

15. ANWENDERTREFFEN DER FDS USERGROUP

TAGUNGSBAND

ZUSAMMENSTELLUNG DER VORTRÄGE

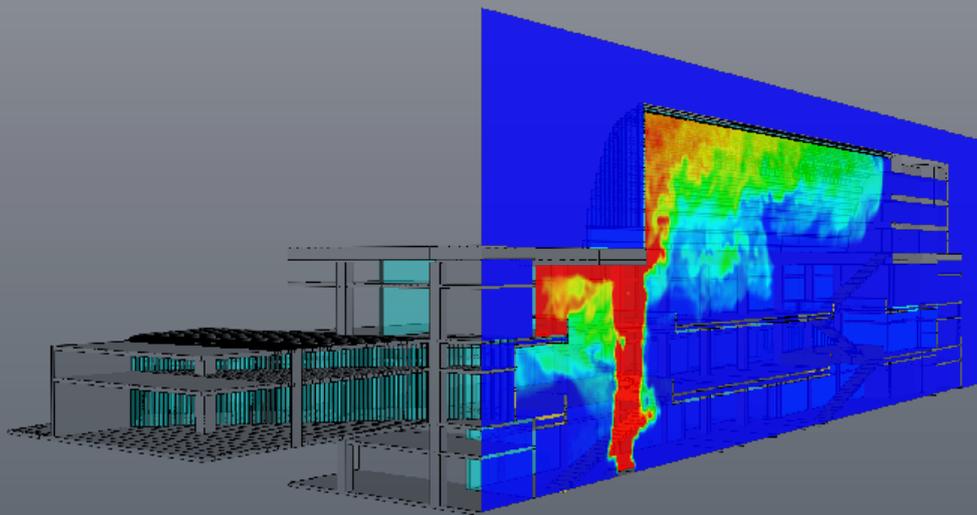
Datum:

4. - 5.11.2021

Ort:

Berlin + Microsoft-Teams

Konferenz



INHALT**Vorträge 4.11.2021**

Analyse zu unterschiedlichen Modellierungsansätzen von strukturellen Brandlasten in Räumen mit Hilfe von CFD-Modellen Manuel Wiesmann	3
Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohrofen Benedikt Bereska	13
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle Kristian Börger	27
The use of lidar scanner for modeling of the geometry in FDS Bjarne Husted	43
Virtual-Reality Smoke Simulation Jan Vogelsang	59
Smart Fire & Smoke Analysis using AR and CFD Analysis Marco Losurdo	67

INHALT**Vorträge 5.11. 2021**

Durchrauchungsfähigkeit von Membrangewebe-Unterdecken Andreas Dahlitz	83
Strömungssimulationen eines Klassenzimmers - Aerosolausbreitung und Lüftungskonzepte im Kontext der Corona-Pandemie Christian Labusch, Pascal Matura, Benjamin Schaufelberger	99
Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen Tristan Hehnen	111
Holzbau - Brandsimulation Gregor Jäger, Manuel Osburg, Benjamin Schröder	121
ARTSS vs. FDS My Linh Würzburger	141
Separabel oder inseparabel - Die FDS Druck-Gleichung in unterschiedlicher Gestalt II Susanne Kilian	163

Manuel Wiesmann

Analyse zu unterschiedlichen Modellierungsansätzen von strukturellen Brandlasten in Räumen mit Hilfe von CFD-Modellen

Abstract:

Der Holzbau gewinnt als energieeffiziente und umweltgerechte Bauweise zunehmend an Bedeutung.

Aktuelle Novellierungen der Landesbauordnungen einzelner Bundesländer und die Veröffentlichung der Muster-Holzbaurichtlinie ermöglichen bereits die Ausführung von Bauteilen aus ungeschütztem Massivholz für Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5.

Im Falle eines Brandereignisses in derartigen Gebäuden, stellen ungeschützte Holzbauteile eine zusätzliche Brandlast (strukturelle Brandlast) dar. Der Einfluss der strukturellen Brandlasten auf den Brandverlauf eines Raumbrandes ist derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Die Berücksichtigung von strukturellen Brandlasten in FDS hinsichtlich der Wärmefreisetzung zur Bestimmung der Brandraumtemperaturen stellt ebenfalls eine Fragestellung dar, die weiterer Untersuchung bedarf.

Der Vortrag bildet den Work-in-Progress Stand einer Masterthesis ab. In der Arbeit wird ein Modellierungsansatz für strukturelle Brandlasten unter Verwendung des komplexen Pyrolysemodells (Complex Pyrolysis Model) von FDS vorgestellt. Die kinetischen Parameter und thermischen Materialeigenschaften von Holz werden im Rahmen eines „Inverse Modelling Process“ (IMP) mit Hilfe des Optimierungstools „Propti“ ermittelt. Dabei werden anhand von Versuchsdaten (TGA, MCC und Cone Calorimeter) sogenannte „effektive Parametersets“ generiert. Die Ermittlung der effektiven Parametersets erfolgt über mehrere Generationen (Berechnungsläufe), wobei innerhalb einer Generation mehr als 1000 Simulationen der TGA, MCC und Cone Calorimeter Versuche durchgeführt werden.

Diese effektiven Parametersets werden anschließend für die Modellierung einer strukturellen Brandlast (Holzdecke) in einem Room-Corner-Test-Modell verwendet.

Durch eine Gegenüberstellung der ermittelten Wärmefreisetzungsrates und der Brandraumtemperaturen aus Realbrandversuch und Simulation werden die Eignung und Anwendungsgrenzen des Modellierungsansatzes dargestellt.

Analyse zu unterschiedlichen Modellierungsansätzen von strukturellen Brandlasten in Räumen mit Hilfe von CFD-Modellen

Manuel Wiesmann | FDS Usergroup 2021

Betreuer: S.Brunkhorst (ibmb TU Braunschweig), B.Schröder (Görtzen Stolbrink & Partner mbB)

Agenda

- Anlass & Methodik
- Optimierung (Inverse Modelling Process „IMP“)
- Ergebnisse der Optimierung
- Validierung

Anlass

- Der Holzbau gewinnt als energieeffiziente und umweltschonende Bauweise zunehmend an Bedeutung
- Bauteile aus ungeschützten Massivholz sind mittlerweile für GK 4 und 5 zulässig
- Ungeschützte Holzbauteile stellen eine zusätzliche Brandlast (strukturelle Brandlast) dar
- Der Einfluss der strukturellen Brandlasten auf einen Raumbrand ist derzeit noch Gegenstand der Forschung
- Wie können strukturelle Brandlasten in FDS berücksichtigt werden?

Methodik

- FDS bietet grundsätzlich drei Varianten zur Modellierung der Wärmefreisetzungsrate:
 - Abbildung über einen vordefinierten zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate
 - Abbildung über einen konstante Wärmefreisetzungsrate unter Vorgabe einer Zünd- und Extinktionstemperatur
 - Abbildung über eindimensionale Pyrolyse
- Generierung effektiver Parametersätze mit dem Optimierungs-Framework „PROPTI“ [1]
 - Inverse Modellierung der kinetischen- und thermophysikalischen Materialparameter anhand von Versuchsdaten
 - Versuchsdaten aus TGA, MCC und Cone-Calorimetire Experimenten der Aalto Univeristy, Espoo, Finland [2]
- Validierung der effektiven Parametersätze durch Modellierung eines Room-Corner-Tests mit Deckenbekleidung aus Fichtenholz
 - Durchgeführt durch das ibmb der TU Braunschweig [3]

Optimierung – Effektive Parametersätze

- Kinetische Parameter (Arrhenius-Gleichung):
 - Präexponentialfaktor A [s^{-1}]
 - Aktivierungsenergie E [J/mol]
 - Reaktionsordnung n

} TGA

- Thermische Materialeigenschaften:

Fichte und Verbrennungsrückstände

 - Dichte
 - Emissivität
 - Spezifische Wärmekapazität
 - Wärmeleitfähigkeit
 - Absorptionskoeffizient
 - Reaktionswärme

} Cone-Calorimeter

- Heat of Combustion und REAC_FUEL:
 - Verbrennungswärme (HOC)
 - Mischung des REAC_FUEL (Pyrolysegas)
 - CH_4 - Anteil
 - C_2H_4 - Anteil
 - N_2 - Anteil
 - CO_2 - Anteil

} MCC

Optimierung

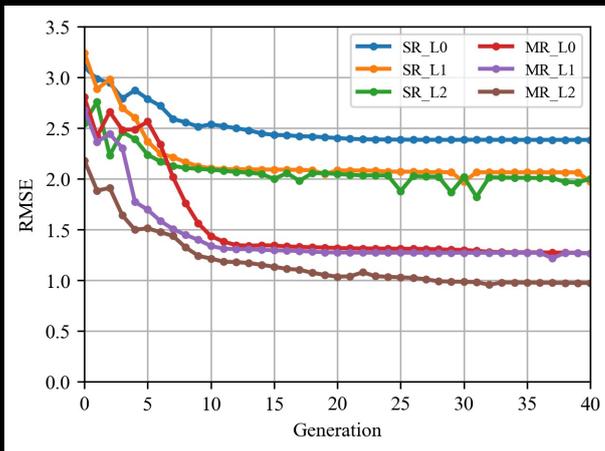
- Single Reaction (SR):
 - Fichte → Rückstand + Pyrolysegas → 24 Parameter = 1176 Simulationen pro Generation

- Multiple-Parallel Reaction (MR):
 - Zellulose → Rückstand + Pyrolysegas
 - Hemizellulose → Rückstand + Pyrolysegas
 - Lignin → Rückstand + Pyrolysegas
 - Extraktstoffe → Rückstand + Pyrolysegas

→ 36 Parameter = 2628 Simulationen pro Generation

- Ermittlung der effektiven Parametersätze erfolgt parallel über drei Laborversuche:
 - TGA → 2 K/min
 - MCC → 37,4 K/min (im Versuch aufgezeichnet)
 - Cone Calorimeter → 50 kW/m²

Ergebnisse der Optimierung – RMSE



▪ Dargestellt wird der RMSE (Root Mean Squared Error) für den besten Parametersatz pro Generation

▪ Index „L“ beschreibt eine Anpassung der Optimierungsgrenzen (Limits)

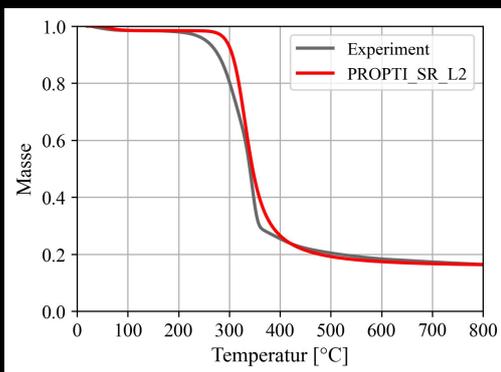
Single Reaction (SR)

▪ 40 Generationen = 141.120 Simulationen

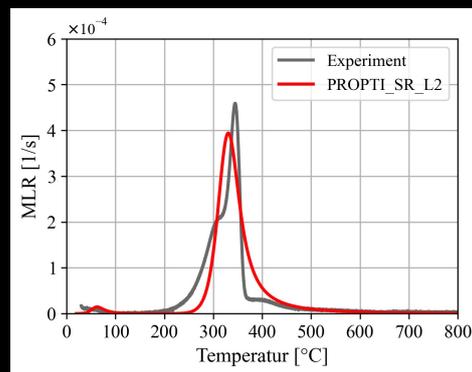
Multiple-Parallel-Reaction (MR)

▪ 40 Generationen = 315.360 Simulationen

Ergebnisse der Optimierung – SR_L2 (TGA)

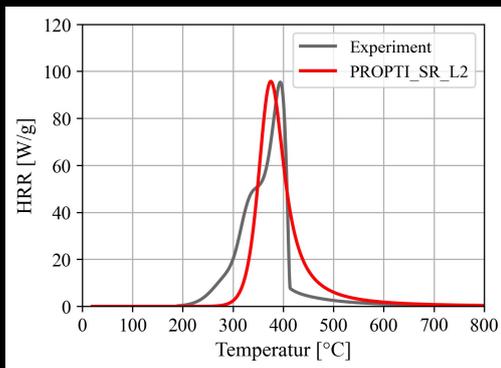


Masse

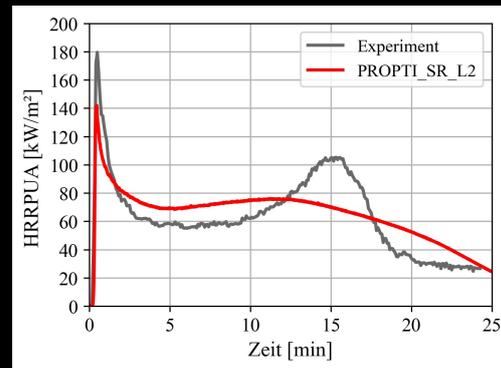


Massenverlustrate

Ergebnisse der Optimierung – SR_L2 (MCC und Cone)

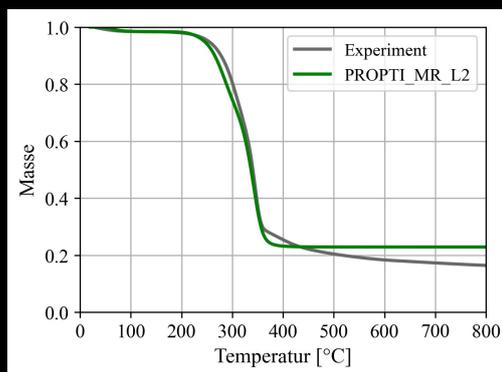


MCC

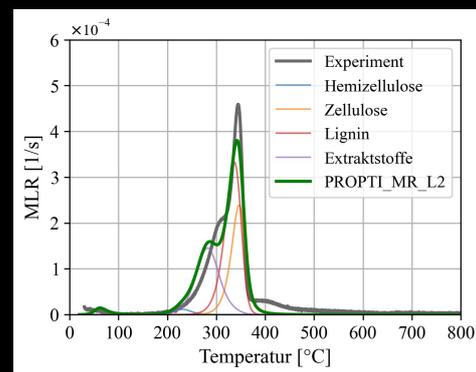


Cone-Calorimeter

Ergebnisse der Optimierung – MR_L2 (TGA)

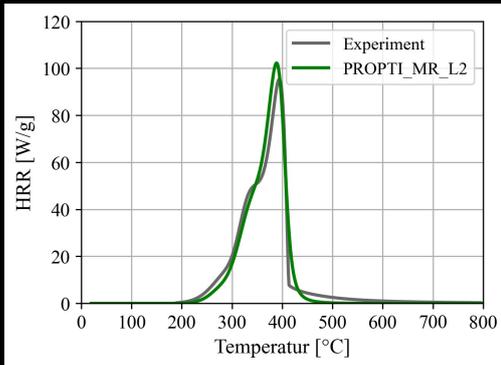


Masse

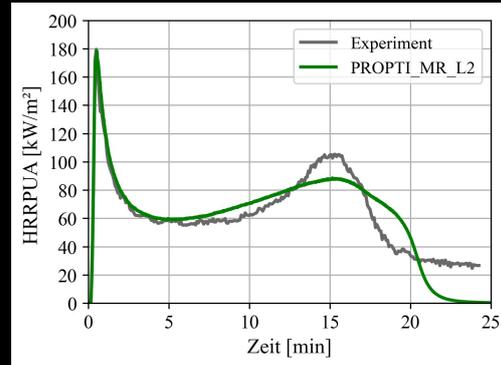


Massenverlustrate

Ergebnisse der Optimierung – MR_L2 (MCC und Cone)



MCC

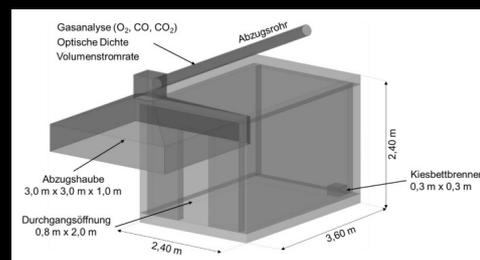


Cone-Calorimeter

Validierung

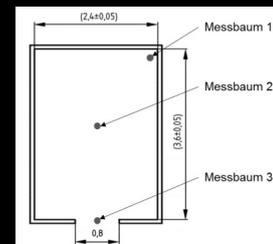
▪ Modellierung eines Room-Corner-Tests (RC_V1)

- Decke bekleidet mit Fichtenholz (Dicke = 4 cm)
- Wände aus Porenbetonelementen
- Brandquelle: Kiesbettbrenner (Raumecke)
 - 100 kW = 0 – 10 Minute
 - 300 kW = 11 – 43 Minute
- FDS Version: FDS 6.7.6-618-g15afdd1-HEAD
 - Gitterauflösung: 0,05 m x 0,05 m x 0,05 m
 - Es wurde keine Gitterstudie durchgeführt

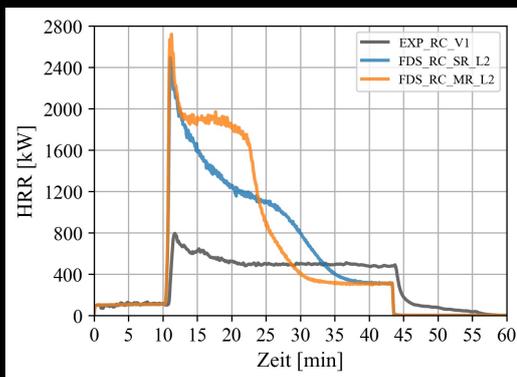


Messstellen (Mantelthermoelemente Ø 3 mm)

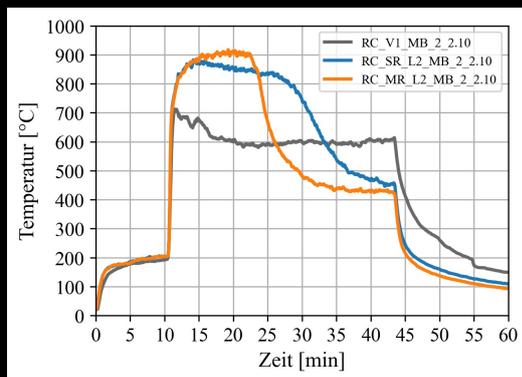
- 2100 mm
- 1820 mm
- 1620 mm
- 1420 mm
- 1220 mm
- 820 mm
- 420 mm



Ergebnisse der Validierung



Wärmefreisetzungsrate



Temperatur an Messstelle 2100 mm

Ergebnisse der Validierung

- Entzündungszeitpunkt zwischen numerischen und experimentellen Untersuchungen stimmt überein
- Wärmefreisetzungsrate und Raumtemperatur wird im FDS-Modell extrem überschätzt
- Die strukturelle Brandlast wird für beide Reaktionsschemata zu schnell und vollständig aufgebraucht
- Reaktionsschema SR bildet den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und Temperatur besser ab als MR

Fazit

Effektive Parametersätze aus Laborversuchen führen in realmaßstäblichen Brandversuchen zu keiner hinreichenden Übereinstimmung zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen

- Wärmefreisetzungsraten und Raumtemperatur werden in der numerischen Simulation extrem überschätzt
- Weitere Untersuchungen hinsichtlich des Optimierungsprozesses sind notwendig
 - Berücksichtigung und Kombination weiterer Heizraten und Wärmeströme

Reaktionsschema SR bildet den Verlauf der Wärmefreisetzungsraten besser ab als Reaktionsschema MR

- Reaktionsschema MR ist mit einem wesentlichen höheren Modellierungs- und Optimierungsaufwand verbunden
- Unsicherheiten aufgrund der hohen Anzahl an benötigten Parametern bei Reaktionsschema MR
- Zukünftig sind zunächst vertiefende Untersuchungen des Reaktionsschemas SR sinnvoll

Vielen Dank!

Literatur

- (1) Arnold, L.; Hehnen, T.; Lauer, P.; Trettin, C.; Vinayak, A. PROPTI—A Generalised Inverse Modelling Framework. In Proceedings of the Third European Symposium on Fire Safety Sciences ESFSS 2018, Nancy, France, 12–14 September 2018
- (2) A. Rinta-Paavola und S. Hostikka, "A model for the pyrolysis of two Nordic structural timbers," *Fire and Materials*, 2021, issn: 0308-0501. doi:10.1002/fam.294
- (3) S. Brunkhorst und J. Zehfuß, "Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverlauf von Raumbänden mit immobilien Brandlasten," in 6th Symposium Structural Fire Engineering - TU Braunschweig, 2019

Benedikt Bereska:

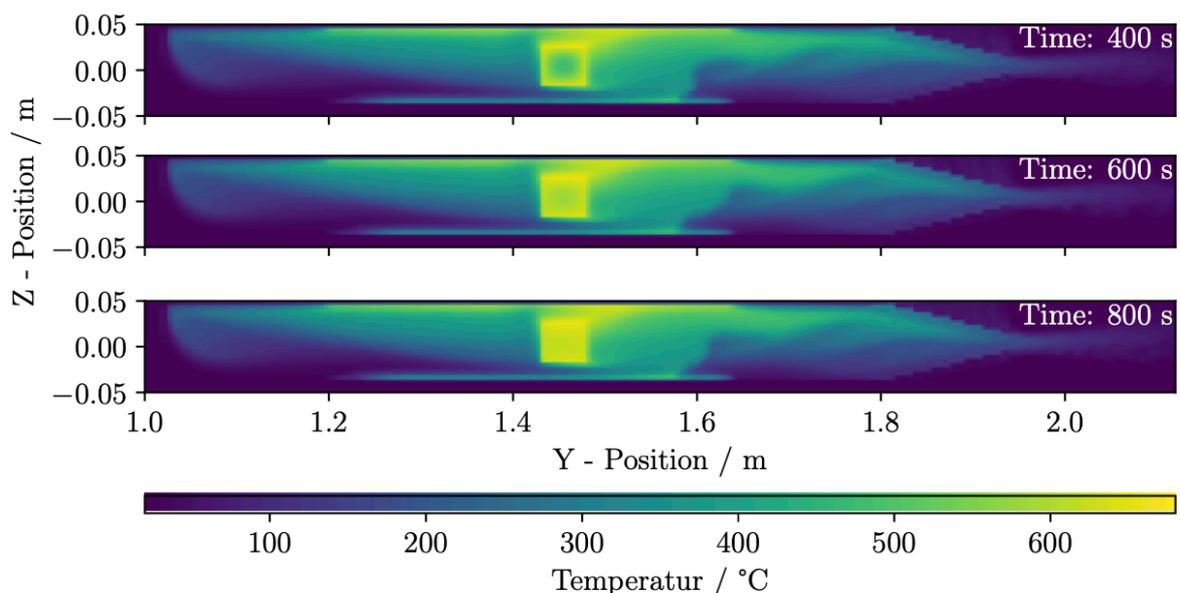
Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohrofen

Abstract:

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Rohrofen modelliert, der am Forschungszentrum Jülich weiterentwickelt wird, sodass die Massenverlustraten gemessen werden können. Die in diesem Ofen durchgeführten Experimente dienen der Validierung des Modells. Ziel der Rohrofenversuche ist es, das Verhalten von Kabeln unter thermischer Belastung zu erfassen. Der Vorteil des Rohrofens gegenüber herkömmlichen Verfahren, wie TGA- und Cone Experimenten, ist eine quasi zeitliche Auflösung der Messdaten. Diese Quasi zeitliche Auflösung wird durch einen kontinuierlichen Vorschub der Probe in die Heizzone erreicht. Eine Herausforderung bei der Modellierung des Rohrofens ist jedoch seine Geometrie, da diese selbst bei hoher Auflösung des Berechnungsnetzes nur unzureichend dargestellt wird.

Das Modell wird mit dem Fire Dynamics Simulator in der Version 6.7.6-618-g15afdd1 berechnet. Um runde Geometrien besser darstellen zu können, werden die komplexen Geometrien anstelle der üblichen Diskretisierung auf kubische Zellen des Berechnungsnetzes verwendet.

Der Wärmeübergang wird mit dem experimentellen System verifiziert, hierzu wird ein strömungsgeschwindigkeitsabhängiger Temperaturgradient im Glas bestimmt, da die Modellierung des Strahlungsdurchgangs durch das Glas nicht möglich ist. In dem Modell wird für die PMMA Probe 3D Wärmeleitung verwendet. Diese wird im zweiten Schritt pyrolysiert. Um die Pyrolyse so gut wie möglich abzubilden, werden die Eingangsparameter für das Modell mit inverser Modellierung aus Cone- und TGA-Experimenten verschiedener Bestrahlungsstärken bzw. Heizraten abgeleitet, wobei propti, ein auf SPOTPY basierendes Skriptset, für die Optimierung verwendet wird.





Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohröfen

Benedikt Bereska



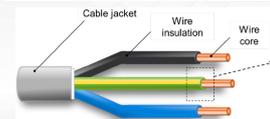
BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Inhalt

- Motivation/Einleitung
- Vorstellung des Experimentes
- Was sind GEOMs?
- Modellierung des Ofens
- Ausblick: Modellierung von Pyrolyse
- Zusammenfassung

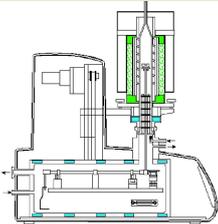
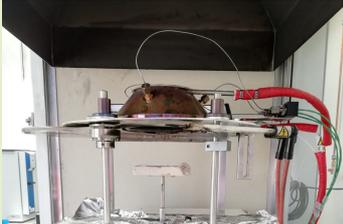
Motivation/Problemstellung

- Potenzielle Brandherde: Wohngebäude, Kernkraftwerke, Flugzeuge, Raumfahrzeuge,...
- Anspruchsvolles kombiniertes System aus Metallkern und Isolierung
- Diskrepanz zwischen experimentellen Daten und Simulationen - Unterschiedliche Randbedingungen
- Untersuchung der Pyrolyse von Kabelbränden
- Experimente mit räumlich und zeitlich aufgelösten Informationen zur Verbesserung der Modellierung



[1]

Überblick über Experimente

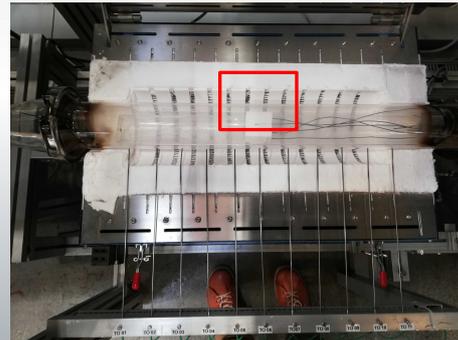
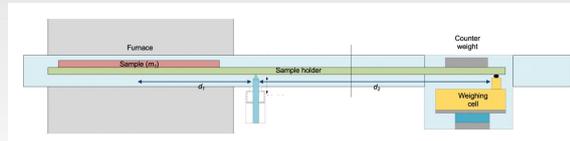
Thermogravimetrischer Analysator (TGA)	Cone-Kalorimeter	Rohrfen
Probengröße: mg-Bereich	Probengröße: 10 cm x 10 cm	Probengröße: 60 cm
		
<ul style="list-style-type: none"> • Massenverlustrate • Temperaturunterschied ? Probengröße ? Isotherm 	<ul style="list-style-type: none"> • Massenverlust • CO, CO₂, O₂ → HRR ? Offen → RDB nicht kontrolliert 	<ul style="list-style-type: none"> • CO, CO₂, O₂ (und H₂) • Probentemperatur • Geschossen → kontrollierte RDB • Massenverlust (in Bearbeitung)

Vorstellung des Experimentes

- Verfahrbarer Probenträger
- Rohr und Probenträger aus Quarzglas
- Ofen Heizrate maximal 100 K/h
- Definierter Gasstrom (<20 l/min, N₂, O₂)
- Temperaturmessung örtlich diskret aufgelöst

Modifikation in Umsetzung:

- Messung der Massenverlustrate
- Massenspektrometrie im Abgas

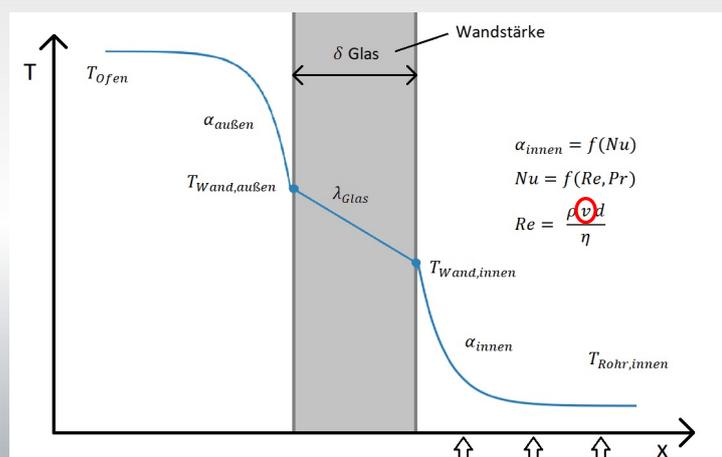


[4]

Wärmeübergänge schematisch

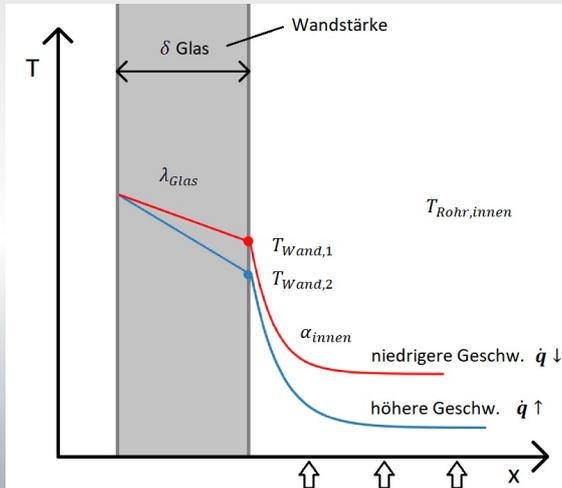
Wärmeübergangskoeffizient α hängt von der Strömungsgeschwindigkeit v ab

Annahme: keine Strömung außen
→ $\alpha_{außen}$ kann vernachlässigt werden



Wärmeübergänge Schematisch

Höhere Strömungsgeschwindigkeit
 → höhere Wärmestromdichte \dot{q}
 → Verteilt sich auf größere
 Stoffmenge → niedrigeres
 Temperaturniveau

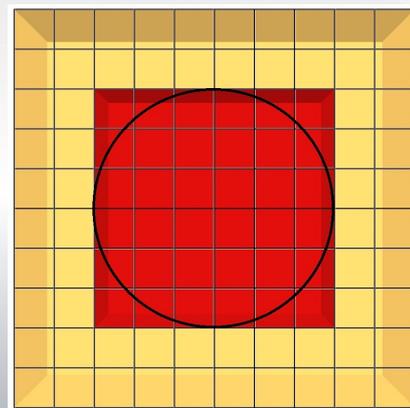


Was sind GEOMs?

Das Problem: Das Runde soll ins Eckige!

OBST:

- Rundheit hängt vom Mesh ab
- Basiert auf Würfeln

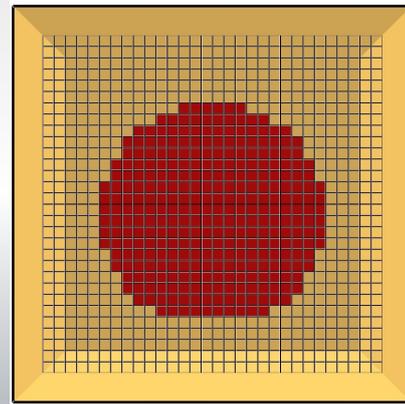


Was sind GEOMs?

Das Problem: Das Runde soll ins Eckige!

OBST:

- Rundheit hängt vom Mesh ab
- Basiert auf Würfeln



Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohrfen
Benedikt Bereska

Seite 9



Was sind GEOMs?

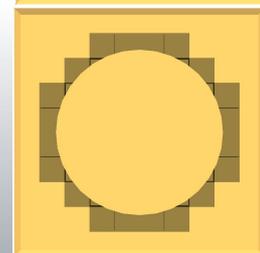
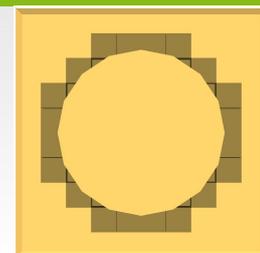
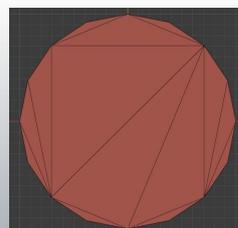
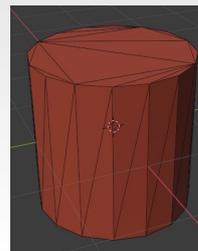
Das Problem: Das Runde soll ins Eckige!

OBST:

- Rundheit hängt vom Mesh ab
- Basiert auf Würfeln

GEOM:

- Glätte Mesh unabhängig wählbar
- Basiert auf dreieckigen Flächen
- Math: Interpolation anhand der Volumenschwerpunkte [3]
- Zusätzliches Programm erforderlich hier: BlenderFDS



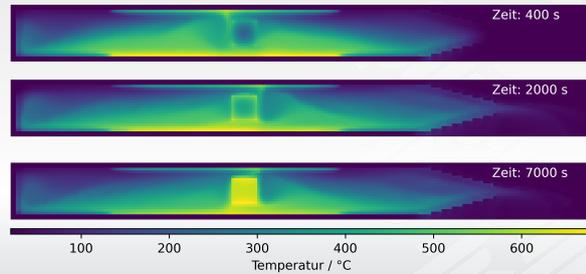
Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohrfen
Benedikt Bereska

Seite 10



Rohröfen - Überprüfung der Wärmeübergänge

- Modell auf das wesentliche reduzieren
 - Rohrgeometrie
 - Lufteinlass wird flächig angenommen (Verkürzung des Rohres)
 - Heizelemente an Innenwand
 - Heizelemente folgen Temperaturverlauf aus Experiment
 - Inerte Probe – OBST für HT3D (Temperaturmessung im Mittelpunkt)



Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohröfen
Benedikt Bereska

Seite 11

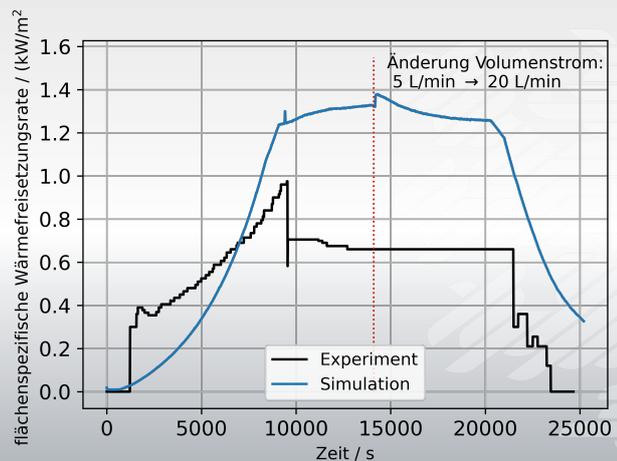


Vergleich der Wärmefreisetzung

Abgegebene Wärmemenge, basierend auf:

- Aufgenommene Leistung des Ofens

➤ Ungeeignet

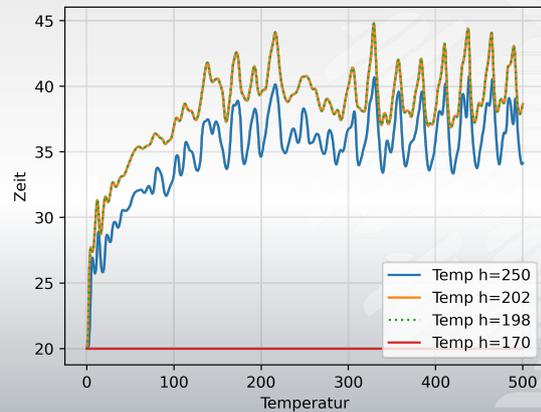
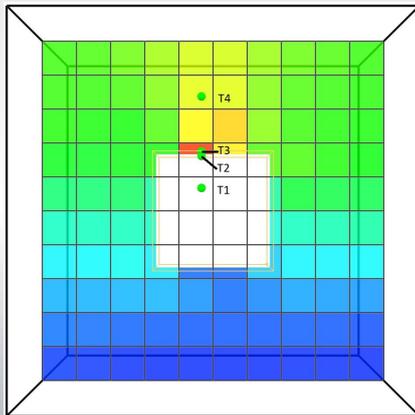


Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohröfen
Benedikt Bereska

Seite 12



GEOM Cut-cells



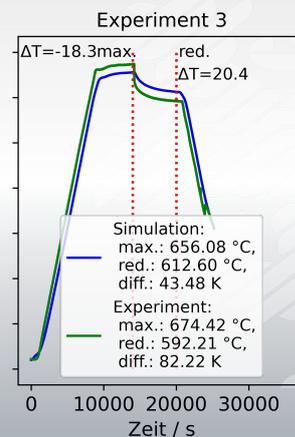
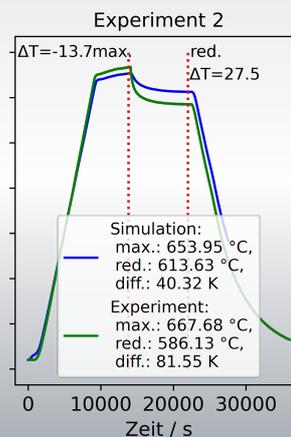
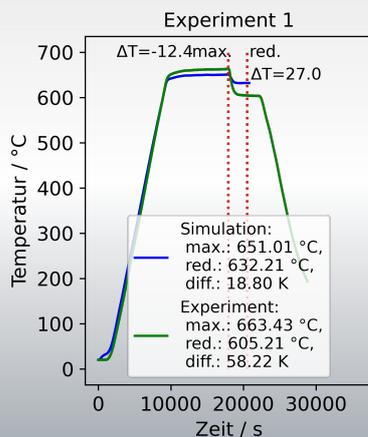
Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohrfen
Benedikt Bereska

Seite 13



Rohrfen - Überprüfung der Wärmeübergänge

Oberfläche beschichtet (kein direkter Strahlungsdurchgang)



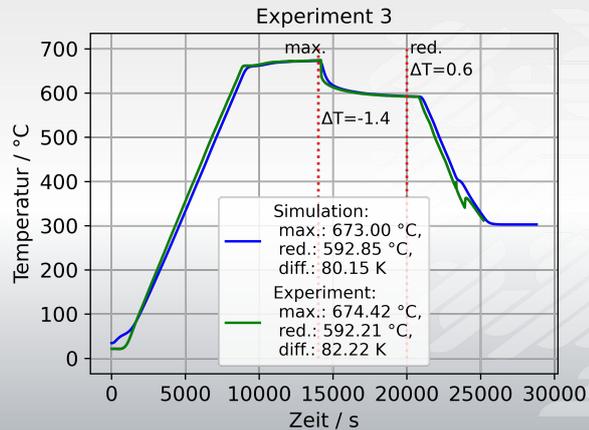
Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohrfen
Benedikt Bereska

Seite 14



Rohröfen - Überprüfung der Wärmeübergänge

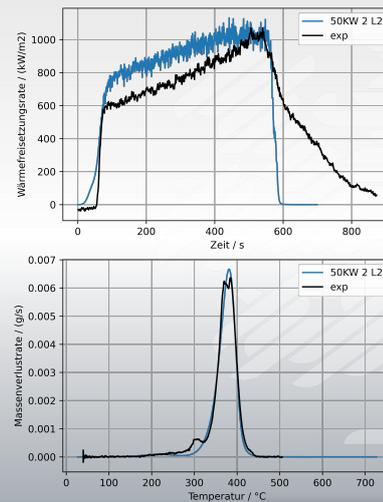
Nach Korrektur für Temperaturgradienten im Glas, Kann eine gute Übereinstimmung erzielt werden.



