



Hannes Schwingenschlögl, BSc

Validierung von Messergebnissen von Brandversuchen mittels CFD-Untersuchungen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Peter-Johann Sturm
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer/in

Dipl.-Ing. Daniel Fruhwirt, BSc
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Mai 2020



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt in erster Linie meinem Betreuer Dipl.-Ing. Daniel Fruhwirt für die Betreuung und Durchsicht meiner Arbeit. Weiters möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen des Fachbereichs für Verkehr und Umwelt unter der Leitung von Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter-Johann Sturm für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken.

Ein Besonderer Dank gilt meiner Familie für die Unterstützung im Studium und für den bedingungslosen Rückhalt in allen Situationen.

Und mein Herzensdank gilt meinen alten und im Studium neu gewonnen Freundschaften, welche mein Glück bedeuten und wissen dass sie gemeint sind. Ihr erweitert meinen persönlichen Horizont und seid Inspiration, Antrieb und Stütze für mich.

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used.

Graz, am 13. Mai 2020

Hannes Schwingenschlögl

Kurzfassung

Die Anwendung der Methoden des Brandschutzingenieurwesens hat bereits einen festen Platz im Rahmen von Brandschutzkonzepten, -planungen und -nachweisen. Diese Arbeit widmet sich Brandsimulationsmodellen, welche für Brandschutzplanung und -nachweisen unumgänglich sind. Konkret wird die Untersuchung der Ausbreitung von Rauchgasen bei Tunnelbränden am Beispiel des Koralmtunnels, welcher mit einer Länge von 32 km Teil der Eisenbahnhochleistungsstrecke zwischen Graz und Klagenfurt ist. Als Basis für die Validierung der numerischen Untersuchungen wurden Messdaten von realen Brandversuche im Maßstab 1:1 untersucht.

Verwendet wurde hauptsächlich FDS, welches eine frei verfügbare CFD-Software ist und speziell für die Untersuchung von Brandszenarien, von den Entwicklern am NIST geschrieben wurde. Als Basis für die Software wurde ein LES-Ansatz für die Berechnung von instationären Strömungsfeldern gewählt. Diese wurde mit einer Vielzahl an empirischen Sub-Modellen ausgerüstet, um möglichst schnelle Untersuchungen auch bei groben Rechengittern durchführen zu können.

Es wurden verschiedene reale Brandversuche im Bereich zwischen 2 MW bis 15 MW durchgeführt, welche numerisch nachgebildet wurden. Hierfür wurde ein vergleichsweise kurzer Abschnitt des Tunnels verwendet. Als Randbedingungen wurde die Anströmgeschwindigkeit und Temperatur als auch die Massenverlustrate des Brennstoffes aufgeprägt. Die Nachbildung der zeitlichen Temperaturprofile deckte sich weitestgehend mit den Messdaten, jedoch konnte die Temperaturschichtung ausgehend vom oberen Deckenrand nicht nachgebildet werden. Die maximale Temperatur an der Decke reicht in der Simulation weiter nach unten. Hierbei muss erwähnt werden, dass die Temperaturschichtung nur bei ausreichend feinem Rechengitter adäquat dargestellt werden kann.

Weiters wurde eine umfangreiche Parameterstudie der verschiedenen Modellparameter der Software durchgeführt, um für ein für zukünftige Tunnelmodelle zugeschnittenes Parametersetting zur Verfügung stellen zu können. Besonderes Augenmerk galt insbesondere den Berechnungszeiten und der Stabilität der Rechnung.

Der konvektive Wärmeübergang von heißen Rauchgasen findet hauptsächlich in der Grenzschicht statt. Diese kann in FDS nicht praktikabel aufgelöst werden, weshalb entsprechende Sub-Modelle eingeführt wurden. Diese wurden anhand einer einfachen Zylinderröhre mit ANSYS Fluent und den Ansätzen gem. VDI-Wärmeatlas verglichen.

Hierbei zeigt sich eine tendenzielle Überschätzung des Wärmeübergangs. Im Allgemeinen soll auf den Einfluss des Wärmeübergangs zwischen heißen Rauchgasen und Tunnelwänden auf die Gesamtsimulation geachtet werden, da die absoluten Werte für den Wärmeübergang sehr mit Vorsicht zu genießen sind.

Schlussendlich zeigt, sich dass FDS sehr gut geeignet ist um Tunnelbrandszenarien numerisch abbilden zu können, insofern die Randbedingungen des Modells gut abgrenzbar und klar definierbar sind. Im Vergleich zu anderen CFD-Softwarepaketen reichen hier sehr grobe Netze aus, wobei die Gültigkeit der im Standard aktivierten Modelle überprüft werden muss. Die Software ist aufgrund von den Standard Einstellungen ein sehr gutmütiges Tool, welches bei einem Minimum an manuellen Eingaben rasch zu Berechnungsergebnissen führt welche plausibel wirken. Die Prüfung der quantitativen Plausibilität verbleibt jedoch beim Softwareuser, welchem eine grundlegende Einarbeit in die technischen Grundlagen nicht ausbleibt.

Abstract

The application of the methods of fire protection engineering already has a permanent place in the context of fire protection concepts, planning and evidence. This thesis is dedicated to fire simulation models, which are essential for fire protection planning and fire safety approvals.. The investigation of the propagation of flue gases during tunnel fires, based on data from tests, performed in the Koralm tunnel, which is with its length of 32 km part of the high-performance railway section between Graz and Klagenfurt. Measurement data from full scale fire tests were used as basis for the validation of the numerical investigations.

FDS, which is a freely available CFD software and was written especially for the investigation of fire scenarios by the developers at NIST, was mainly used for the analysis. A LES approach for the calculation of transient flow fields was chosen as basis for the software. which is equipped with a large number of empirical sub-models in order to be able to carry out tests as quickly as possible, even with coarse computational grids.

Various real fire tests in the range between 2 MW to 15 MW average heat release rate were carried out. The data was used for numerical simulations. For this, a comparatively short section of the tunnel was modeled. The inflow velocity and temperature as well as the mass loss rate of the fuel were imprinted as boundary conditions. The calculated temperature profiles over time largely corresponded with the measurement data, but the temperature stratification could not be reproduced correctly in the upper range of the tunnel. The high temperatures from the ceiling extended further down in the simulation. It must be mentioned here that the temperature stratification can only be adequately reproduced if the computing grid is sufficiently fine, which is almost not possible with FDS.

Furthermore, an extensive parameter study of the various model parameters of the software was carried out in order to be able to provide a parameter setting tailored for future tunnel models. Particular attention was paid to the calculation times and the stability of the calculation.

The convective heat transfer from hot flue gases mainly takes place in the boundary layer. This cannot be practically resolved in FDS, this is why corresponding sub-models have been introduced. These were compared using a simple cylinder tube to results gained by ANSYS Fluent and the VDI heat atlas. The results show a tendency to

overestimate the heat transfer. In general, attention should be paid to the influence of the heat transfer between hot flue gases and tunnel walls on the overall simulation, since the absolute values for the heat transfer should be used with caution.

Finally it turns out that FDS is very well suited to numerically depict tunnel fire scenarios, insofar as the boundary conditions can be very well defined. Compared to other CFD software packages, very coarse grids are sufficient here, however the validity of the models activated in the standard set-up must be checked. Due to the standard settings, the software is a very stable tool, which quickly leads to plausible calculation results with a minimum of manual entries. Nevertheless, the verification of the quantitative results remains with the software user, who needs to be experienced and to have a solid scientific background.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
2 Physikalische Grundlagen	3
2.1 Eigenschaften von Fluiden	5
2.1.1 Stoffwerte von trockener Luft	5
2.1.2 Thermische und kalorische Gasgleichung [4]	7
2.1.3 (Ideale) Gasgemische	10
2.2 Strömungsmechanik	14
2.2.1 Massen- und Stofftransportgleichungen	14
2.2.2 Impulserhaltung	17
2.2.3 Energieerhaltung	18
2.2.4 Fließgesetz	19
2.2.5 Turbulenz	19
2.2.6 Grenzschicht	20
2.2.7 Zusammenfassung der Strömungsmechanik	21
2.3 Wärmeübertragung	22
2.3.1 Konduktion	22
2.3.2 Konvektion	23
2.3.3 Wärmestrahlung	25
2.4 Verbrennungschemie	28
2.4.1 Einteilung von Verbrennungen	28
2.4.2 Komplexe Stöchiometrie	31
2.4.3 FDS relevante Ansätze	32
2.5 Dimensionslose Kennzahlen	37
2.6 Zusammenfassung: resultierende Gleichungen	43
3 Grundlagen der CFD	45
3.1 Diskretisierung	45
3.1.1 Diskretisierung des Raumes	46
3.1.2 Diskretisierung der Zeit	46
3.1.3 Diskretisierung der Modellgleichungen	47

3.2	Diskretisierung: FDS-relevante Spezialthemen	49
3.2.1	Strukturierte und unstrukturierte Diskretisierung	49
3.3	Exkurs in die Numerik	51
3.4	Diskretisierung: Fluent-relevante Spezialthemen	52
3.4.1	Abschätzung des Wandabstandes des ersten Knotenpunktes	52
4	Numerische Versuchsreihe	53
4.1	Problemstellung	53
4.2	Aufbau der FDS-Files	57
4.2.1	Modellierung der Geometrie	59
4.2.2	Gittererstellung	60
4.2.3	Brandtasse - Verbrennungsmodellierung	63
4.2.4	Randbedingungen	64
4.2.5	Ausgabe	66
4.3	Durchführung der Berechnungen	69
4.3.1	Gittergröße	69
4.3.2	Hardware	70
4.4	Brandfallauswertung	72
4.4.1	Brandversuch 3	72
4.4.2	Parameterstudie anhand des BV3	76
4.4.3	Weitere Brandfälle	84
4.4.4	Backlayering	85
4.4.5	Wärmeübergang	88
4.5	Weitere durchgeführte numerische Untersuchungen	95
5	Zusammenfassung und Ausblick	97
	Literatur	99
	Anhang	105
A	Hardware, Software und Tools	105
A.1	verwendete Hardwarekonfiguration	105
A.2	verwendete Softwarekonfiguration	106
A.3	diverse Anleitungen und Hilfestellungen	106
A.4	diverse Bat-Files	108
B	FDS-Files	118
C	Brandversuche - vollständige Auswertungen	122
C.1	Auswertung: <i>BV3-fine</i>	123
C.2	Auswertung: <i>BV4-fine</i>	126
C.3	Auswertung: <i>BV5-fine</i>	130
C.4	Auswertung: <i>BV6-fine</i>	134
C.5	Auswertung: <i>BV7-fine</i>	138

	C.6 Auswertung: <i>BV8-fine</i>	142
	C.7 Auswertung: <i>BV13-fine</i>	146
D	Parameterstudie BV3	150
	D.1 Auswertung: <i>BV3-rough</i>	150
	D.2 Auswertung: <i>BV3-fine-perror-1</i>	154
	D.3 Auswertung: <i>BV3-fine-perror-10</i>	158
	D.4 Auswertung: <i>BV3-fine-perror-50</i>	162
	D.5 Auswertung: <i>BV3-fine-perror-100</i>	166
	D.6 Auswertung: <i>BV3-fine-single</i>	170
	D.7 Auswertung: <i>BV3-rough-USCARC</i>	174
	D.8 Auswertung: <i>BV3-fine-USCARC</i>	178
	D.9 Auswertung: <i>BV3-rough-SCARC</i>	182
	D.10 Auswertung: <i>BV3-fine-SCARC</i>	186

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
A	m^2	Fläche
c_s	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_p	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität bei $p = \text{konst.}$
c_v	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität bei $v = \text{konst.}$
C	div	Konstante
D_α	cm^2/s	Diffusionskoeffizient der Gaskomponente α
E	J	Gesamtenergiedichte
F	N	Kraft
g	m/s^2	örtliche Fallbeschleunigung
G	J	freie Enthalpie (Gibbs-Energie)
G_m^0	J/mol	molare freie Enthalpie beim Standarddruck p^0
$\Delta_B G_m$	J/mol	molare freie Bildungsenthalpie
$\Delta_R G_m$	J/mol	molare freie Reaktionsenthalpie
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
h_s	J/kg	spezifische, sensible Enthalpie
H_s	J	sensible Enthalpie
H_G	MJ/m^3	Gemischheizwert
H_o	kJ/kg	Brennwert (veraltet: oberer Heizwert)
H_u	kJ/kg	Heizwert (veraltet: unterer Heizwert)
k	$\text{W}/(\text{m K})$	Wärmeleitfähigkeit
l	m	Länge
L	kg_L/kg_B	Luftmenge
L_{\min}	kg_L/kg_B	Mindestluftbedarf
L_{st}	kg_L/kg_B	stöchiometrischer Luftbedarf
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	g/mol	molare Masse
\dot{m}'_α	kg/s	Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponente α durch chemische Reaktionen
$\dot{m}''_{b,\alpha}$	kg/s	Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponente α durch verdampfende Tropfen oder Partikel

Formelzeichen und Abkürzungen

n	mol	Stoffmenge (veraltet: Molzahl)
N	–	Anzahl der Teilchen
O_2	kg _{O₂} /kg _B	Sauerstoffmenge
$O_{2\min}$	kg _{O₂} /kg _B	Mindestsauerstoffbedarf
p	bar, Pa	Druck
p^0	atm, bar	Standarddruck, $p^0 = 1 \text{ atm} = 1.0133 \text{ bar}$ häufig auch: $p^0 = 1 \text{ bar}$
p_d	bar	Dampfdruck
p_i	bar, Pa	Partialdruck der Komponente i
P	W	Leistung
P_e	kW	effektive Leistung
q	J/kg	spezifische Wärme(menge)
Q	J	Wärme
$dQ_B/d\varphi$	J/°KW	Brennverlauf
$dQ_W/d\varphi$	J/°KW	Wandwärmeverlauf
R_s	J/(kg K)	spezifische Gaskonstante
t	°C	Temperatur
T	K	thermodynamische Temperatur
\mathbf{u}	m/s	Geschwindigkeitsvektor
u	J/kg	spezifische innere Energie
U	J	innere Energie
v	m ³ /kg	spezifisches Volumen
V	m ³	Volumen
\overline{W}	kg/mol	Molmasse des Gasgemisches
W_α	kg/mol	Molmasse des Moleküls α
W_s	m/s	isentropische Schallgeschwindigkeit
x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate
Z_α	–	Massenanteil der Gaskomponente α

Griechische Formelzeichen

α	–	Index für Gasart
β	1/K	(isobarer) Volumenausdehnungskoeffizient
δ	m	Strömungsgrenzschichtdicke
δ_T	m	Temperaturgrenzschichtdicke
δ_v	m	Dicke der viskosen Unterschicht
δ_W	m	Wandschichtdicke
ε	m ² /s ³	turbulente Dissipationsrate
η	N s/m ²	(dynamische) Viskosität
κ	–	Isentropenexponent
κ	–	Turbulente kinetische Energie

λ	m	Wellenlänge
μ	J/mol	chemisches Potential
ν	m ² /s	kinematische Zähigkeit, Viskosität (= η/ρ)
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	N/m ²	Spannung
$\boldsymbol{\sigma}$	N/m ²	Spannungstensor
τ	s	Zeit
τ	N/m ²	Schubspannung
$\boldsymbol{\tau}$	N/m ²	deviatorischer Spannungstensor
ω	s ⁻¹	Rotation von \mathbf{u}

Konstanten

g	9.8067	m/s ²	Normalfallbeschleunigung
k_B	$1.3806 \cdot 10^{-23}$	J/K	Boltzmann-Konstante
R_m	8314.5	J/(kmol K)	allgemeine (molare) Gaskonstante
σ	$5.6703 \cdot 10^{-8}$	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante

Indizes und Abkürzungen

IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam	d	Dampf
IAPWS-IF97	IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam	DNS	Direct Numerical Simulation
B	Brennstoff; Bildung	EDC	Eddy Dissipation Concept
BB	Brennbeginn	fl	flüssig; Flamme
BD	Brenndauer	F	Formation
ch	charakteristisch	FDM	<i>finite difference method</i>
chem	chemisch	FDS	Fire Dynamics Simulator
CAD	Computational Aided Design	FEM	<i>finite element method</i>
CEA	Chemical Equilibrium Applications	FVM	<i>finite volume method</i>
CFD	Computational Fluid Dynamics	g	gasförmig
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy	gem	gemessen
CH ₄	Methan	ges	gesamt
CO	Kohlenmonoxid	GNU	GNU's Not Unix
CO ₂	Kohlendioxid	GPU	graphics processing unit
CPU	central processing unit	GUI	graphical user interface
CSV	Comma-separated values	HC	Kohlenwasserstoff
CUDA	Compute Unified Device Architecture	HDD	Hard-Disk-Drive
		HDWNA	Hochdruckwassernebelanlage
		i	innen; indiziert; Laufvariable (1, 2, . . . , k)
		k	Anzahl der Komponenten
		k. A.	keine Angabe

Formelzeichen und Abkürzungen

kin	kinetisch	real	real
konst	konstant	rel	relativ
kr, krit	kritisch	Re	Reynolds-Zahl ($= c \cdot l/\nu$)
l	flüssig (liquid), Luft, Längen-	RTE	radiation transport equation
L	Luft; Ladeluft	RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
LBM	Lattice-Boltzmann method	sim	Simulation; simuliert
LES	Large Eddy Simulation	SMV	Smokeview
m	mittel; molar	st	stöchiometrisch; Stoff
max	maximal	spez	spezifisch
min	minimal	SSD	Solid-State-Drive
MLR	mass loss rate	stl	STereoLitographie; Standard Triangulation/Tessellation Language
MPI	Message Passing Interface	STP	Standard Temperature and Pressure
N	Normalbedingungen	t	transportiert; turbulent; technisch
NIST	National Institute of Standards and Technology	TEA	Thermochemical Equilibrium Abundances
NFPA	national fire protection association	TS	Siedepunkt
NO	Stickstoffmonoxid	u	untere; Umgebung
NO ₂	Stickstoffdioxid	vol	volumetrisch
NO _x	Stickoxide	V	Verdampfung; Verlust
NTP	Normal Temperature and Pressure	VBA	Visual Basic for Applications
Nu	Nußelt-Zahl ($= \alpha \cdot l/\lambda$)	VDI	Verein deutscher Ingenieure
NZ	Normzustand (nach ISO 1585)	W	Widerstand; Wand; Welle
O ₂	Sauerstoff	zu	zugeführt(e) (Wärme)
OS	Operating System	zul	zulässig
Pr	Prandtl-Zahl ($= \nu/a$)		
RAM	Random-Access Memory		
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes		

Operatoren

d	vollständiges Differential	∂	partiell Differential
δ	unvollständiges Differential	∇	Nabla

SI-Präfixe

G	10 ⁹	Giga	c	10 ⁻²	Zenti
M	10 ⁶	Mega	m	10 ⁻³	Milli
k	10 ³	Kilo	μ	10 ⁻⁶	Mikro
d	10 ⁻¹	Dezi	n	10 ⁻⁹	Nano

1 Einleitung

Tunnel bzw. Tunnelbauwerke sind im heutigen (Schwer)-Verkehr nicht mehr wegzudenken. Sie verkürzen täglich tausendfach zurückgelegte Wegstrecken enorm und entlasten somit den Verkehr und die Umwelt. Wie man am Beispiel der Nord-Süd Verbindung von Linz nach Graz sehen kann (Bosruck- und Gleinalmtunnel), dienen diese auch der Sicherheit auf den Straßen, da eine Befahrung des Pyhrnpasses bei spontan eintretenden winterlichen Bedingungen, insbesondere für den Schwerverkehr, die Unfallgefahr steigen lässt. Durch die Fahrt durch einen Tunnel kann genau dieser Weg über die Pass-Straße vermieden werden.

Auf der Kehrseite gibt es jedoch eine Vielzahl an zusätzlichen Gefahren, die in Tunnelbauwerken zu berücksichtigen sind, da die Fluchtmöglichkeiten eingeschränkt sind und auch die Belüftung eine ingenieurtechnische Herausforderung darstellt. Diese Arbeit beschäftigt sich genau mit diesem Problem am Beispiel des Koralmtunnels, welcher mit einer Länge von 32 km Teil der Eisenbahnhochleistungsverbindung zwischen Graz und Klagenfurt ist. Die beiden einspurigen Tunnelröhren sind alle 500 m durch Querschläge miteinander verbunden, welche im Brandfall eines Zuges auch als Fluchtmöglichkeit dienen sollen. Vor kurzem durchgeführte reale Brandversuche im Maßstab 1:1 untersuchten die Ausbreitung von Rauchgasen im Ereignisfall. Ziel dieser Arbeit war die Validierung numerischer Strömungsberechnungen mittels der Versuche. Für die CFD-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics) wurde die Software FDS (Fire Dynamics Simulator) verwendet werden, wobei hier ein besonderes Augenmerk auf die unterschiedlichen Modellparameter der Software gelegt wurde. Hierfür wurden bei Bedarf Parameterstudien bzw. Validierungsarbeiten mit der Literatur oder anderen Tools durchgeführt (z.B. die kommerzielle Software Ansys Fluent).

2 Physikalische Grundlagen

Um Vorhersagen über ein Brandszenario treffen zu können, ist es notwendig dem für das Ingenieurwesen üblichen Pfad zu folgen, welcher in Abbildung 2.1 dargestellt ist. D.h. der Weg führt durch eine möglichst allgemein gültige Überführung der zu untersuchenden Phänomene der Physik in eine "berechenbare" Welt der Mathematik, in Form von (meist partiellen Differential-) Gleichungen zur Numerik, deren Lösung wiederum Rückschlüsse über das tatsächliche Brandszenario zulässt.

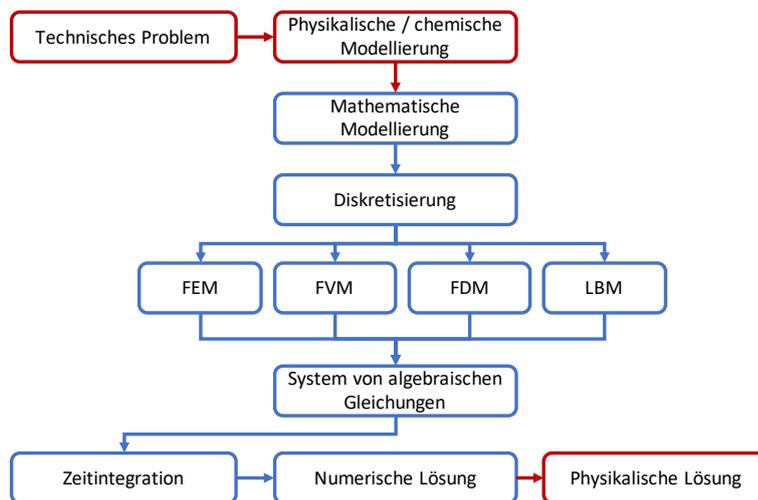


Bild 2.1: typ. Prozedur im Ingenieurwesen [1]

D.h. es erfordert Kenntnisse aus verschiedenen Disziplinen des Ingenieurwesens, um einen Brand vollständig beschreiben zu können, nämlich der Strömungsmechanik, der Wärmeübertragung, der Chemie und zusätzlich der Mathematik bzw. der Numerik. Weiters ist es gerade im Bereich der CFD quasi unerlässlich Tools für die Datenverarbeitung zu beherrschen. D.h. einfache Skriptsprachen wie Matlab oder Phyton und Tools zur Datenvisualisierung wie Microsoft Excel sollten bedient werden können.

Nachweise für die Brandschutzsicherheit können grob in die verschiedenen Disziplinen wie in Tab. 2.1 dargestellt, werden. Umfang dieser Arbeit ist insbesondere die Berechnung, Betrachtung und Ausbreitung der Rauchgase innerhalb eines Tunnels.

Zur Nachweisführung werden drei gänzlich unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet. Empirische Ansätze stützen sich hierbei auf umfangreiche bereits durchgeführten

Tabelle 2.1: Nachweis der Brandsicherheit durch Brandschutzingenieurmethoden[2]

Ziel des Brandschutznachweises	Ingenieurmethode für den Nachweis
Überprüfung der Tragfähigkeit einer Konstruktion für einen bestimmten Zeitraum	Strukturberechnungen; statische Nachweise im Heißzustand
Überprüfung der Maßnahmen zur Minimierung der Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb eines Bauwerks	Brandsimulationsmodelle; Berechnungsverfahren von Feuer und Rauch innerhalb der Simulation zur Rauch- und Feuerausbreitung
Überprüfung der Maßnahmen zur Minimierung der Ausbreitung von Feuer und Rauch außerhalb eines Bauwerks	Brandsimulationsmodelle; Berechnungsverfahren zur Simulation des Brandüberschlags und der Wärmestrahlung
Sicherstellung der sicheren Evakuierung von Personen aus Bauwerken	Evakuierungssimulationsmodelle; Evakuierungsberechnungen und -versuche
Sicherstellung der Sicherheit von Rettungskräften	Brandsimulationsmodelle; Berechnungsverfahren zur Berechnung der Verrauchung und des Flash-Overs

Brandversuche.

Die Anzahl an verfügbaren dokumentierten Brandversuchen im Maßstab 1:1 ist sehr gering bzw. oft gibt es keine Referenzen mit entsprechenden Messdaten, weshalb dieser Ansatz oft nicht mehr weiter verfolgt werden kann. Zonenmodelle sind analytische Lösungen durch ein Aufsplitten der Räumlichkeiten in eine heiße Rauchgasober-schicht und eine kalte Unterschicht. Dies ermöglicht rasche Aussagen über z.B. Temperaturentwicklungen, jedoch ist das Anwendungsgebiet sehr stark auf einfache Fälle beschränkt und es gilt eine generelle Unsicherheit bzgl. der Berechnungsergebnisse, da sich diese auf einen in der Realität nie vorhandenen Idealfall stützt. Schlussendlich gibt es noch einen weiteren Ansatz durch die Abbildung der Szenarien in einem CFD-Modell. Diese lassen sich an das jeweilige Szenario anpassen und bieten die akkurateste Möglichkeit der Approximation der Realität.

Folgend werden die naturwissenschaftlichen Grundlagen zur Beschreibung der Thermo- und Hydrodynamik von Fluiden erklärt und der Weg zu den in CFD-Software (FDS, Ansys Fluent, ...) eingepflegten Grundgleichungen wird erläutert.

2.1 Eigenschaften von Fluiden

Für die Beschreibung eines reinen (einphasigen) Fluids werden 7 Größen benötigt: die Dichte ρ , die Temperatur T , der Druck p , die Energie E und der Geschwindigkeitsvektor \mathbf{u} (3 Komponenten). Die Berechnung dieser Unbekannten erfordert zum einen mathematische Gleichungssysteme, welche auf physikalischen Modellen basieren (siehe Kapitel 2.2 und 2.3), als auch Stoffwerte, die diese Modelle stützen. Um einen Überblick und ein Gefühl für die Größenordnungen zu bekommen, sind im nächsten Unterkapitel die wichtigsten Stoffgrößen für die Berechnung von Luftströmungen in Brandszenarien zusammengefasst. Für den Einstieg beschränken wir uns vorerst auf trockene Luft.

2.1.1 Stoffwerte von trockener Luft

Die Werte stammen aus dem VDI-Wärmeatlas [3] und gelten für trockene Luft bei Atmosphärendruck. Diese Stoffwerte sind sowohl druck-, als auch temperaturabhängig. Die Druckabhängigkeit kann bei Betrachtung der Stoffgrößen bei Brandszenarien vernachlässigt werden, da von relativ geringen Geschwindigkeiten ($<10\text{m/s}$) und geringen Abweichungen vom Standarddruck ausgegangen werden kann. Folgend sind die Stoffgrößen über die Temperatur aufgetragen, wobei ein Interpolationspolynom 3ter Ordnung an die Stützstellen angenähert wurde, welches für genauere Berechnungen in z.B. Fluent verwendet werden kann. Es wird meist folgende Form verwendet:

$$\phi(T) = A_1 + A_2T^1 + A_3T^2 \dots \quad (2.1)$$

Die Koeffizienten findet sich in Tabelle 2.2 im Anschluss an die Diagramme, welche einen Überblick ermöglichen, um festzustellen, ob eine größere oder kleinere Temperaturabhängigkeit vorliegt.

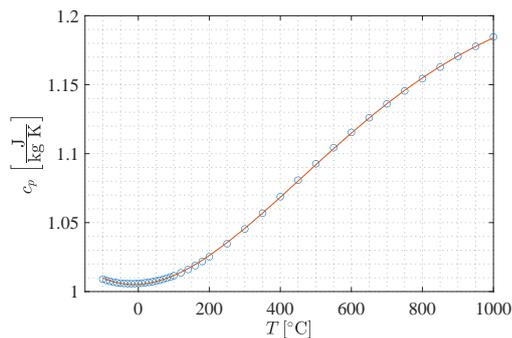


Bild 2.2: Wärmekapazität

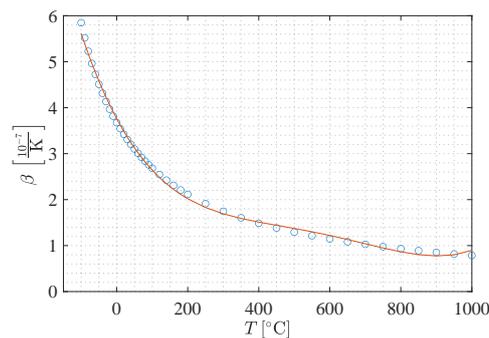


Bild 2.3: Ausdehnungskoeffizient

Wie in Abbildung 2.2 ersichtlich ist, bleibt die Wärmekapazität im relevanten Temperaturbereich (0 bis 500°C) zwischen $1,0$ bis $1,09 \text{ J}/(\text{kg K})$, d.h. der Wert kann mit $1,04 \text{ J}/(\text{kg K})$ angenommen werden.

Abbildung 2.3 stellt den Ausdehnungskoeffizienten dar. Wie erwartet, dehnt sich Luft mit zunehmender Temperatur aus. Durch diese Ausdehnung sinkt die spezifische Dichte und ist somit Ursache für die Auftriebswirkung in Brandszenarien (Kamineffekt). Der Ausdehnungskoeffizient β ist hier nur aufgrund der Vollständigkeit aufgeführt. In der praktischen Anwendung findet diese bei Realgasgleichungen Verwendung. Meist wird jedoch mit der Idealgasgleichung gerechnet.

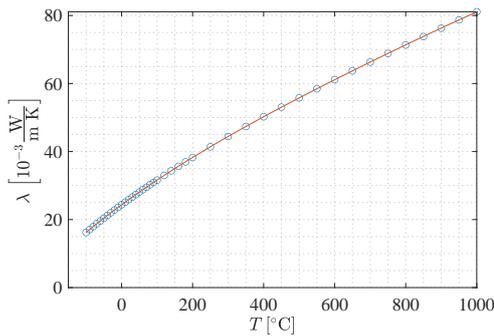


Bild 2.4: Wärmeleitfähigkeit

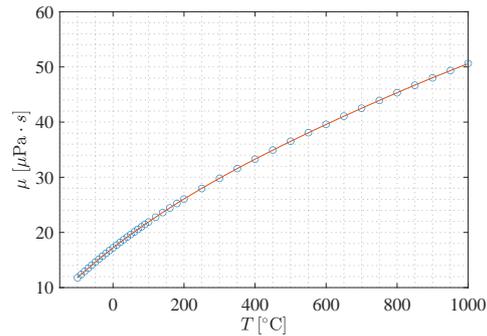


Bild 2.5: Viskosität

Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 zeigen die Tendenz zu höheren Werten der Wärmeleitfähigkeit und der Viskosität mit steigender Temperatur. Diese sind insbesondere für die Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen (siehe 2.5) von großer Bedeutung.

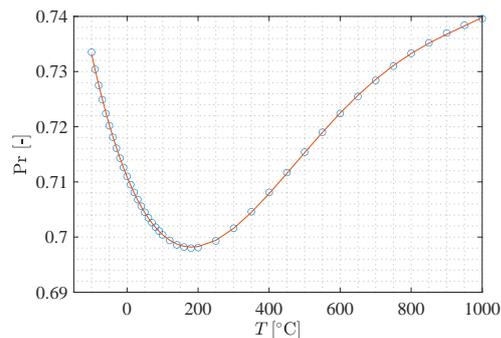


Bild 2.6: Prandtlzahl

Wie Abbildung 2.6 zeigt, ist auch die Änderung der Prandtlzahl über große Bereiche vernachlässigbar klein, weshalb diese in CFD-Programmen vereinfacht auf 0.7 festgelegt wird.

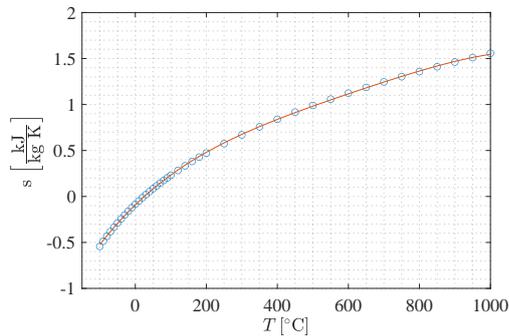


Bild 2.7: Entropie

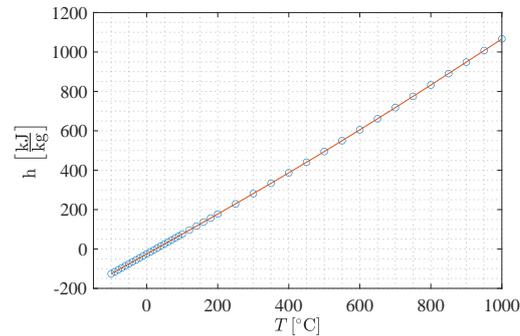


Bild 2.8: Enthalpie

Die Entropie und die Enthalpie gem. Abbildung 2.7 und 2.8 sind erwartungsgemäß größer mit steigender Temperatur.

Schallgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Information in einem Körper ist eine endliche Größe und wird allgemein als Schallgeschwindigkeit bezeichnet. Für ideale Gase gilt:

$$c_s = \sqrt{\frac{\kappa R_m T}{M}} = \sqrt{\kappa R_{\text{spez}} T} \quad (2.2)$$

κ	Isentropenexponent
R_m	allgemeine (molare) Gaskonstante
T	Gastemperatur
M	Molmasse
R_{spez}	spezifische Gaskonstante

Für trockene Luft ergibt sich somit eine vereinfachte Darstellung, welche rein temperaturabhängig ist:

$$c_{s,\text{Luft}} = (331.3 + 0.606 \cdot T) \frac{m}{s} \quad (2.3)$$

2.1.2 Thermische und kalorische Gasgleichung [4]

Für die eindeutige Beschreibung eines Gases genügt die Angabe zweier unabhängiger intensiver Zustandsgrößen (Druck p , spezifisches Volumen v ¹ oder der Temperatur T) und eine unabhängige extensive Größe (Masse m oder das (nicht spezifische) Volumen V). Weitere Größen können durch die thermische ($f(p, T, v) = 0$) oder der kalorischen Zustandsgleichung ($f(e, T, v) = 0$ bzw. $f(h, p, T) = 0$) abgeleitet werden².

¹ $v = \rho^{-1}$

²Dies gilt für alle Zustandsgrößen, mit Ausnahme der Entropie s

Tabelle 2.2: Polynomkoeffizienten¹ für CFD-Programme (siehe S. 5)

	A5	A4	A3	A2	A1
ρ	6.500 594 8E-12	-2.213 409 7E-8	2.772 144 2E-5	-1.567 687 6E-2	3.933 888 6
h	-7.032 253 E-8	2.170 826 3E-4	-1.303 467 8E-1	1.033 635 4E3	-3.018 427 3E5
s	-2.224 731 9E-9	7.918 754 4E-6	-1.085 041 4E-2	8.069 420 1	-1.635 582 5E3
c_p	1.668 264 6E-10	-7.401 276 5E-7	1.087 312 8E-3	-4.275 840 3E-1	1.055 050 8E3
β	1.914 117 7E-8	-6.508 283 9E-5	8.133 983 2E-2	-4.584 223 5E1	1.143 401 3E4
λ	-1.064 759 1E-14	4.273 198 4E-11	-7.055 315 6E-8	1.064 215 6E-4	-2.766 781 6E-4
μ	-9.020 281 5E-18	3.599 359 8E-14	-5.931 662 5E-11	7.522 898 3E-8	3.935 796 3E-7
V	1.346 583 4E-17	-5.506 447 8E-14	1.488 814 1E-10	1.865 502 E-8	-1.636 490 5E-6
a	4.778 551 E-17	-1.574 847 9E-13	2.670 935 4E-10	1.495 575 1E-8	-2.012 065 3E-6
Pr	2.179 591 8E-13	-8.579 376 6E-10	1.193 944 7E-6	-6.357 383 7E-4	0.811 748 23
W_s	-1.594 332 9E-10	6.183 828 E-7	-9.664 217 6E-4	1.011 984 5	1.150 953 6E2

¹ Für die Polynomform $\phi(T) = A_1 + A_2T^1 + A_3T^2 \dots$

In den vielen technischen Anwendung (große spezifisches Volumen bzw. kleine Dichte) kommt die ideale Gasgleichung zum Einsatz, welche eine gute Approximation für das Realgasverhalten ist. Sowohl Luft als auch das gasförmig enthaltende Wasser werden bis zu einem Gesamtdruck von etwa 15 bar durch die Idealgasgleichung ausreichend gut beschrieben[5].

Ideale (thermische) Gasgleichung

Die Modellvorstellung eines idealen Gases setzt voraus, dass die Anziehungskräfte zwischen den einzelnen Gasmolekülen vernachlässigt werden dürfen. Dies ist nur als gedachtes Modell möglich, da diese Voraussetzung in der Realität nie erfüllt werden kann. Tatsächlich vorkommende Gase, welche als reale Gase bezeichnet werden, bestehen aus einzelnen Atomen oder Molekülen, welche Kräfte ausüben. Bei einer ausreichenden Verdünnung eines Realgases vermindert sich diese Wirkung und das Verhalten der Realgase geht in das eines Idealgases (als Grenzfall) über[6].

Es gibt verschiedene Schreibweisen der idealen Gasgleichung, welche ineinander übergeführt werden können:

$$p \cdot v = R_s \cdot T \quad (2.4)$$

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \quad (2.5)$$

$$p \cdot V = n \cdot R_m T \quad (2.6)$$

p	Druck
v	spezifisches Volumen
V	Volumen
R_m	allgemeine (molare) Gaskonstante
R_s	spezifische Gaskonstante
T	Temperatur
n	Teilchenzahl

Kalorische Zustandsgleichung

Die kalorischen Zustandsgleichungen sind eigentlich nur eine Spezialform der Energieerhaltungsgleichung (bzw. des 1.Hauptsatzes der Thermodynamik). Da diese allein nicht ausreicht, um ein vorliegendes Gas vollständig zu beschreiben, wird in diesem Kapitel eine weitere Zustandsgröße, die freie Enthalpie G (oder auch *Gibbs-Energie*, g ist die spezifische freie Enthalpie) erklärt. Dieses thermodynamische Potential wird später auch zur Beschreibung von chemischen Reaktionen verwendet.

$$g(p, T) = h - T s \quad (2.7)$$

$$= u + p v - T s \quad (2.8)$$

h	spezifische Enthalpie
T	Temperatur [K]!
s	Entropie
u	spezifische innere Energie

Entscheidend für die Strömungsmechanik ist die Enthalpie h , welche bei Standarddruck eine aus der spezifischen Wärmekapazität abgeleitete Größe ist:

$$h(T, p^0) = h_0 + \int_{T_0}^T c_p \, dT \quad (2.9)$$

p^0	Standarddruck
h_0	spezifische Bildungsenthalpie
c_p	spezifische Wärmekapazität

2.1.3 (Ideale) Gasgemische

Für Gasgemische aus idealen Gasen gilt, dass sich die Komponenten nicht gegenseitig beeinflussen können. Es gilt das *Gesetz von Dalton*:

$$p = \sum_i p_i \quad (2.10)$$

Generell können für weitere Berechnungen drei unterschiedliche Fälle unterschieden werden, um die Gaszusammensetzung definieren zu können. Es können die jeweiligen Massenanteil $\mu_i = \frac{m_i}{m}$, die jeweiligen Volumenanteile $\phi_i = \frac{V_i}{V}$ oder aber die Molanteile $\nu_i = \frac{n_i}{n}$ verwendet werden. Durch Verwendung des *Satzes von Avogadro* folgt $\phi_i = \nu_i$, und auch die Partialdrücke lassen sich durch $\frac{p_i}{p} = \nu_i$ vereinfacht ausdrücken.

Es folgen weitere Vereinfachungen zur Berechnung der kalorsichen Zustandsgrößen eines idealen Gasgemisches, welche z.B. in [4, S. 159] sehr übersichtlich zusammengefasst sind.

Eigenschaften von feuchter Luft

Feuchte Luft ist ein Gas-Wasserdampf-Gemisch für welches die Annahme in guter Näherung gilt, dass sich beide Komponenten so verhalten wie sie es als alleinstehendes Gas tun würden. Es gilt auch das bereits bekannte *Dalton'sche Gesetz*. Zur Definition des Wasserdampfgehaltes kann entweder der *Feuchtegrad* $x = \frac{m_d}{m_l}$, welcher die in 1kg trockene Luft enthaltene Wassermenge angibt oder aber die relative Feuchte $\varphi = \frac{p_d}{p_d^s}$, welche den Abstand zur Sättigung ausdrückt, genutzt werden. Der Sättigungsdampfdruck kann aus den Dampf tafeln für diverse Temperaturen bzw. Drücke entnommen werden.

Für CFD-Berechnungen ist ein Wissen bzgl. des Einflusses des Wasserdampf-Anteils in der Luft und die daraus resultierenden Änderungen der Stoffwerte von großer Bedeutung, weshalb die wichtigsten Zusammenhänge hier in aller Kürze zusammengefasst sind. Für ausführlichere Informationen sei auf einschlägige Fachliteratur verwiesen (z.B. [4]). Es sei angemerkt, dass die Größen meist auf 1kg trockene Luft bezogen sind³, da dies die Berechnung meist vereinfacht, da die Masse der trockenen Luft konstant ist und der Wasseranteil aufgrund von Kondensations- bzw. Verdunstungsprozessen sich ändern kann. Dies hat sich insbesondere bei Anwendungen zur Raumklimatisierung bewährt.

$$h_{1+x} = c_{pl}t + x(r_0 + c_{pd}t) \quad (2.11)$$

t	Temperatur der feuchten Luft
h_{1+x}	Enthalpie je kg trockene Luft
c_{pl}	spezifische isobare Wärmekapazität von trockener Luft
c_{pd}	spezifische isobare Wärmekapazität von Wasserdampf
r_0	Verdampfungswärme bei 0 °C

$$h = \frac{h_{1+x}}{1+x} \quad (2.12)$$

h	Enthalpie je kg feuchte Luft
h_{1+x}	Enthalpie je kg trockene Luft
x	Feuchtegrad

$$x = \frac{R_l}{R_d} \frac{1}{\frac{p}{p_d} - 1} \quad (2.13)$$

R_l	Gaskonstante der trockenen Luft
R_d	Gaskonstante des Wasserdampfes
p	Gesamtdruckes der feuchten Luft
p_d	Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T

$$v = \frac{V}{m} = \frac{V}{m_l(1+x)} = \frac{v_{1+x}}{1+x} \quad (2.14)$$

v	spezifisches Volumen der feuchten Luft
V	tatsächlich eingenommenes Volumen
m	Masse der feuchten Luft

Eine ausgezeichnete Quelle für Interpolationspolynome für diverse weitere Stoffdaten von feuchter Luft (wie z.B. dynamische und kinematische Viskosität) wurde von Melling, Noppenberger, Still und Venzke (NIST) veröffentlicht[7].

Bei der Definition von Randbedingungen in den CFD-Modellen in Kapitel 4.4, wo die Tunnelbrände des Koralmtunnels modelliert sind, ist die Wärmekapazität von feuchter

³Index 1+x wie z.B. h_{1+x}

Luft besonders wichtig, weshalb diese in Tab. 2.3 und Abb. 2.9 zusammengefasst wurden. Für die Wärmekapazität von Luft wurden die vorgestellten Interpolationpolynome und die Koeffizienten aus Tab. 2.2 verwendet. Die Enthalpie und Sättigungsdampfdrücke wurden mittels bestehender Dampftafeln⁴ ermittelt.

Tabelle 2.3: spezifisches Volumen und Wärmekapazität von feuchter Luft bei 14 °C und 1 bar in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit φ

φ [%]	x [%]	c_p [kJ/(kgK)]	v [m ³ /kg]
0	0	1.0055	1.2132
10	0.0996	1.1689	1.2125
20	0.1995	1.3326	1.2117
30	0.2998	1.4968	1.2110
40	0.4004	1.6613	1.2103
50	0.5012	1.8263	1.2095
60	0.6025	1.9916	1.2088
70	0.7040	2.1574	1.2081
80	0.8059	2.3235	1.2073
90	0.9081	2.4901	1.2066
100	1.0106	2.6570	1.2059

⁴Konkret wurde ein Matlab-Skript von Holmgren [8] verwendet, welches sich auf die Werte der IAPWS-IF97 stützt[9]

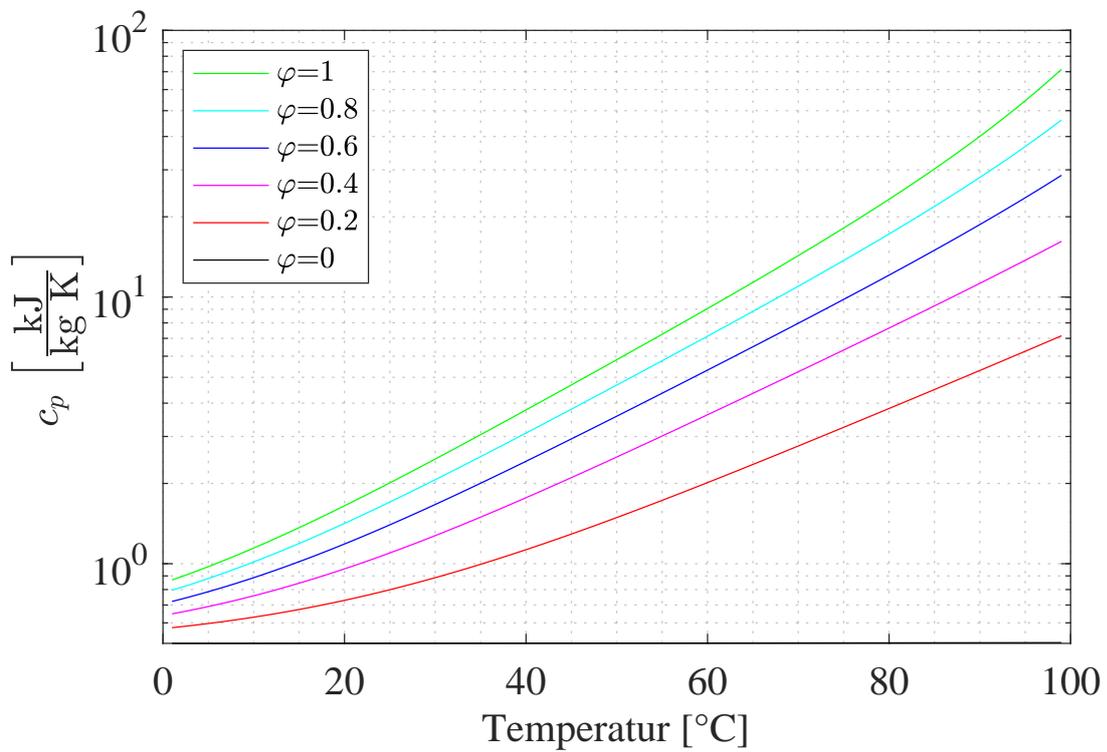


Bild 2.9: spezifische Wärmekapazität von feuchter Luft bei 1 bar

2.2 Strömungsmechanik

Grundlage für die Beschreibung von Strömungen von Fluiden sind die Erhaltungsgleichungen für die Masse, den Impuls und die Energie in ihrer allgemeinsten Form:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\bar{V}(t)} \rho dV = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\bar{V}(t)} \rho \mathbf{u} dV = \sum \mathbf{f} \quad (2.16)$$

$$\frac{dE_{\text{ges}}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\bar{V}(t)} \rho \left(u + \frac{1}{2} \mathbf{u}^2 \right) dV = \mathbf{u} \cdot \sum \mathbf{f} + \sum (q + S_e) \quad (2.17)$$

E_{ges}	Gesamtenergie
$\bar{V}(t)$	Kontrollvolumen ⁵
u	innere Energie
\mathbf{u}	Geschwindigkeitsvektor
$\sum \mathbf{f}$	externe Kräfte
$\sum (q + S_e)$	Quellterme zufolge thermischer Leistung und chemischen Reaktionen

2.2.1 Massen- und Stofftransportgleichungen

Diese Schreibweise kann mithilfe von Transformationssätzen in eine differentielle Schreibweise übergeführt werden. Durch zusätzliche Anwendung der Stokes'schen Hypothese können die Navier-Stokes-Gleichungen hergeleitet werden. Auf eine detaillierte Herleitung dieser wird an dieser Stelle verzichtet, da diese in entsprechender Fachliteratur leicht zu finden ist [10]. Unter Berücksichtigung der Quellterme durch Phasenübergänge aus Feststoffen ergibt sich folgende Form für die Massenerhaltung⁶:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \quad (2.18)$$

\dot{m}_b'''	Massenproduktionsrate per Volumen aller Gaskomponenten durch verdampfende Tropfen oder Partikel
----------------	---

⁵zeitlich veränderlich aufgrund der Lagrangeschen Betrachtungsweise (massenfest)

⁶Diese kann auch aus der Aufsummierung von 2.18 über alle vorkommenden Moleküle gewonnen werden

Es sei angemerkt, dass in allen Gleichungen prinzipiell dieselbe Nomenklatur verwendet wird, wie sie im *Technical Reference Guide* von FDS [11] verwendet wurde, um ein späteres Nachlesen von nicht erwähnten Themen zu erleichtern.

Wendet man nun die Erhaltungsgleichung auf die Massenanteile diverser vorkommender Moleküle an, so erhält man zusätzliche Gleichungen, welche gelöst werden müssen (für jedes Molekül ergibt sich eine zusätzliche Gleichung) da das Erhaltungstheorem auch auf atomarer Ebene Gültigkeit besitzt. Man nennt diese Gleichungen auch Stofftransportgleichungen, welche den Transport durch Diffusion (Ficksches Gesetz) und Quellen bzw. Senken durch chemische Reaktionen miteinbeziehen [10, S. 15]. Die Darstellungsform der Gleichung bleibt an sich gleich, es werden lediglich Diffusions- und Quellterme (in grau markiert) ergänzt:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (2.19)$$

Z_α	Massenanteil der Gaskomponente α
D_α	Diffusionskoeffizient der Gaskomponente α
\dot{m}_α'''	Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponente α durch chemische Reaktionen
$\dot{m}_{b,\alpha}'''$	Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponente α durch verdampfende Tropfen oder Partikel

Im Zuge einer numerischen Berechnung muss auf die Plausibilität der Ergebnisse geachtet werden, da die Numerik auch unphysikalische Lösungen wie z.B. durch errechnen von negativen Massenanteile den obigen Gleichungen genügen kann. Konkret folgt daraus, dass die Massen- bzw. Molanteile jedes Moleküles die Bedingung $0 \leq Z_\alpha \leq 1$ erfüllen müssen. Es gibt für die Lösung dieses Problems verschiedenste Ansätze, weshalb hier auf die Dokumentation in [11, S. 151-153] verwiesen sei.

Vereinfachung für niedrige Mach-Zahlen

Für die Impulserhaltungs- und die Energieerhaltungsgleichungen wurde in FDS eine Vereinfachung für niedrige Machzahlen nach Rehm und Baum [12] verwendet. Diese schlagen für $Ma < 0.3$ eine Aufspaltung des Druckes $p(\mathbf{x}, t)$ in einen Hintergrunddruck $\bar{p}(z, t)$ und einen Störungsdruck $\tilde{p}(\mathbf{x}, t)$ vor:

$$p(\mathbf{x}, t) = p_0(t) + \int_0^z \rho_0(z) g_z dz + \tilde{p}(\mathbf{x}, t) \quad (2.20)$$

$$= \bar{p}(z, t) + \tilde{p}(\mathbf{x}, t) \quad (2.21)$$

Dadurch vereinfacht sich auch die Gasgleichung zu

$$\bar{p} = \rho T R \sum_{\alpha} \frac{Z_{\alpha}}{W_{\alpha}} \equiv \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (2.22)$$

Z_{α} Massenanteil der Gaskomponente α
 W_{α} Molmasse des Moleküles α
 \bar{W} Molmasse des Gasgemisches

Es sei angemerkt, dass sich der *Validation Guide*[13] von FDS nur auf Experimente bis zu $Ma < 0.1$ stützt, obwohl die Gültigkeit bis zu $Ma < 0.3$ reicht.

Weiters ergeben sich in der Anwendung in FDS programmiertechnische Vereinfachungen, wie z.B. die Möglichkeit verschiedenen Druckzonen nutzen zu können. Hierbei ist dann der Unterschied im Hintergrunddruck der Antrieb für die Strömung zwischen den Druckzonen. Innerhalb einer Druckzone ist der Stördruck \tilde{p} die Ursache für eine Strömung.

Zur Verdeutlichung der Anwendungsgebiete dieser Vereinfachung sind in Tab. 2.4 und in Tab. 2.5 Beispiele aufgelistet.

Tabelle 2.4: Beispiele für Strömungen die inkompressibel behandelt werden müssen[14].

Beispiel	Fluid	u [m/s]	c_s [m/s]	Ma	$\Delta\rho/\rho$ [%]
Betankung	Wasserstoff	5	1326	0.00	0.001
Kyrogentechnik, $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$	Argon	1	184	0.01	0.001
Lüftungsrohr	Wasserdampf	8	343	0.02	0.027
Kondensator, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.001 bar	Wasserdampf	5	413	0.01	0.007
Wasserturbine	Wasser	53	1465	0.04	0.064
Kraftfahrzeug, 200 km h^{-1}	Luft ¹	56	319	0.17	1.49
Windrotor, $R = 100\text{ m}$, 5 U/min	Luft ¹	53	319	0.16	1.34
Kompressibilitätsgrenze				0.3	4.31

¹ bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabelle 2.5: Beispiele für Strömungen die kompressibel behandelt werden müssen[14].

Beispiel	Fluid	u [m/s]	c_S [m/s]	Ma	$\Delta\rho/\rho$ [%]
Windrotor, $R = 200m$, 10 U/ min	Luft ¹	210	319	0.66	17.8
Dampfturbine, 1500 U/ min	Wasserdampf	945	1327	0.7	20.2
Gasturbine, 3000 U/ min	Methan	788	878	0.9	28.6
Schallwelle	Luft ²	343	343	1.0	33.3
Detonationswelle	Wasser	3000	1426	2.1	53
Detonationswelle	Luft ²	2000	343	5.8	94
Spaceshuttle, Wiedereintritt	Luft ³	8000	299	27	99

¹ bei -20°C ² bei 20°C ³ bei -50°C

2.2.2 Impulserhaltung

Ausgehend von der Impulserhaltungsgleichung in differentieller Schreibweise

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla \tilde{p} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} \quad (2.23)$$

 $\rho \mathbf{u}$ Impuls \tilde{p} Störungsdruck $\boldsymbol{\tau}$ deviatorischer Spannungstensor⁷ ρ_0 Hintergrunddichte

kann unter Verwendung der Vektor-Identität $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla |\mathbf{u}|^2/2 - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega}$, der Definition des Rotors $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u}$ und der totalen spezifischen Enthalpie $H \equiv |\mathbf{u}|^2/2 + \tilde{p}/\rho$ geschrieben werden

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H - \tilde{p} \nabla (1/\rho) = \frac{1}{\rho} \left[(\rho - \rho_0) \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \right] \quad (2.24)$$

Gleichung 2.24 kann in folgende übliche Schreibweise übergeführt werden

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{F} + \nabla H = 0 \quad (2.25)$$

⁷Anteil des Spannungstensors σ , welcher keine Volumensänderung verursacht, d.h. $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}$

wobei sich der Vektor \mathbf{F} aus zwei Komponenten, eine für Advektion und einem baroklinem Anteil zusammensetzt:

$$\mathbf{F} = \underbrace{-\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} - \frac{1}{\rho} \left[(\rho - \rho_0) \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \right]}_{\mathbf{F}_A} \underbrace{- \tilde{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right)}_{\mathbf{F}_B} \quad (2.26)$$

Bildet man von Gleichung 2.25 die Divergenz, so gewinnt man die sogenannte *Poisson Gleichung* des Druckes:

$$\nabla^2 H = - \left[\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot \mathbf{F} \right] \quad (2.27)$$

Diese Form der Impulserhaltung ist entscheidend für die Geschwindigkeit der numerischen Solver in FDS, da es schnelle, direkte Gleichungslöser gibt, die für die Anwendung an gleichförmigen Rechengitter optimiert sind (Die umfangreiche Herleitung ist in einer Arbeit von McDermott zu finden [15]).

2.2.3 Energieerhaltung

Ausgegangen wird von der Energieerhaltungsgleichung in differentieller Schreibweise:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u}) + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \quad (2.28)$$

E	Gesamtenergiedichte ($E = u + \frac{1}{2} \mathbf{u} ^2$)
\dot{q}'''	Wärmefreisetzungsrage per Volumen
\dot{q}_b'''	an Partikel/Tropfen übergebene Wärme
$\dot{\mathbf{q}}''$	Wärmeflussvektor
$\boldsymbol{\sigma}$	Spannungstensor

Der Wärmeflussvektor setzt sich dabei aus einem konduktiven, einem diffusiven und einem strahlungsrelevanten Term zusammen:

$$\dot{\mathbf{q}}'' = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Z_{\alpha} + \dot{\mathbf{q}}_r'' \quad (2.29)$$

k	Wärmeleitfähigkeit
D_{α}	Diffusität der Moleküle α
<i>alpha</i>	Index für Molekülart

Aufgrund der vorangegangenen Vereinfachung für niedrige Ma-Zahlen ergibt sich eine Verknüpfung der Enthalpie h und der inneren Energie u mit dem Hintergrunddruck \bar{p} :

$$h = u + \bar{p} / \rho \quad (2.30)$$

Deshalb wird die Energieerhaltungsgleichung durch h_s ausgedrückt:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \quad (2.31)$$

wobei für die sensible Enthalpie $h_s = \int_{T_0}^T c_{p,\alpha}(T') dT'$ und durch Aufsummierung $h_s = \sum_{\alpha} Y_{\alpha} h_{s,\alpha}$ gilt⁸.

2.2.4 Fließgesetz

In den vorangegangenen Gleichung der Energie- und Impulserhaltung wurde eine neue Größe eingeführt, der Spannungstensor $\boldsymbol{\sigma}$, welcher sich aus einem deviatorischen Anteil (keine Volumensänderung) und einem Term für die Dilatation (Volumenänderung) zusammensetzt. Insgesamt ergeben sich somit zusätzliche 9 Unbekannte.

Wird ein isotropes Newtonsches Fluid vorausgesetzt und die Stoke'sche Hypothese⁹ angewandt so ergibt sich für den Spannungstensor eine lineare Abhängigkeit zwischen der Verformung und der Spannung:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\boldsymbol{\delta}_{ij} + \boldsymbol{\tau} \quad (2.32)$$

Für den deviatorischen Anteil $\boldsymbol{\tau}$ gilt:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2\mathbf{S}_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla \cdot \mathbf{u}) \right); \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}; \mathbf{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.33)$$

2.2.5 Turbulenz

Das Wort Turbulenz hat seinen Ursprung im lateinischen: *turbare* bedeutet drehen, umherwirbeln bzw. verwirren und beschreibt das Phänomen der Turbulenz bereits sehr gut. Aus dem alltäglichen gibt es genügend Beispiele für Turbulenzen, wie z.B. das Aufsteigen von Rauch am Ende des Zigarettenstümmels oder aber die Verwirbelung von Wasser nach einem Hindernis im Flussverlauf. Dennoch ist der heutige Stand der Forschung unbefriedigend, da es trotz einer Fülle an experimentellen, numerischen und analytischen Resultaten keine vollständige, quantitative Theorie der ausgebildeten Turbulenz gibt[16].

Tsinover beschreibt die phänomenologischen Beschreibungen der Turbulenz welche folgende Eigenschaften umfassen[17]:

1. irreguläres, scheinbar zufälliges Verhalten des Geschwindigkeitsvektors in Raum und Zeit

⁸Diese Stoffwerte (die Bildungsenthalpien) sind in FDS in der Datei *data.f90* im Quellcode zu finden.

⁹ $\tau_{ii,dilat.} = -\frac{2}{3}\mu \frac{1}{dV} \frac{d(dV)}{dt}$

2. erhöhte Transporteigenschaften von Energie, Impuls und passiven Teilchen bewirken eine effektive Durchmischung
3. zahllose ineinandergreifende, sich selbst verstärkende Wirbel führen zu zeitlichen und räumlichen Skalengesetzen
4. empfindliche Abhängigkeit des Strömungsbildes von kleineren Störungen, d.h. der Bewegungsablauf ist unvorhersagbar
5. dagegen gibt es statistische Eigenschaften, die stabil und vorhersagbar sind

Es gibt eine Reihe an technischen Prozessen, die von diesen Effekten stark profitieren (z.B. Mischungsvorgänge), und genauso gibt es Anwendungen, bei denen die Wirkung der Turbulenz möglichst dezimiert werden soll (z.B. Rohrdurchströmungen, hier bewirkt die Turbulenz ein Ansteigen des Druckabfalles). Aufgrund der Tatsache, dass die kleinsten Wirbeln im Zuge einer CFD-Simulation nur bei moderaten Reynoldszahlen auf Supercomputern aufgelöst werden können, haben Ingenieure eine Vielzahl an Turbulenzmodellen (wie z.B. die κ - ϵ -Modelle) entwickelt um ingenieurtechnische Aufgaben besser bewältigen zu können. Jedes für sich hat Vor- und Nachteile, und Einsatzgrenzen. Die Entwicklung von besseren, oder gar universellen Turbulenzmodellen wird nach Pope erst möglich sein, wenn die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse besser verstanden werden[18].

2.2.6 Grenzschicht

Durch die *No-Slip Bedingung* an Festkörpern reduzieren sich in der Nähe dieser die Strömungsgeschwindigkeiten und Querbewegungen werden gedämpft. Es bildet sich eine laminare Grenzschicht aus (Re-Zahlen gehen gegen 0) und die viskosen Kräfte dominieren diese Grenzschicht. *Ludwig Prandtl* gilt als Erfinder der Grenzschichttheorie, wonach er das Strömungsgebiet in diese wandnahe, laminare Grenzschicht und einen äußeren Bereich teilt, welcher sich durch nahezu reibungsfreie (kleine Geschwindigkeitsgradienten) Strömung auszeichnet.

Die Dicke der Grenzschicht, welche im Allgemeinen mit dem griechischen Buchstaben δ bezeichnet wird¹⁰, ist jener Wandabstand bei der die Geschwindigkeit 99% der unbeeinflussten Außenströmungsgeschwindigkeit beträgt. Weiters gilt $\partial/\partial y = 0$ innerhalb der Grenzschicht, weshalb der statische Druck der Außenströmung aufgeprägt wird. Eine Abschätzung von δ kann durch ein Gleichsetzen der Trägheits- und Reibungskräfte erfolgen, da sich diese im Gleichgewicht befinden. Für eine ebene Platte ergibt sich $\delta \sim \sqrt{\frac{\mu x}{\rho U_\infty}} = \sqrt{\frac{\eta x}{U_\infty}}$ [19].

