yeoh G. H., Yuen K. K. (2009). *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*. Oxford: Butterworth Heinemann.

Guo Z.M., Zhang H.Q., Chan C. K., Lin W. Y. (2003). Presumed joint probability density function model for turbulent combustion. *Fuel* 82: 1091-1101.

Schneider U. (2009). *Ingenieurmethoden im Brandschutz. 2. Auflage*. Düsseldorf: Werner Verlag.

McCaffrey B. J. (1979). *Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*. Verfügbar unter: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire79/art001.html> [24.02.2014].

Kurz M. (2004). *Normative Verfahren und Ingenieurmethoden bei Brandschutzkonzepten für den Industriebau*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Biberach, Fachbereich Bauingenieurwesen, Salach.

Burcat A. (2006). Burcat's *Thermodynamic Data*. Verfügbar unter: <http://garfield.chem.elte.hu/Burcat/burcat.html> [24.02.2014].

Melius C. F. (2002). *Thermodynamics Resource*. Verfügbar unter: <http://www.sandia.gov/HiTempThermo/dataPages/thermo-RH63.html> [24.02.2014].

8. Abbildungen

Abb. 1: Brandvoraussetzungen. Verfügbar unter http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Verbrennungsdreieck.svg (Stand 09.01.13).....	8
Abb. 2: Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers nach Schneider, 2009, S. 207.....	9
Abb. 3: Temperatur- und Konzentrationsprofile bei einer Verbrennung (Drysdale 1998, S. 99)	12
Abb. 4: Entwicklung der Flammenhöhe in Relation zur Strahlgeschwindigkeit (Drysdale 1998, S. 128)	13
Abb. 5: 3-Zonen Flammenstruktur nach Cox and Chitty und McCaffrey (Yeoh & Yuen 2009, S. 9).....	13
Abb. 6: Flammenbewegungen im McCaffrey-Experiment (Yeoh & Yuen 2009, S. 415).....	18
Abb. 7: Geometrie des Versuchsstandes (Kurz 2004, S. 70)	21
Abb. 8: Versuchsstand MFPA Leipzig (Kurz 2004, S. 69).....	21
Abb. 9: Vergleich der Wände (links) und dem Innenvolumen (rechts)	23
Abb. 10: Beschreibung der einzelnen Bestandteile in der McCaffrey-Simulation.....	24
Abb. 11: Beschreibung der einzelnen Bestandteile in der MFPA Leipzig-Simulation	29
Abb. 12: Wärmefreisetzung nach Dipl.-Ing. E. Wilk.....	30
Abb. 13: McCaffrey – VHS Temperaturenvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion	34
Abb. 14: McCaffrey – VHS Geschwindigkeitsvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion.....	35
Abb. 15: McCaffrey – VHS Temperaturvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion.....	36
Abb. 16: McCaffrey – VHS Geschwindigkeitsvergleich von Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion	37
Abb. 17: McCaffrey - EBU Temperaturvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion.....	38
Abb. 18: EBU Geschwindigkeitsvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen mit Reduktion.....	39
Abb. 19: McCaffrey - PPDF Temperaturvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion.....	40
Abb. 20: PPDF Geschwindigkeitsvergleich Formelwerten und Star-CCM+ Berechnungsergebnissen ohne Reduktion.....	41
Abb. 21: MFPA Leipzig – VHS Temperaturen 0,1 m unter der Decke	42
Abb. 22: MFPA Leipzig - VHS Temperaturen ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) nach 230 s..	43
Abb. 23: MFPA Leipzig - VHS Temperaturen in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)	44
Abb. 24: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum A ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) bei 300 - 500 s	44
Abb. 25: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum B ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) bei 300 - 500 s	45