Ausblick: IMP Iterationen

Methode: inverse Modellierung mit PROPTI

- Für Modellierung werden Grenzen für Parameter angenommen
- Grenzen werden wiederholt angepasst
- Wenn Wert am Rand des vorgegebenen Intervalls wird Intervall vergrößert
- Überprüfung der Übereinstimmung auf Basis von RMSE und Grafiken



Zusammenfassung

Zusammenfassung:

Aktueller Stand:

- Geometrie mit Strömungsfeld wurde modelliert
- Wärmeübertragungsmechanismen wurden validiert (Leitung, Strahlung, Konvektion)

Ausblick:

- Ermitteln eines geeigneten Parametersets
- Simulation des Rohrofens unter Berücksichtigung von Pyrolyse (PMMA, Kabel, Holz, etc.)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

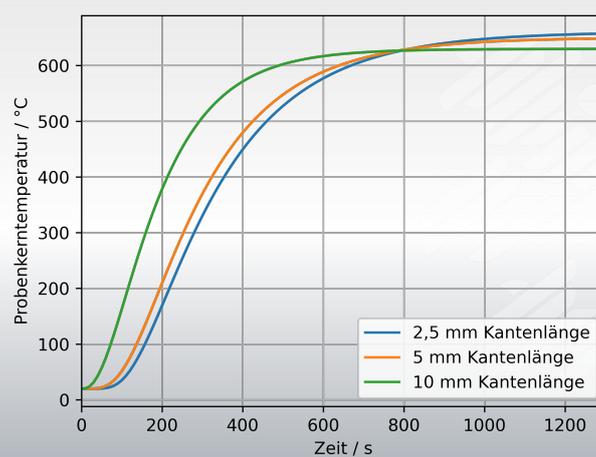


Quellen

- [1] Huang X, Nakamura Y (2020) *A review of fundamental combustion phenomena in wire fires*. Fire Technol 1–32. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00918-5> ,
- [2] LINSEIS STA PT1600 *Thermowaage Bedienungsanleitung*, Linseis-Messgeräte. Selb.
- [3] Vanella, M.; McDermot, R. J. (2019) *Unstructured Geometry Technical Notes*
- [4] Bild: Karen De Lannoye
- [5] Arnold et Al. (2019) *Application cases of inverse modelling with the PROPTI framework*

Gitterstudie

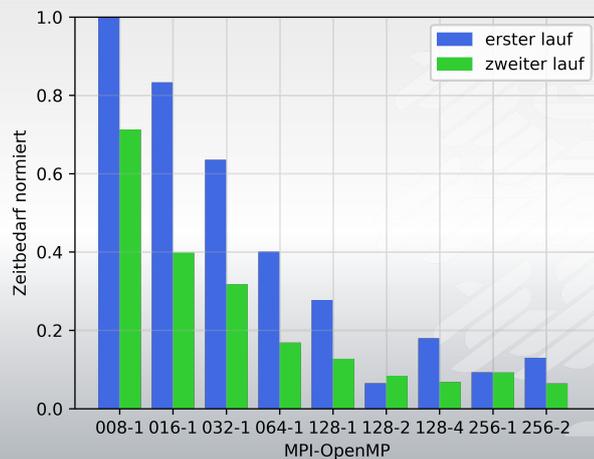
Abwägung:
Genauigkeit gegen Zeitbedarf



Bestimmung der idealen Nutzung von Rechenkapazität

Bestimmung der Idealen
Abstimmung für:

- minimale Rechenzeit
- Vermeidung von Ressourcenverschwendung
- Hier:
`SHARED_FILE_SYSTEM=T`

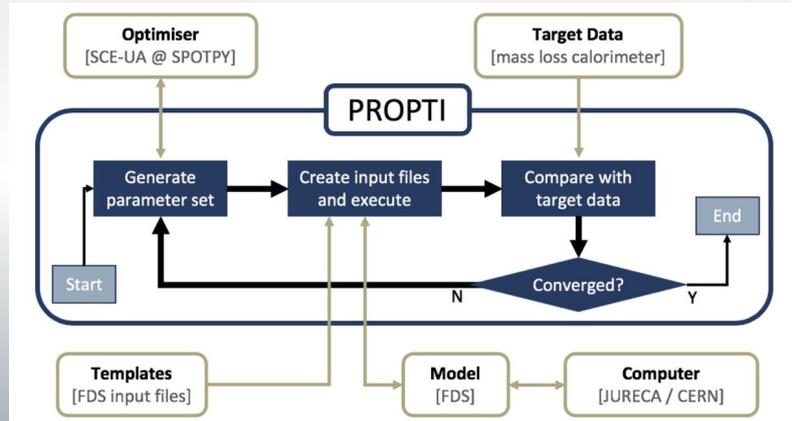


Variierte Parameter

- 3 PMMA Bestandteile (n,A,E,HOR)
 - Variation: Feste Arrhenius-parameter
- Ein Verbrennungsrückstand
- Dichte, Emissivität, Absorptionskoeffizient
- Zusammensetzung Pyrolysegas (N₂, CO₂, CH₄, C₂H₄)
- RAMPs zu Wärmekapazität und -leitfähigkeit

Ausblick: Pyrolysemodellierung - propti

Was ist Propti?



[5]

Kristian Börger:

Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

Abstract:

Die Sichtweite im Brandfall wird als bemessungsrelevante Kenngröße in leistungsorientierten Sicherheitskonzepten durch numerische Modelle in der Regel erheblich unterschätzt. Experimentelle Untersuchungen zur Validierung legen nahe, dass das Phänomen insbesondere den dem Modell zugrunde liegenden Eingangsparametern geschuldet ist. Als wesentliche Einflussgrößen sind hier der z.B. der massespezifische Extinktionskoeffizient sowie die Rußausbeute zu nennen, die in der Regel in kleinmaßstäblichen Versuchsreihen ermittelt werden und infolge von Skalierungseffekten eine zum Teil erhebliche Volatilität aufweisen. Die Berücksichtigung von Aerosoleffekten wie Deposition und Agglomeration scheint die Berechnung der lichttrübenden Wirkung von Brandrauch durch FDS zu verbessern; eine zufriedenstellende Annäherung an die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen lässt sich allerdings lediglich unter gewissen Randbedingungen erreichen. Um entsprechende Einflüsse hinreichend genau untersuchen zu können ist es erforderlich Parameter wie die Partikeldichte und den Extinktionskoeffizienten auf räumlich und zeitlich aufgelöster Ebene experimentell zu erheben. Mit dem fotometrischen Mess- und Analyseverfahren LEDSA wurde bereits ein potenzielles Werkzeug zur lokalen Bestimmung von letzterem mit Hilfe eines optisch-geometrischen Schichtenmodells auf Grundlage des Lambert-Beer'schen Gesetzes vorgestellt.

Der Beitrag soll potenzielle Fehlerquellen und Ungenauigkeiten bei der numerischen Modellierung von Sichtweiten aufzeigen. Im Zuge dessen werden die relevanten Parameter und insbesondere die dafür in FDS hinterlegten Standardwerte hinsichtlich ihres Ursprungs und ihrer Validität bei großmaßstäblichen Bränden kritisch hinterfragt. Darüber hinaus erfolgt eine Erläuterung der Modelle zur Berücksichtigung von Deposition und Agglomeration sowie deren Anwendungsbereiche- und -grenzen. Die Einflüsse der genannten Parameter und Modelle werden anhand von parametrischen Simulationsberechnungen von Testbränden in Anlehnung an die EN 54 demonstriert. Zur anschließenden Validierung der durchgeführten Berechnungen werden die Messdaten aus Vergleichsexperimenten mit etablierter optischer Messtechnik (MIREX) sowie dem fotometrischen Mess- und Analyseverfahren LEDSA herangezogen. Die Erläuterung beider Verfahren erfolgt im Rahmen des Vortrags hinsichtlich ihrer Funktionsweise sowie der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Simulationsberechnungen.

Ziel des Vortrags ist es, Anwender von FDS für die Sensitivität der Eingangsgrößen bei der Modellierung von Sichtweiten im Rahmen leistungsorientierter Sicherheitskonzepte zu sensibilisieren und dazu anzuregen, die Verwendung von Standardwerten kritisch zu hinterfragen. Des Weiteren soll er zum Erfahrungsaustausch über die Anwendung komplexer Ansätze der Modellierung und der Validierung durch experimentelle Untersuchungen ermutigen.

Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken



JÜLICH
Forschungszentrum

Inhalt

1. Was ist Sichtweite?
2. Einflussgrößen auf die Rauchdichte
3. Agglomeration und Deposition
4. LEDSA – Ein photometrisches Verfahren zur Bestimmung von Sichtweiten
5. Simulation vs. Realität
6. Zusammenfassung und Ausblick

15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

2



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken



JÜLICH
Forschungszentrum

Inhalt

1. Was ist Sichtweite?
2. Einflussgrößen auf die Rauchdichte
3. Agglomeration und Deposition
4. LEDSA – Ein photometrisches Verfahren zur Bestimmung von Sichtweiten
5. Simulation vs. Realität
6. Zusammenfassung und Ausblick

15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

3



Was ist Sichtweite?

Partikelgrößenverteilung

EXIT

Rauchdichte

EXIT

Gesetz von Jin erlaubt die lokale Berechnung der Sichtweite mit CFD-Modellen:

$$V = \frac{C}{\sigma}$$

dabei gilt:

- C: dimensionslose Konstante, abhängig vom betrachteten Objekt [-]; C = 8 für selbstleuchtende Lichtzeichen, C = 3 für reflektierende Lichtzeichen
- σ : Extinktionskoeffizient[1/m]

σ [1/m]	V [m] (C=8)	V [m] (C=3)	Series
0.2	40	13.3	MIREX (blue triangle)
0.6	13.3	5	FDS (green circle)

15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

4



Inhalt

1. Was ist Sichtweite?
2. Einflussgrößen auf die Rauchdichte
3. Agglomeration und Deposition
4. LEDSA – Ein photometrisches Verfahren zur Bestimmung von Sichtweiten
5. Simulation vs. Realität
6. Zusammenfassung und Ausblick

Einflussgrößen der Rauchdichte

- Sichtweite ist die bemessungsrelevante Kenngröße in leistungsorientierten Brandschutznachweisen
- Transmission T hängt vom massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m , der Rauchdichte $\rho \cdot Y_s$ und der Weglänge des Lichts Δ_s durch ein homogenes Medium ab

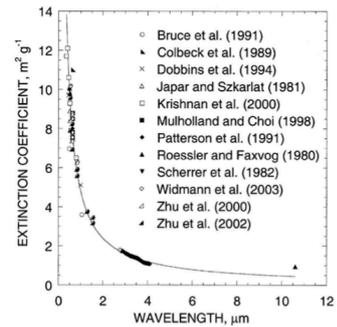
$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\tau) \quad \tau = \underbrace{K_m \cdot \rho \cdot Y_s}_{\sigma} \cdot \Delta_s = \sigma \cdot \Delta_s$$

- K_m und Y_s werden i.d.R durch optische Messungen in kleinskaligen Versuchen ermittelt (z.B. Cone-Kalorimeter) und sind nicht unabhängig voneinander



Massenspezifischer Extinktionskoeffizient

- Mullholland und Croarkin:
Nahezu einheitlicher massenspezifischer Extinktionskoeffizient von $K_m = 8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ für Messungen bei $\lambda = 633 \text{ nm}$ in sieben Experimenten mit 29 verschiedenen Brennstoffen
- Widmann: Korrelation von λ und K_m
 $K_m = 4.8081\lambda^{-1.0088}$
($K_m = 7175 \text{ m}^2/\text{kg}$ bei $\lambda = 633 \text{ nm}$)



Widmann, Evaluation of the plastic mean absorption coefficient for radiation transport through smoke, 2003

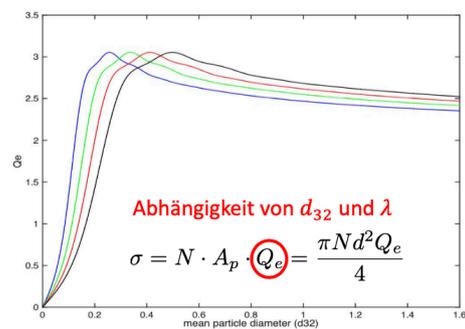
15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

7



Einfluss der Partikelgrößenverteilung

- σ kann auf Grundlage der Mie-Theorie als Funktion der Wellenlänge und des Partikeldurchmessers sowie in Abhängigkeit von der Partikeldichte bestimmt werden
- Q_e hängt im Wesentlichen vom mittleren Durchmesser d_{32} und nicht von der exakten Partikelgrößenverteilung ab



Flörke-Beyen et al. Obtaining Additional Smoke Characteristics Using Multi-Wavelength Light Transmission Measurements, 2015

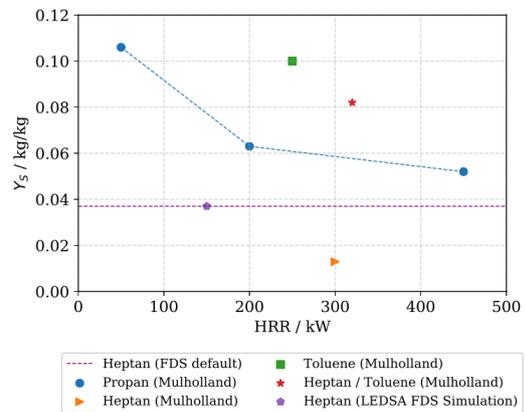
15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

8



Rußausbeute

- Literaturwerte für Rußausbeute weisen eine große Bandbreite auf
- Untersuchungen legen nahe, dass die Rußausbeute mit wachsender Energiefreisetzung abnimmt



15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

9



Inhalt

1. Was ist Sichtweite?
2. Einflussgrößen auf die Rauchdichte
3. Agglomeration und Deposition
4. LEDSA – Ein photometrisches Verfahren zur Bestimmung von Sichtweiten
5. Simulation vs. Realität
6. Zusammenfassung und Ausblick

15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

10



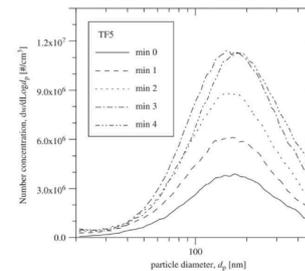
Agglomeration und Deposition

Agglomeration (Alterungsprozess von Aerosolen)

- Vergrößerung von Partikeln durch Zusammenballen infolge Kollision
- Verbreiterung und Verschiebung der Partikelgrößenverteilung

Deposition (Ablagerungsprozesse von Aerosolen)

- Turbulente Deposition
- Thermophorese
- Deposition durch Gravitation



Keller et al. On-line determination of the optical properties of particles produced by test fires, 2006

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2}$$

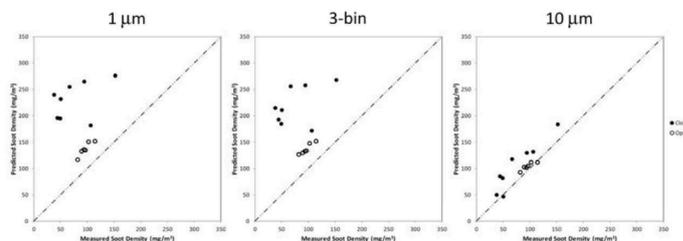
15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

11



Agglomeration und Deposition

- Erhebliche Überschätzung der Rauchdichte durch FDS gegenüber Simulation
- Große Abweichungen bei kleinen Partikelgrößen im Fall „open door“
- Ergebnisse legen Vernachlässigung von Agglomeration nahe



Floyd et al. Soot Deposition and Gravitational Settling Modeling and the Impact of Particle Size and Agglomeration, 2014

15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

12



Inhalt

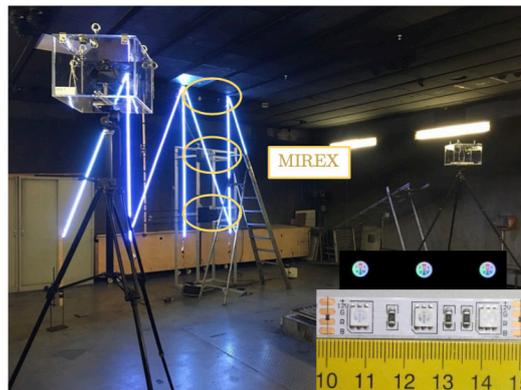
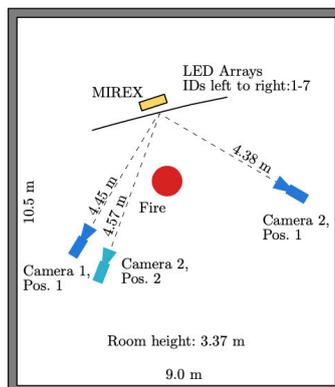
1. Was ist Sichtweite?
2. Einflussgrößen auf die Rauchdichte
3. Agglomeration und Deposition
4. LEDSA – Ein photometrisches Verfahren zur Bestimmung von Sichtweiten
5. Simulation vs. Realität
6. Zusammenfassung und Ausblick

15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

13



Versuchsaufbau

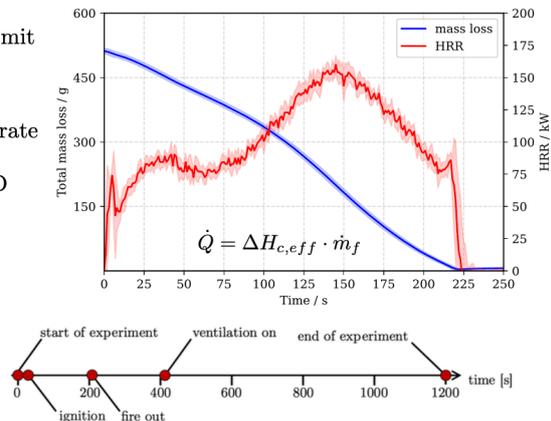


15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle



Testfeuer TF 5 / EN 54

- Versuchsreihe von insgesamt sechs Experimenten mit identischen Randbedingungen
- HRR über experimentell ermittelte Massenverlustrate
- MIREX Infrarot Messungen hinter mittlerem LED Array in verschiedenen Höhen (1.52 m / 2.3 m / 3.3 m)
- Brennstoff: 500g n-Heptan



15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

15



Schichtmodell

- Die Intensitäten des Modells $I_{m,j}$:

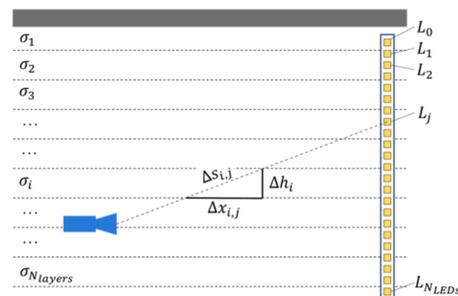
$$I_{m,j} = \exp\left(-\sum_{i=1}^{N_{layers}} \sigma_i \Delta s_{i,j}\right)$$

- Aufstellung und Minimierung einer Kostenfunktion zur Bestimmung der Extinktionskoeffizienten σ_i :

$$\Omega_\sigma = \sum_{j=i}^{N_{LEDs}} (I_{m,j} - I_{e,j})^2 + \phi_s \sum_{j=2}^{N_{layers}-1} (\sigma_{i-1} - 2\sigma_i + \sigma_{i+1}) + \phi_a \sum_{i=1}^{N_{layers}} \sigma_i$$

- Ansatz von zwei Gewichtungsfaktoren zur:

1. Glättung der Lösung (ϕ_s)
2. Forcierung hoher oder niedriger Werte des Extinktionskoeffizienten (ϕ_a)

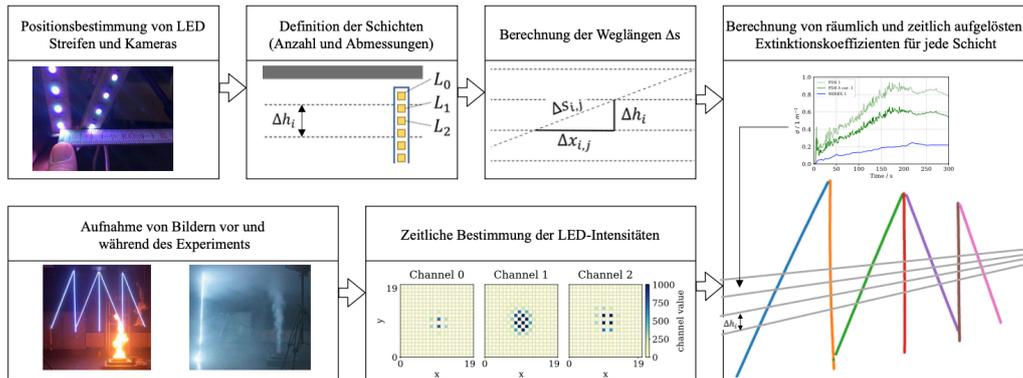


15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

16



Experimentelle Auswertung und Datenanalyse



15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

17

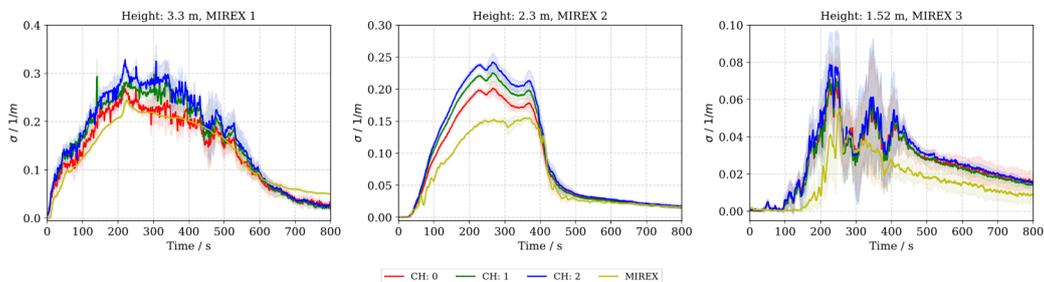


BERGISCHE
 UNIVERSITÄT
 WUPPERTAL

UNIVERSITÄT
 DUISBURG
 ESSEN

JÜLICH
 Forschungszentrum

Experimentelle Reproduzierbarkeit



15. Treffen der FDS User Group,
 Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
 Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

18



BERGISCHE
 UNIVERSITÄT
 WUPPERTAL

UNIVERSITÄT
 DUISBURG
 ESSEN

JÜLICH
 Forschungszentrum

Inhalt

1. Was ist Sichtweite?
2. Einflussgrößen auf die Rauchdichte
3. Agglomeration und Deposition
4. LEDSA – Ein photometrisches Verfahren zur Bestimmung von Sichtweiten
5. Simulation vs. Realität
6. Zusammenfassung und Ausblick

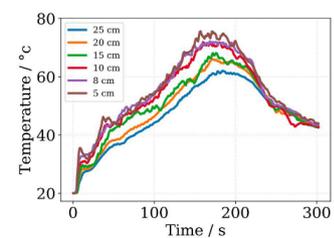
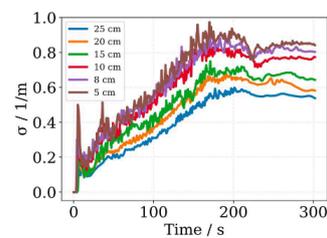
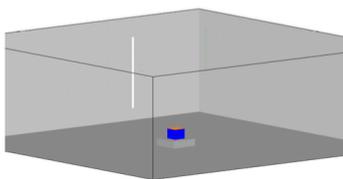
15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

19



FDS Modell

- Modellierung entsprechend des Versuchsaufbaus
- Verwendung der FDS-Standardkennwerte von K_m und Y_s , HRR gemäß gemessenem Masseverlust
- Geeignete Zellgröße: $\delta_x = 8$ cm nach Sensitivitätsanalyse des Meshes



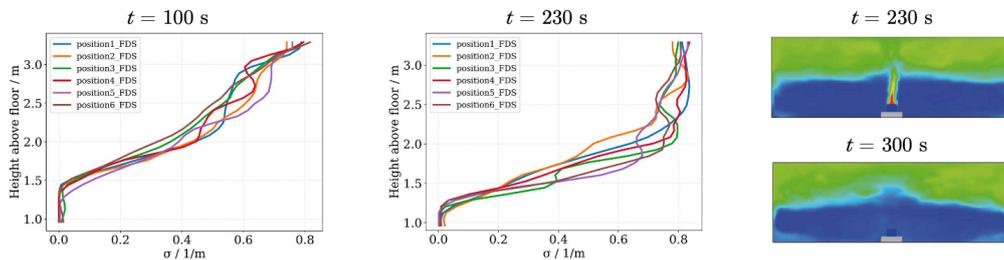
15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

20



Homogenität der Rauchschichtung

- Zeitliche und örtliche Auswertung der Extinktionskoeffizienten lässt auf eine annähernd homogene Rauchschichtung schließen



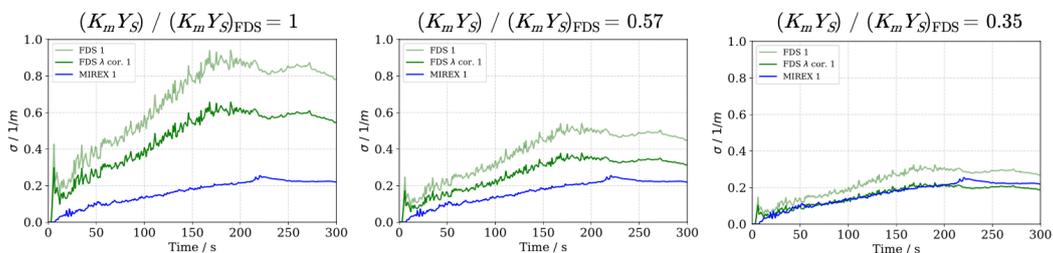
15. Treffen der FDS User Group, Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold, Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

21



Simulation vs. Experiment

- Erhebliche Überschätzung der Extinktionskoeffizienten durch Standardwerte von K_m und Y_S
- Korrektur der Wellenlänge durch Widmann-Korrelation $\frac{\sigma_{FDS}}{\sigma_{MIREX}} = \left(\frac{633}{880}\right)^{-1.0088} \approx 1.4$
- Lineare Abhängigkeit der Rauchdichte ρY_S erlaubt einfache Skalierung durch K_m bzw. Y_S



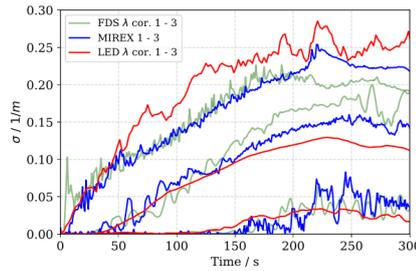
15. Treffen der FDS User Group, Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold, Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

22



Simulation vs. Experiment

- Skalierung der Simulationsergebnisse mit $(K_m Y_S) / (K_m Y_S)_{FDS} = 0.35$ zeigt gute Übereinstimmung für alle drei Messpunkte
- Korrigierte Messdaten aus LEDSA für blaue LEDs aufgrund geringer temperaturbedingter Verfälschung



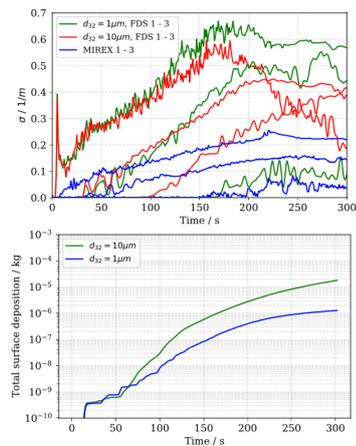
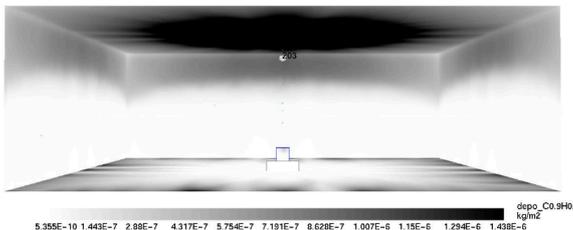
15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

23



Einfluss von Agglomeration und Deposition

- Größere Partikeldurchmesser führen zu erhöhter Deposition
- Reduzierung von σ im Deckennahen Bereich
- Erhöhung von σ im Bodennahen Bereich



15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

24



Inhalt

1. Was ist Sichtweite?
2. Einflussgrößen auf die Rauchdichte
3. Agglomeration und Deposition
4. LEDSA – Ein photometrisches Verfahren zur Bestimmung von Sichtweiten
5. Simulation vs. Realität
6. Zusammenfassung und Ausblick

15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

25



Zusammenfassung

- K_m und Y_g unterliegen erheblichen Skalierungseffekten
- Änderung der Partikelgrößenverteilung hat in FDS keinen Einfluss auf K_m
- Lineare Skalierung der Rauchdichte liefert gute Übereinstimmung der Extinktionskoeffizienten aus Simulation und experimentellen Daten
- Deposition hat erst im späteren Verlauf des Experiments einen sichtbaren Einfluss auf die Rauchdichte



Link:

Spatiotemporal measurement
of light extinction coefficients
in compartment fires

15. Treffen der FDS User Group,
Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultzel, Lukas Arnold,
Validierung der Einflussgrößen numerischer Sichtweitenmodelle

26



Ausblick

- Untersuchung anderer Testfeuer gemäß EN 54 (Schwelbrände, Pyrolyse)
- Erweiterter Versuchsaufbau mit räumlicher Messung von Partikeldichte und Extinktionskoeffizient
- Erweiterung von LEDSA auf räumlicher Ebene



Link: [Spatiotemporal measurement of light extinction coefficients in compartment fires](#)

Bjarne Husted:**The use of lidar scanner for modeling of the geometry in FDS****Abstract:**

Lidar scanning is a promising new technology, which can be used to generate the geometry for an FDS simulation. It can be helpful where the blueprints of a building or a structure are missing, for example, for older buildings. For simulation of fires in a building, where the use of the building is being changed. But also when fire simulations are used for fire investigation. A relatively quick scan can save several hours of manual measurements of the building or a structure.

Two different lidar scanners have been used, and the cloud points from one of these scans have been converted and imported into Pyrosim.

The geometry is compared with the manual measurement.

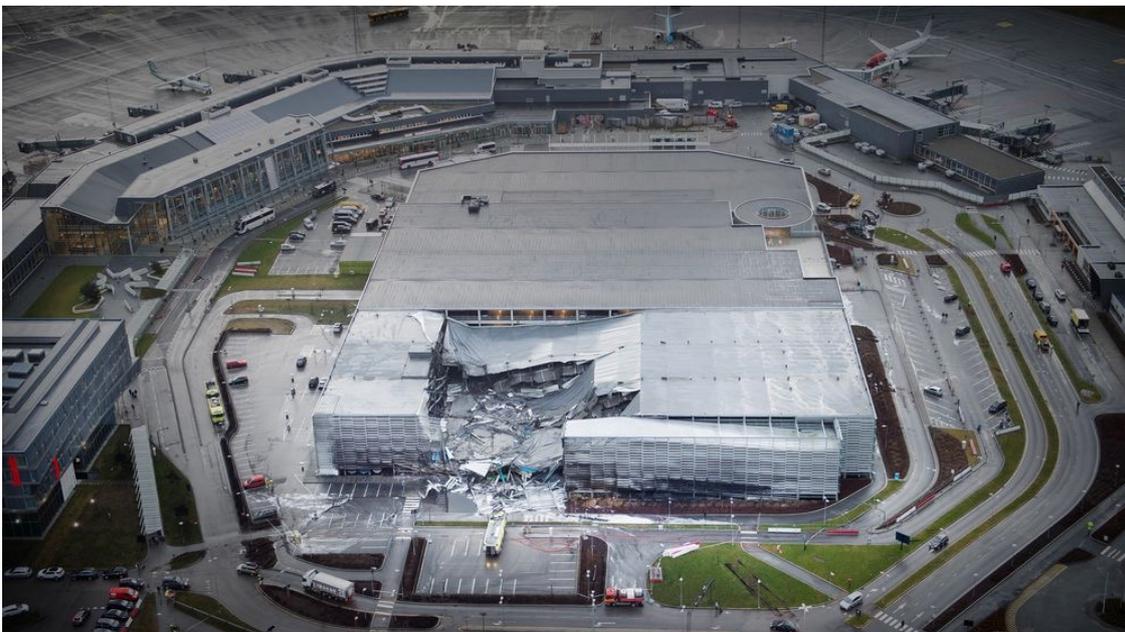
THE USE OF LIDAR SCANNER FOR MODELING OF THE GEOMETRY IN FDS

Bjarne P. Husted
DBI, DTU and LTH

German FDS User Group Meeting
4th November 2021



NEARLY TWO YEARS AGO (STAVANGER AIRPORT)



(Photo: Fredrik Refvem/Stavanger Aftenblad)

17.01.2022



SCANNING WITH MATTERPORT



Steel part of building



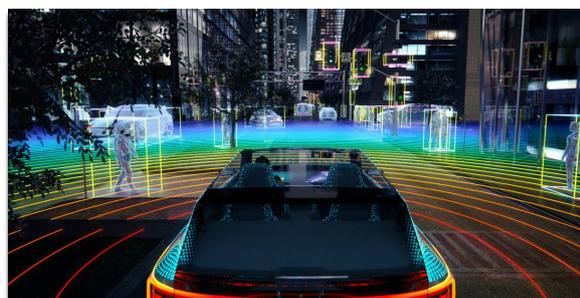
Concrete part of building

Source: (Matterport/DBI)
17.01.2022

WHAT IS LIDAR

From Wikipedia:

Lidar is a method for determining ranges (variable distance) by targeting an object with a laser and measuring the time for the reflected light to return to the receiver.



(Source: OSRAM)

17.01.2022



USES AND TRENDS

Uses

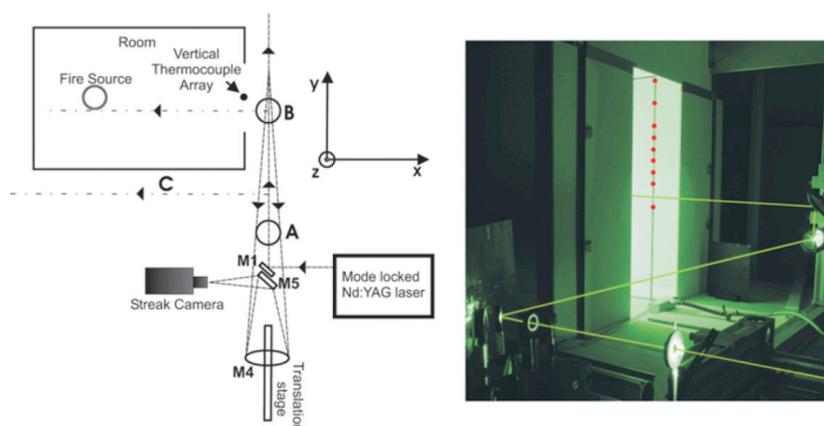
- Mapping the surroundings (self driving car and movies)
- Measuring particles in the air (look at ash from volcanoes)
- Combustion physics (measuring temperatures, see next slides)

Trends

- Cost have come down
- You can get off the shelf lidar products with software



MEASURING TEMPERATURES USING LIDAR

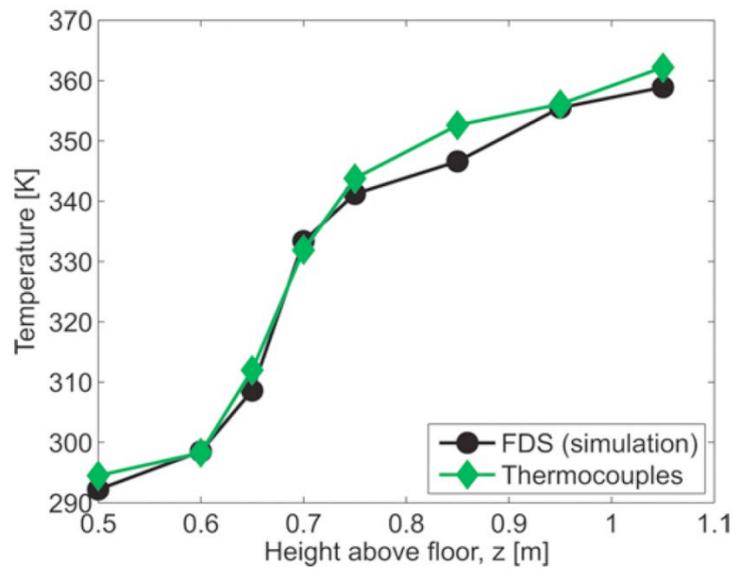


Billy Kaldvee, Jonathan Wahlqvist, Malin Jonsson, Christian Brackmann, Berit Andersson, Patrick van Hees, Joakim Bood & Marcus Aldén (2013) Room-Fire Characterization Using Highly Range-Resolved Picosecond Lidar Diagnostics and CFD Simulations, Combustion Science and Technology, 185:5, 749-765, DOI: 10.1080/00102202.2012.750310

17.01.2022



MEASURING TEMPERATURES USING LIDAR



17.01.2022



DEVELOPMENT IN FDS (NIST)

<https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/new-fire-simulating-tool-could-improve-flight-fire-safety>

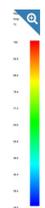
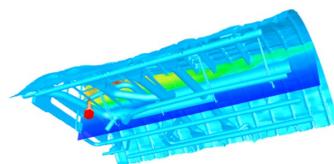
NIST used LIDAR to map the overhead compartment in the plane

Immersed boundary methods are being implemented in FDS

NEWS

New Fire-Simulating Tool Could Improve In-Flight Fire Safety

March 24, 2021



MEDIA CONTACT

Jonathan Griffin
jonathan.griffin@nist.gov
(301) 975-4117

ORGANIZATIONS

Engineering Laboratory
Fire Research Division
Engineered Fire Safety Group

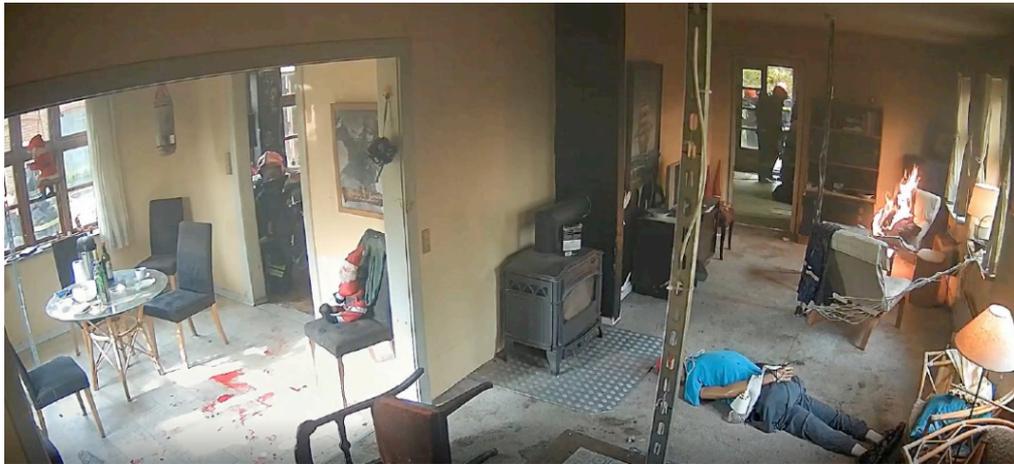
DFI ATFD NEWS

17.01.2022



PRESENT DAY

Movie from Guldborgsund, House Elle

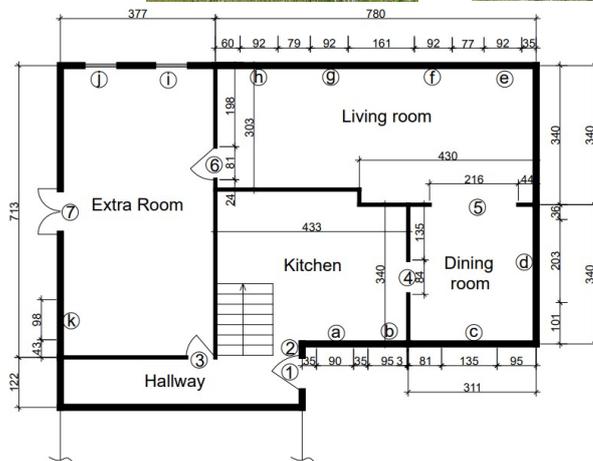


Source: (DBI/Bjarne Husted)

17.01.2022



Test 1 - House description



Doors:		Windows:	
1.	89 x 192	a.	90 x 135 Htop = 32
2.	71 x 203	b.	95 x 135 Htop = 32
3.	71 x 198	c.	135 x 135 Htop = 32
4.	84 x 202	d.	203 x 121 Htop = 47
5.	216 x 202	e.	92 x 136 Htop = 33
6.	81 x 203	f.	92 x 136 Htop = 33
7.	111 x 194	g.	92 x 136 Htop = 33
		h.	92 x 136 Htop = 33
		i.	92 x 136 Htop = 19
		j.	92 x 136 Htop = 18
		k.	98 x 122 Htop = 48

Note:

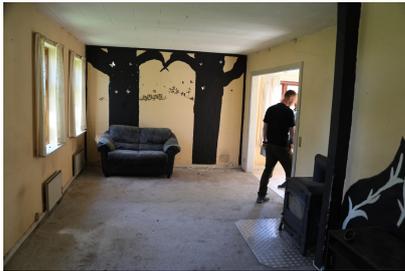
Htop - is the distance from the ceiling to the top of the window.

The room of origin is the living room, and the origin of fire is close to the window "e".

H=2.47±1 (the height of the compartments)

The dimensions are in cm.

