

13. ANWENDERTREFFEN DER FDS USERGROUP

TAGUNGSBAND

ZUSAMMENSTELLUNG DER VORTRÄGE

Datum:

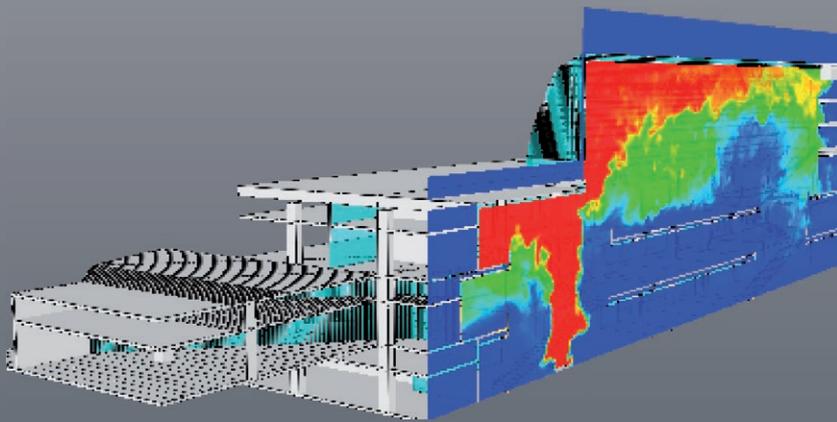
7. - 8.11.2019

Ort:

hhpberlin

Rotherstraße 19

10245 Berlin



INHALT

Vorträge 7.11.2019

Anmerkungen zum Rauchabzug nach Muster-Sonderbauverordnung Dr. Jürgen Will	4
Ventilationssteuerung bei Raumbränden M. Sc. Manuel Osburg	17
NRWG in besonderen Einbausituationen: Numerische Abschätzung von Strömungsbeiwerten Dr. Benjamin Schröder	37
Eine Analyse der Rauchfreihaltung bei offenen Gängen/Laubengängen Dr. Andreas Vischer	55
Analyse und Simulation des temperaturabhängigen Massenverlustes im Buchenholzsichelbrand (Testfeuer TF2 nach DIN EN 54) M. Sc. Benjamin Schaufelberger, Dr. Hans-Fridtjof Pernau, Marco Böhler, Dr. Pascal Matura	71
Entwicklung eines Echtzeit Brandsimulators für die Ausbildung bei der Feuerwehr Dipl.-Inf. Christian Niemand	81

INHALT

Vorträge 8.11.2019

Sichtweitereinschränkungen bei Sprinkleranlagen Dipl.-Ing. Thomas Kolb	103
Sichtweitenbestimmung - Teil 1: Experimente Dr. Alexander Belt	119
Sichtweitenbestimmung - Teil 2: Modellierung Prof. Dr. Lukas Arnold	131
Evaluation of strategies for the integration of BIM with simulation of fires in enclosures M. Sc. Silvia Milena Parra Diettes, Prof. Bjarne Husted, Dr. Pete Thompson	147
Simulation der Flammenwirkung an der inneren Gebäudeecke M. Sc. Gregor Jäger, Dipl.-Ing. (FH) Christian Kraft, M. Sc. Manuel Osburg	163
Ansätze zur Modellierung von PKW-Bränden in FDS B. Sc. Christian Böhm	187
Numerische Einblicke in die Lösung der FDS-Druckgleichung Dr. Susanne Kilian	201

Dr. Jürgen Will:

Anmerkungen zum Rauchabzug nach Muster-Sonderbauverordnung

Abstract:

Für Räume im Industriebau, in Versammlungs- oder Verkaufsstätten erfolgt die Auslegung der Rauchabzugsmaßnahmen pauschal (NRWG: $A_w = 1,5 \text{ m}^2$ je 400 m^2 , Zuluft: $A_{\text{geo}} = 12 \text{ m}^2$) ohne Berücksichtigung von Raumhöhe, Brandmelde- oder Sprinkleranlage. Hierbei wird vom Gesetzgeber billigend in Kauf genommen, dass „der Feuerwehr zudem eine gewisse Verrauchung des Raumes, z.B. durch örtliche Verwirbelung, zugemutet wird“. An einem Beispiel werden die Auswirkungen dieser pauschalen Auslegung auf die Rauch- und Wärmeausbreitung diskutiert.



Sachverständige

Anmerkungen zum Rauchabzug nach Muster-Sonderbauverordnung

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup

7. und 8. November 2019

HHP Nord/Ost Beratende Ingenieure GmbH, Braunschweig
Jürgen Will

Folie 1

Vorgaben für die Rauchableitung



- Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebau-Richtlinie – MIndBauRL)
Stand Mai 2019
Abschnitt 5.7.1.1 (Räume > 200 m²)
- Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung – MVKVO)
Stand Juli 2014
§ 16 Abs. 3 Pkt. 3 (Räume > 1000 m²)
- Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättVO)
Stand Juli 2014
§ 16 Abs. 2 Pkt. 3 (Räume > 1000 m²)

Folie 2



Bemessung

Wie erfolgt die Bemessung / Auslegung?

- je höchstens 400 m² Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät im Dach oder im oberen Raumdrittel
- Rauchabzugsgeräte mit insgesamt mindestens $A_w = 1,5 \text{ m}^2$ je 400 m² Grundfläche
- Zuluftflächen im unteren Raumdrittel mit insgesamt mindestens 12 m² freiem Querschnitt

Folie 3

Begründung / Erläuterung



Worauf basiert die Bemessung?