Abb. 26: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum C ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) bei 300 - 500 s	45
Abb. 27: MFPA Leipzig - VHS Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten ohne Reduktion (links) und mit Reduktion (rechts) nach 50 s	46
Abb. 28: MFPA Leipzig - VHS Strömungsgeschwindigkeiten in den Schloten 1 und 3	47
Abb. 29: MFPA Leipzig - VHS Strömungsgeschwindigkeiten im Zulufttor	47
Abb. 30: MFPA Leipzig – EBU Wärmefreisetzungen.....	49
Abb. 31: MFPA Leipzig – EBU Temperaturen 0,1 m unter der Decke	50
Abb. 32: MFPA Leipzig - EBU Temperaturen in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)	51
Abb. 33: MFPA Leipzig - EBU Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen an den Messbäumen A (links) und B (rechts) bei 300 - 500 s	51
Abb. 34: MFPA Leipzig - EBU Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum C bei 300 - 500 s	52
Abb. 35: MFPA Leipzig - EBU Geschwindigkeiten im Zulufttor	53
Abb. 36: MFPA Leipzig - EBU Geschwindigkeiten in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts).....	53
Abb. 37: MFPA Leipzig - PPDF Wärmefreisetzungen.....	54
Abb. 38: MFPA Leipzig – PPDF Temperaturen 0,1 m unter der Decke.....	55
Abb. 39: MFPA Leipzig - PPDF Temperaturen in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts).....	55
Abb. 40: MFPA Leipzig - PPDF Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen an den Messbäumen A (links) und B (rechts) bei 300 - 500 s	56
Abb. 41: MFPA Leipzig - PPDF Vergleich der durchschnittlichen Temperaturen am Messbaum C bei 300 - 500 s.....	57
Abb. 42: MFPA Leipzig - PPDF Geschwindigkeiten in den Schloten 1 (links) und 3 (rechts)	58
Abb. 43: MFPA Leipzig - PPDF Geschwindigkeiten im Zulufttor.....	58
Abb. 44: Anlage MFPA Leipzig - Brandlast im Brandraum – Prüfstand C.....	i
Abb. 45: Anlage MFPA Leipzig - Fassadenstand C – Fensteröffnung = Flamm Austrittsöffnung.....	i
Abb. 46: Anlage MFPA Leipzig - Temperaturmessstellen der Messbäume im Atrium	ii
Abb. 47: Anlage MFPA Leipzig - Temperaturmessstellen 100 mm unterhalb der Decke.....	ii

Anlagen

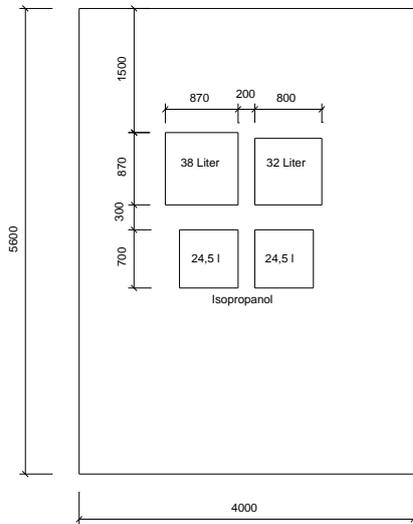


Abb. 44: Anlage MFPA Leipzig - Brandlast im Brandraum – Prüfstand C

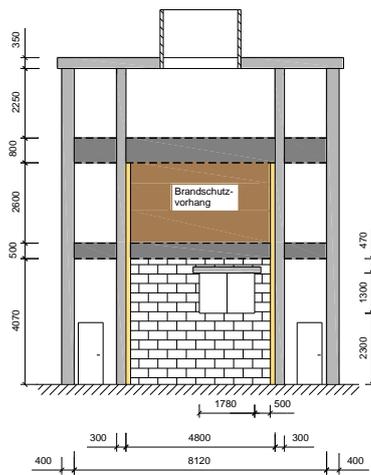


Abb. 45: Anlage MFPA Leipzig - Fassadenstand C – Fensteröffnung = Flamm Austrittsöffnung