Test 1 - House pictures, empty



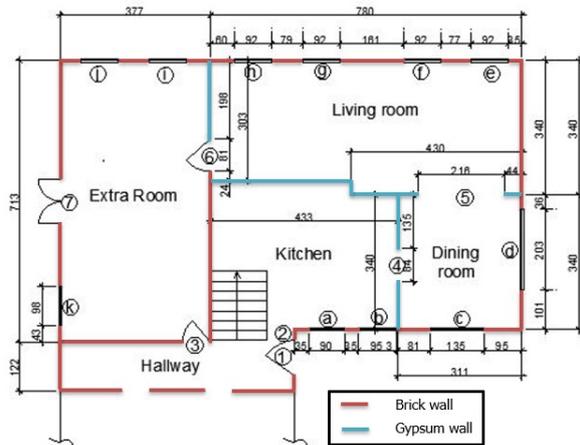
11

Test 1 - House pictures, furnished

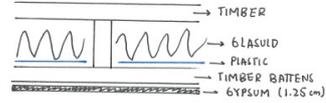


12

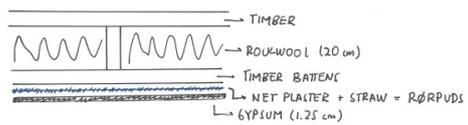
Test 1 - House materials



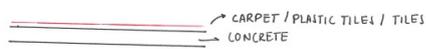
- CEILING EXTRA ROOM



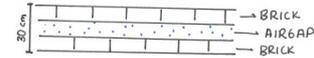
- CEILING LIVING ROOM + KITCHEN



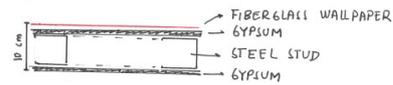
- FLOOR LIVING ROOM / EXTRA ROOM / KITCHEN AND DINNING



- OUTER WALLS

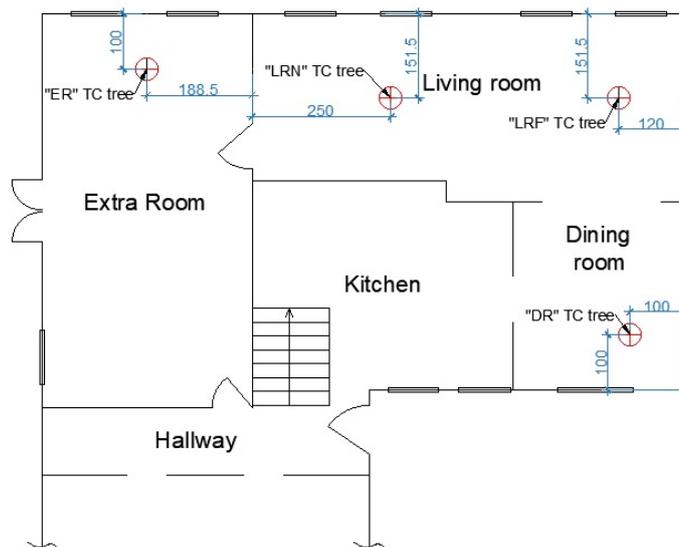


- INNER WALL



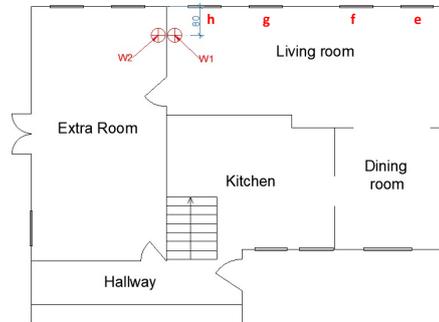
13

Test 1 - TC tree



14

Test 1 – Other TC



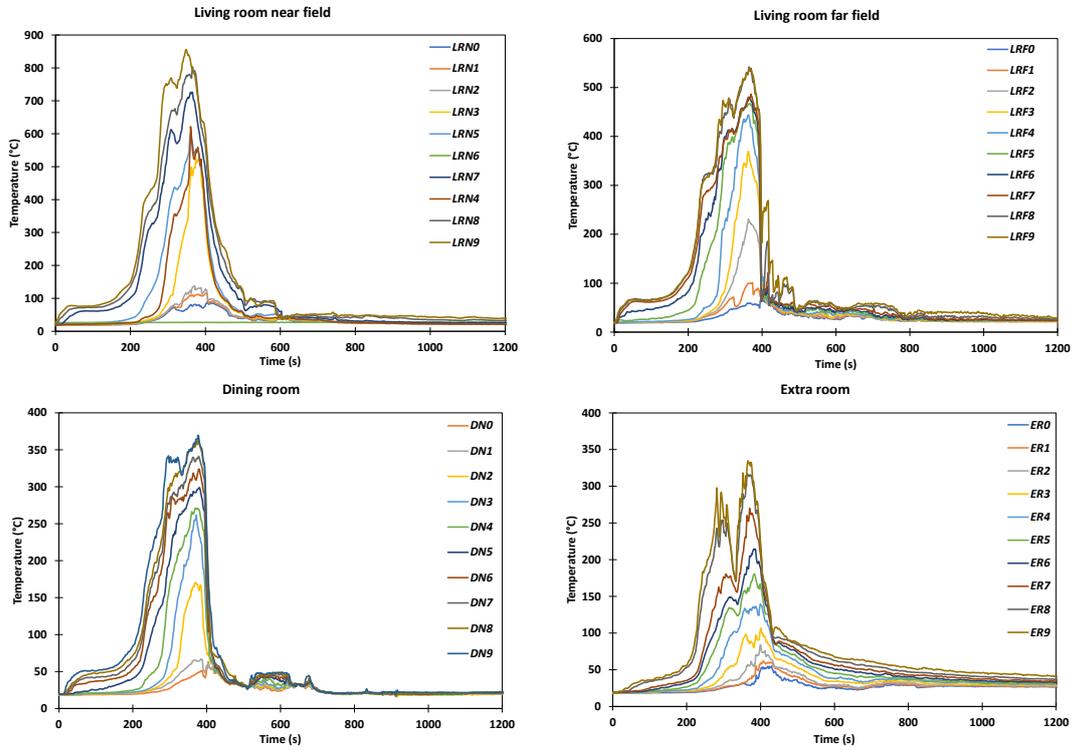
15

Test 1 – Weather station



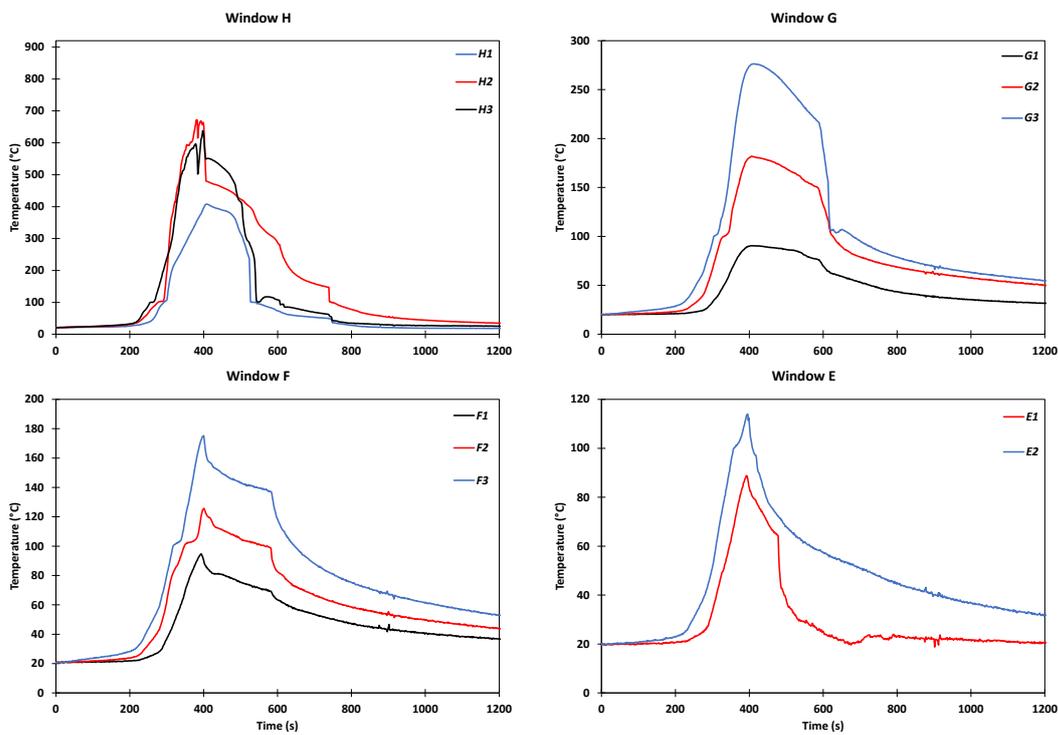
19

Test 1 – Gas temperature



20

Test 1 – Window temperature



21

LIDAR SYSTEMS USES IN THE PROJECT

Matterport (<https://matterport.com/>)

- Easy to use
- Everything is uploaded in the sky
- Access to the scans with a browser

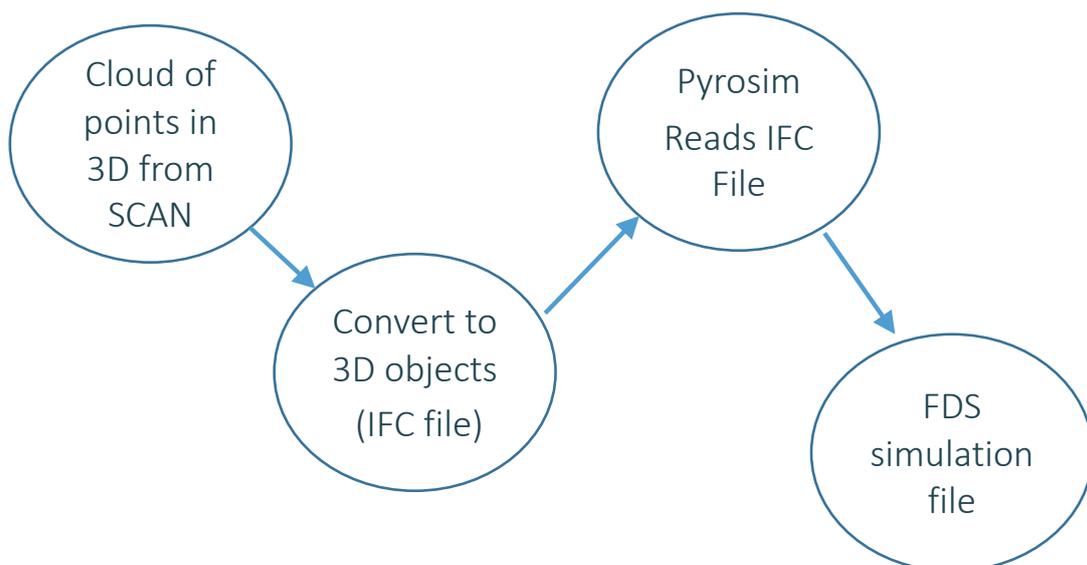
Leica (BLK360)

- Finer resolution
- The scan can be saved locally in a binary format (12 GB for this setup)
- Price to rent in Denmark: (BLK360 package is 265 EUR per day)

17.01.2022



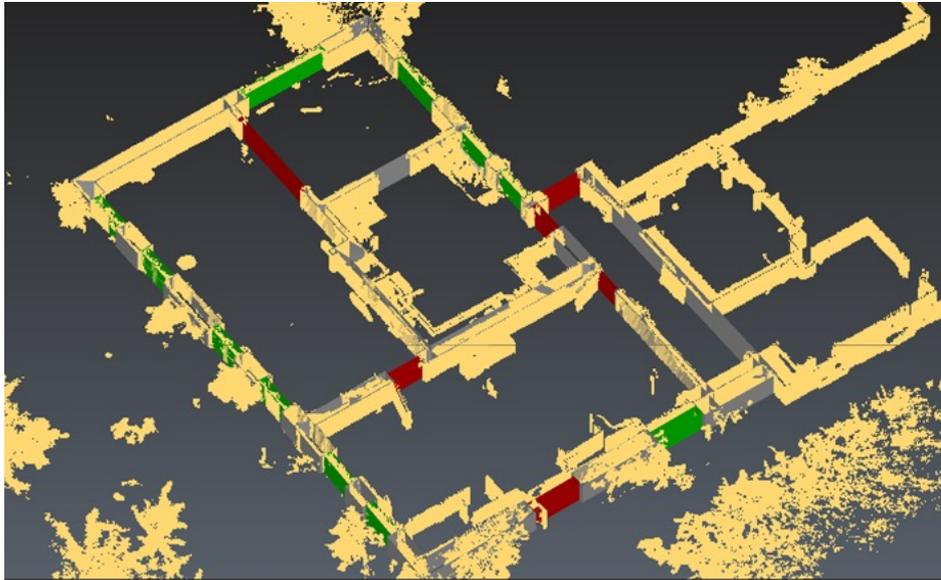
WORKING PROCESS



17.01.2022



POINT CLOUD

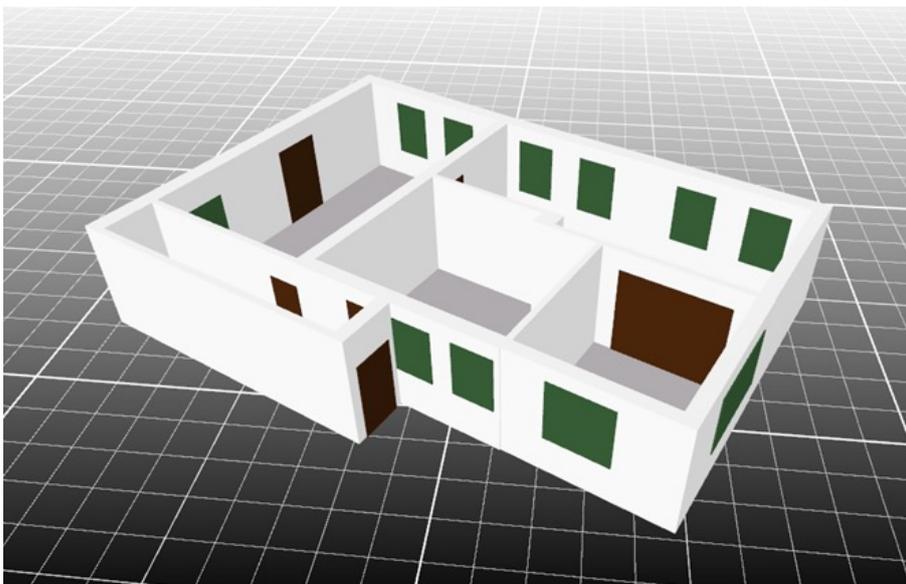


Source: (Hexagon AB, Sweden)

17.01.2022



IFC FILE FROM POINT CLOUD (USING POINTFUSE)

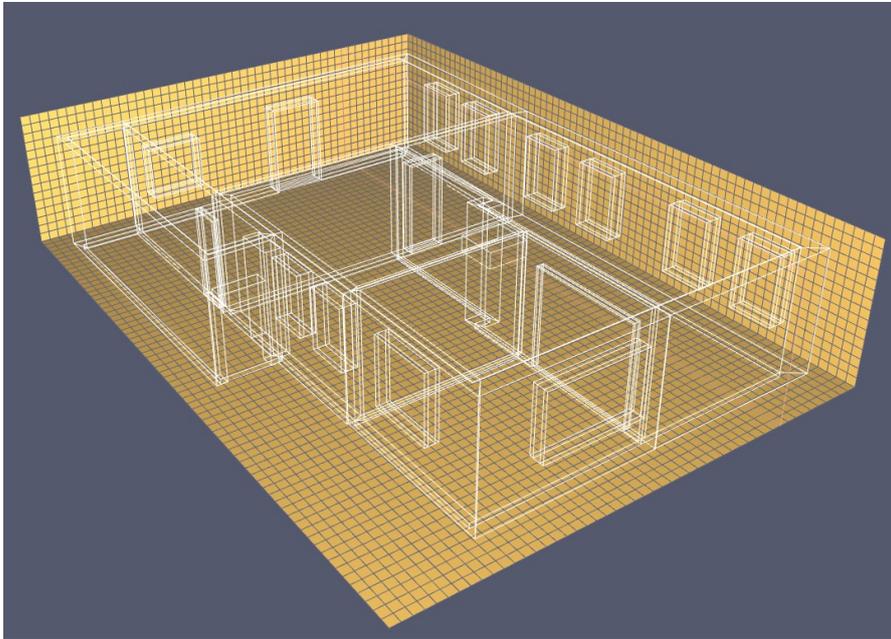


Source: (Hexagon AB, Sweden)

17.01.2022



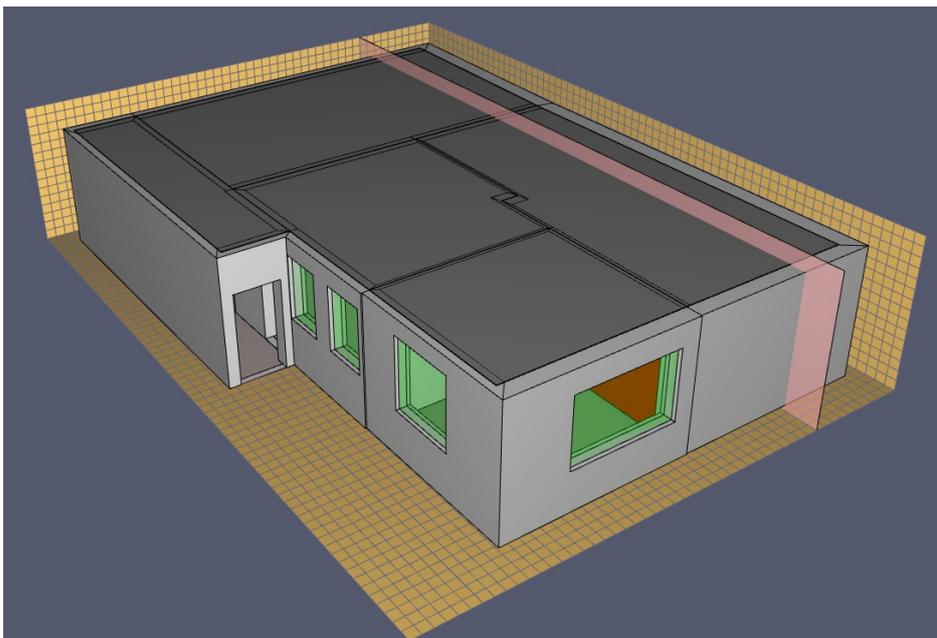
IFC FILE IMPORTED INTO PYROSIM



17.01.2022



PYROSIM



17.01.2022



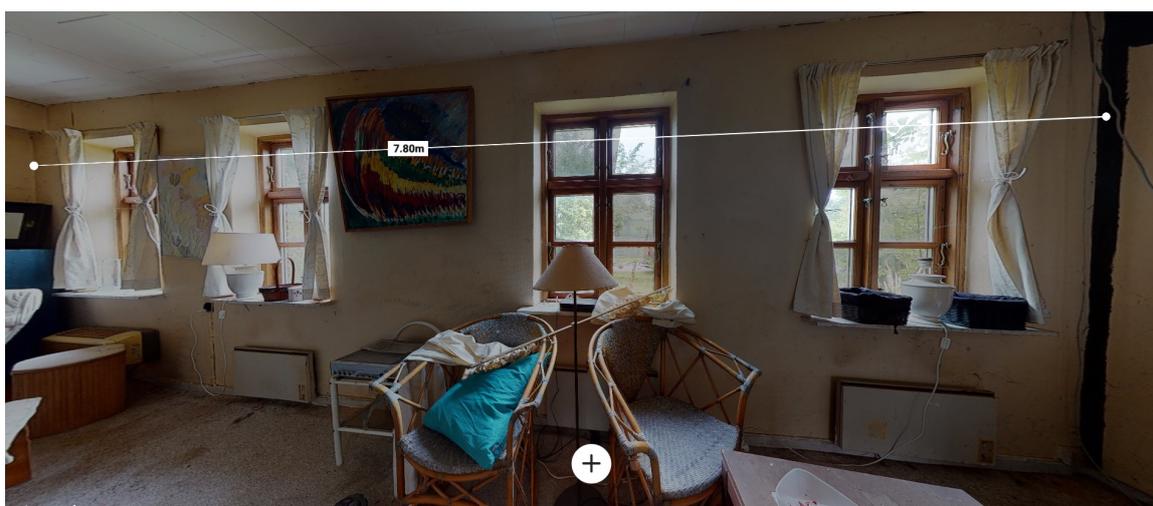
COMPARISON BETWEEN MANUAL MEASUREMENTS AND LIDAR

		Manual measurements (cm)	LEICA (cm)
Living room	Length	780	760
	Width (Wide section)	340	339
	Width (Narrow Section)	303	303
Dining room	Length	311	312
	Width	340	339
Kitchen	Length	433	431
	Width	340	339
Doors are important for the flow			
Doors	Living room to extra room	81	79
	Living room to dinning room	216	237
	Kitchen to Hallway	71	79

17.01.2022



MATTERPORT, ROOM LENGTH



17.01.2022

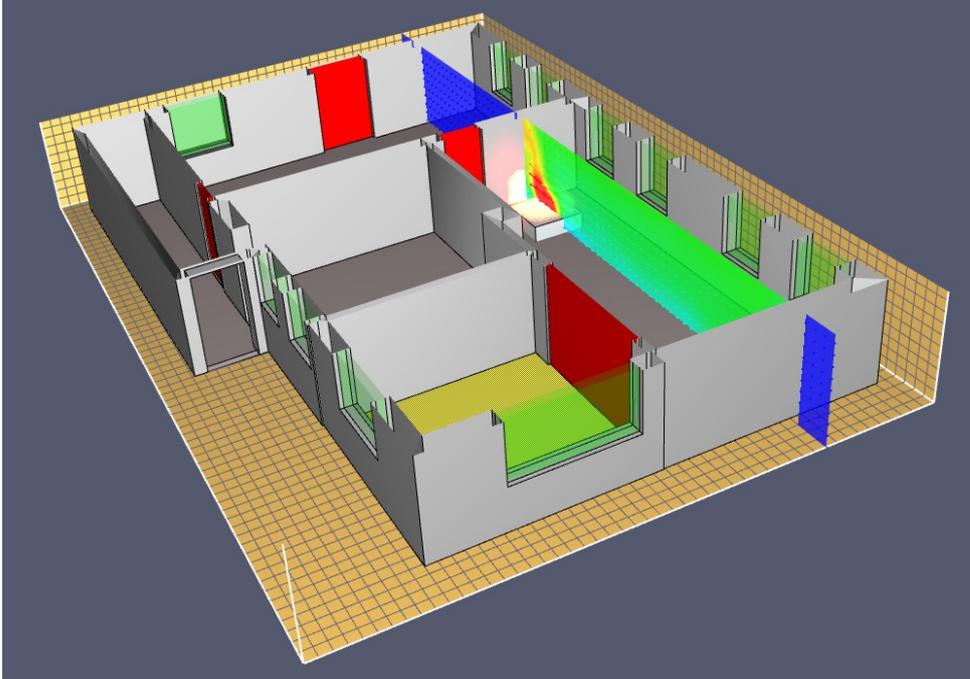
Before
After

<https://my.matterport.com/show/?m=kZk8eHvm7VV>

<https://my.matterport.com/show/?m=wAP5McakudC>



SIMULATION IN FDS 6.7.6



Test 1 – Pictures after the experiment



ACKNOWLEDGEMENT

The following partners contributed to the Udgård research project, and their participation is acknowledged:

- Guldborgsund Municipality
- Lolland-Falster Fire Service
- The Danish National Police
- The Danish Emergency Management Agency
- University of Dundee
- Consilium
- Leica
- Danish Institute of Fire and Security Technology

Special thanks to Dr. Ana Sauca from DBI

17.01.2022



CONCLUSION

- Lidar is a promising technique also for the use with FDS
- Time saving
- LIDAR scans have high accuracy
- Recommendation:
 - Manual check of the width of openings
- Future
 - Develop own software for transferring the point cloud to IFC

17.01.2022



Jan Vogelsang:

Virtual-Reality Smoke Simulation

Abstract:

Die Verwendung von Virtual-Reality-Hardware findet im wissenschaftlichen Umfeld immer mehr Anklang und bietet immersiven Umgang mit Simulationsergebnissen. Durch die beinahe unbegrenzten Möglichkeiten moderner Grafikengines ist es nun möglich auch komplexe Simulationen realitätsnah zu visualisieren.

So wird in dieser Präsentation ein Visualisierungswerkzeug vorgestellt, welches unter Nutzung der neu erschienenen Version der renommierten Unreal Engine (5.0) die Möglichkeiten der Visualisierung von Rauch- und Branddaten erkundet.

In der aktuellen Version des Werkzeugs ist es bereits möglich automatisiert FDS- Rauchdaten einzulesen und diese realitätsgetreu im Raum zu darzustellen. Außerdem können zusätzlich Slice-Daten eingelesen werden, welche gemeinsam mit dem Rauch im Raum erscheinen und so die anschauliche Auswertung verschiedener Messgrößen ermöglichen. In der Zukunft sollen noch weitere Datenstrukturen unterstützt werden, so bietet es sich z.B. an ebenfalls Boundary-Daten zu visualisieren.

Die Präsentation dient dazu einen ersten Eindruck in die bisher geschene und noch bevorstehende Arbeit zu geben und in einer anschließenden Diskussion zu ermitteln, welche zusätzlichen Features für das Tool noch gewünscht sind, um einen Mehrwert gegenüber existierenden Tools wie SmokeView zu schaffen.



VIRTUAL-REALITY SMOKE SIMULATION

Visualization of FDS simulation data using the Unreal Engine

04.11.21 | JAN VOGELSANG

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft



TABLE OF CONTENTS

Motivation

Smoke visualization

Slices

Other FDS data

Outlook

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

04.11.2021

Seite 2



TABLE OF CONTENTS

Motivation

Smoke visualization

Slices

Other FDS data

Outlook

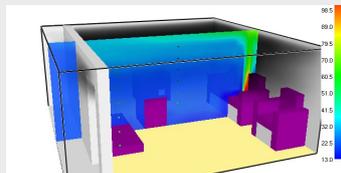
MOTIVATION

Unreal Engine



“Unreal Engine is the world's most open and advanced real-time 3D creation tool for photoreal visuals and immersive experiences.”

SmokeView



“Smokeview is a visualization program used to display the output of FDS and CFAST simulations.”

Virtual Reality



“Virtual reality describes a three-dimensional, computer generated environment which can be explored and interacted with by a person in the real world.”

MOTIVATION

▶ **Smokeview VR:** The tool aims to be similar to SmokeView with the important difference of adding a whole new level of immersiveness and interactivity.

▶ **Real-world visualization:** Using the Unreal Engine, it is relatively easy to create a simulated world that looks much more realistic compared to most modern visualization tools (e.g. SmokeView).

▶ **Use-case flexibility:** The tool can not only be used in research or scientific scenarios, but can also be used in the industry.

▶ **Training software:** Real-world experiments involving smoke are expensive and difficult (even impossible, e.g. fire) to perform. Virtual reality is cheaper, faster and much more secure.

TABLE OF CONTENTS

Motivation

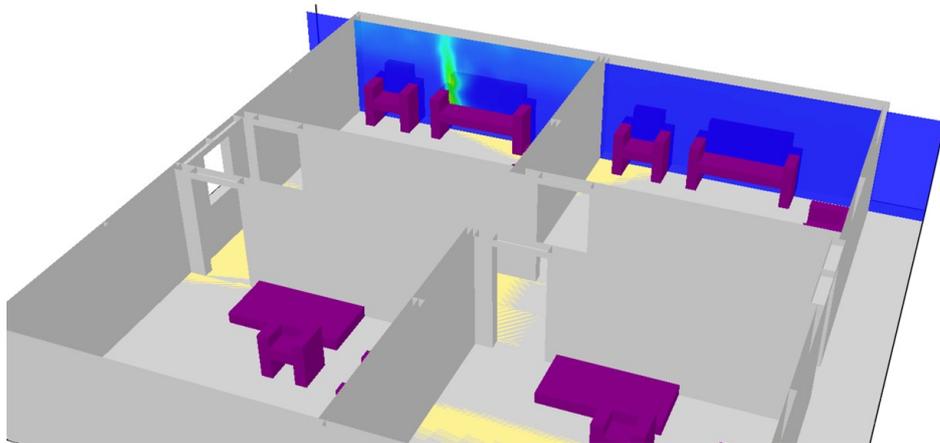
Smoke visualization

Slices

Other FDS data

Outlook

SMOKE VISUALIZATION



Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

04.11.2021

Seite 7



SMOKE VISUALIZATION



Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

04.11.2021

Seite 8



TABLE OF CONTENTS

Motivation

Smoke visualization

Slices

Other FDS data

Outlook

SLICES

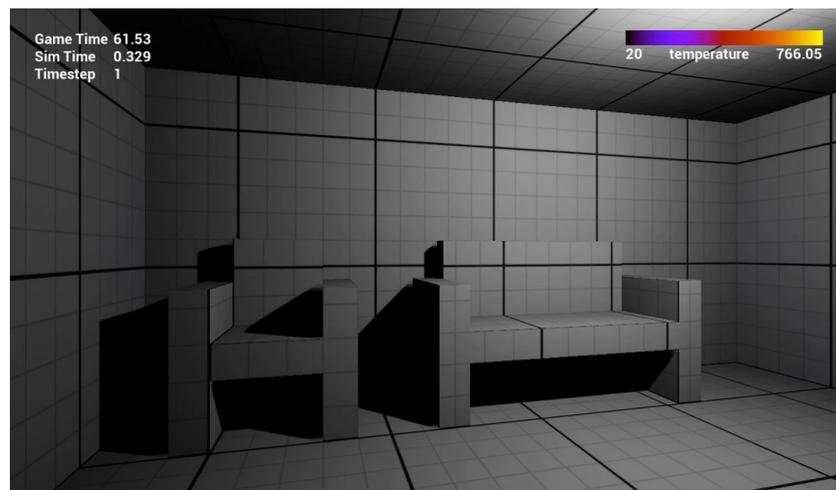


TABLE OF CONTENTS

Motivation

Smoke visualization

Slices

Other FDS data

Outlook

OTHER FDS DATA

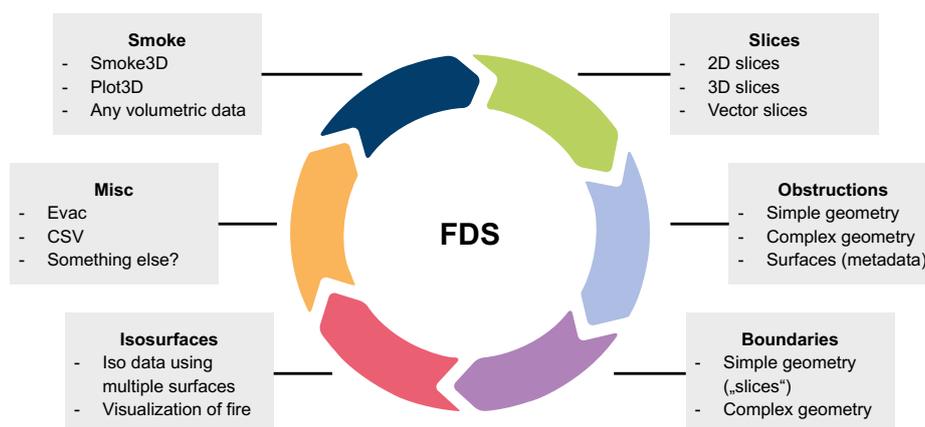


TABLE OF CONTENTS

Motivation

Smoke visualization

Slices

Other FDS data

Outlook

OUTLOOK

▶ **Ready for VR:** VR applications are more complicated than regular ones. Optimal performance is much more crucial and intuitive movement is more difficult to implement.

▶ **One-click:** It will be possible to load FDS-Simulations into the tool as easy as it is to open the simulation in SmokeView.

▶ **Full-range support:** We want to support all kinds of data, potentially even from CFD software other than only FDS.

▶ **User interface:** An intuitive and easy-to-use user interface will be addressed as soon as all main features of the tool are working as expected.

Marco Losurdo:

Smart Fire & Smoke Analysis using AR and CFD Analysis

Abstract:

The use of smart technologies applied to critical scenarios has been considerably increasing in the past decade. IoT Solutions, including Artificial Intelligence (AI) and predictive Machine Learning (ML) Algorithms, are currently paving the path towards Smart Analysis dedicated to Prevention and Intervention in critical life-threat situations.

Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations are largely used to evaluate thermodynamic variables, chemicals, and smoke advection in fire cases, although sometimes it might be hard to share with non-technical audience complex results.

Augmented/Virtual/Mixed Reality may help to fill in the gap between complicated scientific results and immediate interactive comprehension, which represents a critical point when it comes down to sharing scientific analysis and predictions in a fast pace decision-making situation.

Coupling AR/VR/MR Technology and accurate numerical simulations help both visualizing multiple dangerous scenarios and investigating all possible solutions not only as holographic indoor visualization, but also directly on-site.

Smart Technologies & Numerical Analysis can substantially support Prevention and Protection by predicting critical scenarios in advance. This work shows the workflow to visualize a time dependent CFD simulation in Augmented Reality on real Buildings, by combining accurate numerical results, GPS GEO-localization and local-SLAM algorithms. It was developed with the assistance of several applications such as Unity, Paraview, and ARCore SDK.

The workflow has been primarily tested on Android Devices, displaying numerical results obtained from FDS/Pyrosim and OpenFOAM CFD Software. When fire simulations are displayed in AR on-site in the real environment, one can directly see the extension of the fire, potential damages and track in real-time smoke and pollutants to directly observe and virtually verify the implemented solutions. Direct, immersive AR experience has proven to be the most efficient way to experiment solutions and train people to react in dangerous scenarios.

To improve the usability of such an AR-based CFD visualization on smart devices and provide the users with intuitive interaction with the real/virtual surrounding environment, an integrated approach based on the hhpberlin FUTURA - MatchBox framework is implemented.

The proposed integrated solution aims to support firefighter training, design review of fire prevention solutions and verification of their implementation directly on-site, reducing costs and time in execution and decision making.



Smart Fire & Smoke Analysis using AR and CFD Modelling

Prediction & Prevention Gamification

Dr. Marco Losurdo, Berlin



Start Recording Stop+Save Recording

QUIT OFF/ON TOUCH ROTATION

Disable Plane

Measure Distance

OFF/ON Sim. Buttons

ADJUST POSITION

“Nothing more realistic than reality”

Overview

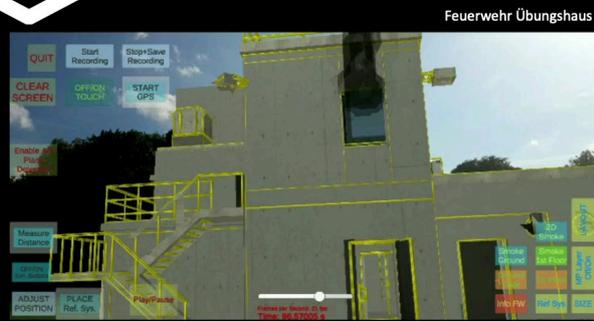


- 1 Why AR matters
- 2 Why FDS + AR matters
- 3 Strategy & Workflow
- 4 Known Issues
- 5 Test Cases
- 6 Summary & Conclusion



U-Bahn U6, Haltestelle Alte Heide, München

Why AR matters



Why AR matters

1/2

Fire Safety Prevention requires Advanced Technologies

1. Passive Audience → Active Player:
 - being in a **positive/pro-active state of mind** enhances our comprehension and understanding
2. Real Surrounding Environment lets people feel **safe** and in **control** of their actions:
 - distances and dimensions are implicitly **“known”**
3. At first, any virtual content displayed in AR is perceived by our brain as **“real”**



1

Why AR matters

2/2

Psychological Implications

1. Passive Audience → Active Player:
 - Faster understanding implies **better** and **educated** decisions
“Vision drives Decisions”
2. Surrounding Environment lets people feel **confident** and in **control** of their actions:
 - calibrated (re)actions
3. At first, any **virtual content** displayed in AR is perceived by our brain as **“real”**:
 - Training, engineering planning & verification

1



Why FDS + AR matters

1/4

Fire & Smoke Applications

1. CFD Data Compact Format:
 - Numerical Results + Additional (practical) Information
2. On-site Applications:
 - Training (e.g. Firefighters, employees)
 - Multiple Fire Scenarios Verification (Smoke Visibility)
3. Interactive 3D Data Sharing (3D Holographic Rendering)



2

Why FDS + AR matters

2/4

Augmented CFD Modelling

Building a **cognitive experience** out of mathematical models and regulations

1. **Complex** CFD Information visually **explained**: ability to perceive & react
2. **On-site** Applications → Do Regulations work for my Building?
 - How do regulations “fit” me and each individual person?
 - How long do I have before Smoke/Pollutants reach me at my Position?
3. **Interactive** 3D Mathematics: converting numbers into “**reachable**” entities

2

Why FDS + AR matters

3/4

Complex Fluid Dynamics Explained

Indoor domestic Fire Scenario



2

Why FDS + AR matters

4/4

VR/AR/MR Integrated Approach

1. AR/VR/MR use the same 3D file formats (.dae, .obj, .fbx, .3ds, etc.)
2. Once FDS results are ready for AR, they can be used also in VR or MR
3. Our current AR Work is under integration in Futura – MatchBox (<https://www.futura.town>)
4. Integrate Digital Twins of Cities with multiple (scientifically correct) scenarios



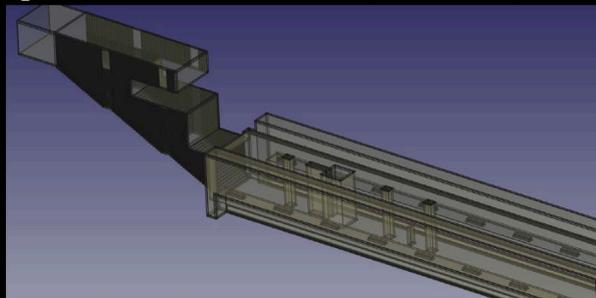
High-Rise Buildings, München

AR/MR digital twins and real world AR overlays to create instructional workflows, training and data driven solutions

2

Strategy & Workflow

3



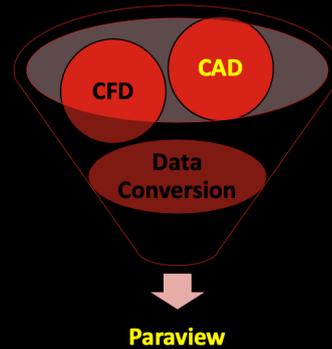
U-Bahn U6, Haltestelle Alte Heide, München

Strategy & Workflow

1/5

Strategy: Read FDS in Paraview

1. VTK Format (Opensource)
2. Simple, reliable & customizable (scripts, macros)
3. Wide range of Data Formats
4. Photorealistic rendering available

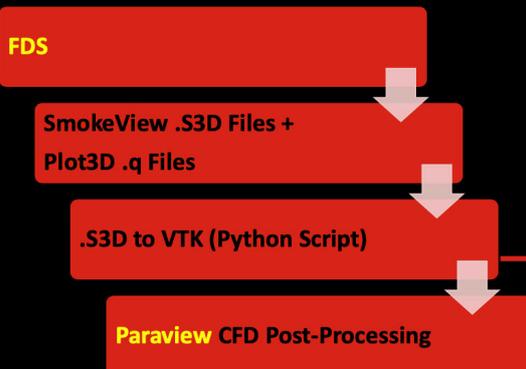


3

Strategy & Workflow

2/5

Main Workflow



Wildfire Scenario, Englischer Garten, München

Sorbonne University GitHub Project:
<https://github.com/ISCDtoolbox>

3

Strategy & Workflow

3/5

General Workflow

Pre-Processing CFD Processing Post-Processing

GoogleEarth 3DMaps
RenderDoc + BlenderGIS
CAD Software + Mesh Editor

Python (.S3D to VTK)
FDS
BlenderFDS or Pyrosim

Paraview
Blender + Gimp Image Processor
Unity3D

Futura.town
Smart Device

Marienplatz, Rathaus + U-Bahn, München

3

Strategy & Workflow

4/5

From Unity to Android

3D Pose (Instantiate)

Markerless

Marker

GPS
2-10m
North oriented

SLAM
Mobile
Orientation

Manual Displacement
Local Reference
System

Image Recognition

Fire-Tower, Firefighters's Training Facility

3

Strategy & Workflow

5/5

From Unity to Android

1. Instantiate Ref. Sys. (0,0,0) with ARCore SLAM
2. Instantiate GPS (distance + North orientation)
3. Adjust Model Position (if necessary)
4. **Press Play...**

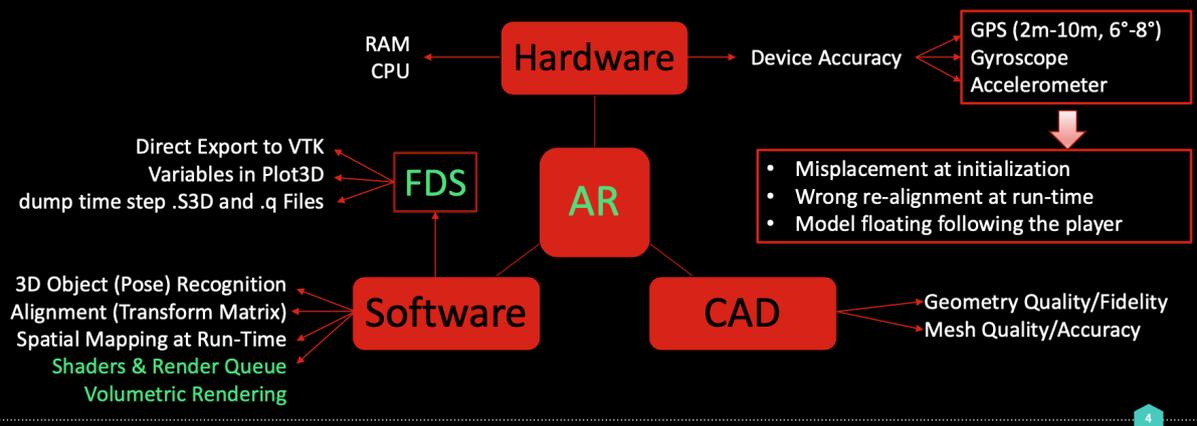


Marienplatz Rathaus, München

Elbphilharmonie outdoor fire, Hamburg

Known Issues

Issues related to App Deployment



Test Cases

5



Fire-Tower, Firefighters's Training Facility

Test Cases

1/4

FDS CFD Modelling Settings

- CAD: GoogleEarth/Maps, Futura-MatchBox or manually sketched
- FDS STL Processing: Pyrosim, BlenderFDS
- Mesh Resolution: 0.2m - 0.5m (sufficient for test cases)
- Standard Fuels (from tutorials):
 - 1) Fire pool N-Heptane C₇H₁₆
 - 2) Fabric+Foam (Upholstery Material, 3 point ignition → FDS Couch Tutorial)
- FDS Post-Processing: Plot3D .q, Smokeview .s3d

5

Test Cases

2/4

Marienplatz, München



<https://www.futura.town/ar-cfd>

5

Test Cases

3/4

Englischer Garten, München



<https://www.futura.town/ar-cfd>

5

Test Cases

4/4

Feuerwehr Übungshaus



<https://www.futura.town/ar-cfd>

5

6

Summary
&
Conclusion

Indoor domestic Fire Scenario

Summary & Conclusion

1/2

Why AR matters

AR/VR/MR Smart Post-Processing

Post-Processing

CFD

Smart Real-Time Post-Processing → e.g. Paraview displayed on Smart Devices

ML Computing (Physics based) → Currently ML Computing is "configuration based"

Real-Time Simulations (ML based)

AI/ML Integrated Environment
(Automated Real-Time Smart Response)

6

Summary & Conclusion

2/2

Lessons learned

1. Interoperability between AR, VR and MR
2. **Mesh & CAD** accuracy are key parameters in AR
3. Smart Device **CPU+RAM** are a **critical** bottle neck
4. CFD (FDS) in AR works but **coding** is **required**
5. Hardware & Software need to improve for a stable AR
6. **Fire & Smoke** Analysis will **benefit** from AR/VR/MR (Indoor/Outdoor Navigation)
7. AR can **display Thermodynamics** and **Information** at specific locations
8. Users are active players!