¹⁰**Achtung:** für die *Verdrängungsdicke* der Grenzschicht, welche angibt um welche Länge die Stromlinien der Außenströmung durch Bildung der GS nach außen verschoben wird, wird in der Literatur oft mit δ , δ_1 oder δ^* bezeichnet und darf nicht verwechselt werden!

Tabelle 2.6: exemplarische Werte für die Grenzschichtdicke einer ebenen, längs angeströmten Platte[19]

Fluid	U_∞ [m/s]	l [m]	Re	δ [mm]	δ_v [mm]
Luft $\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	50	1	3.3×10^6	8	0.4
	100	1	6.6×10^6	8	0.2
	100	5	3.3×10^7	36	0.2
	200	10	1.3×10^8	69	0.1
Wasser $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	1	2	2×10^6	17	1
	2	5	1×10^7	39	0.6
	5	50	2.5×10^8	321	0.4
	10	200	2×10^9	1122	0.1

Tabelle 2.7: Zusammenfassung der Problemstellung der Strömungsmechanik

Unbekannte		Gleichungen		
\mathbf{u}	3			
p	1	Masse	1	Gl. 2.18
I	1	Impuls	3	Gl. 2.23
p	1	Energie	1	Gl. 2.28
T	1			
τ	9	Stokes + Newton	9	Gl. 2.32
		+ thermische Gasgleichung	1	$p = f(\rho, T)$
		+ kalorische Gasgleichung	1	$e = f(\rho, T)$
16		← lösbar →	16	

2.2.7 Zusammenfassung der Strömungsmechanik

Tabelle 2.7 zeigt eine schnelle Übersicht über die Problemstellung der Strömungsmechanik. Die 3 Erhaltungstheoreme liefern 5 Gleichungen mit 6 Unbekannten, wobei der Geschwindigkeitsvektor aus 3 und der Spannungstensor aus 9 Unbekannten besteht, macht in Summe 16 Unbekannte. Die Erhaltungstheoreme liefern ein Gleichungssystem mit 5 Gleichungen. Fügt man zwei Gleichungen aus der Thermodynamik hinzu, so verbleiben 9 Gleichungen, um das Gleichungssystem schließen zu können. Durch die Einführung eines Fließgesetzes kann man die Freiheitsgrade auf null reduzieren. Schlussendlich müssen aufgrund der partiellen Ableitungen in den Gleichungen noch entsprechende Anfangs- und Randbedingungen definiert werden, um eine eindeutige Lösung erhalten zu können.

Analytisch sind die Navier-Stokes-Gleichungen jedoch nur für bestimmte Sonderfälle

exakt lösbar, weshalb eine numerische Approximation mit entsprechender Genauigkeit im Zuge einer CFD-Untersuchung verwendet wird (siehe Kapitel 3). Die direkte Anwendung dieses Verfahrens auf die vorhin genannten Gleichungen wird Direct Numerical Simulation (DNS) genannt und erfordert sehr kleine Rechenzellen und deshalb auch lange Berechnungszeiten, weshalb diese Art der Simulation nur für wissenschaftliche Zwecke in der Forschung auf Supercomputern durchgeführt wird. Deshalb ist es notwendig möglichst viele Phänomene die auftreten können durch weitere Modellierungsgleichungen zu beschreiben, welche eine Verringerung der notwendigen Zellenanzahl und eine damit verbundene Reduzierung der Berechnungszeit auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß bewirken.

2.3 Wärmeübertragung

Es gibt drei unterschiedliche Möglichkeiten Wärme zu übertragen, durch Konduktion (Wärmeleitung), Konvektion (Wärmemitführung) und Wärmestrahlung. Prinzipiell wird Wärme immer vom wärmeren zum kälteren Objekt übertragen.

2.3.1 Konduktion

Konduktion ist die Weitergabe von Wärme in ruhenden Fluiden bzw. in Festkörpern. Maßgebend für diese ist der Temperaturgradient, wie es auch in der Definition der Wärmestromdichte gem. dem *Fourier-Ansatz*¹¹ ersichtlich ist¹²:

$$\dot{\mathbf{q}} = -k \cdot \nabla T \quad (2.34)$$

$\dot{\mathbf{q}}$ Wärmestromdichte
 k Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist hierbei ein stoffspezifischer Wert, welcher im wesentlichen nur von der Temperatur abhängig ist (geringfügig auch vom Druck). Weiters hat sich auch eine Größe für die Temperaturleitfähigkeit a etabliert, diese wird durch $a = k/(\rho c)$ definiert, wobei c hier die Wärmekapazität ist.

¹¹Zurückzuführen ist dieser Ansatz auf *Jean Baptiste Joseph Fourier* und *Isaac Newton*. Dieser wird irrtümlicherweise oft auch als *Wärmeleitungsgesetz* bezeichnet, obwohl es nur ein sehr guter Ansatz ist[20]. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich eine Interaktion zwischen diversen Feldern (Temperaturfeld, elektrisches Feld, Konzentrationsfeld). Auch wenn diese Kopplungseffekte nur sehr schwach sind, so gibt es in speziellen Situation eine relevante Wirkung. Exemplarisch sei das Messprinzip des Thermoelementes genannt, welches auf diesem Effekt basiert.

¹²**Achtung:** Hier wurde die Nomenklatur lokal verwendet, in FDS ist dieser so nicht definiert

Tabelle 2.8: typische Zahlenwerte für die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit bei 20 °C und 1 bar

	Stoff	k [W/mK]	a [m ² /s]
Festkörper	Kupfer[20]	372	107.0×10^{-6}
	Stahl, niedriglegiert[20]	54	15.2×10^{-6}
	Stahl, hochlegiert[20]	15	3.8×10^{-6}
	Beton C25[21]	1.15	8.3×10^{-4}
	Beton C25[21]	1.65	4.4×10^{-4}
	Brandschutzplatte ¹³	0.212	2.35×10^{-4}
Fluid	Luft[20]	0.026	21.47×10^{-6}
	Wasser[20]	0.598	0.14×10^{-6}

2.3.2 Konvektion

Tritt sowohl ein Temperaturunterschied als auch eine Strömung auf, so spricht man von Konvektion. Hierbei beeinflussen sich der Wärmeübergang und die Strömung je nach Anwendungsfall unterschiedlich stark. Im Allgemeinen müssen für eine plausible Beurteilung der Konvektion folgende Fälle unterschieden werden:

- Durchströmung oder Umströmung von Objekten
- thermische Randbedingungen: konstante Wärmestromdichte oder konstante Temperatur
- laminare oder turbulente Strömung

Wie in Kapitel 2.5 gezeigt wird, können wir bei der Betrachtung von Bränden von turbulenten Strömungen ausgehen. Eine ausführliche Beschreibung der Konvektion bei laminaren Verhältnissen kann im Buch von Herwig und Moschallski [20] nachgelesen werden und wird an dieser Stelle vorausgesetzt, jedoch sollen hier die wichtigsten Merkmale zur Wiederholung noch einmal genannt werden:

- Eine erhöhte Reynolds-Zahl liefert bei der Überströmung von Wänden einen verbesserten Wärmeübergang, da sich geringere Grenzschichtdicken ausbilden.
- Ein völligeres Geschwindigkeitsprofil (d.h. die Geschwindigkeit nimmt zur Wand möglichst wenig ab) sorgt für eine höhere Wärmestromdichte.

Turbulente Strömung zeigen im Vergleich zu laminaren Strömungen eine beträchtliche Verbesserung des Wärmeübergangs, da durch Turbulenz beide zuvor genannten Effekte aktiviert werden. Die charakteristischen Schwankungsbewegungen (welche auch quer zur Hauptströmungsrichtung erfolgen) liefern einen verbesserten Austausch von Impuls und Energie. Zur Beschreibung dieser wurden analog zu den molekularen Transport-

koeffizienten für die Wärmeleitfähigkeit k (in der Literatur auch oft mit λ bezeichnet) und dem Impuls η zusätzlich turbulente Größen eingeführt, welche mit dem Index t versehen sind. Diese sind keine Stoffwerte mehr, da sie maßgebend von der Strömung bestimmt werden und deshalb auch als *Strömungsgrößen* bezeichnet werden. Auch der Begriff der *scheinbaren Transportkoeffizienten* ist geläufig, da diese als eine scheinbare Erhöhung der molekularen Größen in einer Strömung zu verstehen sind.

$$\eta_{\text{eff}} \equiv \eta + \eta_t \quad (2.35)$$

$$\lambda_{\text{eff}} \equiv \lambda + \lambda_t \quad (2.36)$$

Die scheinbaren Transportkoeffizienten sind in Wandnähe stark gedämpft, weshalb für die effektiven Transportkoeffizienten sowohl die molekularen als auch die turbulenten Größen zu beachten sind. Innerhalb dieser Wandschicht bildet sich auch eine viskose Unterschicht aus, in welcher quasi keine Turbulenz mehr auftritt, weshalb hier rein die molekularen Stoffgrößen relevant sind. Außerhalb der Wandschicht hingegen überwiegen die turbulenten Größen und die molekularen sind vernachlässigbar. Dieses Verhalten ist anschaulich in Abbildung 2.10 veranschaulicht. Bzgl. der Größenordnungen der Randschichtdicken gilt, dass die Wandschichtdicke δ_W sehr viel kleiner als die Grenzschichtdicke δ ist. Da sich aber die Übertragungsprozesse an der Wand abspielen, ist diese Schicht sehr bedeutsam. Analog zu der Tatsache, dass sich aufgrund von turbulenten Strömungen hohe Gradienten für die Geschwindigkeit in Wandnähe ergeben (und somit große Wandschubspannungen), gilt für die Wärmestromdichte aufgrund hoher Temperaturgradienten in Wandnähe dieselbe Aussage. Dies spiegelt die Bedeutung dieser Wandschichten quantitativ wieder.

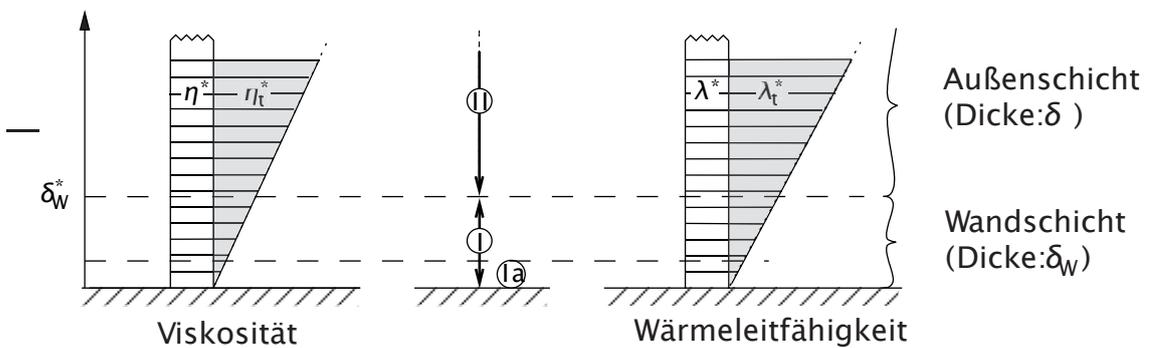


Bild 2.10: prinzipieller Verlauf der Transportkoeffizienten [20]

Für weitere detailliertere Informationen bzgl. der Konvektion ist der *VDI Wärmeatlas* [3] sehr zu empfehlen, da dieser eine Praxis-relevante Zusammenfassung für Ingenieur-technische Probleme zusammenfasst. Hier finden sich eine Vielzahl an analytischen und empirischen Lösungswege, welche die Abschätzung des Wärmeübergangs (d.h. der

Nusseltzahl, siehe 2.5) ermöglichen. Über die vollständige Beschreibung der Konvektion kann man Bücher schreiben, die Bücher von Herwig und Moschallski ([20]) wurden im Zuge dieser Arbeit als Nachschlagewerk genutzt.

2.3.3 Wärmestrahlung

Anders als bei der Konduktion und der Konvektion, welche die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen als "Weg" für die Wärme nutzen, wird bei der Strahlung die Energie auf elektromagnetischem Wege übertragen. D.h. diese ist auch dann wirksam, wenn kein Trägermedium zwischen zwei Objekten vorhanden ist. Anschauliche Beispiele für die Wärmestrahlung ist die Strahlung der Sonne, denn diese transportiert die Energie durch den leeren Raum.

Betrachtet man ein typisches Brandszenario, so ergeben sich Strahlungsanteil der Flammen und Rauchgase von üblicherweise 30 % (bis max. 50 %) [23][24][25]. Betrachtet man die von uns untersuchten Tunnelbrände, so trifft dies allerdings nur lokal für die Region in der Nähe des Brandes zu und beeinflusst im wesentlichen nur dort die Erwärmung der Betonwand. Für die weitere Tunnelströmung ist die Strahlung kaum mehr relevant. Dieses Kapitel soll in sehr kompakter Form erklären, warum dies so ist und welchen Einfluss das auf die CFD Softwarepakete hat.

Wie bereits erwähnt, ist Strahlung eine elektromagnetische Welle. Hierbei beschreibt λ die Wellenlänge¹⁴. Der Bereich mit den höchsten Energiedichten liegt zwischen 0.1 μm bis 1000 μm . Wir beschränken uns vorerst auf Objekte, die undurchlässig für sichtbares Licht (und damit auch für den gesamten Spektralbereich) sind, weshalb die Wärmestrahlung rein an den Oberflächen stattfindet und keine Strahlungspenetration wie z.B. bei Gasen stattfindet. Dadurch ergibt sich für die Strahlungsbilanz der einfallenden Strahlung

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (2.37)$$

- α Absorptionsanteil
- τ Transmissionsanteil
- ρ Reflexionsanteil

Die jeweiligen Anteile sind abhängig von der spektralen Verteilung im Wellenspektrum und vom Material und dessen Oberflächenbeschaffenheit¹⁵. Wichtig ist auch die Unterscheidung zwischen regulärer und diffuser Reflexion von Bedeutung. Letzere ist eine isotrope (richtungsunabhängige) Rückstrahlung, welche für technische Oberflächen zutreffend ist. Unter regulärer Reflexion versteht man einen *perfekten Spiegel*, d.h. Einfallswinkel = Ausfallswinkel.

¹⁴Diese darf nicht mit der Wärmeleitfähigkeit, welche auch oft durch k beschrieben wird, verwechselt werden

¹⁵und in geringen Anteilen auch von der Temperatur des Körpers

Ein weiterer Begriff im Zuge der Strahlungsbetrachtung ist der *schwarze Körper*, welcher einen idealisierter Körper in der Modellbildung darstellt. Dieser emittiert die maximal mögliche Wärmestrahlung, die er bei einer gewissen Temperatur T abgibt¹⁶. Ein *grauer Körper* hat eine zum schwarzen Körper verminderte *spektrale* Intensität, wobei dieses spektrale Emissionsverhältnis unabhängig von der Wellenlänge ist. Aus dem *Stefan-Boltzmann Gesetz* für *graue Strahler*[10] resultiert die Gesamtemission des grauen Strahlers.

$$e(T) = \epsilon(T)\sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (2.38)$$

$e(T)$	Gesamtemission des grauen Strahlers
$\epsilon(T)$	Emissionsverhältniss vgl. zum schwarzen Strahler
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
T	Temperatur [K]

Somit kann der Strahlungsaustausch zwischen Wänden beschreiben werden, insofern kein strahlungsrelevantes Medium sich dazwischen befindet. Bei einfachen Strahlungsmodellen in CFD-Anwendungen ist diese Vernachlässigung von der Interaktion zwischen Gasen und elektromagnetischen Wellen inkludiert und reicht für viele Anwendungen bereits aus. Auch der Rechenaufwand bei diesen Modellen hält sich dadurch noch in Grenzen.

Gase können je nach Zusammensetzung, Druck und Temperatur unterschiedliche Einflüsse auf die Strahlung haben. Zum einen können Sie Strahlung emittieren/absorbieren und sie können diese streuen. Letzteres ist nur bei größeren Schichtdicken relevant (mehrere km). Die Fähigkeit von Gasen bzgl. der Absorption/Emission ist auf dem gesamten Spektralbereich auf einige diskrete λ -Linien beschränkt¹⁷, weshalb diese auch als *Band-Strahler* bezeichnet werden.

Die *optische Dichte* von Gasen drückt aus, wie weit die von einer Grenzfläche abgegebene Strahlung weitergegeben wird, ehe sie vollständig absorbiert wird. Luft besteht zu einem großen Anteil aus symmetrischen Molekülen, weshalb diese kaum Strahlung aufnehmen kann und als optisch dünn zu werten ist, d.h. es kann, wie zuvor erwähnt, auf die Modellierung der Interaktion zwischen Strahlung und Gas verzichtet werden. Stark rußhaltige Rauchgase hingegen nehmen Strahlung sehr gut auf.

Im Kapitel 2.2.3 wurde bereits der Strahlungsterm \dot{q}_r''' in Gleichung 2.29 eingeführt, dieser wird in FDS wie folgt definiert:

¹⁶Dies wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben

¹⁷Dies ist auf den Aufbau der Moleküle zurückzuführen[10]

$$\dot{q}_r''' \equiv -\nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}_r''(\mathbf{x}) = \kappa(\mathbf{x}) [U(\mathbf{x}) - 4\pi I_b(\mathbf{x})] \quad (2.39)$$

$$U(\mathbf{x}) = \int_{4\pi} I(\mathbf{x}, \mathbf{s}') ds' \quad (2.40)$$

$\kappa(\mathbf{x})$	Absorptionskoeffizient
$I_b(\mathbf{x})$	Quellterm
$I(\mathbf{x}, \mathbf{s})$	Lösung der Strahlungstransportgleichung (für nicht zerstreue <i>graue</i> Gase)

Bei der Durchführung von praktischen Simulationen können die spektralen Abhängigkeiten von I , I_b , and κ nicht aufgelöst werden, noch gibt es Stoffwerte für nicht ideale Brennstoffe von realen Bränden. In FDS ist es zwar möglich die Strahlungsspektren aufzusplitten und für jedes Strahlungsband die Strahlungstransportgleichung separat zu lösen, allerdings ist es üblicherweise nicht notwendig, da Ruß die Hauptquelle und -senke für thermische Strahlung ist und im wesentlichen unabhängig von der Wellenlänge ist[11]. Der mittlere Absorptionskoeffizient κ ist eine Funktion der chemischen Zusammensetzung und der Temperatur. κ wird aus einem Band Modell, welches *RadCal* genannt wird gewonnen[26].

Strahlungstransportgleichung

Die Strahlungstransportgleichung (kurz RTE aus dem englischen für radiation transport equation) für ein absorbierendes, emittierendes und streuendes Medium lautet [27]

$$\begin{aligned} \mathbf{s} \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = & \underbrace{-\kappa(\mathbf{x}, \lambda) I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s})}_{\text{Energieverlust durch Absorption}} - \underbrace{\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda) I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s})}_{\text{Energieverlust durch Streuung}} + \\ & \underbrace{B(\mathbf{x}, \lambda)}_{\text{Emissionsquellterm}} + \underbrace{\frac{\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{s}', \mathbf{s}) I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s}') ds'}_{\text{einstreuender Term}} \end{aligned} \quad (2.41)$$

$I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s})$	Strahlungsintensität für die Wellenlänge λ
\mathbf{s}	Richtungsvektor für die Strahlungsintensität
$\kappa(\mathbf{x}, \lambda)$	lokaler Absorptionskoeffizient
$\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)$	lokaler Streukoeffizient
$B(\mathbf{x}, \lambda)$	Strahlungsemissionsanteil
$\Phi(\mathbf{s}', \mathbf{s})$	Streuphasenfunktion (liefert den Streuintensitätsanteil von \mathbf{s}' nach \mathbf{s})

In der Praxis kann die spektrale RTE nicht aufgelöst werden, weshalb auch hier eine diskrete Band-Strahlungsgleichung weiterverwendet wird. Folgend die Band-spezifische

RTE für nicht streuende Gase:

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = B_n(\mathbf{x}) - \kappa_n(\mathbf{x}) I_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}), \quad n = 1 \dots N \quad (2.42)$$

$I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s})$	Strahlungsintensität für die Wellenlänge λ
I_n	über das Band n integrierte Strahlungsintensität
\mathbf{s}	Richtungsvektor für die Strahlungsintensität
$\kappa(\mathbf{x}, \lambda)$	lokaler Absorptionskoeffizient
κ_n	über das Band n gemittelte Absorptionskoeffizient
$\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)$	lokaler Streukoeffizient
$B(\mathbf{x}, \lambda)$	Strahlungsemissionsanteil

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die totale Intensität $I(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ durch die Summe der einzelnen Bänder berechnet wird.

2.4 Verbrennungschemie

Dieses Kapitel widmet sich den Grundlagen zur Ermittlung der eingeführten Quellterme \dot{q}''' (Wärmefreisetzungsrates pro Volumen) und \dot{m}_α''' (Massenproduktionsrate pro Volumen der Gaskomponente α durch chemische Reaktionen). Generell wird für die Ermittlung von \dot{m}_α''' ein Schließungsmodell benötigt, da die Größenordnung der Flammendicke typischerweise im Millimeter-Bereich liegt und nicht durch das Rechenetz, welches sich in der Größenordnung von einigen Dezimetern befindet, aufgelöst werden kann [11].

Die vollständige Beschreibung einer Verbrennung umfasst die Vergasung und die anschließende Reaktion der entstandenen Gase. Hierfür werden Grundlagen aus der Thermochemie und -dynamik benötigt, welche vorgestellt werden. Zudem wird das Prinzip der *gruppierten Komponenten*¹⁸, welches in FDS angewandt wird, als auch das *Eddy-Dissipations-Konzept* vorgestellt.

2.4.1 Einteilung von Verbrennungen

Verbrennungen können anhand unterschiedlichster Charakteristiken unterschieden werden. Eine mögliche Unterteilung ist die Anwendungsart. Hierbei werden technische von unbeabsichtigten Verbrennungen unterschieden. Erstere ist durch sehr gut kontrollierte Randbedingungen und sehr scharf abgegrenzten Systemgrenzen gezeichnet. Anwendungsgebiete hierfür sind Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen. Dieser Typ ist bereits sehr gut erforscht.

Nicht weniger wichtig sind die unbeabsichtigten Verbrennungen wie z.B. der Brand eines Hochhauses oder auch PKW Brände. Die Untersuchung dieser ist merklich schwieriger aufgrund der großen Bandbreite an Brennstoffen (welche nicht als solche vorgesehen

¹⁸Englisch: *lumped species*

sind), Unsicherheiten in der Beschreibung der Randbedingungen und einer Vielzahl an zufälligen Umgebungseinflüssen.

Weiters können zwei verschiedene Verbrennungstypen durch die Oxidationsart unterschieden werden, und zwar die Oberflächen- und die Flammenoxidation. Bei der letzteren sei angemerkt, dass nur Gase bzw. Dämpfe durch eine Flamme oxidiert werden können. Diese Gase können durch die Vergasung von festen Brennstoffen, der Verdampfung von flüssigen Brennstoffen oder aber direkt bereitgestellt werden.

Der bereits enthaltene Anteil an Sauerstoff im Brennstoffgemisch ist ein weiteres Klassifizierungsmerkmal. Hierbei wird in bereits vorgemischte Flammen, welche als eher „technisch“ einzustufen sind, und in Diffusionsflammen, welche als eher „natürlich“ bzw. als „freie“ Flamme zu bezeichnen ist, unterschieden. Abbildung 2.11 zeigt die unterschiedlichen Erscheinungsformen.

Eine weitere physikalische Eigenschaft der Verbrennung, die Reaktionsgeschwindigkeit (bzw. Verbrennungsgeschwindigkeit) ist maßgebend für die resultierenden Eigenschaften des Flambildes. Diese hängt ab von der Verbrennungstemperatur, dem Druck, der jeweiligen Konzentrationen und einigen weiteren Größen. Obwohl diese oft sehr schnell sein kann, so ist diese dennoch eine endliche Größe.

Im Zuge dieser Arbeit werden unbeabsichtigte Verbrennungen von gasförmigen Stoffen bei freier Verbrennung untersucht. Bzgl. der Verbrennungsgeschwindigkeit wird von einer unendlich schnellen ausgegangen, womit eine Koexistenz von Brennstoff und Sauerstoff ausgeschlossen wird. Dies ist zulässig, da die Verbrennungsrate im Vergleich zur Durchmischungsgeschwindigkeit sehr viel größer ist.



Bild 2.11: unterschiedliche Arten von Flammen [28], (a) Diffusionsflamme, (b) Transitionsflamme (kleinerer beigemischter Sauerstoffanteil), (c) Transitionsflamme (größerer beigemischter Sauerstoffanteil), (d) Vormischflamme

2.4.2 Komplexe Stöchiometrie

Bei der Verbrennung eines Brennstoffes ist nicht nur eine Reaktion beteiligt, sondern es sind eine Vielzahl an Reaktionsgleichungen notwendig, um den Prozess vollständig beschreiben zu können. Als Beispiel sei hier die Verbrennung von Methan genannt, welche in Abbildung 2.12 gezeigt ist. Hierbei sind insgesamt 53 verschiedene Moleküle bei einer Gesamtzahl von über 400 Reaktionen beteiligt. Generell treten bei schlecht belüfteten Verbrennungen erhöhte Werte für die Ruß- und die CO-Anteile auf. Die Unterscheidung dieser erfolgt durch das Brennstoff-Luft-Äquivalenzverhältnis Φ oder aber durch das aus dem Bereich der Verbrennungsmotor bekannte Luft-Brennstoff-Äquivalenzverhältnis λ :

$$\Phi = \frac{\text{Brennstoff zu Oxidationsmittelverhältniss}}{(\text{Brennstoff zu Oxidationsmittelverhältniss})_{st}} = \frac{m_{Fuel}/m_{ox}}{(m_{Fuel}/m_{ox})_{st}} \quad (2.43)$$

Konkret gilt für fette Gemische $\Phi > 1$ und für magere Gemische mit Sauerstoffüberschuss $\Phi < 1$.

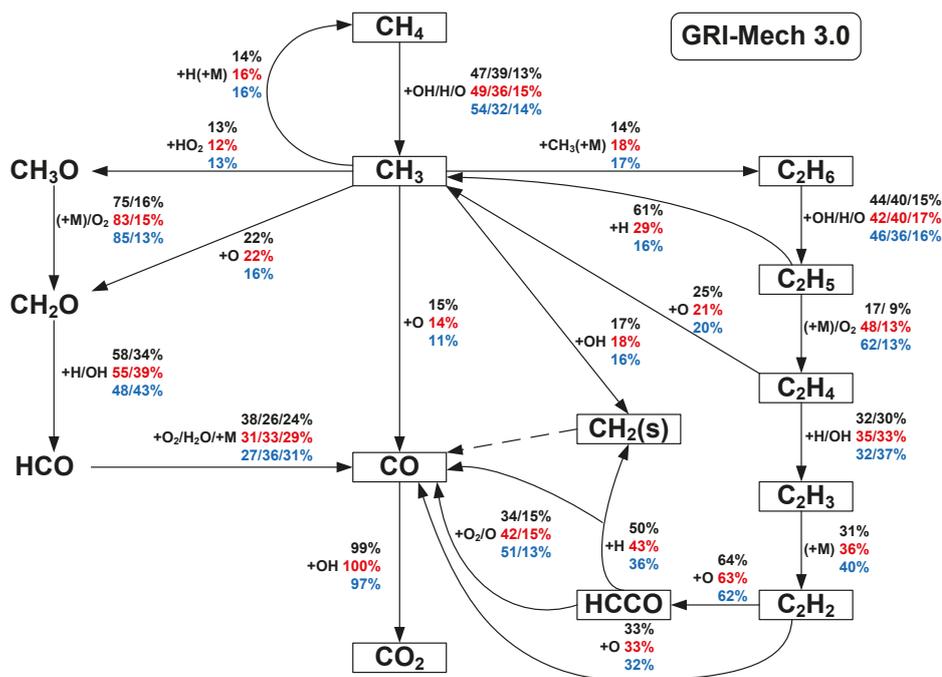


Bild 2.12: Verbrennung von CH₄ [29]

Für gut belüftete Brände bei Umgebungsdruck unter Annahme von unendlich schneller Reaktionsgeschwindigkeit¹⁹ kann die Verbrennung in guter Näherung durch einen *einfachen stöchiometrischen Reaktionsansatz* wie er z.B. in Gleichung 2.45 beschreiben

¹⁹Die Abschätzung, ob diese Annahme richtig ist kann mittels der turbulenten Damköhlerzahl erfolgen, zu finden unter 2.5

wird modelliert werden. Hierfür werden aus der Literatur bekannte Anteile für Ruß und CO verwendet, wobei diese den Aggregatzustand des Brennstoffes berücksichtigen.

Möchte man die Reaktionskinetik und Berücksichtigung aller möglichen Moleküle und Reaktionsvorgänge bei endlicher Reaktionsgeschwindigkeit miteinbeziehen, so müsste man die Ansätze nach Arrhenius und das Minimierungsprinzip der Gibbs-Energie einpflegen, welche einen immensen zusätzlichen Berechnungsaufwand mitbringen. Allerdings gibt es geeignete Berechnungsprogramme für die Abschätzung von den entstehenden Rauchgasen. Als kommerzielles Tool sei hier Aspen-HYSYS[30] genannt, welches einen entsprechenden Reaktor in seiner Bibliothek zur Verfügung stellt. Zusätzlich gibt es CEA²⁰ und TEA²¹ welche die chemische Zusammensetzung bei einer bestimmten Temperatur und eines bestimmten Druckes berechnen können.

Um den Einfluss von Φ darstellen zu können, wurde die Software CEA genutzt, um die Reaktion von Methan bei 1 bar und verschiedenen Brennstoff-Luft-Äquivalenzverhältnissen sowie Temperaturen zu untersuchen. Die resultierenden Gaszusammensetzungen zeigt die Abbildung 2.13. Erwartungsgemäß tritt bei überstöchiometrischen Luft-Verhältnissen eine vollständige Verbrennung auf, wobei sich bei unterstöchiometrischen Verhältnissen eine vermehrte Bildung von Kohlenstoff in Form von Graphit (Ruß) als auch die Entstehung von Kohlenmonoxid zeigt. Der Platzhalter R steht für einen Rest, welcher sich aus geringen Gesamtanteilen von C(g), OH, NO, NO₃, HCN, HNC, H₂O und Argon zusammensetzt.

2.4.3 FDS relevante Ansätze

Lumped Species

In typischen FDS Aufgaben werden die an einer Reaktion beteiligten Moleküle in Gruppen zusammengefasst, wie es in Gleichung 2.44 dargestellt ist.



D.h. es werden Gruppen von Molekülen gebildet, welche unter Voraussetzung von identen Diffusionskoeffizienten innerhalb der Gruppe miteinander transportiert und reagiert werden. Die Umrechnung zwischen den gruppierten Komponenten Brennstoff, Luft und Produkte in die enthaltenen Moleküle erfolgt durch eine lineare Transformation, welche in Vektorschreibweise sehr einfach darstellbar ist. Beispiele hierfür finden sich im *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide* auf Seite 48.

²⁰früher war diese Software frei verfügbar, seit 2018 muss diese angefordert werden. Geschrieben ist CEA in Fortran

²¹frei verfügbare Software, welche in Python geschrieben wurde

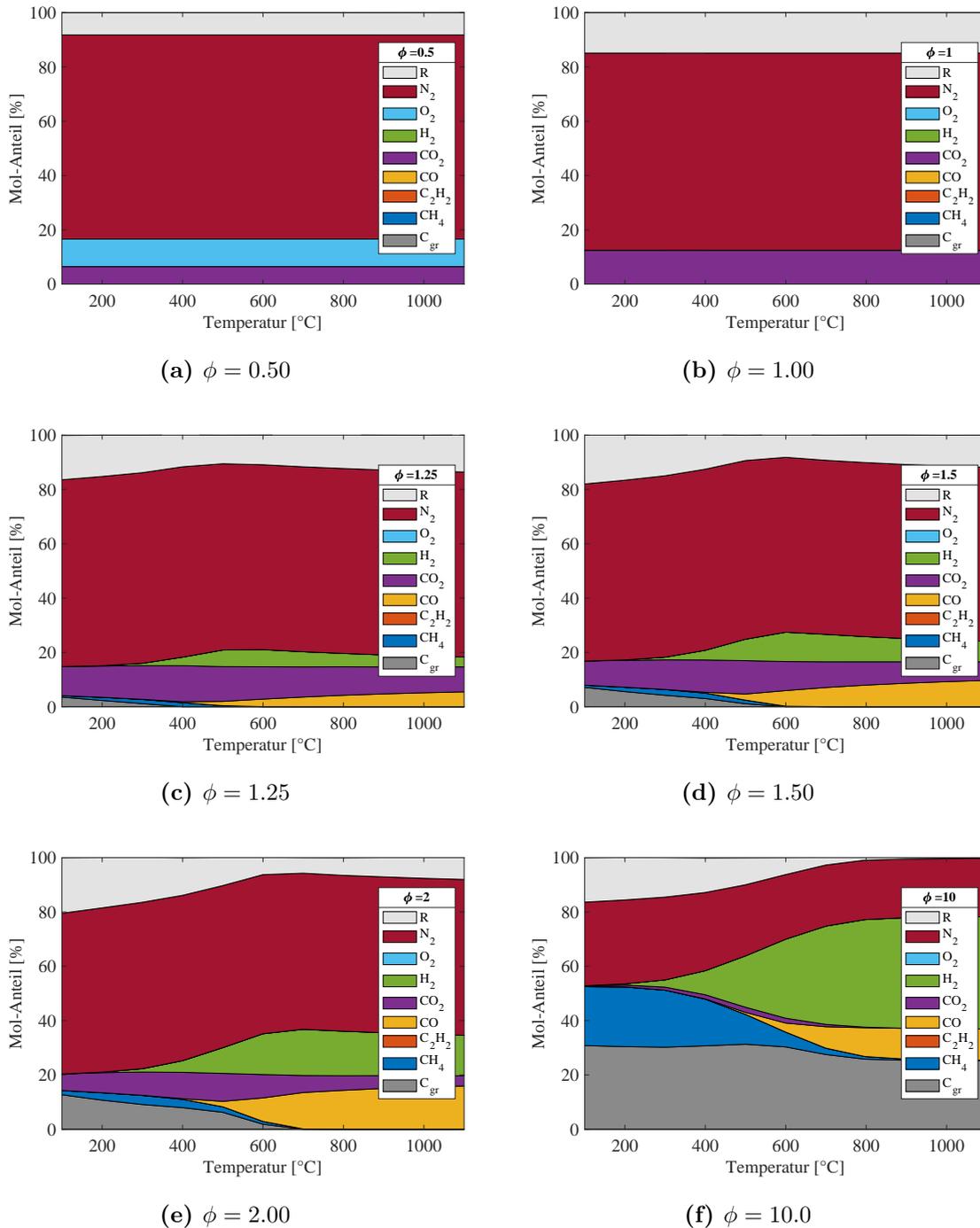
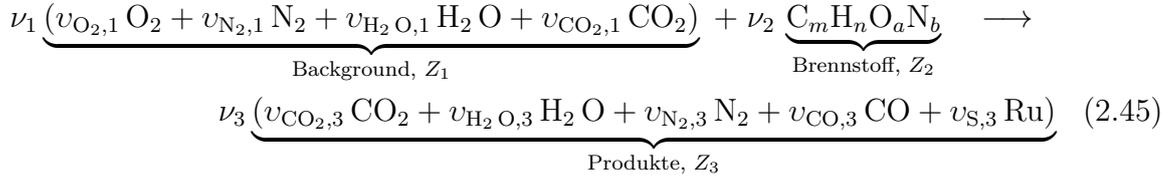


Bild 2.13: Rauchgaszusammensetzung bei unterschiedlichen Verbrennungs-Luft-Verhältnissen. Der Platzhalter R repräsentiert einen Rest, welcher sich aus geringen Gesamtanteilen von C(g), OH, NO, NO₃, HCN, HNC, H₂O und Argon zusammensetzt. C_{gr} steht für Ruß.

Die im Standard verwendete HC-Verbrennungsgleichung schreibt sich wie folgt:



$\nu_{\alpha i}$ Volumenanteil der Komponente (Moleküle) α in der gruppierten Sorte i
 ν_i Stöchiometrische Koeffizienten der gruppierten Sorte i

Die Anteile für CO und Ruß²² müssen hierbei durch den Anwender definiert werden und sind definitionsgemäß Massenanteile von CO bzw. Ruß in den Produkten dividiert durch die Gesamtmasse des reagierten Brennstoffs:

$$y_S = \frac{\text{Rußmasse in den Produkten}}{\text{Masse des reagierten Brennstoffes}} \quad (2.46)$$

Die Stöchiometrischen Koeffizienten werden für CO und Ruß in FDS wie in Gleichung 2.47 berechnet. Die verbleibenden Koeffizienten lassen sich durch eine atomare Massenbilanz ermitteln.

$$\nu_{\text{Fuel}} \nu_{\text{CO,Fuel}} = -\nu_{\text{Air}} \frac{W_{\text{Air}}}{W_{\text{CO}}} y_{\text{CO}} \quad (2.47)$$

$$\nu_{\text{Fuel}} \nu_{\text{S,Fuel}} = -\nu_{\text{Air}} \frac{W_{\text{Air}}}{W_{\text{S}}} y_{\text{S}} \quad (2.48)$$

Turbulente Verbrennungsmodellierung

Bei Betrachtung der Erhaltungsgleichungen für jede Molekülgruppe, welche mathematisch idente Formulierungen verglichen zu jener der einzelnen Moleküle aufweisen, erkennt man, dass das Gleichungssystem noch nicht geschlossen ist:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}'''_\alpha + \dot{m}'''_{\text{b},\alpha} \quad (2.49)$$

α Index für eine Gaskomponentengruppe der Gasmischung
 Z_α Massenanteil der Gaskomponentengruppe α
 D_α Diffusionskoeffizient der Gaskomponentengruppe α
 \dot{m}'''_α Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponentengruppe α durch chemische Reaktionen
 $\dot{m}'''_{\text{b},\alpha}$ Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponentengruppe α durch verdunstende Tropfen/Partikel

²²Ruß wird folgend mit dem Index S für das englische Wort für Ruß (Soot) in den mathematischen Gleichungen bezeichnet

Es fehlt der Quellterm \dot{m}''_{α} . Da die Längen- und Zeitskalen, welche mit der Verbrennung assoziiert sind, nicht mit den üblich verwendeten Skalen im Zuge einer CFD-Berechnung aufgelöst werden können, ist die Modellierung einer turbulenten Verbrennung und dem damit verbundenen Quellterm \dot{m}''_{α} sehr herausfordernd. Meist kommt das EDC Model (Eddy Dissipation Concept) [31, 32] zur Anwendung, welches für sehr schnelle, diffusionsdominierte Verbrennungsreaktionen geeignet ist. Um komplexere Prozesse beschreiben zu können, wurde in FDS ein erweitertes Model eingeführt, welches als *turbulent batch reactor*²³ Model bekannt ist. Die dem Model zugrunde liegende Idee ist die Berücksichtigung des lokal maßgebenden physikalischen Prozesses zur Durchmischung. Es werden die Diffusion, die (nicht aufgelöste) Advektion²⁴ als auch die Auftriebsbeschleunigung berücksichtigt, wobei der schnellste Prozess zur weiteren Berechnung verwendet wird. Es sei angemerkt, dass die im Rechenetz nicht aufgelösten Modelgrößen und deren Eigenschaften mit der LES Filterweite Δ variieren. Die Definition von τ_{mix} ist sehr übersichtlich in Abbildung 2.14 bzw. der mathematischen Definition in Gleichung 2.50 dargestellt.

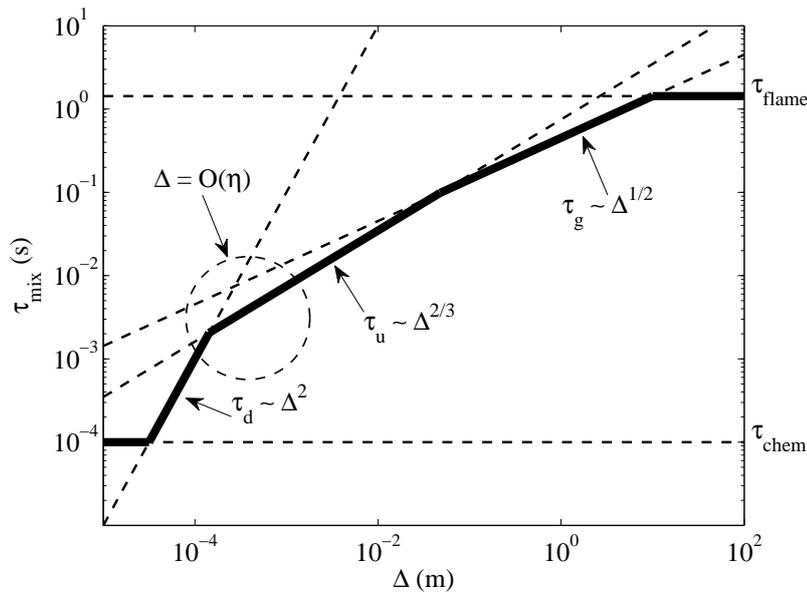


Bild 2.14: Reaktion-Zeit-Skala

$$\tau_{mix} = \max(\tau_{chem}, \min(\tau_d, \tau_u, \tau_g, \tau_{flame})) \quad (2.50)$$

Weiters wird eine binäre Darstellung der Mischungsanteile in den einzelnen Berechnungszellen eingeführt. D.h. man geht von nur zwei möglichen Zuständen aus, komplett durchmischt oder ungemischt. Es sei $\zeta(t)$ der ungemischte Massenanteil innerhalb der Zelle, und wie in *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide* gezeigt wird,

²³Ein *turbulent batch reactor* ist ein diskontinuierlicher, idealisierter Verbrennungsreaktor.

²⁴Advektion ist der gerichtete Strömungstransport

entwickelt sich diese wie durch die folgende, einfache, gewöhnliche Differentialgleichung beschreiben wird:

$$\frac{d\zeta}{dt} = -\frac{\zeta}{\tau_{\text{mix}}} \quad (2.51)$$

Die Lösung kann durch die Exponentialfunktion $\zeta(t) = \zeta_0 e^{-t/\tau_{\text{mix}}}$ direkt ermittelt werden. Diese Lösung wird in Abb. 2.15 bei einer anfänglich gegebenen Durchmischung gezeigt. Naturgemäß strebt diese einen Zustand der optimalen Durchmischung an, wie auch in der fortgeschrittenen Abbildung (c) ganz rechts zu sehen ist.

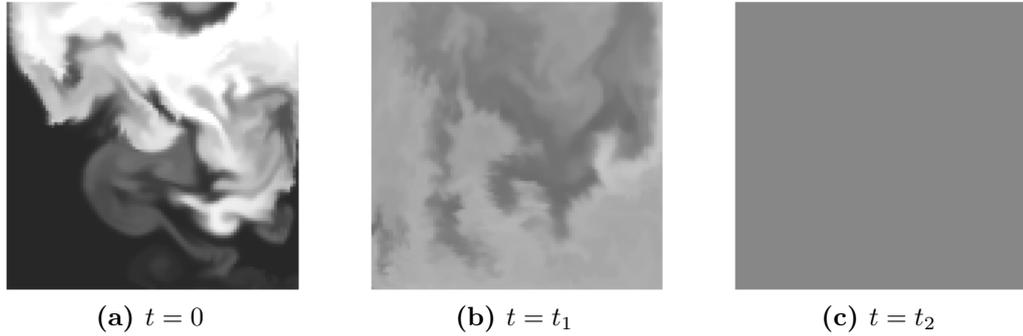


Bild 2.15: Entwicklung des ungemischten Masseanteiles

Der fehlende Quellterm kann somit durch die zeitliche Ableitung der aktuellen Zusammensetzung der Berechnungszelle, welche sich durch Addition der ungemischten mit den gemischten Anteilen ergibt, ermittelt werden:

$$\dot{m}_\alpha''' = \rho \frac{d\tilde{Y}_\alpha}{dt} = \rho \left[\frac{\zeta}{\tau_{\text{mix}}} (\hat{Y}_\alpha - \tilde{Y}_\alpha^0) + (1 - \zeta) \frac{d\hat{Y}_\alpha}{dt} \right] \quad (2.52)$$

- \dot{m}_α''' Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponentengruppe α durch chemische Reaktionen
- $\tilde{Y}_\alpha(t)$ mittlerer Zellenmassenanteil des Moleküles oder der Molekülgruppe α
- $\hat{Y}_\alpha(t)$ Massenanteil des Moleküles bzw. der Molekülgruppe α in der durchmischten Reaktor Zone

Hier grenzt sich ganz klar der Term für die Mischung $\frac{\zeta}{\tau_{\text{mix}}} (\hat{Y}_\alpha - \tilde{Y}_\alpha^0)$ und der Reaktionsterm $(1 - \zeta) \frac{d\hat{Y}_\alpha}{dt}$ voneinander ab.

Die durch die Reaktion freiwerdende Energie wird schlussendlich durch folgende Gleichung erfasst:

$$\dot{q}''' = \rho \sum_{\alpha} \left(\tilde{Y}_\alpha(\delta t) - \tilde{Y}_\alpha^0 \right) \Delta h_{f,\alpha}^0 = - \sum_{\alpha} \dot{m}_\alpha''' \Delta h_{f,\alpha}^0 \quad (2.53)$$

$\Delta h_{f,\alpha}^0$ Änderung der Standardbildungsenthalpien

2.5 Dimensionslose Kennzahlen

Durch das Einführen von Referenzgrößen, welche der Problemstellung entsprechen müssen, können die Erhaltungsgleichungen dimensionslos gemacht werden. Exemplarisch gilt z.B. für ein Längenmaß $x_i^* = \frac{x_i}{d_0}$ wobei d_0 der hydraulische Durchmesser unserer Tunnelröhre ist.

Durch einsetzen dieser Referenzgrößen erhält man dimensionslose Erhaltungsgleichungen. Hierfür gilt dann das Ähnlichkeitsprinzip:

$$\begin{array}{l} \text{gleiche Werte der Kennzahlen} \\ + \text{ gleiche dimensionslose Randbedingungen} \\ \hline \Rightarrow \text{gleiche dimensionslose Lösungen} \end{array}$$

Dieses Prinzip ist ganz besonders dann von Interesse, wenn kein Prototyp im Maßstab 1:1 realisiert werden kann, aber dennoch ein Versuch an einem physischen Prototypen gewünscht ist. Dadurch lassen sich wie es z.B. im Wasserbau üblich ist kleinere Versuchsanlagen umsetzen.

Zusätzlich lassen sich durch die dimensionslosen Kennzahlen die Eigenschaften bzw. Charakteristiken der Strömung (und in weiterer Folge auch Wärmeübertragung) beschreiben. Damit ist eine Abschätzung gemeint, welche Effekte in der Strömung vorrangig Einfluss üben und welche vernachlässigbar klein sind.

Machzahl

$$\text{Ma} = \frac{v}{c} \quad (2.54)$$

- v Geschwindigkeit
- c Schallgeschwindigkeit

Die Machzahl charakterisiert die Kompressibilität²⁵ der Strömung:

$$\begin{array}{ll} \text{Ma} \ll 1 & \text{inkompressibel} \\ \text{Ma} > 0.3 & \text{kompressibel} \end{array}$$

²⁵**Achtung:** ist ein Fluid inkompressibel, so bedeutet das nicht, dass das Fluid eine konstante Dichte aufweist! Eine Änderung zufolge Temperaturschwankungen sind immer noch möglich. Die physikalisch richtige Definition ist folgende: $c_s^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s \gg u^2$, d.h. $\text{Ma} = \frac{u}{c} \approx 0$

Reynoldszahl

Die Reynoldszahl ist wie folgt definiert:

$$\text{Re} = \frac{\rho U_m L}{\mu} = \frac{U_m d_0}{\nu} \hat{=} \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}} \quad (2.55)$$

- ρ Dichte des Fluids
- U_m mittlere Geschwindigkeit
- L charakteristische Länge (bei Rohrströmung = d)
- μ kinematische Viskosität
- ν dynamische Viskosität

L ist hierbei die charakteristische Größe der Strömung. Die Reynoldszahl gibt Auskunft darüber, ob eine laminare oder eine turbulente (siehe Kap. 2.2.5 auf Seite 19) Strömung vorliegt. Die Unterscheidung erfolgt durch den Vergleich mit der kritischen Reynoldszahl, welcher nur empirisch ermittelt werden kann. Z.B. für eine Rohrströmung ergibt sich $L = d_0$ und $\text{Re}_{krit} = 2300$.

Generell kann für Luftströmungen aufgrund der geringen Viskosität ein voll turbulentes Verhalten angenommen werden, da sich die Reynoldszahlen meist im Bereich größer 10^5 ergeben.

Prandtlzahl

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\nu \rho c_p}{k} \hat{=} \frac{\text{Geschwindigkeitsdiffusion}}{\text{Temperaturdiffusion}} \quad (2.56)$$

- ν kinematische Viskosität
- a Temperaturleitfähigkeit
- μ dynamische Viskosität
- c_p spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
- k Wärmeleitfähigkeit

Die Prandtl-Zahl stellt die Koppelung des Geschwindigkeitsfeldes mit dem Temperaturfeld dar und kann somit auch als ein Verhältnis von der Geschwindigkeits- zur Temperaturgrenzschichtdicke aufgefasst werden (siehe Abbildung 2.16). Sie ist ein temperatur- und druckabhängiger Stoffwert. Für Luft ergeben sich bei Umgebungsdruck im Temperaturbereich von 0°C bis 500°C Werte zwischen 0.70 bis 0.72 [3, S. 197], und kann somit als Konstante sehr gut angenähert werden.

Weiters gibt es eine turbulente Prandtlzahl, welche nicht verwechselt werden darf. Diese ist abhängig von der Strömung und somit keine Stoffgröße mehr. Verwendung findet diese bei der Berechnung vom Wärmeübergang von turbulenten Strömungen. Experimentelle Daten zeigen für Luft einen Wertebereich zwischen 0.7 bis 0.9.

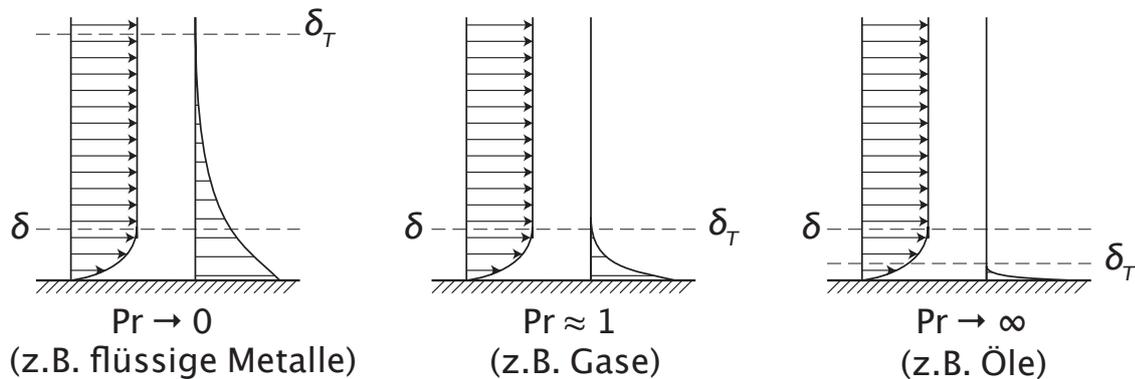


Bild 2.16: Geschwindigkeits- und Temperaturgrenzschicht bei verschiedenen Prandtl-Zahlen [20]

Grashofzahl

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \triangleq \frac{\text{Auftriebskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}} \quad (2.57)$$

- g Erdbeschleunigung
- β Wärmeausdehnungskoeffizient
- T_w Wandtemperatur
- T_∞ unbeeinflusste Fluidtemperatur
- L charakteristische Länge
- ν kinematische Viskosität

Genutzt wird die Grashofzahl zur Abschätzung darüber welche Art des Wärmeübergangs in der Strömung vorliegt. Man kann die Grashofzahl auch als das Kräfteverhältnis $\frac{\text{Auftriebskräfte}}{\text{viskose Kräfte}} \cdot \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{viskose Kräfte}}$ interpretieren.

Konkret vergleicht man das Verhältnis von Grashofzahl zum Quadrat der Reynoldszahl:

- $\text{Gr} \ll \text{Re}^2$ erzwungene Konvektion
- $\text{Gr} \gg \text{Re}^2$ freie (natürliche) Konvektion
- $\text{Gr} \sim \text{Re}^2$ gemischte (freie + erzwungene) Konvektion

Setzt man die Stoffwerte für trockene Luft ein und verwendet für den Temperaturunterschied einen typischen Bereich von bis zu 500 °C und für die Geschwindigkeiten einen Bereich von bis zu 10 m/s, so ergibt sich für Gr/Re^2 ein Wert im Bereich um die $10^5 - 10^7$.

Bei Betrachtung eines Tunnels mit aktiver Belüftung würde man sehr schnell zu dem Trugschluss gelangen, dass bei dem Wärmeübergang von der Luft auf die Tunnelröhre durch eine aufgeprägte Strömungsgeschwindigkeit von einer erzwungenen Konvektion

ausgegangen werden müsse, jedoch belegt der Wertebereich von vorhin, dass dem nicht so ist und eine freie Konvektion vorliegt.

Nußeltzahl

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot L}{k} \hat{=} \frac{\text{konvektiver Wärmeübergang}}{\text{Wärmeleitung im stehenden Fluid}} \quad (2.58)$$

- α Wärmeübergangskoeffizient
- L charakteristische Länge
- k Wärmeleitfähigkeit

Die Nußeltzahl ist jene Kennzahl im Anlagenbau, welche für den Wärmeübergang entscheidend ist. Sie gibt Auskunft darüber, wie viel mehr Wärmeübergang in der Strömung durch Konvektion auftritt als bei einem stillstehenden Fluid mit gleicher Temperaturdifferenz. Salopp gesagt drückt sie aus, um wie viel besser der Wärmeübergang durch Konvektion als durch Wärmeleitung vonstattengeht.

Achtung: in Fluent ist die Nußeltzahl (Surface Nusselt Number [33, S. 2493]) zwar ident formuliert, jedoch muss bei der Auswertung auf die manuell zu setzende Referenztemperatur T_{ref} geachtet werden:

$$\text{Nu} = \frac{h_{\text{eff}} L_{\text{ref}}}{k} \quad (2.59)$$

- h_{eff} lokale Wärmedurchgangszahl
- L_{ref} Referenzlänge
- k Wärmeleitfähigkeit

wobei h_{eff} , die lokale Wärmedurchgangszahl (Surface Heat Transfer Coef.) wie folgt definiert ist:

$$h_{\text{eff}} = \frac{q}{T_{\text{wall}} - T_{\text{ref}}} \quad (2.60)$$

- q (lokaler) Wärmefluss
- T_{wall} (lokale) Wandtemperatur
- T_{ref} (manuel gesetzte) Referenztemperatur

Da T_{ref} eine manuell zu setzende Größe in Fluent ist, welche meist nicht bekannt ist, empfiehlt sich die Nusseltzahl in Fluent nicht für einen Vergleich mit Werten aus der Literatur oder anderen CFD-Programmen. Meist wird T_{ref} in Fluent im Zuge der Simulationsarbeiten kaum noch Beachtung geschenkt und zum Schluss

verwundern sehr abstruse Werte für die Nusseltzahl. Deswegen sollten für einen Abgleich absolute Werte verwendet werden, wie z.B. die tatsächlich übergebenen Wärmemenge Q .

Boltzmanzahl

$$Bo = \frac{\rho U c_p}{\sigma T^3} \hat{=} \frac{\text{konvektiver Wärmefluss}}{\text{Wärmefluss durch Strahlung}} \quad (2.61)$$

σ Stefan-Boltzmann-Konstante

Entscheidungskriterium, ob die Strahlung im vlg. zur Konvektion einen relevanten Anteil des Wärmeflusses darstellt, ist die Boltzmanzahl. Erst ab einem Wert größer 10 darf die Strahlung vernachlässigt werden [34]. Für trockene Luft ergeben sich bei einem Temperaturbereich von 20 bis 500 °C und einer Geschwindigkeit bis 10 m/s Werte im Bereich zwischen 1×10^4 bis 5×10^5 , weshalb die Eigenstrahlung der Rauchgase in einem Brandszenario vernachlässigt werden darf, insofern nicht die Flamme an sich betrachtet wird. Bzgl. der Strahlungsabsorption der Gase kann hier keine Aussage getroffen werden!

(turbulente) Damköhlerzahl

Auch hier muss darauf geachtet werden, dass die richtige Definition der Damköhlerzahl verwendet wird. Es gibt neben der einfachen Damköhlerzahl auch noch welche 1ter, 2ter, 3ter und 4ter Ordnung, als auch die turbulente Damköhlerzahl, welche bei der Untersuchung von Flammen meist gemeint wird. Genutzt wird diese zur Charakterisierung einer Flamme. Für $Da \gg 1$ ist die Flamme in die Kategorie der *schnellen chemischen Reaktionskinetik* einzustufen, weshalb eine Beschreibung durch ein reduziertes Modell oder einer Fortschrittsvariable (wie z.B. dem Mischungsanteil) zulässig ist. Für $Da \leq 1$ ist eine umfangreichere Beschreibung des chemischen Prozesses notwendig [35].

$$Da = \frac{\tau_{mix}}{\tau_{chem}} \approx \frac{l_0 v_R}{v' l_R} \hat{=} \frac{\text{Reaktionsrate}}{\text{Massentransportrate}} \hat{=} \frac{\text{Zeitskala der Strömung}}{\text{Zeitskala der chemischen Reaktion}} \quad (2.62)$$

l_0 zugehörige Längenskala

v_R charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeit (oft laminare Flammgeschwindigkeit)

v' Standardabweichung der Strömungsgeschwindigkeit

l_R Reaktionslängenskala (oft die Dicke der laminaren Flammenfront)

Froude-Zahl

$$\text{Fr} = \frac{U_m}{\sqrt{gL}} \hat{=} \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}} \quad (2.63)$$

Die Froude-Zahl kann genutzt werden, um abzuwägen ob eine mögliche Vernachlässigung der Schwerkraft in Betracht gezogen werden darf. Der zugehörige Gravitationsterm in den dimensionslosen Impulsgleichungen hat die Form $\frac{1}{\text{Fr}} \cdot g^{*26}$, sodass für $\text{Fr} \gg 1$ die Schwerkraft vernachlässigt werden darf. In diesem Kontext hat dies keine große Relevanz, verwendet man jedoch den Ansatz nach Thomas[36] und setzt die Trägheitskraft der zuströmenden Luft gleich den Auftriebskräften der heißen Rauchgase, so erhält man eine Kennzahl, welche zur Abschätzung der Rauchgasausbreitung entgegen die Anströmgeschwindigkeit genutzt werden kann. Bei der *kritischen Froude-Zahl* Fr_{krit} können sich die heißen Rauchgase noch nicht entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten. Dies ist extrem wichtig, damit die Fluchtwege frei von heißen Rauchgasen bleiben und die Sichtweite nicht eingeschränkt wird, weshalb diese kritische Froude-Zahl in diversen Überlegungen zum Brandschutz von entscheidender Bedeutung ist. Als konservativen Ansatz soll für diese ein Wert von 4.5 verwendet werden. Formal sieht der Zusammenhang, wie in Gleichung 2.64 dargestellt ist, aus, wobei hier bei Verwendung der kritischen Froude-Zahl Fr_{krit} auch die kritische Anströmgeschwindigkeit u_{krit} , ab der keine Rauchgasrückschlagung mehr einsetzen kann, verwendet wird:

$$\text{Fr}_{krit} = \frac{\Delta\rho g H}{\rho u_{krit}^2} \quad (2.64)$$

²⁶Der Term g^* entspricht dem Term der Schwerkraft g , welcher bei der Entdimensionierung der Impulserhaltungsgleichung entsteht.

2.6 Zusammenfassung: resultierende Gleichungen

Schlussendlich ergeben sich die folgenden 5 strömungsmechanischen Grundgleichungen, welche in FDS Anwendung finden:

Massenerhaltung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \quad (2.65)$$

- ρ Dichte
- \mathbf{u} Geschwindigkeitsvektor
- \dot{m}_b''' Massenproduktionsrate per Volumen des gesamten Gasgemisches durch durch verdunstende Tropfen/Partikel

Massenerhaltung der einzelnen Gaskomponenten

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (2.66)$$

- α Index für eine Gaskomponente der Gasmischung
- Y_α Massenanteil der Gaskomponente α
- D_α Diffusionskoeffizient der Gaskomponente α
- \dot{m}_α''' Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponente α durch chemische Reaktionen
- $\dot{m}_{b,\alpha}'''$ Massenproduktionsrate per Volumen der Gaskomponente α durch verdunstende Tropfen/Partikel

Impulserhaltung

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla \tilde{p} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} \quad (2.67)$$

- \tilde{p} Druckstörung
- $\boldsymbol{\tau}$ viskoser Spannungstensor
- ρ_0 Umgebungsdichte
- \mathbf{g} Erdbeschleunigung

Energieerhaltung

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \quad (2.68)$$

- h_s sensible Enthalpie
- \bar{p} Hintergrunddruck
- $\dot{\mathbf{q}}''$ Wärmeflussvektor
- \dot{q}''' Wärmefreisetzungsrate per Volumen

ideale Gasgleichung

$$\rho = \frac{\bar{p}\bar{W}}{RT} \quad (2.69)$$

- \bar{W} molekulare Masse der Gasmischung
- R molekulare Gaskonstante
- \bar{p} Hintergrunddruck

3 Grundlagen der CFD

Die meisten technischen Anwendungen nutzen physikalische Effekte, welche durch kontinuierliche Differenzialgleichungen oder ein System aus Differenzialgleichungen beschrieben werden können. Die Maxwell-Gleichungen zur Beschreibung von elektrischen und Magnetischen Felder, Fourier's Hitzübertragungsgleichungen oder die Navier-Stokes-Gleichungen sind die bekanntesten Gleichungen. Die Überführung dieser kontinuierlichen Gleichungen in eine diskrete Beschreibung, welche die Bearbeitung durch digitale Rechner ermöglicht, wird Diskretisierung genannt. Diese stützt sich auf eine räumliche Aufteilung der zu berechnenden Umgebung und ebenso wird die Zeit in diskrete Zeitschritte unterteilt. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Diskretisierung und der numerischen Umsetzung erläutert.

3.1 Diskretisierung

Prinzipiell sind 3 verschiedene Elemente zu diskretisieren: der Raum, die Zeit und die Modellgleichungen. Diese 3 Arten sind grundverschieden, weshalb diese auch separat zu betrachten sind und in den folgenden Kapitel erläutert werden. Entscheidend für die Größe der Schrittweiten in den Diskretisierungen ist vor allem, wie groß die in der zu berechnenden Strömung vorkommenden Wirbel sind. Die Schrittweiten müssen zumindest so klein gewählt werden, sodass Wirbel noch aufgelöst werden können. Diese Größenordnungen können aus der *Kolmogorov-Skala* gewonnen werden[37, 38]. Für die Größe der kleinsten Wirbel¹ gilt:

$$\eta = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}, \quad \tau_\nu = \sqrt{\nu/\epsilon}, \quad u_\eta = (\nu\epsilon)^{1/4} \quad (3.1)$$

- η kleinstes Längenmaß des Turbulenzspektrums [m]
- τ_ν kleinstes Zeitmaß des Turbulenzspektrums [$1/s$]
- u_η Geschwindigkeit
- ν kinematische Viskosität
- ϵ Dissipation der Turbulenz [m^2/s^3]

¹ $R_\eta = \frac{\eta u_\eta}{\nu} = 1$, d.h. die Kolmogorovsche Längen- und Zeitskala charakterisiert Strömungen die als laminar anzusehen sind.