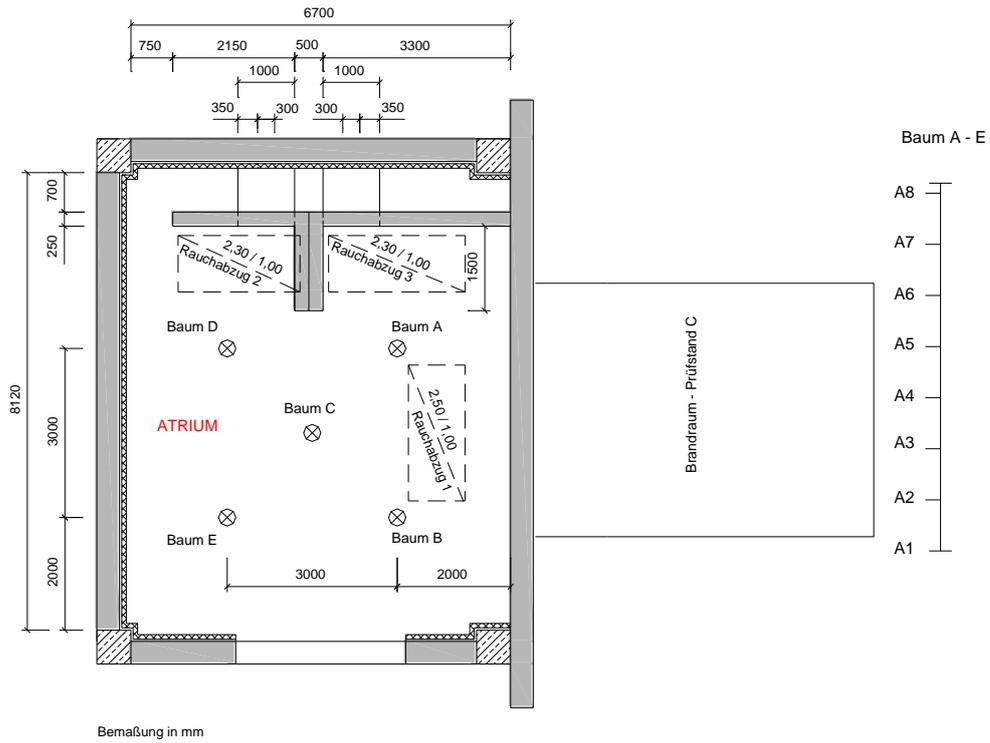
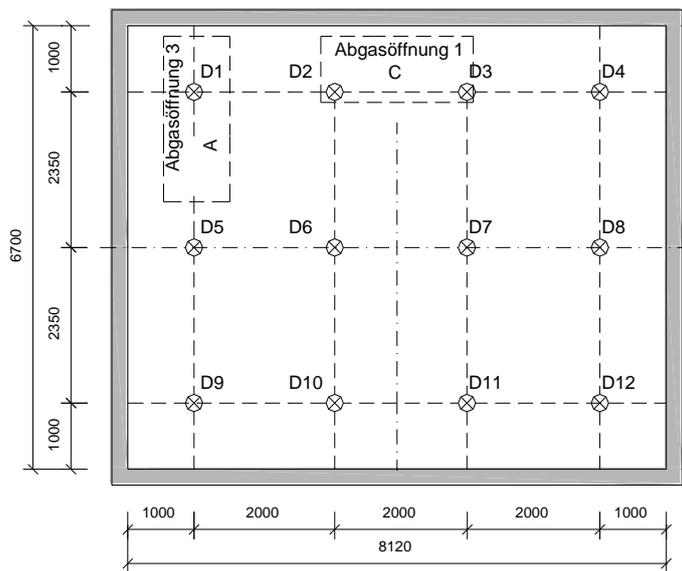


Abb. 46: Anlage MFPA Leipzig - Temperaturmessstellen der Messbäume im Atrium



D1 - D12 Temperaturmessstellen 100 mm unterhalb der Decke

Abb. 47: Anlage MFPA Leipzig - Temperaturmessstellen 100 mm unterhalb der Decke