6

Q & A

Thank you for your attention



Dreischeibenhaus Gebäude, Düsseldorf



Marco Losurdo

Senior Entwickler Ingenieur
m.losurdo@hhpberlin.de

Andreas Dahlitz:

Durchrauchungsfähigkeit von Membrangewebe- Unterdecken

Abstract:

Es handelt sich um einen Ausblick bzw. offenen Impuls für FDS-User zur Klärung der Frage, wie eine solche Problemstellung mit FDS optimal abgebildet bzw. simuliert werden kann.



Durchrauchungsfähigkeit von Membrangewebe- Unterdecken

Dipl.-Phys. Petra Büttner †
Dr.-Ing. Karen Paliga
Dipl.-Ing. Andreas Dahlitz

Agenda



- 1 Aufgabenstellung
- 2 Durchgeführte Versuche
- 3 Versuchsergebnisse
- 4 Schlussfolgerungen und Impulse für die FDS-Anwendung

Aufgabenstellung

An Unterdecken besteht die Anforderung, dass diese ausreichend rauchoffen sein müssen

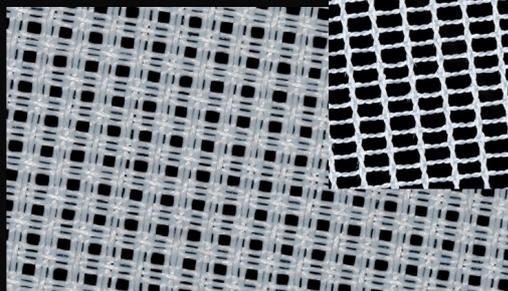
→ Nachweis der Rauchoffenheit muss erbracht werden

aus DIN 18232-5:2012-11:

Eine rauchoffene Unterdecke ist „... eine unter der raumabschließenden Decke eingebrachte, zumeist abgehängte Konstruktion mit einem mindestens 50 % freien, gleichmäßigen Flächenanteil, um eine ungehinderte Durchströmung der Rauchgase zu ermöglichen.“

1

Aufgabenstellung



Membran B (2x2) → Markthalle und Abflughalle E1

Membran A (2x4) → FGBR,
Mainpier E0, E0Z

Membran C (5x8) →
Verteilerebene U1,
Ankommerebene E0,
Mainpier E1 und E2

Bildquellen: büncK + fehse

1

Aufgabenstellung

Anforderung: Nachweis Rauchoffenheit

- in Abhängigkeit von der Brandsimulation müssen die Membrane verschiedene Öffnungsanteile nach Abschluss des Brandversuchs aufweisen
- der verbleibende rauchoffene Anteil der Membrane kann in Ergänzung zu 100 % offene Fugen angesetzt werden

Untersuchung im Hinblick auf

- verbleibender Öffnungsanteil nach Brand mit einer Mischbrandlast
- zeitabhängiges Verhalten

1

Aufgabenstellung

Anforderung: Nachweis Rauchoffenheit

- in Abhängigkeit von der Brandsimulation müssen die Membrane verschiedene Öffnungsanteile nach Abschluss des Brandversuchs aufweisen
- der verbleibende rauchoffene Anteil der Membrane kann in Ergänzung zu 100 % offene Fugen angesetzt werden

Untersuchung im Hinblick auf

- verbleibender Öffnungsanteil nach Brand mit einer Mischbrandlast
- zeitabhängiges Verhalten

1

Durchgeführte Versuche (Rauch)

Vorversuche zum Nachweis des erforderlichen Öffnungsanteils:

- Versuche im SBI-Prüfstand an der MPA Braunschweig
- Brandlast und Volumenstrom der Rauchabzugsanlage wurden verkleinert und entsprechen den tatsächlichen Randbedingungen
- Membranabmessung der Proben ca. 0,6 m x 0,6 m

Hauptversuche an der BAM auf Basis der Vorversuche

- Nachweis zur Durchrauchungsfähigkeit als Basis für eine spätere ZIE
- Versuche in einem Doppelofen an der BAM
- Brandlast und Volumenstrom der Rauchabzugsanlage entsprechen wiederum den tatsächlichen Randbedingungen
- Membranabmessung der Proben auch hier ca. 0,6 m x 0,6 m

2

Durchgeführte Versuche (Rauch)

Hauptversuche BAM mit Membrane A bis E

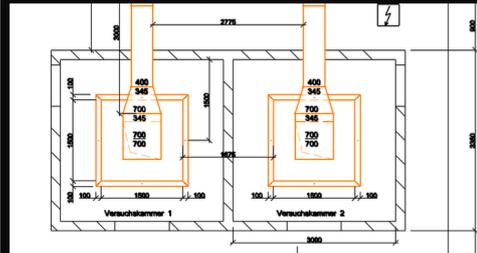
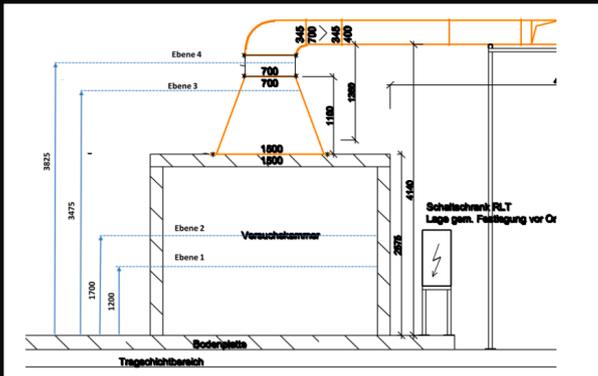
Membran	Größe der Poren [mm x mm]	Öffnungsanteil [%]	Volumenstrom skaliert [m/s]	Brandlast skaliert [kW]	Anzahl der Versuche
A	2 x 4	60	0,1	110	13
B	2 x 2	19	0,2	50	8
C	5 x 8	80	0,1	110	14
D	10 x 10	70	0,1	110	8
E	6 x 6	76	0,1	110	13

Die Membrane A, B und C kamen letztendlich zum Einsatz.

2

Durchgeführte Versuche (Rauch)

Aufbau des Versuchsofens BAM (als Doppelofen)



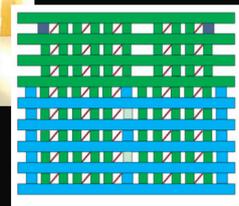
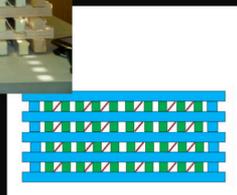
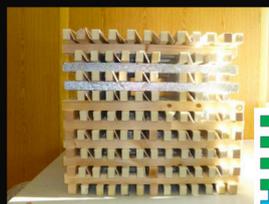
Bildquellen: BAM

2

Durchgeführte Versuche (Rauch)

- Brandkrippen 50 kW (links) und 110 kW (rechts) bestehend aus 50 % Holz, 25 % PVC und 25 % PUR

Holz	PVC	PUR
500x25x25	500x30x2,4	500x25x20 (LxBxH in mm)



Bildquellen: BAM

2

Durchgeführte Versuche (Rauch)

Brandkrippen im Abbrand (rechts Brandkrippe auf Rollwagen)



Versuch MPA



Versuch BAM

2

Bildquelle: links A. Dahlitz; rechts BAM

Durchgeführte Versuche (Rauch)

Durchgeführte Messungen

- Temperatur unterhalb und oberhalb der Membran,
- Masseverlust der Brandkrippen,
- Luftgeschwindigkeit unterhalb der Membran (Messung vor Beginn des Versuches),
- Ermittlung des verbliebenen Öffnungsanteils durch Fotoauswertung in vorher definierten Fotoausschnitten nach Abschluss des Versuchs
- Auswertung der offenen Anteile über Bildauswertesoftware (Pixelauswertung)

2

Durchgeführte Versuche (Rauch)

Fotoauswertung (Kamera am Schwenkarm mit drei vordefinierten Positionen (oben, mitte und unten))



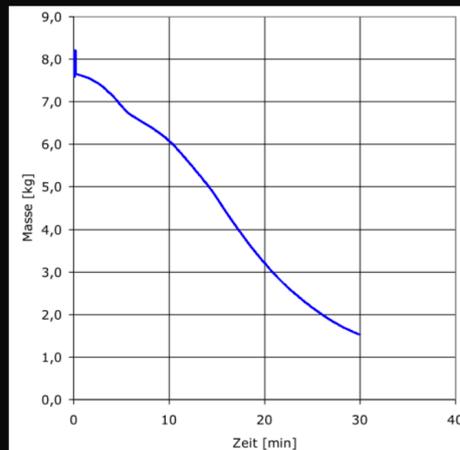
2

Quelle: bünck + fehsche visualisierung und animatonsdesign gmbh



Versuchsergebnisse - Öffnungsanteil

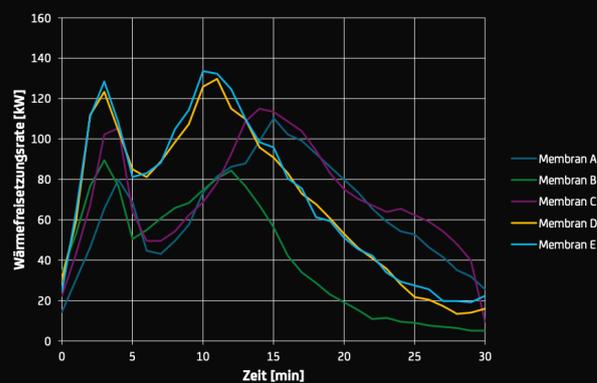
- Masseverlust
- Versuch mit 110 kW



3

Versuchsergebnisse - Öffnungsanteil

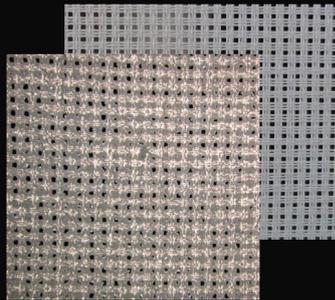
Wärmefreisetzungsrate BAM



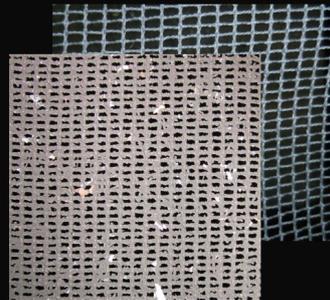
3

Versuchsergebnisse – Öffnungsanteil

Grad der Rauchoffenheit in Abhängigkeit der Porengröße aus Vorversuche MPA



Membran B (2x2)

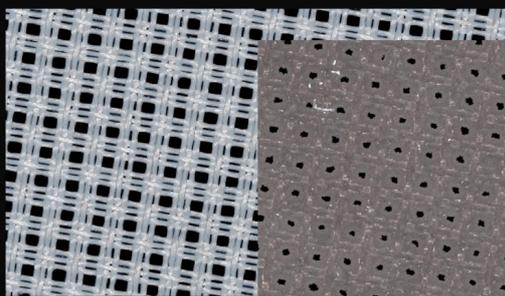


Membran A (2x4)

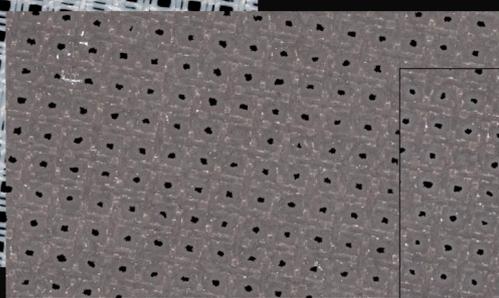
3

Versuchsergebnisse – Öffnungsanteil

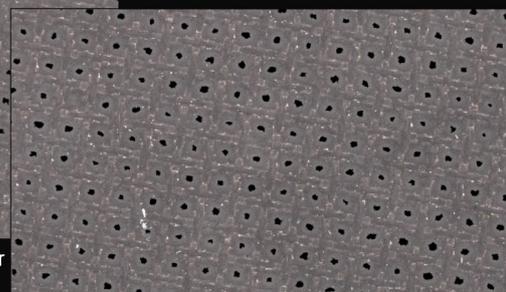
Grad der Rauchoffenheit in Abhängigkeit der Porengröße aus Hauptversuche BAM



Membran B (2x2) sauber



Membran B (2x2) nach 15 min Branddauer



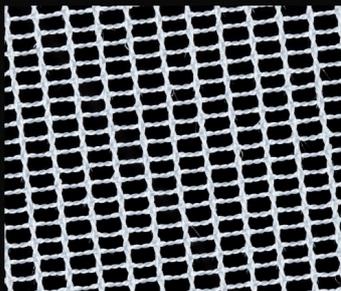
Membran B (2x2) nach 30 min Branddauer

3

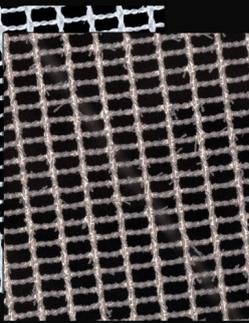
Bildquellen: bünck + fehnse

Versuchsergebnisse – Öffnungsanteil BAM

Grad der Rauchoffenheit in Abhängigkeit der Porengröße aus Hauptversuche BAM



Membran A (2x4) sauber



Membran A (2x4) nach
15 min Branddauer



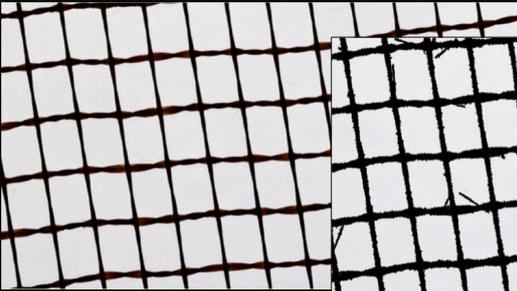
Membran A (2x4) nach 30 min Branddauer

3

Bildquellen: bünck + fehsé

Versuchsergebnisse – Öffnungsanteil BAM

Grad der Rauchoffenheit in Abhängigkeit der Porengröße aus Hauptversuche BAM



Membran C (5x8) sauber



Membran C (5x8) nach 15
min Branddauer



Membran C (5x8) nach 30 min Branddauer

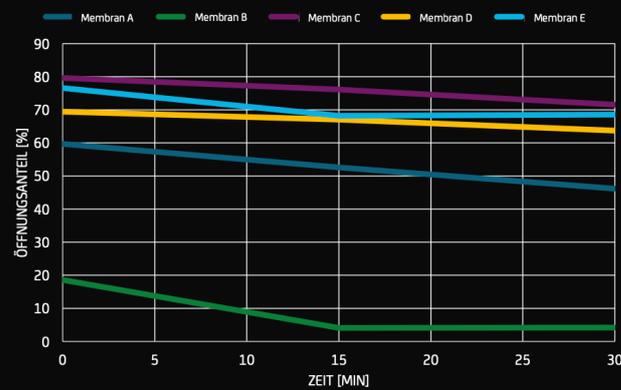
3

Bildquellen: bünck + fehsé



Schlussfolgerungen

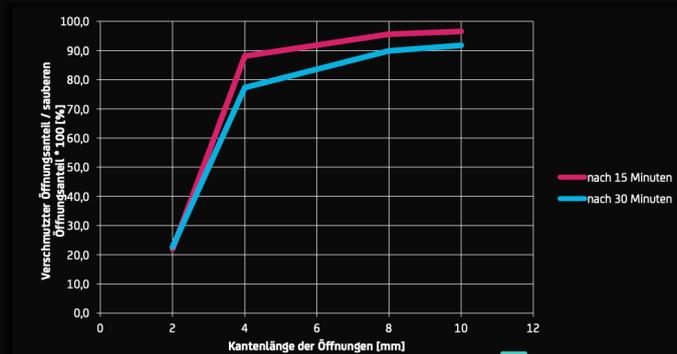
Veränderung des Öffnungsanteils in Abhängigkeit von der Branddauer



4

Schlussfolgerungen

Veränderung des Öffnungsanteils im verschmutzten Zustand (Brandfall) zum Öffnungsanteil der sauberen Membran (vor dem Brand) in Abhängigkeit von der minimalen Kantenlänge der Pore in mm



4

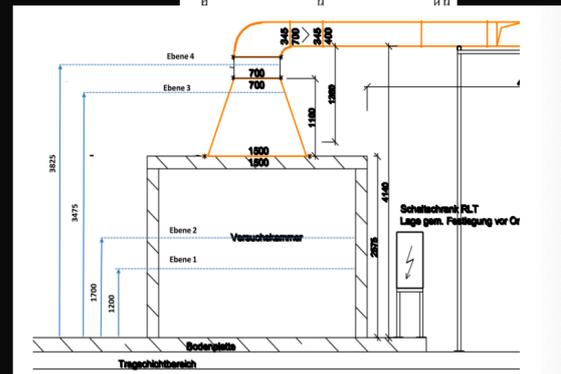
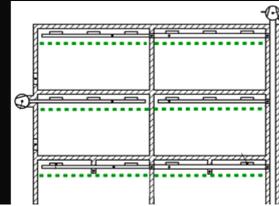
Schlussfolgerungen

- Die untersuchten Membrane verschmutzten infolge der Rußbeaufschlagung (Siebwirkung).
- Bei Kantenlängen der Pore ab ca. 8 mm reduziert sich der „saubere“ Öffnungsanteil durch die Rußbeaufschlagung nur noch geringfügig um ca. 10 %.
- Dieselbe Aussage gilt auch für kreisrunde Poren.
- Diese Reduzierung sollte von vornherein als Minderung der Durchrauchungsfähigkeit bei derartigen Membrangeweben angesetzt werden.
- Membrangewebe mit weit geringeren Porengrößen sollten immer mit 100 % offenen Flächen (Fugen, Senkrechtlamellen etc.) kombiniert werden.
- Für das hier betreffende Bauvorhaben konnte die Durchrauchungsfähigkeit nachgewiesen werden.

4

Impulse für die FDS-Anwendung

- Wie können membranartige Unterdecken in FDS-Simulationen berücksichtigt werden?
- Wäre es denkbar die ansteigende Dämpfung der Durchrauchungsfähigkeit über die Simulationsdauer abzubilden?
- Die Ergebnisse der vielzähligen Versuchsreihen können in Abstimmung mit dem damaligen AG sicherlich zur Verfügung gestellt werden.



4

Thank you



hhpberlin.org



hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz GmbH
Rotherstrasse 19 · 10245 Berlin

<https://www.hhpberlin.org>
ServiceDesk@hhpberlin.de
+49 30 895955-0

Amtsgericht
Berlin-Charlottenburg
Register-Nr.: HRB 78 927
Ust-ID Nr.: DE217656065

Geschäftsführung
Dipl.-Ing. Karsten Foth
Dipl.-Inf. BW [VWA] Stefan Truthän

Beirat
Dipl.-Ing. Margot Ehrlicher
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hossler



Dr.-Ing.
Karen Paliga
Sachverständige für Brandschutz

k.paliga@hhpberlin.de



Dipl.-Ing.
Andreas Dahlitz
Prüfingenieur für Brandschutz

a.dahlitz@hhpberlin.de

Christian Labusch, Pascal Matura, Benjamin Schaufelberger:

Strömungssimulationen eines Klassenzimmers - Aerosolausbreitung und Lüftungskonzepte im Kontext der Corona-Pandemie

Abstract:

Im Rahmen des Anti-Corona-Projekts AVATOR [1] befasst sich das Fraunhofer EMI insbesondere mit der Modellierung und Simulation der Ausbreitung exhalierter Aerosole in Innenräumen - konkret am Beispiel eines Klassenzimmers. Sind die ausgeatmeten Aerosolpartikel Träger des SARS-CoV-2-Virus, so kann eine aerogene Übertragung der Viren stattfinden und bei Rezipienten eine Infektion auslösen. Dieser Übertragungsweg ist von großer Bedeutung, da sich Aerosolpartikel aufgrund ihrer langen Verweildauer in der Luft über weite Distanzen ausbreiten und sich somit insbesondere in schlecht durchlüfteten Innenräumen über die Zeit akkumulieren können [2].

Neben Büroräumen sind Klassenzimmer ein Paradebeispiel für Innenräume, in denen tagtäglich viele Personen über einen langen Zeitraum zusammenkommen. Zudem haben die allermeisten Schulen in Deutschland keine zentralen Lüftungsanlagen [3], sodass sich die Frage aufdrängt, wie einer Anreicherung der Aerosolpartikel effektiv entgegengewirkt werden kann.

Hierzu haben wir im Rahmen des o.g. Projekts ein FDS-Modell eines typischen Klassenzimmers erstellt, das neben den räumlichen und baulichen Gegebenheiten auch Personenmodelle enthält, die als Wärme- und insbesondere als Aerosolquellen dienen. In systematischer Weise untersuchen wir in unterschiedlichen Szenarien die Aerosolausbreitung und analysieren, wie viel Aerosol jede einzelne Person im Klassenzimmer im Laufe einer gesamten Schulstunde inhaliert. Die Szenarien umfassen neben verschiedenen Fensterlüftungsvarianten vor allem auch die Wirkung eines Raumluftreinigers und der Einfluss seiner Positionierung.

Der Vortrag bietet Einblicke in die Modellierung sowie in die Validierung des Raumluftreinigermodells und stellt interessante Ergebnisse der untersuchten Szenarien vor. Ebenso wird der Einfluss der Anzahl verwendeter MPI-Prozesse (multiple meshes) und der eingestellten Fehlertoleranz (velocity_tolerance) für die Druckiteration auf die ausgewerteten Daten untersucht.

Quellen:

- [1] Fraunhofer EMI, »AVATOR« - Anti-Virus-Aerosol: Testing, Operation, Reduction«, <https://www.emi.fraunhofer.de/de/aktuelles/aktuelles-presse/avator.html>, Zugriff: 20.10.2021
- [2] Robert-Koch-Institut, Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19 (Stand: 18.3.2021), https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html, Zugriff: 20.10.2021
- [3] Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#wie-funktioniert-richtiges-luftten-im-schulalltag>, Zugriff, 20.10.2021

STRÖMUNGSSIMULATIONEN EINES KLASSENZIMMERS

AEROSOLAUSBREITUNG UND LÜFTUNGSKONZEPTE IM KONTEXT DER CORONA-PANDEMIE

15. Anwendertreffen der FDS-Usergroup, 4./5. November 2021 in Berlin

Benjamin Schaufelberger Benjamin.Schauelberger@emi.fraunhofer.de

Dr. Pascal Matura Pascal.Matura@emi.fraunhofer.de

Christian Labusch Christian.Labusch@emi.fraunhofer.de



© Adobe Stock

1
© Fraunhofer

 Fraunhofer
EMI

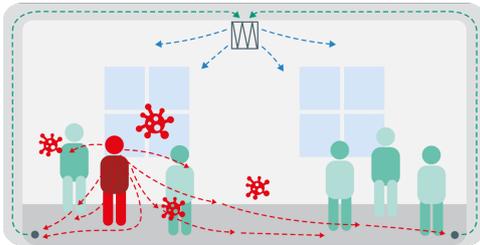
AGENDA

- Rückblick, Vortrag vom 14. Treffen
- Modellierung und Validierung Raumluftreiniger
- Strömungssimulation Klassenzimmer
 - FDS-Modell
 - Auswertemethodik
 - Vergleich unterschiedlicher Szenarien
- Ein Blick auf *Multiple Meshes* und *Velocity Tolerance*

2
© Fraunhofer

 Fraunhofer
EMI

Rückblick Vortrag 14. Treffen Projektvorstellung [1]



Verminderung der Infektionsgefahr durch Aerosol-getragene Viren in geschlossenen Räumen

- (1) Modellierung der Ausbreitungsmechanismen
- (2) Reinigung der Raumluft, Desinfektion
- (3) Validierung in Labor- und Realumgebungen
- (4) Ableitung von Hygienekonzepten für diverse Nutzungen

- Institutsübergreifendes Fraunhofer-Projekt
- Innovative Innenraumluft-Konzepte: neue Methoden zur Aerosol-Simulation und Filterkonzepte
- Laufzeit: Oktober 2020 bis Dezember 2021

Fraunhofer IBP EMI IAP ICT IFAM IFF IGB IGD IMM IPM ITEM ITWM LBF Austria Singapore

[1] Fraunhofer EMI, Anti-Virus-Aerosol: Testing, Operation, Reduction »AVATOR« <https://www.emi.fraunhofer.de/de/aktuelles/aktuelles-presse/avator.html>, Zugriff: 4.11.2021

3
© Fraunhofer



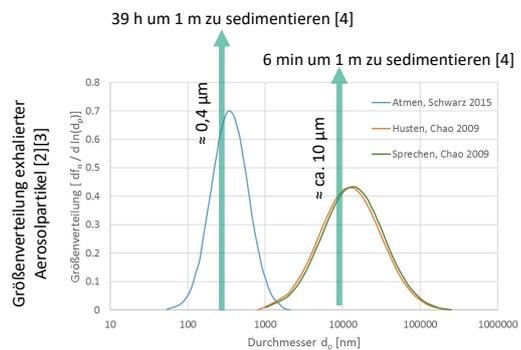
Rückblick Vortrag 14. Treffen Exhalierete Aerosole

- Experimentelle Arbeiten zur Analyse des Strömungsfeldes in der Nähe der Quelle (Videos unter: [avator - Fraunhofer EMI](#))



Schlieren-Aufnahmen: Popko, G. und Mert, D.

- Größenverteilung und Sedimentation



[2] Schwarz, K. et al.: Characterization of exhaled particles from the human lungs in airway obstruction, Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery 28/1, 2015

[3] Chao, C.Y.H et al.: Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening, Aerosol Science 40, 2009

[4] Gesellschaft für Aerosolforschung: Positionspapier der Gesellschaft für Aerosolforschung zum Verständnis der Rolle von Aerosolpartikeln beim SARS-CoV-2 Infektionsgeschehen, 2020

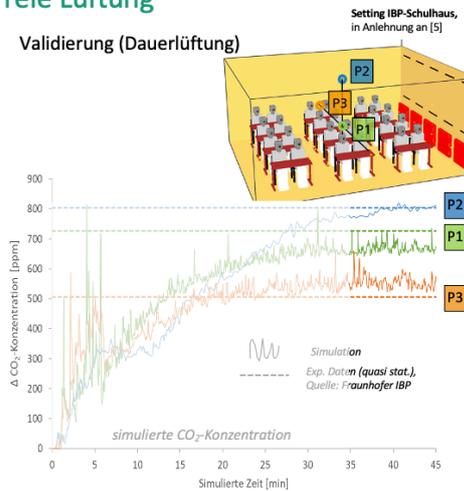
4
© Fraunhofer



Rückblick Vortrag 14. Treffen

Freie Lüftung

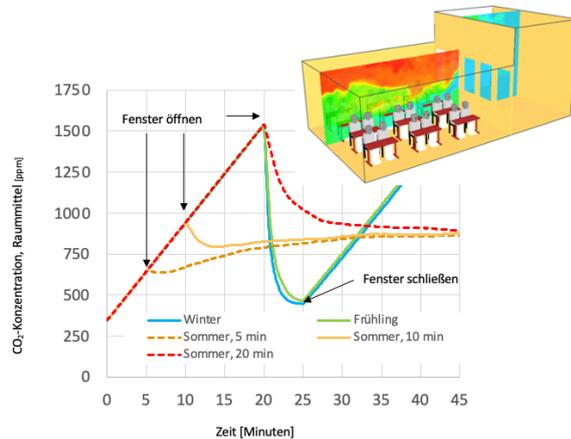
Validierung (Dauerlüftung)



[5] Steiger, S.; Hellwig, R.T.: *Hybride Lüftungssystem für Schulen*, Abschlussbericht Fraunhofer IBP, 2011

5
© Fraunhofer

Einfluss Außentemperatur (Stoßlüftung)



Fraunhofer
EMI

Raumluftreiniger

Vorstellung des ausgewählten Raumluftreinigers

- Grundlage der Simulation und Validierung ist die Veröffentlichung: *Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole Wirksam reduzieren?* von Prof. Christian Kähler et al. [6]
 - PIV-Daten zur Strömungsgeschwindigkeit in der Umgebung des Raumluftreinigers
 - Untersuchungen im »realen« Klassenraum
- Fabrikat des Luftreinigers: TROTEC TAC V+ [7]
- Ableitung des Modells aus den zugänglichen Herstellerangaben
 - Abmessungen: B/L/H = 610/690/1300 mm
 - Max. Volumenstrom 2,200 m³/h, bei H14-Filter empfohlen 1,200 m³/h

[6] Kähler, C.J. et al: *Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren*, Universität der Bundeswehr München, [raumluftreiniger.pdf \(unibw.de\)](#)
 [7] Trotec GmbH, [Hochleistungsraumluftreiniger TAC V+ - TROTEC](#)

6
© Fraunhofer

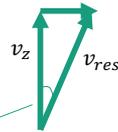
Fraunhofer
EMI

Raumlufreiniger Modellentwicklung

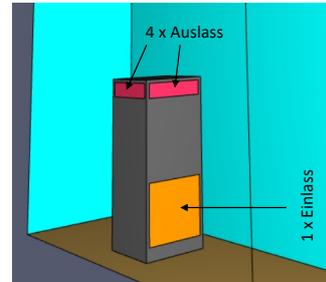
- Anpassung der Geometrien an die jeweiligen Meshes
- Ermittlung der tangentialen Geschwindigkeiten an den Auslässen
→ iterative Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten durch Vergleich der Simulationsergebnisse und der vorhandenen PIV-Daten

```
&SURF ID='Exhaust',
      RGB=255,153,0,
      VOLUME_FLOW=0.27778/
&SURF ID='Supply',
      RGB=255,51,102,
      VOLUME_FLOW=-0.069445,
      VEL_T=0.0,2.37712/
```

→ entspricht 30°



Im Eingabefile muss ein größerer Winkel eingestellt werden als im Experiment bzw. in der Simulation beobachtet wird (21°).



FDS-Modell Raumlufreiniger

- Netzstudie: der einzustellende Winkel ist abhängig von der Elementgröße

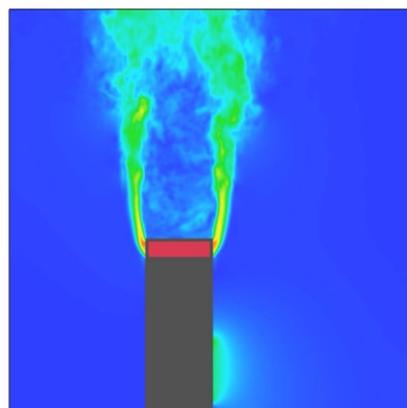
[6] Kähler, C.J. et al: Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren, Universität der Bundeswehr München, [raumlufreiniger.pdf \(unibw.de\)](https://www.unibw.de/~raumlufreiniger.pdf)

7
© Fraunhofer

Fraunhofer
EMI

Raumlufreiniger Simulation des ausgewählten Raumlufreinigers

- Elementkantenlänge: 1,25 cm
- Volumenstrom: 1000 m³/h
- Gewählter Ausströmwinkel: 30°



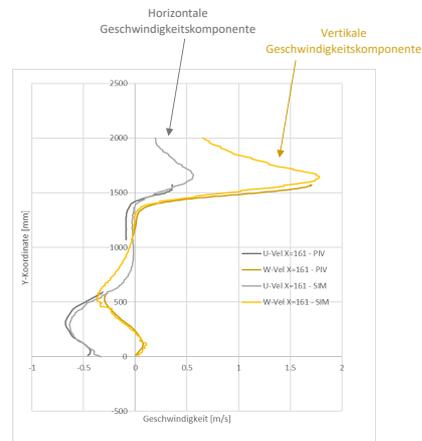
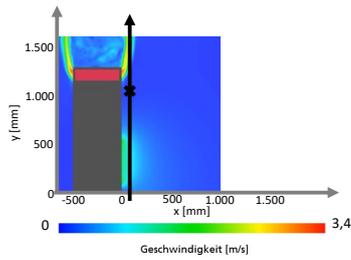
3,4
Geschwindigkeit [m/s]
0

8
© Fraunhofer

Fraunhofer
EMI

Raumlufreiniger Validierung der Strömungsgeschwindigkeiten

- Vergleich der Daten an ausgewähltem x-Achsenabschnitt

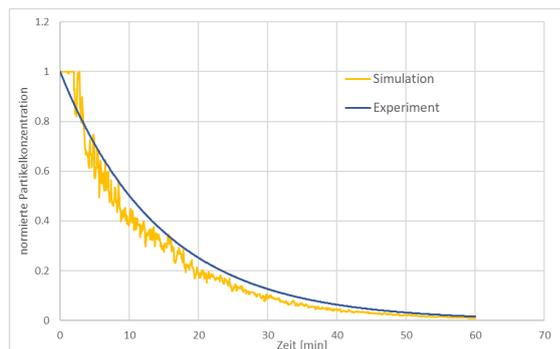


[6] Kähler, C.J. et al: Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren, Universität der Bundeswehr München, [raumlufreiniger.pdf \(unibw.de\)](https://www.fraunhofer-emi.de/raumlufreiniger.pdf)

Raumlufreiniger Validierung der Abnahme der Aerosolkonzentration

- Validierung basierend auf Experimenten zur normierten Partikelkonzentration [6]
- Abmessungen Raum: 9 m x 9 m x 2,5 m
- Elementgröße 5 cm
- Simulationsdauer 60 min

- ➔ Modell validierter Raumlufreiniger vorhanden
- ➔ Einsatz im Modell Klassenzimmer



[6] Kähler, C.J. et al: Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren, Universität der Bundeswehr München, [raumlufreiniger.pdf \(unibw.de\)](https://www.fraunhofer-emi.de/raumlufreiniger.pdf)

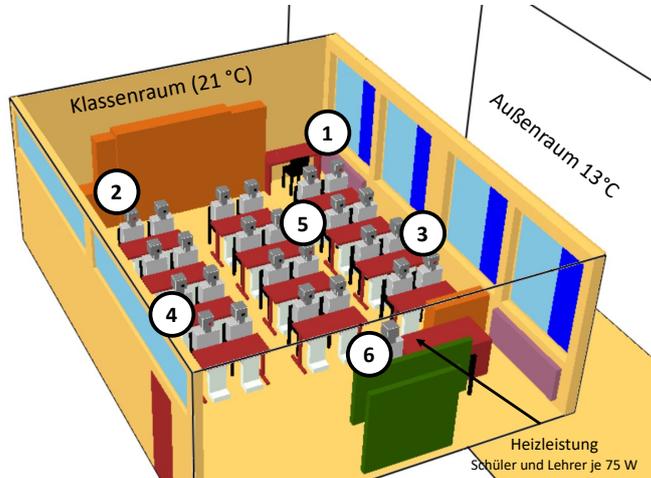
Strömungssimulation Klassenzimmer

FDS-Modell Klassenzimmer

1 5 infizierte Schüler + infizierter Lehrer

```
&SURF ID='Breath_withMask_Inf-1',
  TMP_FRONT=32,
  SPEC_ID(1)='NITROGEN',
  MASS_FLUX(1)=0.5538,
  SPEC_ID(2)='OXYGEN',
  MASS_FLUX(2)=0.1361,
  &SPEC_ID(3)='CO2_Inf-1', CO2 als Tracergas
  MASS_FLUX(3)=0.04404,
  RAMP_MF(1)='Ramp_Atmung_mitMaske',
  RAMP_MF(2)='Ramp_Atmung_mitMaske',
  RAMP_MF(3)='Ramp_Atmung_mitMaske' /
```

Elementkantenlänge 5 cm
 Klassenraum: 12 Meshes, 1 454 355 Elemente
 Außenraum: 9 Meshes, 964 880 Elemente



Klassenraum: 6,75 m x 8,55 m x 3,15 m ≈ 181,8 m³
 Simuliert wird die Dauer einer Schulstunde, 45 min

11
 © Fraunhofer



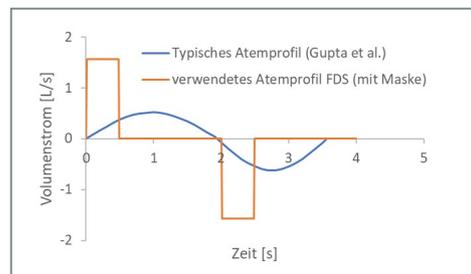
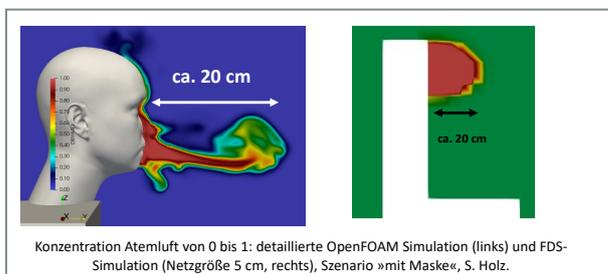
Strömungssimulation Klassenzimmer

Quellterm

- Klassenraum-Modell (Zellgröße 5 cm) kann lokale Luftströmung am Mund nicht ausreichend auflösen
- Ziel: Volumenstrom und Strahlweite korrekt abbilden
- Annahmen: Atemvolumen 0,6 m³/h und 15 Atemzyklen pro Minute

```
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 0.0, F = 0.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 0.01, F = 1.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 0.48, F = 1.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 0.49, F = 0.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 2.0, F = 0.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 2.01, F = -1.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 2.48, F = -1.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 2.49, F = 0.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 4.0, F = 0.0 /
&RAMP ID='Ramp_Atmung_mitMaske', T = 4.01, F = 1.0 /
```

- ➔ Zeitschritt ausreichend klein
- ➔ NUMBER_INTERPOLATION_POINTS (Default 5000)



[8] Gupta, J.K.: Characterizing exhaled airflow from breathing and talking, Indoor Air 20, 2010

12
 © Fraunhofer



Strömungssimulation Klassenzimmer

Auswertemethodik

1. Kontinuumsbeschreibung

$c(\vec{r}, t) = \frac{V_p(\vec{r}, t)}{\delta V}$

$c(\vec{r}, t)$: Konzentrationsfeld
Aerosolpartikel einer inf. Person
 $V_p(\vec{r}, t)$: Aerosol-Partikel Volumen
 δV : Raumvolumen

2. Räumliche Mittelung

$c^{(n)}(t) = \frac{1}{V^{(n)}} \int_{V^{(n)}} c(\vec{r}, t) dV$

n : (gesamt) Anzahl Schüler
 $V^{(n)}$: Mittelungsvolumen Schüler n

3. Inhalierete Aerosolmenge

$A_{in, total}^{(n)} = \bar{v} \int_0^T c^{(n)}(t) dt$

$A_{in, total}^{(n)}$: inhalierete Aerosolmenge
 \bar{v} : konstanter Atemvolumenstrom

4. Normierung

$A_{in, total}^{(n)} = \bar{v} \int_0^T c^{(n)}(t) dt$

$A_{ex, total} = \bar{v} \int_0^T c^{(mark)}(t) dt$

$R^{(n)} = \frac{A_{in, total}^{(n)}}{A_{ex, total}}$

$A_{in, total}^{(n)}$: inhalierete Aerosolmenge, Schüler n
 $A_{ex, total}$: exhalierte Aerosolmenge (Indexperson)
 $R^{(n)}$: relative inhalierete Aerosolmenge

13
© Fraunhofer



Strömungssimulation Klassenzimmer

Auswertemethodik

Konzentration virenbeladenes Aerosol
»Infizierter 2«

Hier: t = 45 Minuten

1.54 · 10 ⁻³	4.45 · 10 ⁻³	1.33 · 10 ⁻³	1.10 · 10 ⁻³	1.04 · 10 ⁻³
2.15 · 10 ⁻³	2.09 · 10 ⁻³	1.63 · 10 ⁻³	1.34 · 10 ⁻³	1.08 · 10 ⁻³
2.14 · 10 ⁻³	1.90 · 10 ⁻³	1.58 · 10 ⁻³	1.40 · 10 ⁻³	1.11 · 10 ⁻³
1.90 · 10 ⁻³	1.77 · 10 ⁻³	1.59 · 10 ⁻³	1.46 · 10 ⁻³	1.03 · 10 ⁻³
		1.18 · 10 ⁻³		

Verteilung für »Infizierter 2«

~ 1,5 ‰

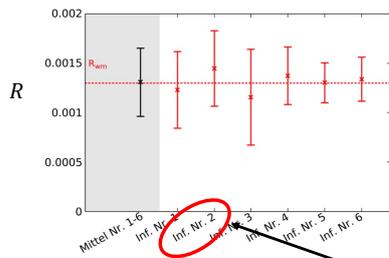
$R^{(n)} = \frac{A_{in, total}^{(n)}}{A_{ex, total}}$

14
© Fraunhofer

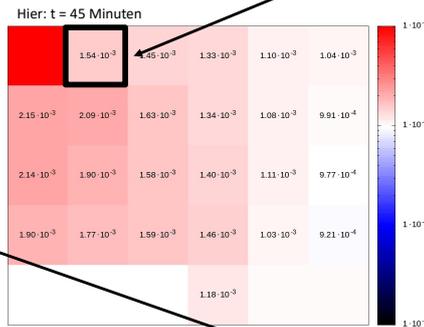
Vorläufige Ergebnisse



Strömungssimulation Klassenzimmer Auswertemethodik



Statistische Auswertung über alle Schüler im Raum:
Mittelwert und Standardabweichung im Vergleich zum gut durchmischten Raum (Engl. well mixed room).