Es sind die Gültigkeitsgrenzen der Theorie von Kolmogorov zu beachten, denn diese unterliegt vereinfachten Annahmen. Zum einen muss eine ausreichend hohe Reynoldszahl vorliegen, und zum anderen gilt die Voraussetzung der isotropen Turbulenz. In vielen technischen Anwendungsfällen überwiegen anisotrope Effekte, wie sie z.B. in der wandgebundenen Turbulenz zu finden sind, dennoch sind die Zeit- und Längenskalen ein einfaches Mittel, um die Größenordnungen abschätzen zu können.

Generell werden große und kleine Skalen unterschieden. Die großen Wirbelstrukturen werden durch die Geometrie und den Randbedingungen aufgeprägt, wobei die kleinen Wirbeln direkt von den großen abhängen und damit nur indirekt von der Geometrie und den Randbedingungen abhängig sind. Zudem sind die Kleinen universeller und können dadurch modelliert werden[39].

3.1.1 Diskretisierung des Raumes

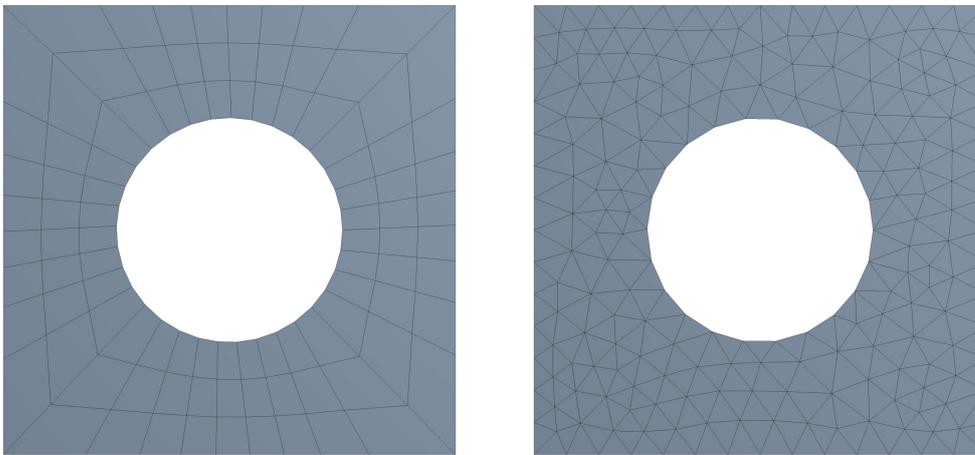
Die Diskretisierung des Raumes bedeutet eine Aufteilung des kontinuierlichen Raumes in diskrete Punkte welche in einem Netz (engl.: *grid*) angeordnet sind. Hierbei müssen strukturierte und unstrukturierte Netze unterschieden werden. Bei einem strukturierten Netz treten entlang einer Netzlinie gleich viele Berechnungspunkte auf. Dadurch ist ein Ansprechen dieser Punkte durch ihren Index möglich.

Bei unstrukturierten Netzen werden für den zweidimensionalen Raum dreieckige (engl.: *triangle*) oder viereckige (engl.: *quadrilateral*) Gitterzellen verwendet, um das Rechengebiet zu beschreiben. Analog werden im 3D Tetraeder und Hexaeder verwendet. Da keine Indexierung möglich ist, muss die Information, wo sich der Berechnungspunkt befindet, separat vermerkt werden.

Weiters gibt es auch noch Kombinationen aus den beiden Gittertypen. Wichtig ist eine entsprechende Beurteilung der Gitterqualität, welche sehr großen Einfluss auf die Genauigkeit und Plausibilität der Simulationsergebnisse hat. Auf eine detaillierte Diskussion wird an dieser Stelle verzichtet und es sei auf entsprechende Fachliteratur verwiesen[40], einige wichtige Tipps zur Beurteilung werden jedoch nach Kap. 3.1.3 erläutert, da ein Vorwissen bzgl. der verwendeten Diskretisierungsart der Modellgleichungen notwendig ist.

3.1.2 Diskretisierung der Zeit

Bei instationären Strömungen muss entsprechend auch die Zeit diskretisiert werden. Es stellt sich die Frage, wie groß der Zeitschritt gewählt werden darf um noch plausible Ergebnisse erwarten zu können. Generell gilt, dass alle Wirbelskalen die nicht modelliert sind zeitlich erfasst werden müssen. Dementsprechend muss der Zeitschritt klein genug gesetzt werden. Diese Bedingung hat allerdings nur bei der DNS noch Relevanz, da bei



(a) strukturiert

(b) unstrukturiert

Bild 3.1: mit ANSYS erstellte Netztypen

allen anderen Verfahren aufgrund zusätzlicher Modellierungsarbeit die Gitterabstände größer gewählt werden können, ebenso die Zeitschrittweiten. Dennoch gibt es Anforderungen seitens der Numerik, damit diese Verfahren auch noch stabil konvergieren. Für unstrukturierte Netze gibt es je nach Solver verschiedene Anforderungen, diese sind z.B. im *Fluent Theory Guide*[41] der Fa. Ansys sehr gut dokumentiert. Wesentlich wichtiger für diese Arbeit sind die Anforderungen für strukturierte Netze, konkret die *Courant-Friedrichs-Lewy Bedingung*:

$$\text{CFL} = \delta t \frac{\|\mathbf{u}\|}{\delta x} \approx 1 \quad (3.2)$$

Physikalisch bedeutet diese Bedingung, dass ein Fluid-Teilchen nicht mehr als eine Gitterzelle pro Zeitschritt passieren soll, damit die Numerik nach wie vor stabil konvergiert. Es sei angemerkt, dass der angegebene Wert nur für den Code von FDS gültig ist und bei anderen verwendeten CFD-Softwarepaketen abweichen kann.

3.1.3 Diskretisierung der Modellgleichungen

Hierfür haben sich vier Verfahren etabliert: die Lattice-Boltzmann method (LBM), die *finite element method* (FEM), die *finite volume method* (FVM) und die *finite difference method* (FDM). Die FEM findet im wesentlichen Anwendung in der Strukturmechanik und wurde im Zuge dieser Arbeit nicht genutzt, weshalb auf eine Erläuterung dieser hier verzichtet wird. Ebenso wurde auf eine Ausführung der LBM verzichtet.

Die FDM findet Anwendung bei strukturierten, rechtwinkligen Rechengitter, wie es in der Software FDS der Fall ist. Konkret wird anstelle einer räumlichen Ableitung ein zentraler Differentialquotient gebildet, welcher an den Zentren der individuellen Gitterzellen gestützt wird. Hier ein Beispiel für die Diskretisierung von Gleichung 2.27:

$$\frac{H_{i+1,jk} - 2H_{ijk} + H_{i-1,jk}}{\delta x^2} + \frac{H_{i,j+1,k} - 2H_{ijk} + H_{i,j-1,k}}{\delta y^2} + \frac{H_{ij,k+1} - 2H_{ijk} + H_{ij,k-1}}{\delta z^2} = -\frac{F_{x,ijk} - F_{x,i-1,jk}}{\delta x} - \frac{F_{y,ijk} - F_{y,i,j-1,k}}{\delta y} - \frac{F_{z,ijk} - F_{z,ij,k-1}}{\delta z} - \frac{\delta}{\delta t}(\nabla \cdot \mathbf{u})_{ijk} \quad (3.3)$$

Für die Berechnung des letzten Terms mit der zeitlichen Ableitung sei an dieser Stelle auf die Dokumentation von FDS verwiesen. Die zugehörige Skizze ist in 3.2 abgebildet.

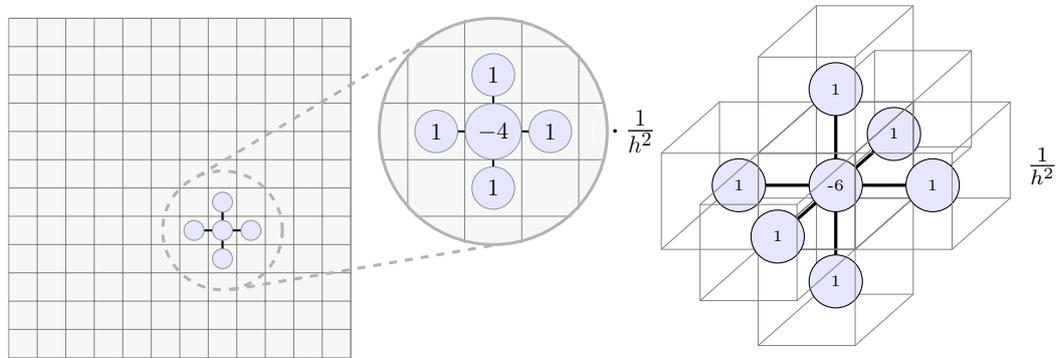


Bild 3.2: Zentraler Differentialquotient: (links) 5-Punkt Schablone im 2D. (rechts) 7-Punkt Schablone im 3D[42].

Eine große Einschränkung dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, Randgebiete des Fluids abzubilden. Aufgrund der erfordernten Orthogonalität des Rechengitters kann z.B. ein Rohr nur nachempfunden werden. Als plakatives Beispiel eignet sich ein einfaches zylindrisches Rohr, respektive ein Kreis im Querschnitt. Dieser wird in FDS wie in Abb. 3.3 dargestellt aufgelöst. Dadurch ergibt sich für die diskretisierte Umfangsfläche des Zylinders, welche z.B. für die Berechnung des Wärmeübergangs entscheidend ist, unabhängig von der Gitterweite, eine um einen Faktor² $4/\pi = 1.273$ größere Fläche (siehe. Abb. 3.3).

Ausgangsbasis für die FVM ist die sogenannte *schwache Form* der Erhaltungsgleichung. D.h. es wird die integrale Schreibweise der Erhaltungsgleichung diskretisiert. Sinngemäß werden alle in die Zelle eintretenden und austretenden Größen mit den Quellen bzw. Senken innerhalb der Zelle verglichen. Dadurch ergibt sich ein Zell-orientiertes Verfahren, da sich die Indexierungen der diskretisierten Gleichungen auf die Zellen beziehen (im

²Dieser Faktor ergibt sich aus der Division der projizierten Fläche ($= 4 \cdot D$) zur tatsächlichen Fläche ($= \pi \cdot D$).

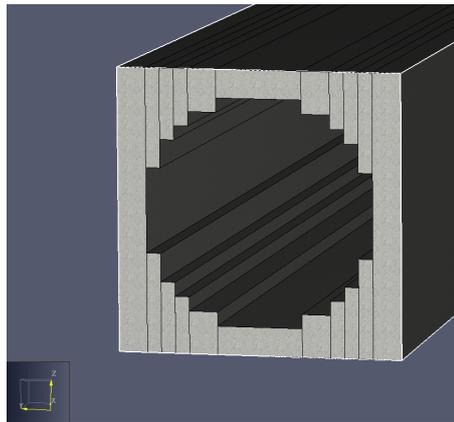


Bild 3.3: Darstellung eines Zylinders in FDS

Vgl. zur FDM, hier wurden jeweils die Größen an Stützstellen indiziert und abgeleitet). Aufgrund der Dämpfung von starken Unregelmäßigkeiten in der Lösung durch die FVM, der Tatsache dass Randbedingung nur näherungsweise erfüllt werden können³, hat sich diese Methode in vielen CFD Anwendungen in der Praxis bewährt, da diese Eigenschaften die Robustheit der Numerik steigern[14].

3.2 Diskretisierung: FDS-relevante Spezialthemen

3.2.1 Strukturierte und unstrukturierte Diskretisierung

Vernachlässigt man die Stoffdiffusion, so wird bei einer Strömung entlang einer Oberfläche gefordert, dass keine Materie eindringen kann. Dementsprechend wird dies auch von der Numerik gefordert. Bei Diskretisierung der Gleichungen wurde bisher eine 5-Punkte-Schablone im 2D (und eine 7-Punkte-Schablone im 3D, siehe Abb. 3.2) verwendet. An Oberflächen kann man für eine genauere Darstellung nun eine 4-Punkte-Schablone im 2D verwenden(siehe 3.4). Diese bildet die interne Randbedingung besser ab, da auch numerisch kein Eindringen mehr möglich ist, d.h. die Normalgeschwindigkeit an der Oberfläche ist gleich null. Der Nachteil dieser Variante zeigt sich in der mathematischen Abbildung. Hierbei entsteht eine unregelmäßige Koeffizientenmatrix was erhöhte Anforderungen an die numerischen Löser stellt.

Abhilfe schafft die *Direct Forcing Immersed Boundary Method*[43], welche auch in FDS Anwendung findet. Hierbei wird solange iteriert, bis die Normalgeschwindigkeit an internen Oberflächen eine gewisse definierte Schwelle (die Geschwindigkeitstoleranz, zu

³Randbedingungen können nur durch die künstliche Erschaffung von zusätzlichen Zellen am Rand eingebettet werden. Im Vergleich zur FDM wird die Randbedingung nicht direkt aufgeprägt, weshalb dies im Sinne der Stabilität als Vorteil zu werten ist.

finden unter *velocity tolerance*) unterschreitet. Dieser Prozess wird in FDS als *pressure iteration* (Druckiteration) bezeichnet[42]. Es kann die übliche 5-Punkte-Schablone (im 2D) durchgehend verwendet werden, weshalb auch die resultierende Koeffizientenmatrix sich zu einer hochregulären Matrix ausbildet (siehe Abb. 3.5). Der große Vorteil dieser Methode ist, dass bei diesen hochregulären Matrizen ein extremst optimierter Gleichungslöser *CRAYFISHPAK*[44] verwendet werden kann, welcher trotz notwendiger mehrmaliger Iterationen schneller ist im Vgl. zu anderen Gleichungslöser bei Verwendung der strukturierten Diskretisierung.

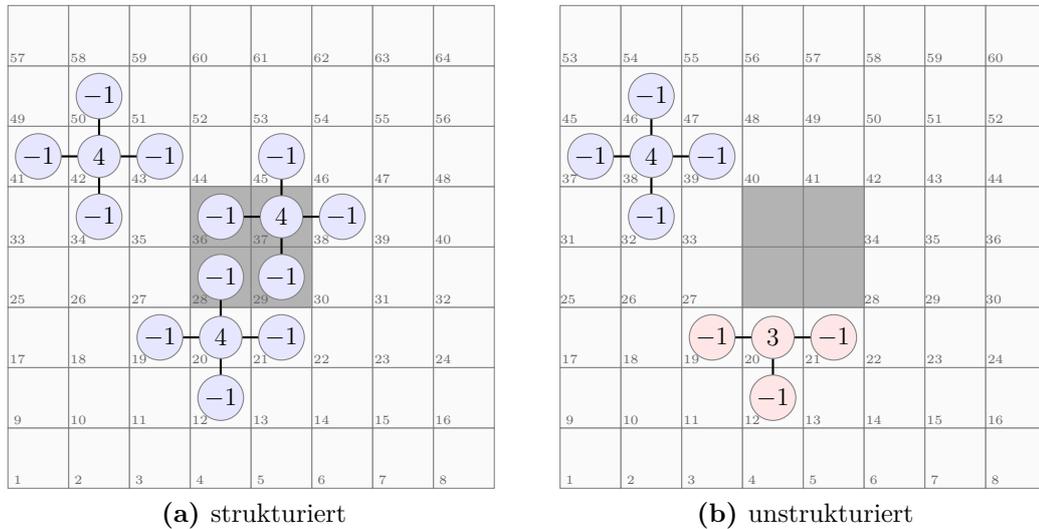


Bild 3.4: strukturierte vs. unstrukturierte Diskretisierung[42]

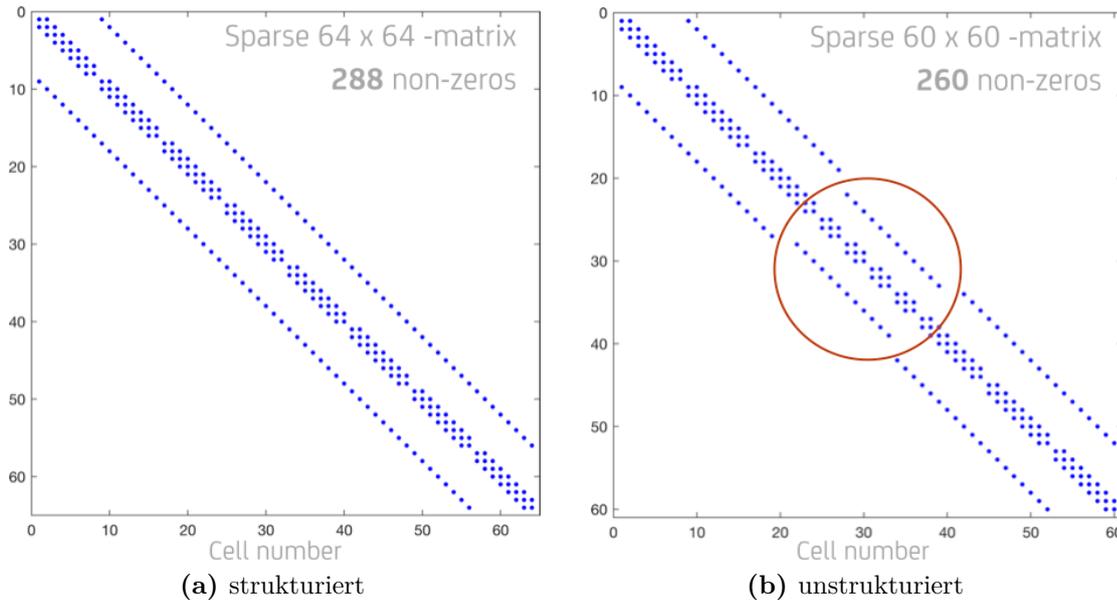


Bild 3.5: strukturierte vs. unstrukturierte Diskretisierung [42]

3.3 Exkurs in die Numerik

Im Zuge der Überführung in die diskrete, numerische Welt wird auch ein gewisses Mindestvokabular aus der Numerik vom CFD-Ingenieur gefordert, hier eine Auflistung inkl. Erklärung der wichtigsten Begriffe, um sich schnell zurechtzufinden, begonnen wird mit den 3 Anforderungen an numerische Verfahren nach Ferziger und Peric [45]:

- Konsistenz** Die Lösung der diskretisierten Gleichungen muss für unendlich kleine Gitterabstände im Raum und in der Zeit in die analytische Lösung übergehen.
- Stabilität** Der numerische Fehler darf sich in der Zeit nicht verstärken. Die Lösung muss beschränkt sein.
- Konvergenz** Erst aus Konsistenz und Stabilität einer Lösung erfolgt Konvergenz. Man spricht auch von einer konvergierten Lösung, wenn die Residuen (siehe Residuum) sich über mehrere Iterationen sich nicht mehr verändern und der relative Werte der Residuen im Bereich kleiner 10^{-3} bis 10^{-5} ist.

Weitere wichtige Begriffe:

- Fehler** ist die Abweichung von der exakten Lösung (welche im Allgemeinen nicht bekannt ist)
- Residuum** ist die Abweichung der gelösten Gleichung von der zu lösenden Gleichung

chung (diese ist direkt berechenbar)

3.4 Diskretisierung: Fluent-relevante Spezialthemen

3.4.1 Abschätzung des Wandabstandes des ersten Knotenpunktes

Bei der Erstellung des Rechenetzes stellt sich die Frage, wie groß die erste Rand-schichtzelle gewählt werden soll, um die von den Wandmodellen geforderten y^+ Werte erreichen zu können, ohne das Netz im nachhinein verfeinern zu müssen bzw. um einen unnötig großen Rechenaufwand vermeiden zu können. Achtung: auch zu kleine Werte sind nicht geeignet bei der Verwendung von Wandmodellen, da diese dann in der laminaren Unterschicht liegen. Ist der Wert zu groß, so befindet sich die erste Gitterzelle bereits außerhalb der Grenzschicht, was auch unzulässig ist. Es ist im weiteren auch auf Ablösungen zu achten, da die meisten Wandmodelle dann nicht mehr gültig sind. Hier empfiehlt sich dann eventuell ein *Low-Re* Ansatz, bei dem die Grenzschicht aufgelöst wird ohne der Verwendung eines Wandmodells.

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Abschätzung ist wie folgt:

1. Schätzung des Oberflächenreibungskoeffizienten $C_f = 0.039 \operatorname{Re}_d^{-\frac{1}{5}}$
2. Berechne die resultierende Wandschubspannung $\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2$
3. Berechne die Wandschubspannungsgeschwindigkeit $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$
4. Setze den gewünschten Wert für y^+ in die Definition ein und forme um $y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \rightarrow y = \frac{y^+ \nu}{u_\tau}$

4 Numerische Versuchsreihe

4.1 Problemstellung

In Österreich werden derzeit 3 lange Eisenbahntunnel im Zuge der TEN-T Hochleistungsstrecken, wie z.B. der zu untersuchende Koralmtunnel mit einer Länge von rund 33 km, gebaut. Alle diese Eisenbahntunnel werden aus Sicherheitsgründen zwei-röhrig ausgeführt und sind in regelmäßigen Abständen (rund 500 m) durch Querschläge miteinander verbunden. Diese fungieren im Brandfall als Fluchtwege und sind deshalb jeweils aus Schleusen mit zwei Betonwandscheiben und Branschutztüren ausgeführt. Die Anforderungen für diese sind im Gegensatz zu Straßentunnel nicht in der RVS [46] festgelegt sondern werden in der Regel im behördlichen Genehmigungsverfahren bestimmt. Generell wird zur Sicherstellung eines rauchfreien Bereiches als Fluchtweg die sichere Röhre in Überdruck versetzt, damit sich eine Luftströmung über den Querschlag in die Brandröhre einstellt. Dies soll die Rauchausbreitung in die sicheren Bereiche verhindern.

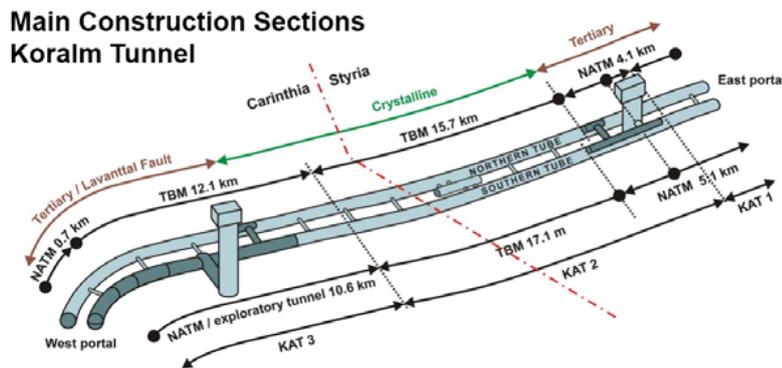


Bild 4.1: Projekt Koralmtunnel - Hauptbauabschnitte[47]

Ausgangsbasis für die numerischen Untersuchungen sind Brandversuche welche im Maßstab 1:1 im Zeitraum vom 24.10.2016 bis zum 16.12.2016 am Ostportal des Koralmtunnel (siehe Abb. 4.1) durchgeführt wurden[47]. Aufgrund der Bauarbeiten konnten die Versuche jeweils nur in der Nacht durchgeführt werden. Auch die Anzahl der Brandversuche

pro Tag war auf 2 limitiert. Die Auswirkung der aktuellen Wetterlage hatte somit von Versuch zu Versuch unterschiedlichen Einfluss, welcher nicht zu vernachlässigen ist. Untersuchungsziele der Brandversuche waren die Wärmefreisetzungsraten, Rauchgas- und Temperaturentwicklung im Entstehungs- und beim Vollbrand. Weitere Ziele waren die Messung von Schadstoffen abseits des Brandes, Türöffnungskräfte, Einfluss einer Hochdruckwassernebelanlage (HDWNA) sowie Rauchdichtemessungen.

Auf den Messwerten aufbauend wurde ein CFD-Modell erstellt, welches diese Brandversuche abbildet. Ein spezielles Augenmerk sollte auf die Abweichungen und deren Ursache gelegt werden, um für spätere Arbeiten die gewonnen Erkenntnisse anwenden zu können und um Vorhersagen über mögliche Brandszenarien besser treffen zu können, auch wenn keine Brandversuche möglich sind. Weiters sollten Größen, welche im Experiment messtechnisch nicht erfasst werden konnten abgeschätzt werden (z.B. Energieeintrag in die Betonwände). Zusätzlich sollte das Backlayering dokumentiert werden, da diese Größe im Experiment nicht im Detail erfasst wurde.

Abbildung 4.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Experimente. Die wesentlichen Komponenten bildeten einige Brandtassen, eine Brandschutzeinhausung zum Schutz der Betonröhre und eine Zugattrappe als Querschnittsverengung. In den Brandtassen wurde ein Benzin/Diesel-Gemisch verbrannt. Weiters wurde die Längsströmungsgeschwindigkeit mittels Ultraschall-Luftströmungsgeschwindigkeits-Messgeräte diagonal über den Tunnelquerschnitt mitprotokolliert. Zusätzlich wurden gem. Abbildung 4.3 die Temperaturschichtungen stromabwärts des Brandes aufgenommen. Abb. 4.4 liefert noch weitere Details zum Versuchsaufbau. Alle weiteren Informationen finden sich im Endbericht[47] von der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik vom Okt. 2017 bzw. in der Veröffentlichung im *Fire Safety Journal* [48] in gekürzter Fassung wieder.

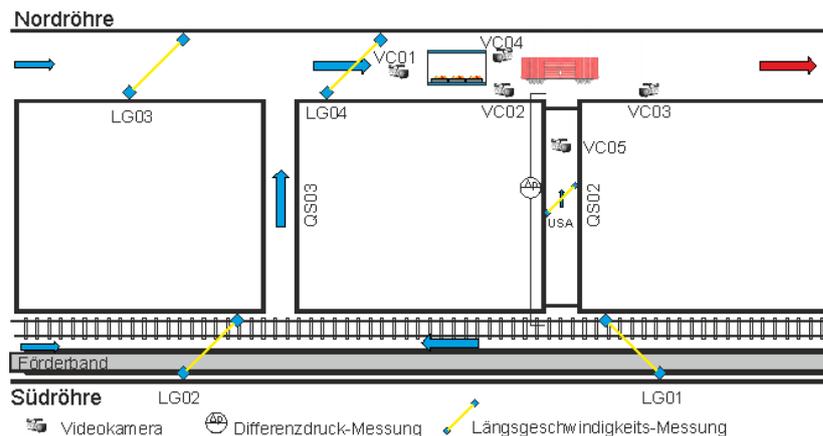


Bild 4.2: Versuchsaufbau und Anordnung der Messgeräte [47]

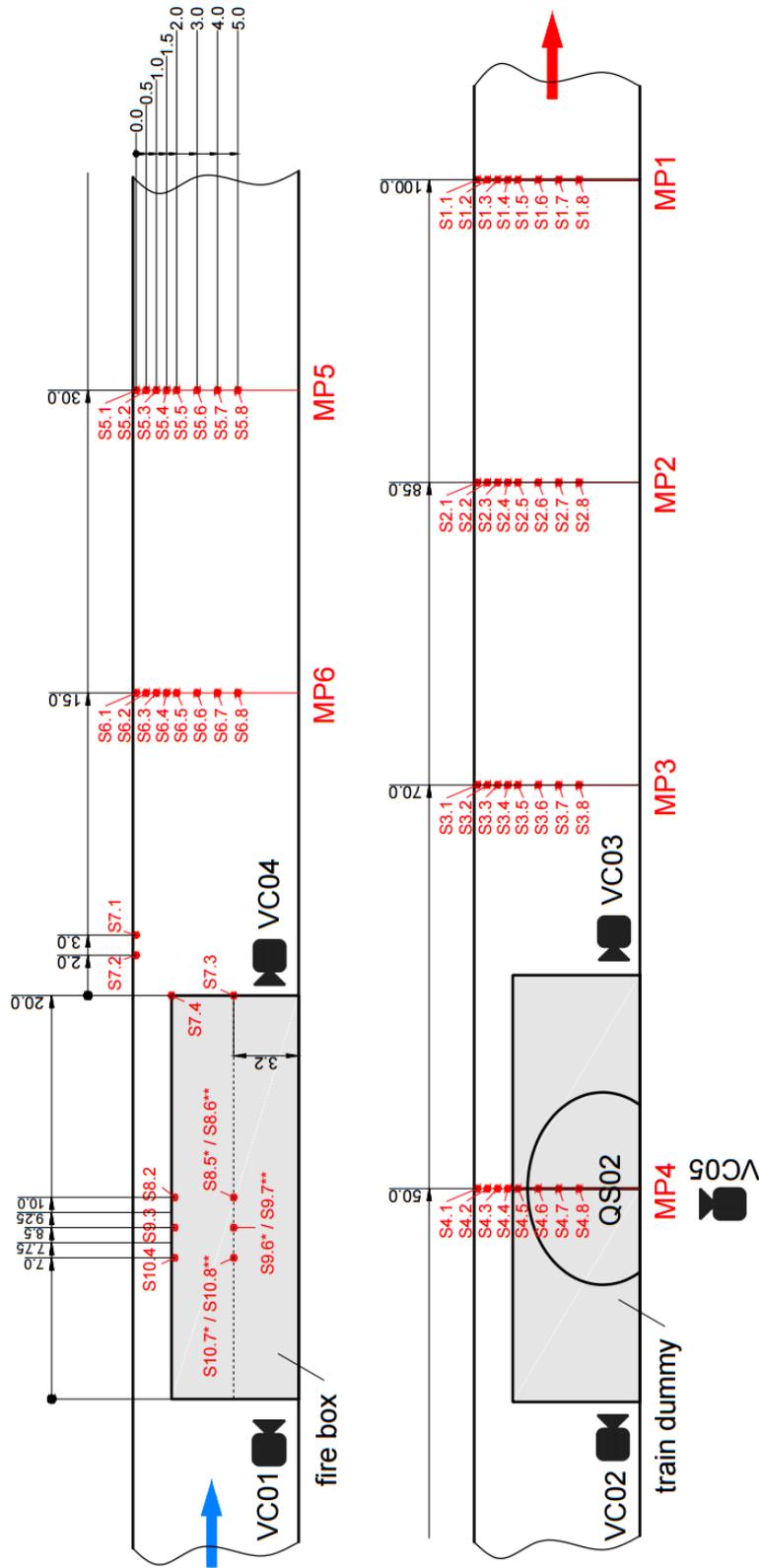


Bild 4.3: Temperaturmessoren (Sx.y) - Anordnung und Positionierung (MPx) [47]

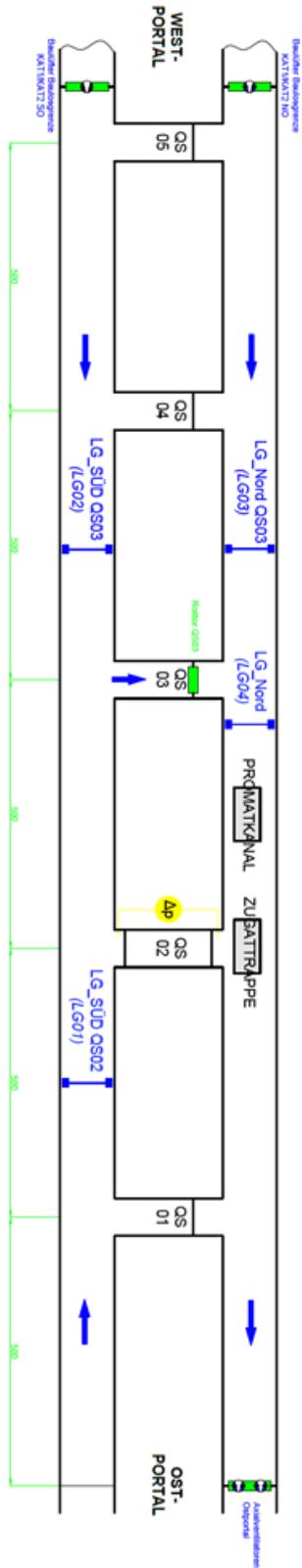


Bild 4.4: weitere Details des Messaufbaus [47]

4.2 Aufbau der FDS-Files

Die für die Erstellung der Files genutzten Tools sind im Anhang in Tabelle A.2 gelistet. In Pyrosim wurde zuerst eine leere Vorlage angelegt, welche die wichtigsten Grundeinstellungen für die Berechnung von Tunnelbränden beinhaltet. Es werden Simulationsmodi, diverse Einstellungen für die Ausgabedateien, Log-Files, allgemeine Randbedingungen und Einstellungen für den Drucksolver gesetzt. Die Details hierfür finden sich in der Dokumentation von FDS, im *FDS Users Guide*[49] wieder. Konkret werden folgende Einstellungen dadurch festgelegt:

```

1 template_leer.fds
2 Generated by PyroSim - Version 2019.2.1002
3 05.11.2019 13:16:58
4
5 &HEAD CHID='template_leer'/
6 &TIME T_BEGIN=-100.0, T_END=250.0/
7 &DUMP COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_BNDF=0.25, DT_DEVC=0.25, DT_HRR=0.25, DT_ISOF=0.25,
8     DT_PART=0.25, DT_PROF=0.25, DT_RESTART=3600.0, DT_SL3D=0.25,
9     VELOCITY_ERROR_FILE=.TRUE., STATUS_FILES=.TRUE., UVW_TIMER(1)=0, DT_CPU=5/
10
11 &MISC TMPA=18.0, SIMULATION_MODE='LES', BAROCLINIC=.TRUE./
12 &PRES VELOCITY_TOLERANCE=0.1, PRESSURE_TOLERANCE=0.1, MAX_PRESSURE_ITERATIONS=10/
13
14 &MESH ID='Mesh01', IJK=40,40,12, XB=0.0,10.0,0.0,10.0,0.0,3.0/
15
16 &BNDF QUANTITY='BACK_WALL_TEMPERATURE'/
17 &BNDF QUANTITY='VISCOUS_WALL_UNITS'/
18
19 &TAIL /

```

Listing 4.1: template_leer.fds

Hierdurch wird ein einheitlicher Standard für alle Berechnungen geschaffen, um ein Abweichen aufgrund unterschiedlicher Einstellungen zu vermeiden.

In Pyrosim ist es möglich, Gruppen anzulegen, weshalb alle Brandversuche in einem gemeinsamen File¹ verwaltet werden können. Hier kann dann optional die jeweilige Gruppe aktiviert werden. Auch dies ist äußerst nützlich, um ein Abweichen der verschiedenen Standard-Einstellungen zu vermeiden. Abbildung 4.5 zeigt die GUI von Pyrosim, links ersichtlich sind die verschiedenen Gruppen für die entsprechenden Brandfälle.

Für die Erstellung des Modells wurde nach dem *Bottom-Up-Prinzip* vorgegangen, welches aus dem Bereich der CAD bekannt ist. D.h. man arbeitet von den kleinsten Elementen weggehend, wie der Modellierung der Brandquelle und testet diese in einem überschaubar kleinen Rechengitter mit entsprechend geringen Berechnungsaufwand und schnell verfügbaren Ergebnissen. Sind diese plausibel und läuft das Model stabil, so wird ein weiteres separates File angelegt, in dem das nächste physikalische Phänomen abgebildet wird, wie z.B. die Tunnelströmung. Nachdem alle Komponenten lauffähig sind,

¹abgelegt und wiederzufinden unter BVx.psm

können diese zusammengefügt werden. Pyrosim erleichtert hier das Zusammenfügen, da die verschiedenen Elemente in Gruppen gesammelt und per copy and paste eingefügt werden können. Alternativ lassen sich auch die Quellcode-Zeilen per Editor einfügen, wenn die GUI von Pyrosim nicht zur Verfügung stehen sollte.

In den folgenden Kapitel werden die weiteren Modellierungsschritte der Brandversuche erläutert und auf die Auswirkungen von verschiedenen Einstellungen wird näher eingegangen werden.

4.2.1 Modellierung der Geometrie

Die Geometrieerstellung erfolgte in Siemens NX. Diese wurde mit den in Abb. 4.6 gezeigten Einstellungen als stl-Datei exportiert. Anschließend kann diese in Pyrosim wieder importiert werden. Da die kompletten Geometrieinformationen nun in Pyrosim verfügbar sind, kann dieses vollautomatisch ein Block-Konstrukt erstellen, welches zu dem festgelegten Berechnungsgitter passt. Prinzipiell kann auch in Pyrosim direkt eine Geometrie erstellt werden, allerdings kann der Funktionsumfang bzw. die Bedienbarkeit nicht mit der einer vollwertigen CAD-Software mithalten. Die in Pyrosim enthaltene Tools zur Erzeugung von Geometrie, eignen sich bevorzugt für typische Anwendungen im Hochbau, wie z.B. zur Erstellung senkrechter Wände, horizontaler Decken mit geometrisch einfachen Durchbrüchen.

Es hat sich gezeigt, dass einige CAD-Programme nicht mit den untypisch großen Längenmaßen arbeiten können, deshalb empfiehlt sich die Erstellung in einem entsprechend verkleinertem Maßstab (z.B. 1:1000), da dies sowohl die Performace beim Export verbessert als auch die einhergehenden Probleme² mit zu großen Längenmaßen verhindert. In Pyrosim kann die Geometrie anschließend wieder hochskaliert werden.

Da besonders die Region an der Tunnel-Oberseite von Interesse ist, und in den Versuchen dort auch die meisten Sensoren platziert wurden, sollte bereits im Vorfeld auf eine entsprechende Nullpunktsetzung des Gitters geachtet werden. Gemeint ist damit eine entsprechende Anordnung des größten verwendeten Gitters, sodass die Tunneloberseite genau mit einem Gitterrand zusammenfällt. Dies ermöglicht bei einer Nachverfeinerung des Gitters³ die Verwendung derselben Sensoren. Beachtet man dies nicht, so ist es möglich, dass durch eine Nachverfeinerung das Netz auf eine andere Koordinate fällt und ein zuvor gesetzter Gas-Sensor später im Festkörper liegt. Pyrosim kann das Block-Konstrukt in der Vorschau direkt anzeigen, dies erfordert jedoch ein manuelles

²CAD-Programme welche auf maschinenbautechnische Anwendungen zugeschnitten sind, haben meist eine Fülle an Optionen gesetzt, welche das Arbeiten im typischen Bereich von einigen Millimetern bis zu wenigen Metern und die entsprechende Visualisierung optimiert. Bei entsprechender Anpassung der Visualisierungsoptionen ist eine Modellierungsarbeit auch im Kilometer Bereich möglich, allerdings sind die Einstellungen oft versteckt und nur mit Administratorrechten anpassbar.

³Nur für ganzzahlige Vielfache des ursprünglichen Gitters gültig.

Aktivieren dieser Option⁴. Abb. 4.7 zeigt die Auswirkung der verschiedenen Gittergrößen auf die Block-Generierung.

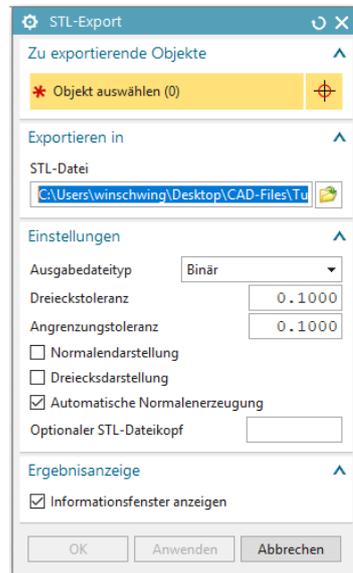


Bild 4.6: stl-Export Einstellungen

4.2.2 Gittererstellung

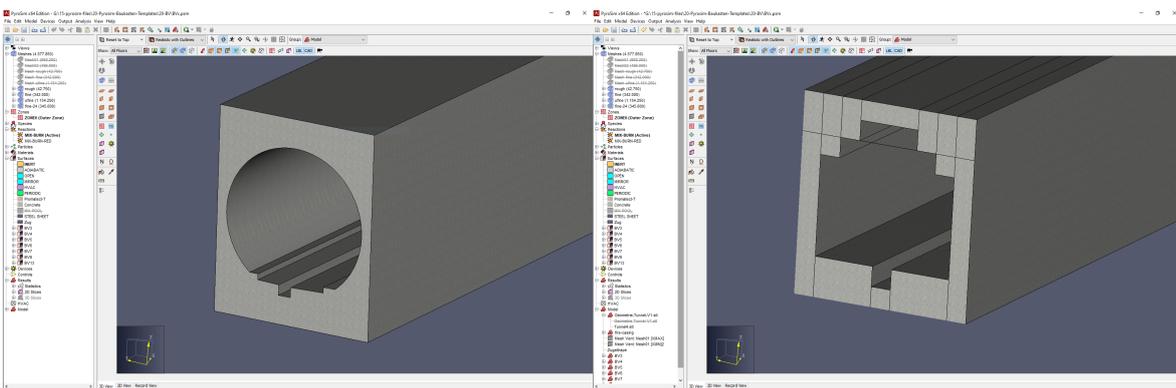
Auch für die Gittererstellung wurde Pyrosim genutzt, da diese eine sehr komfortable Verwaltung der Gitter ermöglicht. Für die Brandfälle wurde die insgesamt 10x10x600m umfassende Berechnungsdomäne in 6 aneinandergereihte Blöcke unterteilt, wobei darauf geachtet wurde, dass Zonen mit hohen Gradienten (z.B. die Brandtasse) nicht in den Randgebieten der Blöcke lagen. Es wurde keine lokale Verfeinerung der Netze vorgenommen. Bei einer Gitterabmessung von 0.5 m x 0.5 m x 0.5 m ergaben sich somit für jeden Block eine Zellenanzahl von 86 400 und insgesamt 518 400.

Modellierung von *dünnen* Elementen

Unter *dünnen* Elementen versteht man Wände, Schichtstärken etc. welche eine tatsächliche Dicke aufweisen, welche die Gittergröße unterschreiten. Damit ein künstliches Aufdicken durch Anpassung an das Rechengitter verhindert wird, wurden sowohl die Betonwand, als auch die Brandschutzeinhausung als 1D-Wärmeleitelement modelliert.

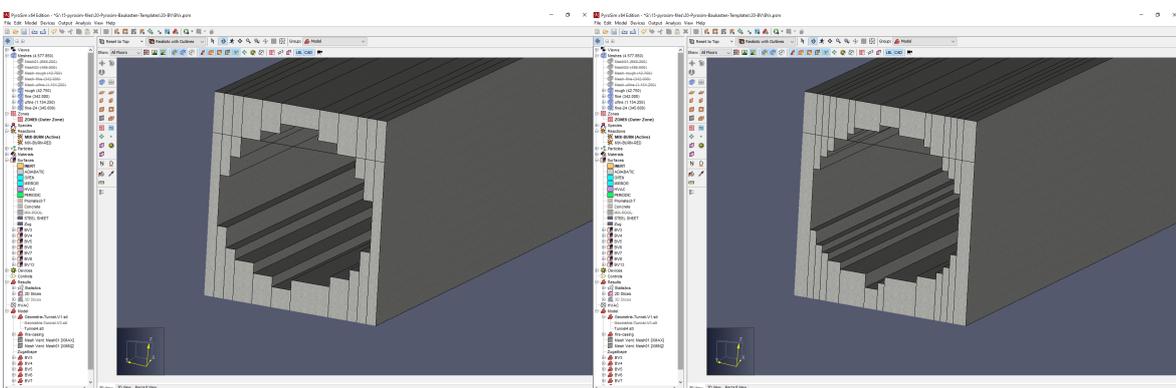
Die Brandschutzeinhausung diente bei den realen Brandversuchen dem Schutz der Betonhülle des Tunnels vor bleibenden strukturellen Schäden. Die Betontemperatur

⁴Option *preview FDS blocks*, welche oberhalb des Visualisierungsfenster zu finden ist



(a) importierte Geometrie

(b) diskretisierte Geometrie ($\Delta x_i = 1.00 \text{ m}$)



(c) diskretisierte Geometrie ($\Delta x_i = 0.50 \text{ m}$)

(d) diskretisierte Geometrie ($\Delta x_i = 0.33 \text{ m}$)

Bild 4.7: Raumdiskretisierung bei verschiedenen Gittergrößen

der Hülle darf eine Temperatur von 120 °C nicht überschreiten, um negative Auswirkungen auf das Bauwerk zu verhindern. Deshalb wurde ein 20 m langes Stahlgerüst errichtet, welches mit Silikat-Brandschutzplattenbauplatten eingekleidet wurde, um einen Wärmeeintrag in der kritischen Zone, direkt über dem Brandherd, zu verhindern.

Die verwendeten Stoffdaten sind in Tab. 4.1 angeführt. Die Definition für die Materialdaten erfolgt wie in 4.2. Die Definition der (Promatect™-T) Brandschutzplatte ist in 4.3 dargestellt. Da die Brandschutzeinhausung aus zwei Promatect™-T Platten aufgebaut war wurde diese durch die FDS-Syntax direkt als eine geschichtete Platte eingepflegt werden. Zusätzlich wurde eine entsprechende Rauigkeit für die Platten vorgegeben. Dem Model fehlt nun noch die Beschreibung der Lage der Brandschutzeinhausung. Es empfiehlt sich eine direkte Definition dieser durch *Obstructions*, wie es im Beispielcode 4.4 gezeigt ist. Alternativ kann auch eine Geometrie importiert werden, wobei hier auf die Anzahl der ausgewählten Flächen geachtet werden muss und wie Pyrosim diese dann am Rechengitter anbringt. Eine Kontrolle des von Pyrosim generierten FDS-Codes ist zwingend erforderlich und kann eine manuelle Nachbearbeiten erfordern. Um diese Fehlerquelle bei der Verwendung von verschiedenen Rechengittern zu umgehen wurde der bereits empfohlene Weg verwendet.

```
&MATL ID='Promatect-T',
      FYI='Brandschutzeinhausung',
      SPECIFIC_HEAT=1.0,
      CONDUCTIVITY=0.212,
      DENSITY=900.0/
```

FDS-Code 4.2: Materialdefinition der Promatect-T Brandschutzplatten

```
&SURF ID='Promatect-T',
      COLOR='GRAY_80',
      TEXTURE_MAP='psm_carpet.jpg',
      TEXTURE_WIDTH=0.9144,
      TEXTURE_HEIGHT=0.9144,
      MATL_ID(1,1)='Promatect-T',
      MATL_ID(2,1)='Promatect-T',
      MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
      MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
      THICKNESS(1:2)=0.025,0.025,
      ROUGHNESS=0.0005/
```

FDS-Code 4.3: Oberflächendefinition der Promatect-T Brandschutzplatten

```

&OBST ID='case1', XB=-1070.0,-1050.0,-2.5,2.5,5.0,5.0,
SURF_ID='Promatect-T' /
&OBST ID='case2', XB=-1070.0,-1050.0,2.5,2.5,0.0,5.0,
SURF_ID='Promatect-T' /
&OBST ID='case3', XB=-1070.0,-1050.0,-2.5,2.5,0.0,0.0,
SURF_ID='Promatect-T' /
&OBST ID='case4', XB=-1070.0,-1050.0,-2.5,-2.5,0.0,5.0,
SURF_ID='Promatect-T' /

```

FDS-Code 4.4: Größen- und Lagedefinition der Brandschutzeinhausung

Tabelle 4.1: Stoffdaten für das Model in Pyrosim/FDS

Material	Wärmekapazität kJ/(kgK)	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/(m ³)
Beton	1.04	1.8	2280
Promatect-T	1.0	0.212	900

4.2.3 Brandtasse - Verbrennungsmodellierung

In den Brandversuchen wurden Brandtassen mit den Abmessungen 1 m - 1 m verwendet, in denen ein Gemisch aus Diesel und Benzin im Volumenverhältnis 4:1 verbrannt wurde. Es wurde die Kraft der Brandtassen auf den Untergrund mittels einer Wägezellenkonstruktion mitgemessen, welche sowohl die Gewichtskraft als auch die entstehende Kräfte aufgrund von Druckunterschieden bzw. Strömungsbewegungen aufzeichnete. Letzere sind unerwünschte Fluktuationen, weshalb diese mittels eines Matlab-Skriptes herausgefiltert wurden. Anschließend wurde eine Tabelle mit einer Zeitschrittweite von $\Delta t = 1$ s erstellt, welche sich für den Import in Pyrosim eignet. D.h. als Randbedingung für die Verbrennungsmodellierung wurde eine Rampe für die Massenverlustrate vorgegeben. Eine gekürzte Darstellung der automatisiert generierten Quellcode-Zeilen zeigen die Codezeilen 4.5.

Als Verbrennungsmodell wurde das *simple chemistry model* ausgewählt, da nicht die Untersuchung des Brandes an sich von Interesse ist, sondern die Auswirkungen des Brandes auf die Temperaturentwicklung und den damit verbundenen Strömungsvorgängen fernab des Brandes untersucht werden sollte. Vorteil dieses Modells ist die geringe Anforderung an die Netzfeinheit in der Brandzone als auch der damit reduzierte numerische Aufwand. Die für das Model notwendigen Werte für die chemische Zusammensetzung der Ausgangsprodukte, die entstehenden Rauchgasanteile als auch die Werte für die Abgabe der freiwerdenden Energie in Form von konvektiver- und Strahlungswärme sind in Tab. 4.2 gelistet. Die Werte für den spezifischen Heizwert und die chemische Zusammensetzung von Diesel und Benzin wurden mithilfe der gegebenen Dichte auf ein

Gemisch im gegebenen Volumenverhältnis von 4:1 angepasst. Die exakte chemische Zusammensetzung (d.h. die absoluten Mol-Zahlen für C,H und O) sind hierfür nicht erforderlich, jedoch ist darauf zu achten dass die Werte nicht zu groß gewählt werden, da dies in der in FDS implementierten Numerik zu Fehlern führen kann [49].

```
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=-100.0 , F=0.0/
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=0.0 , F=0.0/
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=1.0 , F=0.428898/
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=2.0 , F=0.435279/
...
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=774.0 , F=0.172817/
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=775.0 , F=0.160107/
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=776.0 , F=0.147434/
&RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q' , T=777.0 , F=0.0/
```

FDS-Code 4.5: Rampe für die Massenverlustrate (gekürzte Darstellung)

Tabelle 4.2: Werte für das Verbrennungsmodell

Variable	Wert	Quelle
Verbrennungsmodell	simple chemistry model	
Stoffmengenanteil Kohlenstoff	5.865 37	[50, Tab. 9.5]
Stoffmengenanteil Wasserstoff	11.157 013	[50, Tab. 9.5]
Stoffmengenanteil Sauerstoff	0.027 401	[50, Tab. 9.5]
CO_YIELD	0.01	[25, Tab. 3-4.14]
SOOT_YIELD	0.04	[25, Tab. 3-4.14]
HEAT_OF_COMBUSTION	$4.265\,24 \times 10^4$	[50, Tab. 9.5]
RADIATIVE_FRACTION	0.33	[25, Tab. 3-4.14]
IDEAL	.TRUE.	

4.2.4 Randbedingungen

Strömungsaus- und -einlass

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit wurde vor der Brandzone protokolliert. Diese wurde wie die Massenverlustrate in Kap. 4.2.3 mittels Matlab in eine Rampe umgewandelt und als Randbedingung in entsprechendem Abstand, vor dem Brand, dem Model aufgeprägt (Code-Zeilen 4.6). Auf eine Einbringung von turbulenten Wirbeln wurde verzichtet, da sich diese in der hydrodynamischen Anlaufzone von selbst ausbilden. Hiermit ist jener Abstand von der Randbedingung gemeint, ab der sich das (quasi stationäre) Strömungsprofil nicht mehr verändert. Analog dazu wurde auf die

Einbringung eines Strömungsprofils verzichtet, da sich die durch die Haftungsbedingung an der Rohroberfläche reduzierte Geschwindigkeit dementsprechend ausbilden wird und eine genügend große Anlaufänge berücksichtigt wurde.

Wenn nicht anders definiert, strömt standardmäßig Luft mit einer relativen Luftfeuchte von 40 % ein. Hier wurde der Wert auf 50 % angehoben, da die relative Luftfeuchtigkeit gem. den Messdaten in dem Bereich lag. Im Tunnelbau muss man im allgemeinen von höheren Luftfeuchtigkeiten ausgehen, es können je nach Jahreszeit Feuchtigkeiten bis zur Kondensationsgrenze erreicht werden, was bei einer Auslegung entsprechend berücksichtigt werden muss. Die Definition der Luftfeuchte ist für die Abschätzung der Temperaturprofile im Brandfall von hoher Bedeutung, da die Wärmekapazität der feuchten Luft mit steigendem Wasseranteil ansteigt. Wählt man bei vorgegeben 14 °C und Umgebungsdruck anstatt der 50 % keine definierte Luftfeuchtigkeit, so erhält man eine um ca. 10 % erhöhte spezifische Wärmekapazität bei gleichbleibendem Volumen- und Massenstrom (spezifisches Volumen bleibt annähernd konstant, siehe Abbildung 2.3) und eine dementsprechend reduzierte Erhöhung der Temperatur aufgrund der Wärmefreisetzung.

Der Auslass wurde durch die Standardoption '*OPEN*' als Umgebungsdruck modelliert (FDS-Code 4.7). Eine Modellierung der absaugenden Lüfter war nicht notwendig, da das Strömungsprofil am Einlass aufgeprägt wurde und somit bereits inkludiert ist.

```

&SURF ID='AirSupply-BV3',
      RGB=26,204,26,
      VEL=-2.337207,
      RAMP_V='AirSupply-BV3_RAMP_V' /
&RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=-30.0, F=0.0/
&RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=-10.0, F=0.279804/
&RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=0.0, F=0.279804/
&RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=5.0, F=0.278953/
...
&RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=3880.0, F=0.573481/
&RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=3881.0, F=0.573481/
&RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=4480.0, F=0.573481/
...
&VENT ID='VentBV3', SURF_ID='AirSupply-BV3', XB=-1300.0,-1300
      .0,-4.5,4.5,-2.5,7.5/

```

FDS-Code 4.6: Rampe für die Einlassströmungsgeschwindigkeit

```
&VENT ID='Mesh_Vent:_Mesh01_[XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=-825
      .0,-825.0,-4.5,4.5,-2.5,7.5/
```

FDS-Code 4.7: Randbedingung des Auslasses

Temperatur

Initialisiert wird das gesamte Berechnungsgebiet mit der Temperatur wie sie im Header der Datei definiert ist⁵. Insofern keine andere Temperatur für einströmendes Gas an den Randbedingungen definiert wird, wird auch hierfür, wie gewünscht, diese Temperatur verwendet.

Die Randgebiete des 1D Wärmeleitmodelles der Tunnelröhre wurden auf eine fixe Temperatur (=14 °C) festgelegt. Hierbei ist auf eine entsprechende Mindestdicke dieses Modells zu achten, damit nicht eine künstliche Wärmesenke entsteht. Diese kann bereits, wie von Beyer[51] vorgeschlagen mittels einer numerischen Abschätzung der 1D-Wärmeleitungsgleichung erfolgen. Wie in der Referenz gezeigt wird, bewegt sich die Temperatureindringtiefe bei einer Oberflächentemperatur von 900 °C über eine Einwirkdauer von 60 min in einem Bereich um die 0.25 m. Der Rechenaufwand für diese 1D-Wärmeleitung im Vergleich zu dem Gesamten-Rechenaufwand der CFD-Rechnung ist verschwindend klein, weshalb hier konservativer Weise eine Betonschichtdicke von 1+5 m gewählt wurde.

Zusätzlich wurde die tatsächliche Temperatureindringtiefe mittels einer entsprechenden Ausgabe in FDS kontrolliert. Pyrosim unterstützt zum aktuellen Zeitpunkt diese Funktion noch nicht, weshalb diese manuell in Pyrosim eingepflegt werden musste (siehe FDS-Code 4.8). Weitere Details folgen in Kapitel 4.4, in dem die Auswertung der Berechnung erfolgt.

```
&PROF ID='S5-1-wall-temperature-profile-IOR-3', XYZ=-1020.0,0
      .0,6.37, QUANTITY='TEMPERATURE', IOR=-3 /
&PROF ID='S6-1-wall-temperature-profile-IOR-3', XYZ=-1035.0,0
      .0,6.37, QUANTITY='TEMPERATURE', IOR=-3 /
...

```

FDS-Code 4.8: Sensor für die Temperaturpenetration in der Betonröhre

4.2.5 Ausgabe

Für eine Auswertung der Berechnungsergebnisse wurden entsprechende Schnittbilder und Sensoren eingepflegt. Die FDS-Codes 4.9 und 4.10 zeigen eine gekürzte Version der

⁵&MISC TMPA=14.0 ist der entsprechende Eintrag

Sensoren-Liste, welche die wichtigsten Größen auswerten. Sich wiederholende Elemente wurden zusammenfasst und Duplikate sind entfernt worden.

```

&DEVC ID='S1-1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-950.0,0.0,6.37,
      IOR=-3/
&DEVC ID='S1-2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-950.0,0.0,5.87/
&DEVC ID='S1-3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-950.0,0.0,5.37/
...
&DEVC ID='S7.1-wall-temperature', QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'
      , XYZ=-1047.0,0.0,6.37, IOR=-3/
&DEVC ID='S7.1-heat-flux', QUANTITY='NET_HEAT_FLUX', XYZ=-104
      7.0,0.0,6.37, IOR=-3/
&DEVC ID='S7.1-convective-heat-flux', QUANTITY='CONVECTIVE_
      HEAT_FLUX', XYZ=-1047.0,0.0,6.37, IOR=-3/
&DEVC ID='S7.1-radiative-heat-flux', QUANTITY='RADIATIVE_HEAT
      _FLUX', XYZ=-1047.0,0.0,6.37, IOR=-3/
&DEVC ID='S7.1-back-wall-temperature', QUANTITY='BACK_WALL_
      TEMPERATURE', XYZ=-1047.0,0.0,6.37, IOR=-3/
...
&DEVC ID='Layer-MP1->HEIGHT', QUANTITY='LAYER_HEIGHT', XB=-95
      0.0,-950.0,0.0,0.0,0.0,6.37/
&DEVC ID='Layer-MP1->LTEMP', QUANTITY='LOWER_TEMPERATURE', XB
      =-950.0,-950.0,0.0,0.0,0.0,6.37/
&DEVC ID='Layer-MP1->UTEMP', QUANTITY='UPPER_TEMPERATURE', XB
      =-950.0,-950.0,0.0,0.0,0.0,6.37/
...
&BNDF QUANTITY='BACK_WALL_TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='VISCOUS_WALL_UNITS' /

```

FDS-Code 4.9: angeforderte Schnittbilder und Sensoren - Teil 1

```
&ISOFF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=20.0,50.0,75.0,100.0,125
.0/
&ISOFF QUANTITY='U-VELOCITY', VALUE=1.0,-1.0/
...
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=-1000.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-1000.0/
&SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN', PBX=-1000
.0/
&SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='CARBON_DIOXIDE',
PBX=-1000.0/
&SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='CARBON_MONOXIDE',
PBX=-1000.0/
&SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='SOOT', PBX=-1000.0
/
...
&DEVC ID='HeatFluxConv0_SURFACE_INTEGRAL', QUANTITY='
CONVECTIVE_HEAT_FLUX', SPATIAL_STATISTIC='SURFACE_INTEGRAL
', XB=-1070.0,-1050.0,-4.4,4.4,-2.4,7.4/
...
&DEVC ID='SD', PROP_ID='Heskestad_Ionization', XYZ=-1068.5,0
.0,6.0/
&DEVC ID='SD01', PROP_ID='Heskestad_Ionization', XYZ=-1069.5,
0.0,6.0/
&DEVC ID='SD02', PROP_ID='Heskestad_Ionization', XYZ=-1070.5,
0.0,6.0/
...
```

FDS-Code 4.10: angeforderte Schnittbilder und Sensoren - Teil 2

4.3 Durchführung der Berechnungen

Wie bereits erwähnt, verwendet FDS einen LES-Formalismus für die Berechnung von instationären Strömungen. Vom Berechnungsaufwand liegt dieser zwischen einer DNS und einer RANS, wobei in FDS sehr viel Modellierungsarbeit⁶ eingebettet ist, wodurch eine größere Gitterweite zulässig ist. D.h. übliche Quellen für die Auslegung der Gitterweite und damit der Zellenanzahl, wie sie z.B. in *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden* empfohlen werden, sind hier nicht mehr notwendig und auch nicht praktikabel. Diese schreibt z.B. für die Vernetzung von Galerien eine maximale Länge von 0.3 m mit mindestens 10 Gitterpunkten vor [52, S. 40-41]⁷. Es ist somit unerlässlich sich fundiert mit den größtenteils empirisch ermittelten Ersatzmodellen auseinanderzusetzen, um die Gültigkeit dieser auf individuelle Simulationen beurteilen zu können bzw. die Modell-Parameter entsprechend anzupassen. FDS liefert aufgrund einer Vielzahl an gesetzten Default-Werten meist relativ unkompliziert, scheinbar plausible Berechnungsergebnisse ohne diese separat kontrollieren zu müssen. Dies verleitet dadurch allerdings auch zu Trugschlüssen.

Aufgrund der genannten Gründe wurde zu Beginn der Berechnungen eine umfangreiche Parameter- und Netzverfeinerungsstudie am Beispiel des Brandversuches Nr. 3 durchgeführt. Hierfür werden folgend einige grundlegenden Thematiken, wie z.B. die Auslegung der Gittergröße, ein Abschätzen der Hardwareanforderungen usw., vorgestellt.

4.3.1 Gittergröße

Startend mit einer groben Auflösung zum Testen des Modells soll das Gitter solange verfeinert werden, bis keine merkbaren Änderungen am Berechnungsergebnis mehr auftreten und eine Netzunabhängigkeit erreicht ist. Hierbei soll je nach dem zu berechnenden Szenario eine passende Größe zum Überwachen der Änderungen ausgewählt werden. Als klassisches Beispiel kann z.B. der konvektive Wärmeübergang in einer Rührströmung genannt werden. Die in FDS integrierten Statistik-Tools erleichtern den Vergleich ungemein, da keine Nachbearbeitung der Berechnungsergebnisse mittels Matlab oder ähnlichen Tools erforderlich ist.

Dennoch stellt sich die Frage mit welchem Wert für die Gitterweite gestartet werden soll. Hierfür kann die für die Beschreibung einer relativ unkomplexen Flamme, ohne weitere Umgebungseinflüsse, gültigen Faustformel für den charakteristischen Flammendurchmesser D^* gearbeitet werden.

Die dimensionslose Größe $D^*/\delta x$ bezeichnet somit die Anzahl an Gitterzellen, die

⁶Mit Modellierungsarbeit sind Modelle wie Wandfunktionen für die Strömung und Wärmeübertragung, Turbulenzmodelle und viele weitere gemeint.

⁷Auch eine Verwendung von kartesischen Gittern ist nicht zulässig. Es muss eine an die Geometrie angepasste Vernetzung erfolgen.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{0.5} \quad (4.1)$$

\dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate des Feuers
ρ_∞	Dichte der umliegenden, vom Brand unbeeinflussten Luft
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität der Umgebungsluft
T_∞	Temperatur der umliegenden, vom Brand unbeeinflussten Luft
g	Erdbeschleunigung

über dem charakteristischen Flammendurchmesser verteilt werden. Gem. [53] kann bei dem verwendeten Benzin/Diesel-Gemisch von einer Wärmefreisetzungsrate von ca. 1.5 MW m^{-2} ausgegangen werden. Verwendet man die Stoffdaten von feuchter Luft bei 1 bar und $14 \text{ }^\circ\text{C}$ (siehe S. 10, Kap. 2.1.3), so ergeben sich die in Tab. 4.3 gezeigten Werte⁸. Um Flammen-relevante Effekte untersuchen zu können, empfiehlt sich eine Mindestzahl von 5-10 Gitterzellen über den charakteristischen Durchmesser aufzubringen. Werte über 20 gelten schon als ausgezeichnet aufgelöst.