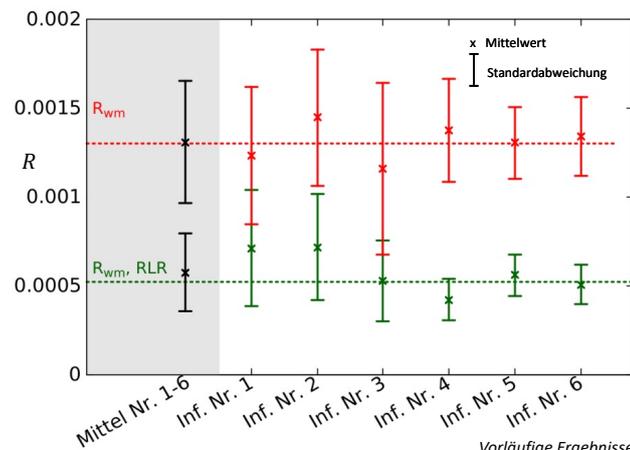
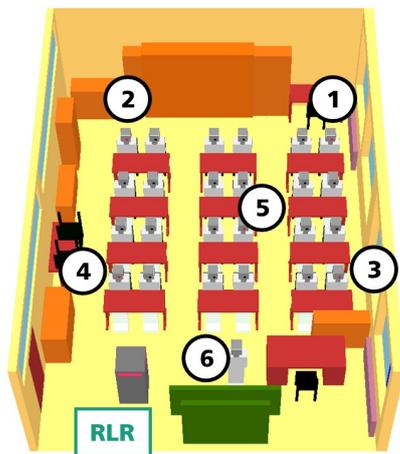


$$R^{(n)} = \frac{A_{in,total}^{(n)}}{A_{ex,total}}$$

Verteilung für »Infizierter 2«

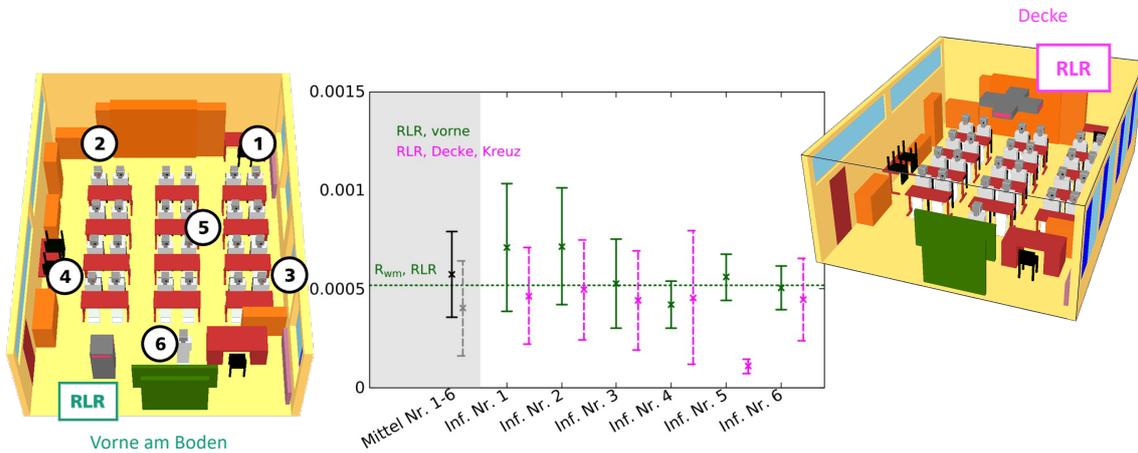
Vorläufige Ergebnisse

Strömungssimulation Klassenzimmer Raumlufreiniger



Vorläufige Ergebnisse

Strömungssimulation Klassenzimmer Raumlufreiniger Positionierung

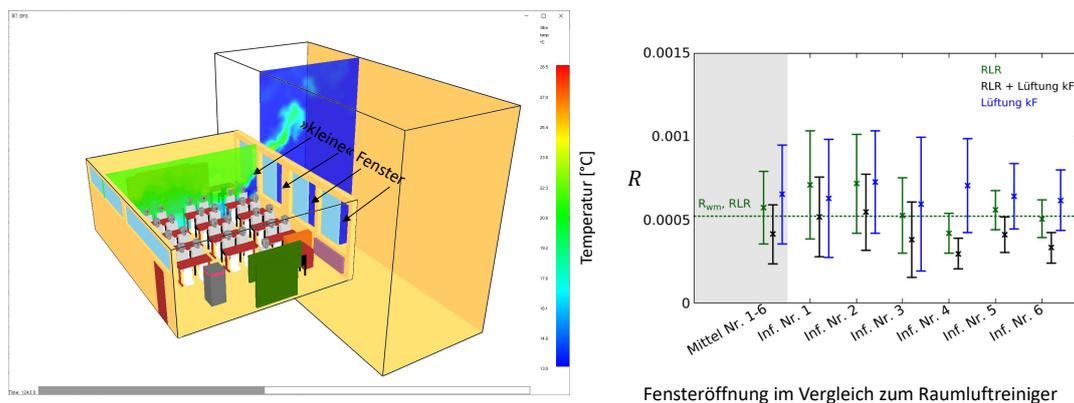


Vorläufige Ergebnisse

17
© Fraunhofer

Fraunhofer
EMI

Strömungssimulation Klassenzimmer Freie Lüftung



Öffnung der vier kleinen Fenster nach 20 min für 5 min

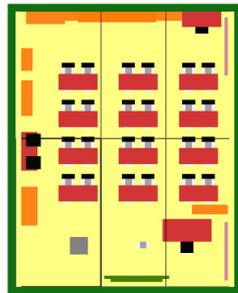
Fensteröffnung im Vergleich zum Raumlufreiniger

Vorläufige Ergebnisse

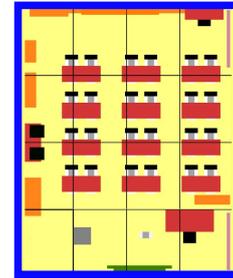
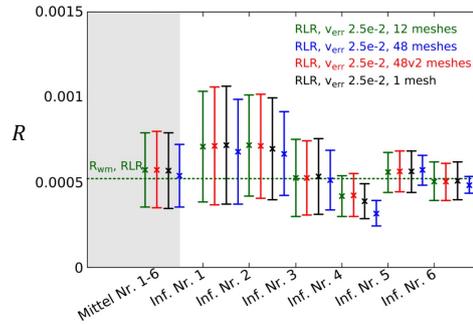
18
© Fraunhofer

Fraunhofer
EMI

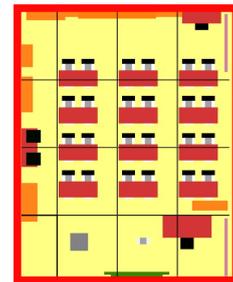
Ein Blick auf *Multiple Meshes* und *Velocity Tolerance*



12 meshes



48 meshes



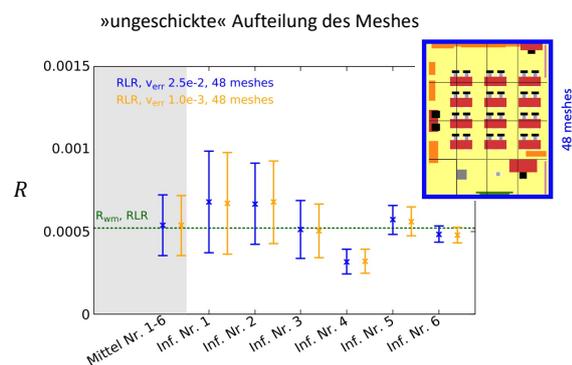
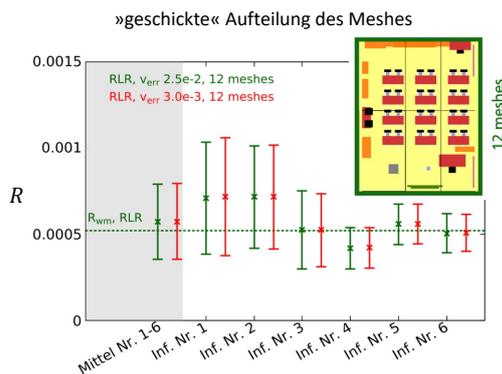
48 meshes v2

- Dargestellte Rechnungen mit default velocity error
- Bei verwendeten 12 Meshes gute Übereinstimmung zur Referenz (1 Mesh)
- Bei ungeschickter Aufteilung (48 Meshes) deutliche Abweichungen zu beobachten

19
© Fraunhofer

Ein Blick auf *Multiple Meshes* und *Velocity Tolerance*

- Untersuchung des Einflusses der »Velocity Tolerance« bei den Druck-Iterationen



In den untersuchten Fällen führt eine Verringerung der erlaubten »Velocity Tolerance« zu keiner signifikanten Veränderung der Ergebnisse

20
© Fraunhofer

Fazit

- Im Rahmen des Vortrags wurde eine Methodik vorgestellt, mit der basierend auf relativen Aerosolmengen und CFD-Simulationen eine vergleichende Bewertung einzelner Maßnahmen durchgeführt werden kann.
- Die Simulation entsprechender Validierungsszenarien (freie Lüftung, Raumlufreiniger) und die Überprüfung mit analytischen Ansätzen (well-mixed room) zeigen, dass FDS ein geeignetes Simulationsprogramm zur Berechnung von Raumluftströmungen in Alltagsszenarien ist.
- In den untersuchten Klassenraum-Szenarien (Simulationsdauer 45 Minuten, Anfangsaerosolkonzentration Null, Raumvolumen 182 m³) konnte sowohl mit einem Raumlufreiniger (1000 m³/h, ideale Filterleistung) als auch durch Stoßlüften (nach 20 min für 5 min, Temperaturdifferenz 8 °C, Öffnungsfläche 4,8 m²) in etwa eine Halbierung der Aerosolkonzentration erreicht werden. Die Wirkung kann durch eine geschickte Positionierung (Raumlufreiniger), noch häufigeres Lüften und eine Kombination der Maßnahmen erhöht werden.
- Für das Ableiten konkreter Infektionsrisiken sind u.a. absolute Werteangaben zur Aerosolkonzentration notwendig. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ausscheidung pathogener Viren / Aerosolpartikel stark von der jeweils infizierten Person und deren Tätigkeit abhängt.

Tristan Hehnen:

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen

Abstract:

Aus diversen Gründen steht jeder Nutzer irgendwann vor der Entscheidung zu einer anderen FDS Version zu wechseln. In diesem Kurzvortrag werden einige Stolperstellen dargestellt, welche bei solch einem Wechsel angetroffen werden können. Es werden Ideen diskutiert, um mögliche Schwierigkeiten frühzeitig zu erkennen.

Zudem wird die Wichtigkeit der Angabe der FDS Versionsnummer in Veröffentlichungen unterstrichen. Insbesondere im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit vorgestellter Ergebnisse.

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Übersicht

- Wechsel zu anderen FDS Versionen
- Stolperstellen
- „Wir arbeiten mit FDS 6.“
- Weshalb ist das wichtig?
- Worauf sollten Nutzer achten?
- Nebenpunkt:
Reproduzierbarkeit gewährleisten

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Wechsel zu einer anderen FDS Version

- Irgendwann muss/will jeder Nutzer die Version wechseln. Nicht nur für FDS.

- Dienstleister (e.g. Rechenzentrum) ändert Ausstattung/Umgebung
- Neue Funktionen
- Bessere Leistungsfähigkeit
- Bug fixes
- ...



Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



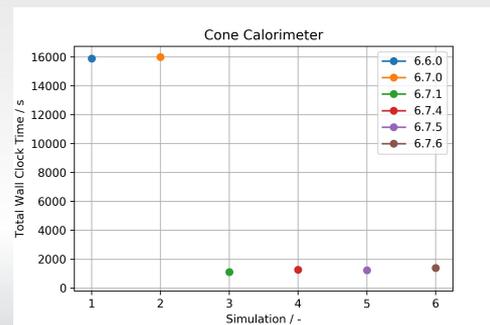
Stolperstellen

Beim Wechsel gibt es verschiedene Stolperstellen. Nicht alle sind direkt offensichtlich.

Auch weil die FDS Eingabedateien „einfach laufen“.

Beispiele:

- Es können sich Fehler in den Updates einschleichen
 - Viele kleine Änderungen werden zu einer neuen Version zusammengefasst.



FDS 6.7.1 (Feb 5, 2019)

• Fix bug in solid phase 1D heat transfer routine when temperature-dependent properties are used. The grid resolution requirement was being over-estimated, causing significantly longer run times than were necessary.

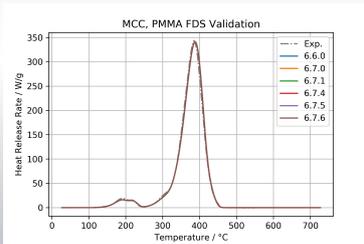
Quelle: <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Release-Notes>

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)

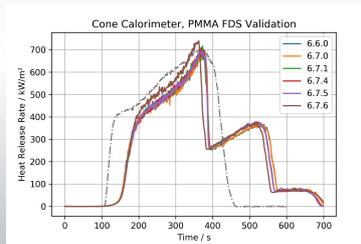


Stolperstellen

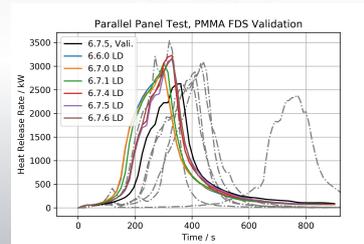
- Sub-Modelle können unterschiedlich stark betroffen sein.
- Aber auch Interaktion zwischen Sub-Modellen



TGA_ANALYSIS=.TRUE.



Mit Gasphase, 2 cm Zellen
EXTERNAL_FLUX=25.0



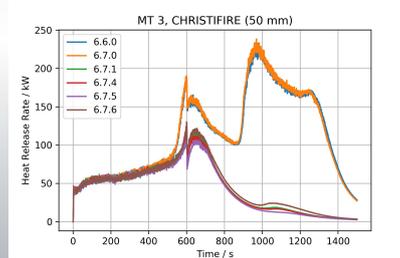
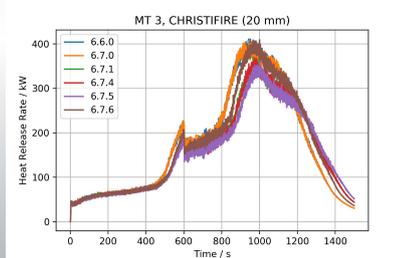
Parallel Panel FDS Validation Case,
2 cm Zellen

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Stolperstellen

- Gitterauflösung kann auch einen Einfluss haben. (Geänderte Standardeinstellungen?)



Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



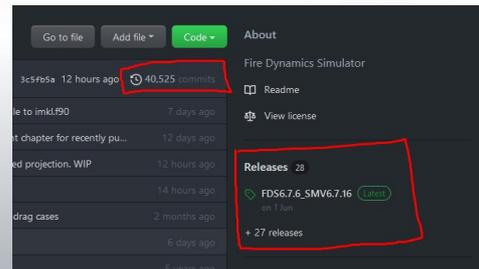
„Wir arbeiten mit FDS 6.“

„Wir arbeiten mit FDS 6.“

- FDS wurde nach GitHub übertragen,
 - etwa im Oktober 2015
 - die Version 6.3.0



- Seither wurden **tausende** Änderungen durchgeführt



Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



„Wir arbeiten mit FDS 6.“

- FDS 6.0.0 Entwicklung startete noch früher

```
r17283 | gforney | 2013-11-04 08:19:37 -0500 (Mon, 04 Nov 2013) | bundle: update fds web page release notes (from wiki->html conversion)
r17282 | gforney | 2013-11-04 07:42:50 -0500 (Mon, 04 Nov 2013) | bundle: minor update to FDS release notes, to change heading to FDS 6.0
r17279 | randy.mcdermott | 2013-11-03 21:39:17 -0500 (Sun, 03 Nov 2013) | FDS Source: change version string to 6.0.0
r17278 | randy.mcdermott | 2013-11-03 21:33:31 -0500 (Sun, 03 Nov 2013) | Manuals: change FDS version string to 6.0.0
r17277 | randy.mcdermott | 2013-11-03 21:30:17 -0500 (Sun, 03 Nov 2013) | FDS User Guide: add more discussion about PARTICLE_CFL for spray insertion of particles
```

Quelle: https://github.com/firemodels/fds/blob/master/Utilities/Misc/GoogleCode_Commit_Log.txt

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Weshalb ist das wichtig?

- Über verschiedene (Sub-) Versionen hinweg gab es teilweise drastische Änderungen
 - Beta Modelle sind bereits im Code, auch wenn nicht explizit im User Guide beschrieben
 - Beispiel &GEOM → remeshing der geschnittenen Zellen
- Auswahl weiterer Beispiele:

FDS 6.7.0 (June 20, 2018)

- `STIMULATION_MODE` replaces `RESEARCH_MODE` to control the level of physics. For example, `STIMULATION_MODE = 'ONS'` sets the code to run in direct numerical simulation model. Other options include `'LES'` (high-fidelity, convergent LES simulations), `'VLES'` ("very large-eddy simulation" [default] for coarse-grained, practical LES calculations), and finally `'SVLES'` ("Simple VLES", makes simplifying physical assumptions, such as constant specific heat ratio, to speed calculations when appropriate).
- Create look-up table for `CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE` based on minimum extinguishing concentration (MEC) measurements in cup burner experiments with nitrogen as the diluent.
- `PYRO3D` in beta testing.
- Add `SHAPE` feature to `OBST` line. When combined with `MULT` this allows the user to "sculpt" a basic shape (sphere, cylinder, or cone) out of the obstructions.

FDS 6.5.3 (Jan 22, 2017)

- Solid Heat Transfer 3D (HT3D) is in beta testing.

FDS 6.7.3 (Oct 31, 2019)

- Allow thin obstructions to burn.
- Beta version of an aerosol scrubbing model.
- Beta version of a condensation model.

Quelle: <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Release-Notes>

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Weshalb ist das wichtig?

- Standardeinstellungen ändern sich
- Auswahl an Beispielen:

FDS 6.7.0 (June 20, 2018)

- `STIMULATION_MODE` replaces `RESEARCH_MODE` to control the level of physics. For example, `STIMULATION_MODE = 'ONS'` sets the code to run in direct numerical simulation model. Other options include `'LES'` (high-fidelity, convergent LES simulations), `'VLES'` ("very large-eddy simulation" [default] for coarse-grained, practical LES calculations), and finally `'SVLES'` ("Simple VLES", makes simplifying physical assumptions, such as constant specific heat ratio, to speed calculations when appropriate).
- Set the default radiation `PATH_LENGTH` to 0.1 m. Previously it was a function of the cell size.

FDS 6.7.3 (Oct 31, 2019)

- `STRETCH_FACTOR` default value set to 2 for all surfaces, even burning surfaces. `STRETCH_FACTOR` controls the size of solid phase cells used to solve the 1-D heat transfer equation.

FDS 6.7.5 (Aug 21, 2020)

- `PROJECTION` is now `.TRUE.` by default.

FDS 6.7.1 (Feb 5, 2019)

- Modify `'EXTINCTION_1'` such that for large grid cells (like 5 cm and up) extinction does not occur if the bulk cell temperature is greater than approximately 600 C. The exact value depends on the size of the cell.

FDS 6.7.6 (June 1, 2021)

- The FDS source code now conforms to the 2018 standard.
- FDS now uses the 2008 Fortran MPI bindings, i.e. `USE MPI_F08` instead of `USE MPI`.

Quelle: <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Release-Notes>

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Was sollte in Veröffentlichungen angegeben werden?

- FDS erstellt eine *CHID.out* Datei für jeden Lauf
- Darin wird die Versionsnummer (Revision) der Software aufgeführt
 - **Diese Revision** sollte angegeben werden

```

1 |
2 | Fire Dynamics Simulator
3 |
4 | Current Date   : October 28, 2021 13:19:54
5 | Revision      : FDS6.7.6-0-g5064c50-HEAD
6 | Revision Date  : Thu May 27 12:19:10 2021 -0400
7 | Compiler       : Intel ifort 19.1.3.304
8 | Compilation Date : Aug 06, 2021 09:06:49
9 |

```

- Besonders **wichtig für nominell gleiche** Versionen
 - Beispiel: selbst-kompilierte Version

```

4 | Current Date   : September 6, 2021 17:04:42
5 | Revision      : FDS6.7.6-618-g15afdd1a4-HEAD
6 | Revision Date  : Mon Aug 30 13:21:32 2021 -0400

```

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Worauf sollten Nutzer achten?

- Nicht während eines laufenden Projektes wechseln.
- Nicht ohne Not die Version wechseln, bloß um die neueste zu haben.
- Verhalten der neuen Version prüfen um sicherzustellen das die Ergebnisse passen, sprich „alte“ Fälle.
- Eventuell auch Standardwerte explizit angeben.
- Validation cases rechnen?

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Wie lässt sich Reproduzierbarkeit gewährleisten?

- Versionsnummern korrekt angeben
- FDS Eingabedateien, Ergebnisse und Experimentaldaten veröffentlichen
- Eine Option hier wäre Zenodo
 - Gesponsert von: CERN, OpenAIRE und Europäische Kommission
 - 50 GB **pro Projekt**
 - Data Object Identifier (DOI) ermöglicht Zitierbarkeit
 - Versionen
 - Offen für „alles“



Quelle: <https://zenodo.org/communities/fire-safety-engineering-and-evacuation/?page=1&size=20>

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



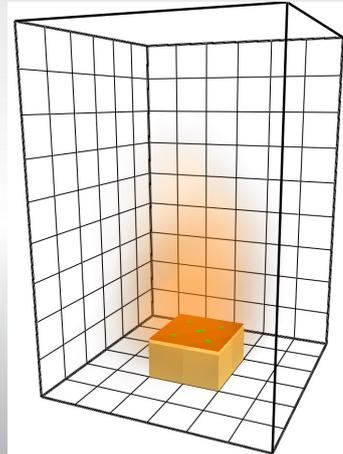
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Anhang

- Simple Cone Calorimeter Setup,
5 cm Zellen

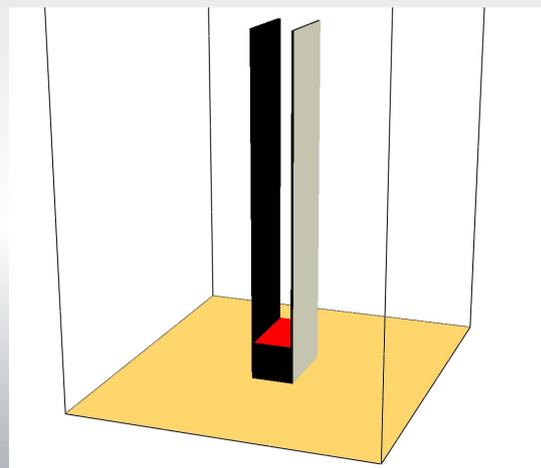


Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Anhang

- FDS Validation Case:
 - Parallel Panel Test, 2 cm Zellen

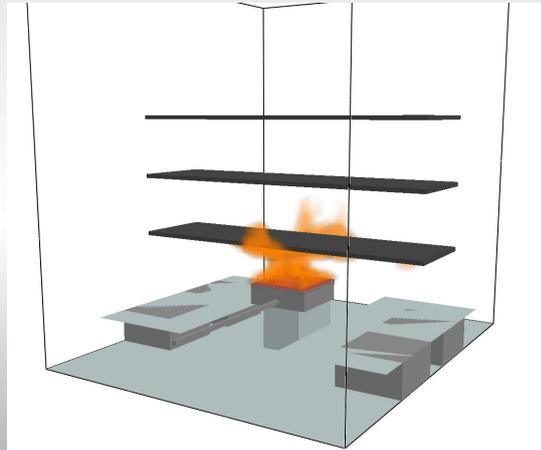


Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)



Anhang

- Kabelinstallation:
 - CHRISTIFIRE Multiple Tray Test 3,
2 cm Zellen



Über den Umgang mit verschiedenen FDS Versionen
Tristan Hehnen | Computational Civil Engineering (CCE)

Gregor Jäger, Manuel Osburg, Benjamin Schröder:

Holzbau - Brandsimulation

Abstract:

Ausgehend von allgemeinen Fragen zur Simulation bei Fragestellungen zum Bauen mit Holz wollen wir u. a. unsere Variationen und Berechnungen zu den TIMpuls- Brandversuchen zeigen und diskutieren.

Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder, Gregor Jäger, Manuel Osburg

görtzen
ingenieure

hhpberlin 



Rückblick

14. Anwendertreffen der FDS Usergroup (6.-7. Mai 2021)

Was geht (nicht)?

- Über welche Schutzziele, funktionale Anforderung und Leistungskriterien sprechen wir?
- Wie kann der Einfluss sichtbarer Holzanteile beim Raumbrand quantifiziert werden?
- Welchen Beitrag kann FDS hier leisten?
- Welche Rolle spielen die unterschiedlichen Nutzungen bzw. Brandlastdichten?
- Wo liegen die Anwendungsgrenzen?

MHolzBauRL (Fassung Oktober 2020)

Anforderungen (neu)

- an feuerwiderstandsfähige Bauteile in Holzrahmen- und Holztafelbauweise für Standardgebäude der GK 4
- an feuerwiderstandsfähige Bauteile in Massivholzbauweise für Standardgebäude der GK 4 und GK 5
- an Außenwandbekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen bei Gebäuden der GK 4 und GK 5

Fassung Oktober 2020, DiBt Mitteilung Ausgabe 4, 21.06.2021

TIMpuls

Realbrandversuche

Literatur

- (1) Engel, T., Brunkhorst, S., Steeger, F., Winter, S., Zehfuß, J., Kampmeier, B., & Werther, N. (2020). TIMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau. *Bautechnik*, 97, 97–107.
- (2) Zehfuß, J., Kampmeier, B., Brunkhorst, S., & Steeger, F. (2021). TIMpuls - Forschungsvorhaben zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen zur erweiterten Anwendung des Holzbaus. *Tagungsband vfdb-Jahresfachtagung 2021*, 111–128.
- (3) Engel, T., Kurzer, C., Werther, N., & Winter, S. (2021). TIMpuls - abschließende Realbrandversuche für den mehrgeschossigen Holzbau. *Tagungsband vfdb-Jahresfachtagung 2021*, 131–145.
- (4) Engel, T., Kurzer, C., Werther, N., & Winter, S. (2021). Realbrandversuche als Grundlage neuer Forschungserkenntnisse für den Brandschutz im Holzbau. *Brandschutz-Tagung 2021*, 69–88.
- (5) Brunkhorst, S., Engel, T., Kurzer, C., Steeger, F., & Butscher, D. (2021). TIMpuls Großversuche an Holzbauten. In J. Zehfuß (Ed.), *Braunschweiger Brandschutz-Tage 2021 : 35. Fachtagung Brandschutz - Forschung und Praxis, 15. und 16. September 2021 : Tagungsband* (pp. 219–248). Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB).
- (6) Engel, T., & Werther, N. (2021). Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design. *Fire Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01174-2>

TIMpuls - Realbrandversuche

Untersuchungsziele

- Einfluss brennbarer Bauteiloberfläche auf den Brandverlauf
- Verhalten der Brandschutzbekleidung und deren Schutzzeiten unter Naturbeanspruchung
- Verhalten bzgl. Selbstverlöschen von Holzkonstruktionen
- Analyse der Brandweiterleitung über die Fassade in das Geschoss über dem Brandgeschoss durch brennbare Oberflächen im Raum
- Bewertung der Standsicherheit unter Naturbrandbeanspruchung

Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

TIMpuls - Realbrandversuche

Versuch	V0	V1	V2	V3	V4
Raumgröße (B x L x H)		4,5 m x 4,5 m x 2,4 m		4,5 m x 9,0 m x 2,4 m	
Grundfläche		20,25 m ²		40,50 m ²	
Öffnungsgröße (B x H)		2,4 m x 2,2 m		4,2 m x 2,2 m	
Sichtbare Holzoberfläche	0 %	35 %	37 %	42 %	58 %

Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

TIMpuls - Realbrandversuche

Brandlast

- Brandlastdichte
 - „Wohnraum“
 - 1.085 MJ/m²
- Holzkrippen
 - 74 kg/m² Holz
 - Gesamtgewicht: 1,5 t / 3 t
 - Anzahl: 9 Krippen / 18 Krippen

TIMpuls - V0

- Brandschutzbekleidung (2 x 25 mm GKF) verhindert den Mitbrand und die Verfärbung der Holzbauteile unter der resultierenden Naturbrandbeanspruchung
- Maximale Brandraumtemperatur: 1200 °C
- Flashover nach ca. 9 Minuten

TIMpuls – V0

Temperatur-Zeit-Kurve (4)

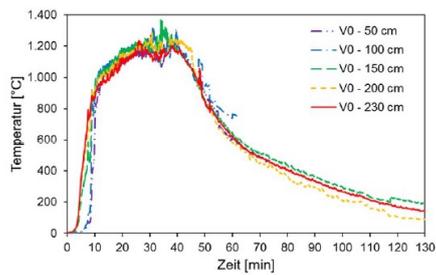
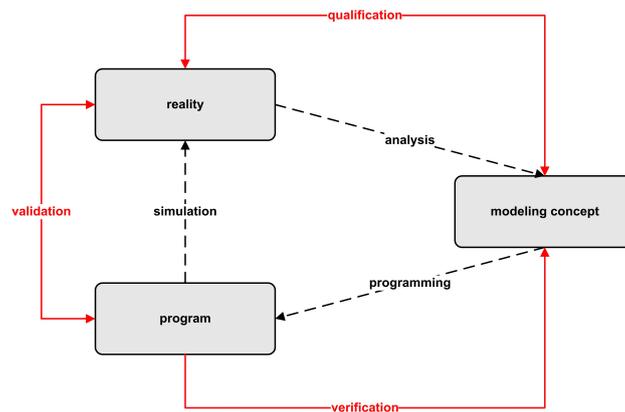


Bild 6 Temperatur-Zeit-Verläufe V0 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Validierung & Verifizierung

Verifikation & Validierung



Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

Verifikation & Validierung

- Analytische Tests
- Numerische Test
- Semi-Experimentelle Tests
- Experimente
 - Prüfung der Näherungsqualität
 - Anwendungstests
 - a-priori
 - blind
 - offen

Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

TIMpuls – V0

Informationen zu Beginn

- Literatur (1)-(4)
- YouTube – Livestream <https://youtu.be/RtbS3nAtW00>
- Temperatur-Zeit-Kurve (4)
- Artikelserie „Brand in Räumen“
- Vortrag: „Reproduzierbarkeit von Brandversuchen in Räumen durch Brandsimulation“
- Vorträge: „Ventilationssteuerung bei Raumbränden“

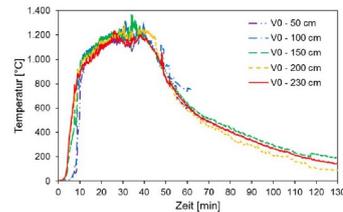
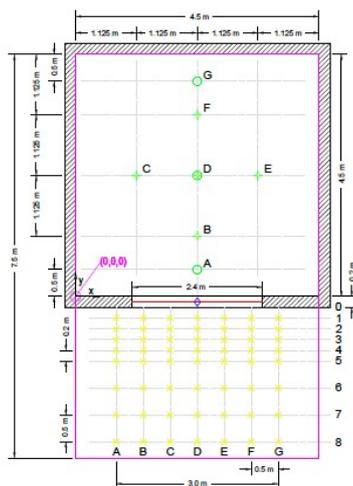


Bild 6 Temperatur-Zeit-Verläufe V0 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

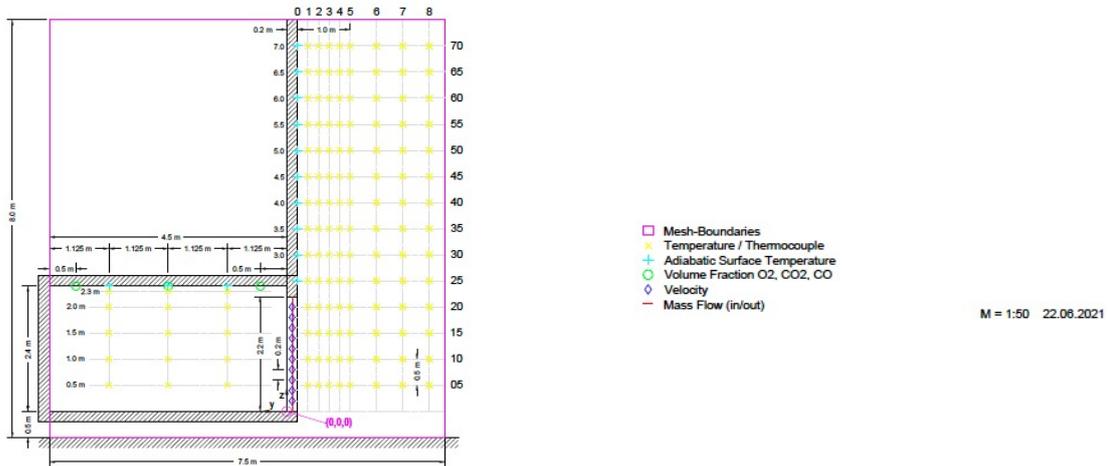
Referenzversuch V0



- Mesh-Boundaries
- × Temperature / Thermocouple
- + Adiabatic Surface Temperature
- Volume Fraction O2, CO2, CO
- ◇ Velocity
- Mass Flow (in/out)

M = 1:50 22.08.2021

Referenzversuch V0



Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

Bemessungsbrand

nach DIN EN 1991-1-2/NA

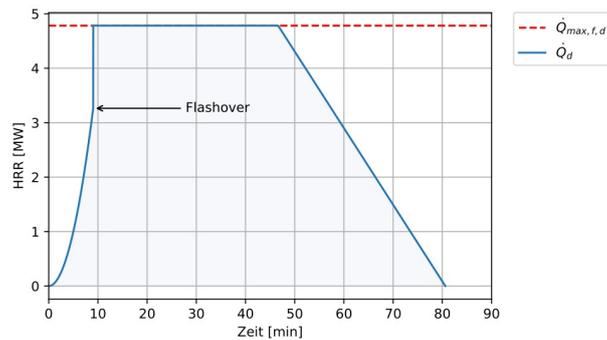
DIN EN 1991-1-2/NA

Nutzung	Schadensfolge					
	hoch		mittel		gering	
	β	p_f	β	p_f	β	p_f
Wohngebäude	4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$	4,2	$1,3 \cdot 10^{-5}$	3,7	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Gebäudeklasse				4 + 5		2 + 3
Hochhaus	5,2	$1,0 \cdot 10^{-7}$	4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$	4,2	$1,3 \cdot 10^{-5}$

Berechnung der Wärmefreisetzung nach EC1

- $q_{fk} = 1085 \text{ MJ/m}^2$
- $RHR_f = 0,25 \text{ MW/m}^2$
- $t_\alpha = 300 \text{ s}$
- $A_F: 20 \text{ m}^2; h: 2,4 \text{ m}; A_t: 63,45 \text{ m}^2; A_w: 5,28 \text{ m}^2; h_w: 2,2 \text{ m}$
- $p_f: 1,3 \cdot 10^{-5}$
- $p_1: 3,0 \cdot 10^{-3}; p_{2,1}: 0,5; p_{2,2}: 0,2; p_3: 1$
 - $p_{f,fi} = 4,3 \cdot 10^{-2}; \beta_{fi} = 1,713; \gamma_{fi,Q} = 0,945; \gamma_{fi,q} = 0,925$
- $Q_{\max,f,k} = 5,06 \text{ MW}; Q_{\max,v,k} = 10,84 \text{ MW}$
 - $Q_{\max,k} = 5,06 \text{ MW}$
 - $Q_{\max} = Q_{\max,k} * \gamma_{fi,q} = 4,78 \text{ MW}$

Berechnung der Wärmefreisetzung nach EC1



Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

Berechnungen

case	COMB	RHR [kW/m ²]			Q _{max} [MW]	A _F
		q _{aG}	q _{aAS}	q _{aAG}		
V0_HHP_10cm_01	EXTINCTION 2	236,15			4,78	20,25
V0_HHP_10cm_02	EXTINCTION 1	236,15			4,78	20,25
V0_HHP_10cm_03	EXTINCTION 2		470	611	19	37,8
V0_HHP_10cm_04	EXTINCTION 1		470	611	19	37,8
V0_HHP_10cm_05	EXTINCTION 2		201		7,6	37,8
V0_HHP_10cm_06	EXTINCTION 1		201		7,6	37,8

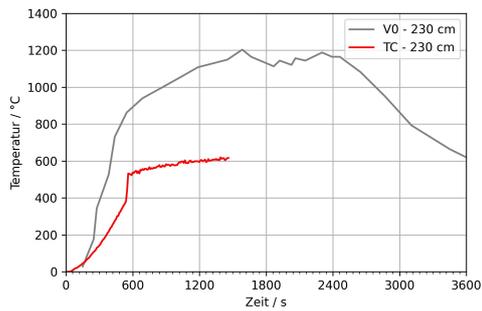
Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

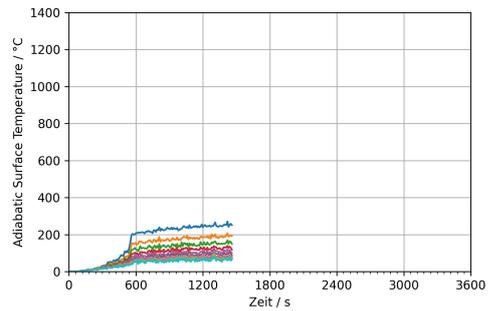
FDS Usergroup, 5. November 2021

VO_HHP_10cm_01

Temperatur Brandraum



AST Fassade



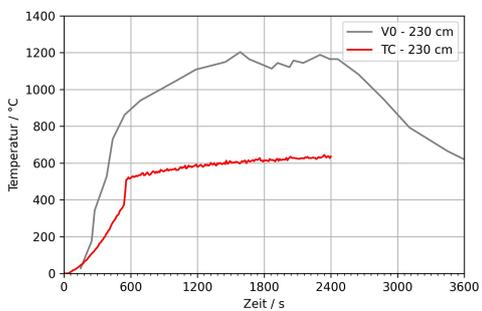
Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

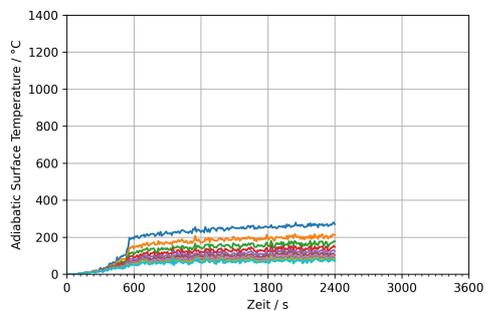
FDS Usergroup, 5. November 2021

VO_HHP_10cm_02

Temperatur Brandraum



AST Fassade



Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

Zwischenfazit

TIMpuls – V0

Wärmefreisetzungskurve – mobil (5)

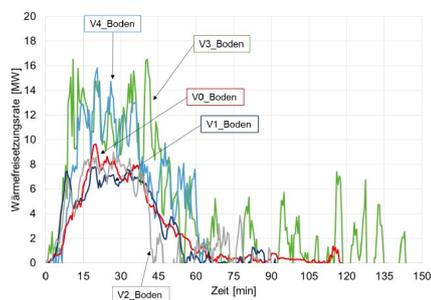


Bild 9 Vergleich der Wärmefreisetzungsraten der Belegversuche für den Boden (mobile Brandlast)

Wärmefreisetzungskurve – strukturell (5)

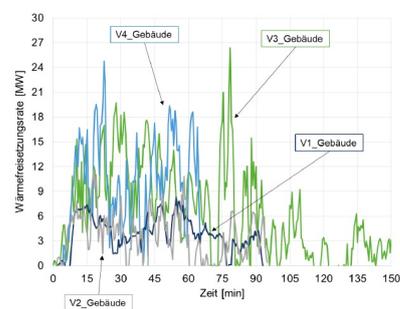
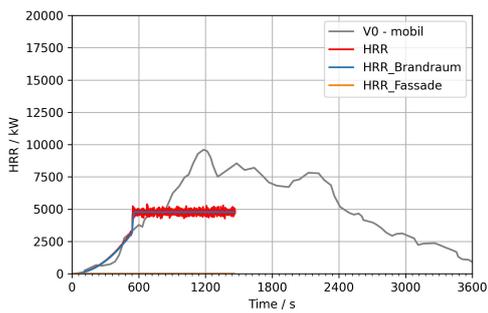


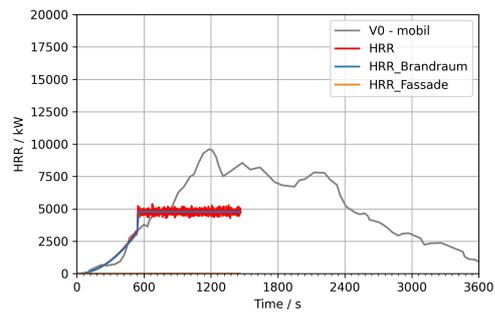
Bild 10 Vergleich der Wärmefreisetzungsraten der Belegversuche für das Gebäude (strukturelle Brandlast)

VO_HHP_10cm_01

Wärmefreisetzung



Wärmefreisetzung Brandraum/Fassade



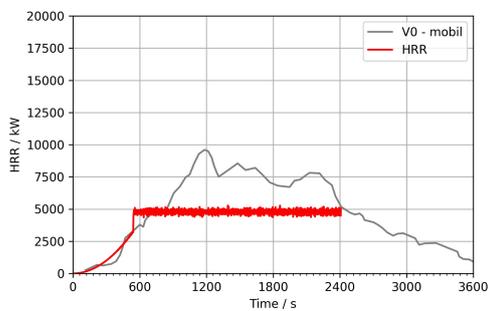
Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

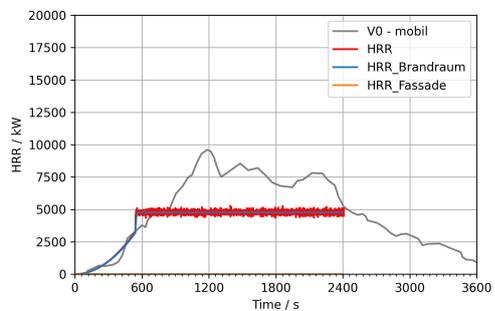
FDS Usergroup, 5. November 2021

VO_HHP_10cm_02

Wärmefreisetzung



Wärmefreisetzung Brandraum/Fassade



Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

Bemessungsbrand

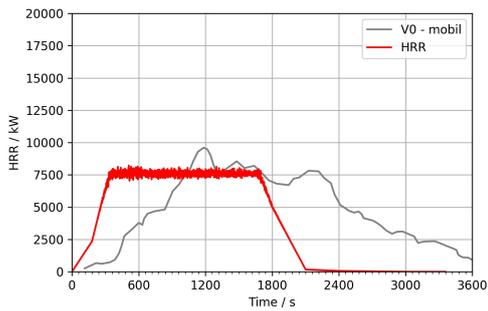
Näherung

Berechnungen

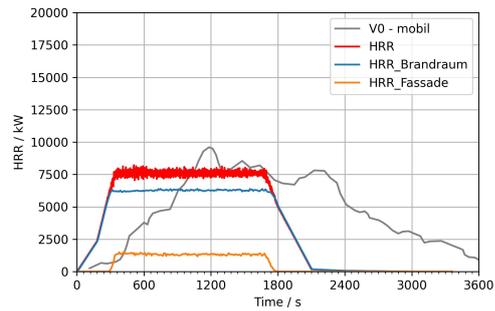
case	COMB	RHR [kW/m ²]			Q _{max} [MW]	A _F
		q _{aG}	q _{aAS}	q _{aAG}		
V0_HHP_10cm_01	EXTINCTION 2	236,15			4,78	20,25
V0_HHP_10cm_02	EXTINCTION 1	236,15			4,78	20,25
V0_HHP_10cm_03	EXTINCTION 2		470	611	19	37,8
V0_HHP_10cm_04	EXTINCTION 1		470	611	19	37,8
V0_HHP_10cm_05	EXTINCTION 2		201		7,6	37,8
V0_HHP_10cm_06	EXTINCTION 1		201		7,6	37,8

VO_HHP_10cm_06

Wärmefreisetzung



Wärmefreisetzung Brandraum/Fassade



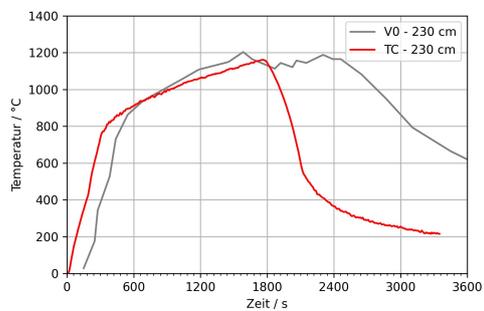
Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

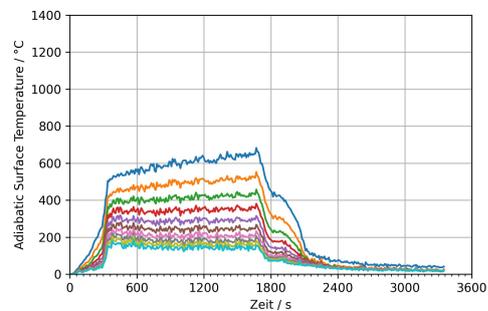
FDS Usergroup, 5. November 2021

VO_HHP_10cm_06

Temperatur Brandraum



AST Fassade



Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

Bemessungsbrand

nach Artikelserie „Der Brand in Räumen“

Hegemann, K., Wilk, E., & Kotthoff, I. (2016). Der Brand in Räumen - Abbrand von Lagergütern - Teil 8-4. *vfdB - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz*, 65(2), 90–105.

Hegemann, K., Wilk, E., & Kotthoff, I. (2016). Der Brand in Räumen - Abbrand von Lagergütern und Rauchausbeuten - Teil 8-5. *vfdB - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz*, 65(3), 124–135.

Der Brand in Räumen

Versuch	Masse	Breite	Tiefe	Höhe	A-grund	A-außen
BV01-14	25	0,50	0,50	0,50	0,25	1,25
BV00-19	50	1,00	0,50	0,50	0,50	2,00
Ho75KA	75	1,00	1,00	0,32	1,00	2,28
BV00-20	100	1,00	0,50	1,00	0,50	3,50
BV03-44	100	1,00	0,50	1,00	0,50	3,50
Ho200KA	200	1,00	1,00	0,84	1,00	4,36
BV00-04	200	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00
BV00-16	200	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00
BV13-02-5	200	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00
BV13-02-7	200	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00
Ho330KA	305	1,00	1,00	1,28	1,00	6,12
BV13-02-1	400	1,50	1,10	1,15	1,65	7,63
Ho440KA	412	2,00	1,00	0,96	2,00	7,76
Ho550KA	515	2,00	1,00	1,12	2,00	8,72
Ho712KA	712	2,00	1,00	1,60	2,00	11,60

Tabelle 100: Abmessungen der Holzkippen zur Auswertung gem. Abschnitt 12.6.2.

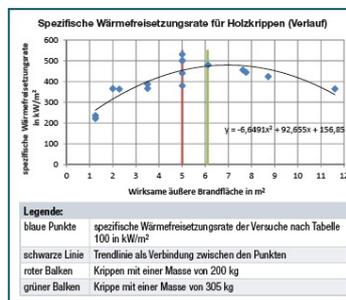


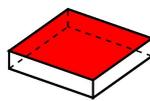
Abbildung 338: Spezifische Wärmefreisetzungsrate für Holzkippen mit unterschiedlich großen Außenflächen und verschiedenen Brandstoffmassen.

Zusammenfassung	t ₉₀	qa ₉₀ -Vers.	qa ₉₀ -DIN	qa ₉₀ -Vers.	γ ₉₀
Wellkarton, geschichtet	250	750	378	140	0,72
Lagergüter in Kartons	220	840		235	0,49
Kartons, leer	200	433	428	100	0,97
24 Getränkekästen	400	2000	474	330	0,27
110 Getränkekästen	220	2300	474	420	0,43
Speisemargarine, 1 m hoch	330	330	270	115	0,28
Speisemargarine, 2 m hoch	290	490	270	110	0,34
Papier, gepresst in Ballen	200	230		100	0,33
Papier und Alten, 0,5 m hoch	600	250	378	150	0,12
Papier und Alten, 1,5 m hoch	300	700	378	170	0,25
Bücher in Metallregalen	250	400	83	150	0,26
Bücher in Holzregalen	200	700	83	330	0,36
Holzkippen ²⁾	250	2025	346	470	0,40

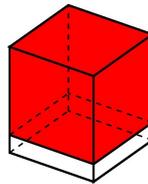
Legende:
 t₉₀ in Sekunden qa₉₀ in kW/m² qa₉₀-DIN nach DIN 18230-3
 qa₉₀ in kW/m²

Tabelle 99: Zusammenfassung zu Lagergütern.

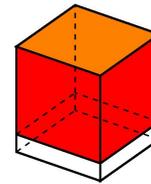
Modellierung



q_{aG}



q_{aW}



q_{aAS} / q_{aAG}

Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021

Berechnungen

case	COMB	RHR [kW/m ²]			Q _{max} [MW]	A _F
		q _{aG}	q _{aAS}	q _{aAG}		
V0_HHP_10cm_01	EXTINCTION 2	236,15			4,78	20,25
V0_HHP_10cm_02	EXTINCTION 1	236,15			4,78	20,25
V0_HHP_10cm_03	EXTINCTION 2		470	611	19	37,8
V0_HHP_10cm_04	EXTINCTION 1		470	611	19	37,8
V0_HHP_10cm_05	EXTINCTION 2	201			7,6	37,8
V0_HHP_10cm_06	EXTINCTION 1	201			7,6	37,8

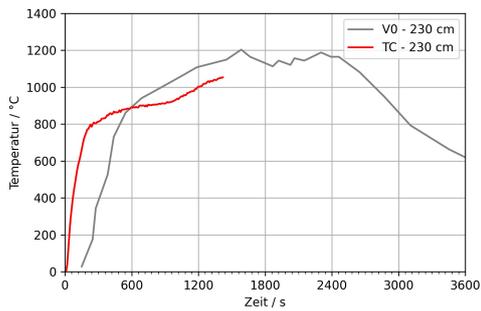
Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

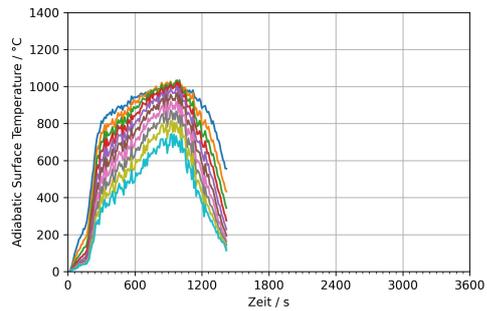
FDS Usergroup, 5. November 2021

VO_HHP_10cm_04

Temperatur Brandraum



AST Fassade



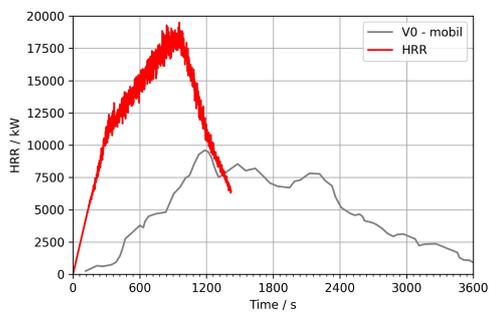
Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

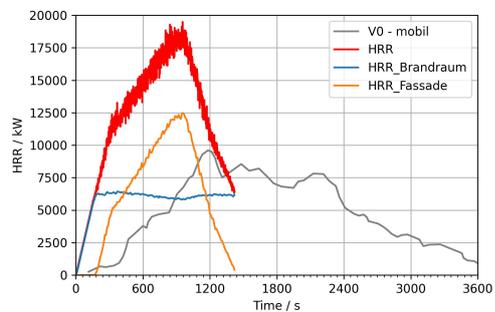
FDS Usergroup, 5. November 2021

VO_HHP_10cm_04

Wärmefreisetzung



Wärmefreisetzung Brandraum/Fassade



Holzbau - Brandsimulation

Benjamin Schröder | Gregor Jäger | Manuel Osburg

FDS Usergroup, 5. November 2021



Holzbau und Brandsimulation

Teil 2

Benjamin Schröder, Gregor Jäger, Manuel Osburg

05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

TIMpuls



Für die Versuche wird eine Brandlastdichte für die Nutzung „**Wohnen**“ gewählt. Damit ergibt sich nach DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09 für das 90 % - Quantil eine charakteristische Brandlastdichte von 1.085 MJ/m².

- Gleichmäßig verteilte Holzkippen jeweils 1.000 x 1.000 mm aus Stäben mit den Abmessungen B x H = 40 x 40 mm
- Material zu Luft Verhältnis der Krippen beträgt 1:1.
- Unter Berücksichtigung der Holzfeuchte und der Rohdichte der Holzkippen (Kiefer) entspricht die oben beschriebene Brandlast von 1085 MJ/m²:
 - ca. **74 kg/m² Holz**
 - ca. **1,5 Tonnen Holz** (Summe) im **kleinen Raum** (4,5 x 4,5 m) aus 9 Krippen
 - ca. **3 Tonnen Holz** (Summe) im **großen Raum** (4,5 x 9 m) aus 18 Krippen



05.11.2021

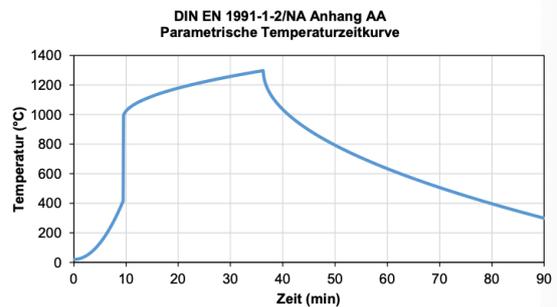
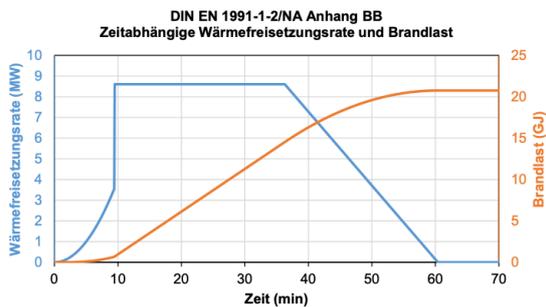
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

2

Vorarbeiten: Vereinfachtes Naturbrandmodell EC1-1-2/NA



Raumabmessungen:	$A_f = L \times B = 4,5 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} = 20,25 \text{ m}^2$	Brandlastdichte:	$q_{f,d} = 1.025 \text{ MJ/m}^2$ (mit $m_{\text{Holz}} = 1,5 \text{ t u. } \chi = 0,8$)
Raumhöhe:	$H = 2,4 \text{ m}$	Brandentwicklung:	$t_w = 300 \text{ s}$
Ventilationsöffnung:	$A_w = b_w \times h_w = 2,4 \text{ m} \times 2,2 \text{ m} = 5,28 \text{ m}^2$	HRR_Max (ventilationsgesteuert):	$Q_{\text{max,v,k}} = 1,57 \cdot \chi_{\text{O}_2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} = 8,61 \text{ MW}$
Teilsicherheitsbeiwerte:	$\gamma_i = 1,0$	HRR_Flashover:	$Q_{\text{FO}} = 3,57 \text{ MW}$ ($t_{\text{FO}} = 567 \text{ s}$)



05.11.2021

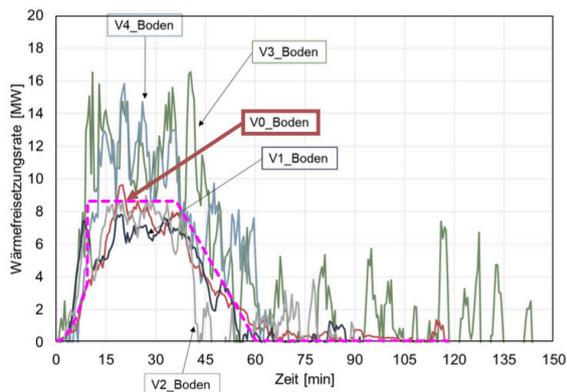
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

3

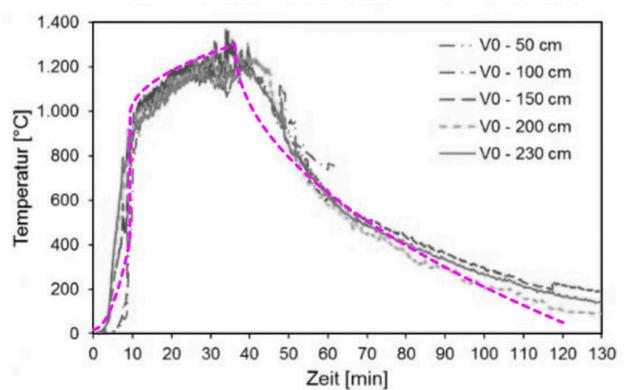
Vorarbeiten: Vereinfachtes Naturbrandmodell EC1-1-2/NA



Wärmefreisetzungsrate



Temperaturen



05.11.2021

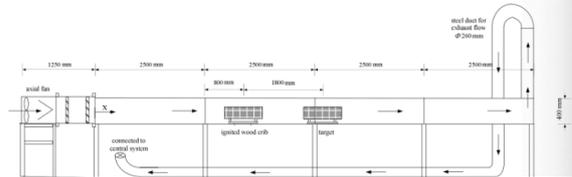
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

4

SP Technical Research Institute of Sweden
Wood Crib Experiments (Hansen & Ingason, 2010)



- Kleinmaßstäbliche Brandversuche mit Holzpaletten in einem Windkanal
- Entwicklung eines Modells zur Prognose der Brandausbreitung / Wärmefreisetzungsrate mehrerer Objekte in unterschiedlichen Abständen.
- Tunnel: $L \times B \times H = 10 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$
- 4 Palettenstapel á 5 Paletten (1:4) mit unterschiedlichen Abständen
- Initiierung unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten (0,3 – 0,9 m/s)
- Zündung auf der Luvseite des windzugewandten Stapels

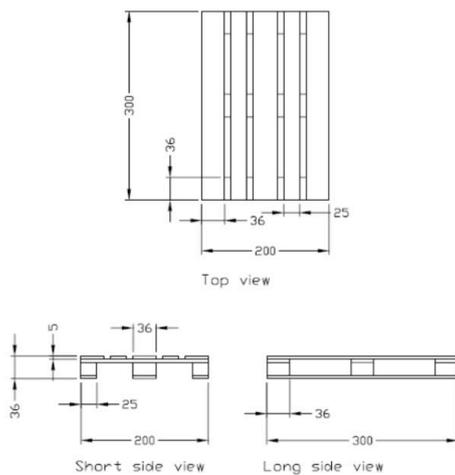


05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

5

SP Technical Research Institute of Sweden
Wood Crib Experiments (Hansen & Ingason, 2010)



Maßstab 1:4

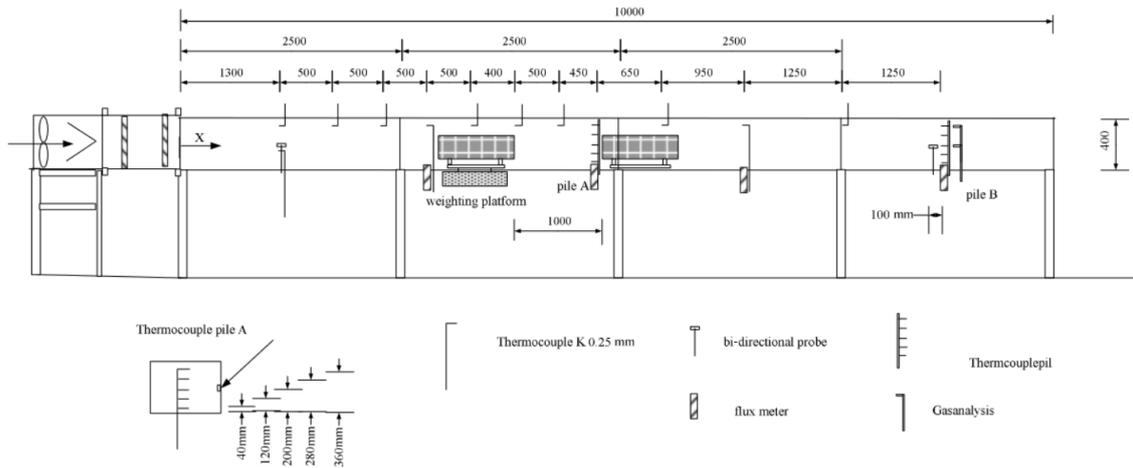


05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

6

SP Technical Research Institute of Sweden
Wood Crib Experiments (Hansen & Ingason, 2010)



05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

7

SP Technical Research Institute of Sweden
Wood Crib Experiments (Hansen & Ingason, 2010)



05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

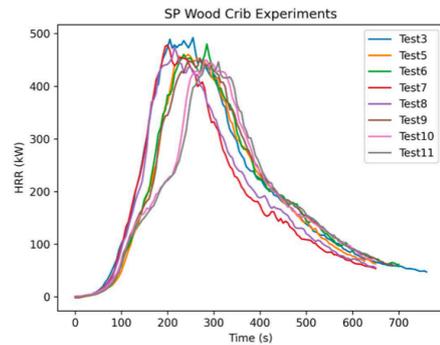
8

SP Technical Research Institute of Sweden Wood Crib Experiments (Hansen & Ingason, 2010)



Table 2. Information on the piles of wood pallets used in the fire experiments.

Test #	T _a [°C]	u _c [m/s]	Number of piles	Initial weight of each pile [kg]	Arrangement of piles – free distance
1	22	0.3	1	1.719	-
2	22	0.3	4	#1-1.712 ; #2-1.729 #3-1.697 ; #4-1.669	0.6 m between pile #1 and #2; 0.9 m between pile #2 and #3; 0.9 m between pile #3 and #4.
3	22	0.6	4	#1-1.662 ; #2-1.715 #3-1.697 ; #4-1.669	0.4 m between pile #1 and #2; 0.7 m between pile #2 and #3; 0.6 m between pile #3 and #4.
4	22	0.6	1	1.687	-
5	22	0.6	4	#1-1.755 ; #2-1.748 #3-1.673 ; #4-1.728	0.5 m between pile #1 and #2; 0.7 m between pile #2 and #3; 0.8 m between pile #3 and #4.
6	22	0.6	4	#1-1.701 ; #2-1.726 #3-1.695 ; #4-1.671	0.5 m between pile #1 and #2; 0.8 m between pile #2 and #3; 0.9 m between pile #3 and #4.
7	22	0.6	4	#1-1.681 ; #2-1.672 #3-1.707 ; #4-1.684	0.5 m between pile #1 and #2; 0.8 m between pile #2 and #3; 1.1 m between pile #3 and #4.
8	22	0.6	4	#1-1.656 ; #2-1.693 #3-1.684 ; #4-1.747	0.5 m between pile #1 and #2; 0.8 m between pile #2 and #3; 1.3 m between pile #3 and #4.
9	22	0.6	4	#1-1.738 ; #2-1.657 #3-1.705 ; #4-1.671	0.6 m between pile #1 and #2; 0.8 m between pile #2 and #3; 1.1 m between pile #3 and #4.
10	22	0.6	4	#1-1.653 ; #2-1.695 #3-1.685 ; #4-1.691	0.7 m between pile #1 and #2; 0.8 m between pile #2 and #3; 1.1 m between pile #3 and #4.
11	22	0.6	4	#1-1.700 ; #2-1.651 #3-1.703 ; #4-1.715	0.7 m between pile #1 and #2; 0.9 m between pile #2 and #3; 1.1 m between pile #3 and #4.
12	20	0.9	1	1.732	-



05.11.2021

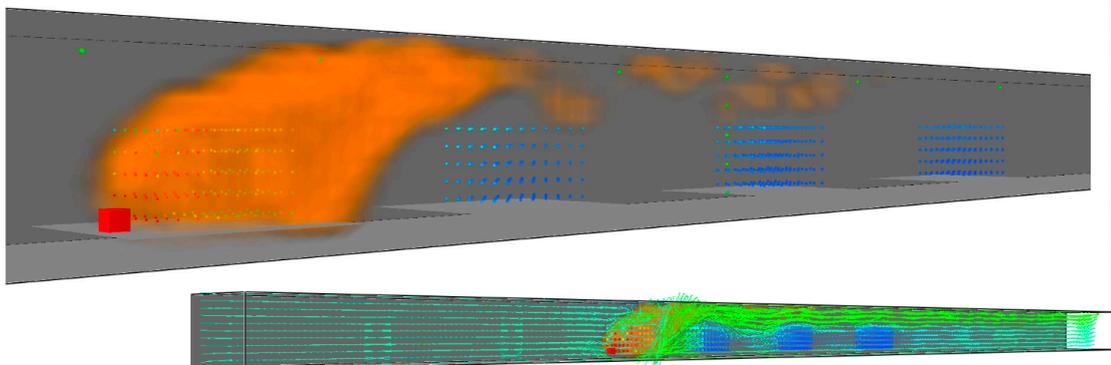
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

9

FDS Validation Guide: SP Wood Cribs Simulations



- Modellierung der Palettenstapel in Form ortsfester Partikel zur Ermöglichung grober Gitterauflösung (hier: 4 cm > Holzstäbe / Palettenbestandteile)
- Modellierungsmethode ähnlich wie für Vegetationsbrände



05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

10

FDS Validation Guide: SP Wood Cribs Simulations



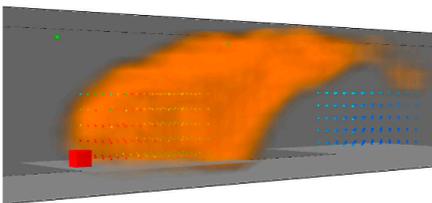
```
&SURF ID='IGNITER', HRRPUA=1000, RAMP_Q='IG',
TMP_FRONT=98, COLOR='RED' /

&RAMP ID='IG', T=0, F=0 /
&RAMP ID='IG', T=10, F=1 /
&RAMP ID='IG', T=75, F=1 /
&RAMP ID='IG', T=90, F=0 /

&OBST XB=2.84,2.88,0.28,0.32,0.040,0.080,
SURF_IDS='IGNITER','IGNITER','Promatect H
Board' /
```

```
&PART ID = 'PINE'
DRAG_COEFFICIENT = 2.8
COLOR = 'BROWN'
SURF_ID = 'PINE'
QUANTITIES = 'PARTICLE TEMPERATURE','PARTICLE MASS'
STATIC = .TRUE. /
```

```
&SURF ID = 'PINE', ...
SURFACE_VOLUME_RATIO = 460 ... /
```



```
&INIT PART_ID='PINE', XB=2.9,3.2,0.2,0.4,0.040,0.220,
N_PARTICLES_PER_CELL=1, CELL_CENTERED=T, PACKING_RATIO=0.42 /
&INIT PART_ID='PINE', XB=3.7,4.0,0.2,0.4,0.040,0.220,
N_PARTICLES_PER_CELL=1, CELL_CENTERED=T, PACKING_RATIO=0.42 /
&INIT PART_ID='PINE', XB=4.7,5.0,0.2,0.4,0.040,0.220,
N_PARTICLES_PER_CELL=1, CELL_CENTERED=T, PACKING_RATIO=0.42 /
&INIT PART_ID='PINE', XB=5.8,6.1,0.2,0.4,0.040,0.220,
N_PARTICLES_PER_CELL=1, CELL_CENTERED=T, PACKING_RATIO=0.42 /
```

05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

11

FDS Validation Guide: SP Wood Cribs Simulations



```
&REAC FUEL = 'CELLULOSE',
SOOT_YIELD = 0.01,
C = 3.4,
H = 6.2,
O = 2.5,
HEAT_OF_COMBUSTION = 18100
```

```
&SURF ID = 'PINE',
MATL_ID = 'PINE'
COLOR = 'BROWN'
BACKING = 'INSULATED'
MOISTURE_FRACTION = 0.02
SURFACE_VOLUME_RATIO = 460.
&MATL ID = 'char'
EMISSIONITY = 1.
DENSITY = 135.
CONDUCTIVITY_RAMP = 'char_k'
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'char_cp'
= 0.
```

$$\text{Wet Wood} \rightarrow \frac{M}{1+M} \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{1+M} \text{Dry Wood}$$

$$\text{Dry Wood} \rightarrow \chi_{\text{char}} \text{Char} + (1 - \chi_{\text{char}}) \text{Fuel Gas}$$

$$\text{Char} + \nu_{\text{O}_2,\text{char}} \text{O}_2 \rightarrow (1 + \nu_{\text{O}_2,\text{char}} - \chi_{\text{ash}}) \text{CO}_2 + \chi_{\text{ash}} \text{Ash}$$

```
2_CHAR = 1.65
_CHAR = 0.2
= 430.
= 74800.
_ID = 'ash'
ATL = 0.02
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'wood_cp'
A = 1.413E5
E = 90.73E3
N_S = 1.69
MATL_ID = 'char'
NU_MATL = 0.20
SPEC_ID = 'CELLULOSE'
NU_SPEC = 0.80
HEAT_OF_REACTION = 250. /
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'char_cp'
SPECIFIC_HEAT = 2.0 /
```

05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

12

FDS Validation Guide: SP Wood Cribs Simulations

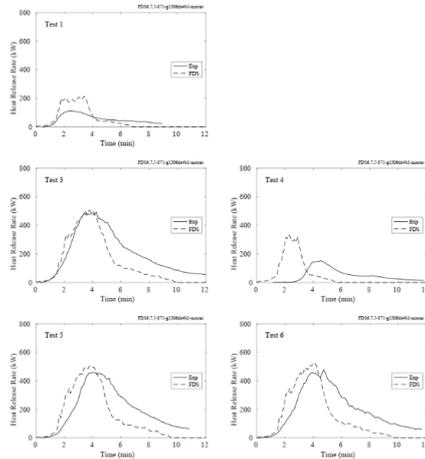


Figure 14.17: SP Wood Cribs heat release rates, Tests 1-6.

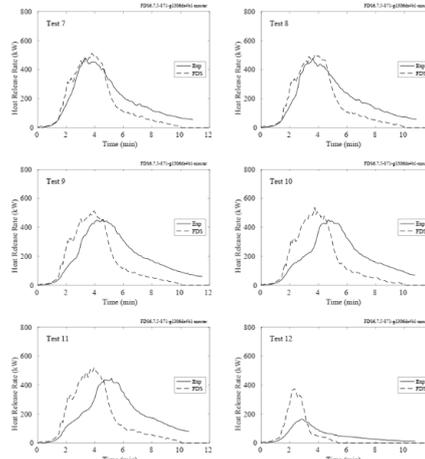


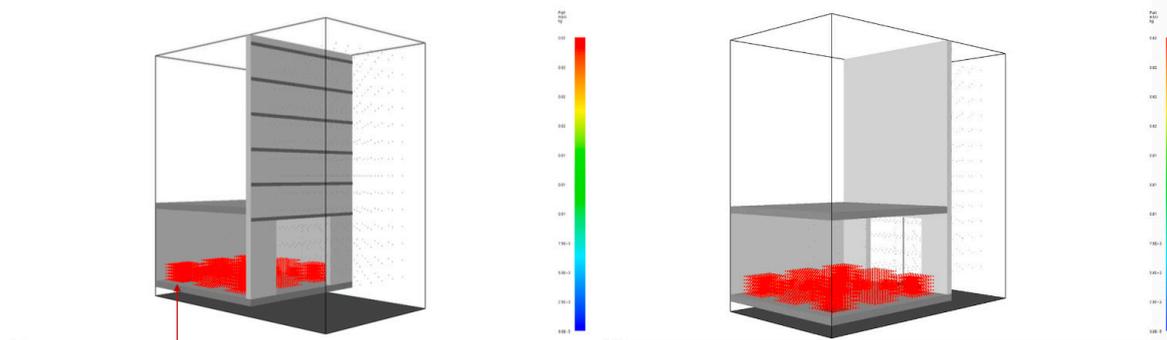
Figure 14.18: SP Wood Cribs heat release rates, Tests 7-12.

05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

13

Ein Schuss ins Blaue: Anwendung des Krippenmodells für TIMpuls V0



Zündinitial: 360 kW

SURFACE_VOLUME_RATIO = 77
 PACKING_RATIO = 0.52
 DENSITY = 570

05.11.2021

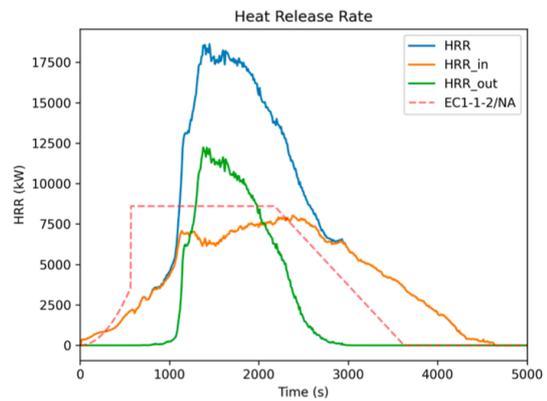
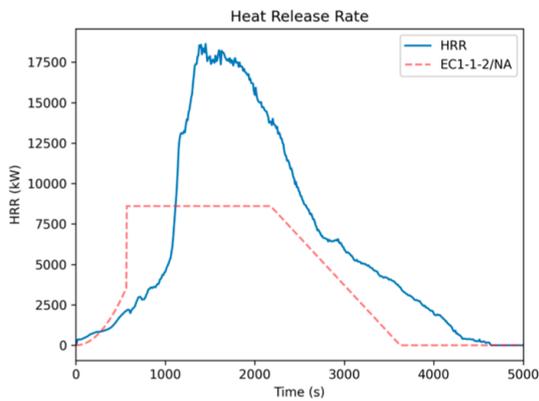
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

14

Ein Schuss ins Blaue: Anwendung des Krippenmodells für TIMpuls V0



Wärmefreisetzungsrate



05.11.2021

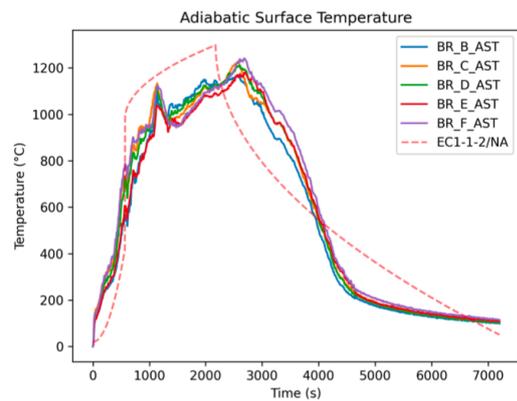
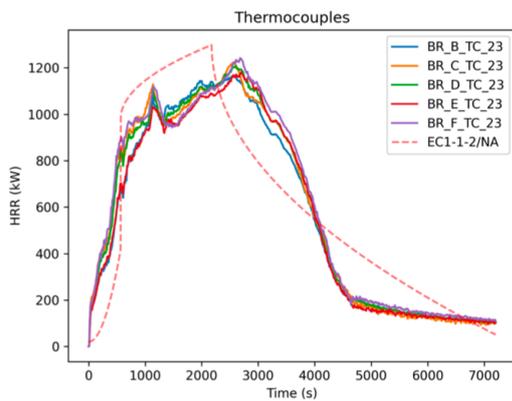
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

15

Ein Schuss ins Blaue: Anwendung des Krippenmodells für TIMpuls V0



Temperaturen



05.11.2021

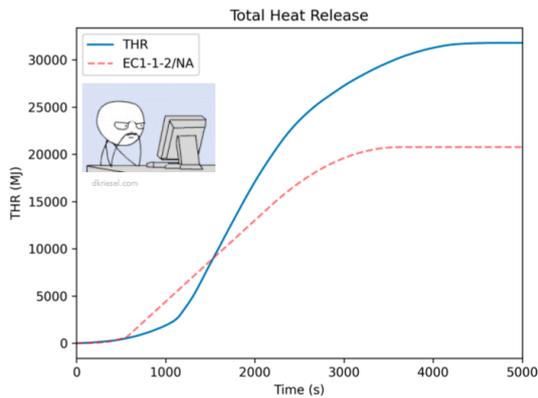
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

16

Ein Schuss ins Blaue: Anwendung des Krippenmodells für TIMpuls V0



Abweichungen in Brandlast und -dauer



DENSITY (kg/m ³)	SP Wood Cribs Sim.	TIMpuls Sim.
PINE	370	570
CHAR	135	135
ASH	67	67

Bei den zugrundeliegenden SP-Wood-Cribs-Simulationen betrug die Dichte des Kiefernholzes $\rho_{\text{PINE}} = 370 \text{ kg/m}^3$. Für die TIMpuls-Simulation wurde die Dichte des Kiefernholzes auf $\rho_{\text{PINE}} = 570 \text{ kg/m}^3$ geändert. Liegt hier die Ursache für die Abweichungen?