In groß skalierten Brandszenarien ist die Brandquelle an sich jedoch von untergeordneter Ordnung, die Wirkung des Brandes auf die Gesamtsituation ist das eigentliche Untersuchungsziel. Insofern die für das Verbrennungsmodell notwendigen Parameter vorliegen, kann die Gitterauflösung größer gewählt werden. Die max. mögliche Gittergröße in dem entwickelten Modell ist mit 1 m beschränkt, da ansonsten die Brandtasse an sich nicht mehr wahrheitsgemäß modelliert werden könnte⁹.

Die Gitterauflösung wirkt sich direkt auf die Berechnungszeit aus. Es gilt, dass sich bei einer Verfeinerung um den Faktor x (d.h. halbe Gitterweite δx), die Zellanzahl um den Faktor x^3 vervielfältigt. Damit die CFL-Bedingung weiterhin erfüllt wird, muss auch eine um den Faktor x reduzierte Zeitschrittweite verwendet werden. Daraus resultiert ein um x^4 vergrößerter Berechnungsaufwand. Dies bestätigte sich auch in den durchgeführten Berechnungen. Für die gewählte Gitterweite von 1 m wurden ca. 1 h, für 0.5 m ca. 8 h und für 0.33 m rund ein Tag benötigt.

4.3.2 Hardware

Für jede Zelle muss im schnellen Arbeitsspeicher entsprechend die aktuelle Information über die physikalischen Größen gespeichert werden. Für eine Millionen Zellen

⁸Die Firma Thunderhead Engineering stellt eine Vielzahl an nützlichen ExcelTMTools zur freien Verfügung wie z.B. den *D* Calculator*, siehe <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/resources/>

⁹Durch eine entsprechende Reduktion der Wärmefreisetzungsrate bei Verwendung einer größeren Brandfläche kann dies in Sonder-Fällen als Workaround dennoch realisiert werden.

Tabelle 4.3: resultierende Werte für D^*

D^*	0.893 m
$D^*/5$	0.178 m
$D^*/10$	0.089 m
$D^*/20$	0.044 m

wird rund 1 GB RAM benötigt, dies gilt jedoch nur für die Verwendung des Standard-Druckgleichungslösers. Bei Verwendung der optionalen Löser 'GLMAT', 'UGLMAT' können bis zu einer Millionen Zellen bei einem verfügbaren Arbeitsspeicher von 64 GB berechnet werden[49].

In den letzten Jahren ist die Nutzung von GPUs als Unterstützung für die Rechenleistung der CPU in den Trend gekommen. Hierfür muss die Software in die von Nvidia entwickelte Programmieretechnik CUDA[®] eingebettet werden bzw. diese unterstützen. Kommerzielle CFD-Tools wie Fluent unterstützen dies bereits vollständig und profitieren je nach Anwendung mit einer beachtlichen Verkürzung der Rechenzeit, FDS unterstützt CUDA[®] allerdings zum aktuellen Tag noch nicht. Bereits 2009 haben Belaschk und Münch FDS größtenteils nach C bzw. CUDA[®] portiert/parallelisiert und erreichten dabei Steigerungen der Rechenleistungen zwischen dem 10fachen (für Strahlungstransport) und dem 30fachen (für die Strömungsmechanik)[54]. Eine ähnliche Software wurde von Glimberg, Erleben und Bennetsen im selben Jahr, mit dem Ziel die Rauchentwicklung mithilfe von GPUs vorherzusagen, geschrieben, wobei noch keine Implementierung von Bränden und deren Hitzeabgabe vollzogen worden ist[54]. Aber auch hier spricht die Verifizierungsarbeit im Vergleich zu FDS für sich, die Berechnungszeit betragen bei kleinskalierten Modellen nur einen Bruchteil von der FDS benötigten Zeit. Schlussendlich kann in der aktuellen Version von FDS jedoch noch keine Grafikkarte genutzt werden, womit auch keine Anforderungen an diese von Nöten sind. Vielmehr setzen die Entwickler am NIST auf die Parallelisierung durch MPI aufgrund der einfachen Skalierbarkeit in Verbindung mit den neustesten Drucksolvern (USCARC, SCARC).

Eine Performance-Steigerung durch die Verwendung einer SSD anstelle einer HDD ist nicht zu erwarten, da die Schreibintervalle manuell gesetzt werden können und der Einfluss einer schnellen Schreibrate somit beeinflusst werden kann. Auf genügend Speicherplatz sollte geachtet werden, insbesondere beim Abarbeiten von seriell aufgesetzten Berechnungsaufträgen. Für jeden der 7 durchgeführten Brandfälle wurden in etwa 25 GB an Speicherplatz bei einer Laufzeit von ca. 1200 s und rund 500 000 Zellen benötigt. Sollten 3D-Exporte stattfinden, so ist mit einem massiven Zuwachs an Speicherplatzbedarf und auch zusätzlicher Berechnungsdauer aufgrund von Exportvorgängen zu rechnen.

Alle Berechnungen wurden auf einer HP Z820 Workstation mit einer Dual-CPU-Architektur durchgeführt, welche insgesamt 12 physische Kerne bei 16 GB RAM zur

Verfügung stellt. Alle weiteren Details der verwendeten Hardware und Softwarekonfiguration finden sich in Tab. A.1 und A.2 im Anhang wieder.

Dieses Vorwissen genügte, um die ersten lauffähigen Simulationen erstellen zu können. Um die weiteren Schritte bzgl. der Parameterstudie besser nachvollziehen zu können, wird ein Blick auf die Auswertung des Brandversuches 3, der ersten numerische Untersuchung empfohlen (siehe 4.4.1).

4.4 Brandfallauswertung

Für alle berechneten Brandfälle finden sich im Anhang (siehe Anhang C ab S. 122) alle relevanten Diagramme und Tabellen, jeweils mit der Gegenüberstellung zu den gemessenen Werten der Realbrandversuche. Tabelle 4.4 fasst die wichtigsten Größen zusammen.

Tabelle 4.4: Übersicht - Brandfallauswertung

Brandfall	Experiment				FDS		
	Anzahl Tassen	mittlere Brandleistung	maximale Brandleistung	Brenndauer	max. Beton-Temperatur	max. Beton-Temperatur	max. Backlayering
[#]	[#]	[MW]	[MW]	[min]	[°C]	[°C]	[m]
3	2	2.3	4.0	15	25.6	24.8	131
4	4	6.0	7.7	10	42.5	37.3	138
5	6	7.2	11.5	12	69.4	45.8	138
6	8	9.5	14.3	12	89.9	53.4	100
7	8	14.5	19.5	8	116.4	102.4	153
8	4	4.1	6.7	14	57.0	31.7	145
13	10	9.0	21.0	16	100.3	103.0	136

4.4.1 Brandversuch 3

Die numerische Versuchsreihe wurde mit dem Brandversuch 3 gestartet, da dieser eine noch relativ geringe Energiefreisetzung vorweist und damit die geringsten Anforderungen

an die Numerik stellt¹⁰. Die Brandversuche 1 und 2 eigneten sich aufgrund der eines Ausfalls der Auswertelektronik geschuldeten nicht vorhandenen Temperaturprofile nicht.

Es wurde jeder der durchgeführten numerischen Brandversuche anhand der Simulationsergebnisse basierend auf einer einheitlichen Gittergröße von 0.5 m ausgewertet¹¹.

Vorgaben an FDS durch das Experiment

Wie bereits erläutert, sind die Anströmgeschwindigkeit und die Massenverlustrate des Brennstoffes aufgeprägte Randbedingungen. Abbildung 4.8 zeigt die entsprechende Anströmgeschwindigkeit für den BV3 und Abb. 4.9 zeigt die entsprechende Massenverlustrate, welche durch eine Ableitung eines Näherungspolynoms für die tatsächlich gemessene Brennstoffmaße gewonnen wurde. Dadurch wurden Messschwankungen aufgrund des Luftdruckes herausgefiltert. Plötzliche Änderungen der Massenverlustrate sind für die Numerik herausfordernd und erfordern eine entsprechende Anpassungen an die Zeitschrittweiten, was in einer verlängerten Berechnungszeit resultiert. Deshalb eignen sich die geglätteten Funktionen für die Randbedingungen besser als die ungefilterten Größen.

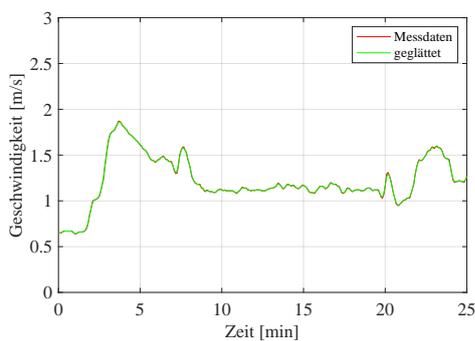


Bild 4.8: Anströmgeschwindigkeit

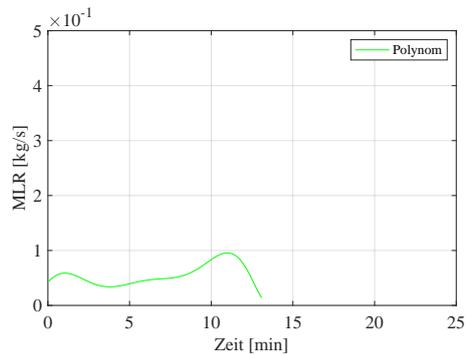


Bild 4.9: MLR Vorgabe vom Brandversuch

Simulationsergebnisse

Die Abbildung 4.10 zeigt das zeitliche Temperaturprofil am Messpunkt 5 (vgl. Abb. 4.2), welcher sich knapp hinter der Brandschutzeinhausung befindet, in Gegenüberstellung zu den Messdaten. Es zeigt sich eine erstaunlich gute Übereinstimmung in der zeitlichen

¹⁰Größere Energiefreisetzungsraten resultieren insbesondere bei der Simulation von langen Tunnelröhren erhöhte Anforderungen an das Berechnungsmodell, es ist vermehrt mit numerischen Instabilitäten zu rechnen.

¹¹siehe Parameterstudie auf Seite 4.4.2

Entwicklung, als auch in den maximal erreichten Temperaturwerten. Stellt man die Temperaturschichtung ausgehend von der Decke dar, wie es in Abb. 4.11 zu sehen ist, so zeigt sich eine gute Annäherung an die Spitzentemperaturen an der Betondecke, wobei die Schichten mit höheren Temperatur weiter nach unten reichen als tatsächlich gemessen wurde. Wie in den Parameterstudien gezeigt wird, ist eine Gittergröße von 0.5 m noch nicht ausreichend, um die Temperaturschichtung netzunabhängig abbilden zu können, weshalb eine weitere Verfeinerung notwendig wäre. Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass das Zeit-Temperaturprofil der Simulation in Abb. 4.10 gefiltert wurde, die entsprechende Grenzfrequenz für den Tiefpassfilter wurde durch eine Analyse der Frequenzanteile des Sensorsignals mittels FFT ermittelt, da die verwendeten Thermoelemente eine geringe, aber dennoch vorhandene thermische Trägheit besitzen. Dies verbessert die Lesbarkeit der Diagramme deutlich, insbesondere bei der Verwendung von kleineren Gittergrößen. Weiters wurde bei der Darstellung der Temperaturschichtung in Abb. 4.11 ein Stützpolynom für die Darstellung der Linien verwendet, die entsprechenden Stützstellen sind durch einen Punkt hervorgehoben. Zudem sind alle weiteren Diagramme sind im Anhang gelistet.

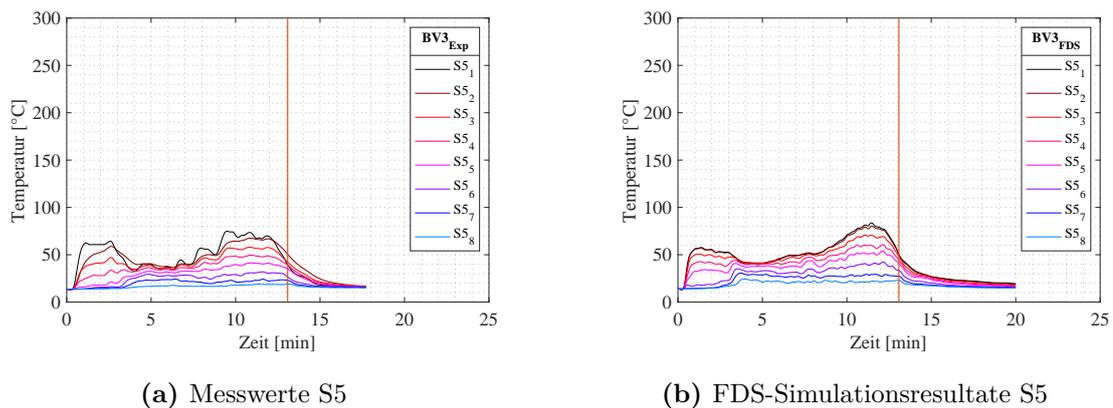


Bild 4.10: BV3: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 5

Die resultierende Rauchgasrückschlagung (backlayering) wird in Abb. 4.12 dargestellt. Es zeigt sich ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Länge des Backlayerings zur Massenverlustrate. Ein Einfluss der Randbedingung konnte ausgeschlossen werden, da eine separate Berechnungsreihe mit verlängertem Einlaufbereich durchgeführt wurde. Hierbei zeigte sich keine Veränderung zu der durchgeführten Berechnung. Es sind keine weiteren Vergleiche mit den Messwerten möglich, da die Rauchgasausbreitung bei den real durchgeführten Brandversuchen nicht ausreichend dokumentiert wurde. Weitere Vergleiche mit aus der Literatur bekannten analytischen und empirischen Ansätzen sind für alle Brandversuche gesammelt im Kapitel 4.4.4 zu finden.

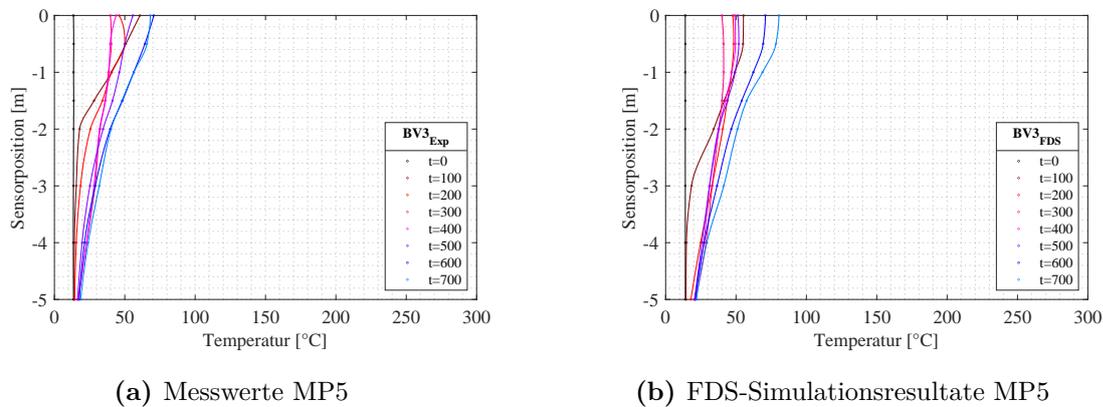


Bild 4.11: BV3: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 5

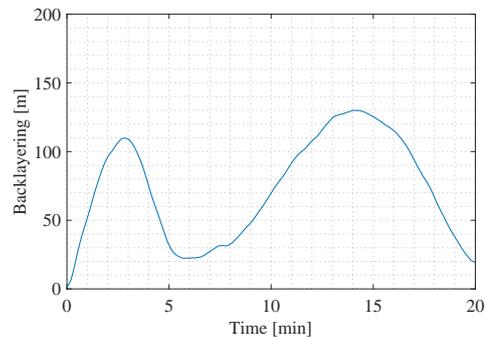


Bild 4.12: BV3: Backlayering

Wie in Kap. 4.2.4 erklärt wurde, muss die Plausibilität der Temperaturrandbedingung geprüft werden, um eine künstliche Wärmesenke zu verhindern. Deshalb wurde an den Stellen, an denen erwartungsgemäß der größte Wärmeeintrag in die Betonhülle auftritt das Temperaturprofil des Betons überprüft. Diese Auswertung zeigt Abb. 4.13. Der Einfluss des Wärmeeintrages über Konvektion (und Strahlung) geht nicht über eine Tiefe von 0.1 m hinaus. Da alle anderen Brandfälle von der Brandlastdauer, welche maßgebend für die Eindringtiefe ist, nicht allzu weit abweichen, kann für alle Brandfälle eine künstliche Wärmequelle mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden. Diese Bedingung wurde für alle weiteren Brandfälle nochmals kontrolliert, auf eine explizite Darstellung der Diagramme wird allerdings verzichtet.

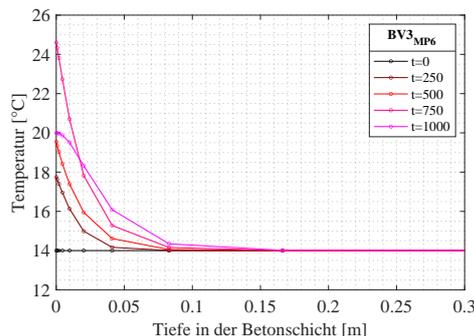


Bild 4.13: Temperaturprofil des Betons beim Messpunkt 6

4.4.2 Parameterstudie anhand des BV3

In FDS ist eine Vielzahl an Parametern und Modellen gesetzt, welche es ermöglicht relativ rasch zu einer lauffähigen Simulation zu gelangen, welche speziell für allgemeine Brandszenarien zugeschnitten ist. Dies unterscheidet sich im Modelaufbau zu der in der Branche bekannten Software ANSYS Fluent, welche einen gänzlich anderen Weg zur Beschreibung der Problemstellung verfolgt: Hierbei wird ausgehend von einigen wenigen Basis-Gleichungen, wie es z.B. die Massen- und Impulserhaltung sind, nach und nach optionale Sub-Modelle ergänzt. Hierzu zählen z.B. die ideale Gasgleichung oder Turbulenzmodelle. Hierbei stoßt der Benutzer nach und nach auf die eingepflegten Voreinstellungen. Deshalb ist es wichtig, in FDS die versteckten Parameter und Modelle auf Sinnhaftigkeit zu prüfen und zu korrigieren, um plausible Ergebnisse ermöglichen zu können. Deshalb wurde im Zuge dieser Arbeit eine umfangreiche Parameterstudie unter Berücksichtigung der Berechnungsdauer anhand des BV3's durchgeführt.

Toleranzwerte für den Standard-Drucksolver

Begonnen wurde diese Studie mit der Untersuchung der Toleranzwerte für den Druck-solver. Hierbei können drei verschiedene Parameter unabhängig voneinander gesetzt werden, und zwar die Schwelle für die Geschwindigkeits- und die Drucktoleranz als auch die damit verbundene maximale Iterationszahl des Drucklösers bei der Berechnung eines Zeitschrittes. Um nicht für jeden Wert eine vollständige Berechnung durchführen zu müssen, wurde stellvertretend eine Simulation für jede Gittergröße durchgeführt mit einer maximalen Iterationszahl von 25. Anschließend wurde anhand des Log-Files für die Druckiterationen eine Abschätzung der Berechnungsdauer (mittels Matlab) durchgeführt¹². Zusätzlich ist die Definition der Schwellwerte für Druck und Geschwindigkeit

¹²Hierbei wird die Tabelle, welche mittels eines csv-Files bereitgestellt entsprechend gefiltert, d.h. dass bei einer Unterschreitung der jeweiligen Toleranzgrenze die anschließenden Berechnungsschritte nicht mehr zur Berechnungszeit gezählt werden.

maßgebend, weshalb diese bei dieser Untersuchung sehr fein gesetzt wurden, um den für die Berechnung aufwändigsten Fall darzustellen.

Die Auswirkung des Einflusses der maximal erlaubten Iterationszahl wird in Abbildung 4.14 dargestellt, wobei die Berechnungszeit jeweils auf die Zeit bezogen wurde, die durch die Standard-Iterationszahl von 10 benötigt wurde. Bei einem größeren Netz ist die Auswirkung vom Default-Wert aufwärts marginal, mit feineren Netzen zeigt sich jedoch eine direkte Proportionalität zwischen der Berechnungszeit und der Iterationszahl. Dies spiegelt sich auch in den Abbildung für die erreichten Konvergenzfehler (Abb. 4.15) als auch den Histogrammen für die Fehler (siehe Anhang) wieder.

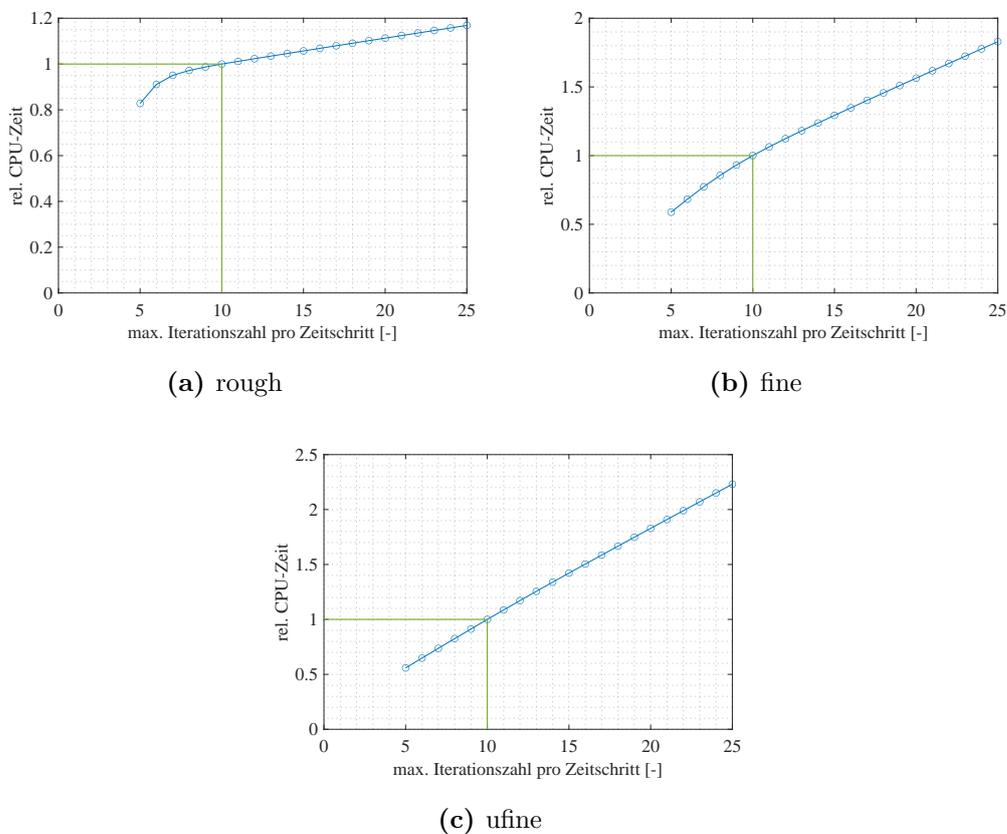


Bild 4.14: Einfluss der max. Iterationszahl auf die CPU-Zeit

Abbildung 4.15 zeigt die tatsächlich erreichten Konvergenzfehler bei dem jeweiligen Iterationsschritt an. Als Bezugsgrößen wurde wieder die bei dem Standardwert erreichten Fehler verwendet. Für das verwendete Gitter mit einer Größe von 1 m ist der Fehler bereits etwas früher konvergiert, weshalb bei größeren Gittern die maximale Iterationszahl auf einen niedrigeren Wert gesetzt werden darf ohne einen unzulässig großen Konvergenzfehler in Druck und Geschwindigkeit zu ermöglichen. Allerdings

kann hier kaum Berechnungszeit gewonnen werden, wie in Abb. 4.14 gezeigt wird. Der Standard-Wert von 10 kann somit bedenkenlos verwendet werden. Bei dem Netz mit einer Größe von 0.5 m sind die Fehler bei 10 Iterationen bereits vollständig konvergiert. Auch bei dem Netz mit der Größe von 0.33 m ist eine Konvergenz beinahe schon erreicht, aufgrund der Tendenz von größeren relativen Fehlern bei feineren Netzen ist hier anschließend noch etwas Potential (ca. 30 %) vorhanden, wobei der Zeitaufwand direkt proportional zu der max. zulässigen Iterationszahl ansteigt.

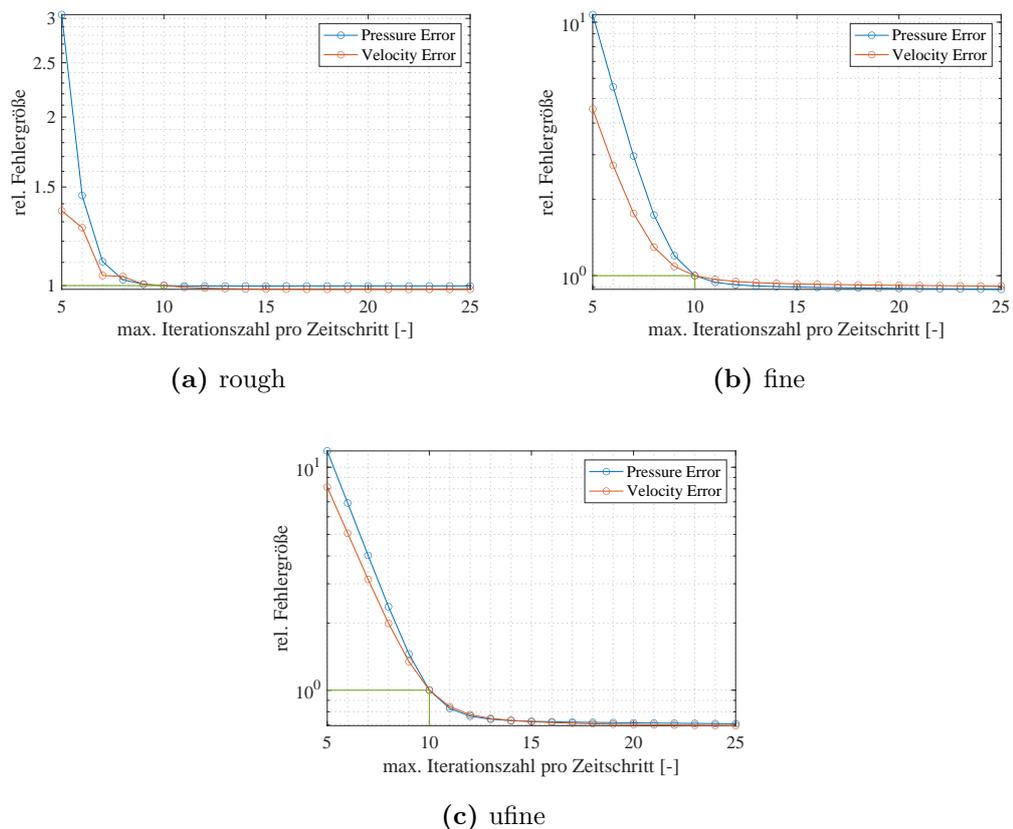


Bild 4.15: Einfluss der max. Iterationszahl auf den Fehler

Weiters konnte keine Auswirkung der Schwellwerte für Druck und Temperatur auf die wesentlichen Auswertungsgrößen wie das Temperaturprofil und die Wärmefreisetzungsrates festgestellt werden. Bei diversen Testsimulationen zu Beginn der Versuchsreihen wurde jedoch ein Zusammenhang dieser Größen mit der Stabilität der Simulation an sich festgehalten. Dieser ließ sich jedoch nicht genau charakterisieren. Jedoch empfiehlt sich beim Auftreten von numerischen Instabilitäten eine Verkleinerung der Schwellwerte oder gar die Verwendung eines alternativen Drucklösers. Für das Verhalten von langen Tunnelröhren in der Berechnung in FDS gibt es noch eine ergänzende Liste an Empfehlungen, welche die Problematik des Drucksolvers erläutern. Diese ist im

FDS-USER-Guide[49] zu finden.

Berechnungsdauer

Die Berechnung von hochgradig instationären Strömungen durch einen LES Ansatz kann bei größeren Berechnungsdomänen und abzubildenden Zeitbereichen mitunter nur mithilfe von Supercomputern in praktisch brauchbaren Berechnungsdauern simuliert werden. Der hohe Grad an Modellierungsarbeit ermöglicht in FDS dennoch eine Verwendbarkeit auf einfach verfügbaren Workstations. Deshalb wurde die CPU Zeit für eine Vielzahl an verschiedenen Setups mitprotokolliert. Diese ist in Abbildung 4.16 in Logarithmischer Skalierung angeführt. Hierbei wurde für jede Berechnung die jeweilige maximale CPU-Zeit (total) der Berechnungsgitter verwendet. Zusätzlich wurde ein separater bereinigter Balken (total-dump) angeführt, welcher die Zeit die für das Vorbereiten der angeforderten Daten (Slices, Sensoren, etc.) benötigt wird, abgezogen wird. Dies hat insbesondere bei der Aufteilung auf mehrere Berechnungsgitter Auswirkungen¹³. Alle Mehrgitter-Berechnungen wurden mit 6 aneinandergereihten Gitter bei jeweils 2 OpenMP Threads durchgeführt. Single-Gitter Berechnungen wurden mit dem Suffix *single* ergänzt. Standardmäßig wurden 10 Iterationsschleifen für den Drucksolver verwendet.

Es zeigt sich die erwartungsgemäße Vervielfachung¹⁴ bei Verfeinerung des Gitternetzes. Der Einfluss des absoluten Wertes für die Drucktoleranzgrenze ist bei einer Gittergröße von 0.5 m vernachlässigbar klein.

Vergleicht man die Berechnungszeiten von Multi-Mesh Berechnungen mit Berechnungen, welche nur mit einem Gitter durchgeführt wurden, so zeigt sich eine eindeutige Verbesserung durch eine bessere Ausnutzung der Hardware Ressourcen. Weiters zeigt sich ein positiver Effekt bei der Ausgabe der Daten. Durch die Aufsplittung wird der Anteil für das Vorbereiten der Ausgabedaten stark reduziert.

Bei genauerer Betrachtung des Graphes fällt auf, dass die optionalen Drucksolver UGLMAT und GLMAT nicht angeführt sind. Diese wurden bewusst aus dem Graphen entfernt, da diese nicht zu stabilen Berechnungsergebnissen geführt haben. Bezüglich der Berechnungsdauer lagen diese für die Gittergrößen *rough* und *fine* immer etwas über den Standard-Drucksolver FFT und auch über dem relativen jungen optionalen Drucksolver USCARC / SCARC. Für die Gittergröße *ufine* (0.33 m) wurde die Berechnung aufgrund unbrauchbar langer Berechnungszeiten abgebrochen und konnte dementsprechend nicht verglichen werden. Die unstrukturierten Drucksolver USCARC und UGLMAT benötigen definitionsgemäß nur eine Iterationsschleife pro Zeitschritt, benötigten aber dennoch mehr

¹³Die Einstellungen für das Schreiben von Messdaten müssen insbesondere bei der Verwendung eines Rechenclusters genauer betrachtet werden, da es hier schnell zu einer Performance-Bremse des Clusters kommen kann. Details findet man im User Guide von FDS

¹⁴Faktor 8 bei einer Verfeinerung des Gitters auf die halbe Gitterlänge.

CPU-Zeit als bei Verwendung der strukturierten Drucksolver SCARC und GLMAT, welche eine mehrmalige Druckiteration durchführen müssen. Es sei ergänzend angemerkt, dass die neuen Drucksolver SCARC und USCARC bei der verwendeten Anzahl an Gitterteilungen (6) noch keine Verbesserung zu dem Standarddrucksolver darstellt. Der Vorteil dieser Solver wird sich erst bei einer größeren Anzahl an Berechnungsgittern (>100) bemerkbar machen, da diese für Ihre Eigenschaft einer beinahe unbegrenzten Skalierbarkeit an Rechenclustern bekannt sind.

Ergänzend sind auch noch (exemplarisch) die Graphen für die Temperaturprofile dargestellt (Abb. 4.17 und Abb. 4.18). Hierbei zeigen sich bis auf die bessere Darstellung der Höhenschichtung keine weiteren Charakteristiken. Zusätzlich sticht eine Line (BV3-ufine-single) hervor, welche mit einem falschen Wert für die Standard-Temperatur T_{MPA} berechnet wurde (18 °C anstelle 14 °C). Dieser Offset zieht sich durch die gesamte Berechnung durch und ist somit nicht weiter von Belang. Auf eine erneute Durchführung der Rechnung wurde aufgrund der extrem langen Berechnungszeit verzichtet.

Zusammengefasst gilt, dass für neue Berechnungsmodelle ein Gitterabmaß von 1 m sich besonders gut für die Erstrechnung eignet, da die Berechnungsergebnisse bereits nach kurzer Zeit (30 min bis 60 min) zur Verfügung stehen. Es kann somit relativ rasch überprüft werden, ob alle notwendigen Modelle aktiviert sind und die Rechnung lauffähig ist. Eine Verfeinerung auf 0.5 m ist für die Endrechnung empfohlen, um Abweichungstendenzen aufgrund der Verwendung des äußerst groben Netzes feststellen zu können. Die Rechnung mit feineren Netzen ist aufgrund der langen Berechnungszeiten, bei Verwendung von einer einzigen Workstation, nicht praktikabel. Verwendet werden sollte der Standarddrucksolver mit enger gesetzten Schwellwerte für die Druck- und Geschwindigkeitstoleranzen bei gleichzeitiger Aufsplittung der Berechnungsdomäne in eine für die jeweilige Hardware angepasste Anzahl.

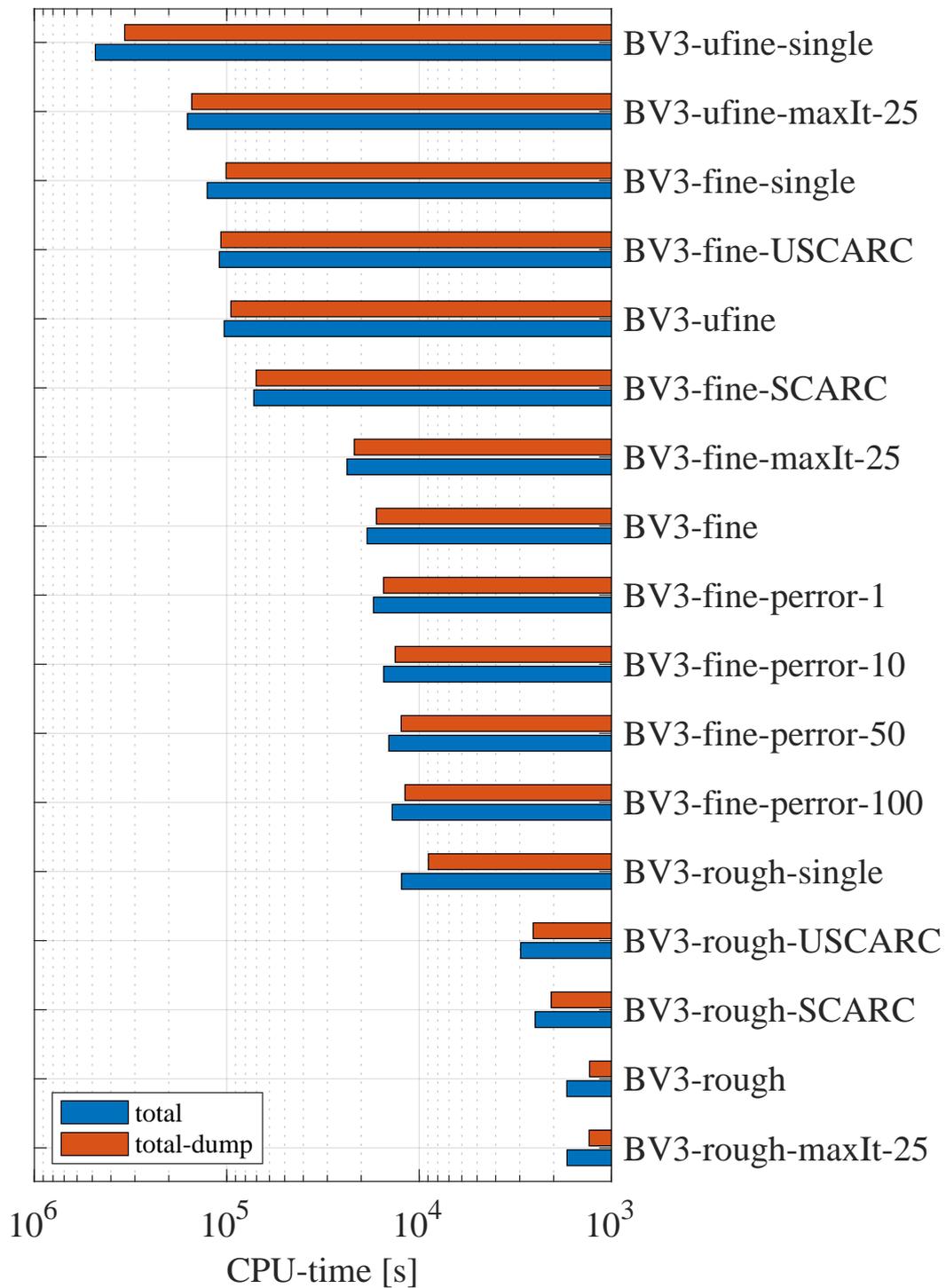


Bild 4.16: Berechnungszeiten des BV3s mit unterschiedlichen Einstellungen

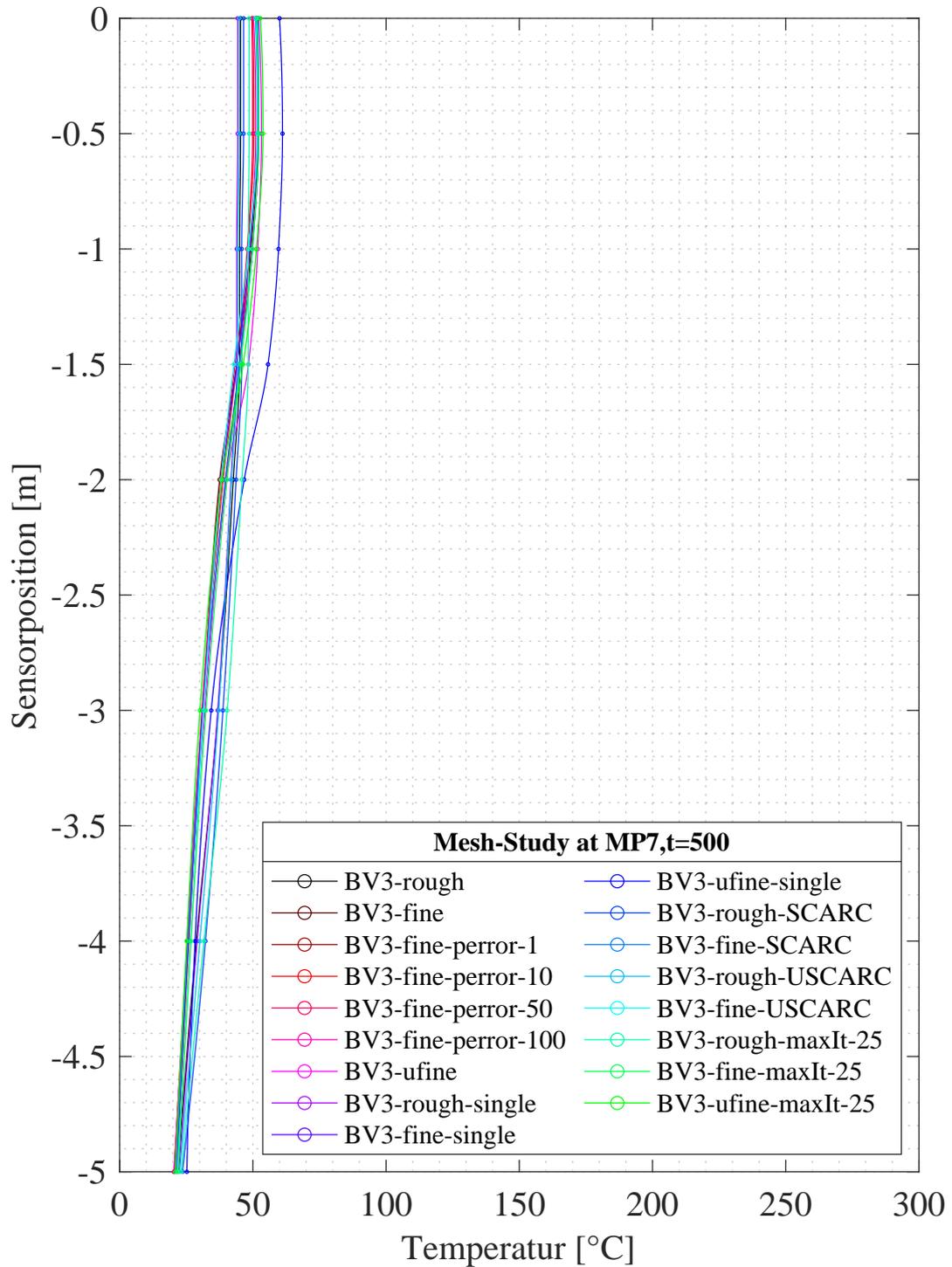


Bild 4.17: Temperatur-Schichtungsprofil der unterschiedlichen Setups am Beispiel des BV3

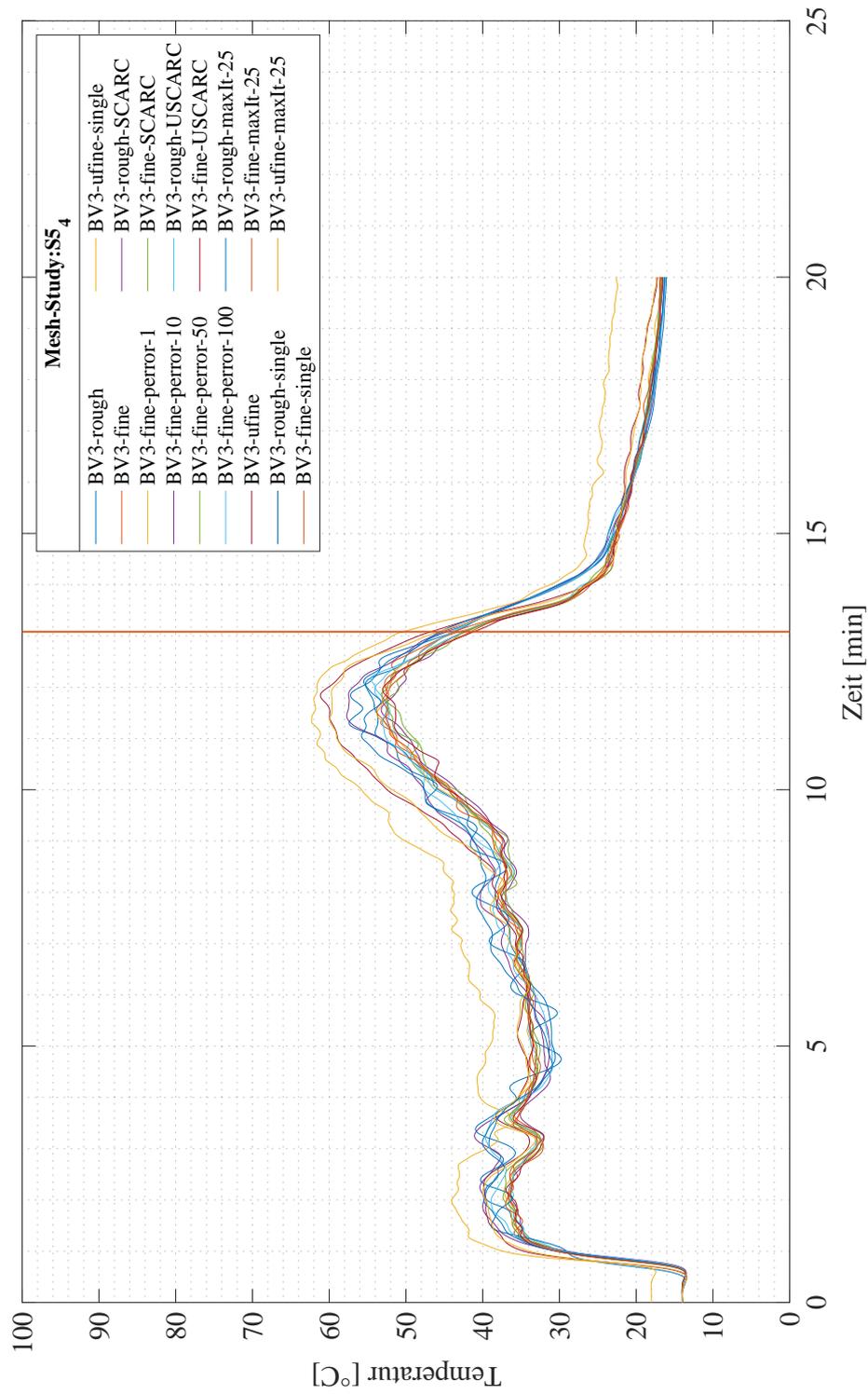


Bild 4.18: Temperatur-Zeitprofile der unterschiedlichen Setups am Beispiel des BV3

4.4.3 Weitere Brandfälle

Stellvertretend für die komplette Bandbreite an Wärmefreisetzungsraten, welche bei den Versuchen freigesetzt wurden sind in Abb. 4.19 und Abb. 4.20 die Graphen für die Temperaturentwicklung des Brandversuches 7 dargestellt. Dies war jener Versuch mit der maximalen Brandlast. Auch hier stimmen die maximalen Temperaturen und der zeitliche Verlauf sehr gut mit den Messdaten überein, allerdings reicht der Einfluss der hohen Temperaturen an der Decke, wie beim Brandversuch 3, weiter nach unten.

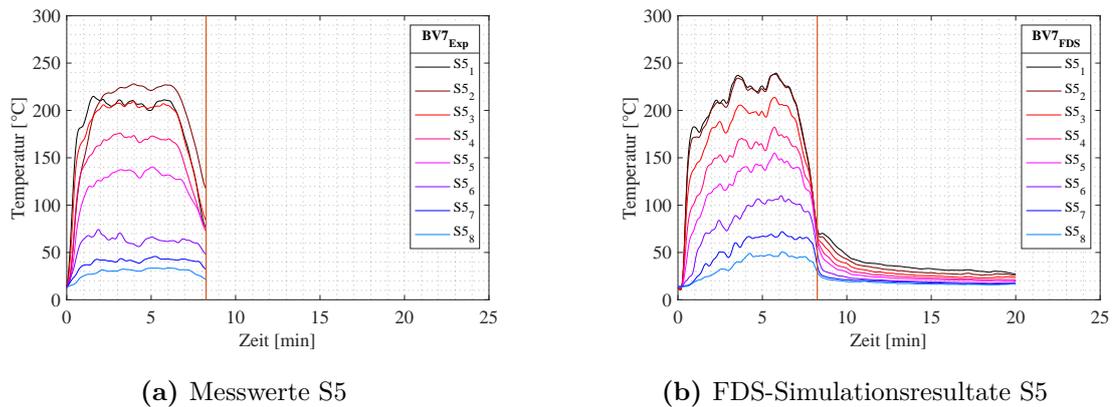


Bild 4.19: BV7: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 5

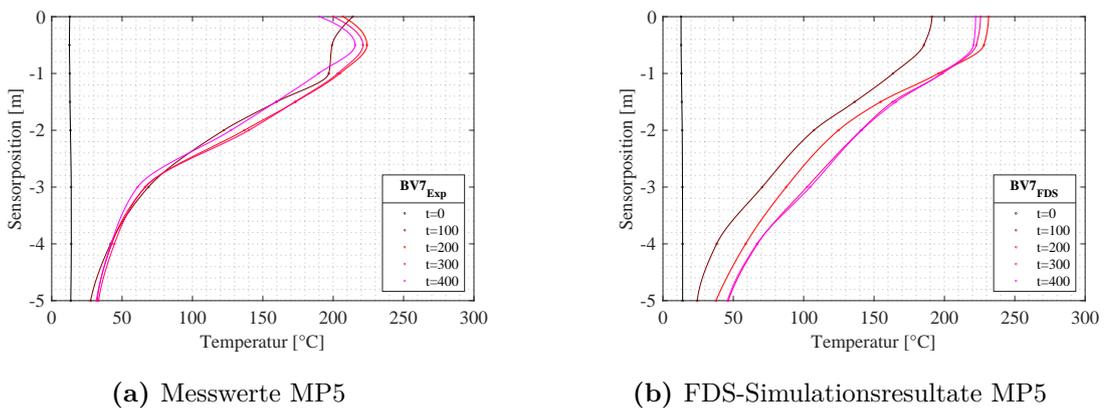


Bild 4.20: BV7: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 5

Alle weiteren Graphen der Brandversuche 4,5,8 und 12 finden sich im Anhang ab Seite C wieder.

4.4.4 Backlayering

Für die Auswertung der Rauchgas-Ausbreitung entgegen der Hauptströmungsrichtung wurden in FDS in einem Intervall von 1 m Rauchdetektoren platziert. Diese speichern zu jedem Zeitschritt den entsprechenden Anteil an Rauch in Prozent in eine CSV Datei. Die Auswertung erfolgte in Matlab¹⁵. Zu Beginn wurde überprüft, ob der eingestellte Grenzwert¹⁶ Einfluss auf die maximale Backlayering-Länge hat, wobei sich zeigte dass diese in großen Bereichen keine merkliche Auswirkung auf das Resultat hatte. Gewählt wurde schlussendlich der Standardwert von 3.5 %.

Für jeden Brandfall wurde eine entsprechende Kurve, welche den zeitlichen Verlauf der Backlayering-Länge aufzeichnet, ausgegeben. Diese sind gesammelt mit den anderen Diagrammen im Anhang (Kap. C ab S. 122) auffindbar. Zusätzlich wurden für eine vereinfachte Berechnung von kritischen Geschwindigkeiten und Rauchgasrückschlagungslängen VBA-Module in einem Excel-Arbeitsblatt angefertigt. Dies hat sich aufgrund des oft notwendigen iterativen Rechenweges bewährt.

Tabelle 4.5 zeigt eine Übersicht über alle simulierten Brandfälle mit den wichtigsten Eckdaten, welche für eine Abschätzung der Backlayering-Länge benötigt werden. Ergänzt wurde diese Tabelle mit den gängigsten empirischen Berechnungswerken. Für die Stoffwerte wurde feuchte Luft mit einer Luftfeuchtigkeit von 50 % und einer Temperatur von 14 °C gem. Kap. 2.1.3 verwendet. Aufgrund der Messunsicherheiten wäre eine exakte Berechnung nicht sehr aussagekräftig, weshalb jeweils ein Bereich in der Tabelle angeführt ist, welcher von einer prozentualen Unsicherheit der Werte für die max. Wärmefreisetzungsrates und der Anströmgeschwindigkeit von 10 % ausgeht. Im Allgemeinen unterschätzen die Literaturwerke die mittels FDS berechnete Backlayering-Länge. Der Grund hierfür dürfte in der im Brandfall vorliegenden Querschnittsverengung (Zugatrape), welche einen Rauchgasrückstau begünstigt, liegen, wobei alle Literaturstellen von einer leeren Tunnelröhre ausgehen. Erwartungsgemäß liefert Thomas[36] infolge des eher konservativ gewählten Ansatzes die beste Annäherung an die Berechnungsergebnisse. Die derzeit umfangreichste Studie von Li und Ingason[56], welche auch den Einfluss von Tunnelhöhe und -breite berücksichtigt (und auch in der NFPA502 Anwendung findet), zeigt die größte Abweichung von den Ergebnissen.

Einzig Oka und Atkinson (keine Werte in der Tabelle) und Li und Ingason berücksichtigten die Auswirkung einer in der Brandzone vorliegenden Querschnittsverengung. Hierbei wurden für eine Querschnittsverengung um 20 % eine Abnahme der kritischen Anströmgeschwindigkeit um 23 % [58] festgestellt, ebenso für 12 % zu 15 % und

¹⁵Microsoft Excel 2016 unterstützt beim Einlesen max. 256 Spalten!

¹⁶Gemeint ist der Schwellwert, ab dem in der Auswertung eine Rauchanwesenheit angenommen wird. Dieser ist äquivalent zu dem in FDS eingestellten Parameter, welcher für die Visualisierung der Rauchdetektoraktivierung in SMV (Visualisierungssoftware für die Berechnungsergebnisse aus FDS) verwendet wird (über diesem Wert zeigt sich ein roter Punkt, andernfalls erscheint ein grüner Punkt).

32 % zu 40 % bis 45 % [57]. Dies sind klare Indikatoren für eine entsprechend reduzierte Backlayering-Länge. Ein direkter Rückschluss auf die sich dadurch einstellende Rauchgasausbreitungslänge kann aber nicht getroffen werden. Insbesondere da in den von uns untersuchten Brandszenarien die Querschnittsverengung hinter dem Brand lag (verglichen zu den Quellen, wo die Querschnittsverengung direkt in der Brandzone war, vgl. Abb. 4.2).

Tabelle 4.5: Brandfallauswertung Backlayering-Länge der Simulation im Vergleich zu gängigen Formelwerken aus der Literatur

Brandfall	FDS				Literaturangaben für die Backlayering-Länge L_b			Abweichung zu FDS			
	maximale Brandleistung [MW]	Anströmgeschwindigkeit [m/s]	zum Zeitpunkt [min]	max. Backlayering-Länge [m]	zum Zeitpunkt [min]	Thomas [36] [m]	Li und Ingason [56] [m]	NFPA [59] [m]	Thomas [36] [%]	Li und Ingason [56] [%]	NFPA [59] [%]
3	4	1.1	11	130	14	85-120	78-97	67-84	-20	-33	-42
4	7.7	1.35	7	140	10	82-120	80-99	71-88	-29	-36	-43
5	11.5	2.25	6.5	60	7	27-39	28-46	22-40	-45	-38	-48
6	14.3	2.2	3.5	100	3.5	34-49	41-60	35-53	-59	-50	-56
7	19.5	1.5	2.5	150	3	120-170	110-130	100-120	-5	-21	-27
8	6.7	1.5	2	140	3	54-78	59-78	51-68	-53	-51	-58
13	21	1.75	2.5	135	5	84-120	91-110	83-100	-26	-26	-32

4.4.5 Wärmeübergang

Der Energieeintrag durch Strahlung und Konvektion ist von besonderem Interesse, da dieser messtechnisch beim Brand nicht erfasst werden kann. Hierfür werden in FDS empirische Sub-Modelle eingeführt, welche durch entsprechende Model-Konstanten angepasst werden könnten. Um die quantitative Plausibilität dieser Modellwerte für die Tunnelröhre überprüfen zu können, wurde ein Vergleich mit Lösungen aus dem VDI-Wärmeatlas und ANSYS Fluent durchgeführt.

Konkret wurde ein 700 m langes Rohr mit einem Durchmesser von 8 m als Vergleichsmodell verwendet. Die ersten und letzten hundert Meter wurden mit einer adiabaten Randbedingung modelliert. Die verbleibenden 500 m wurden mit einer konstanten Temperatur festgehalten. Als Eingangsparameter wurde eine konstante Luftgeschwindigkeit bei einer konstanten Temperatur gewählt. Es wurde jeweils mit trockener Luft ($\varphi = 0\%$) als Fluid gerechnet. Dieses Berechnungsmodell ermöglicht ein Separieren der thermischen und strömungsmechanischen Anlaufänge, was einen Vergleich mit dem VDI-Wärmeatlas erleichtert. Es wurde jeweils eine stationäre Lösung verglichen.

Fluent - Modelaufbau

Fluent bietet im Gegensatz zum LES-Ansatz in FDS die Möglichkeit direkt stationäre Lösungen zu berechnen¹⁷. Deshalb konnte bei ähnlichem Berechnungsaufwand das Berechnungsnetz sehr viel feiner gewählt werden. Es wurde ein Vollmodell ohne Nutzung der Symmetrie verwendet¹⁸, wobei bei der Gittererstellung eine Inflation mit 9 Schichten am Rande der Röhre für die Auflösung der Grenzschichten abbildete (siehe Abb. 4.21). Verwendet wurde ein Druck-basierter Löser, als Turbulenz-Modell wurde das realizeable $\kappa - \epsilon$ Modell gewählt. Entsprechend den Empfehlung in der Dokumentation von ANSYS[33][41] wurde für das Wand-Modell jenes nach Menter-Lechner[41, S. 132] aktiviert. Als Fluid wurde ein Modell für Luft mit inkompressiblem Ideal-Gas-Verhalten bei konstanter Wärmekapazität und konstanter Viskosität eingestellt.

Um eine rasche Konvergenz in Fluent sicherzustellen, wurde, wie in Abbildung 4.22 dargestellt, das Druck- und Geschwindigkeitsfeld in der Numerik direkt gekoppelt. Besonders wichtig ist die zusätzliche Aktivierung der Option *Pseudo Transient*, welche eine Form der impliziten Unter-Relaxation für stationäre Berechnungen ist.

¹⁷Bei Verwendung der RANS Gleichungen

¹⁸Ein Halbmodell wäre für die Berechnung ausreichend gewesen

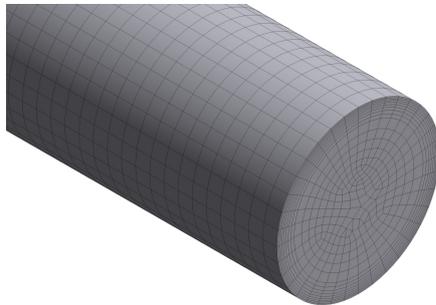


Bild 4.21: Berechnungsnetz in ANSYS Fluent

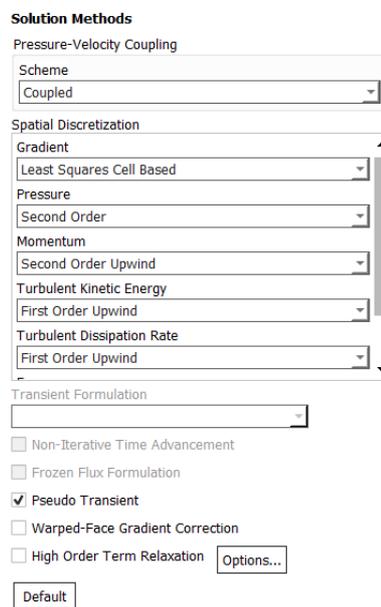


Bild 4.22: Solver Einstellungen in ANSYS Fluent

Abgleich Fluent mit Ergebnissen gem. dem VDI-Wärmeatlas

Der Vergleich wurde schrittweise durchgeführt, begonnen wurde mit einem Vergleich bei Vernachlässigung der Auftriebseffekte (d.h. die Erdbeschleunigung wurde auf null gesetzt). Hierbei kann die Lösung aus Fluent direkt mit dem Wärmeatlas verglichen werden. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 4.6 angeführt. Es zeigt sich, dass beide Ansätze gut übereinstimmen. Der Vergleich mit den Resultaten aus FDS deckt sich nicht. Dies liegt daran, dass die Sub-Modelle in FDS anhand von Messdaten bei freier Konvektion (d.h. bei Mitberücksichtigung von Auftriebseffekten) kalibriert wurden und eine Berechnung ohne der Erdbeschleunigung¹⁹ nicht mehr zulässig ist. Aus diesem Grunde sind die Resultate auch nicht in der Tabelle angeführt.

Die Werte für den konvektiven Wärmeübergang nach dem VDI-Wärmeatlas stützen sich auf mittlere Stoffwerte, welche iterativ zu ermitteln sind. Zudem sind diese von der Nusseltzahl iterativ abgeleitete Größen. Es empfiehlt sich die Verwendung eines Berechnungstools, um den mehrstufig-iterativen Prozess rasch lösen zu können. Die Tendenz der größer werdenden Abweichung bei steigenden Temperaturen in Tab. 4.6 begründet sich durch die konstant gewählten Stoffgrößen in Fluent. Deshalb wurde eine weitere Simulationsreihe mit temperaturabhängigen Größen hinzugefügt (wie bei der Berechnung gem. VDI). Die Grenzen für die in Fluent eingepflegten Wandmodelle wurden manuell überprüft (Prüfung der Gültigkeitsbereiche durch Auswerten von y^+). Es befinden sich alle berechneten Werte im Bereich Gültigkeitsbereich der VDI²⁰, und zeigen eine sehr exakte Übereinstimmung mit den Ergebnissen in Fluent. Somit ist der Wärmeübergang in Fluent stimmig.

Abgleich Fluent mit FDS

Im zweiten Schritt wird die Lösung aus Fluent mit jener aus FDS bei aktivierten Auftriebseffekten verglichen (siehe Tab. 4.7 und 4.8). Der Vergleich mit dem VDI-Wärmeatlas kann nicht mehr durchgeführt werden, da dieser bei der einsetzenden freien Konvektion nicht mehr gültig ist²¹. Wieder wurde in Fluent eine stationäre Lösung für den konvektiven Wärmübergang berechnet. Um diesen mit FDS vergleichen zu können, wurde eine Simulation über einen Zeitraum von 1000 s durchgeführt, wobei die letzten

¹⁹Für die Berücksichtigung dieser gibt es in der Literatur Abschätzungen für die Wirkung der freien Konvektion. Hierbei ist die Nusseltzahl maßgebend von der Prandtl- und der Grashofzahl abhängig. Je nach Geometrie ergeben sich unterschiedliche Zusammenhänge. Allerdings gibt es für den Spezialfall des ebenen, durchströmten Kreiszyinders (inkl. freier anteilmäßiger Konvektion) kaum Literaturquellen.

²⁰Einzig bei 3 m s^{-1} und 500°C übersteigt die Reynoldszahl den Gültigkeitsbereich minimal. Da dieser aber ohnehin nicht scharf abgrenzbar ist, kann das Ergebniss ohne weiters für den Vergleich verwendet werden.

²¹Für die Berücksichtigung der freien Konvektion gibt es ein separates Kapitel, welches allerdings auf einige wenige Spezialfälle beschränkt ist. Konkret wurde nur das Beispiel einer ebenen, senkrechten Platte mit konstanter Temperatur angeführt.

Tabelle 4.6: konvektiver Wärmeübergang: Fluent/VDI-Wärmeatlas

Randbedingungen				VDI		Fluent			
						konst ¹		poly ²	
Anström- geschwindigkeit	Einlass- temperatur	Umgebungs- temperatur	Erd- beschleunigung	mittlere Reynoldszahl	konvektiver Wärmeübergang	konvektiver Wärmeübergang	Abweichung zur VDI	konvektiver Wärmeübergang	Abweichung zur VDI
[m/s]	[°C]	[°C]	[m/s ²]	[-]	[kW]	[kW]	[%]	[kW]	[%]
0.25	100	18	0	8.5×10^4	510	511	0	526	3
0.5	100	18	0	1.7×10^5	926	908	-2	935	1
1	100	18	0	3.4×10^5	1673	1637	-2	1687	1
1.5	100	18	0	5.1×10^5	2363	2315	-2	2389	1
2	100	18	0	6.8×10^5	3021	2962	-2	3055	1
2.5	100	18	0	8.5×10^5	3655	3589	-2	3701	1
3	100	18	0	1.0×10^6	4272	4199	-2	4330	1
0.25	300	18	0	4.1×10^4	1368	1333	-3	1397	2
0.5	300	18	0	8.2×10^4	2490	2351	-6	2509	1
1	300	18	0	1.6×10^5	4485	4218	-6	4515	1
1.5	300	18	0	2.4×10^5	6317	5956	-6	6390	1
2	300	18	0	3.3×10^5	8054	7614	-5	8179	2
2.5	300	18	0	4.1×10^5	9726	9214	-5	9907	2
3	300	18	0	4.9×10^5	11352	10770	-5	11588	2
0.25	500	18	0	2.5×10^4	1952	1841	-6	1948	0
0.5	500	18	0	4.9×10^4	3593	3269	-9	3605	0
1	500	18	0	9.9×10^4	6487	5837	-10	6476	0
1.5	500	18	0	1.5×10^5	9131	8233	-10	9163	0
2	500	18	0	2.0×10^5	11640	10516	-10	11730	1
2.5	500	18	0	2.5×10^5	14053	12172	-13	14211	1
3	500	18	0	3.0×10^5	16390	14858	-9	16623	1

¹ Stoffwerte für Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und isobarer Wärmekapazität wurden als Konstant festgelegt² Stoffwerte für Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und isobarer Wärmekapazität wurden als Polynome gem. 2.2 eingepflegt

50 s als Basis für einen Endmittelwert diente. Zu Beginn der Simulationsreihe, wurde das Temperaturfeld der Berechnungsdomäne mit 18 °C initialisiert, wobei das Einpendeln des Endmittelwertes relativ lange dauerte, weshalb dann die Initialisierungstemperatur mit der Eingangstemperatur gleichgesetzt wurde. Abb. 4.23 zeigt einen charakteristischen Verlauf des konvektiven Wärmeübergangs in FDS. Hierbei stellen die unterschiedlichen Linien jeweils den Wärmeübergang zufolge Konvektion der in 50 m unterteilten Röhre dar. Die horizontale Linie stellt den zuvor beschriebenen Mittelwert dar. Bei allen in FDS durchgeführten Simulation ist noch mit einer geringfügigen Absenkung des Wärmeübergangs zu rechnen, da der Endwert sich erst mit einer theoretisch unendlich langen Simulationsdauer erreicht wird, wobei dieser Effekt bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten stärker ausgeprägt ist im Vergleich zu Simulationen mit schnelleren Anströmgeschwindigkeiten.

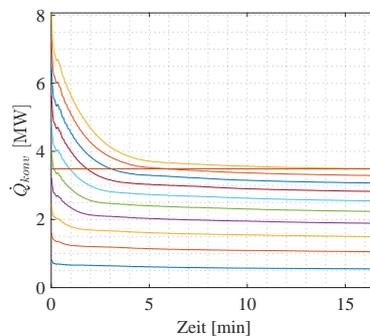


Bild 4.23: Charakteristischer Wärmeübergangsverlauf in FDS bei 1.5 ms^{-1} und 100 °C , Gitternetz *fine* und aktivierter Erdbeschleunigung

Das Strömungsbild ändert sich im Vergleich zum vorangegangenen Vergleich ohne Erdbeschleunigung drastisch und verschiebt erwartungsgemäß den Wärmeübergang an die Decke. In Fluent war nun besonders darauf zu achten, dass die Gültigkeitsgrenzen der Wandmodelle eingehalten wurden, welche manuell überprüft wurde und somit auch sichergestellt wurde. In FDS wurden zwei unterschiedliche Gittergrößen verwendet, *rough* und *fine*, wobei die feinere Auflösung eine bessere Annäherung der Lösung an jene von Fluent erbrachte. In FDS wurden zwei unterschiedliche Gittergrößen verwendet, *rough* und *fine*, wobei das feinere Netz auch bei höheren Geschwindigkeiten besser zur der Lösung passt, welche durch Fluent berechnet wurde. Generell tendiert FDS zu einer Überschätzung des konvektiven Wärmeübergangs, wobei sich dieser auf die vergrößerten Fläche aufgrund der groben Diskretisierung in einem kartesischen Gitter zurückführen lässt.

Wie in den Tabellen 4.7 und 4.8 ersichtlich ist, wurden jeweils zwei Lösungen pro Szenario in Ansys und FDS simuliert. In Fluent wurde je eine Simulation mit konstanten Stoffwerten durchgeführt. Um eine bessere Abbildung der Realität zu finden,

wurde eine zusätzliche Simulationsreihe mit den temperaturabhängigen Stoffwerten für trockene Luft durchgeführt. Die nur geringfügig Änderung bestätigt die Richtigkeit der Interpolationspolynome. In FDS wurden zwei verschiedene Wärmeübergangsmodelle getestet. Zum einen wurde das im Standard verwendete Modell verwendet. Zusätzlich wurde ein weiteres empirisches Modell für zylindrische Oberflächen verwendet, welches eine Korrelation in der in Gleichung 4.2 dargestellten Form verwendet²².

$$\text{Nu} = C_1 + C_2 \text{Re}^n \text{Pr}^m \quad ; \quad \text{Re} = \frac{\rho |\mathbf{u}| L}{\mu} \quad ; \quad \text{Pr} = 0.7 \quad (4.2)$$

Die Simulationsreihen mit extrem niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten stechen besonders hervor, da diese extreme Gradienten direkt hinter der Einlassrandbedingung aufgrund hoher vertikaler Auftriebsgeschwindigkeiten aufweisen. Diese sind nur der Vollständigkeit halber angeführt, sollten jedoch für weitere Vergleiche nicht verwendet werden. Ab ca. 1 m s^{-1} zeigt sich eine allgemeine Überschätzung des konvektiven Wärmeübergangs des im Standard aktivierten Wandmodells, wobei eine geringfügige Verbesserung bei feinerer Vernetzung erkennbar wird. Das Modell für zylindrische Oberflächen liegt hier näher an der Referenzlösung von Fluent, wobei eine zusätzliche Verfeinerung des Netzes keine merkbare Verbesserung aufweist.

Eine genauere Charakterisierung der Abweichungen konnte nicht gemacht werden. Berechnungen mittels FDS mit einem für die Simulation relevanten Anteil an konvektivem Wärmeübergang sind sehr mit Vorsicht zu genießen. Das Auslesen und Weiterverwenden von absoluten Werten für den konvektiven Wärmeübergang ist damit im Allgemeinen nicht zulässig.

²²Für die Modellparameter müssen hierbei $C_1 = 0$, $C_2 = 0.683$, $n = 0.466$, $m = 0.33$, und $L = D$ eingesetzt, wobei die in FDS verwendeten Parameter `CONVECTION_LENGTH_SCALE`, `C_FORCED_CONSTANT`, `C_FORCED_RE`, `C_FORCED_RE_EXP` und `C_FORCED_PR_EXP` heißen.

Tabelle 4.7: konvektiver Wärmeübergang: FDS/Fluent - Teil 1

v	T	g	Fluent		FDS-rough					
			konst ¹	poly ²	default		cylindrical			
[m/s]	[°C]	[m/s ²]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[kW]	[%]	[%]
0.25	100	-9.81	1392	1586	1211	-13	-24	1113	-20	-30
0.5	100	-9.81	2153	1666	1986	-8	-19	1770	-18	6
1	100	-9.81	3013	2532	3381	12	34	2916	-3	15
1.5	100	-9.81	3726	3517	4677	26	33	3763	1	7
2	100	-9.81	4431	4345	5953	34	37	4369	-1	1
2.5	100	-9.81	5059	5209	7237	43	39	4831	-5	-7
3	100	-9.81	5708	5913	8479	49	43	5176	-9	-12
0.25	300	-9.81	2393	2856	2550	7	-11	2402	0	-16
0.5	300	-9.81	3990	3855	4529	14	17	4108	3	7
1	300	-9.81	7189	6878	8284	15	20	7387	3	7
1.5	300	-9.81	9516	9474	11 688	23	23	10 448	10	10
2	300	-9.81	11 643	11 824	15 027	29	27	13 434	15	14
2.5	300	-9.81	13 179	14 007	18 045	37	29	15 941	21	14
3	300	-9.81	15 023	16 090	21 013	40	31	18 002	20	12
0.25	500	-9.81	2321	3467	3257	40	-6	3070	32	-11
0.5	500	-9.81	5106	5116	5871	15	15	5416	6	6
1	500	-9.81	8837	8789	10 957	24	25	9927	12	13
1.5	500	-9.81	11 992	12 447	15 760	31	27	14 393	20	16
2	500	-9.81	15 064	16 054	20 403	35	27	18 623	24	16
2.5	500	-9.81	17 676	19 423	24 779	40	28	22 875	29	18
3	500	-9.81	20 481	22 723	29 017	42	28	26 845	31	18

¹ Stoffwerte für Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und isobarer Wärmekapazität wurden als Konstant festgelegt

² Stoffwerte für Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und isobarer Wärmekapazität wurden als Polynome gem. 2.2 eingepflegt

Tabelle 4.8: konvektiver Wärmeübergang: FDS/Fluent - Teil 2

v	T	g	Fluent		FDS-fine					
			konst ¹	poly ²	default		cylindrical			
[m/s]	[°C]	[m/s ²]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[kW]	[%]	[%]
0.25	100	-9.81	1392	1586	1190	-14	-25	1045	-25	-34
0.5	100	-9.81	2153	1666	1956	-9	17	1642	-24	-1
1	100	-9.81	3013	2532	3320	10	31	2647	-12	5
1.5	100	-9.81	3726	3517	4594	23	31	3489	-6	-1
2	100	-9.81	4431	4345	5800	31	33	4159	-6	-4
2.5	100	-9.81	5059	5209	6991	38	34	4589	-9	-12
3	100	-9.81	5708	5913	8140	43	38	4898	-14	-17
1.5	300	-9.81	9516	9474	11 369	19	20	9380	-1	-1
1.5	500	-9.81	11 992	12 447	15 117	26	21	12 992	8	4

¹ Stoffwerte für Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und isobarer Wärmekapazität wurden als Konstant festgelegt

² Stoffwerte für Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und isobarer Wärmekapazität wurden als Polynome gem. 2.2 eingepflegt

4.5 Weitere durchgeführte numerische Untersuchungen

Wie anfangs erwähnt, wurden dem Modell konkrete Randbedingungen, welche aus den Brandversuchen bekannt waren, aufgeprägt. Dadurch wurde die Komplexität weitestgehend gesenkt, da diese sehr viele Umgebungseinflüsse wie z.B. der aktuellen Wetterlage, tatsächliche Brandentwicklung des Brennstoffes usw. beinhalten. Deshalb wurden in kleineren numerischen Studien versucht, weitere Einflüsse in der Simulation zu inkludieren, um unabhängiger von Messdaten zu werden und damit gänzlich neue Brandszenarien in der virtuellen Welt abbilden zu können.

Es wurde versucht die Massenverlustrate durch Verdampfung des Brennstoffes zu modellieren. Hierbei muss der Energieeintrag aus der Umgebung in den flüssigen Brennstoff modelliert werden. FDS beinhaltet für diesen Fall bereits ein Sub-Modell, wobei diese durch Materialwerte für die Penetrationstiefe der Wärmestrahlung in das Medium angegeben werden müssen. Die Durchführung einer Simulation einer Brandtasse bei offener Umgebung konnte stabil durchgeführt werden²³ Wurde die Umgebung geschlossen, wie es bei einem Tunnel der Fall ist, so können die Rauchgase nicht mehr so rasch weichen und es kommt zu einem vergrößerten Strahlungsanteil, welcher den Brennstoff verdampfen lässt. Diese Simulation konnte trotz relativ feinen Auflösungen nicht durchgeführt

²³Die quantitative Validierung der Resultate konnte aufgrund fehlender Messdaten nicht durchgeführt werden, es wurde lediglich auf Plausibilität geprüft. Augenmerk lag vorerst nur auf der Stabilität der CFD-Rechnung.

werden, da es zu numerischer Instabilität kam und die Rechnung abgebrochen wurde. Schlussendlich bedeutet das, dass die Brandquelle bei großskalierten Tunnelbränden nicht unabhängig von Messdaten modelliert werden kann. Die Wärmefreisetzungsrates stützt sich somit entweder auf vorhandene Messdaten oder aus Normen bekannte Verläufe. Diese Thematik ist den Entwicklern von FDS am NIST durchaus bekannt, und der aktuelle Stand der Erforschung und Entwicklung von entsprechenden Modellen, für die akkurate Abbildung der Verdampfung von Flüssigkeiten in Brandtassen, ist unter der *FDS Road Map* ersichtlich[60]. Bei regelmäßiger Verwendung von FDS sollte diese von Zeit zu Zeit eingesehen werden, um neue Möglichkeiten der Modellierung nicht zu verabsäumen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Verkehrstunnel sind Kernkomponenten unserer Infrastruktur zur Beförderung von Gütern und Personen. Hierbei stellen die Gewährleistung eines hohen Schutzniveaus als auch die Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit entsprechende Anforderungen an die Ingenieurmethoden zur Auslegung von Tunnelbelüftungen. Die Vorhersage von Temperaturentwicklungen, Sichtweiten und Schadstoffkonzentrationen im Falle eines Brandes sind hierbei zentrale Themen, welche im Zuge dieser Arbeit am Beispiel des Koralmtunnels detailliert untersucht wurden.

Basierend auf realen Brandversuchen mit durchschnittlichen Brandlasten von bis zu 15 MW wurde eine numerische Versuchsreihe zur Nachbildung dieser durchgeführt. Hierbei wurde die Software FDS genutzt. Zu Beginn der Arbeit wurde eine umfangreiche Parameter-Studie anhand eines Teilabschnittes (ca. 500 m) vollzogen, um unterschiedliche Gittergrößen und Druck-Solver als auch deren Konvergenz-Kriterien auf Genauigkeit und Berechnungszeit zu testen. Als Randbedingungen wurden sowohl die Anströmgeschwindigkeit als auch die Massenverlustrate des Brennstoffes (und somit die Wärmefreisetzungsrate) dem Modell aufgeprägt. Diese waren aus den realen Brandversuchen bekannt, und es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Nachrechnung der Maximaltemperaturen als auch der zeitlichen Entwicklung des Temperaturprofils. Einzig die Temperaturschichtung konnte nicht adäquat in der numerischen Brandsimulation abgebildet werden.

Der Einfluss der verschiedenen getesteten Setups zeigt sich hauptsächlich in der Berechnungszeit. Um diese möglichst gering halten zu können, empfiehlt sich die Verwendung des Standard-Druck-Lösers FFT, bei einer Aufspaltung der Berechnungsdomäne. Diese ist in FDS manuell durchzuführen. Weitere Details bzgl. der verwendeten Werte für die Konvergenz-Schranken sind in der Arbeit dokumentiert.

Zusätzlich wurde der konvektive Wärmeübergang detaillierter am Beispiel eines kreisförmigen Rohrzylinders untersucht. Es erfolgte ein Abgleich mit einer Referenzlösung aus ANSYS Fluent. Die Verwendung der auf empirischen Ansätzen beruhenden Wärmeübergangsmodelle in FDS erfordert manuelles Eingreifen, um diese auf die entsprechende Anwendung anpassen zu können. Im Allgemeinen soll bei Berechnungen der Einfluss von Konvektion separat abgeschätzt werden. Ist dieser maßgebend für die Simulation, so sind quantitative Aussagen bzgl. der Temperaturen von am Wärmeaustausch beteiligten Feststoffen und Gasen nicht mehr zulässig. Dennoch eignet sich die Software, um

qualitative Rückschlüsse ziehen zu können.

Ein Versuch zur Entkopplung der Simulation von den vergleichsweise scharf definierten Randbedingungen, welche aus dem realen Brandversuch bekannt sind, wurde zum Schluss der Arbeit unternommen. Dies gelang nicht. Somit ist die Vorgabe einer Wärme-freisetzungsrates (und deren Verlauf) aus Brandversuchen oder entsprechenden Normen unumgänglich.

Schlussendlich präsentiert sich FDS als eine sehr leistungsfähige Software zur Berechnung von transienten Strömungsvorgängen, mit dem Schwerpunkt zur Abbildung von Brandeinflüssen. Aufgrund umfangreicher Standard-Einstellungen gelangt der Nutzer schnell zu plausiblen Ergebnissen, wobei die Bewertung und Einschätzung der qualitativen und quantitativen Richtigkeit der Ergebnisse ganz beim Berechnungsingenieur liegt. Eine Einarbeitung in die Software und deren Modelle sollte nicht zu schnell durchgeführt werden, und belohnt den Ingenieur mit einem Tool, welches auch ohne einer performanten (leistungsfähigen und damit kostenintensiven) IT-Infrastruktur mit praktikablen Berechnungszeiten zu Resultaten führt.

Literatur

- [1] Lukas Arnold, Max Böhler und Tristan Hehnen. *Fire Simulation I+II*. Techn. Ber. Vorlesung. Bergische Universität Wuppertal, Mai 2018 (siehe S. 3).
- [2] U. Schneider und Kirchberger H. „Anwendungsschwerpunkte von Zonen- und CFD-Modellen im Brandschutz“. In: *Linzer Brandschutztag* (2019) (siehe S. 4).
- [3] Verein deutscher Ingenieure. *VDI-Wärmeatlas*. VDI-Wärmeatlas. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642199806 (siehe S. 5, 24, 38).
- [4] Helmut Eichlseder und Peter Sturm. *Thermodynamik*. Vorlesung. Technische Universität Graz, Sep. 2017 (siehe S. 7, 10, 11).
- [5] Aschenbrenner H. „Gas - Dampf - Gemische, feuchte Luft“. Apr. 2012. URL: https://www.thm.de/wi/images/user/Thielen-72/Downloads/Energietechnik/Kapitel_8_-_feuchte_Luft.pdf (siehe S. 9).
- [6] Langeheinecke Klaus, Jany P, Thieleke G, Langeheinecke Kay und Kaufmann A. *Thermodynamik für Ingenieure*. Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-658-03169-5. DOI: 10.1007/978-3-658-03169-5 (siehe S. 9).
- [7] Adrian Melling, Stefan Noppenberger, Martin Still und Holger Venzke. „Interpolation Correlations for Fluid Properties of Humid Air in the Temperature Range 100C to 200C“. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 26.4 (1997), S. 1111–1123. DOI: 10.1063/1.555998. eprint: <https://doi.org/10.1063/1.555998>. URL: <https://doi.org/10.1063/1.555998> (siehe S. 11).
- [8] Magnus Holmgren. *X Stea, Thermodynamic properties of water and steam*. Aug. 2007. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam> (siehe S. 12).
- [9] W. Wagner u. a. „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 122.1 (2000), S. 150–184. DOI: 10.1115/1.483186. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.483186> (siehe S. 12).
- [10] Helfried Steiner. *Höhere Strömungslehre und Wärmeübertragung*. Vorlesung. Technische Universität Graz, 2011 (siehe S. 14, 15, 26).
- [11] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt. *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide*. sixth. 1018. NIST Special Publication. Vol. 1: Mathematical Model; Vol. 2: Verification Guide; Vol. 3: Validation Guide; Vol. 4: Software Quality Assurance. National Institute

- of Standards, Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, und VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland. 2013 (siehe S. 15, 27, 28, 32, 35).
- [12] R.G. Rehm und H.R. Baum. „The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows“. In: *Journal of Research of the NBS* 83 (1978), S. 297–308 (siehe S. 15).
- [13] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt. *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 3: Validation*. sixth. 1018-3. NIST Special Publication. National Institute of Standards, Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, und VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland. 2013 (siehe S. 16).
- [14] Eckart Laurien und Herbert Jr. Oertel. *Nummerische Strömungsmechanik*. 6. Aufl. Springer Vieweg, Dez. 2017. ISBN: 978-3-658-21060-1 (siehe S. 16, 17, 49).
- [15] Randall J. McDermott. „A velocity divergence constraint for large-eddy simulation of low-Mach flows“. In: *Journal of Computational Physics* 274 (2014), S. 413–431. ISSN: 0021-9991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2014.06.019>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999114004264> (siehe S. 18).
- [16] John Argyris, Gunter Faust, Maria Haase und Rudolf Friedrich. *Die Erforschung des Chaos*. Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-54545-4 (siehe S. 19).
- [17] Arkady Tsinober. *An Informal Introduction to Turbulence*. Fluid Mechanics and Its Applications. Springer, Dordrecht. ISBN: 978-1-4020-0110-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/0-306-48384-X> (siehe S. 19).
- [18] Stephen B. Pope. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000 (siehe S. 20).
- [19] Schlichting Hermann und Klaus Gersten. *Grenzschicht-Theorie*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Okt. 1996. ISBN: 978-3-540-23004-5. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-32985-4> (siehe S. 20, 21).
- [20] Heinz Herwig und Andreas Moschallski. *Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen und ausführliche Anleitung zum Lösen von Aufgaben*. English. 4. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019. ISBN: 9783658264017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26401-7> (siehe S. 22–25, 39).
- [21] *DIN EN 206; Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Jän. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.31030/2584715> (siehe S. 23).
- [22] *PROMATECT-T: Matrix Engineered Minearal Board*. Promat International N.V. URL: <http://www.promat-tunnel.com>.
- [23] U. Schneider. „Strahlungsberechnung in Brandräumen: Entzündung brennbarer Objekte durch Rauchgas- und Flammenstrahlung, Teil 1“. In: *Zeitschrift für Forschung und Technik im Brandschutz*. 57. 2008, S. 129–144 (siehe S. 25).
- [24] U. Schneider. „Strahlungsberechnung in Brandräumen: Entzündung brennbarer Objekte durch Rauchgas- und Flammenstrahlung, Teil 2“. In: *Zeitschrift für Forschung und Technik im Brandschutz*. 57. 2008, S. 159–173 (siehe S. 25).
- [25] Philip J Dinunno. *The SFPE Handbook of Fire Protection*. 4th ed. Quincy, Mass: National Fire Protection Association, 2008. ISBN: 9780877658214 (siehe S. 25, 64).

-
- [26] W. Grosshandler. *RadCal: A Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment*. NIST Technical Note 1402. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 1993 (siehe S. 27).
- [27] R Viskanta und M P Menguc. „Radiation Heat Transfer in Combustion Systems“. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 13 (1987), S. 97–160 (siehe S. 27).
- [28] Arthur Jan Fijałkowski. *Bunsen burner flame types*. <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>. Last retrieved 2012-05-10. Juni 2007. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusionsflamme#/media/Datei:Bunsen_burner_flame_types.jpg (siehe S. 30).
- [29] A.M. Dmitriev, D.A. Knyazkov, T.A. Bolshova, A.G. Tereshchenko, A.A. Paletsky, A.G. Shmakov und O.P. Korobeinichev. „Structure of CH₄/O₂/Ar flames at elevated pressures studied by flame sampling molecular beam mass spectrometry and numerical simulation“. In: *Combustion and Flame* 162.10 (2015), S. 3946–3959. ISSN: 0010-2180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.07.032>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218015002333> (siehe S. 31).
- [30] *Aspen HYSYS*. <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspens-hysys> (siehe S. 32).
- [31] B.F. Magnussen und B.H. Hjertager. „On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion“. In: *Proceedings of the Sixteenth Symposium (International) on Combustion*. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania. 1977, S. 719–729 (siehe S. 35).
- [32] T. Poinso und D. Veynante. *Theoretical and Numerical Combustion*. 2nd. Philadelphia, Pennsylvania: R.T. Edwards, Inc., 2005 (siehe S. 35).
- [33] *ANSYS Fluent User Guide*. ANSYS Inc. 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317, Aug. 2018. URL: <http://www.ansys.com> (siehe S. 40, 88).
- [34] Stefan Martens. *Strömungsmechanik und Stoffaustausch*. Vorlesung. Technische Universität Graz, 2019 (siehe S. 41).
- [35] Robert Scharler. *CFD-Applications for Energy Systems*. Vorlesung. Technische Universität Graz, 2019 (siehe S. 41).
- [36] P. H. Thomas. *The Movement of Smoke in Horizontal Passages Against an Air Flow*. Forschungsber. Fire Research Note No. 723. Boreham Wood: Fire Research Station, 1968 (siehe S. 42, 85, 87).
- [37] A. N. Kolmogorov. „The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers“. In: *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences* 434.1890 (1991), S. 9–13. ISSN: 09628444. URL: <http://www.jstor.org/stable/51980> (siehe S. 45).
- [38] Volker John. *Finite Element Methods for Incompressible Flow Problems*. Springer International Publishing, 2016. ISBN: 978-3-319-45750-5. DOI: 10.1007/978-3-319-45750-5 (siehe S. 45).
- [39] Stefan Hickel. *Angewandte Strömungssimulation*. Vorlesung. Technische Universität Delft, Apr. 2014 (siehe S. 46).

- [40] S. Mittal. „On the performance of high aspect ratio elements for incompressible flows“. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 188.1 (2000), S. 269–287. ISSN: 0045-7825. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00152-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00152-8). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782599001528> (siehe S. 46).
- [41] *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS Inc. 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317, Aug. 2018. URL: <http://www.ansys.com> (siehe S. 47, 88).
- [42] Susanne Kilian. *Documentation of the alternative FDS pressure solver SCARC*. Ingenieure für Brandschutz GmbH. Nov. 2018 (siehe S. 48, 50, 51).
- [43] E.A. Fadlun, R. Verzicco, P. Orlandi und J. Mohd-Yusof. „Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations“. In: *Journal of Computational Physics* 161.1 (2000), S. 35–60. ISSN: 0021-9991. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6484>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999100964842> (siehe S. 49).
- [44] Roland A. Sweet. „Recent Developments in Numerical Methods and Software for ODEs/DAEs/PDEs“. In: *Recent Developments in Numerical Methods and Software for ODEs/DAEs/PDEs*. Hrsg. von G. D. Byrne und W. E. Schiesser. 1992. Kap. CRAYFISHPAK: A vectorized FORTRAN package to solve Helmholtz equations, S. 37–53. ISBN: 978-981-4335-86-7. DOI: 10.1142/9789814335867_0003. eprint: https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9789814335867_0003. URL: https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814335867_0003 (siehe S. 50).
- [45] Joel H. Ferziger und Milovan Peric. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. ISBN: 978-3-642-56026-2 (siehe S. 51).
- [46] Arbeitsgruppe Tunnelbau. *RVS 09.02.31*. Techn. Ber. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, Juni 2014 (siehe S. 53).
- [47] Johannes Rodler. „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln 1.1“. Okt. 2017 (siehe S. 53–56).
- [48] Peter Sturm, Johannes Rodler, Thomas Thaller, Daniel Fruhwirt und Patrick Fößleitner. „Hot smoke tests for smoke propagation investigations in long rail tunnels“. In: *Fire Safety Journal* 105 (2019), S. 196–203. ISSN: 0379-7112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711218304120> (siehe S. 54).
- [49] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt. *Fire Dynamics Simulator, User’s Guide*. sixth. 1019. NIST Special Publication. National Institute of Standards, Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, und VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland. 2013 (siehe S. 57, 64, 71, 79).

-
- [50] Klaus Schreiner. *Basiswissen Verbrennungsmotor*. 2te Auflage. Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-06187-6. DOI: 10.1007/978-3-658-06187-6 (siehe S. 64).
- [51] Michael Beyer. „Eindimensionale Berechnungsmethoden zur Auslegung von Lüftungsanlagen in Tunneln unter besonderer Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte“. Diss. Technische Universität Graz, Juli 2018 (siehe S. 66).
- [52] VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung. *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden*. Juli 2009 (siehe S. 69).
- [53] Haukur Ingason, Ying Zhen Li und Anders Lönnermark. *Tunnel Fire Dynamics*. Springer Verlag New York, 2015. ISBN: 978-1-4939-2198-0. DOI: 10.1007/978-1-4939-2199-7 (siehe S. 70).
- [54] Hendrik C. Belaschk und Matthias Münch. „Anwendung von massiv paralleler Berechnung mit Grafikkarten (GPGPU) für CFD-Methoden im Brandschutz“. In: *Bauphysik* 31.4 (2009), S. 216–226. DOI: 10.1002/bapi.200910029. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/bapi.200910029>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bapi.200910029> (siehe S. 71).
- [55] Stefan Glimberg, Kenny Erleben und Jens Bennetsen. „Smoke Simulation for Fire Engineering using a Multigrid Method on Graphics Hardware“. In: Jän. 2009, S. 11–20. DOI: 10.2312/PE/vriphys/vriphys09/011-020 (siehe S. 71).
- [56] Ying Zhen Li und Haukur Ingason. „Effect of cross section on critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fires“. In: *Fire Safety Journal* 91 (2017). Fire Safety Science: Proceedings of the 12th International Symposium, S. 303–311. ISSN: 0379-7112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.069>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711217300905> (siehe S. 85, 87).
- [57] Yasushi Oka und Graham T. Atkinson. „Control of smoke flow in tunnel fires“. In: *Fire Safety Journal* 25.4 (1995), S. 305–322. ISSN: 0379-7112. DOI: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(96\)00007-0](https://doi.org/10.1016/0379-7112(96)00007-0). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379711296000070> (siehe S. 85, 86).
- [58] Ying Zhen Li, Bo Lei und Haukur Ingason. „Study of critical velocity and back-layering length in longitudinally ventilated tunnel fires“. In: *Fire Safety Journal* 45.6 (2010), S. 361–370. ISSN: 0379-7112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.07.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711210000652> (siehe S. 85).
- [59] NFPA. *NFPA 502 - Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*. Techn. Ber. NFPA - National Fire Protection Association, 2020 (siehe S. 87).
- [60] Randy McDermott. <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Road-Map>. Feb. 2019. eprint: <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Road-Map> (siehe S. 96).

- [61] Martin Kitzlinger. *Syntax highlighting for Notepad plus plus*. 2014. URL: <https://github.com/firetools/blenderfds/wiki/Syntax-highlighting-for-Notepad-plus-plus> (siehe S. 106).

Anhang

A Hardware, Software und Tools

A.1 verwendete Hardwarekonfiguration

Tabelle A.1: Hardwarekonfiguration

Komponente	Typ	Anzahl	Leistungsdaten
CPU ^a	Intel® Xeon® E5-2640	2	2.5 GHz, 6 Kerne, 12 Threads
Arbeitsspeicher	UDDR3-ECC	8	2 GB, 1333 MHz
GPU	NVIDIA® Quadro K4000	1	3 GB GDDR5, 192 bit, 768 CUDA Kerne
Systemspeicher	Samsung SSD	1	256 GB
Datenspeicher	WDC WD20EFRX-68E	1	2 TB

^a Hyperthreading deaktiviert

A.2 verwendete Softwarekonfiguration

Tabelle A.2: verwendete Software

Software	Version	Datum	Verwendung
Windows 10 Pro	10.0.18362	Juli 2019	OS
FDS	6.7.1	31.10.2019	CFD-Software
SMV ^a	6.7.10	21.10.2019	Visualisierung
Pyrosim ^b	2019.2.1002	02.10.2019	GUI für FDS
Notepad++ ^c	7.7.1	16.01.2019	Editor
Intel Parallel Studio XE ^d 2019, Update 3		-	Fortran-Compiler
GNU make utility	3.8.1	01.04.2006	Kompilierungstool
CEAgui	-	28.08.2005	chemisches Berechnungstool

^a für die Visualisierung von den Berechnungsergebnissen

^b GUI für FDS mit integriertem Post-Processing und Visualisierung (Results)

^c inkl. Syntax-Highliter von Kitzlinger [61]

^d Cluster Edition

A.3 diverse Anleitungen und Hilfestellungen

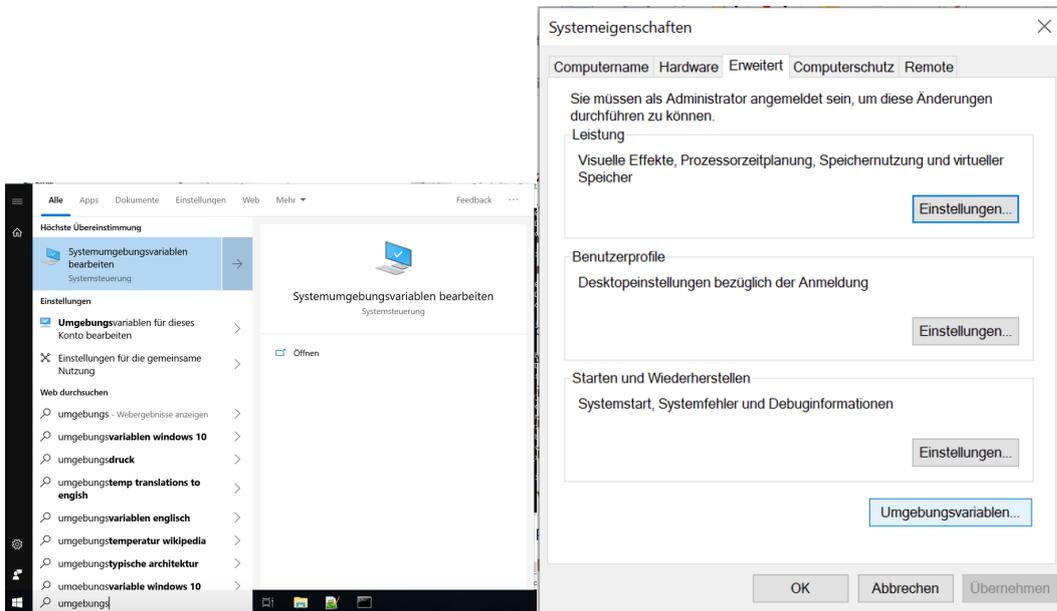
Kompilieren von FDS unter Windows 10

Der Quellcode von FDS wird über GitHub verwaltet. Dort finden sich alle Quellcodes und Manuals der Software, und auch ein Reiter *Wiki*¹ ist dort zu finden, welches Installationsanleitungen (für alle unterstützten Betriebssysteme), die Versionshinweise der verschiedenen Versionen der Software, Informationen bzgl. dem Verifikations- und Validierungstatus und auch Anleitungen zur Kompilierung enthält. Diese werden auch von den Softwareentwicklern gewartet und es empfiehlt sich online die aktuellen Informationen einzulesen. Da diese Anleitungen für Personen gedacht ist, welche bereits im Umgang mit den diversen Tools geschult sind wird hier eine Kurzanleitung für Einsteiger erstellt.

Prinzipiell kann FDS unter Linux, Windows als auch unter Mac OS kompiliert und verwendet werden. Diese Anleitung beschränkt sich auf Windows-Rechner und wurde nur unter Windows 10 getestet.

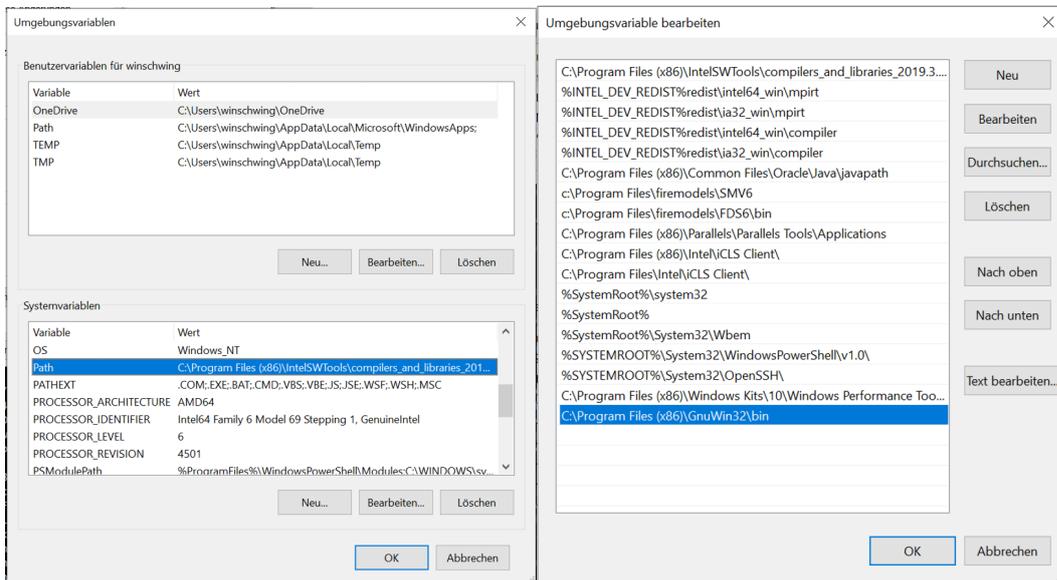
Zu Beginn muss ein GitHub Benutzerkonto erstellt werden, und das Quellverzeichnis `firemodels/fds` muss auf die lokale Festplatte kopiert werden. Weiters muss ein Fortran Compiler inkl. MPI-Bibliotheken und das *GNU make utility* müssen lokal installiert sein (in Tab. A.2 finden sich getestete Compiler und Versionen).

¹<https://github.com/firemodels/fds/wiki>



(1) Systemvariablen bearbeiten

(2) Umgebungsvariablen



(3) Path

(4) Pfad ergänzen

Bild A.1: Systemvariable ergänzen

Sind alle Installationen abgeschlossen, so muss noch eine Systemvariable (*Path*) um einen Eintrag erweitert werden, damit die Kompilierbefehle ohne seperater Pfad-Angabe lauffähig sind. Konkret muss `C:\Program Files (x86)\GnuWin32\bin\`, also das Installationsverzeichnis von GNU ergänzt werden. Abbildung A.1 leitet durch die dafür notwendigen Schritte.

Sind die Befehle *git* und *make* über das Terminal aufrufbar, so ist die Konfiguration abgeschlossen. Nun muss nur mehr die entsprechende `make_fds.bat` ausgeführt werden, welche von den Entwicklern für diverse Betriebssysteme in den Quellverzeichnissen bereitgestellt wird (Ordner `Build\impi_intel_win_64`). Dadurch wird der Quellcode kompiliert und eine ausführbare Datei wird erstellt.

A.4 diverse Bat-Files

Achtung: es wurde bei allen Files für eine übersichtlichere und kürzere Darstellung die Unterprogrammrountinen entfernt. Diese ist einmalig zu Beginn angeführt.

gemeinsam verwendete Unterprogramme

Listing 5.1: Unterprogramme

```
1  :: source: https://stackoverflow.com/questions/38369664/how-to-add-filter-to-a-file-chooser-in-batch
2
3  @echo off
4
5  set "full="
6  set "file="
7  set "mypath=%~dp0"
8
9  call:fds_fileSelection "%file%", "%mypath%", "Choose a file", file, mypath
10
11 set "full=%mypath%\%file%"
12
13 echo(
14 echo( File is: %file%
15 echo( Path is: %mypath%
16 echo(
17 echo( Full filename: %full%
18
19 pause
20
21 call:folderSelection "%mypath%", mypath, "Choose a folder"
22 echo "%mypath%"
23
24 pause
25
26 exit/B REM exits only subroutine, not the cmd-process
27
28
29 :: -----
30 :: ----- subroutines -----
31 :: -----
```

```

32 :: history:
33 :: 2019-04-26 created by Hannes Schwingenschloegl
34 ::
35 ::
36 ::
37 ::
38 :: -----
39
40
41 :: -----
42 :: typical call:fds_fileSelection "%file%", "%mypath%", "Choose a file", file, mypath
43 :: first 2 values are the presets in the created window, file and mypath are the gained
44 :: directions
45 :: -----
46 :fds_fileSelection
47 SetLocal & set "file=%~1" & set "folder=%~2" & rem if selection is canceled restore previous
48   data
49 set "dialog=powershell -sta "Add-Type -AssemblyName System.Windows.Forms^|Out-Null;$f=
50   New-Object System.Windows.Forms.OpenFileDialog;$f.filename='%~1';$f.InitialDirectory='
51   %~2';$f.title='%~3';$f.showHelp=$false;$f.Filter='FDS files (*.fds)^|*.fds^|All files
52   (*.*)^|*.*';$f.ShowDialog()^|Out-Null;$f.FileName"
53 for /f "delims=" %%I in ('%dialog%') do set "res=%%I"
54 echo "%res%" | find "\ " >NUL && call:stripPath "%res%", file, folder & rem selection,
55   otherwise cancel. Avoid this if you want full path and filename
56 EndLocal & set "%4=%file%" & set "%5=%folder%"
57 exit/B 0
58
59 :: -----
60 :: typical call:smv_fileSelection "%file%", "%mypath%", "Choose a file", file, mypath
61 :: -----
62 :smv_fileSelection
63 SetLocal & set "file=%~1" & set "folder=%~2" & rem if selection is canceled restore previous
64   data
65 set "dialog=powershell -sta "Add-Type -AssemblyName System.Windows.Forms^|Out-Null;$f=
66   New-Object System.Windows.Forms.OpenFileDialog;$f.filename='%~1';$f.InitialDirectory='
67   %~2';$f.title='%~3';$f.showHelp=$false;$f.Filter='SMV files (*.smv)^|*.smv^|All files
68   (*.*)^|*.*';$f.ShowDialog()^|Out-Null;$f.FileName"
69 for /f "delims=" %%I in ('%dialog%') do set "res=%%I"
70 echo "%res%" | find "\ " >NUL && call:stripPath "%res%", file, folder & rem selection,
71   otherwise cancel. Avoid this if you want full path and filename
72 EndLocal & set "%4=%file%" & set "%5=%folder%"
73 exit/B 0
74
75 :: ----- Split path and filename -----
76 :: typical call:stripPath "%file%", "%folder%", filepath
77 :: -----
78 :stripPath
79 SetLocal & set "file=%~nx1" & set "folder=%~dpl"
80 EndLocal & set "%2=%file%" & set "%3=%folder:~0,-1%"
81 exit/B
82
83 :: -----
84 :: typical call:folderSelection "%mypath%", mypath, "Choose a folder"
85 :: -----
86 :folderSelection
87 SetLocal & set "folder=%~1"
88 set "dialog=powershell -sta "Add-Type -AssemblyName System.Windows.Forms^|Out-Null;$f=
89   New-Object System.Windows.Forms.FolderBrowserDialog;$f.SelectedPath='%~1';$f.
90   Description='%~3';$f.ShowNewFolderButton=$true;$f.ShowDialog();$f.SelectedPath"
91 for /F "delims=" %%I in ('%dialog%') do set "res=%%I"
92 EndLocal & (if "%res%" EQU "" (set "%2=%folder%") else (set "%2=%res%"))
93 exit/B
94

```

```

82 :: -----
83 :: typical call:removeFileExtension "%file%", file
84 :: -----
85 :removeFileExtension
86 SetLocal & set "file=%~1"
87 EndLocal & set %2=%file:~0,-4%
88 exit/B
89
90 :: -----
91 :: typical call:check_directory "%dir%"
92 :: -----
93 :check_directory
94 SetLocal & set "dir=%~1"
95 IF EXIST %dir%NUL (
96     ECHO %dir% folder exists, so it's been removed and new created
97     RMDIR /S /Q %dir%
98     mkdir %dir%
99 ) ELSE (
100     ECHO %dir% not found and created
101     mkdir %dir%
102 )
103 EndLocal
104 exit/B

```

Starten von FDS via Explorer für „Dummys“

Listing 5.2: FDS-startup-via-explorerV1-0.bat

```

1  :: -----
2  :: bat.file for starting a local-FDS Simulation
3  :: -----
4  :: history:
5  :: 2019-04-11 created by Hannes Schwingenschloegl
6  :: 2019-04-26 subroutines added for shorter main-routine
7  :: filter in explorer windows added for faster file-choice
8  ::
9  :: -----
10 :: How2use:
11 :: start the batch file
12 :: use the explorer to choose your batch-job
13 :: define number of MPI and openMP processes
14 :: if you don't know how many you should use, look up the FDS_USER_GUIDE...
15 :: ... or for testing simple choose both 1 (depending on the job, the ...
16 :: ... performance of the PC will be bad, but it runs for sure!
17 :: -----
18 :: How2maintain:
19 :: look up for the original files (which are commented below) ...
20 :: ... in newer versions of FDS for any changes, simple adapted them
21 ::
22 ::
23 ::
24 ::
25 :: -----
26 @echo off
27
28 :: base directory (parent directory)
29 pushd..
30 set FDS_base_dir=%cd%
31 set CURDIR=%FDS_base_dir%
32

```

```

33 :: fdsinit.bat (adapted to no-admin edition)
34 SET I_MPI_ROOT=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\mpi
35
36 SET PATH=%I_MPI_ROOT%;%PATH%
37 :: fdspath.bat (adapted to no-admin edition, ATTENTION: added %PATH% !!!
38
39 :: set path containing fds, smokeview, intel mpi and windows entries
40 SET FDS_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\
41 SET SMV_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\SMV6
42
43 SET PATH=%SMV_PATH%;%FDS_PATH%;%I_MPI_ROOT%;%WINDIR%;%WINDIR%\system32;%PATH%
44 ::echo PATH=%PATH%
45
46 cd %CURDIR%
47
48 :: choose file and workdir via explorer
49 call:fds_fileSelection "CHID.fds", "%FDS_base_dir%", "Choose a FDS-file", file, folder
50
51 :: define number of MPI processes
52 :user_input_num MPI
53 SET /P numb_MPI=Wie viele MPI Prozesse sollen gestartet werden:
54 SET "var="&for /f "delims=0123456789" %i in ("%numb_MPI%") do set var=%i
55 if defined var (GOTO user_input_num MPI) else (echo %numb_MPI% numeric)
56
57 :: define number of openMP processes
58 :user_input_num openMP
59 SET /P numb_openMP=Wie viele openMP Prozesse sollen gestartet werden:
60 SET "var="&for /f "delims=0123456789" %i in ("%numb_openMP%") do set var=%i
61 if defined var (GOTO user_input_num openMP) else (echo %numb_openMP% numeric)
62
63 :: starting FDS_local
64
65
66 :: To run fds for jobs using this computer only:
67 :: fds_local -p xx -o yy casename.fds
68 ::
69 :: for more options type: fds_local -h
70 ::
71 :: for multiple computer-calculation lookup helpfds.bat
72
73 :: %FDS_base_dir%\bin\fds.exe %FDS_base_dir%\2-test\%filename%
74
75 cd %folder%
76 @echo on
77 fds_local -p %numb_MPI% -o %numb_openMP% %file%
78 timeout /t 10
79 pause
80 exit/B
81
82
83 :: -----
84 :: ----- subroutines -----
85 :: -----

```

Starten von SMV via Explorer für „Dummys

Listing 5.3: SMV-startup-via-explorer-V1-0.bat

```

1 :: -----
2 :: bat.file for starting smokeview

```

Anhang

```
3  :: -----
4  :: history:
5  :: 2019-04-26 created by Hannes Schwingenschloegl
6  ::
7  ::
8  ::
9  :: -----
10 :: How2use:
11 :: start the batch file
12 :: use the explorer to choose your smv-file
13 ::
14 ::
15 ::
16 ::
17 :: -----
18 :: Created files:
19 :: - none
20 ::
21 ::
22 ::
23 ::
24 ::
25 :: -----
26 :: How2maintain:
27 :: look up for the original files (which are commented below) ...
28 :: ... in newer versions of FDS for any changes, simple adapted them
29 ::
30 :: or simple adapt a functional version of FDS-startup-via-explorer.exe
31 ::
32 ::
33 :: -----
34 @echo off
35
36 :: base directory (parent directory)
37 pushd..
38 set FDS_base_dir=%cd%
39 set CURDIR=%FDS_base_dir%
40
41 :: fdsinit.bat (adapted to no-admin edition)
42 SET I_MPI_ROOT=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\mpi
43
44 SET PATH=%I_MPI_ROOT%;%PATH%
45 :: fdspath.bat (adapted to no-admin edition, ATTENTION: added %PATH% !!!
46
47 :: set path containing fds, smokeview, intel mpi and windows entries
48 SET FDS_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\
49 SET SMV_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\SMV6
50
51 SET PATH=%SMV_PATH%;%FDS_PATH%;%I_MPI_ROOT%;%WINDIR%;%WINDIR%\system32;%PATH%
52 ::echo PATH=%PATH%
53
54 cd %CURDIR%
55
56 :: choose file and workdir via explorer
57 call:smv_fileSelection "CHID.smv", "%FDS_base_dir%", "Choose a SMV-file", file, folder
58
59 cd %folder%
60 @echo on
61 smokeview %file%
62 exit/B
63
64
65 :: -----
```

```
66 :: ----- subroutines -----
67 :: -----
```

Starten von FDS via Explorer für „Dummys - serielle Abarbeitung

Listing 5.4: FDS-serial-startupV1-0.bat

```
1  :: -----
2  :: bat.file for seriall startup of FDS-Jobs
3  :: -----
4  :: history:
5  :: 2019-04-26 created by Hannes Schwingenschloegl
6  :: 2019-05-12 call of the fds jobs is now done via "CALL", because
7  ::   the call via background.exe wasn't working safe
8  ::
9  :: -----
10 :: How2use:
11 :: use the template at the end of the file to write your own joblist
12 :: place your fds-files in the folder called "joblist"
13 :: be carefull that every file uses a different chid-name inside the file
14 :: set up your specific values (MPI, openMP, casename.fds) for each joblist
15 :: save this bat.file
16 :: execute this bat.file and let the computer do the work
17 :: -----
18 :: Created files:
19 :: - for each job there will be all FDS-result-files inside dir joblist
20 :: - a logfile called serial_fds.log is created with all FDS output from...
21 :: the command prompt
22 ::
23 ::
24 ::
25 :: -----
26 @echo off
27
28 :: base directory (parent directory)
29 pushd ..
30 set FDS_base_dir=%cd%
31 set CURDIR=%FDS_base_dir%
32
33 :: fdsinit.bat (adapted to no-admin edition)
34 SET I_MPI_ROOT=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\mpi
35
36 SET PATH=%I_MPI_ROOT%;%PATH%
37
38 :: fdspath.bat (adapted to no-admin edition)
39
40 :: set path containing fds, smokeview, intel mpi and windows entries
41 SET FDS_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\
42 SET SMV_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\SMV6
43
44 SET PATH=%SMV_PATH%;%FDS_PATH%;%I_MPI_ROOT%;%WINDIR%;%WINDIR%\system32
45 ::echo.
46 ::echo PATH=%PATH%
47
48 cd %CURDIR%\joblist
49
50 set logfile=serial_fds.log
51 echo Start of batch-job at %DATE% %TIME% > %logfile%
52
53 :: -----
```

```
54 :: joblist (has to be done via the user)
55
56 :: template for one job (simple change case-number and numb_MPI/numb_openMP)
57 :: set numb_MPI=1
58 :: set numb_openMP=1
59 :: set case_name=case1.fds
60 :: call fds_local -p %numb_MPI% -o %numb_openMP% %case_name%
61 :: echo %case_name% completed at %DATE% %TIME%, moving on >> %logfile%
62
63
64 :: Attention: no blanks between variable, the equation-sign and the value!!!
65 :: -----
66
67 set numb_MPI=1
68 set numb_openMP=10
69 set case_name=case1.fds
70 call fds_local -p %numb_MPI% -o %numb_openMP% %case_name%
71 echo %case_name% completed at %DATE% %TIME%, moving on >> %logfile%
72
73 set numb_MPI=1
74 set numb_openMP=1
75 set case_name=case2.fds
76 call fds_local -p %numb_MPI% -o %numb_openMP% %case_name%
77 echo %case_name% completed at %DATE% %TIME%, moving on >> %logfile%
78
79 set numb_MPI=1
80 set numb_openMP=1
81 set case_name=case3.fds
82 call fds_local -p %numb_MPI% -o %numb_openMP% %case_name%
83 echo %case_name% completed at %DATE% %TIME%, moving on >> %logfile%
84
85 echo ----- >> %logfile%
86 echo joblist done >> %logfile%
87 PAUSE >nul
```

Starten von SmokeDiff via Explorer für „Dummys

Listing 5.5: SmokeDiff-startup-via-explorerV1-0.bat

```
1 :: -----
2 :: bat.file for smokediff startup to compare FDS-results
3 :: -----
4 :: history:
5 :: 2019-04-25 created by Hannes Schwingenschloegl
6 :: 2019-04-26 added explorer filter & additional subroutines by Hannes Sch.
7 ::
8 ::
9 :: -----
10 :: How2use:
11 :: simple start the batch file
12 :: 1st: choose your 1st .smv file for comparison
13 :: 2nd: choose your 2nd .smv file for comparison (will be subtracted
14 :: 3rd: choose any file in your destination folder
15 :: let the computer do the work
16 :: check the smokeview file
17 :: -----
18 :: Created files:
19 :: - there will be the results from the comparison in the choosen directory
20 ::
21 ::
```

```

22 ::
23 ::
24 ::
25 :: -----
26 @echo off
27
28 :: base directory (parent directory)
29 pushd..
30 set FDS_base_dir=%cd%
31 set CURDIR=%FDS_base_dir%
32
33 :: fdsinit.bat (adapted to no-admin edition)
34 SET I_MPI_ROOT=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\mpi
35
36 SET PATH=%I_MPI_ROOT%;%PATH%
37
38 :: fdspath.bat (adapted to no-admin edition, ATTENTION: added %PATH% !!!
39
40 :: set path containing fds, smokeview, intel mpi and windows entries
41 SET FDS_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\
42 SET SMV_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\SMV6
43
44 SET PATH=%SMV_PATH%;%FDS_PATH%;%I_MPI_ROOT%;%WINDIR%;%WINDIR%\system32;%PATH%
45 ::echo.
46 ::echo PATH=%PATH%
47
48 cd %CURDIR%
49
50 :: choose File 1 for comparison
51 call:smv_fileSelection "CHID.smv", "%FDS_base_dir%", "Choose your 1st file for comparison",
    file1, folder1
52 :: remove fileextension for correct smokediff call
53 call:removeFileExtension "%file1%", file1
54
55 :: choose File 2 for comparison
56 call:smv_fileSelection "CHID.smv", "%FDS_base_dir%", "Choose your 2nd file for subtraction
    ", file2, folder2
57 :: remove fileextension for correct smokediff call
58 call:removeFileExtension "%file2%", file2
59
60 :: choose Folder 3 as a directory for the comparison results
61 call:folderSelection "%FDS_base_dir%", folder3, "Choose a folder for the comparison results"
62
63 :: execute smokediff
64 smokediff -smv -s1 %folder1% -s2 %folder2% -d %folder3% %file1% %file2%
65
66 pause
67 exit/b
68
69
70 :: -----
71 :: ----- subroutines -----
72 :: -----

```

Starten von SmokeDiff via Explorer für „Dummys - serielle Abarbeitung

Listing 5.6: SmokeDiff-serial-startup-V1-0.bat

```

1 :: -----
2 :: bat.file for smokediff startup to compare multiple FDS-results

```

```

3  :: -----
4  :: history:
5  :: 2019-04-26 created by Hannes Schwingenschloegl
6  ::
7  ::
8  ::
9  :: -----
10 :: How2use: Attention: files HAVE TO be named Case1, Case2, Case3....
11 :: simple start the batch file
12 :: 1st: tell the programm how many cases you got for comparison
13 :: 2nd: let the computer do the work
14 :: 3rd: check the output-files (look fup the creation date of the folders if
15 :: they are up to date
16 :: 4rd: use the output to do your stuff
17 :: -----
18 :: Created files:
19 :: - new folders in joblist are created called diff2, diff3, ... which are
20 :: containing the comparison of case1.smv to case2.smv, case3.smv, ...
21 :: - a log file called serial_smv.log is created with all smokediff output...
22 :: in the command prompt
23 ::
24 ::
25 :: -----
26
27 @echo off
28
29 :: base directory (parent directory)
30 pushd..
31 set FDS_base_dir=%cd%
32 set CURDIR=%FDS_base_dir%
33
34 :: fdsinit.bat (adapted to no-admin edition)
35 SET I_MPI_ROOT=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\mpi
36
37 SET PATH=%I_MPI_ROOT%;%PATH%
38
39 :: fdspath.bat (adapted to no-admin edition, ATTENTION: added %PATH% !!!
40
41 :: set path containing fds, smokeview, intel mpi and windows entries
42 SET FDS_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\fds6\bin\
43 SET SMV_PATH=%FDS_base_dir%\firemodels\SMV6
44
45 SET PATH=%SMV_PATH%;%FDS_PATH%;%I_MPI_ROOT%;%WINDIR%;%WINDIR%\system32;%PATH%
46 REM echo.
47 REM PATH=%PATH%
48
49 cd %CURDIR%
50
51 :: define CaseMax until which should be smokediff executed
52 :user_input_CaseMax
53 SET /P numb=Bis zu welchem Case soll verglichen werden (Eingabe als Zahl X groesser 1 fuer
54 CaseX.smv):
55 SET "var=&for /f "delims=0123456789" %i in ("%numb%") do set var=%i
56 if defined var (GOTO user_input_CaseMax) else (echo %numb% numeric)
57
58 :: tell the user what will be done next
59 FOR /L %%A IN (2,1,%numb%) DO (
60     ECHO Es wird Case1.smv zu Case%%A.smv im Ordner joblist\diff%%A verglichen.
61 )
62 timeout /t 10
63
64 :: create logfile
65 set logfile=serial_smv.log

```

```
65 echo Start of batch-job at %DATE% %TIME% > %logfile%
66
67 :: execute the comparsion-jobs
68 FOR /L %%A IN (2,1,%numb%) DO (
69     :: check if output is there, erase if necessary, execute smokediff 2vsl and wait 10
        seconds beetween the jobs
70     call:check_directory "%FDS_base_dir%joblist\diff%%A\"
71     echo smokediff -s1 %FDS_base_dir%joblist -s2 %FDS_base_dir%joblist -d
        %FDS_base_dir%joblist\diff%%A Case1 Case%%A >> %logfile%
72     smokediff -s1 %FDS_base_dir%joblist -s2 %FDS_base_dir%joblist -d %FDS_base_dir%joblist
        \diff%%A Case1 Case%%A >> %logfile%
73     timeout /t 10
74 )
75
76 pause
77
78 exit/b
79
80
81 :: -----
82 :: ----- subroutines -----
83 :: -----
```

B FDS-Files

Ein vollständiges exemplarisches Beispiel für den Aufbau der FDS-Files, welche genutzt wurden um die Berechnungsreihen zu simulieren. Einzig die Rampen für die Eingangsgeschwindigkeit und der Massenverlustrate wurden durch drei Punkte (...) gekürzt.

```

1 BV3-fine-SCARC.fds
2 Generated by PyroSim - Version 2019.1.0515
3 19.09.201914:16:45
4
5 -----User Section (not generated by PyroSim)-----
6
7 -----
8 &PROF ID='S5-1-wall-temperature-profile-IOR-3', XYZ=-1020.0,0.0,6.37, QUANTITY='TEMPERATURE'
9   , IOR=-3 /
10 ...
11 -----PyroSim-generated Section-----
12
13 &HEAD CHID='BV3-fine-SCARC' /
14 &TIME T_BEGIN=-30.0, T_END=1200.0, RESTRICT_TIME_STEP=.FALSE./
15 &DUMP RENDER_FILE='BV3-fine-SCARC.ge1', COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_BNDF=0.25, DT_DEVC=0.25
16   , DT_HRR=0.25, DT_ISOF=0.25, DT_PART=0.25, DT_PROF=0.25, DT_RESTART=3600.0, DT_SLCF=0.2
17   5, DT_SL3D=0.25, VELOCITY_ERROR_FILE=.TRUE., STATUS_FILES=.TRUE., UVW_TIMER(1)=0,
18   DT_CPU=5/
19 &MISC TMPA=18.0, SIMULATION_MODE='LES', BAROCLINIC=.TRUE./
20 &PRES VELOCITY_TOLERANCE=0.1, PRESSURE_TOLERANCE=0.1, MAX_PRESSURE_ITERATIONS=10, SOLVER='
21   SCARC' /
22
23
24
25 &MESH ID='fine-a', IJK=300,18,20, XB=-1300.0,-1150.0,-4.5,4.5,-2.5,7.5/
26 &MESH ID='fine-b', IJK=250,18,20, XB=-1150.0,-1025.0,-4.5,4.5,-2.5,7.5/
27 &MESH ID='fine-c', IJK=200,18,20, XB=-1025.0,-925.0,-4.5,4.5,-2.5,7.5/
28 &MESH ID='fine-d', IJK=200,18,20, XB=-925.0,-825.0,-4.5,4.5,-2.5,7.5/
29
30
31
32 &REAC ID='MIX-BURN',
33   FUEL='REAC_FUEL',
34   C=5.86537,
35   H=11.157013,
36   O=0.027401,
37   AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,
38   SOOT_H_FRACTION=0.0,
39   SOOT_YIELD=0.1,
40   HEAT_OF_COMBUSTION=4.265243E4/
41
42
43 &DEVC ID='S1-1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-950.0,0.0,6.37, IOR=-3/
44 ...
45 &DEVC ID='S7.1', QUANTITY='GAS_TEMPERATURE', XYZ=-1047.0,0.0,6.37, IOR=-3/
46 &DEVC ID='S7.1-wall-temperature', QUANTITY='WALL_TEMPERATURE', XYZ=-1047.0,0.0,6.37, IOR=-3/
47 &DEVC ID='S7.1-heat-flux', QUANTITY='NET_HEAT_FLUX', XYZ=-1047.0,0.0,6.37, IOR=-3/
48 &DEVC ID='S7.1-convective-heat-flux', QUANTITY='CONVECTIVE_HEAT_FLUX', XYZ=-1047.0,0.0,6.37,
49   IOR=-3/
50 &DEVC ID='S7.1-radiative-heat-flux', QUANTITY='RADIATIVE_HEAT_FLUX', XYZ=-1047.0,0.0,6.37,
51   IOR=-3/
52 &DEVC ID='S7.1-back-wall-temperature', QUANTITY='BACK_WALL_TEMPERATURE', XYZ=-1047.0,0.0,6.3
53   7, IOR=-3/
54 ...
55 &DEVC ID='Layer-MP1->HEIGHT', QUANTITY='LAYER_HEIGHT', XB=-950.0,-950.0,0.0,0.0,0.0,6.37/
56 &DEVC ID='Layer-MP1->LTEMP', QUANTITY='LOWER_TEMPERATURE', XB=-950.0,-950.0,0.0,0.0,0.0,6.37/

```

```
46 /
47 &DEVC ID='Layer-MP1->UTEMP', QUANTITY='UPPER_TEMPERATURE', XB=-950.0,-950.0,0.0,0.0,0.0,6.37
48 /
49 ...
50 &MATL ID='concrete',
51 FYI='NBSIR_88-3752_-_ATF_NIST_Multi-Floor_Validation',
52 SPECIFIC_HEAT=1.04,
53 CONDUCTIVITY=1.8,
54 DENSITY=2280.0/
55 &MATL ID='Promatect-T',
56 FYI='Brandschutzeinhausung',
57 SPECIFIC_HEAT=1.0,
58 CONDUCTIVITY=0.212,
59 DENSITY=900.0/
60 &MATL ID='steel',
61 SPECIFIC_HEAT=0.46,
62 CONDUCTIVITY=45.8,
63 DENSITY=7850.0,
64 EMISSIVITY=1.0/
65 &SURF ID='Concrete',
66 COLOR='GRAY_40',
67 TEXTURE_MAP='psm_concrete.jpg',
68 TEXTURE_WIDTH=0.762,
69 TEXTURE_HEIGHT=0.762,
70 MATL_ID(1,1)='concrete',
71 MATL_ID(2,1)='concrete',
72 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
73 MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
74 THICKNESS(1:2)=1.0,5.0,
75 ROUGHNESS=0.0003/
76 &SURF ID='Promatect-T',
77 COLOR='GRAY_80',
78 TEXTURE_MAP='psm_carpet.jpg',
79 TEXTURE_WIDTH=0.9144,
80 TEXTURE_HEIGHT=0.9144,
81 MATL_ID(1,1)='Promatect-T',
82 MATL_ID(2,1)='Promatect-T',
83 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
84 MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
85 THICKNESS(1:2)=0.025,0.025,
86 ROUGHNESS=0.0005/
87 &SURF ID='Zug',
88 RGB=51,204,0,
89 TEXTURE_MAP='psm_metal.jpg',
90 TEXTURE_WIDTH=3.0,
91 TEXTURE_HEIGHT=2.0,
92 ROUGHNESS=0.0003/
93 &SURF ID='STEEL_SHEET',
94 COLOR='BLACK',
95 TEXTURE_MAP='psm_metal.jpg',
96 TEXTURE_WIDTH=3.0,
97 TEXTURE_HEIGHT=2.0,
98 MATL_ID(1,1)='steel',
99 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
100 THICKNESS(1)=3.0E-3/
101 &SURF ID='Burn-BV3',
102 COLOR='RED',
103 TEXTURE_MAP='psm_fire.jpg',
104 MLRPUA=0.047918,
105 RAMP_Q='Burn-BV3_RAMP_Q',
106 ADIABATIC=.TRUE./
```