05.11.2021

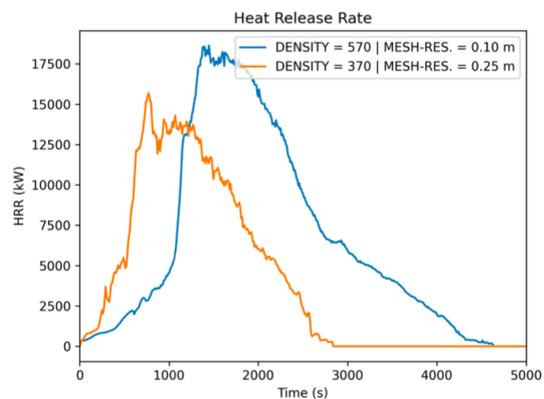
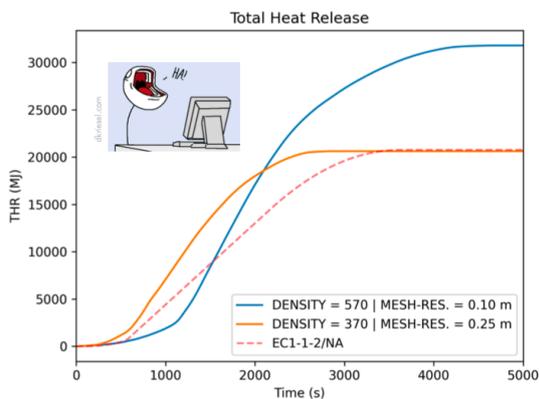
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

17

Ein Schuss ins Blaue: Anwendung des Krippenmodells für TIMpuls V0



Nachträgliche Brandsimulation mit $\rho_{\text{PINE}} = 370 \text{ kg/m}^3$ liefert bessere Übereinstimmungen:



05.11.2021

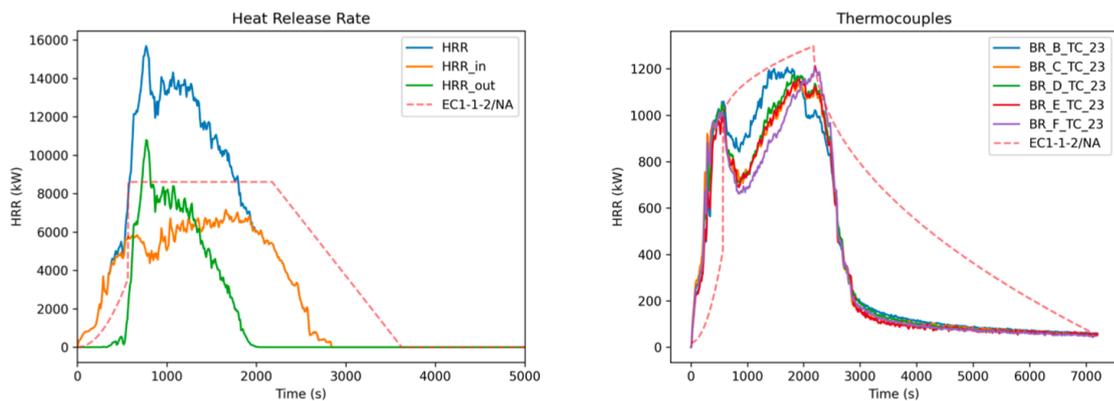
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

18

Ein Schuss ins Blaue: Anwendung des Krippenmodells für TIMpuls V0



Vergleich der Brandparameter für nachträgliche Simulation:



05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

19

Fortsetzung geplant...



Fragen?

Anregungen?

Diskussionen?

05.11.2021

www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

20

My Linh Würzburger:**FDS im Vergleich mit ARTSS****Abstract:**

ARTSS steht für Accelerated Real Time Smoke Simulator und ist wie FDS ein CFD Code und ist im Gegensatz zu diesem auf eine möglichst schnelle Ausführungszeit ausgelegt. Das Ziel von ARTSS ist es eine Echtzeit- und eventuell sogar eine Prognosesimulation der Rauchausbreitung in komplexen Gebäuden zu erstellen, welche im Brandfall als Hilfestellung vor Ort herangezogen werden kann. Auf Grund dessen beschränkt sich ARTSS auf die Simulation der Rauchausbreitung, auf Modelle zur Abbildung von Pyrolyse- bzw. Verbrennungsprozessen wurde wissentlich verzichtet.

Der Beitrag zeigt die Unterschiede von ARTSS und FDS anhand des Steckler Compartment Fire Experiments auf, welches oftmals zu Validierungszwecken herangezogen wird. Insbesondere wird die schnellere Laufzeit von ARTSS und der entsprechende Preis einer geringeren Genauigkeit gegenüber FDS behandelt.

Ein gegenwärtiges in ARTSS behandelt die Optimierung der Genauigkeit von ARTSS im Zuge der Daten Assimilierung. Ziel ist es, während einer laufenden Simulation durch Sensordaten den Simulationsverlauf der Wirklichkeit anzugleichen. Motivation hierfür ist, dass zur Simulation vor Ort nicht ausreichend Informationen zugrunde liegen bzw. berücksichtigt werden können. Beispielsweise ist für gewöhnlich weder die genaue Lage des Brandherds noch alle Information über brennbares Mobiliar innerhalb des Gebäudes bekannt. Grundlage für die Erhebung synthetischer Sensordaten soll hierbei FDS bieten.



15. Anwender-Treffen der FDS Usergroup

ARTSS vs. FDS

05.11.2021 | My Linh Würzburger | Civil Safety Research

Member of the Helmholtz Association



ARTSS

**Accelerator-based
Real
Time
Smoke
Simulator**

ARTSS

ARTSS is an Accelerator-based Real Time Smoke Simulator, which specialises in fast calculation of smoke propagation

ARTSS

Accelerator-based Real Time Smoke Simulator

ARTSS is a real-time and prognosis capable CFD code basis simulating buoyancy-driven turbulent smoke spread based on finite differences and a large eddy simulation turbulence model. The open source code is portable on CPU and GPU and successfully verified using analytical and semi-analytical tests. It is also successfully validated with scenarios relevant for fire protection. ARTSS is based on JuRoC, which was originally developed within the ORPHEUS project (funded by BMBF) by Dr. Anne Küsters.

Getting Started

Requirements

The serial CPU version of ARTSS can be compiled on Linux or MacOS systems with very few tools, whereas the multicore and GPU version needs an OpenACC capable compiler. Detailed requirements are listed in the table below (General requirements for serial version, specific for multicore and GPU version).

Purpose	Tool	Version
General	Version control system (optional)	git >= 2.0
	Build processor using a compiler-independent method	CMake >= 2.8
	Compiler fully supporting C++17 (gcc or clang)	gcc >= 7.0

Member of the Helmholtz Association

05.11.2021

Slide 1



ARTSS

Accelerator-based → GPU

Real

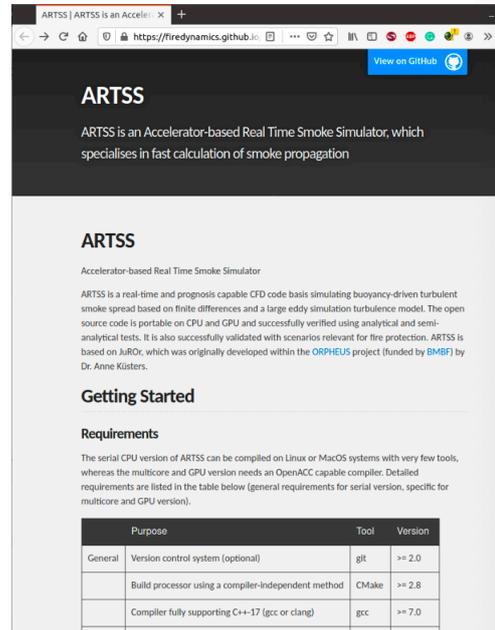
Time

Smoke

Simulator

Member of the Helmholtz Association

05.11.2021



Slide 1



ARTSS

Accelerator-based → GPU

Real

Time

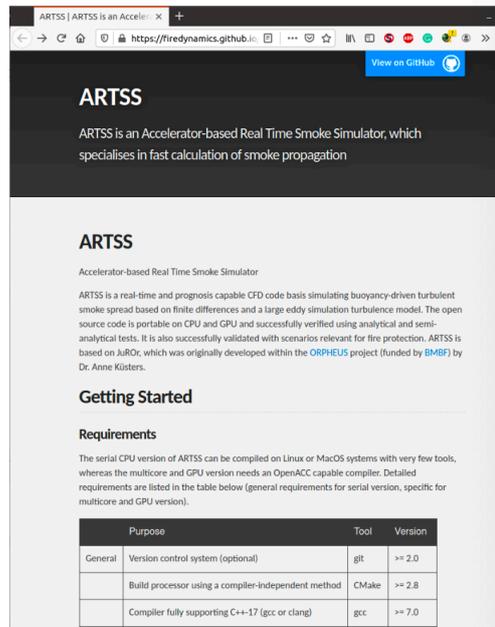
Rechenzeit ≤ Simulationszeit

Smoke

Simulator

Member of the Helmholtz Association

05.11.2021



Slide 1

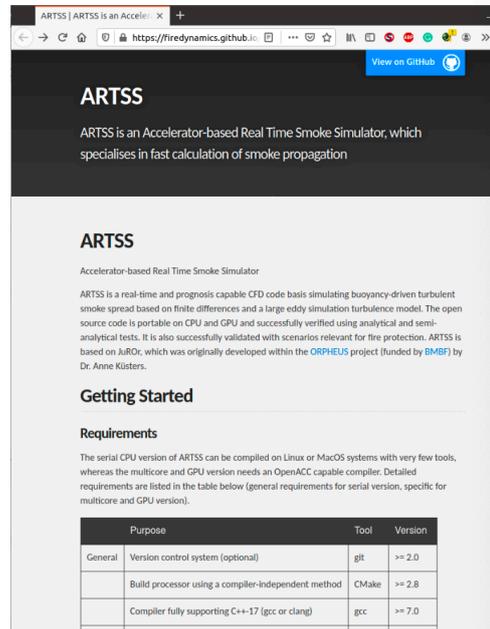


ARTSS

Accelerator-based → GPU

Real Time } Rechenzeit ≤ Simulationszeit

Smoke → keine Verbrennung/Pyrolyse Simulator



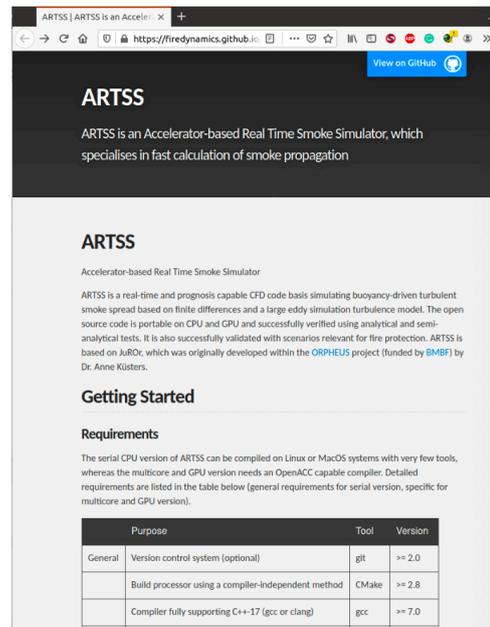
ARTSS

Accelerator-based → GPU

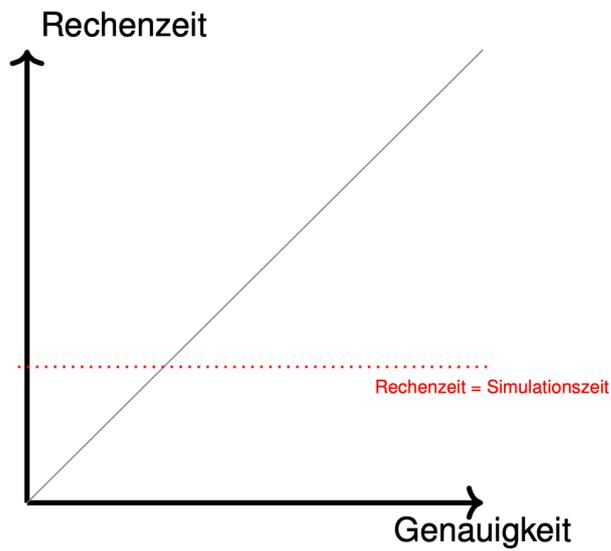
Real Time } Rechenzeit ≤ Simulationszeit

Smoke → keine Verbrennung/Pyrolyse Simulator

- Fokus: Laufzeit
- In Entwicklung
- Open Source auf GitHub github.com/FireDynamics/ARTSS



Unterschiede zwischen ARTSS und FDS



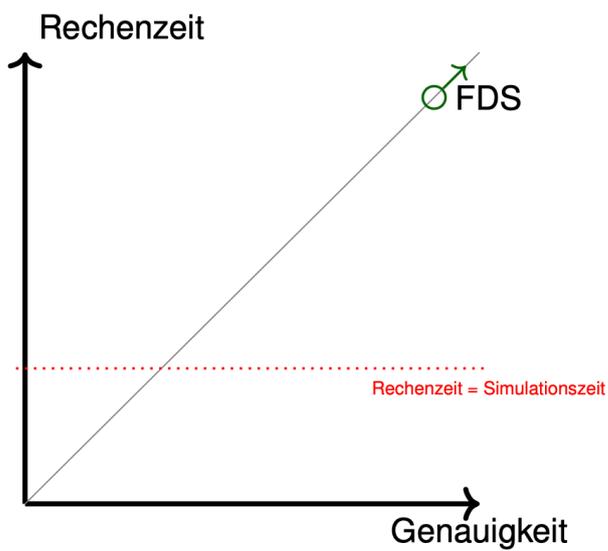
Member of the Helmholtz Association

05.11.2021

Slide 2



Unterschiede zwischen ARTSS und FDS



FDS

- Vollständig

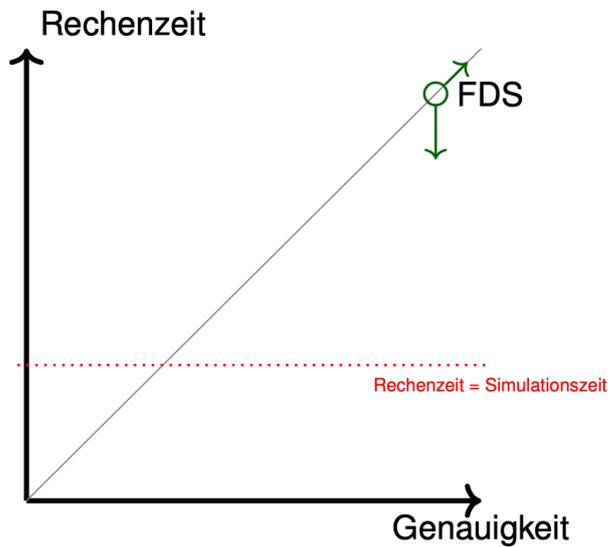
Member of the Helmholtz Association

05.11.2021

Slide 2



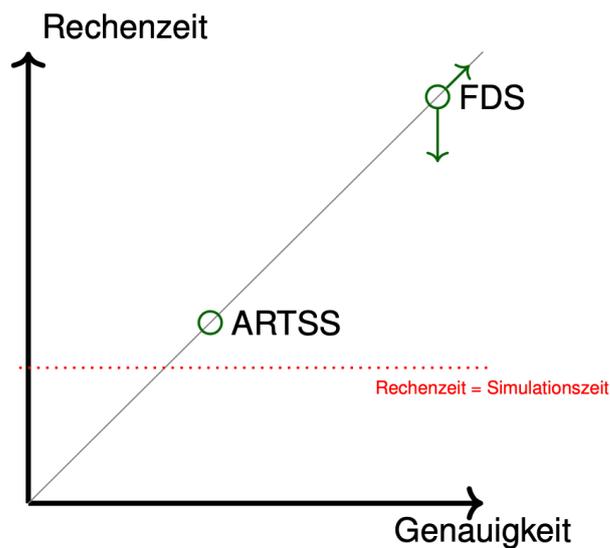
Unterschiede zwischen ARTSS und FDS



FDS

- Vollständig
- Parallelisierung

Unterschiede zwischen ARTSS und FDS



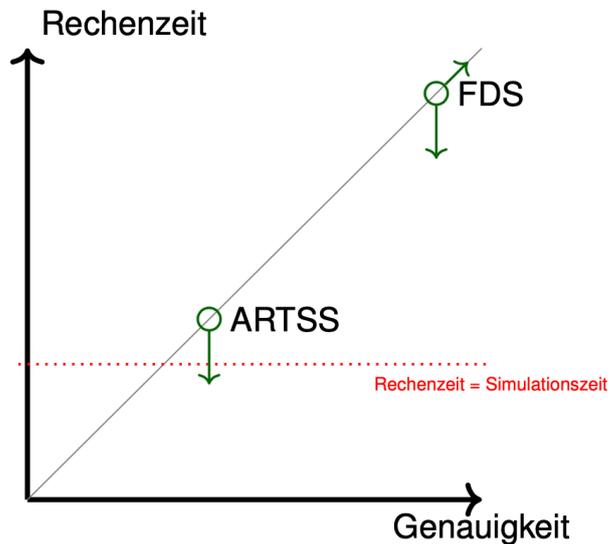
FDS

- Vollständig
- Parallelisierung

ARTSS

- Minimal

Unterschiede zwischen ARTSS und FDS



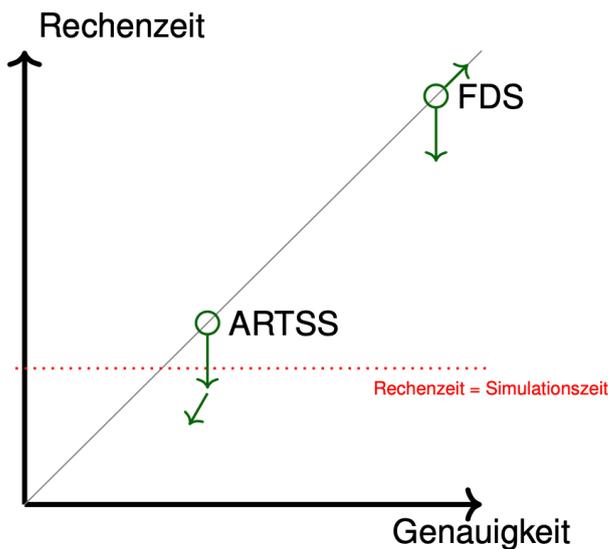
FDS

- Vollständig
- Parallelisierung

ARTSS

- Minimal
- Parallelisierung (+ GPU)

Unterschiede zwischen ARTSS und FDS



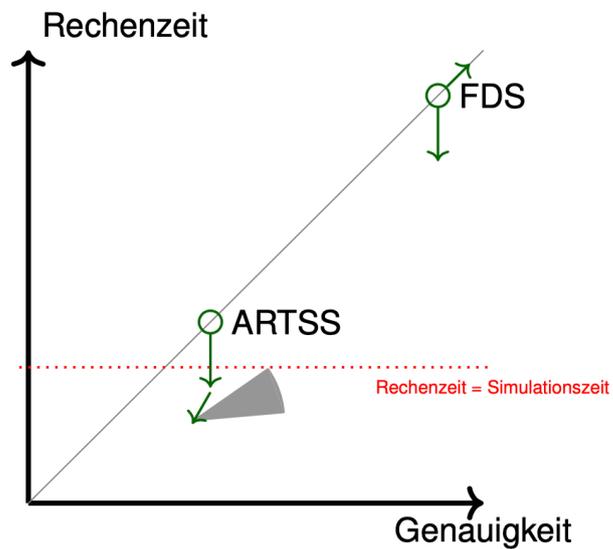
FDS

- Vollständig
- Parallelisierung

ARTSS

- Minimal
- Parallelisierung (+ GPU)
- Dynamische Gebietserweiterung

Unterschiede zwischen ARTSS und FDS



FDS

- Vollständig
- Parallelisierung

ARTSS

- Minimal
- Parallelisierung (+ GPU)
- Dynamische Gebietserweiterung
- Daten Assimilierung

Parallelisierung

OpenMP und MPI

Zahlen aus Datei einlesen

Summe = 0

Schleife über alle Zahlen:

Summe = Summe + Zahl

Parallelisierung

OpenMP und MPI

Zahlen aus Datei einlesen

Summe = 0

Schleife über alle Zahlen:
Summe = Summe + Zahl

OpenMP

Parallelisierung

OpenMP und MPI

OpenMP:

- 8 Zahlen in einer Datei

Zahlen aus Datei einlesen

Summe = 0

Schleife über alle Zahlen:
Summe = Summe + Zahl

OpenMP

Parallelisierung

OpenMP und MPI

Zahlen aus Datei einlesen

Summe = 0

Schleife über alle Zahlen:
Summe = Summe + Zahl

OpenMP

OpenMP:

- 8 Zahlen in einer Datei
- → max. 4 OpenMP Threads

Parallelisierung

OpenMP und MPI

Zahlen aus Datei einlesen

Summe = 0

Schleife über alle Zahlen:
Summe = Summe + Zahl

MPI

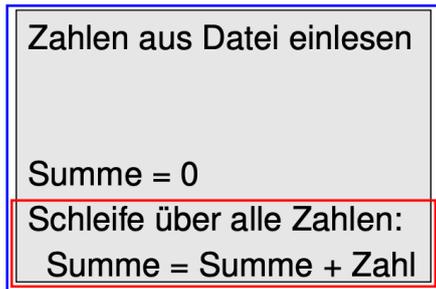
OpenMP

OpenMP:

- 8 Zahlen in einer Datei
- → max. 4 OpenMP Threads

Parallelisierung

OpenMP und MPI



MPI

OpenMP

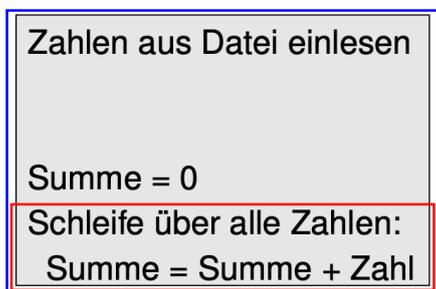
OpenMP:

- 8 Zahlen in einer Datei
- → max. 4 OpenMP Threads

MPI

Parallelisierung

OpenMP und MPI



MPI

OpenMP

OpenMP:

- 8 Zahlen in einer Datei
- → max. 4 OpenMP Threads

MPI

- 1000 Dateien
- → max. 1000 MPI Prozesse
- (ohne Hardware/Overhead Beachtung)

Parallelisierung

OpenMP und MPI

1000 Dateien mit je 8 Zahlen

Zahlen aus Datei einlesen

MPI

Summe = 0

Schleife über alle Zahlen:
Summe = Summe + Zahl

OpenMP

1 Datei, pro Zeile eine Datei

Zeilen aus Datei einlesen

Schleife über alle Zeilen:
errechne Summe

Parallelisierung

OpenMP und MPI

1000 Dateien mit je 8 Zahlen

Zahlen aus Datei einlesen

MPI

Summe = 0

Schleife über alle Zahlen:
Summe = Summe + Zahl

OpenMP

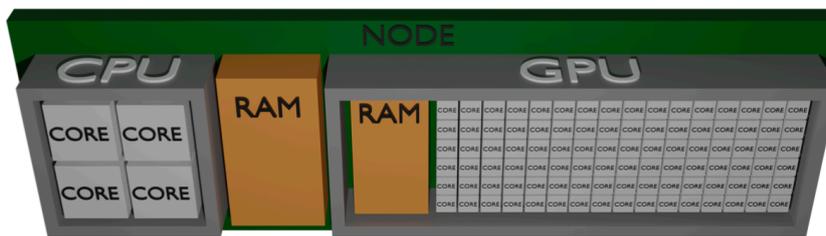
1 Datei, pro Zeile eine Datei

Zeilen aus Datei einlesen

Schleife über alle Zeilen:
errechne Summe

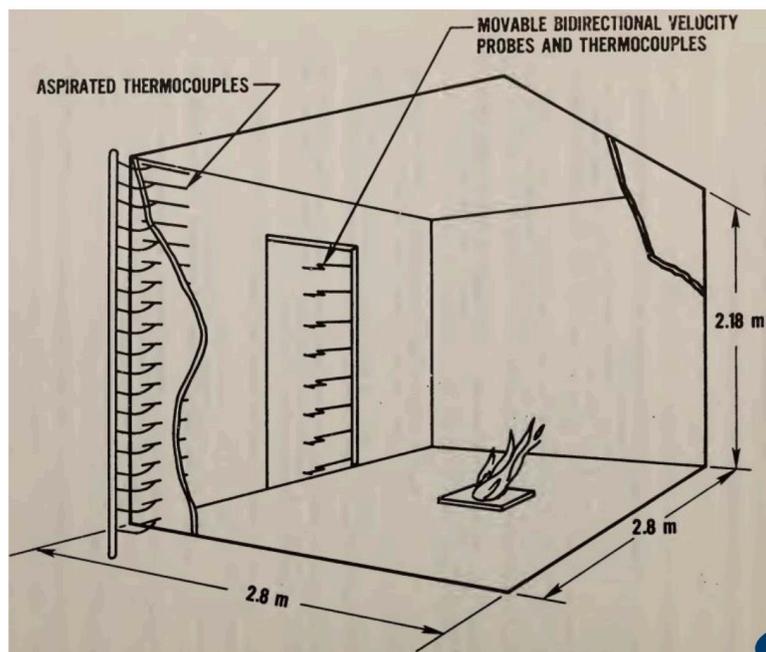
CPU vs GPU

CPU	GPU
Central Processing Unit	Graphic Processing Unit
Wenige flexible Kerne	Viele spezialisierte Kerne
Geringe Latenz	Hoher Durchsatz
Gut für serielle Verarbeitung	Gut für parallele Verarbeitung



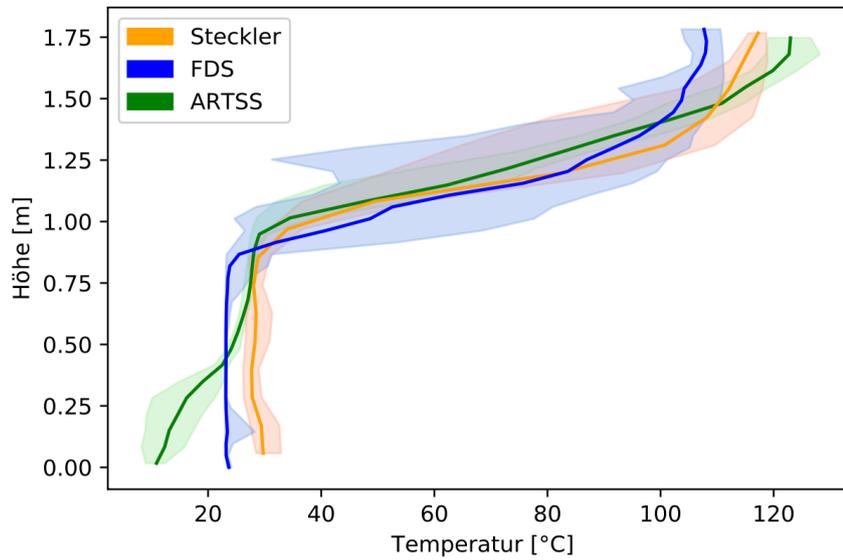
ARTSS vs FDS

Steckler Compartment Fire



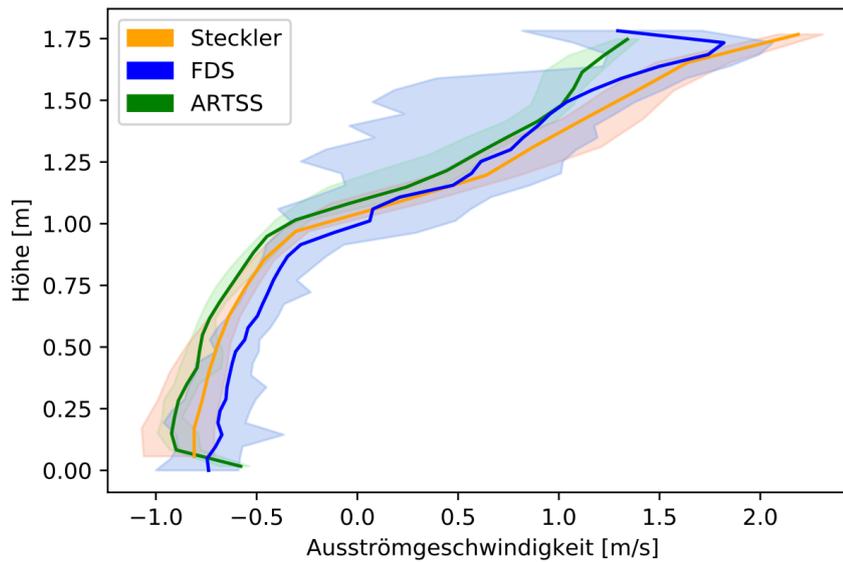
ARTSS vs FDS

Genauigkeit - Steckler Compartment Fire



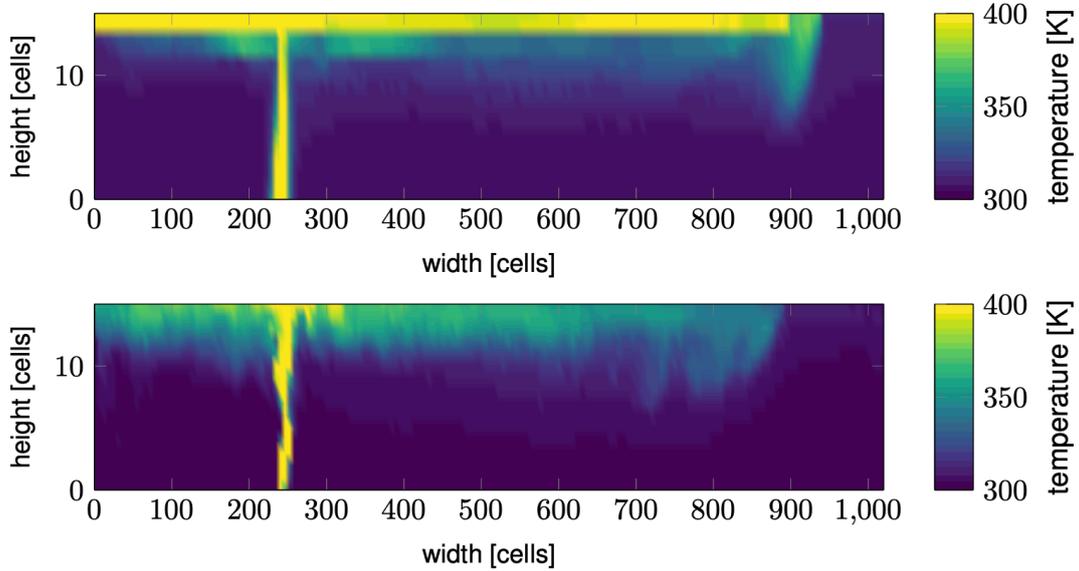
ARTSS vs FDS

Genauigkeit - Steckler Compartment Fire



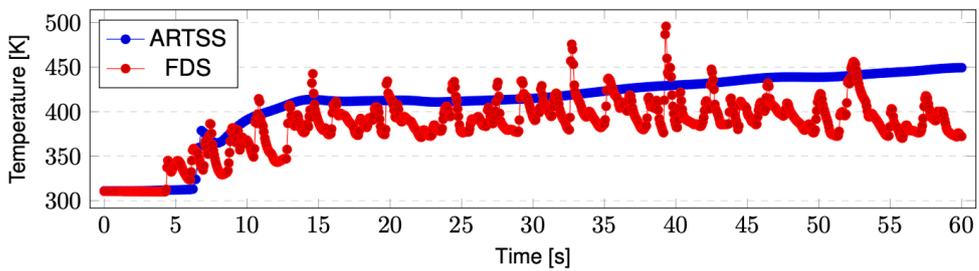
ARTSS vs FDS

Genauigkeit



ARTSS vs FDS

Genauigkeit



ARTSS vs FDS

Geschwindigkeit

Geschwindigkeit FDS

8 MPI Prozesse, 4 OpenMP Threads: 6745.031s

Geschwindigkeit ARTSS

Seriell: 881.370s

Member of the Helmholtz Association

05.11.2021

Slide 14



ARTSS vs FDS

Geschwindigkeit

Geschwindigkeit FDS

8 MPI Prozesse, 4 OpenMP Threads: 6745.031s

Geschwindigkeit ARTSS

Seriell: 881.370s

Ähnliches Szenario

	Laufzeit [s]	Speedup
Serial	944.5	-
Multicore (12 Kerne)	147.5	6.4
GPU	135.7	6.9

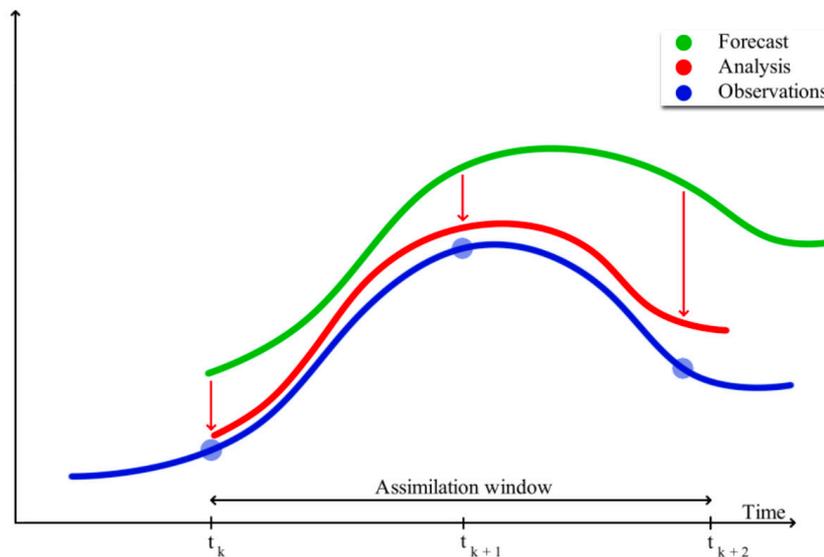
Member of the Helmholtz Association

05.11.2021

Slide 14



Daten Assimilierung



Daten Assimilierung

Motivation: Daten Assimilierung + real time Simulation

Ziel

Hilfsmittel zur Evakuierung im Brandfall

Daten Assimlierung

Motivation: Daten Assimlierung + real time Simulation

Ziel

Hilfsmittel zur Evakuierung im Brandfall

Probleme:

- Wo brennt es? (Koordinaten?)

Daten Assimlierung

Motivation: Daten Assimlierung + real time Simulation

Ziel

Hilfsmittel zur Evakuierung im Brandfall

Probleme:

- Wo brennt es? (Koordinaten?)
- Wie stark brennt es? (HRR)

Daten Assimlierung

Motivation: Daten Assimlierung + real time Simulation

Ziel

Hilfsmittel zur Evakuierung im Brandfall

Probleme:

- Wo brennt es? (Koordinaten?)
- Wie stark brennt es? (HRR)
- Was brennt?

Daten Assimlierung

Motivation: Daten Assimlierung + real time Simulation

Ziel

Hilfsmittel zur Evakuierung im Brandfall

Probleme:

- Wo brennt es? (Koordinaten?)
- Wie stark brennt es? (HRR)
- Was brennt?
- Änderungen von Raumstrukturen (Fenster bspw.)

Daten Assimilierung

Motivation: Daten Assimilierung + real time Simulation

Ziel

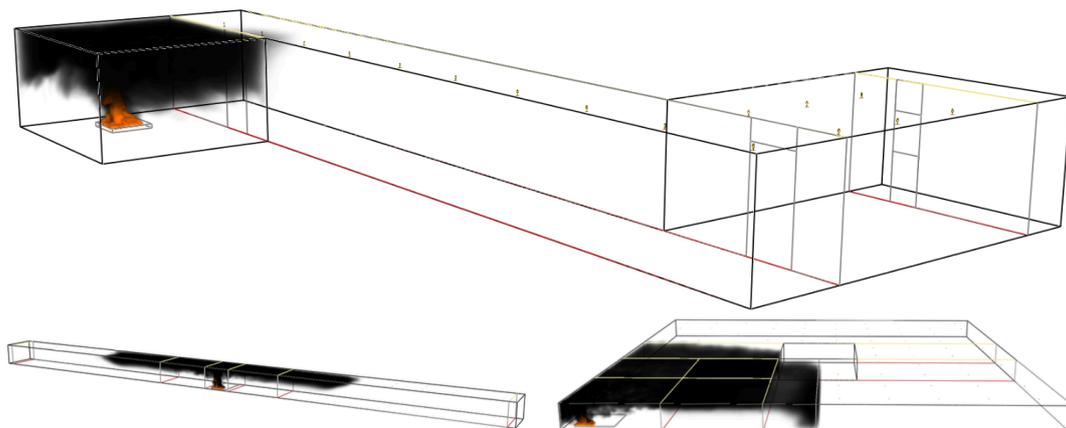
Hilfsmittel zur Evakuierung im Brandfall

Probleme:

- Wo brennt es? (Koordinaten?)
- Wie stark brennt es? (HRR)
- Was brennt?
- Änderungen von Raumstrukturen (Fenster bspw.)
- Änderung durch Brandschutzmaßnahmen (Sprinkler)
- ...

Daten Assimilierung

Blick in die Zukunft



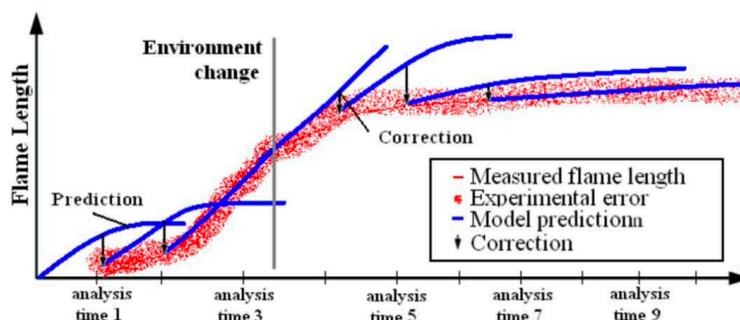
Zusammenfassung

ARTSS ist schneller aber ungenauer als FDS

In Zusammenarbeit mit FDS Daten

- Validierung
- Daten Assimilierung

Ziel: Echtzeitberechnungen



Member of the Helmholtz Association

05.11.2021

Slide 18

Jahn, Wolfram & Rein, Guillermo & Torero, Jose. (2009). Data assimilation in enclosure fire dynamics - towards adjoint modelling



PhD Seminar Fire Science

- Sprache: Englisch
- kostenloses jährliches Event
- Ort: abhängig vom Veranstalter (Jülich, Braunschweig, Prag)
- PhD Studenten
- Masterstudenten (auch gerne zum schnuppern)
- kürzlich gewordene Post-Docs

PhD Seminar 2021

- 23. - 25.11.
- Berlin
- Hybrid Veranstaltung

Kontakt:

k.de.lannoye@fz-juelich.de
m.wuerzbuerger@fz-juelich.de

Member of the Helmholtz Association

05.11.2021

Slide 19



Susanne Kilian:

Separabel versus inseparabel - Die FDS Druck-Gleichung in unterschiedlicher Gestalt II

Abstract:

Der Vortrag knüpft an den entsprechenden Beitrag anlässlich des 14. Anwendertreffens an. Darin wurden zwei verschiedene Varianten der FDS-Druckgleichung hergeleitet und hinsichtlich ihrer numerischen Vor- und Nachteile miteinander verglichen:

- **Separable Form**

Dabei handelt es sich um die Default-Variante innerhalb von FDS, die auf einer vereinfachten Darstellung der Druckgleichung basiert. Diese führt zu allzeit konstanten Matrixeinträgen und erlaubt so den Einsatz hoch-optimierter FFT-Verfahren. Aufgrund der Vereinfachung werden jedoch turbulente Veränderungen der Dichte im Verlauf der Zeititeration möglicherweise nicht hinreichend schnell berücksichtigt, was im schlimmsten Fall zu numerischen Instabilitäten führen kann.

- **Inseparable Form**

Dabei handelt es sich um die korrekte und vollständige Form der Druckgleichung. Diese führt jedoch zu Matrizen mit variablen Einträgen, die in jedem Zeitschritt neu aufgebaut werden müssen bzw. den Einsatz robusterer und in der Regel weniger performanter Lösungsverfahren erfordern. Variationen der Dichte fließen jedoch zeitgenau in das Druckgleichungssystem ein, so dass letztlich eine erhöhte Genauigkeit und Stabilität der Gesamtsimulation erzielt werden kann.

Inzwischen ist die Implementierung der inseparablen Variante bereits weit fortgeschritten und befindet sich in der Testphase. Der Vortrag zeigt anhand ausgewählter Testbeispiele die Unterschiede beider Strategien hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Performance auf und skizziert die zukünftig geplanten Entwicklungsschritte für die inseparablen Methodik.