Anhang

```
107 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=-100.0, F=0.0/
108 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
109 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=1.0, F=0.428898/
110 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=2.0, F=0.435279/
111 ...
112 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=774.0, F=0.172817/
113 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=775.0, F=0.160107/
114 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=776.0, F=0.147434/
115 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=777.0, F=0.0/
116 &RAMP ID='Burn-BV3_RAMP_Q', T=1376.0, F=0.0/
117 &SURF ID='AirSupply-BV3',
118     RGB=26,204,26,
119     VEL=-2.337207,
120     RAMP_V='AirSupply-BV3_RAMP_V' /
121 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=-30.0, F=0.0/
122 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=-10.0, F=0.279804/
123 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=0.0, F=0.279804/
124 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=5.0, F=0.278953/
125 ...
126 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=3875.0, F=0.571674/
127 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=3880.0, F=0.573481/
128 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=3881.0, F=0.573481/
129 &RAMP ID='AirSupply-BV3_RAMP_V', T=4480.0, F=0.573481/
130
131 &OBST ID='case1', XB=-1070.0,-1050.0,-2.5,2.5,5.0,5.0, SURF_ID='Promatect-T' /
132 &OBST ID='case2', XB=-1070.0,-1050.0,2.5,2.5,0.0,5.0, SURF_ID='Promatect-T' /
133 &OBST ID='case3', XB=-1070.0,-1050.0,-2.5,2.5,0.0,0.0, SURF_ID='Promatect-T' /
134 &OBST ID='case4', XB=-1070.0,-1050.0,-2.5,-2.5,0.0,5.0, SURF_ID='Promatect-T' /
135 &OBST ID='fluid', XB=-1068.5,-1067.5,0.5,1.5,0.92,1.52, SURF_IDS='Burn-BV3','STEEL_SHEET','
    STEEL_SHEET' /
136 &OBST ID='fluid', XB=-1068.5,-1067.5,-1.5,-0.5,0.92,1.52, SURF_IDS='Burn-BV3','STEEL_SHEET',
    'STEEL_SHEET' /
137 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-1300.0,-1150.0,0.0,1.0,-2.5,-1.5, SURF_ID='Concrete' /
138 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-1300.0,-1150.0,-2.0,0.0,-2.5,-1.0, SURF_ID='Concrete' /
139 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-1300.0,-1150.0,1.0,2.0,-2.5,-1.0, SURF_ID='Concrete' /
140 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-1300.0,-1150.0,-3.0,-2.0,-2.5,-0.5, SURF_ID='Concrete' /
141 ...
142 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-925.0,-825.0,2.0,3.0,5.5,7.5, SURF_ID='Concrete' /
143 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-925.0,-825.0,-2.0,-1.0,6.0,7.5, SURF_ID='Concrete' /
144 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-925.0,-825.0,1.0,2.0,6.0,7.5, SURF_ID='Concrete' /
145 &OBST ID='Tunnel4.stl', XB=-925.0,-825.0,-1.0,1.0,6.5,7.5, SURF_ID='Concrete' /
146 &OBST ID='Zugattrape', XB=-1010.0,-990.0,-1.5,1.5,-1.0,3.0, SURF_ID='Zug' /
147
148 &EVENT ID='Mesh_Vent:_Mesh01_[XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=-825.0,-825.0,-4.5,4.5,-2.5,7.5/
149 &EVENT ID='Mesh_Vent:_Mesh01_[XMIN]2', SURF_ID='OPEN', XB=-1300.0,-1300.0,-4.5,4.5,5.5,7.5/
150 &EVENT ID='VentBV3', SURF_ID='AirSupply-BV3', XB=-1300.0,-1300.0,-4.5,4.5,-2.5,5.5/
151
152 &BNDF QUANTITY='BACK_WALL_TEMPERATURE' /
153 &BNDF QUANTITY='VISCOUS_WALL_UNITS' /
154
155 &ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=20.0,50.0,75.0,100.0,125.0/
156 &ISOF QUANTITY='U-VELOCITY', VALUE=1.0,-1.0/
157
158 &SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=-1000.0/
159 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-1000.0/
160 &SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN', PBX=-1000.0/
161 &SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='CARBON_DIOXIDE', PBX=-1000.0/
162 &SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='CARBON_MONOXIDE', PBX=-1000.0/
163 &SLCF QUANTITY='VOLUME_FRACTION', SPEC_ID='SOOT', PBX=-1000.0/
164 ...
165
166 &DEVC ID='HTC1_MEAN', QUANTITY='HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT', SPATIAL_STATISTIC='MEAN', XB=-10
    50.0,-1010.0,-4.4,4.4,-2.4,7.4/
```

```
167 &DEVC ID='HTC1_SURFACE_INTEGRAL', QUANTITY='HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT', SPATIAL_STATISTIC='
    SURFACE_INTEGRAL', XB=-1050.0,-1010.0,-4.4,4.4,-2.4,7.4/
168 ...
169 &DEVC ID='HeatFluxConv-1_MEAN', QUANTITY='CONVECTIVE_HEAT_FLUX', SPATIAL_STATISTIC='MEAN',
    XB=-1110.0,-1070.0,-4.4,4.4,-2.4,7.4/
170 &DEVC ID='HeatFluxConv-1_SURFACE_INTEGRAL', QUANTITY='CONVECTIVE_HEAT_FLUX',
    SPATIAL_STATISTIC='SURFACE_INTEGRAL', XB=-1110.0,-1070.0,-4.4,4.4,-2.4,7.4/
171 ...
172
173 &TAIL /
```

Listing 5.7: BV3-fine-SCARC

C Brandversuche - vollständige Auswertungen

C.1 Auswertung: *BV3-fine*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

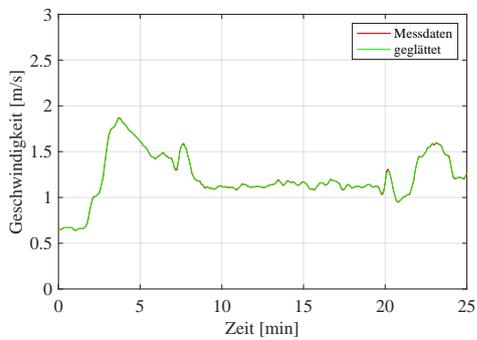


Bild A.2: Anströmgeschwindigkeit

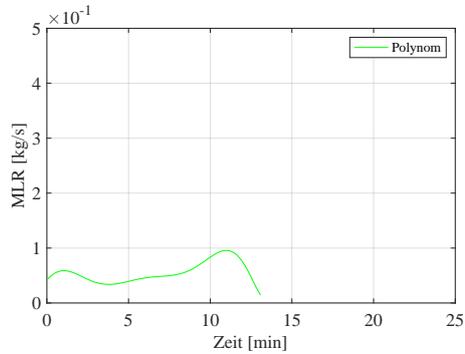


Bild A.3: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

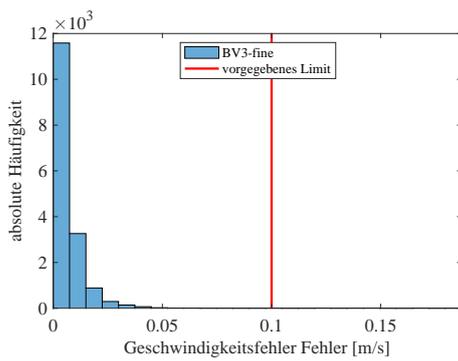


Bild A.4: Geschwindigkeitsfehler

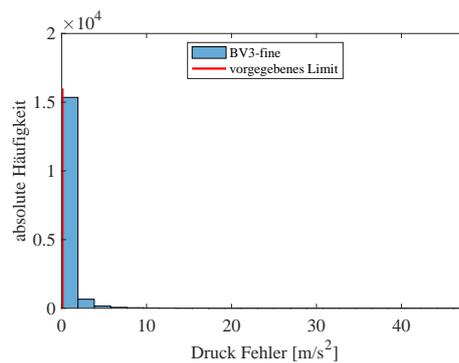


Bild A.5: Druckfehler

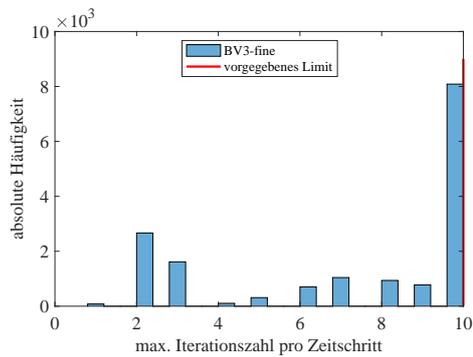
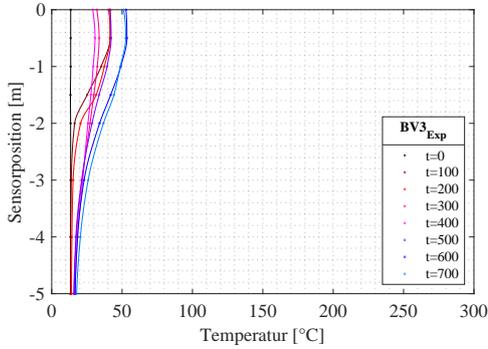
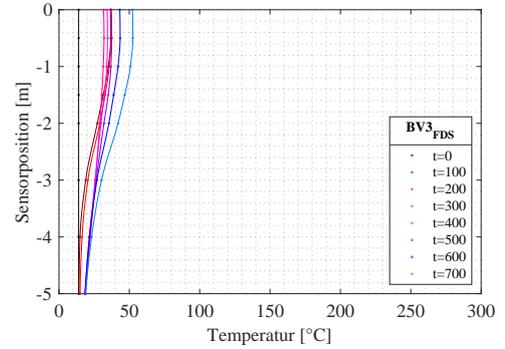


Bild A.6: Iterationen pro Zeitschritt

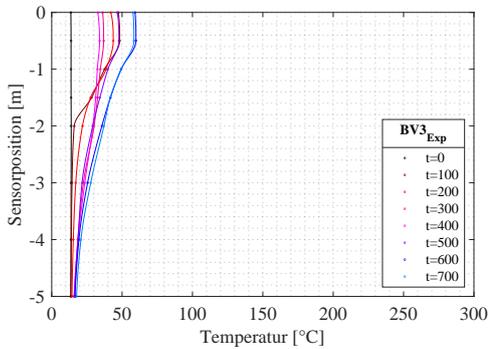
Simulationsresultate



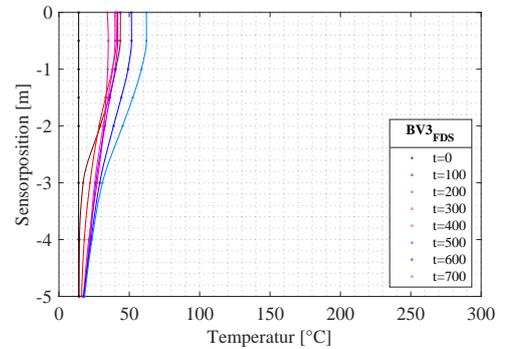
(a) Messwerte MP1



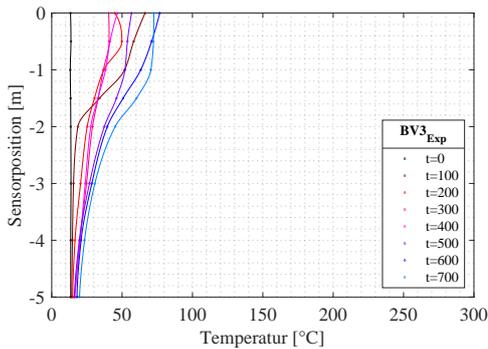
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



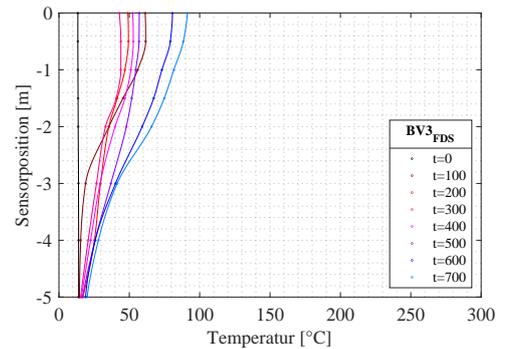
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

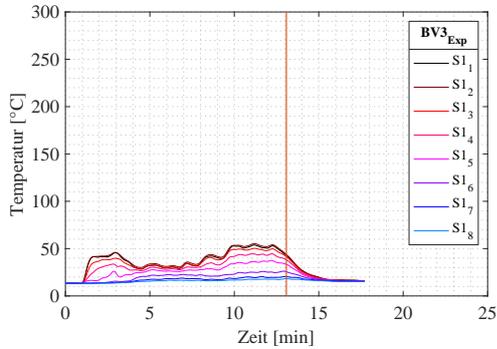


(e) Messwerte MP6

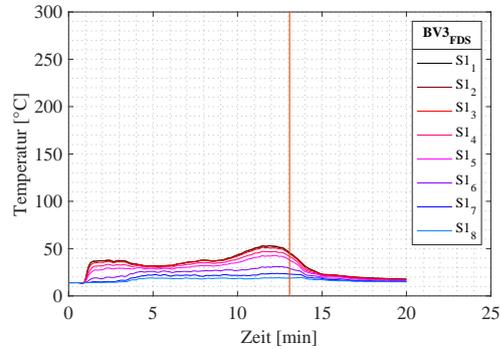


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

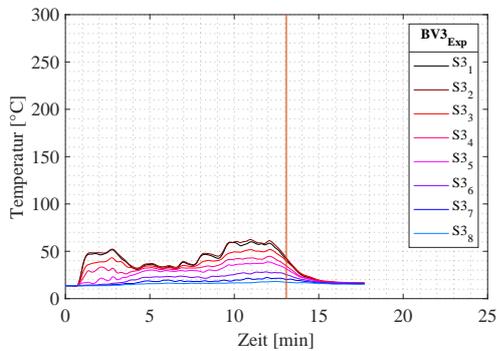
Bild A.7: Brandversuch BV3-fine: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6



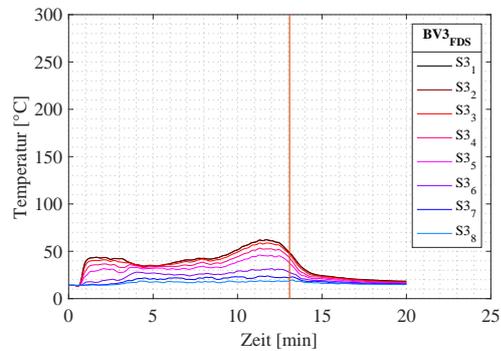
(a) Messwerte S1



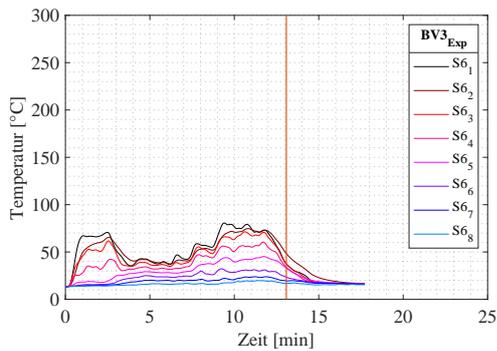
(b) FDS-Simulationsresultate S1



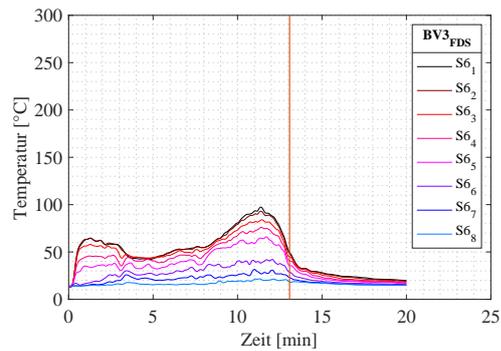
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.8: Brandversuch BV3-fine: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6

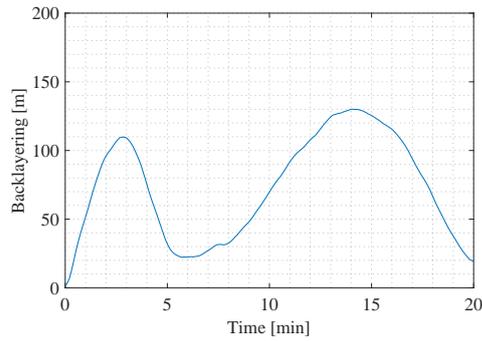


Bild A.9: BV3-fine: Backlayering

C.2 Auswertung: *BV4-fine*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

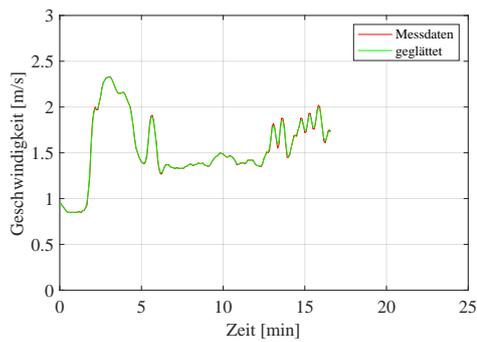


Bild A.10: Anströmgeschwindigkeit

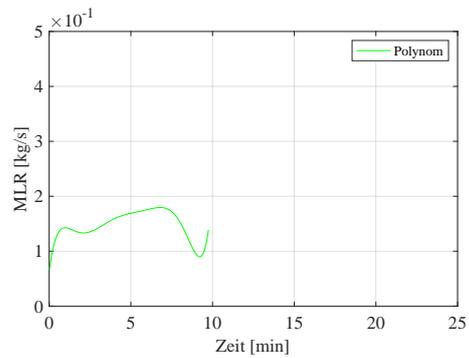


Bild A.11: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

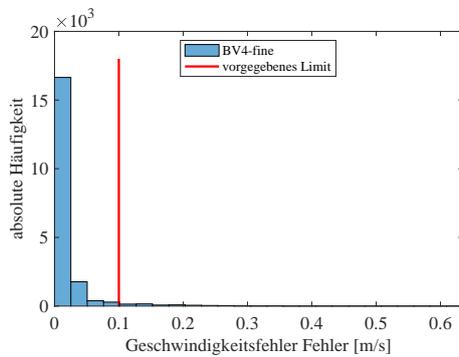


Bild A.12: Geschwindigkeitsfehler

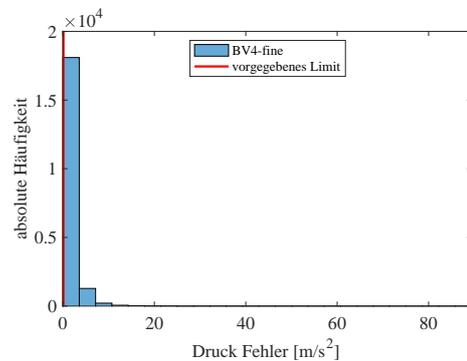


Bild A.13: Druckfehler

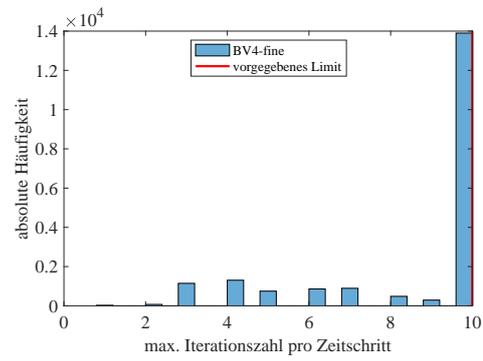
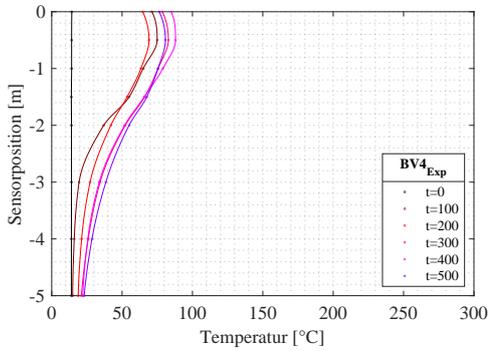
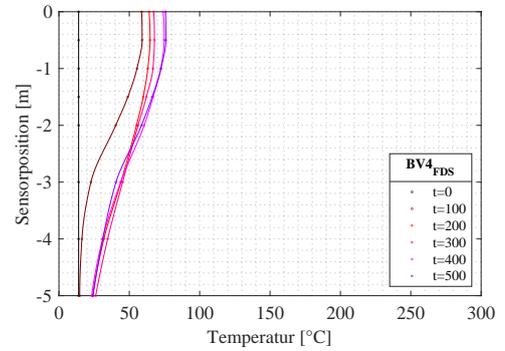


Bild A.14: Iterationen pro Zeitschritt

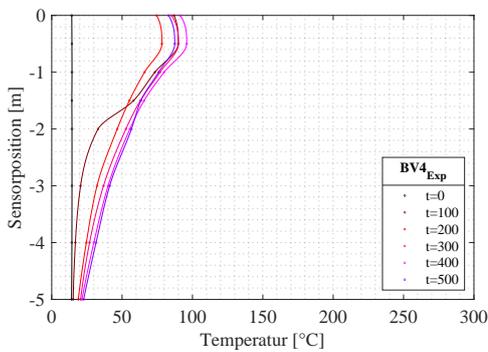
Simulationsresultate



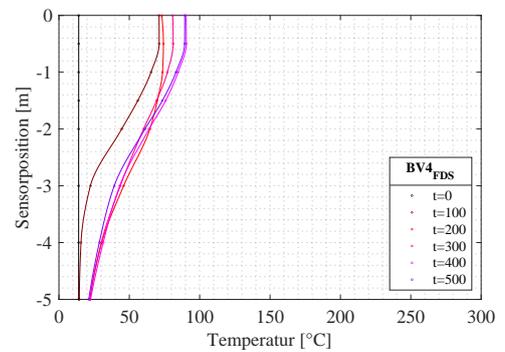
(a) Messwerte MP1



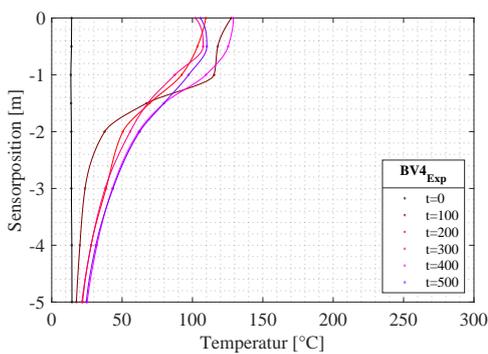
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



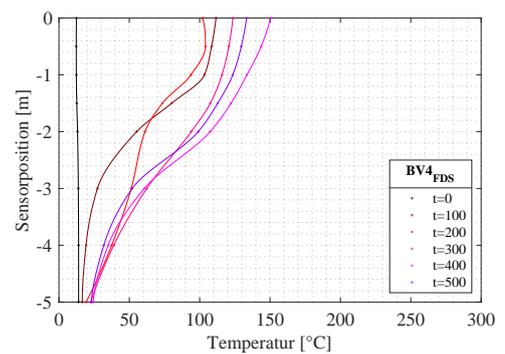
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

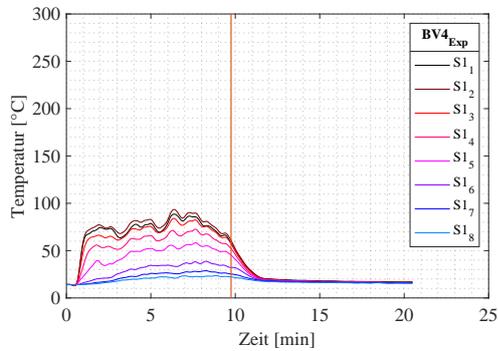


(e) Messwerte MP6

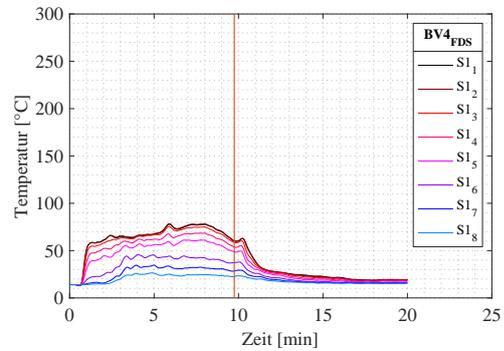


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

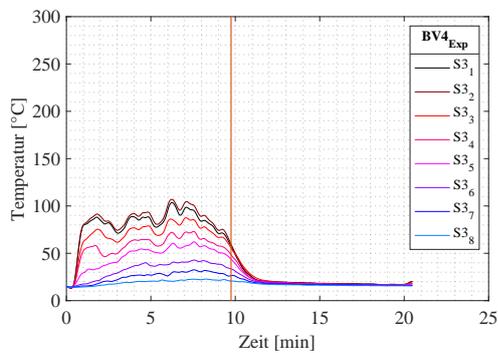
Bild A.15: Brandversuch BV4-fine: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



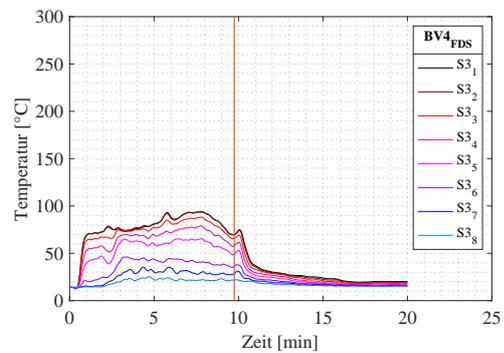
(a) Messwerte S1



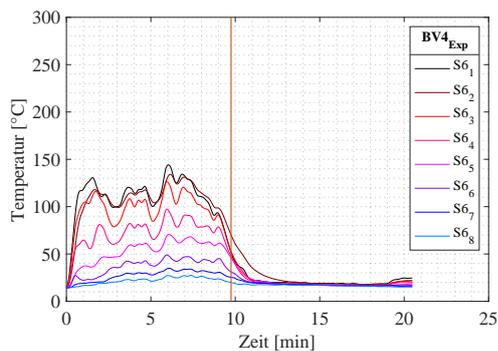
(b) FDS-Simulationsresultate S1



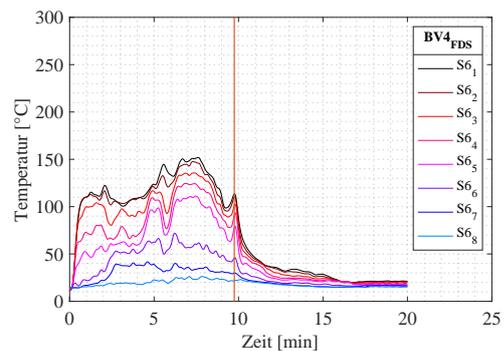
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.16: Brandversuch BV4-fine: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

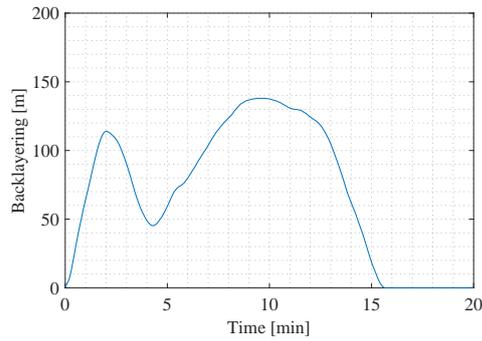


Bild A.17: BV4-fine: Backlayering

C.3 Auswertung: *BV5-fine*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

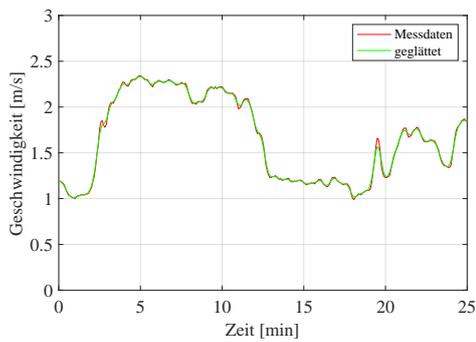


Bild A.18: Anströmgeschwindigkeit

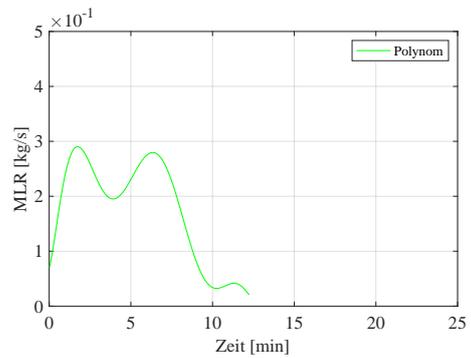


Bild A.19: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

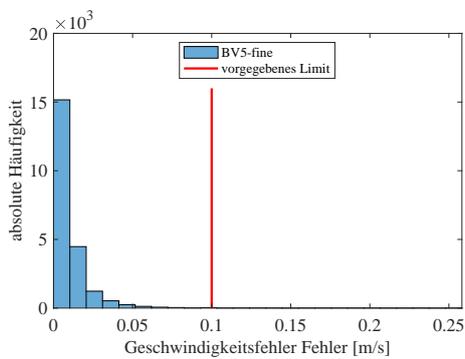


Bild A.20: Geschwindigkeitsfehler

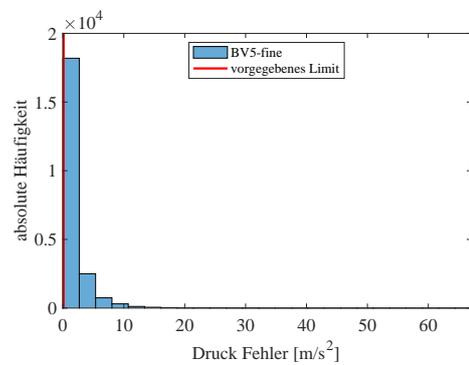


Bild A.21: Druckfehler

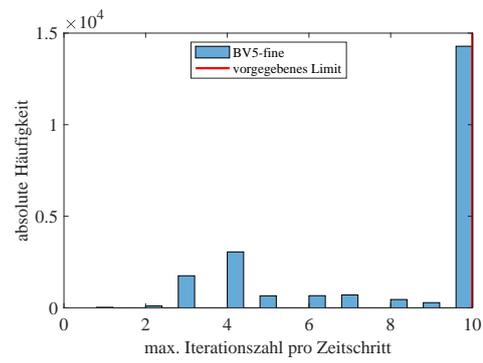
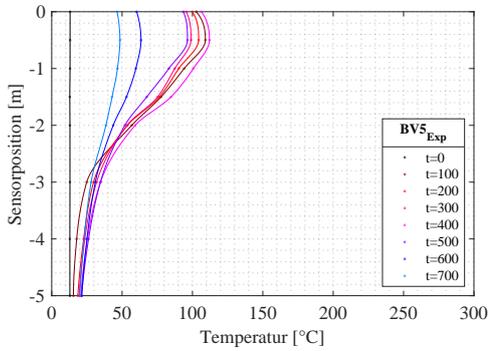
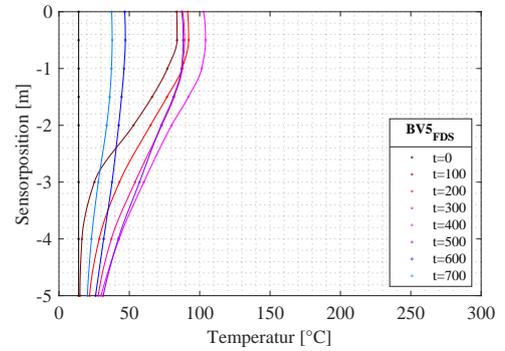


Bild A.22: Iterationen pro Zeitschritt

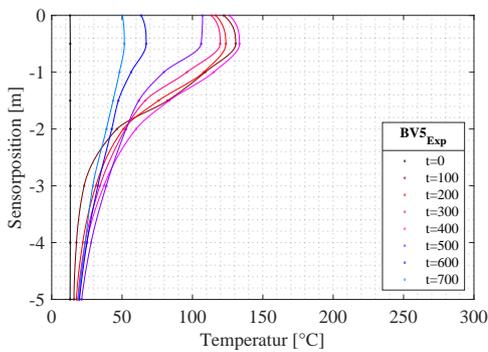
Simulationsresultate



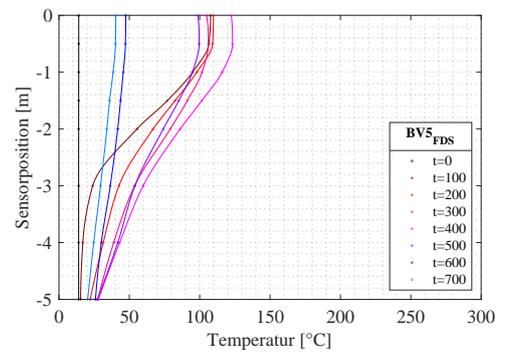
(a) Messwerte MP1



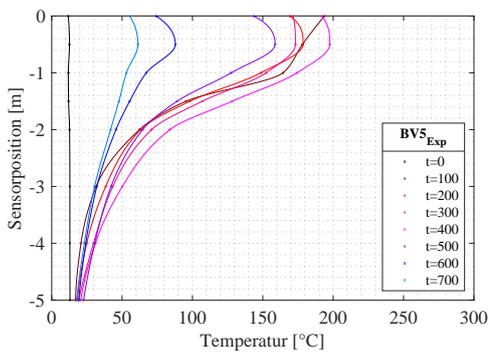
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



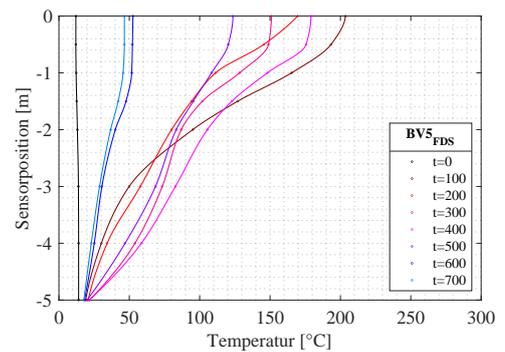
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

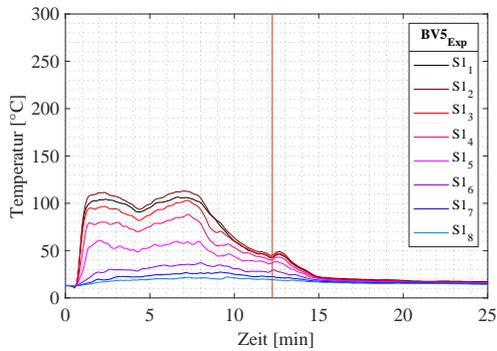


(e) Messwerte MP6

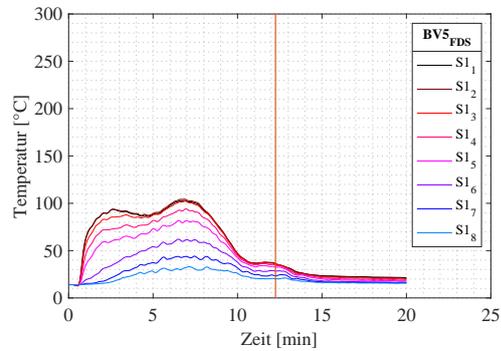


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

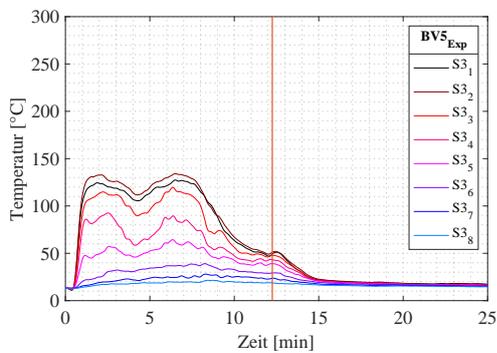
Bild A.23: Brandversuch BV5-fine: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



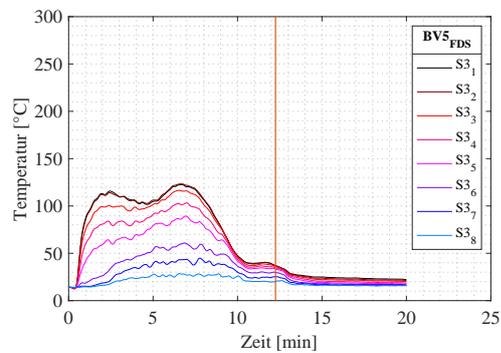
(a) Messwerte S1



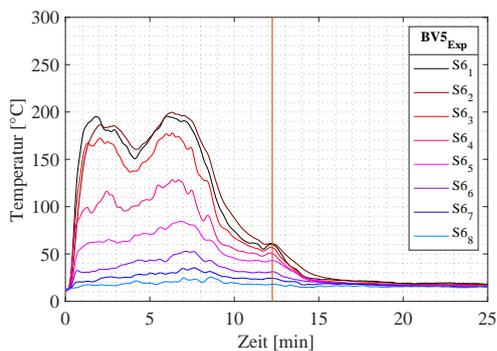
(b) FDS-Simulationsresultate S1



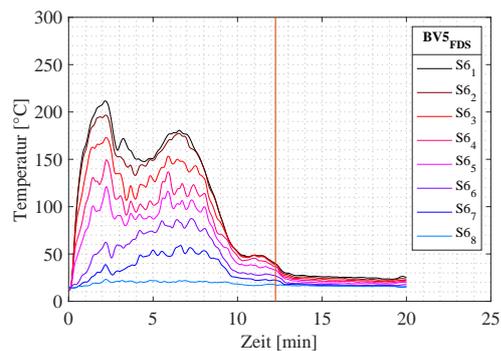
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.24: Brandversuch BV5-fine: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

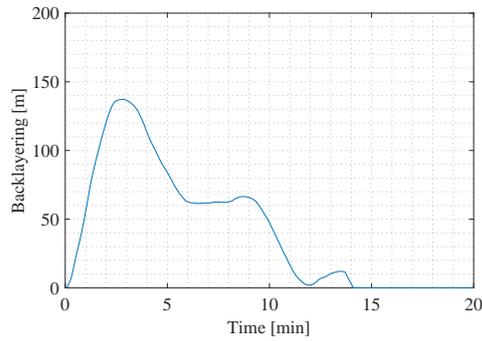


Bild A.25: BV5-fine: Backlayering

C.4 Auswertung: *BV6-fine*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

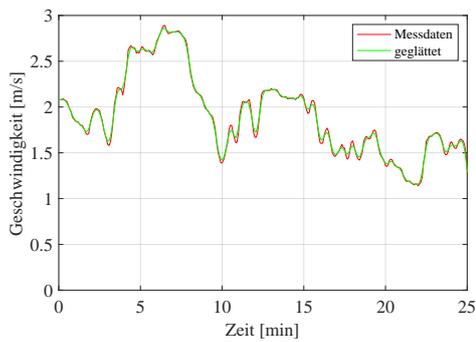


Bild A.26: Anströmgeschwindigkeit

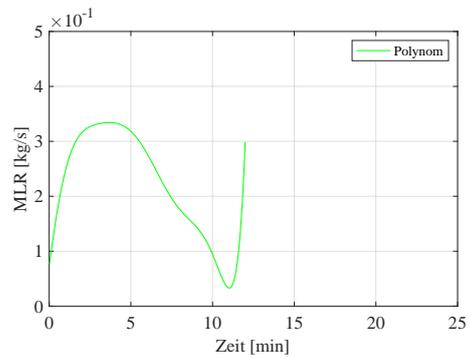


Bild A.27: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

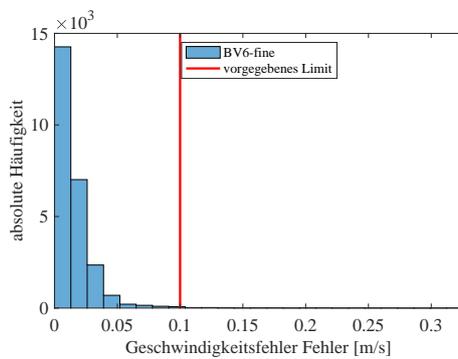


Bild A.28: Geschwindigkeitsfehler

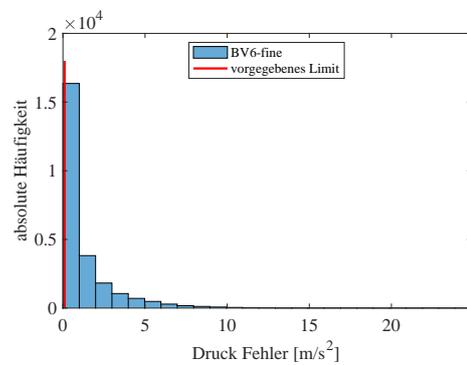


Bild A.29: Druckfehler

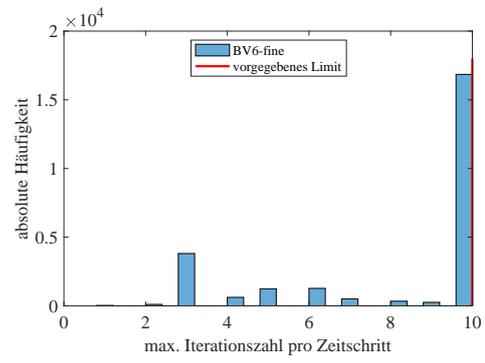
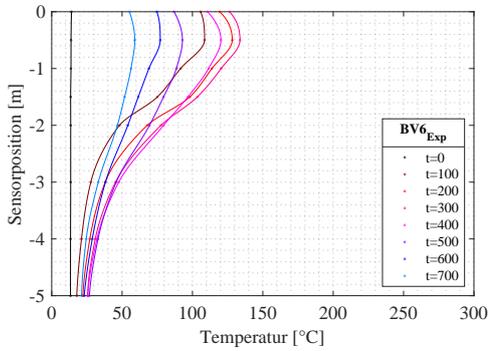
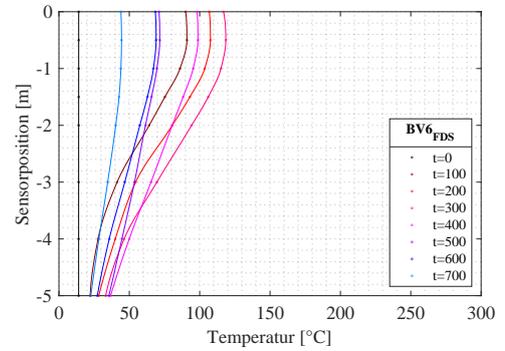


Bild A.30: Iterationen pro Zeitschritt

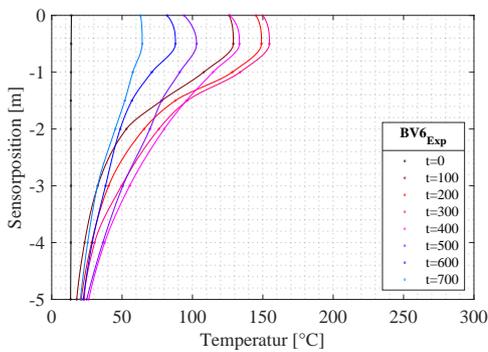
Simulationsresultate



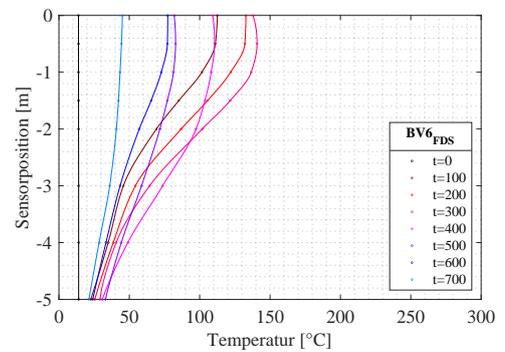
(a) Messwerte MP1



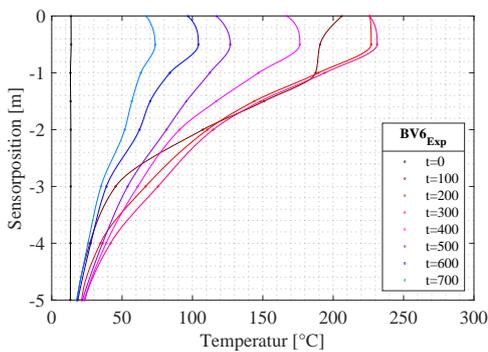
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



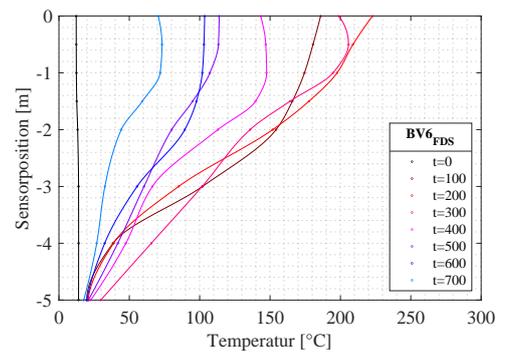
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

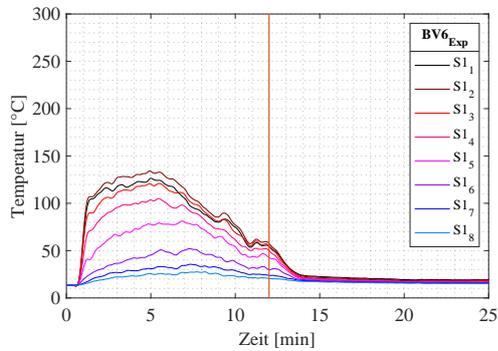


(e) Messwerte MP6

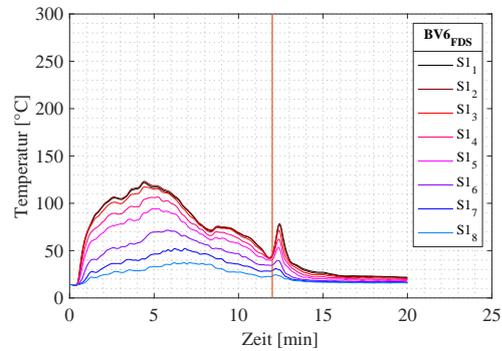


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

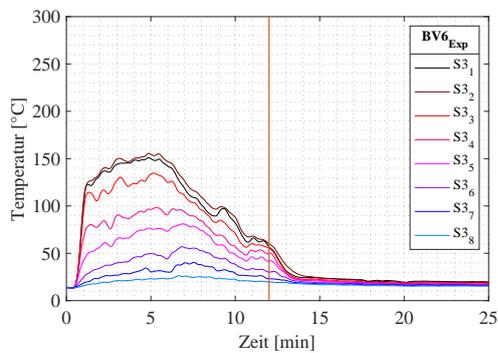
Bild A.31: Brandversuch BV6-fine: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



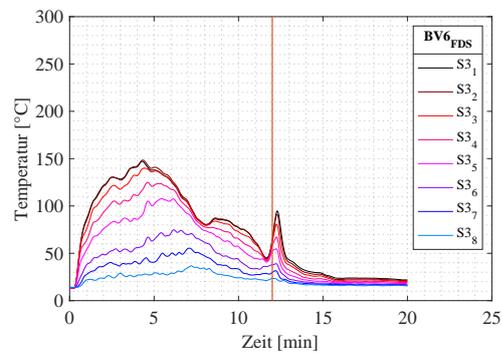
(a) Messwerte S1



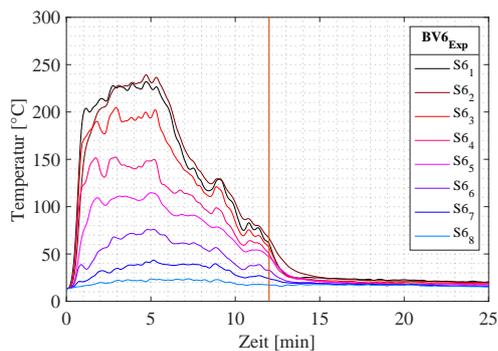
(b) FDS-Simulationsresultate S1



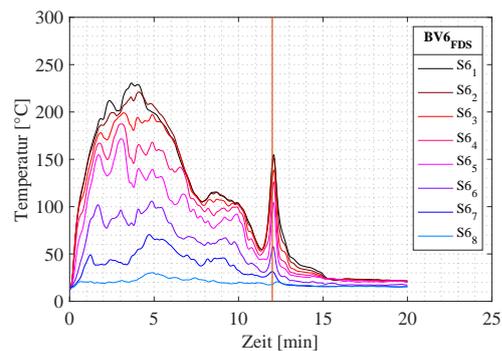
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.32: Brandversuch BV6-fine: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

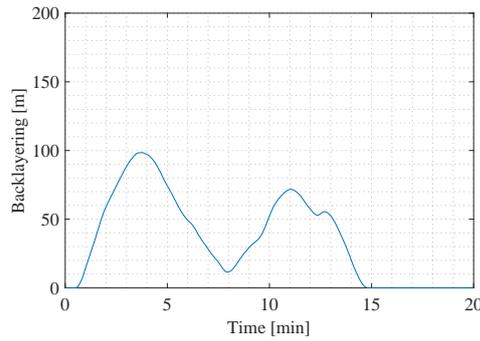


Bild A.33: BV6-fine: Backlayering

C.5 Auswertung: *BV7-fine*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

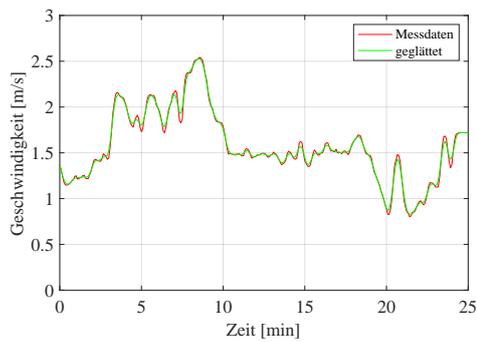


Bild A.34: Anströmgeschwindigkeit

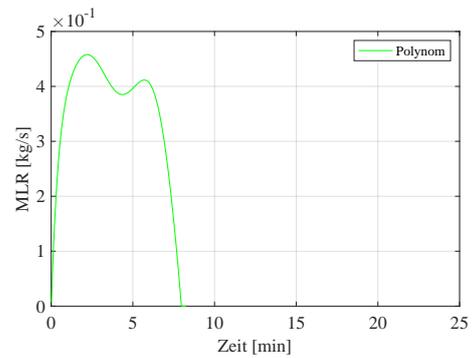


Bild A.35: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

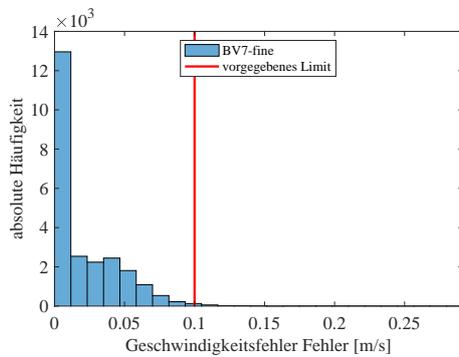


Bild A.36: Geschwindigkeitsfehler

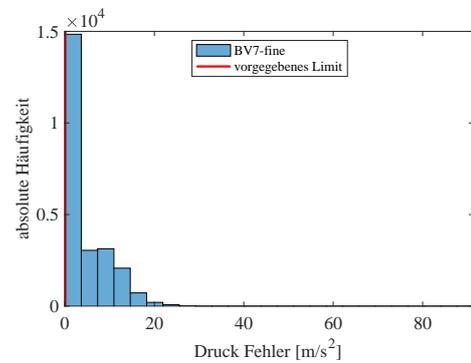


Bild A.37: Druckfehler

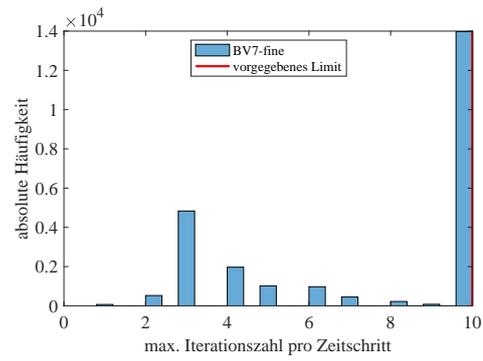
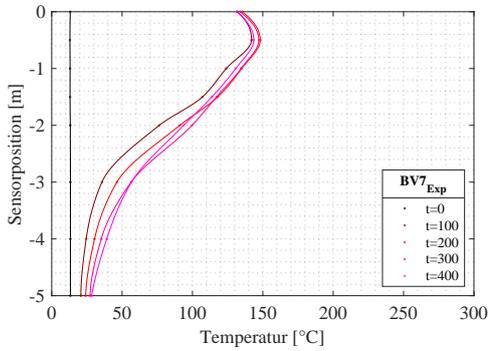
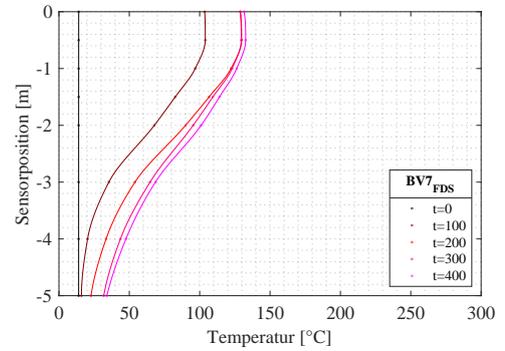


Bild A.38: Iterationen pro Zeitschritt

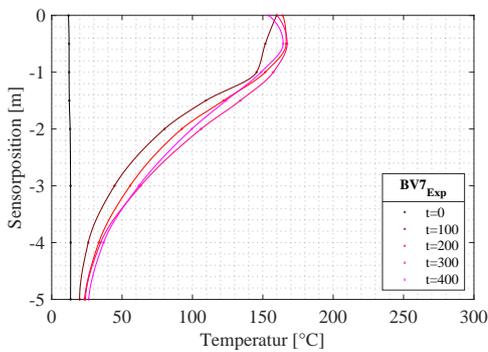
Simulationsresultate



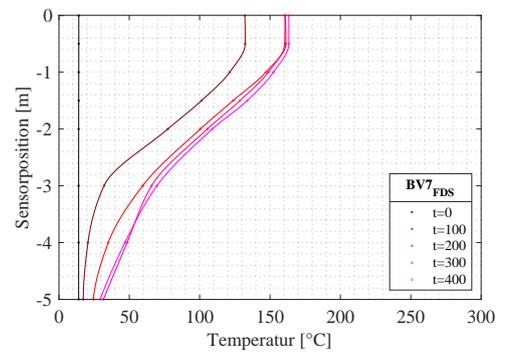
(a) Messwerte MP1



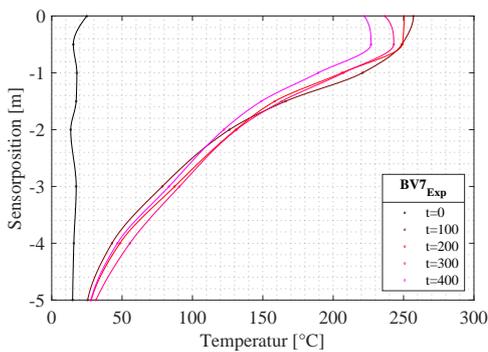
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



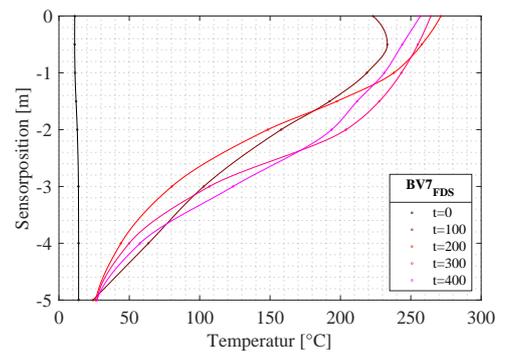
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

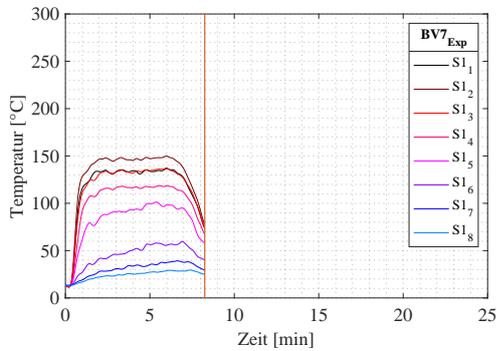


(e) Messwerte MP6

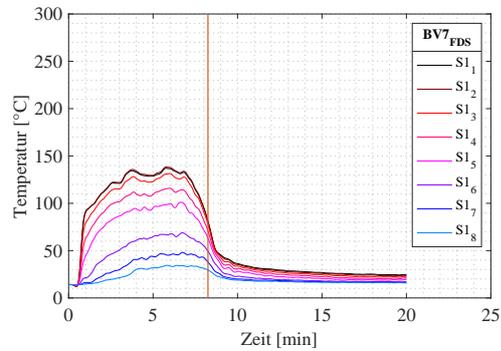


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

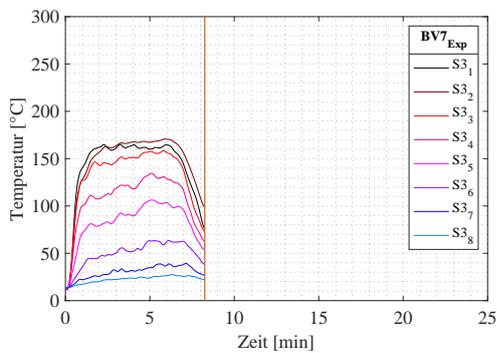
Bild A.39: Brandversuch BV7-fine: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



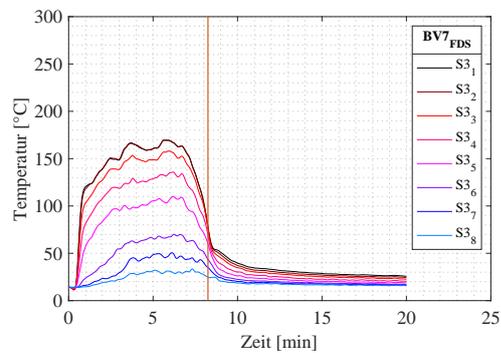
(a) Messwerte S1



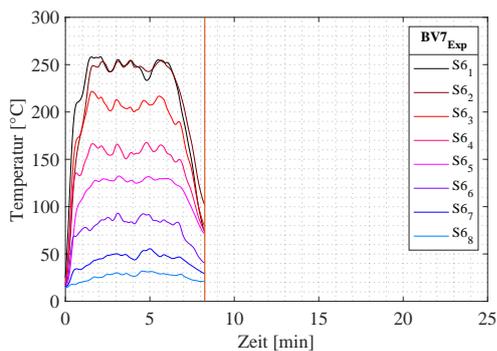
(b) FDS-Simulationsresultate S1



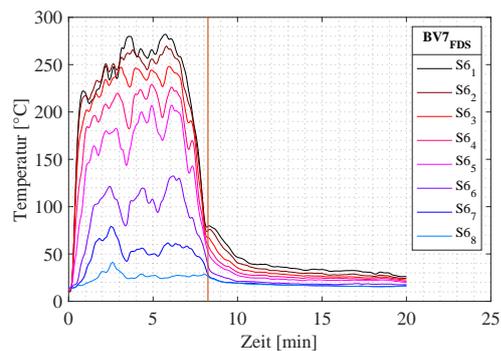
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.40: Brandversuch BV7-fine: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

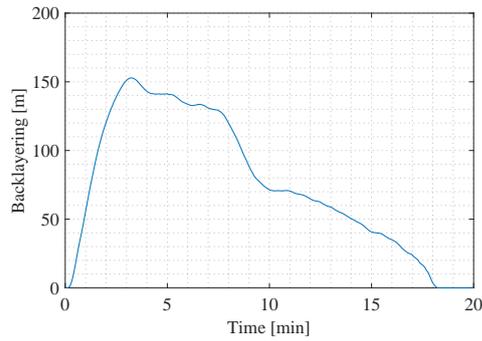


Bild A.41: BV7-fine: Backlayering

C.6 Auswertung: BV8-fine

Vorgaben an FDS durch das Experiment

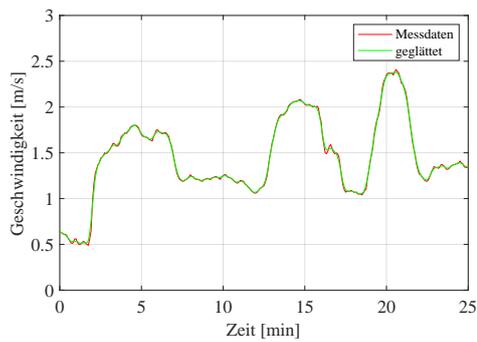


Bild A.42: Anströmgeschwindigkeit

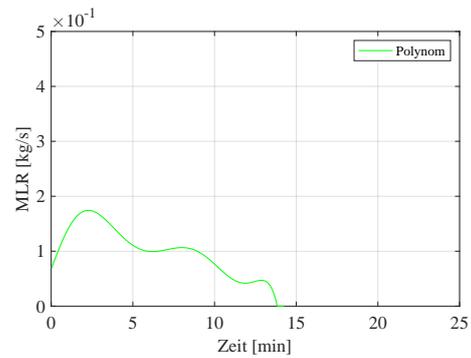


Bild A.43: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

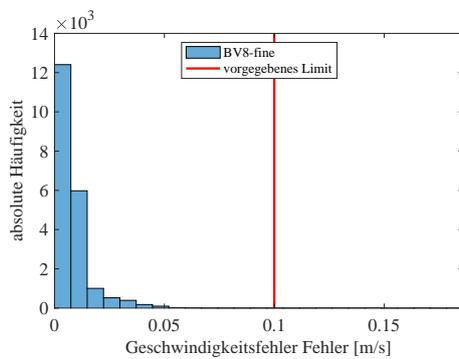


Bild A.44: Geschwindigkeitsfehler

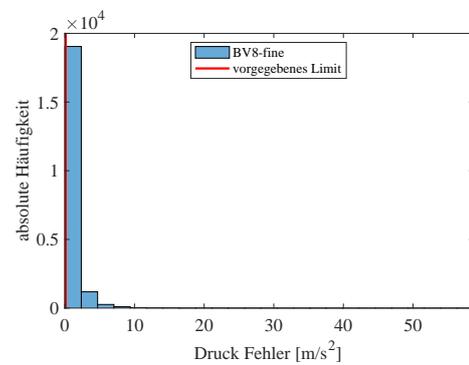


Bild A.45: Druckfehler

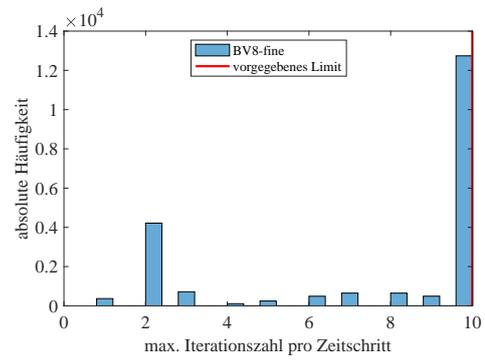
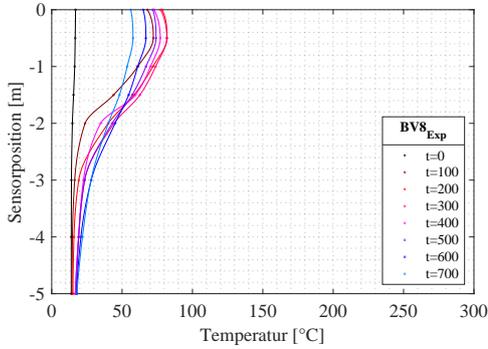
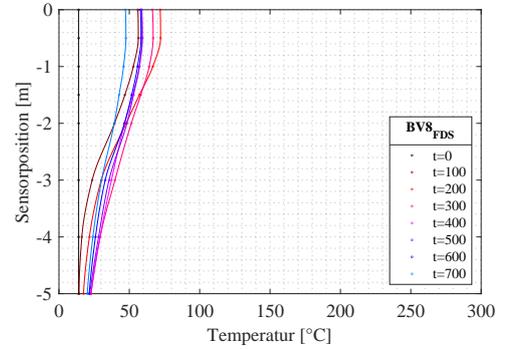


Bild A.46: Iterationen pro Zeitschritt

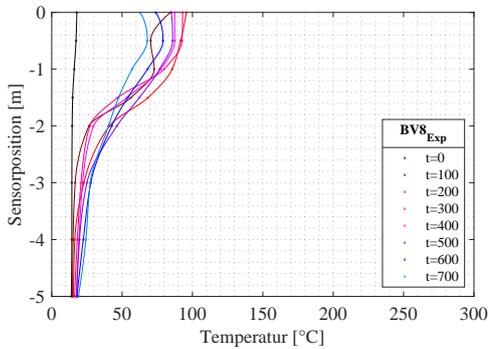
Simulationsresultate



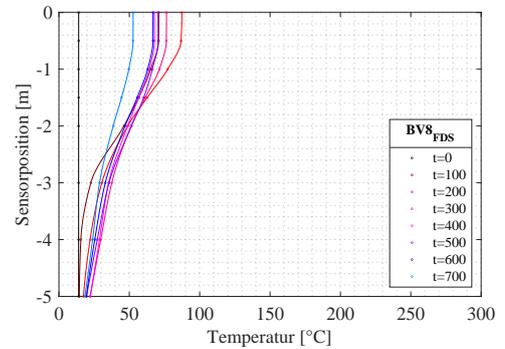
(a) Messwerte MP1



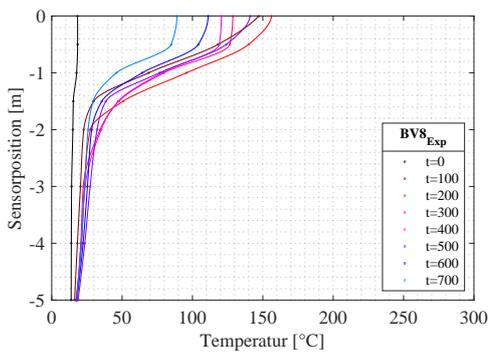
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



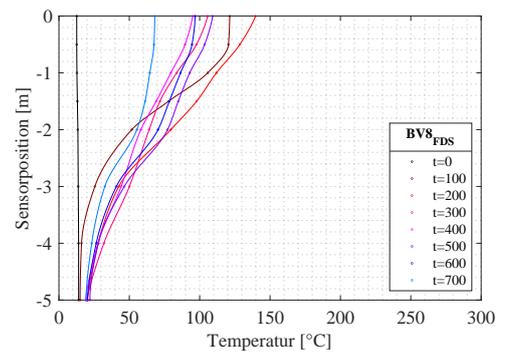
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

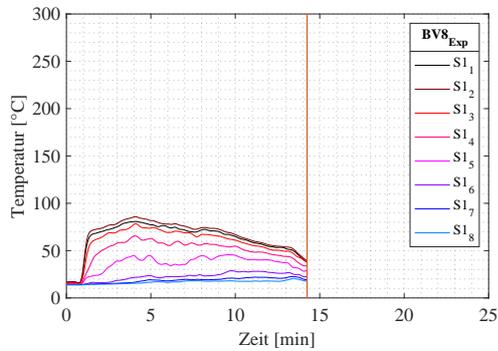


(e) Messwerte MP6

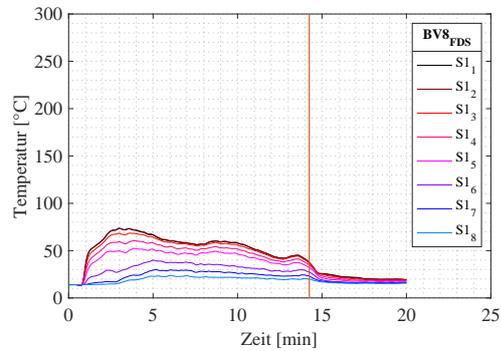


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

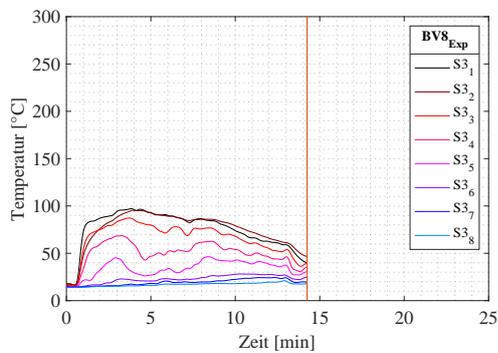
Bild A.47: Brandversuch BV8-fine: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



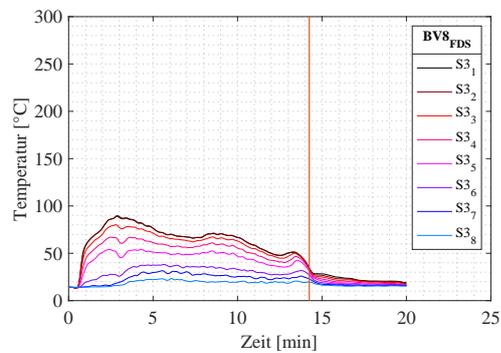
(a) Messwerte S1



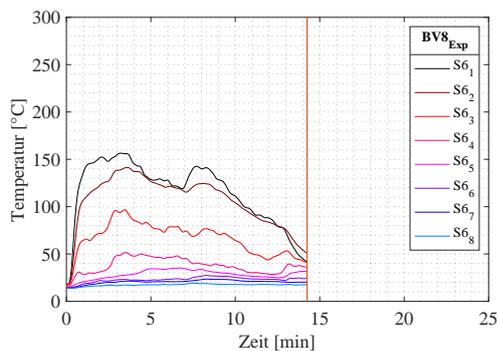
(b) FDS-Simulationsresultate S1



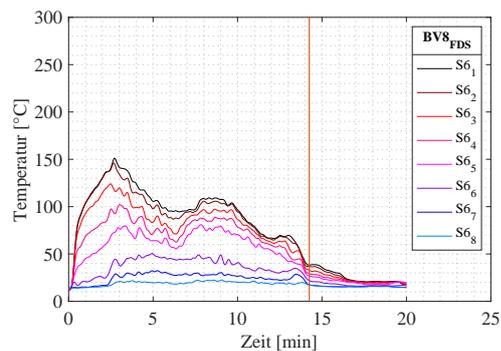
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.48: Brandversuch BV8-fine: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

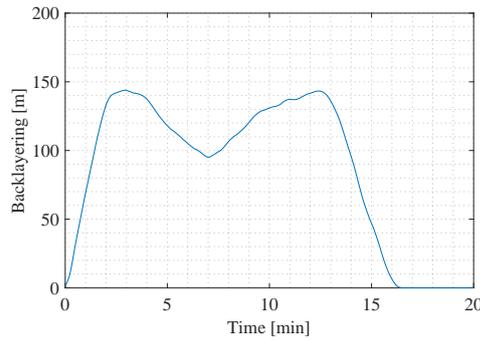


Bild A.49: BV8-fine: Backlayering

C.7 Auswertung: *BV13-fine*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

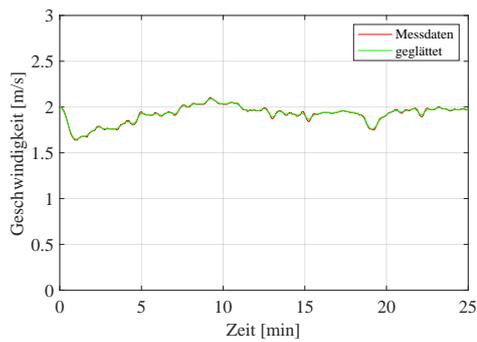


Bild A.50: Anströmgeschwindigkeit

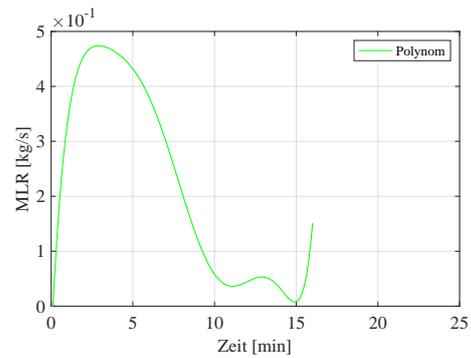


Bild A.51: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

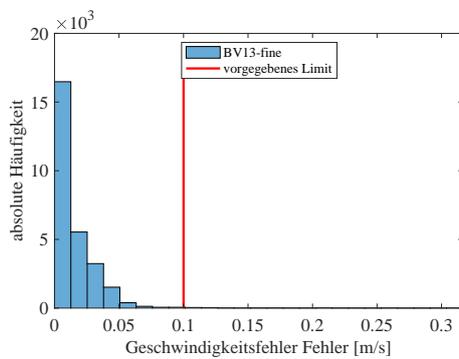


Bild A.52: Geschwindigkeitsfehler

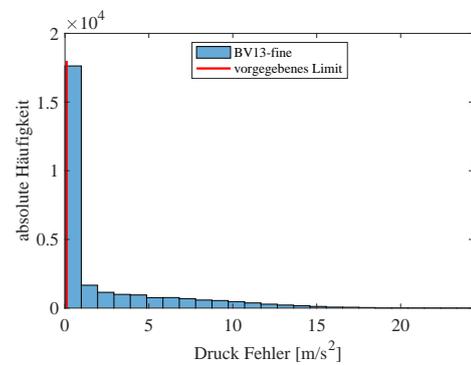


Bild A.53: Druckfehler

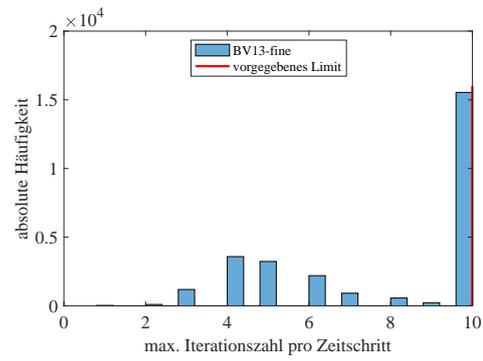
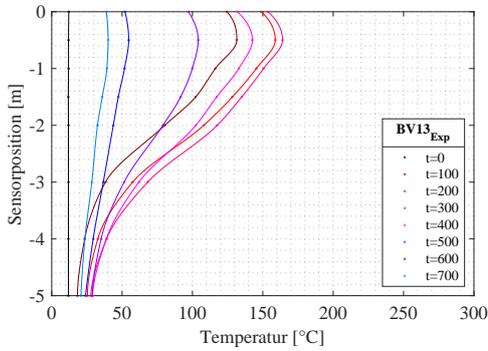
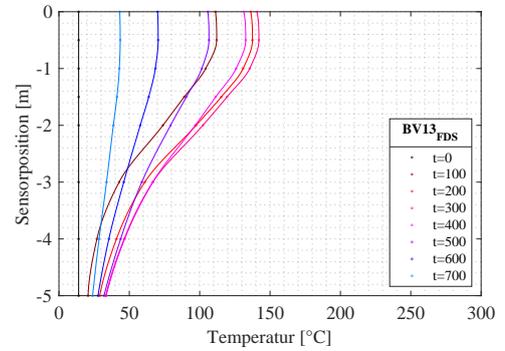


Bild A.54: Iterationen pro Zeitschritt

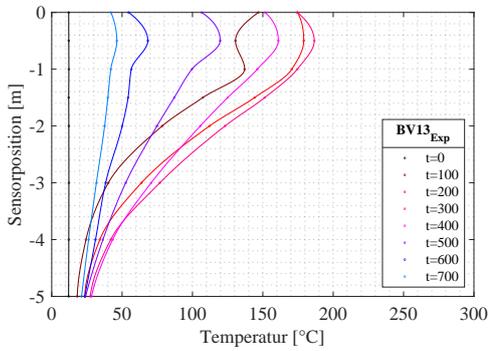
Simulationsresultate



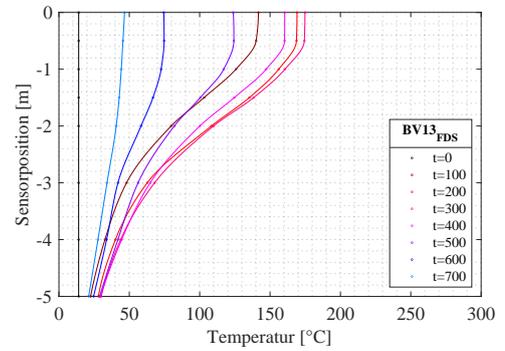
(a) Messwerte MP1



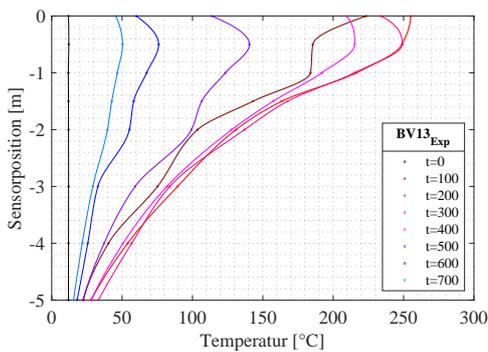
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



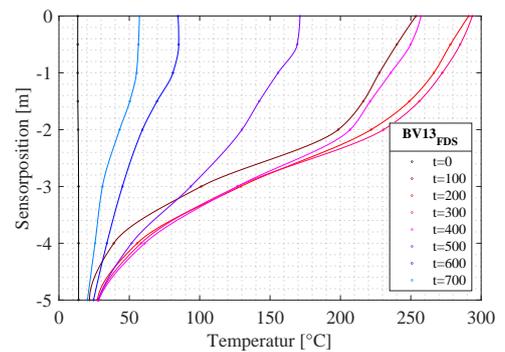
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

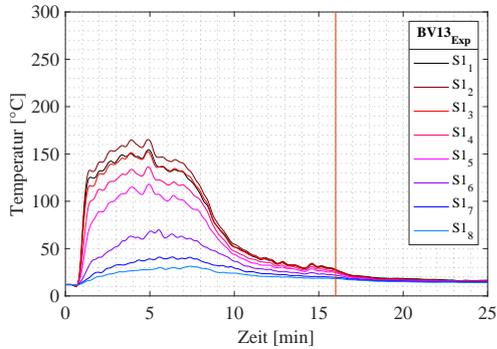


(e) Messwerte MP6

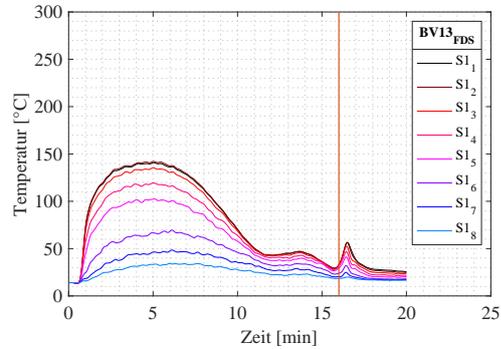


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

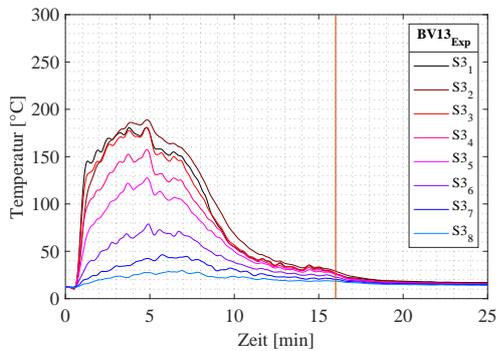
Bild A.55: Brandversuch BV13-fine: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



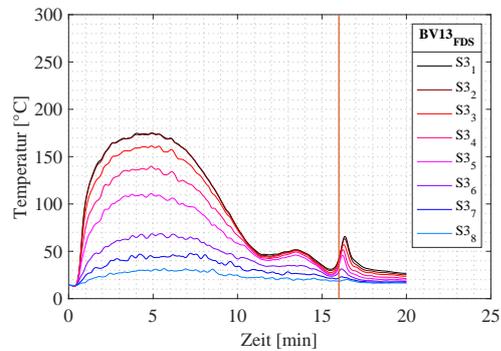
(a) Messwerte S1



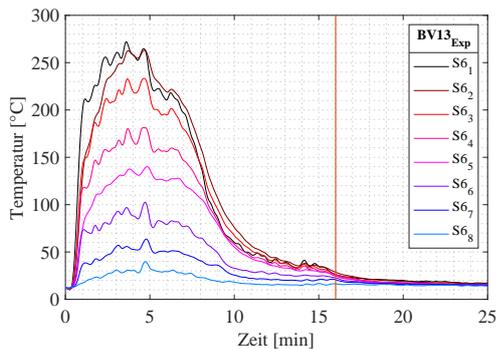
(b) FDS-Simulationsresultate S1



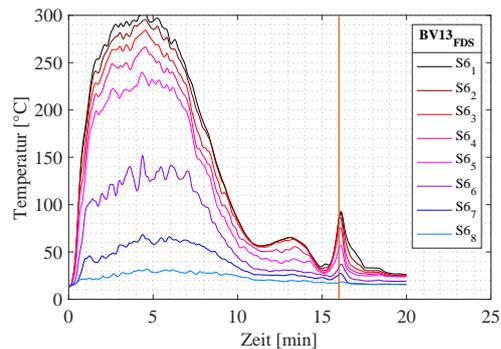
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.56: Brandversuch BV13-fine: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

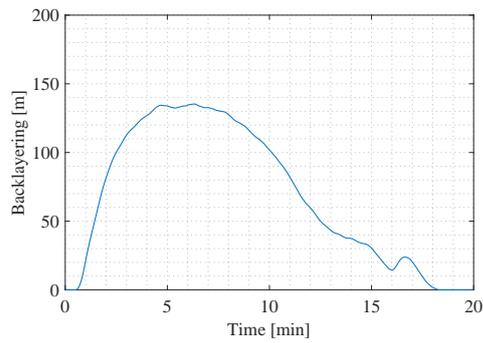


Bild A.57: BV13-fine: Backlayering

D Parameterstudie BV3

D.1 Auswertung: *BV3-rough*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

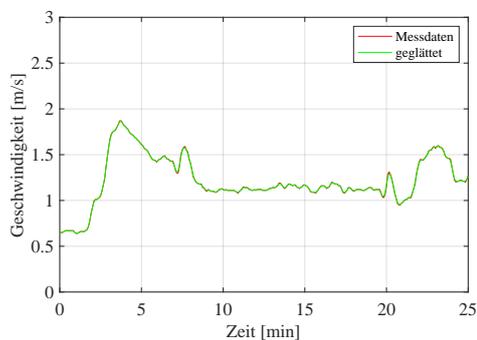


Bild A.58: Anströmgeschwindigkeit

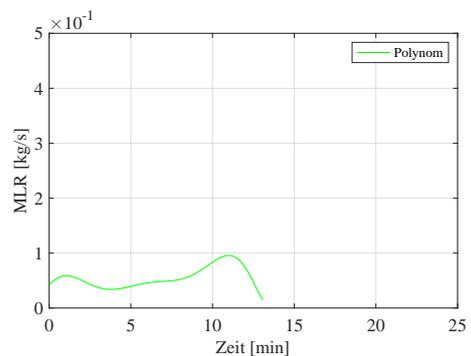


Bild A.59: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

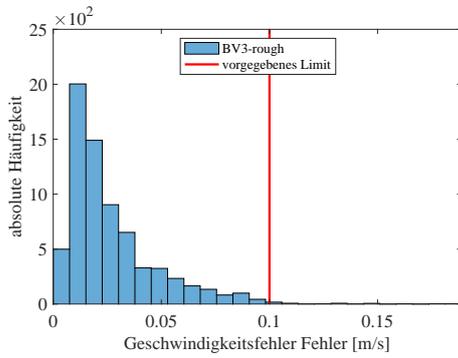


Bild A.60: Geschwindigkeitsfehler

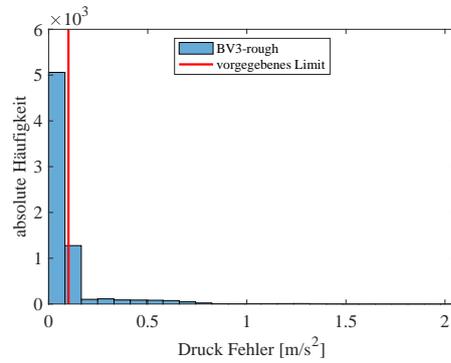


Bild A.61: Druckfehler

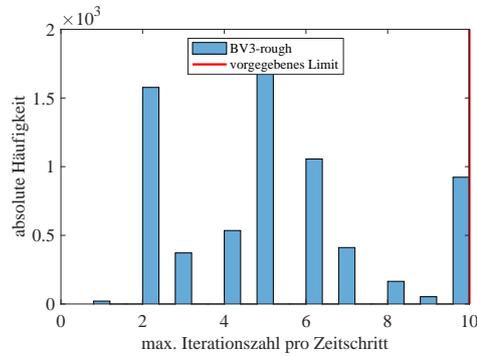
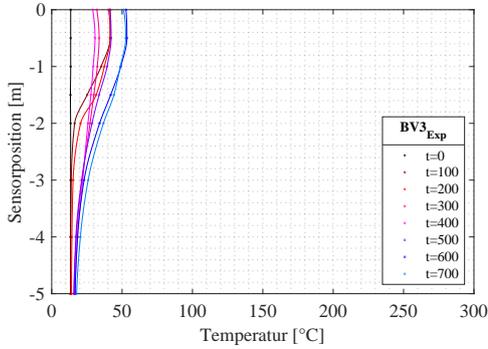
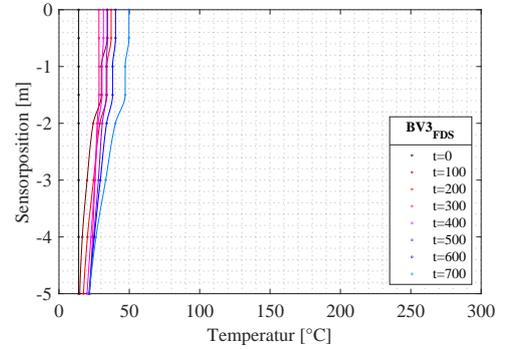


Bild A.62: Iterationen pro Zeitschritt

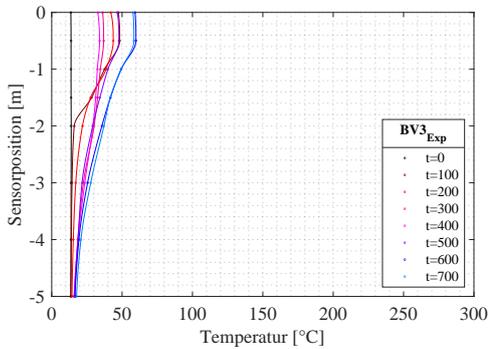
Simulationsresultate



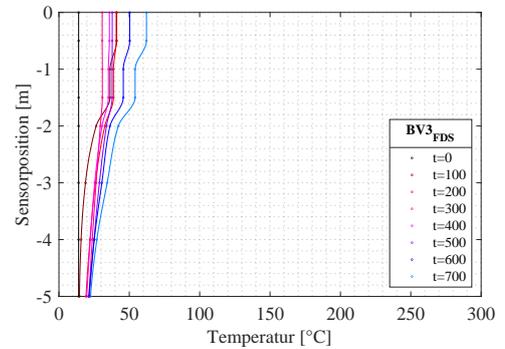
(a) Messwerte MP1



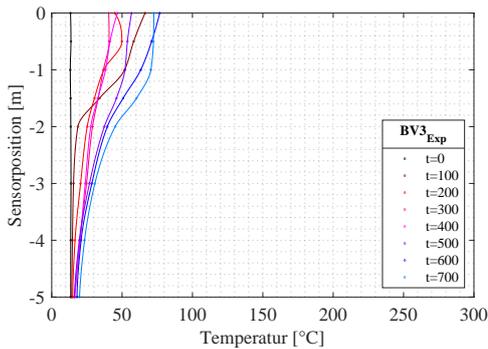
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



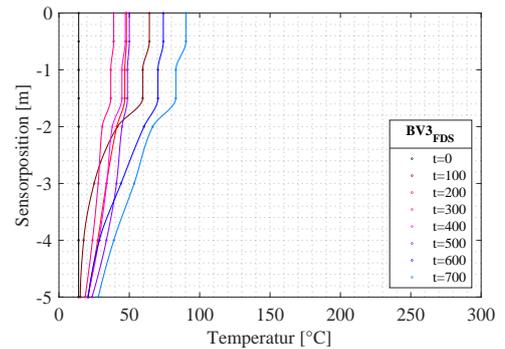
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

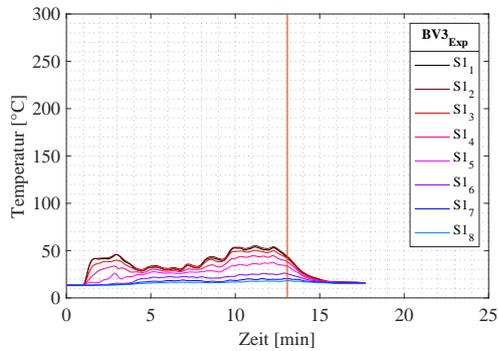


(e) Messwerte MP6

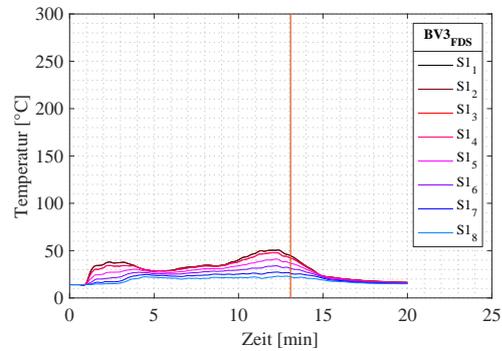


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

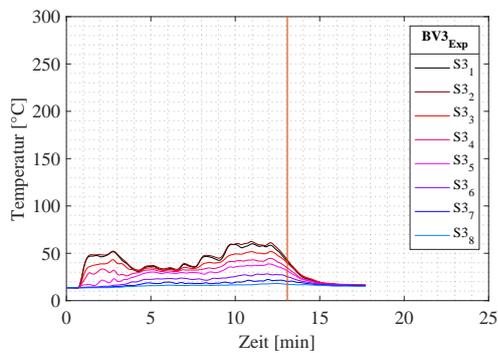
Bild A.63: Brandversuch BV3-rough: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



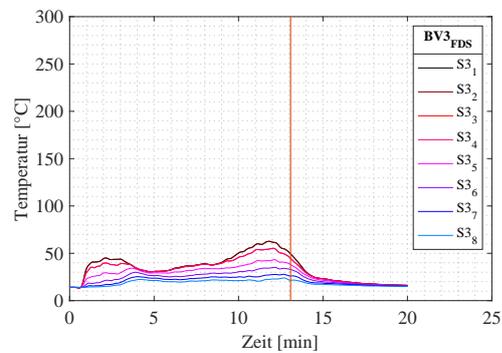
(a) Messwerte S1



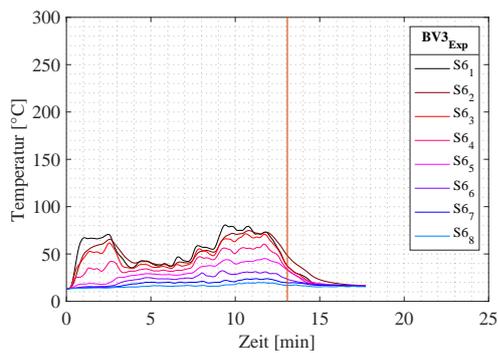
(b) FDS-Simulationsresultate S1



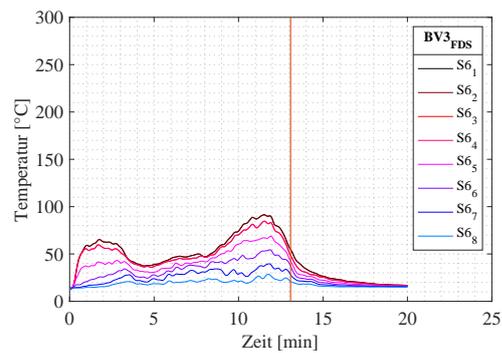
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.64: Brandversuch BV3-rough: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

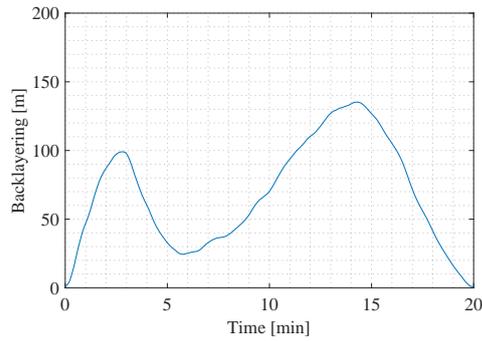


Bild A.65: BV3-rough: Backlayering

D.2 Auswertung: *BV3-fine-perror-1*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

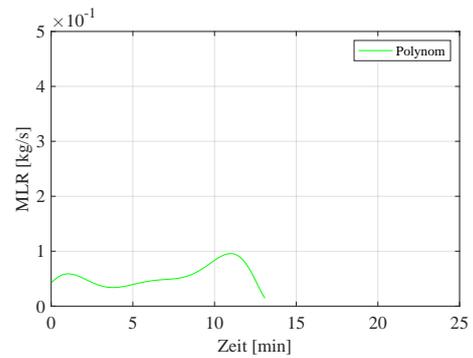
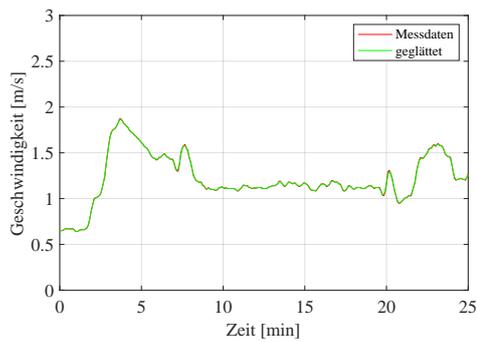


Bild A.66: Anströmgeschwindigkeit

Bild A.67: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

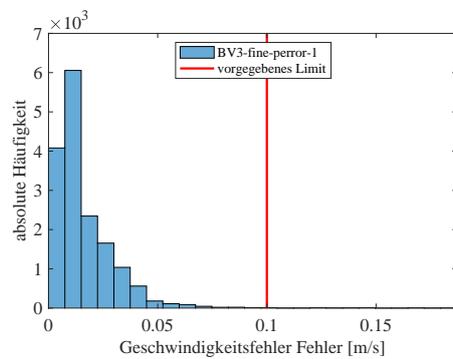


Bild A.68: Geschwindigkeitsfehler

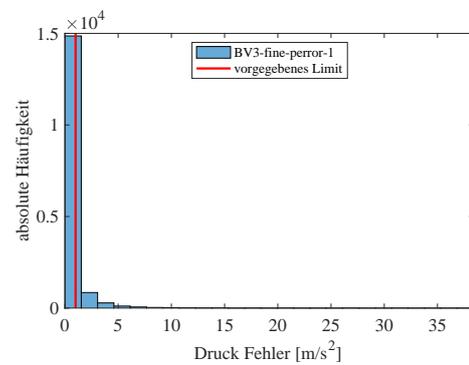


Bild A.69: Druckfehler

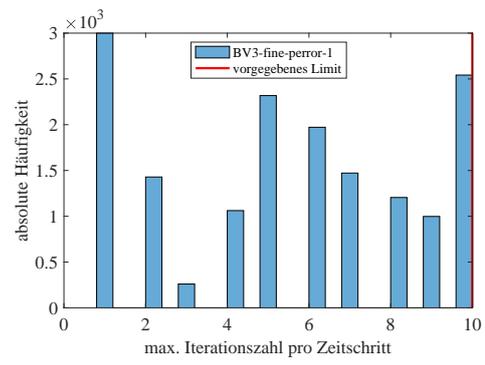
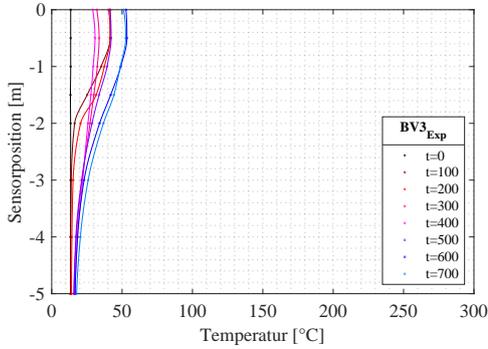
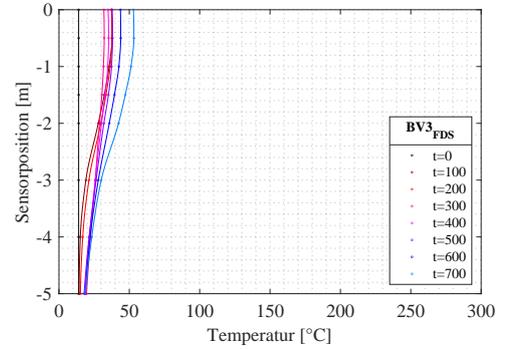


Bild A.70: Iterationen pro Zeitschritt

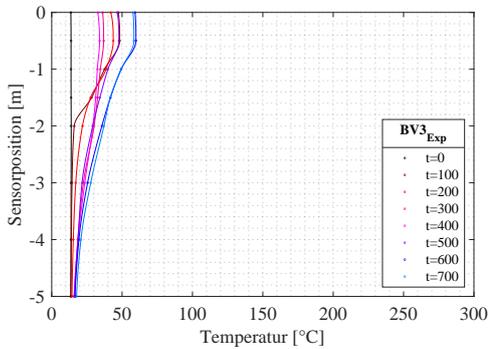
Simulationsresultate



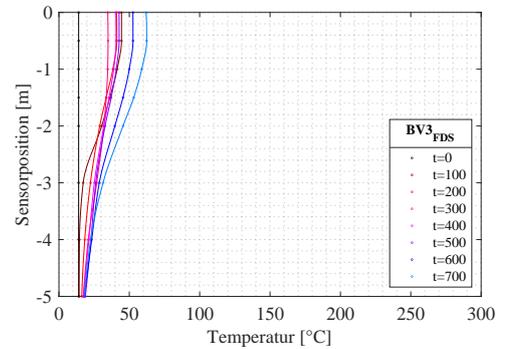
(a) Messwerte MP1



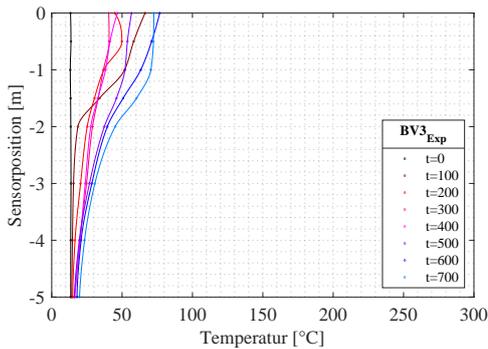
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



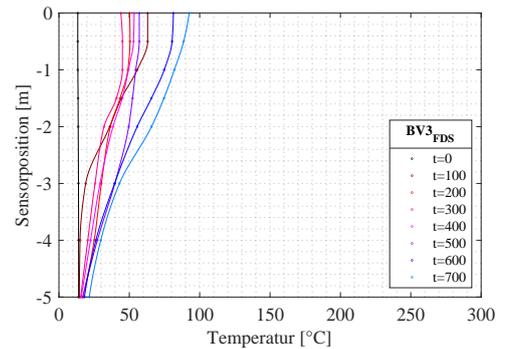
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

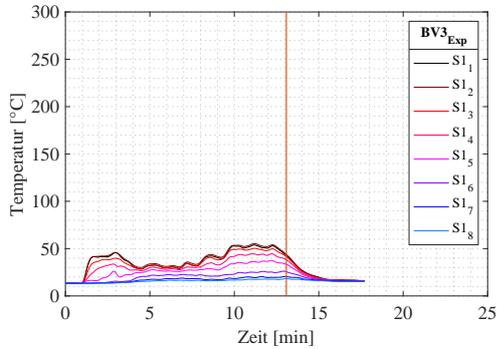


(e) Messwerte MP6

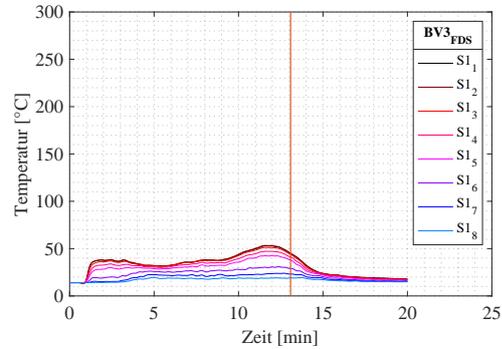


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

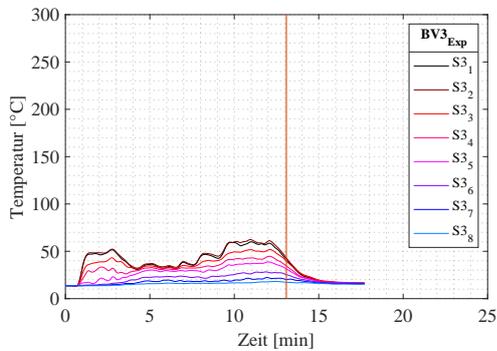
Bild A.71: Brandversuch BV3-fine-perror-1: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6



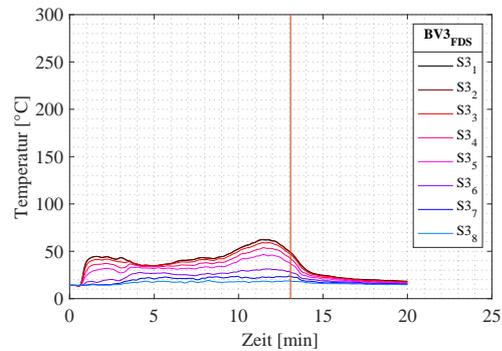
(a) Messwerte S1



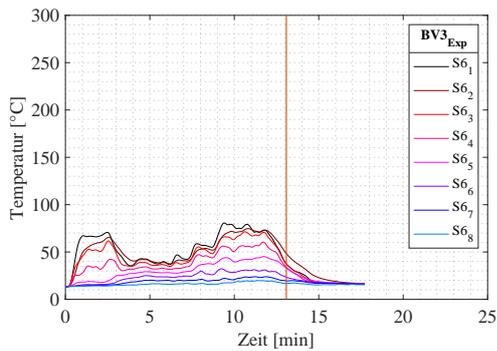
(b) FDS-Simulationsresultate S1



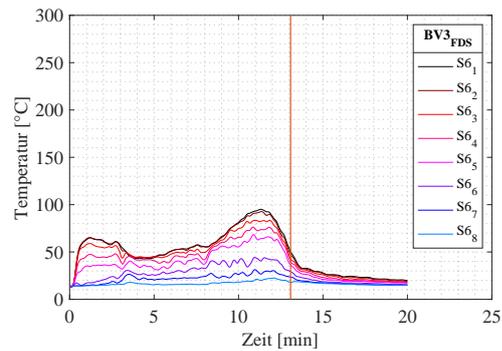
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.72: Brandversuch BV3-fine-perror-1: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

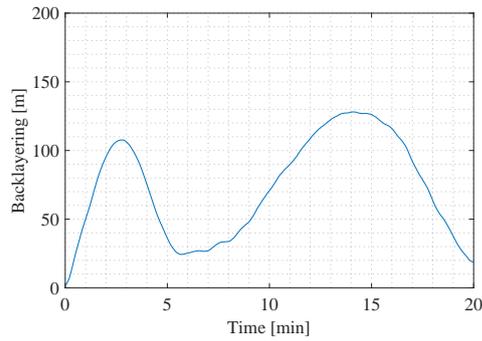


Bild A.73: BV3-fine-perror-1: Backlayering

D.3 Auswertung: BV3-fine-perror-10

Vorgaben an FDS durch das Experiment

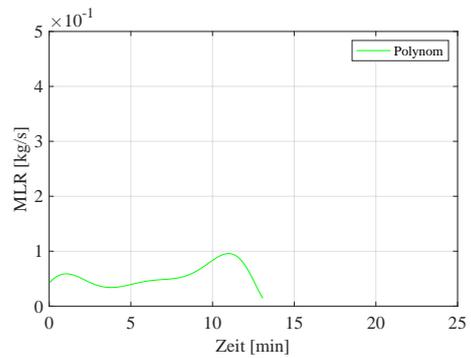
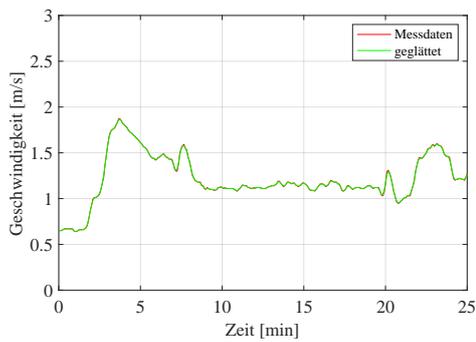


Bild A.74: Anströmgeschwindigkeit

Bild A.75: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

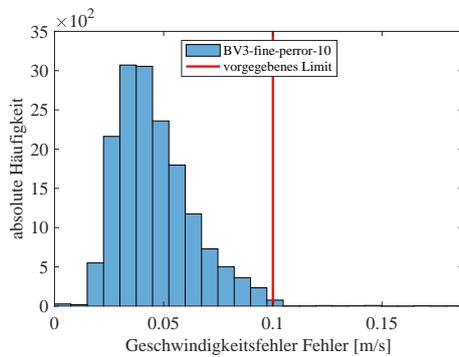


Bild A.76: Geschwindigkeitsfehler

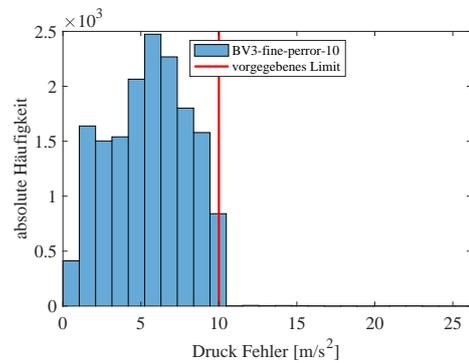


Bild A.77: Druckfehler

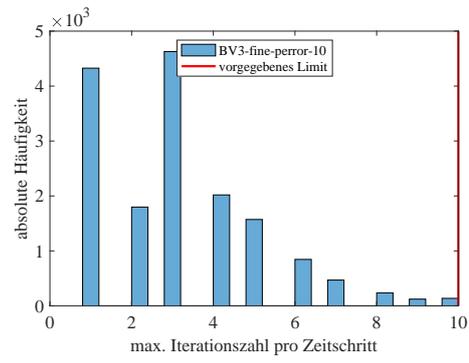
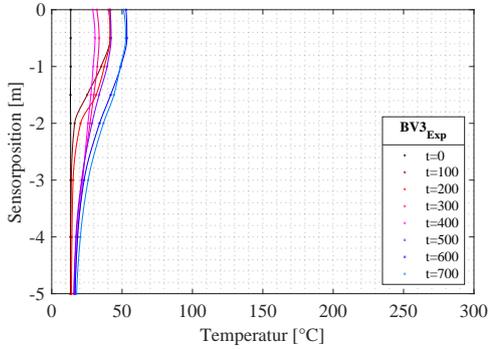
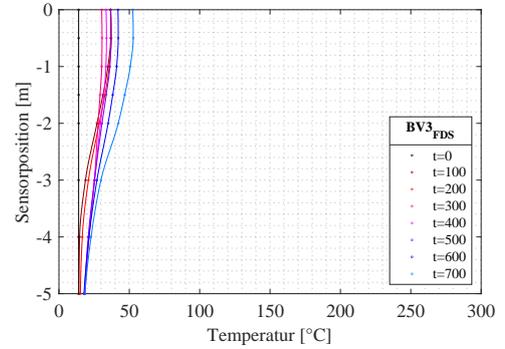


Bild A.78: Iterationen pro Zeitschritt

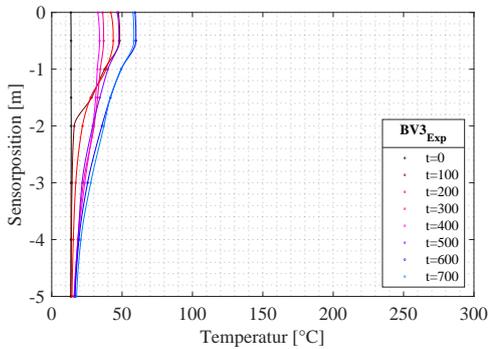
Simulationsresultate



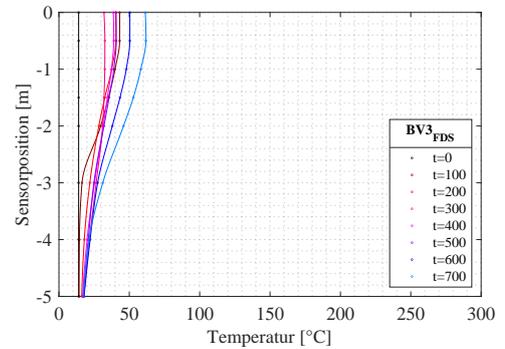
(a) Messwerte MP1



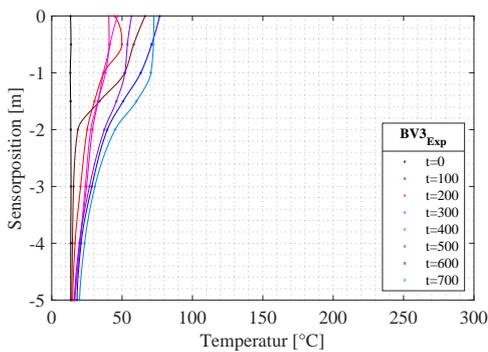
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



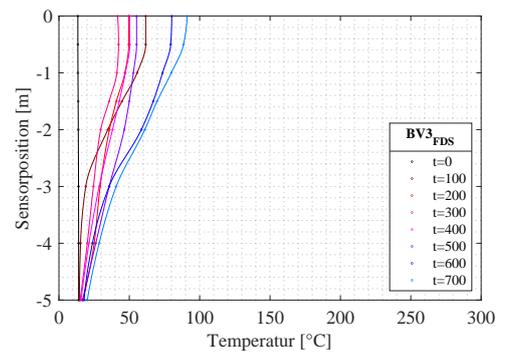
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

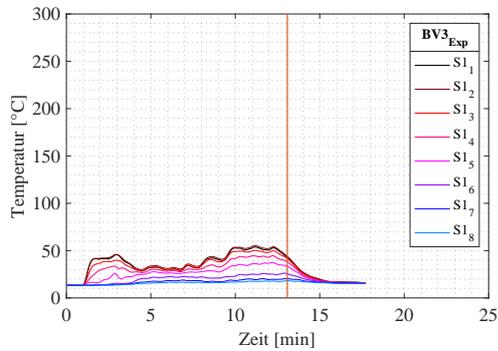


(e) Messwerte MP6

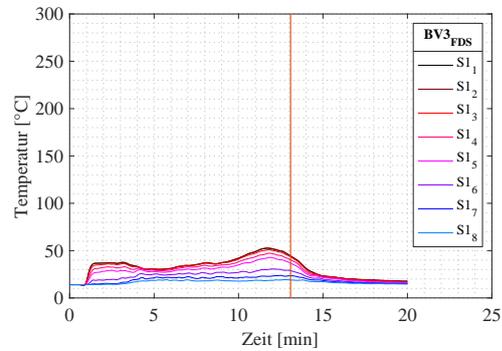


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

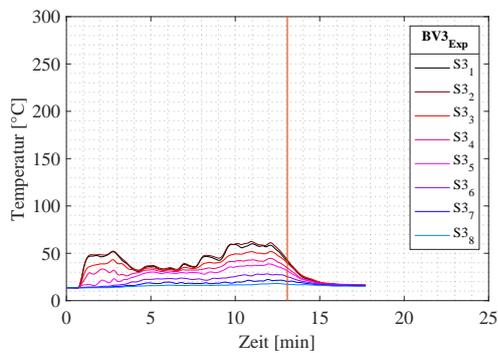
Bild A.79: Brandversuch BV3-fine-perror-10: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6



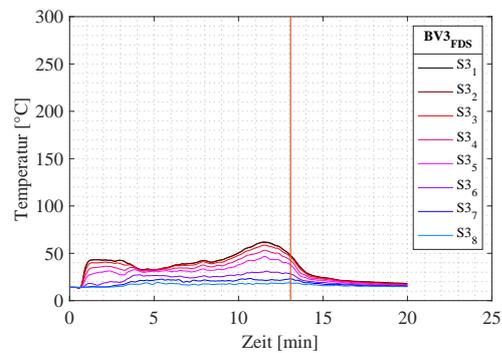
(a) Messwerte S1



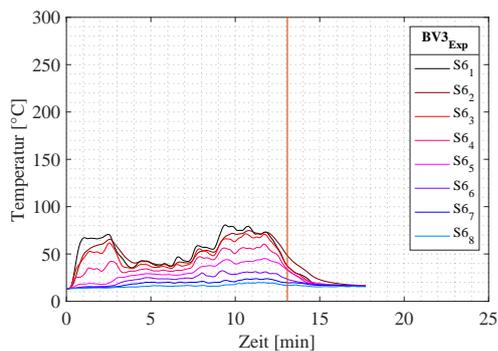
(b) FDS-Simulationsresultate S1



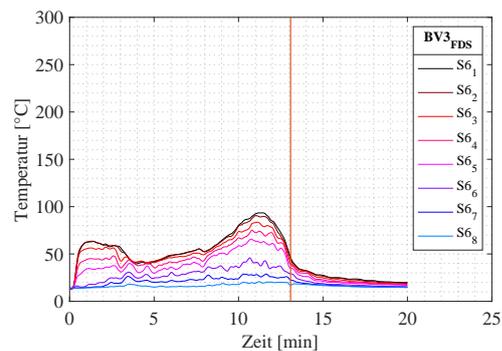
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.80: Brandversuch BV3-fine-perror-10: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

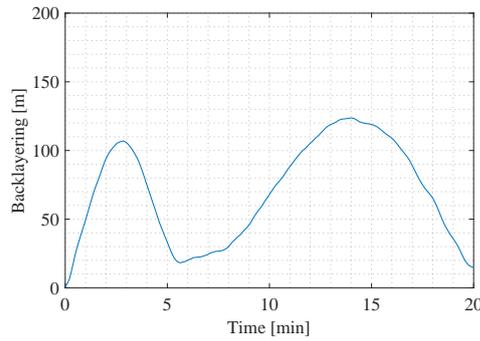


Bild A.81: BV3-fine-perror-10: Backlayering

D.4 Auswertung: BV3-fine-perror-50

Vorgaben an FDS durch das Experiment

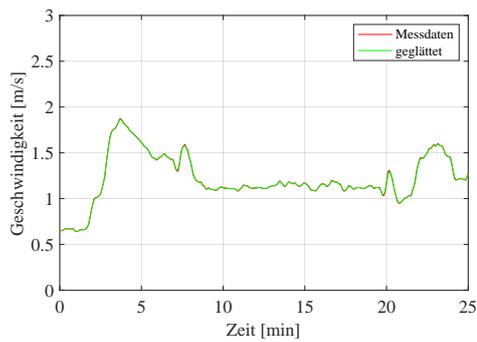


Bild A.82: Anströmgeschwindigkeit

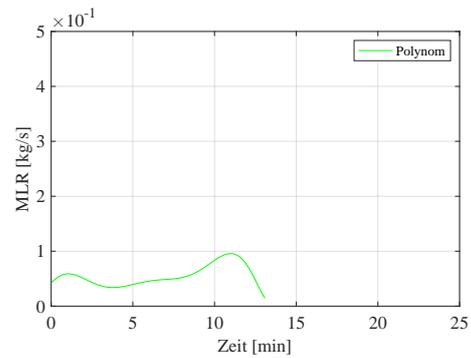


Bild A.83: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

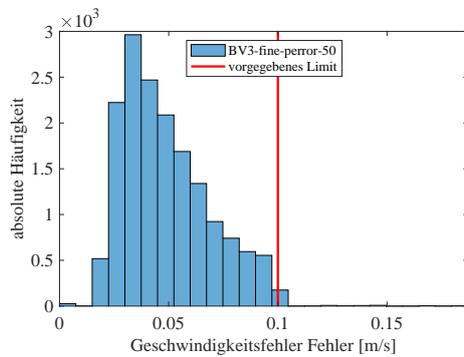


Bild A.84: Geschwindigkeitsfehler

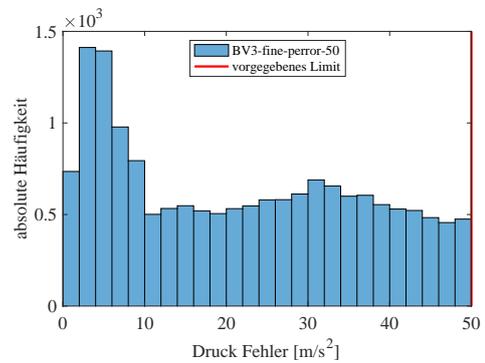


Bild A.85: Druckfehler

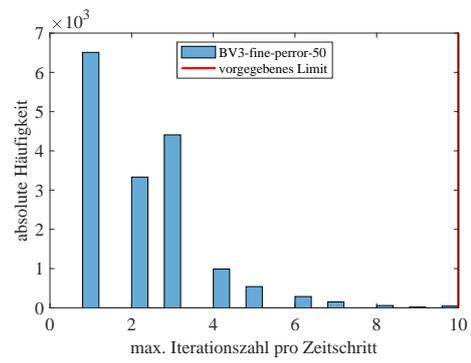
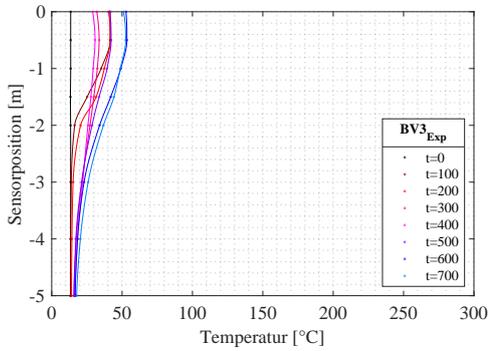
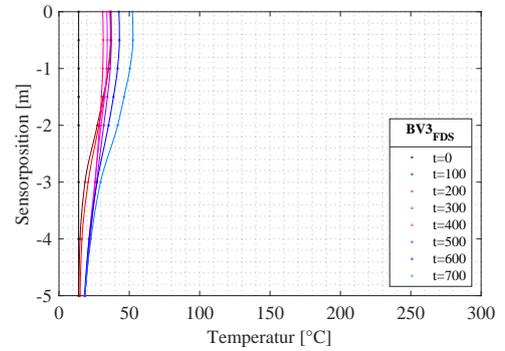


Bild A.86: Iterationen pro Zeitschritt

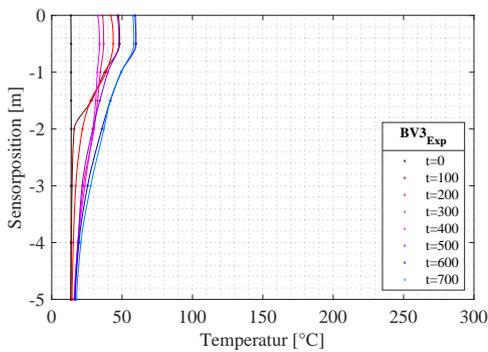
Simulationsresultate



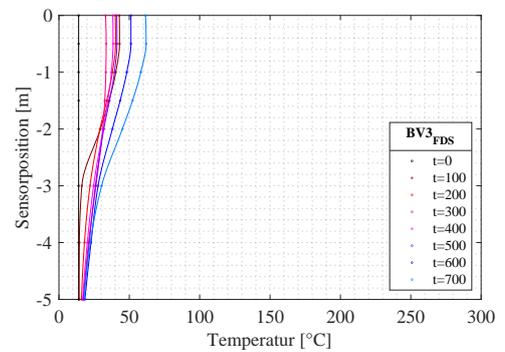
(a) Messwerte MP1



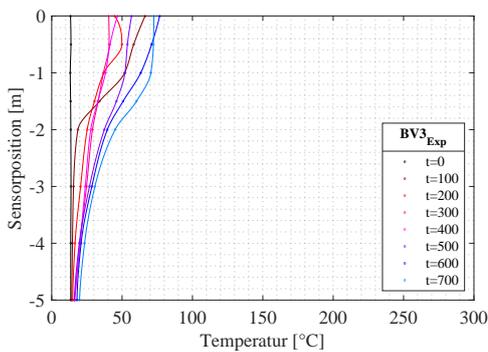
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



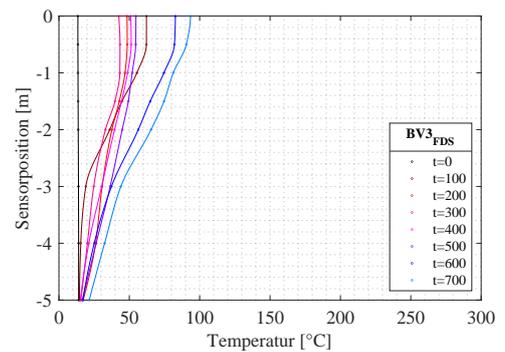
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

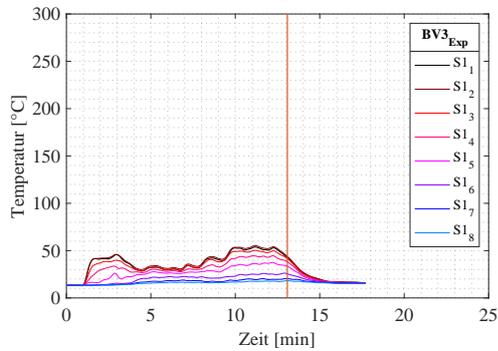


(e) Messwerte MP6

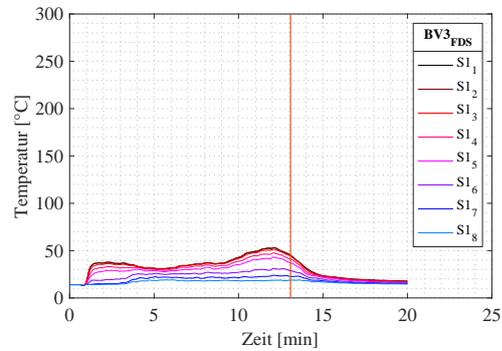


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

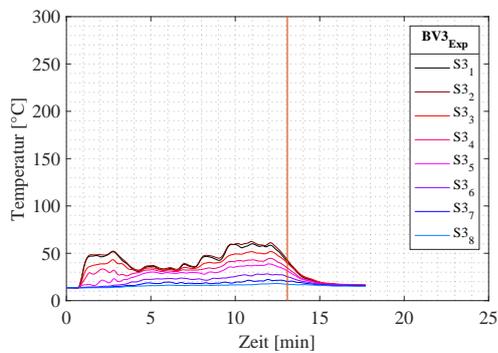
Bild A.87: Brandversuch BV3-fine-perror-50: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6



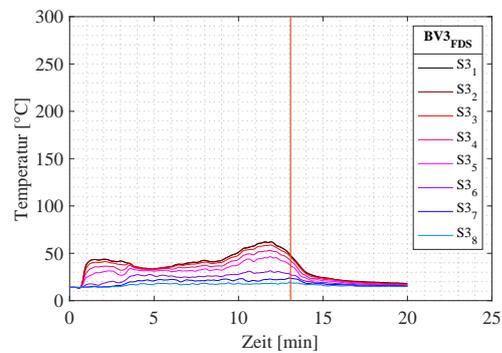
(a) Messwerte S1



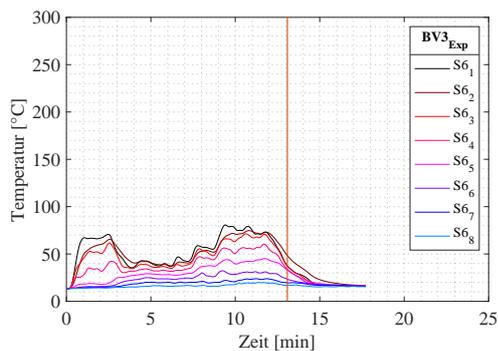
(b) FDS-Simulationsresultate S1



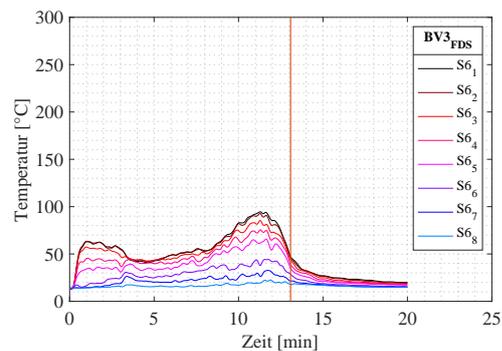
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.88: Brandversuch BV3-fine-perror-50: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

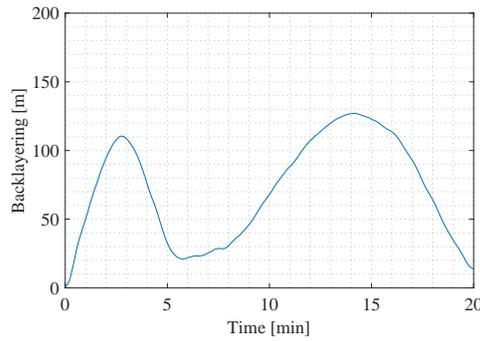


Bild A.89: BV3-fine-perror-50: Backlayering

D.5 Auswertung: BV3-fine-perror-100

Vorgaben an FDS durch das Experiment

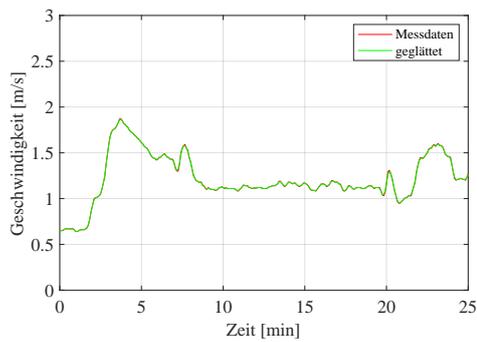


Bild A.90: Anströmgeschwindigkeit

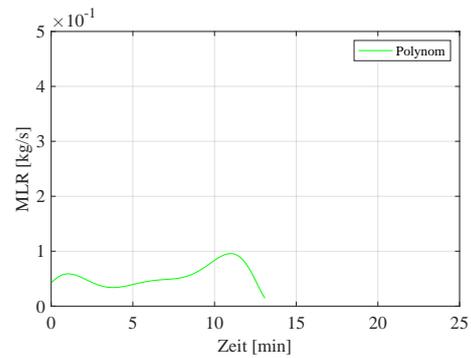


Bild A.91: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

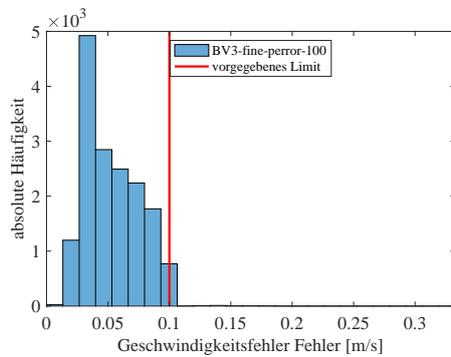


Bild A.92: Geschwindigkeitsfehler

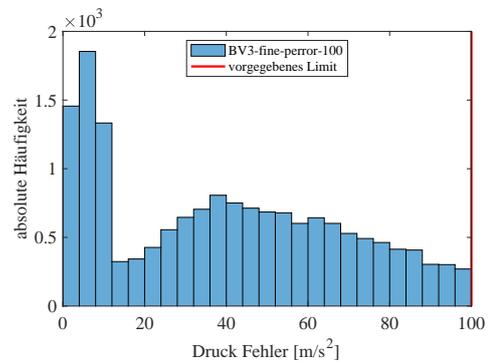


Bild A.93: Druckfehler

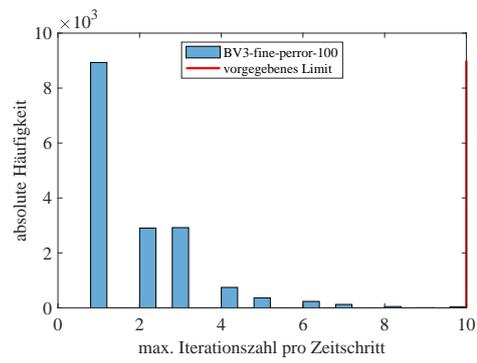
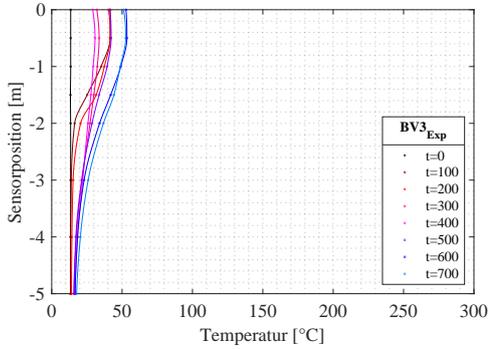
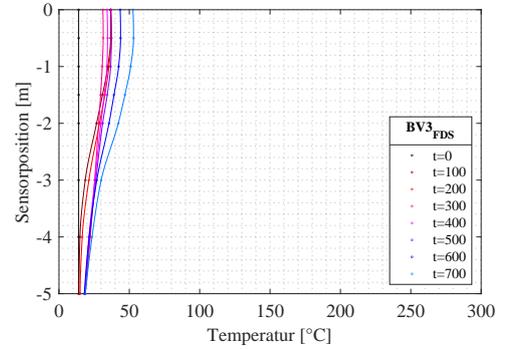