Separabel versus inseparabel

Die FDS-Druckgleichung in unterschiedlicher Gestalt II

Dr. Susanne Kilian
hhpberlin – Ingenieure für Brandschutz
10245 Berlin

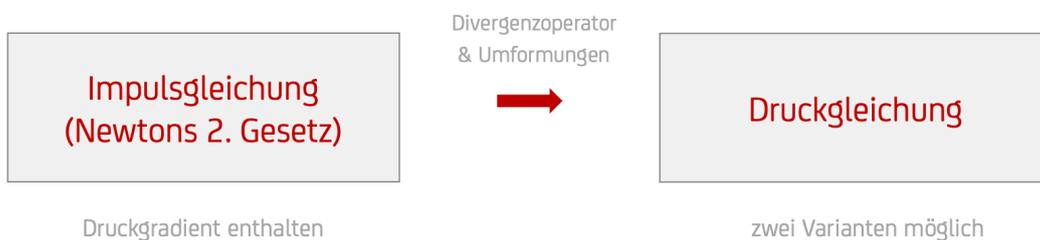
Agenda

- 1 Rückblick numerische Eigenschaften
- 2 Testfall-Trio
- 3 Korrektheit Strahlungslöser?
- 4 Zusammenfassung und Ausblick





Herleitung Druckgleichung



Variante I - Inseparable Druckgleichung



Divergenz des dichteteskalierten Druckgradienten $\stackrel{!}{=}$ einwirkenden Kräften

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p} \right] = R_I$$

Rechte Seite R_I abhängig von

- thermodynamischen Einflüssen
- turbulenter kinetischer Energie
- Partikeln (z.B. Sprinklerung)
- Viskosität (Turbulenzmodellierung)
- Gravitation

1

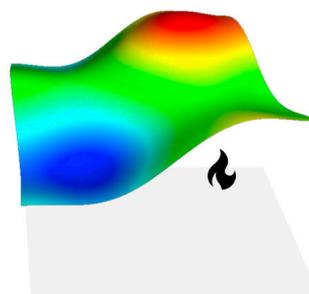
Variante I - Inseparable Druckgleichung



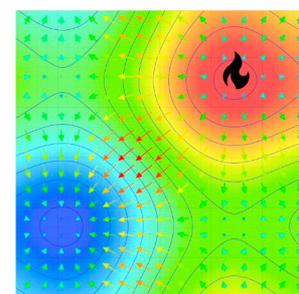
Physikalische Interpretation

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p} \right] = R_I$$

Maß für Extraktion/Kontraktion des Strömungsfeldes durch hydrodynamische und thermodynamische Einflüsse



Druckverteilung



Divergenz Druckgradient

1

Variante I - Inseparable Druckgleichung



Diskretisierung zum Gleichungssystem

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p} \right] = R_I$$

Ableitung der Dichte benötigt !!



$$A_\rho x = b$$

Matrix von aktuellen Dichtewerten abhängig
Pro Matrixzeile und Zeitschritt unterschiedlich!

1

Variante I - Inseparable Druckgleichung



Erläuterung zur Namensgebung ‚inseparabel‘

- resultierende Matrix A_ρ hat sehr komplexe Struktur
- Lösung **nicht separierbar** in Anteile für x-, y- und z-Richtung
- robuste variable Lösungsstrategien erforderlich

$$A_\rho x = b$$

➔ Verwendung der hochoptimierten FFT **nicht** möglich

1

Abhilfe möglich?



Umformung des inseparablen Gleichungssystems

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p} \right] = \dots - \frac{\nabla^2 |\mathbf{u}|^2}{2}$$

Druck-Identität

$$\nabla \left(\frac{\tilde{p}}{\rho} \right) - \tilde{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right)$$

,Umschafeln' von Ausdrücken



Variante II - Separable Druckgleichung



Neue Form der Druckgleichung

$$\nabla^2 \left[\frac{\tilde{p}}{\rho} + \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} \right] = \dots + \nabla \cdot \left[\tilde{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) \right]$$

Barokliner Term

H R_s

Bernoulli Druck Rechte Seite des separablen Systems



Variante II - Separable Druckgleichung



Diskretisierung zum Gleichungssystem

$$\nabla^2 H = R_s$$



$$A x = b$$

Ableitung der Dichte **nicht** benötigt

Matrix **nicht** von aktuellen Dichtwerten abhängig
Pro Matrixzeile und Zeitschritt konstant!

1

Variante II - Separable Druckgleichung



Erläuterung zur Namensgebung ‚separabel‘

- resultierende Matrix A hat simple, konstante Struktur
- Lösung **separierbar** in Anteile für x-, y- und z-Richtung
- deutlich vereinfachte Lösungsstrategien verfügbar

$$A x = b$$

➔ Verwendung der hochoptimierten FFT möglich !

1

Inkonsistenz im separablen Fall



Druck in beiden Seiten der Gleichung enthalten !

$$\nabla^2 \left[\frac{\tilde{p}}{\rho} + \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} \right] = \dots + \nabla \cdot \left[\tilde{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) \right]$$

\tilde{p} ist der Druck, zu dem das System im Zeitschritt n erst gelöst werden soll !!

\tilde{p} ist daher beim Aufbau der rechten Seite noch nicht bekannt !!!



Inkonsistenz im separablen Fall



Druck in beiden Seiten der Gleichung enthalten !

$$\nabla^2 \left[\frac{\tilde{p}}{\rho} + \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} \right] = \dots + \nabla \cdot \left[\tilde{p}^{alt} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) \right]$$

Es kann nur der Wert aus der letzten Zeiteration genommen werden!



Inkonsistenz im separablen Fall



Iterative Durchführung bis Differenz beider Werte unter Fehlertoleranz

$$\nabla^2 \left[\frac{\tilde{p}^{n,k}}{\rho} + \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} \right] = \dots + \nabla \cdot \left[\tilde{p}^{n,k-1} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) \right]$$

Startwert:

Druck aus vorangehendem Zeitschritt $\tilde{p}^{n,0} = \tilde{p}^{n-1}$

1

Übersicht Drucklöser



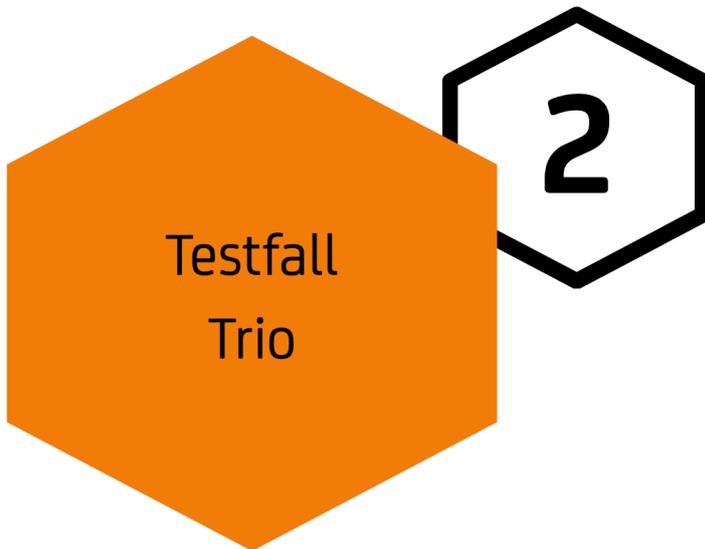
Inseparabel

- + Höhere Genauigkeit**
 - korrekte Gleichung wird gelöst
- Niedrigere Performance**
 - variable Matrix, stetiger Neuaufbau nötig
 - FFT nicht anwendbar

Separabel

- Niedrigere Genauigkeit**
 - vereinfachte Gleichung wird gelöst
- + Höhere Performance**
 - konstante Matrix, kein Neuaufbau nötig
 - FFT anwendbar

1



Festlegung der ‚separablen‘ Genauigkeit



Wie viel darf sich \tilde{p}^{alt} von \tilde{p} unterscheiden ?

Wie oft darf maximal iteriert werden, um diese Toleranz zu erreichen?

&PRES PRESSURE_TOLERANCE = ..., MAX_PRESSURE_ITERATIONS = ...

Defaults: 10 Iterationen, $tol = 20/\delta x^2$

Relativ hoher Toleranzwert !

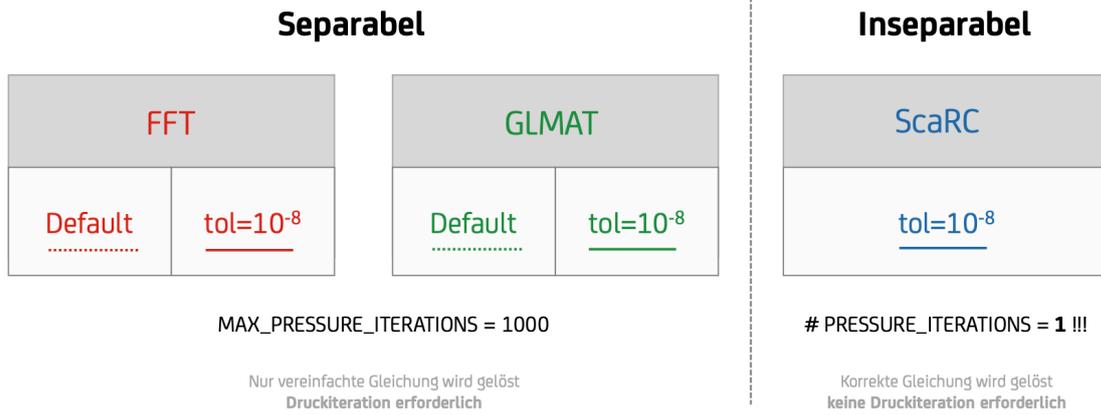
Beispiel: Gitterweite 0.2 m, $tol = 500$
 Gitterweite 0.1 m, $tol = 2000$

```

Time Step 2455 November 2, 2021 07:58:51 chid.out
Step Size: 0.288E-02 s, Total Time: 30.00 s
Pressure Iterations: 20
Maximum Velocity Error: 0.13E+00 on Mesh 3 at ( 81 1 20)
Maximum Pressure Error: 0.55E+03 on Mesh 4 at ( 1 1 20)
    
```



Testreihen für verschiedene Drucklöser



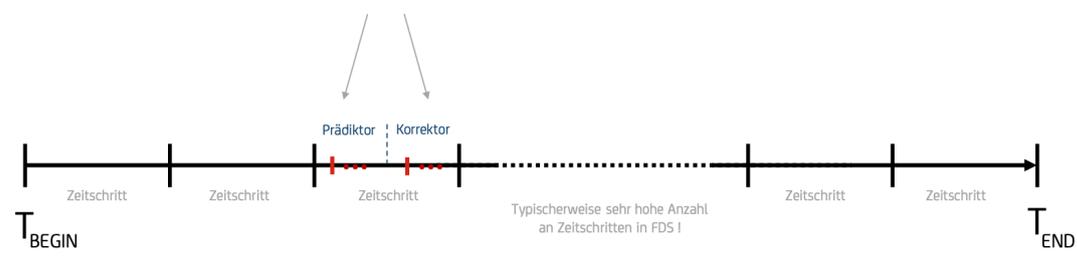
Drucklöser ist Performance-kritisch



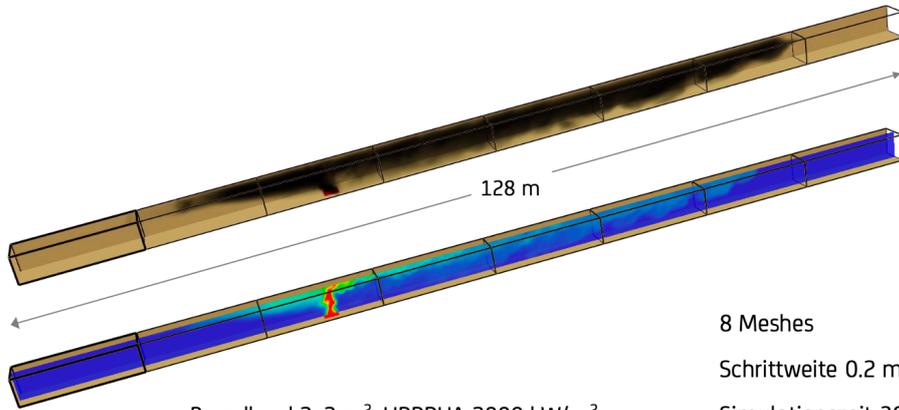
Pro Zeitschritt **mindestens 2** Drucklösungen nötig

Separabel: in Prädiktor & Korrektor jeweils Drucklösung mit Hilfe einer Iteration bis Toleranz erreicht

Inseparabel: in Prädiktor & Korrektor jeweils Drucklösung in einem Schritt



tunnel_demo - Geometrie



Brandherd 2x2 m², HRRPUA 2000 kW/m²

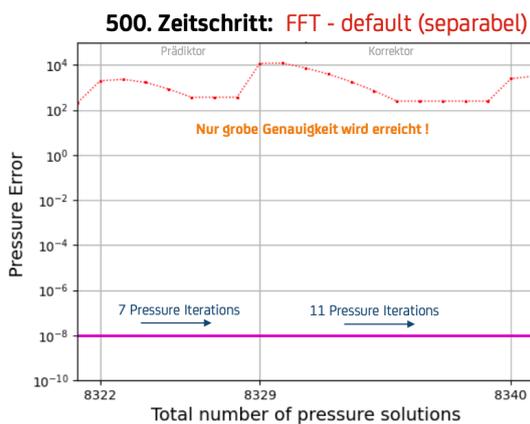
8 Meshes

Schrittweite 0.2 m

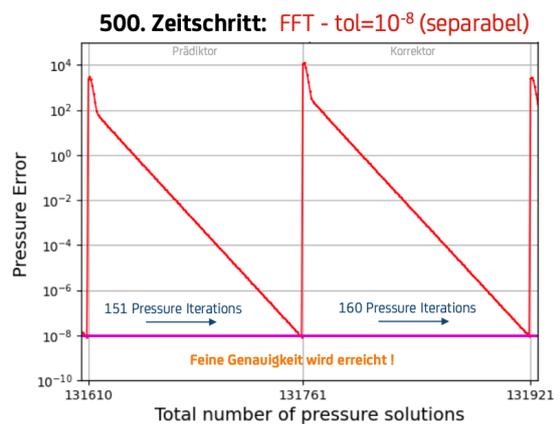
Simulationszeit 30 s

2

tunnel_demo - Genauigkeit FFT

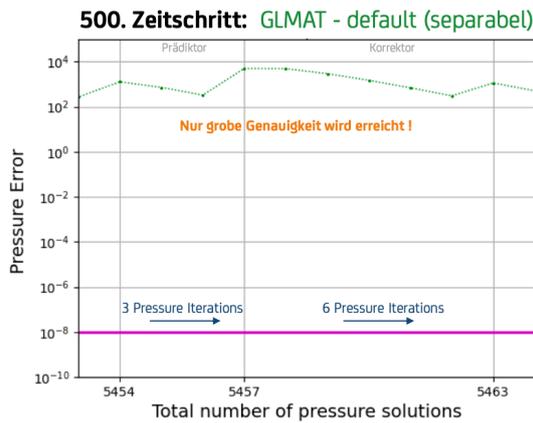


- Grobe Default-Toleranz benötigt nur wenige Iterationen
 - Nach dem 500. Zeitschritt: **8340** Aufrufe der FFT

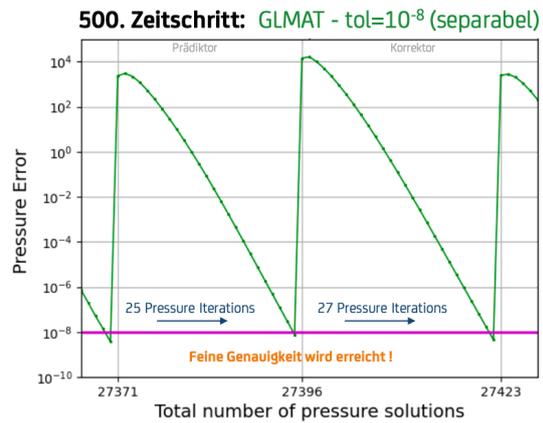


- Feine Toleranz 10⁻⁸ benötigt Hunderte von Iterationen!
 - Nach dem 500. Zeitschritt: **131921** Aufrufe der FFT !!

tunnel_demo - Genauigkeit GLMAT

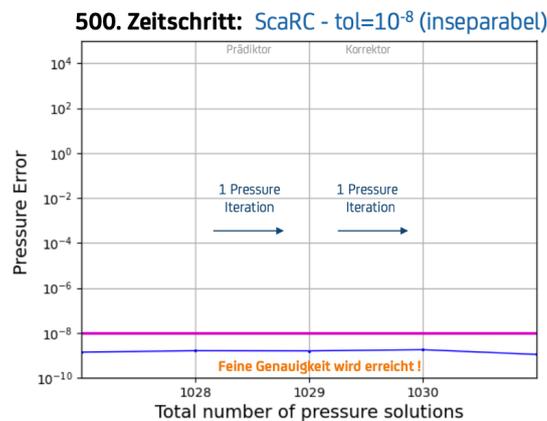


- Default-Toleranz benötigt sehr wenige Iterationen
- Nach dem 500. Zeitschritt: **5463** Aufrufe von GLMAT



- Feine Toleranz 10⁻⁸ benötigt Dutzende von Iterationen!
- Nach 500. Zeitschritt **27423** Aufrufe von GLMAT !!

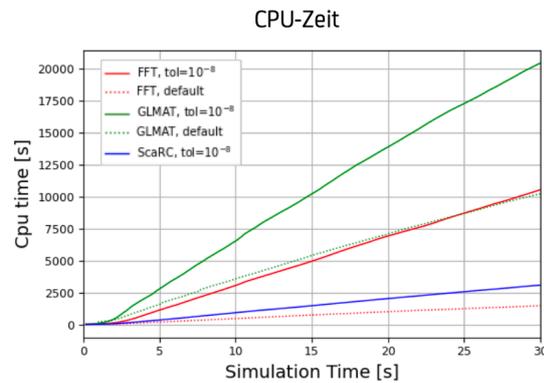
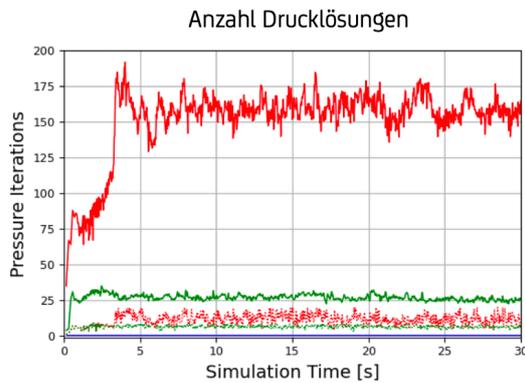
tunnel_demo - Genauigkeit ScaRC



- Feine Toleranz 10⁻⁸ benötigt genau **eine** Iteration
- Nach 500. Zeitschritt **1030** Aufrufe von ScaRC

Pro Zeitschritt
genau
2 Aufrufe !

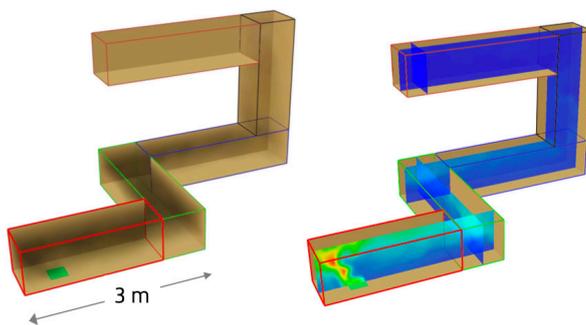
tunnel_demo - Performance



- Wenige Iterationen für FFT und GLMAT zur groben Toleranz
- Deutlich mehr Iterationen für FFT und GLMAT zu $tol=10^{-8}$
- Genau eine Iteration für ScaRC zu $tol=10^{-8}$

- Kürzeste Laufzeit für FFT zur groben Toleranz
- Deutlich höhere Laufzeiten für FFT und GLMAT zu $tol=10^{-8}$
- ScaRC zu $tol=10^{-8}$ nur knapp hinter FFT-Default

hallways - Geometrie

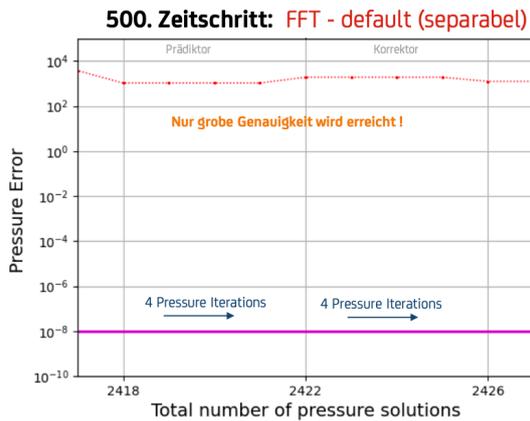


5 Meshes
 Schrittweite 0.0625 m
 Simulationszeit 60 s

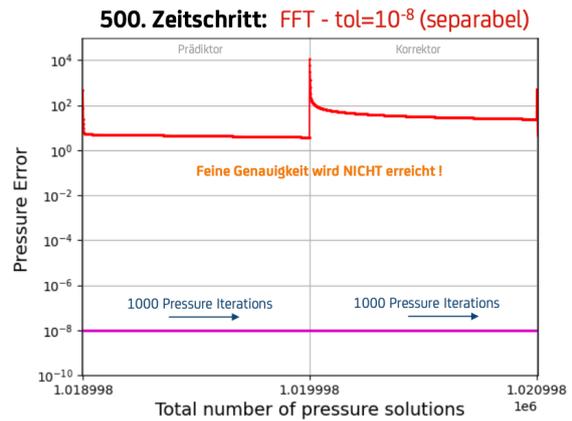
Brandherd 0.4 x 0.4 m², HRRPUA 1000 kW/m²



hallways - Genauigkeit FFT

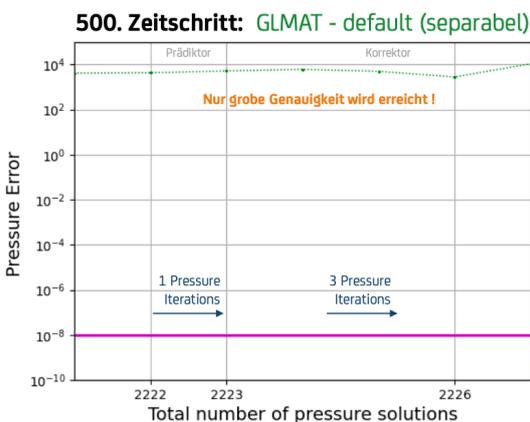


- Grobe Default-Toleranz benötigt nur sehr wenige Iterationen
 - Nach dem 500. Zeitschritt: **2426** Aufrufe der FFT

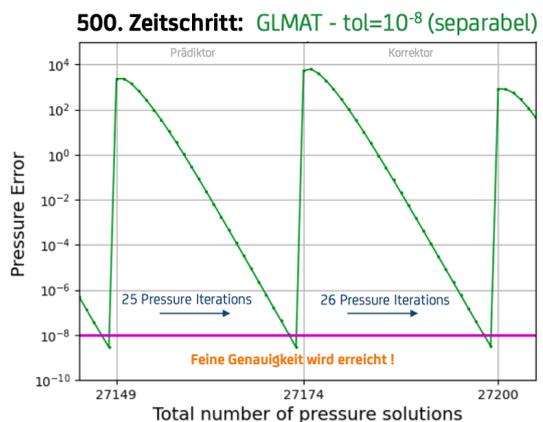


- Feine Toleranz 10⁻⁸ braucht Maximalanzahl an Iterationen auf
 - Nach dem 500. Zeitschritt: **1.020.998** Aufrufe der FFT !!

hallways - Genauigkeit GLMAT

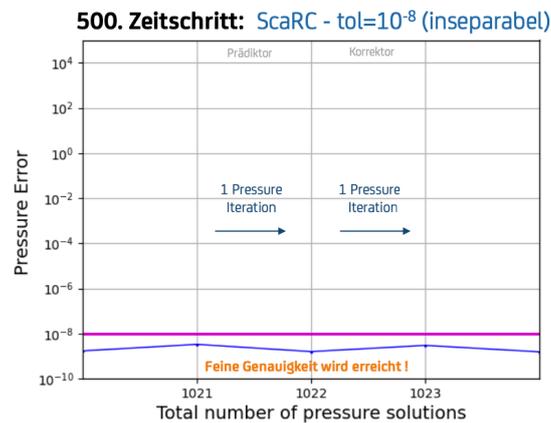


- Grobe Default-Toleranz benötigt sehr wenige Iterationen
 - Nach dem 500. Zeitschritt: **2226** Aufrufe von GLMAT



- Feine Toleranz 10⁻⁸ benötigt Dutzende von Iterationen!
 - Nach dem 500. Zeitschritt: **27200** Aufrufe von GLMAT !!

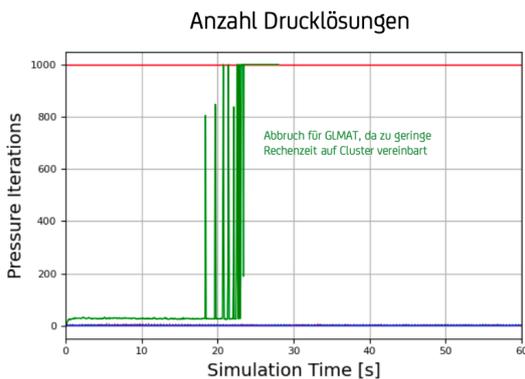
hallways - Genauigkeit ScaRC



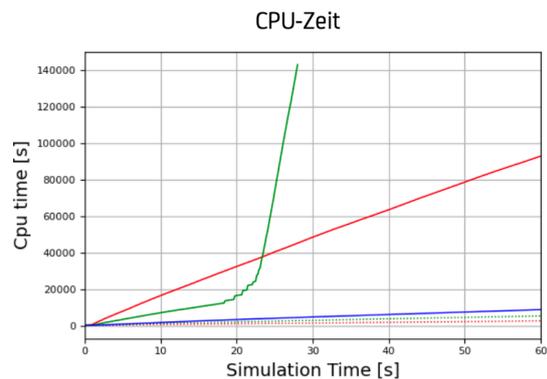
Pro Zeitschritt
genau
2 Aufrufe !

- Feine Toleranz 10^{-8} benötigt genau **eine** Iteration
- Nach dem 500. Zeitschritt: **1023** Aufrufe von ScaRC

hallways - Performance

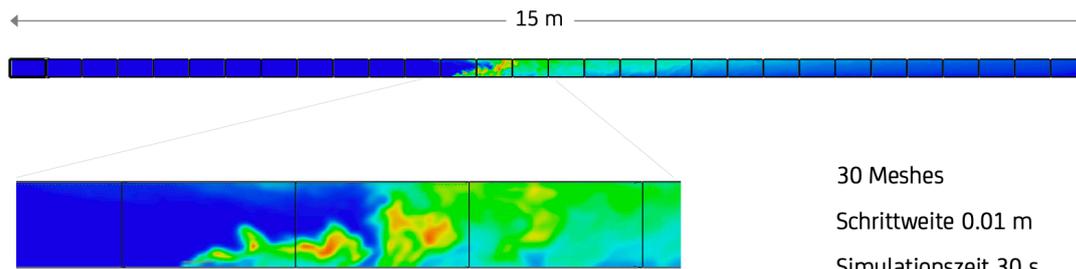


- Wenige Iterationen für FFT und GLMAT zur groben Toleranz
- Sehr viele Iterationen für FFT und GLMAT zu $tol=10^{-8}$
- Genau eine Iteration für ScaRC zu $tol=10^{-8}$



- Kürzeste Laufzeit für FFT zur groben Toleranz
- Extrem hohe Laufzeiten für FFT und GLMAT zu $tol=10^{-8}$
- ScaRC zu $tol=10^{-8}$ nur knapp hinter FFT-Default

Wu_Bakar_Tunnel_A - Geometrie

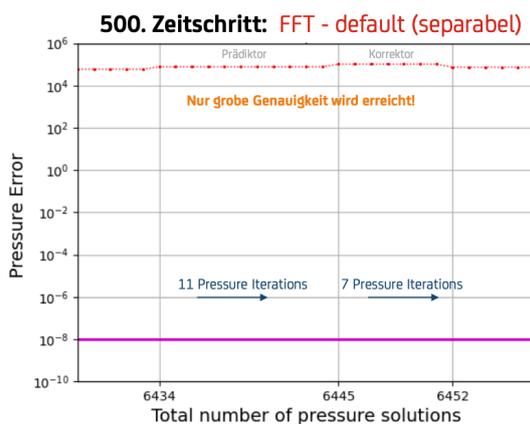


Brandherd 0.12 x 0,12 m²
HRRPUA 3400 kW/m²

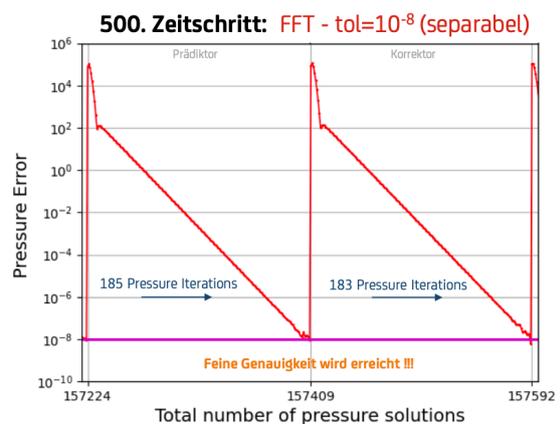
30 Meshes
Schrittweite 0.01 m
Simulationszeit 30 s



Wu_Bakar_Tunnel_A - Genauigkeit FFT

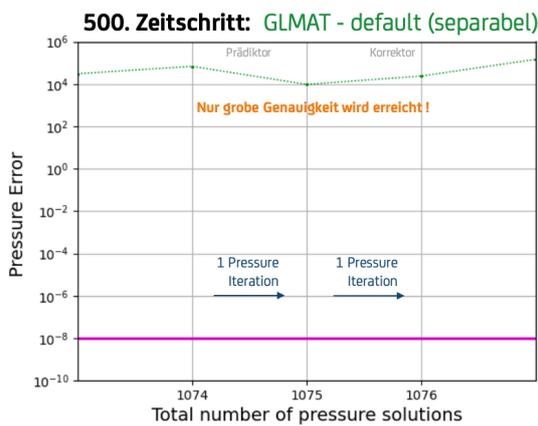


- Default-Toleranz benötigt nur wenige Iterationen
- Nach dem 500. Zeitschritt: **6452** Aufrufe der FFT

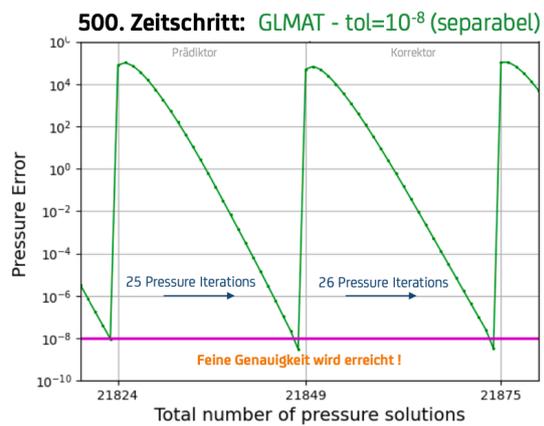


- Feine Toleranz 10⁻⁸ benötigt Hunderte an Iterationen!
- Nach dem 500. Zeitschritt: **157592** Aufrufe der FFT !!

Wu_Bakar_Tunnel_A - Genauigkeit GLMAT

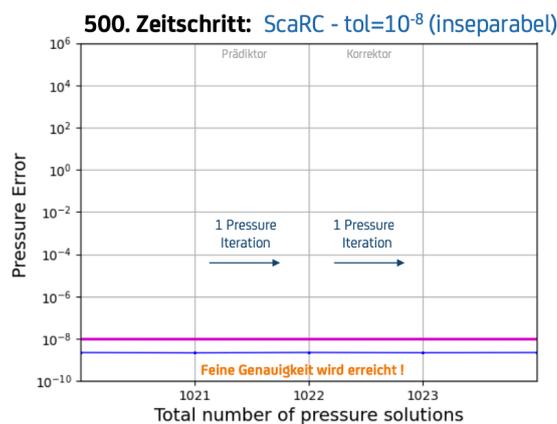


- Default-Toleranz benötigt nur je eine Iteration
- Nach dem 500. Zeitschritt: **1076** Aufrufe von GLMAT



- Feine Toleranz 10⁻⁸ benötigt Dutzende von Iterationen!
- Nach dem 500. Zeitschritt: **21875** Aufrufe von GLMAT !!

Wu_Bakar_Tunnel_A - Genauigkeit ScaRC



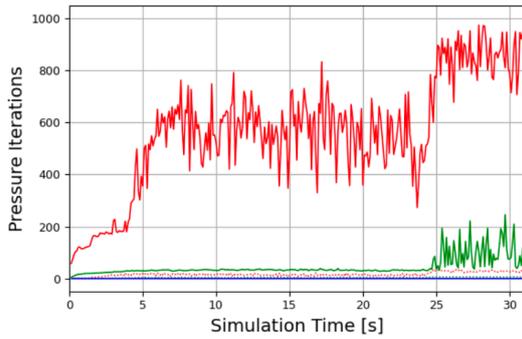
- Feine Toleranz 10⁻⁸ benötigt genau **eine** Iteration
- Nach dem 500. Zeitschritt: **1023** Aufrufe von ScaRC

Pro Zeitschritt
genau
2 Aufrufe !

Wu_Bakar_Tunnel_A - Performance

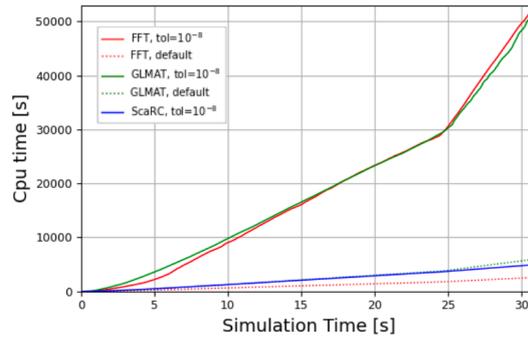


Anzahl Drucklösungen



- Wenige Iterationen für FFT und GLMAT zur groben Toleranz
- Deutlich mehr Iterationen für FFT und GLMAT für $tol=10^{-8}$
- Genau eine Iteration für ScaRC

CPU-Zeit



- Kürzeste Laufzeit für FFT zur groben Toleranz
- Extrem hohe Laufzeiten für FFT und GLMAT für $tol=10^{-8}$
- ScaRC zu $tol=10^{-8}$ nur knapp hinter FFT-Default

Korrektheit
Strahlungslöser
???

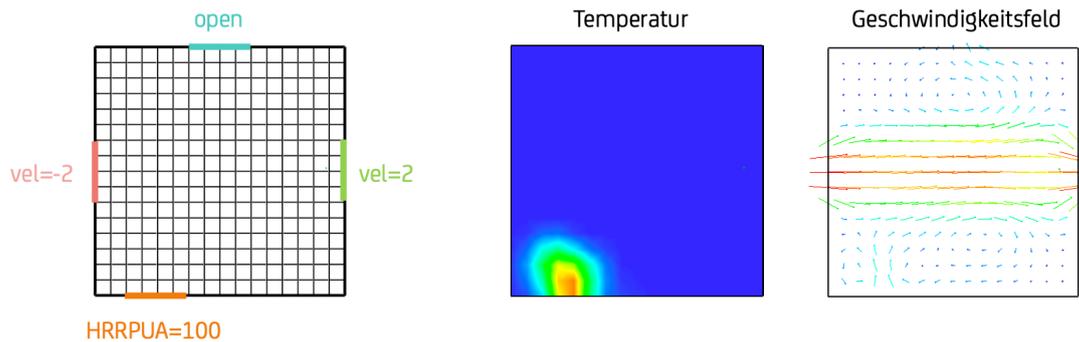
3



Sehr einfacher 2D-Testfall



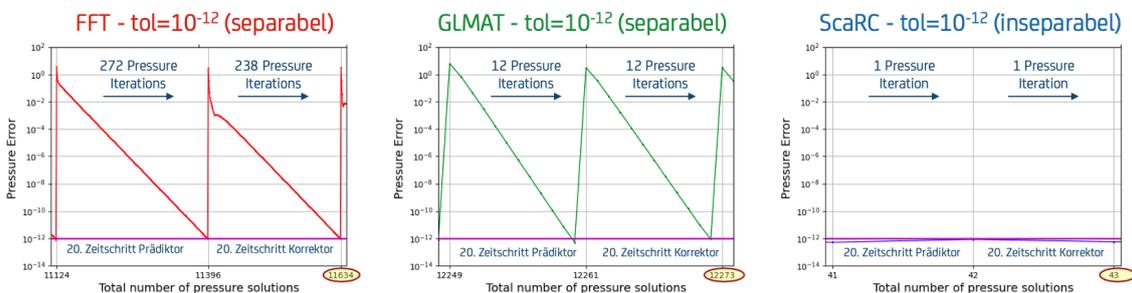
Ursprüngliches Ziel: Austesten verschiedener VENT's für inseparablen ScaRC



Ohne Strahlungslöser, $tol=10^{-12}$



Alle Löser erreichen die feine Toleranz!



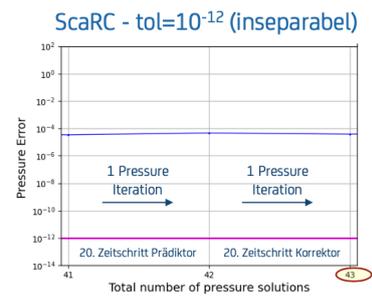
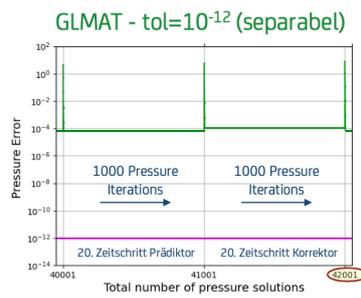
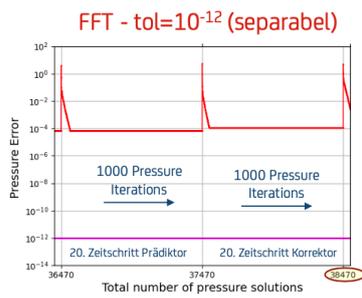
Deutlich unterschiedliche Anzahl an Pressure Iterations!



Mit Strahlungslöser, $tol=10^{-12}$



Kein Löser erreicht die feine Toleranz! **➔** Fehler im Strahlungslöser?



Alle Löser stagnieren bei etwa 10^{-4} !!!



Fazit

4



Kurze Zusammenfassung und Ausblick



Potential der inseparablen ScaRC-Variante

- Erzielt hohe Genauigkeit durch Lösung der korrekten Druckgleichung
- Benötigt nach Konstruktion genau **eine** Pressure-Iteration je Prädiktor & Korrektor
- Relativiert die schlechtere Performance von 1 ScaRC-Lösung im Vergleich zu 1 FFT-Lösung deutlich
- Hauptanwendungsbereich Tunnel-Simulationen (Pressure Error bei separablen Varianten sehr hoch!)

Noch zu tun

- Klärung des Strahlungslöser-Problems mit Hauptentwicklern
- Durchführung umfassender Testreihen an realistischen Problemen



**Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit**

Fragen?



Die deutsche FDS Usergroup ist ein unabhängiges Forum für die deutschsprachigen FDS-Anwender. Sie bietet den Nutzern des Fire Dynamics Simulator die geeignete Plattform für einen intensiven, wissenschaftlichen Austausch.

FDS (Fire Dynamics Simulator) ist ein Programm zur Simulation von Bränden. Die Software simuliert unter anderem dreidimensionale Strömungen auf Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen, den zugrunde liegenden Brandprozess und die Ausbreitung von Feuer und Brandrauch. Die Ergebnisse der FDS-Simulationen können mit Hilfe von Smokeview – einem Teil des gesamten FDS-Programmpakets – visualisiert werden. Die Auswertungen können sowohl zwei- als auch dreidimensional, als Standbild oder animiert dargestellt werden. FDS wurde am amerikanischen NIST (National Institute of Standards and Technology) von Kevin McGrattan, Glenn Forney und Bryan Klein entwickelt. Ziel der FDS Usergroup ist es, ein umfassendes Kontakt- und Kooperationsnetzwerk aufzubauen, das den Austausch von Informationen und Erfahrungen sowie Anregungen und Unterstützung rund um das Programm FDS ermöglicht. Das Online-Forum, das den registrierten Mitgliedern zur Verfügung steht, bietet zudem die Möglichkeit, konkrete Anwenderprobleme direkt und zeitnah zu diskutieren und gemeinsam zu lösen.

Dr. Susanne Kilian
Initiatorin der FDS Usergroup



ISSN 2191-463X
15. Tagungsband
FDS Usergroup
Jahrgang 2021

hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz GmbH
Rotherstraße 19, 10245 Berlin
email@hhpberlin.de