Bild A.94: Iterationen pro Zeitschritt

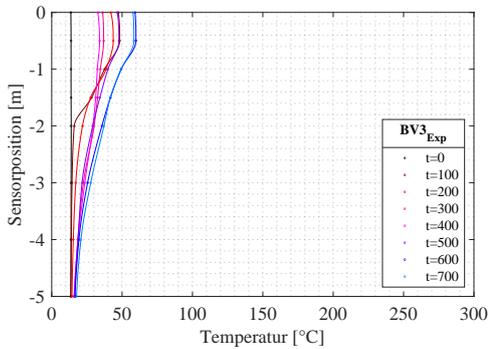
Simulationsresultate



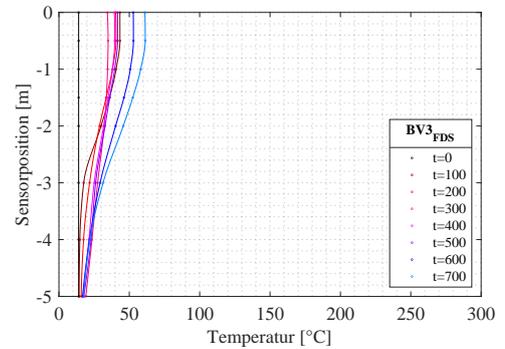
(a) Messwerte MP1



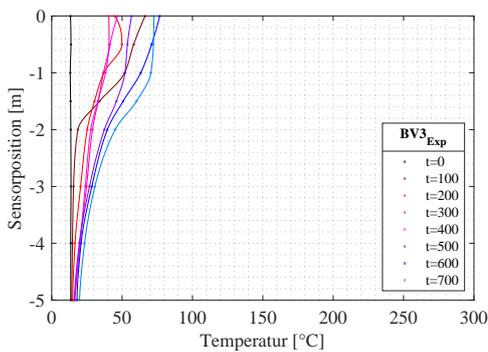
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



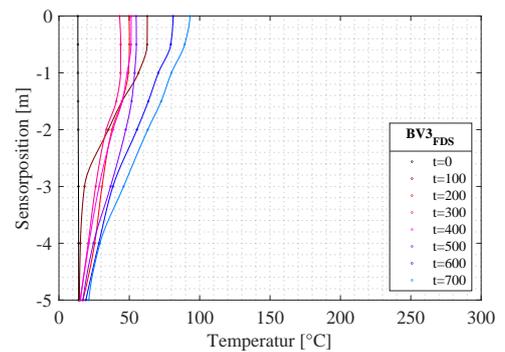
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

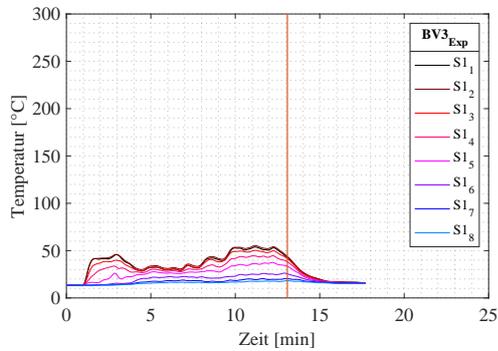


(e) Messwerte MP6

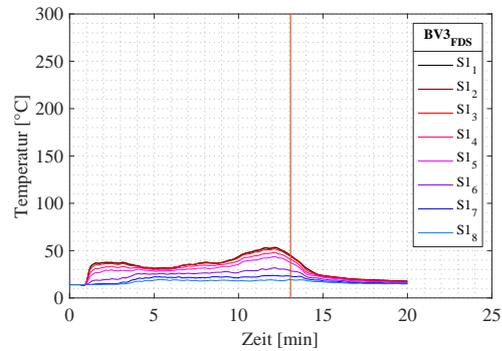


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

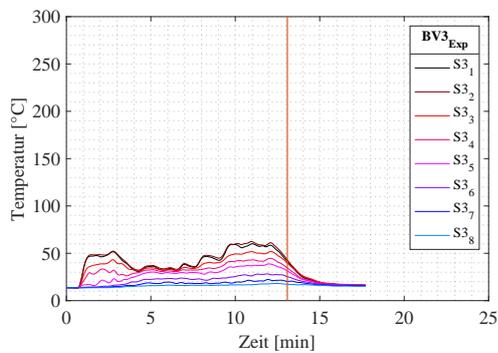
Bild A.95: Brandversuch BV3-fine-perror-100: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6



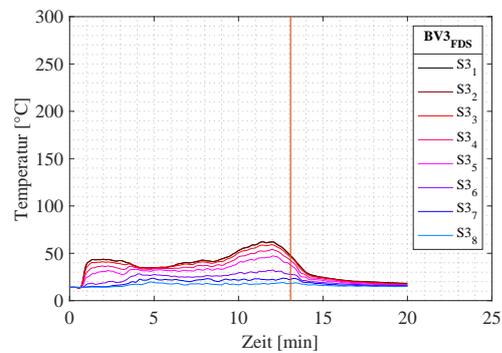
(a) Messwerte S1



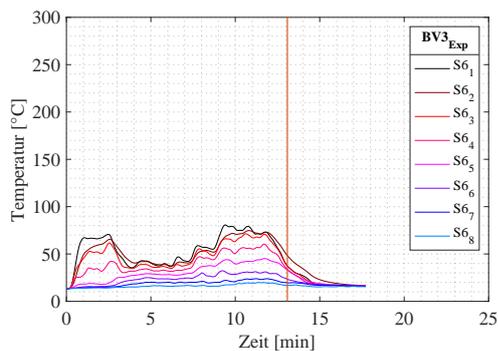
(b) FDS-Simulationsresultate S1



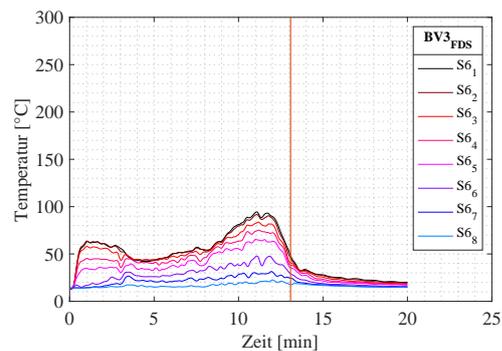
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.96: Brandversuch BV3-fine-perror-100: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

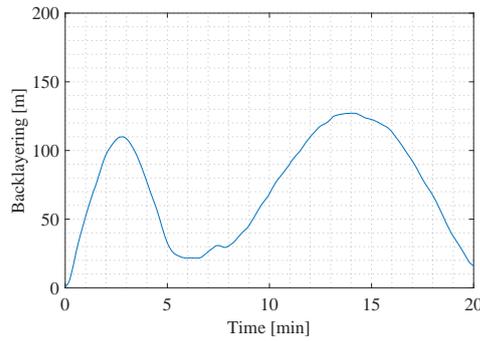


Bild A.97: BV3-fine-perror-100: Backlayering

D.6 Auswertung: *BV3-fine-single*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

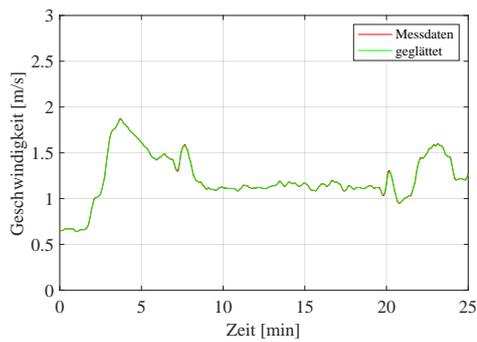


Bild A.98: Anströmgeschwindigkeit

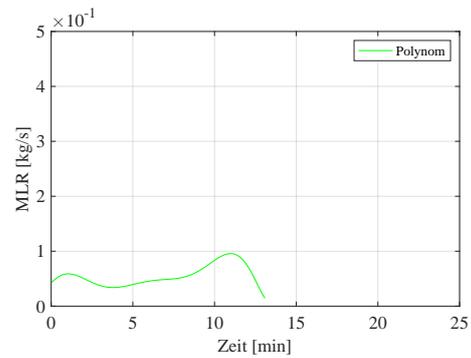


Bild A.99: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

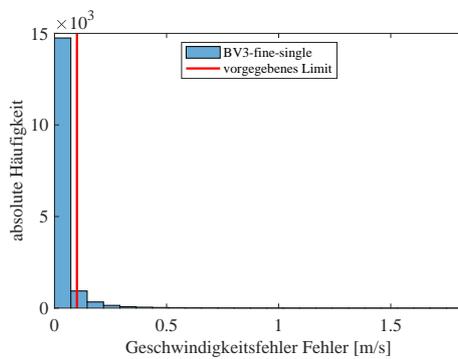


Bild A.100: Geschwindigkeitsfehler

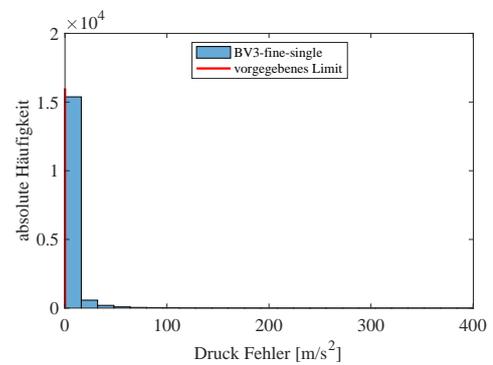


Bild A.101: Druckfehler

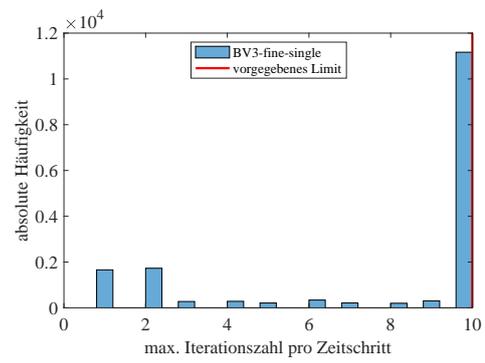
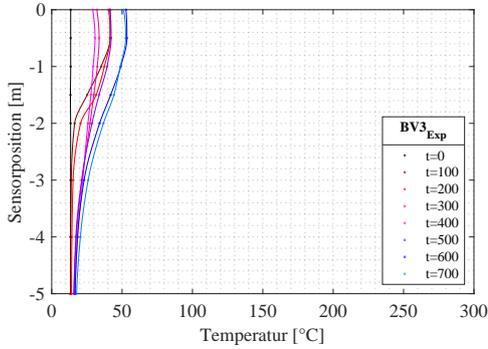
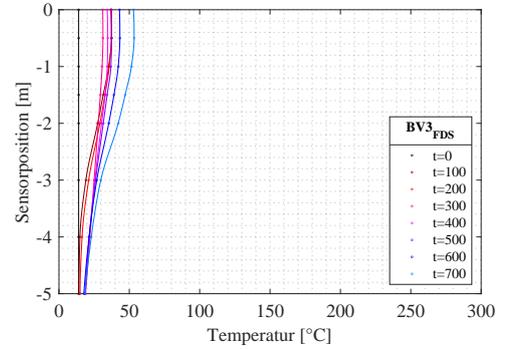


Bild A.102: Iterationen pro Zeitschritt

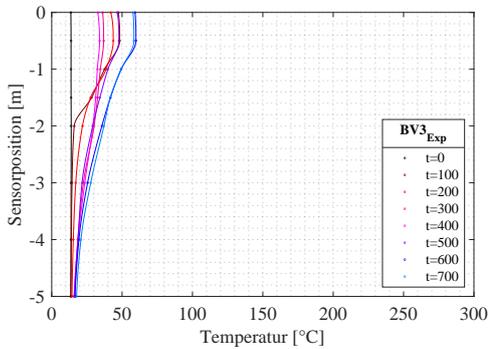
Simulationsresultate



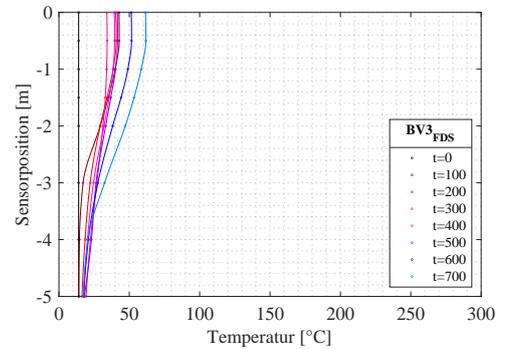
(a) Messwerte MP1



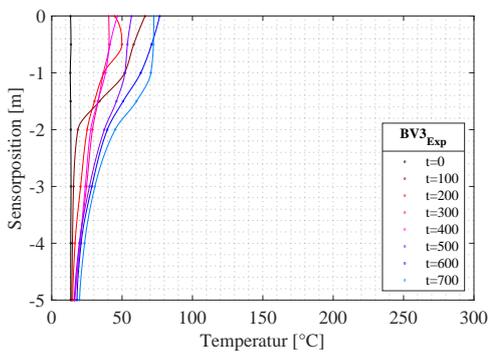
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



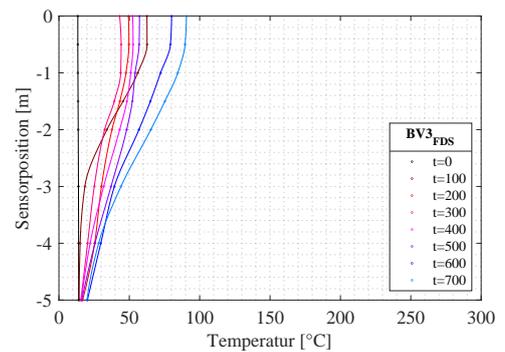
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

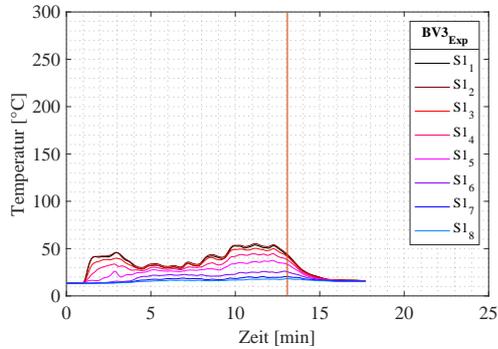


(e) Messwerte MP6

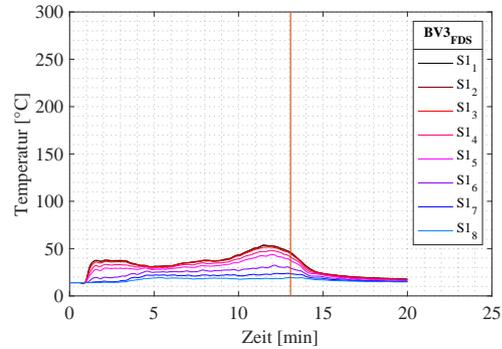


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

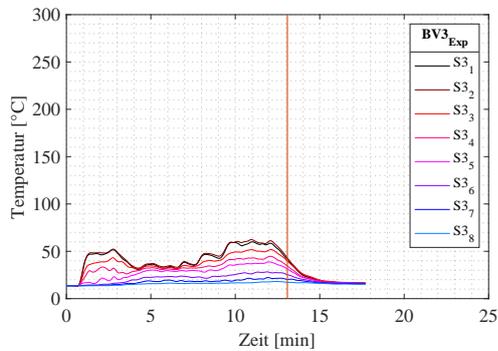
Bild A.103: Brandversuch BV3-fine-single: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationsergebnisse am MP6



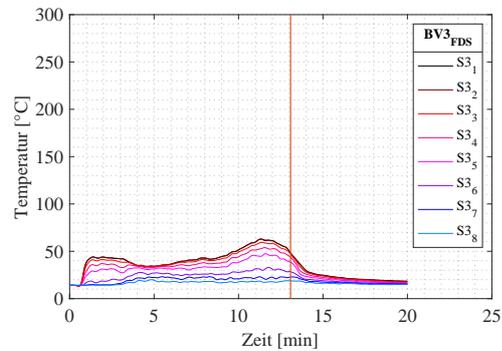
(a) Messwerte S1



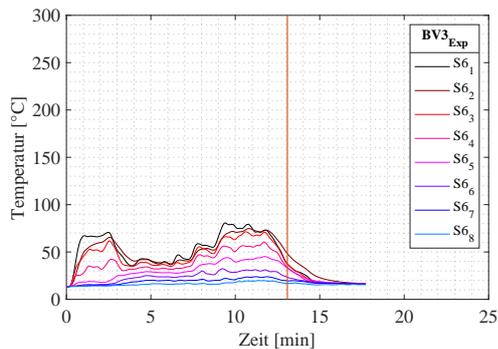
(b) FDS-Simulationsresultate S1



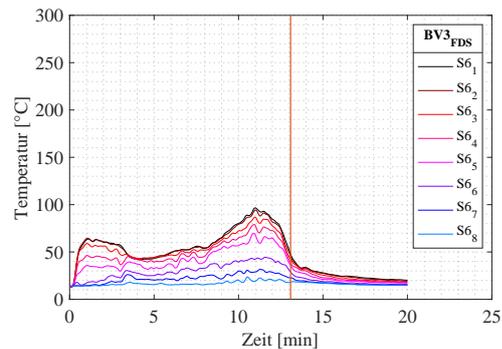
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.104: Brandversuch BV3-fine-single: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6

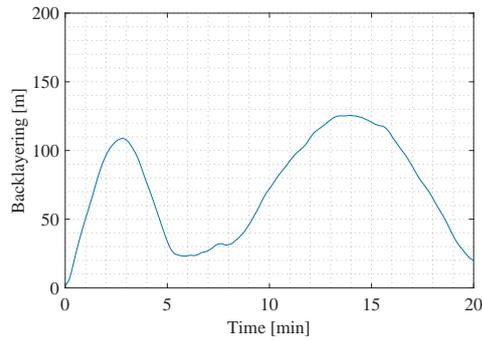


Bild A.105: BV3-fine-single: Backlayering

D.7 Auswertung: *BV3-rough-USCARC*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

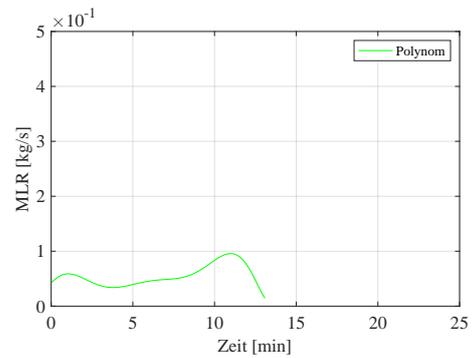
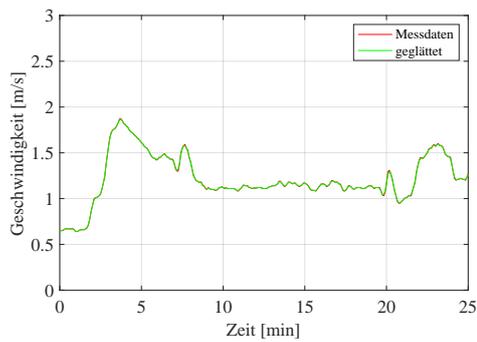


Bild A.106: Anströmgeschwindigkeit

Bild A.107: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

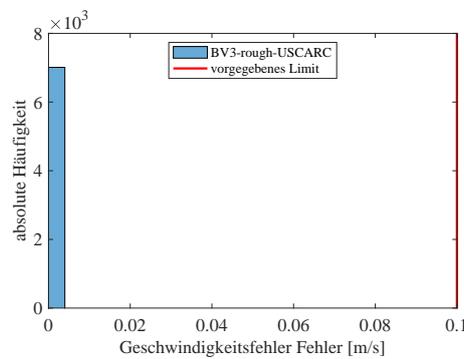


Bild A.108: Geschwindigkeitsfehler

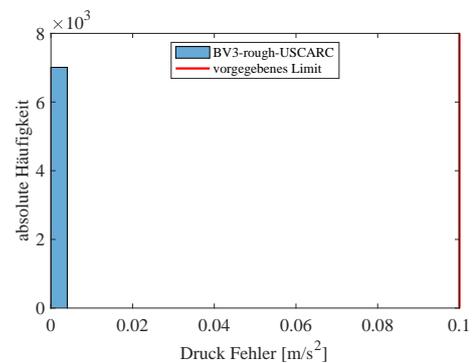


Bild A.109: Druckfehler

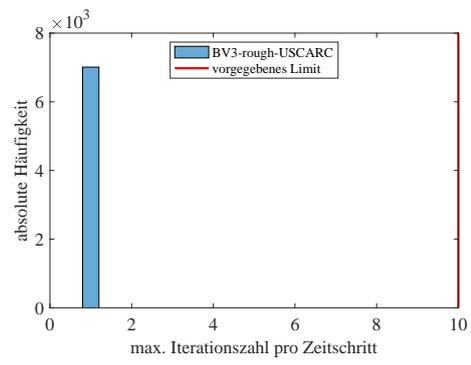
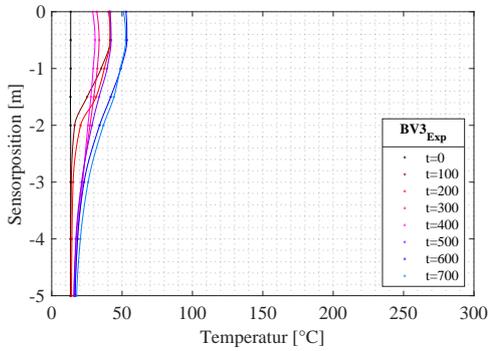
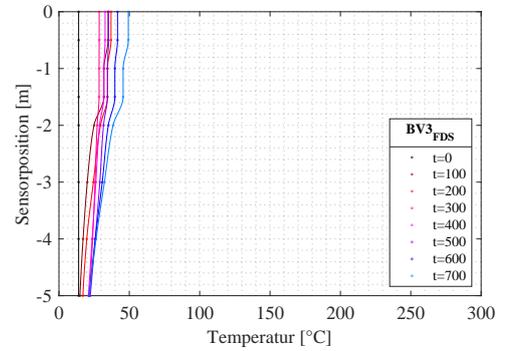


Bild A.110: Iterationen pro Zeitschritt

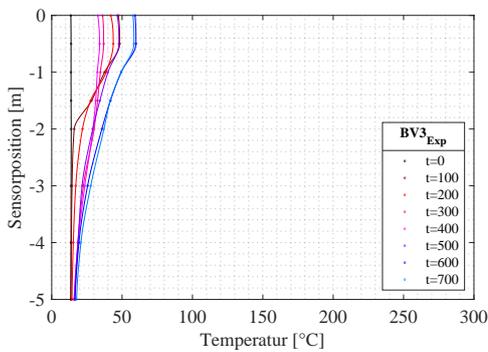
Simulationsresultate



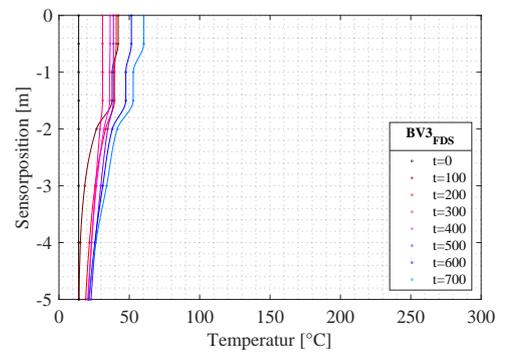
(a) Messwerte MP1



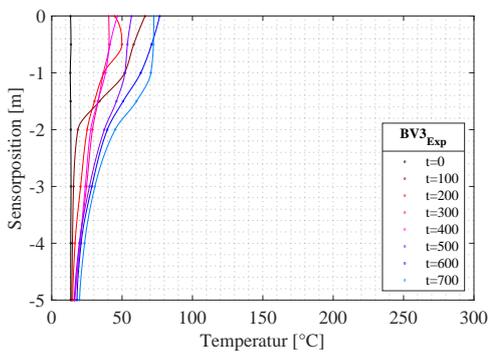
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



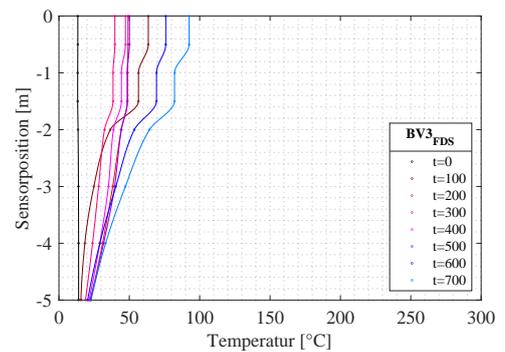
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

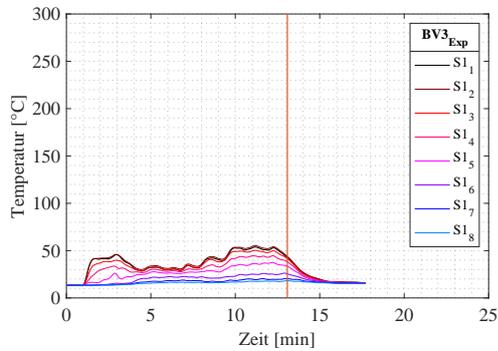


(e) Messwerte MP6

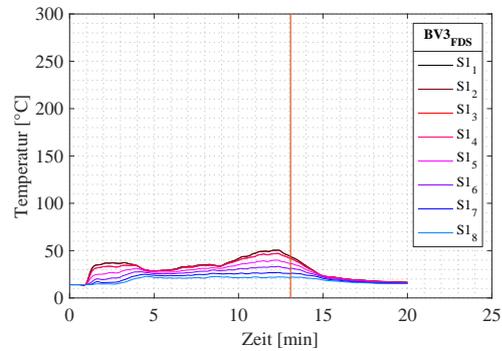


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

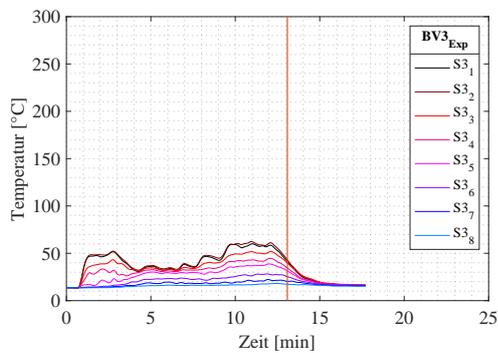
Bild A.111: Brandversuch BV3-rough-USCARC: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



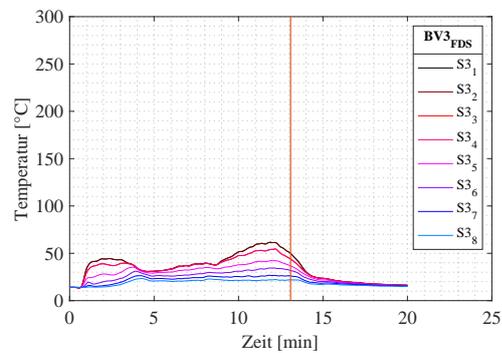
(a) Messwerte S1



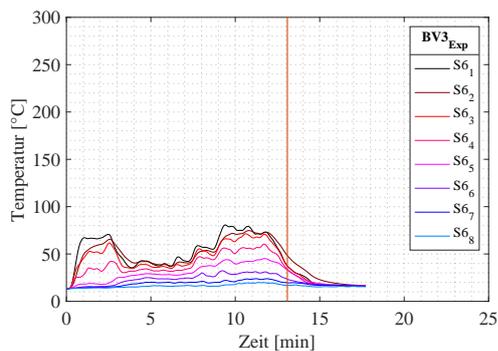
(b) FDS-Simulationsresultate S1



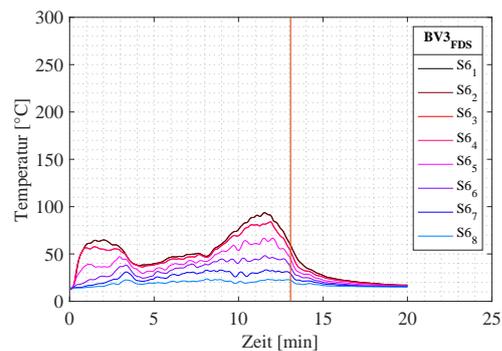
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.112: Brandversuch BV3-rough-USCARC: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6

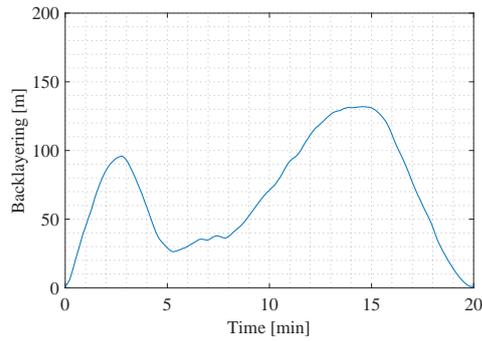


Bild A.113: BV3-rough-USCARC: Backlayering

D.8 Auswertung: *BV3-fine-USCARC*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

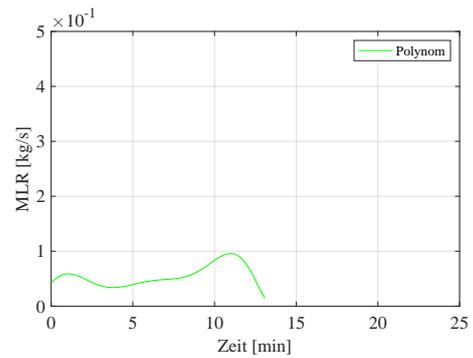
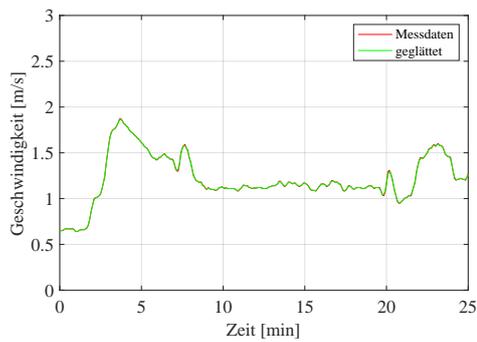


Bild A.114: Anströmgeschwindigkeit

Bild A.115: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

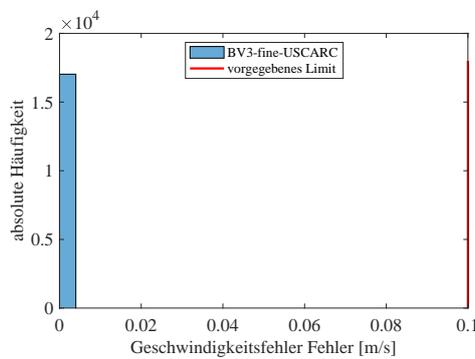


Bild A.116: Geschwindigkeitsfehler

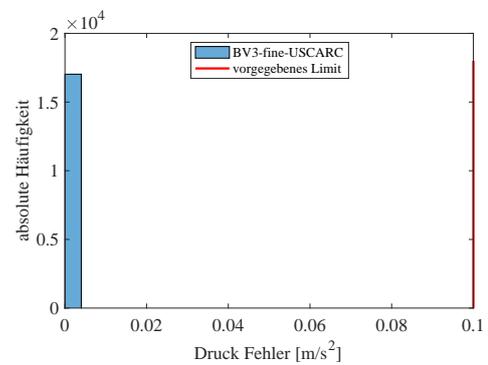


Bild A.117: Druckfehler

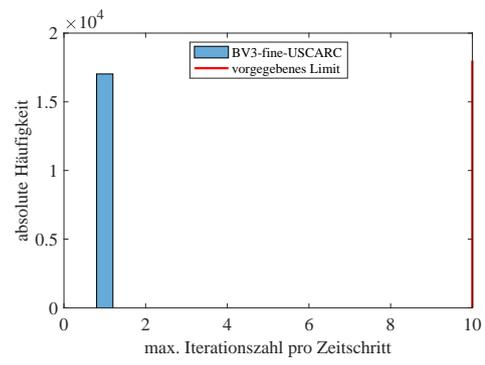
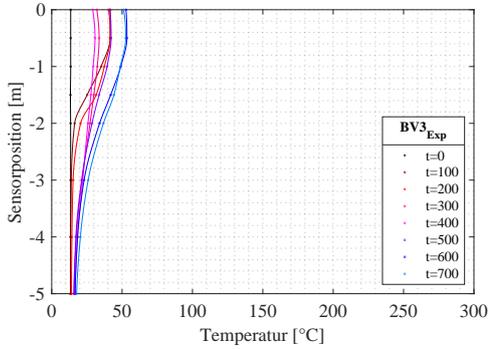
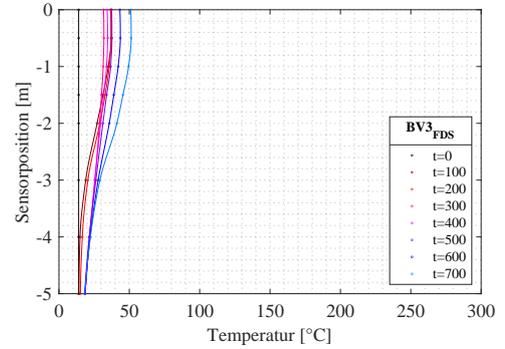


Bild A.118: Iterationen pro Zeitschritt

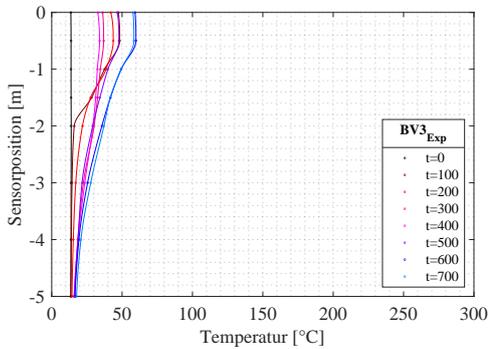
Simulationsresultate



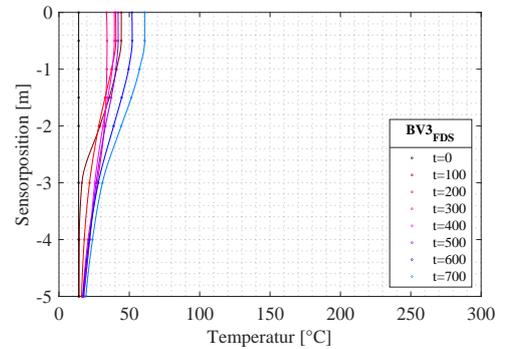
(a) Messwerte MP1



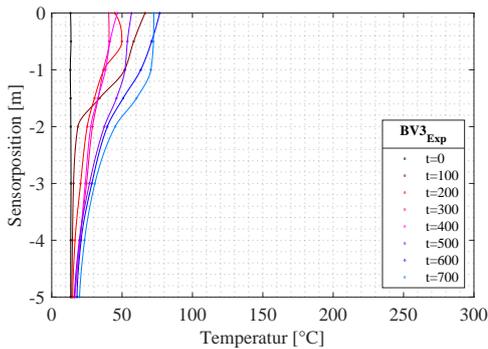
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



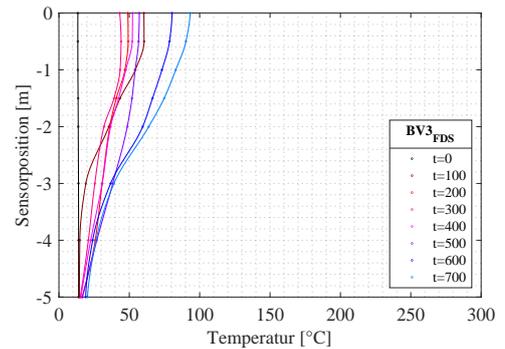
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

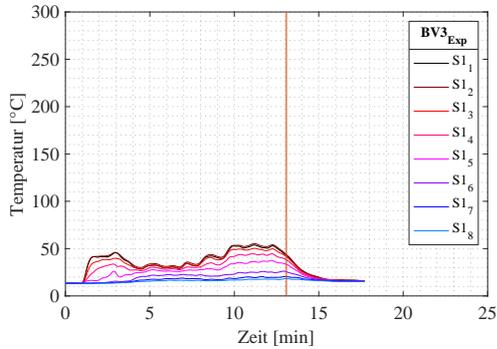


(e) Messwerte MP6

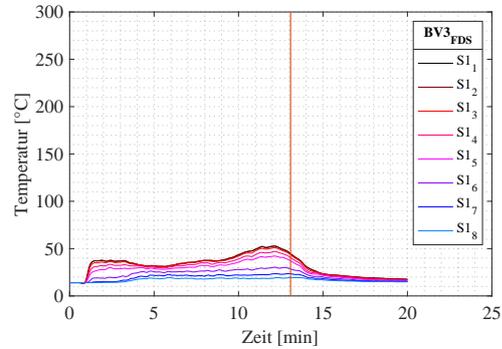


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

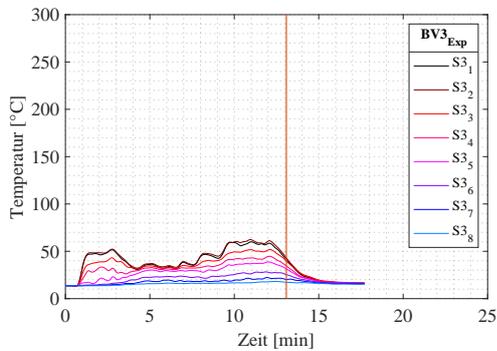
Bild A.119: Brandversuch BV3-fine-USCARC: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



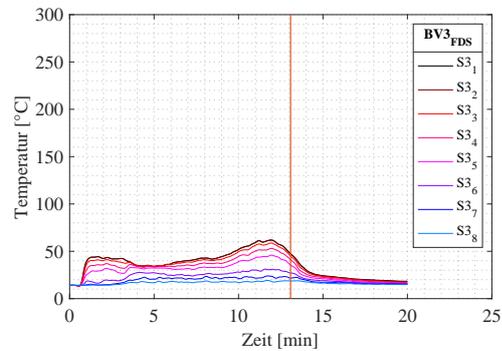
(a) Messwerte S1



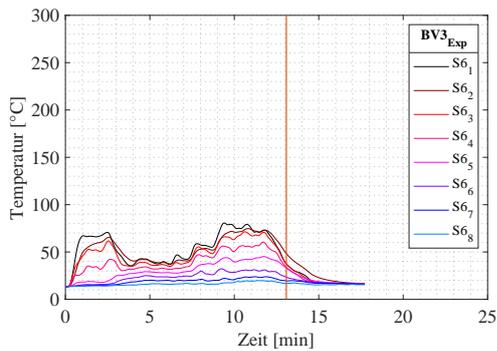
(b) FDS-Simulationsresultate S1



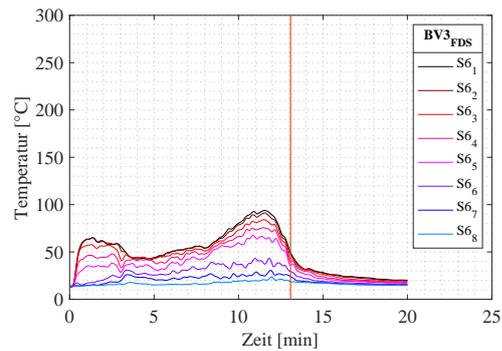
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.120: Brandversuch BV3-fine-USCARC: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6

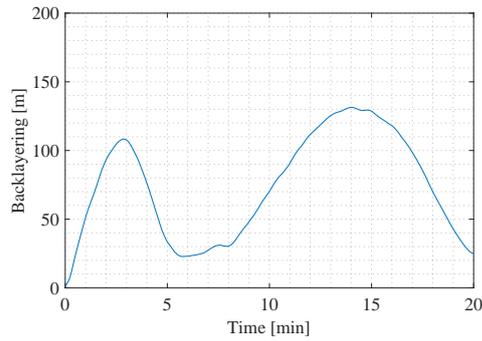


Bild A.121: BV3-fine-USCARC: Backlayering

D.9 Auswertung: *BV3-rough-SCARC*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

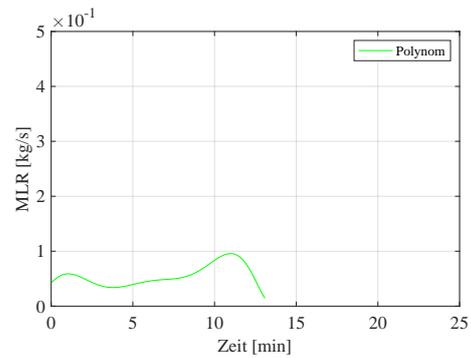
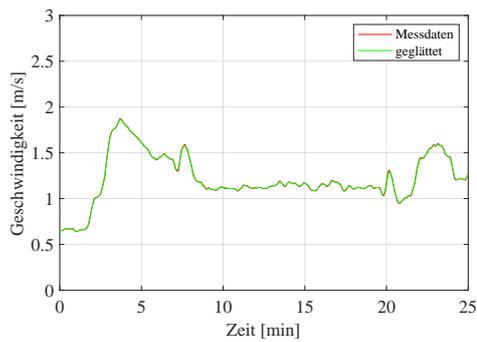


Bild A.122: Anströmgeschwindigkeit

Bild A.123: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

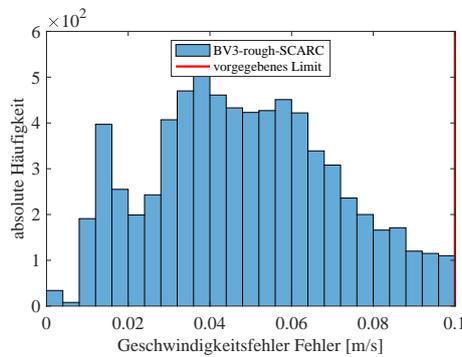


Bild A.124: Geschwindigkeitsfehler

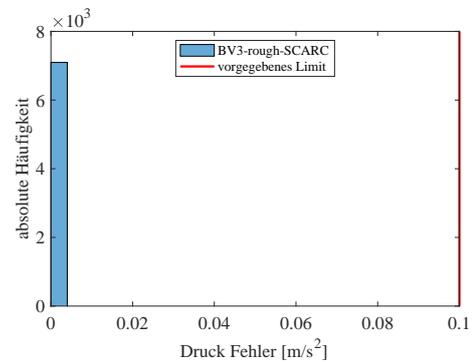


Bild A.125: Druckfehler

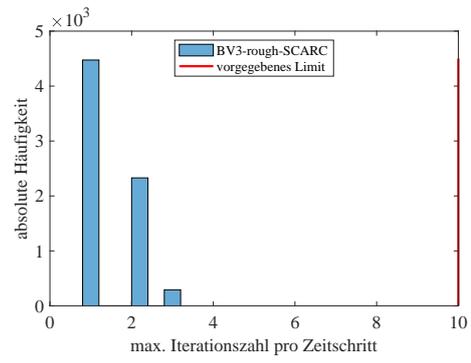
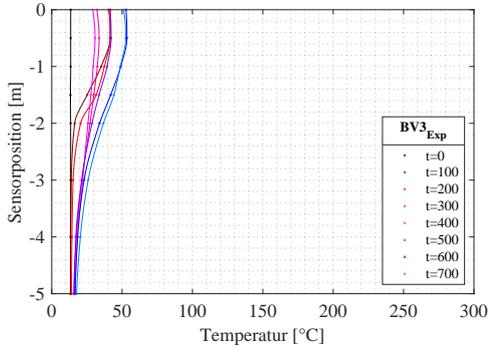
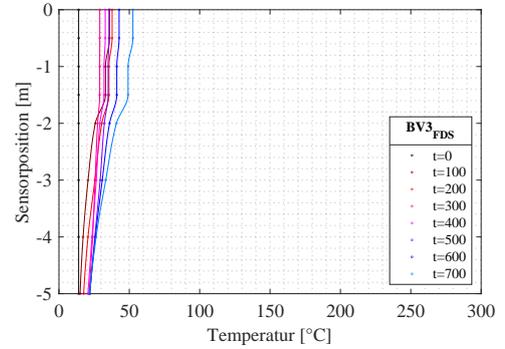


Bild A.126: Iterationen pro Zeitschritt

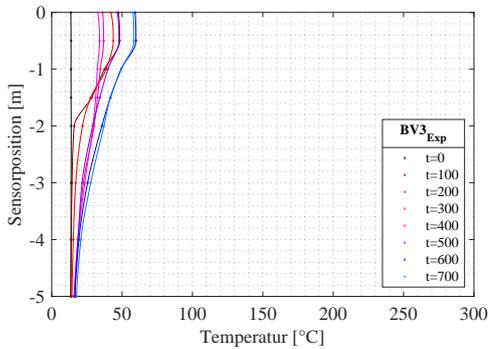
Simulationsresultate



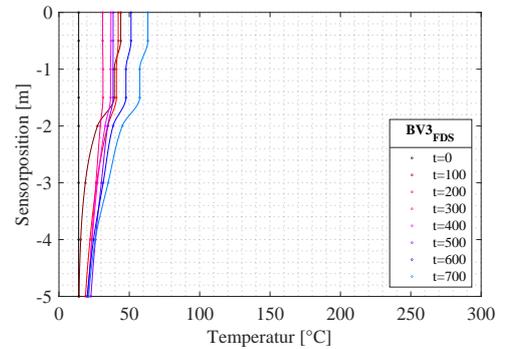
(a) Messwerte MP1



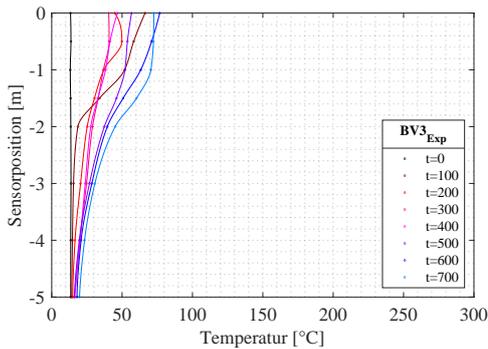
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



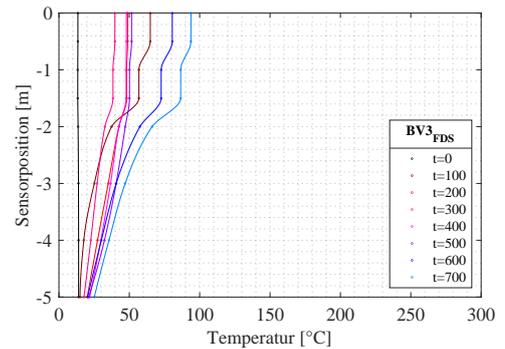
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

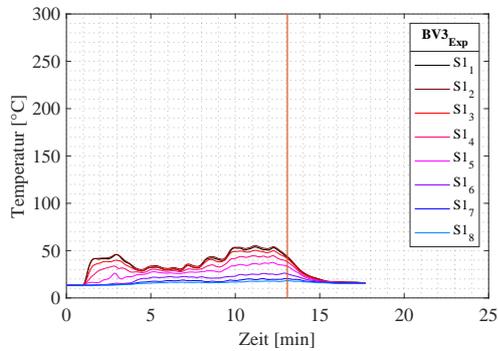


(e) Messwerte MP6

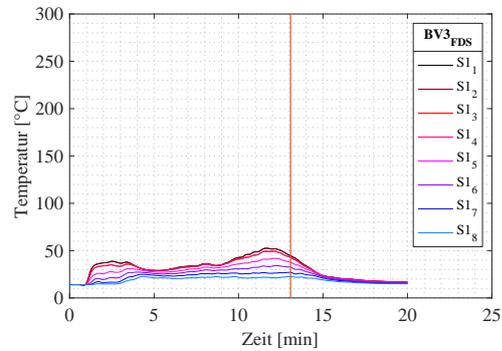


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

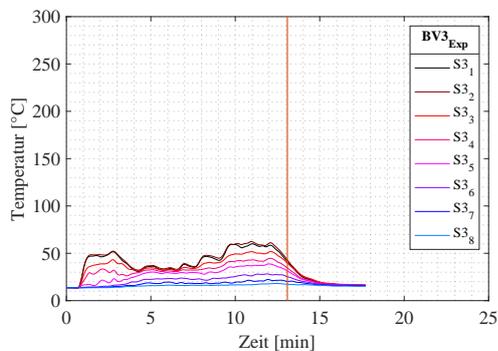
Bild A.127: Brandversuch BV3-rough-SCARC: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationswerte am MP6



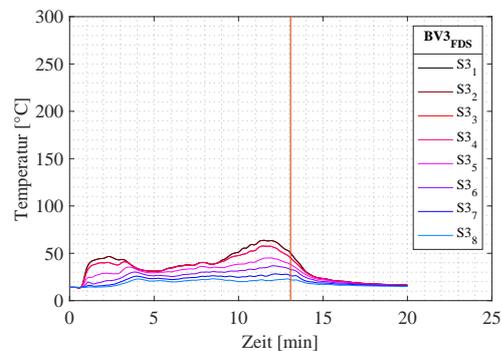
(a) Messwerte S1



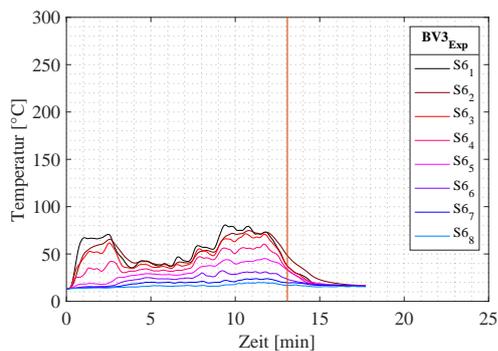
(b) FDS-Simulationsresultate S1



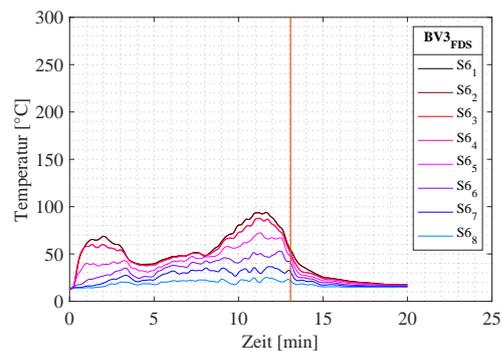
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.128: Brandversuch BV3-rough-SCARC: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6

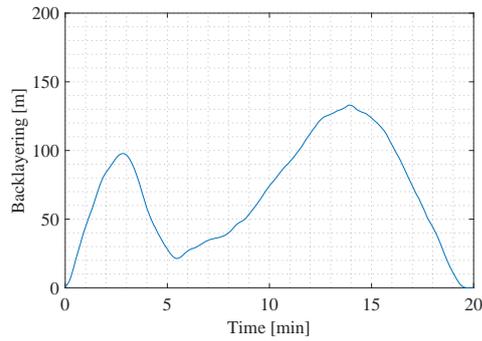


Bild A.129: BV3-rough-SCARC: Backlayering

D.10 Auswertung: *BV3-fine-SCARC*

Vorgaben an FDS durch das Experiment

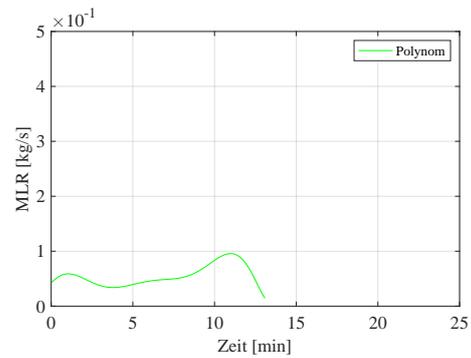
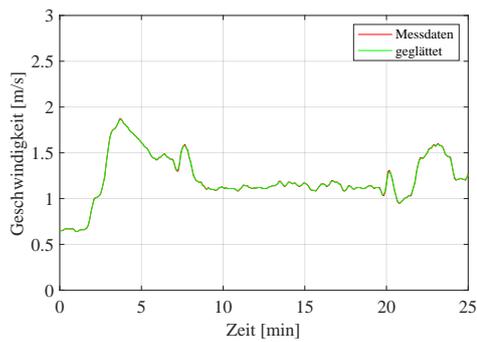


Bild A.130: Anströmgeschwindigkeit

Bild A.131: MLR Vorgabe vom Brandversuch

FDS log files

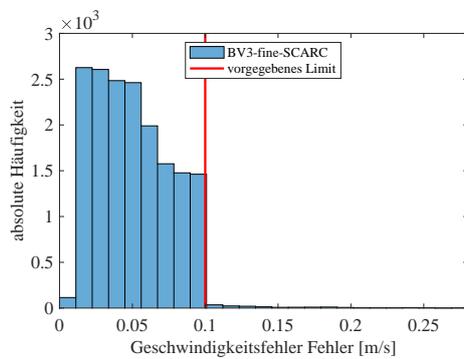


Bild A.132: Geschwindigkeitsfehler

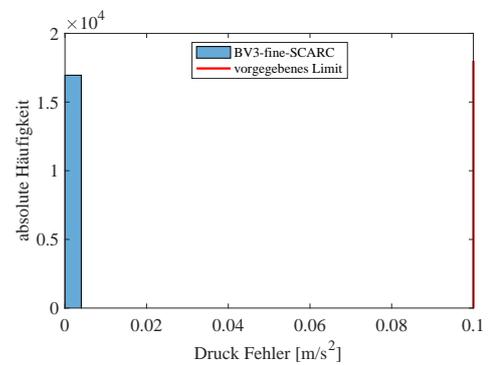


Bild A.133: Druckfehler

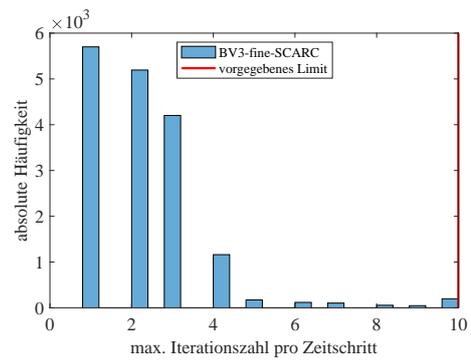
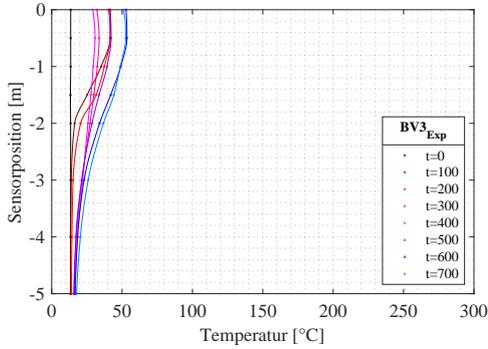
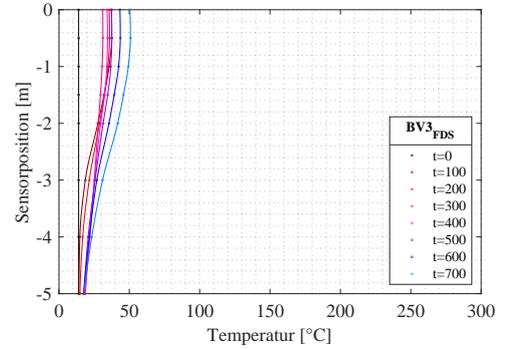


Bild A.134: Iterationen pro Zeitschritt

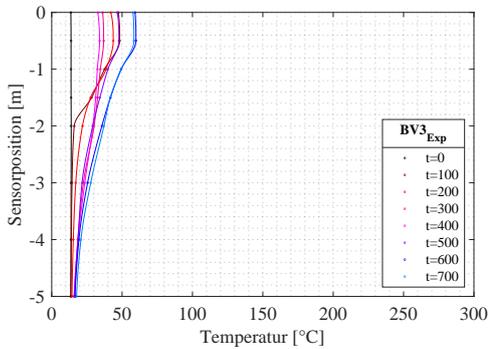
Simulationsresultate



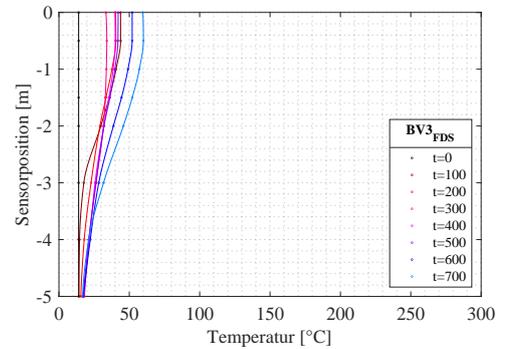
(a) Messwerte MP1



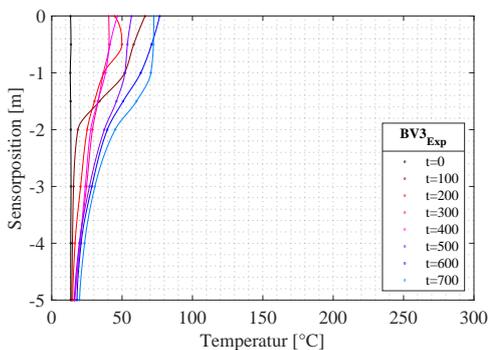
(b) FDS-Simulationsresultate MP1



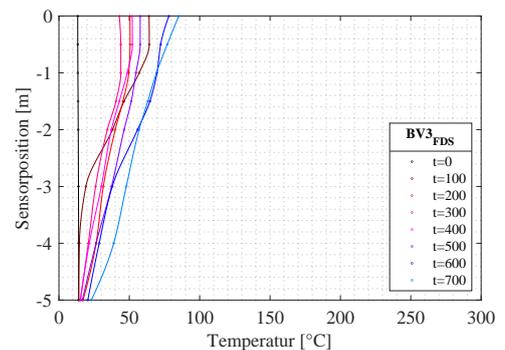
(c) Messwerte MP3



(d) FDS-Simulationsresultate MP3

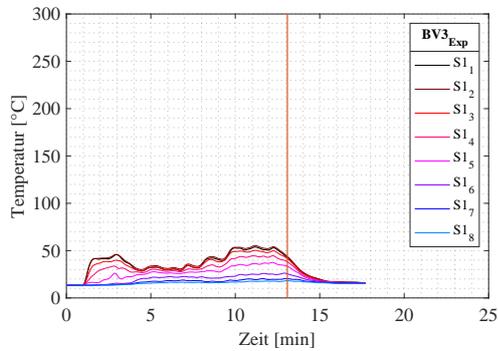


(e) Messwerte MP6

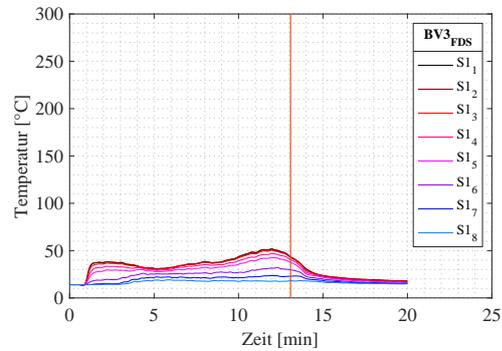


(f) FDS-Simulationsresultate MP6

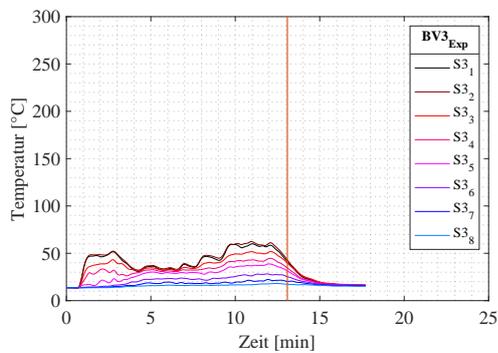
Bild A.135: Brandversuch BV3-fine-SCARC: Höhen-Temperaturprofil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationsergebnisse am MP6



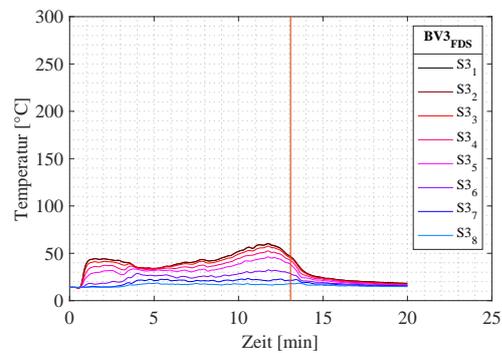
(a) Messwerte S1



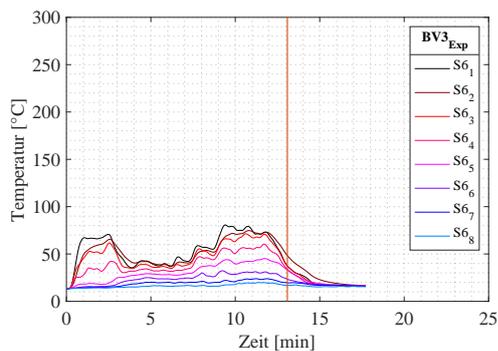
(b) FDS-Simulationsresultate S1



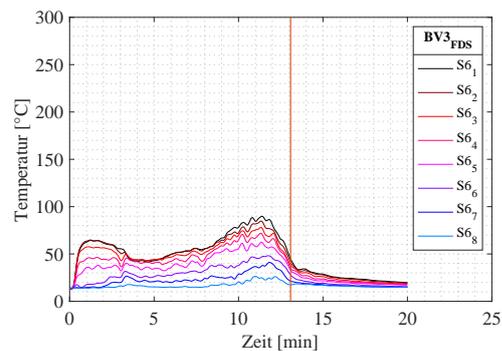
(c) Messwerte S3



(d) FDS-Simulationsresultate S3



(e) Messwerte S6



(f) FDS-Simulationsresultate S6

Bild A.136: Brandversuch BV3-fine-SCARC: Temperatur-Zeit-Profil (a) Messwerte und (b) FDS-Simulationswerte am MP 1, (c) Messwerte und (d) FDS-Simulationswerte am MP3, (e) Messwerte und (f) Simulationenwerte am MP6

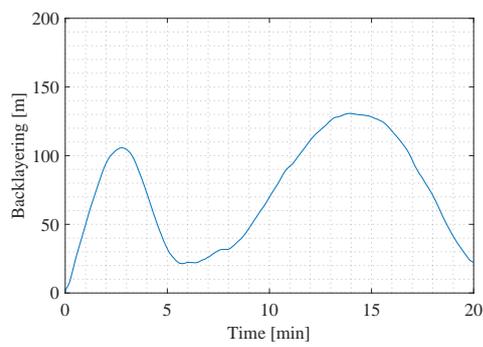


Bild A.137: BV3-fine-SCARC: Backlayering