„Unter Beachtung sowohl physikalischer Modelle (Energie- und Massebilanzmodell) als auch physikalisch-strömungsmechanischer Modelle - wie sie beispielsweise auch der Normenreihe **DIN 18232** zu Grunde liegen, hier wegen des geforderten Schutzziels jedoch mit modifizierten Randbedingungen - wäre z. B. bei einer natürlich wirkenden Rauchableitung rechnerisch eine aerodynamisch wirksame Rauchableitungsfläche A_w von **4 bis 5 m²** in Zuordnung zu der Fläche des Raumes von **$A = 1.600 \text{ m}^2$** ausreichend. Dabei wird ein Brandverlauf bis zum Ende der Entstehungsphase als Bemessungsszenario mit einer **Brandleistung von 2 MW [übliche Brandleistung eines in der Entstehungs- und Entwicklungsphase brandlastgesteuerten Brandes und zugleich gerundeter Maximalwert des in Abstimmung auf 1,5 m² wirksamer Rauchableitungsfläche A_w sich einstellenden ventilationsgesteuerten Brandes; siehe hierzu vergleichsweise auch die Gleichung (AA.1) und (BB.6) in DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12]** über einen Zeitraum von einer Stunde betrachtet. **Der Feuerwehr wird zudem eine gewisse Verrauchung des Raumes, z. B. durch örtliche Verwirbelung, zugemutet.**“

Folie 4

Gliederung

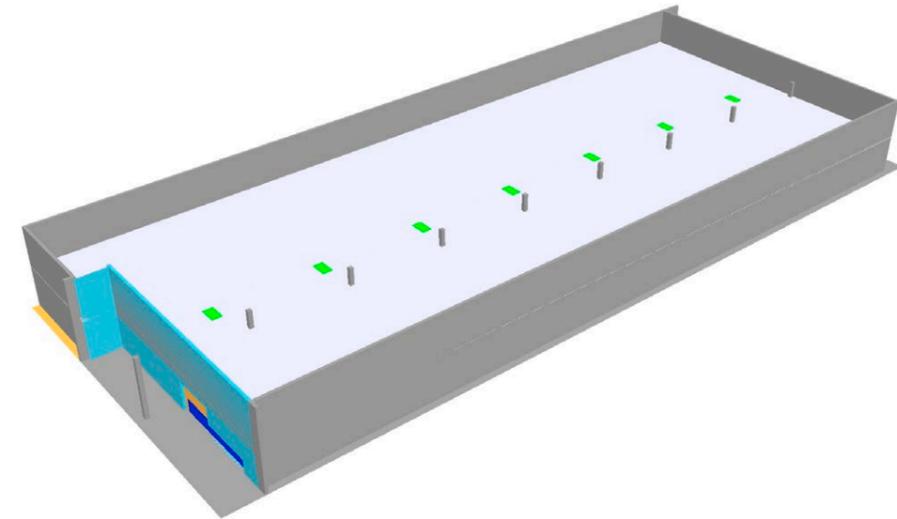


Anmerkungen zur

- „gewisse örtliche Verrauchung“, die der Feuerwehr zugemutet werden kann
 - ▲ Rauchausbreitungssimulationen
- aerodynamisch wirksame Fläche (1,5 m² je 400 m²)
 - ▲ Vergleich mit DIN 18232-2
- Brandleistung 2 MW
 - ▲ Brandentwicklung (DIN VDI 6019 Blatt 1, DIN 18232-2)
 - ▲ ventilationsgesteuert

Folie 5

Beispiel



Folie 7

Beispiel

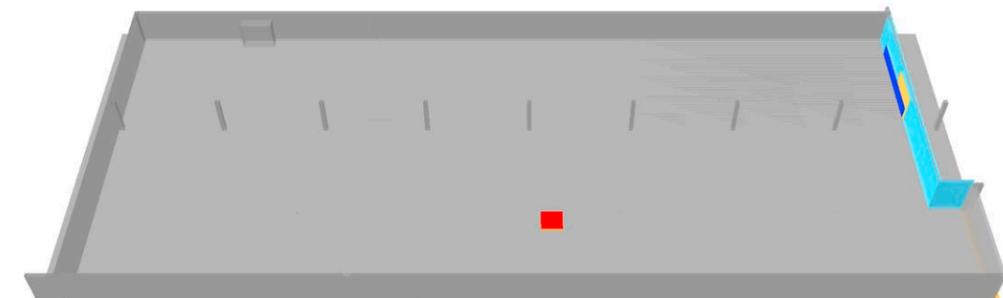


Verkaufsraum

- Grundfläche: ca. 2600 m² Höhe
- Höhe: 3,5 m, 4 m, 6 m oder 8 m
- Rauchabzug: 7 Öffnungen je 1,667 m² (geometrisch)
- Zuluft: Öffnung 12 m² (geometrisch)
 - ▲ im unteren Raumdrittel, d.h. Oberkante bei 1,17 m, 1,67 m, 2 m, 2,67 m
- Brandverlauf
 - ▲ schnelle Brandentwicklung (DIN VDI 6019 Blatt 1), innerhalb von 206 Sekunden auf 2 MW
 - ▲ stationär 2 MW bis zur 900. Sekunden
 - ▲ Brand verloschen in der 1106. Sekunden
 - ▲ 500 kW/m² (DIN VDI 6019 Blatt 1 für Verkaufsfläche)

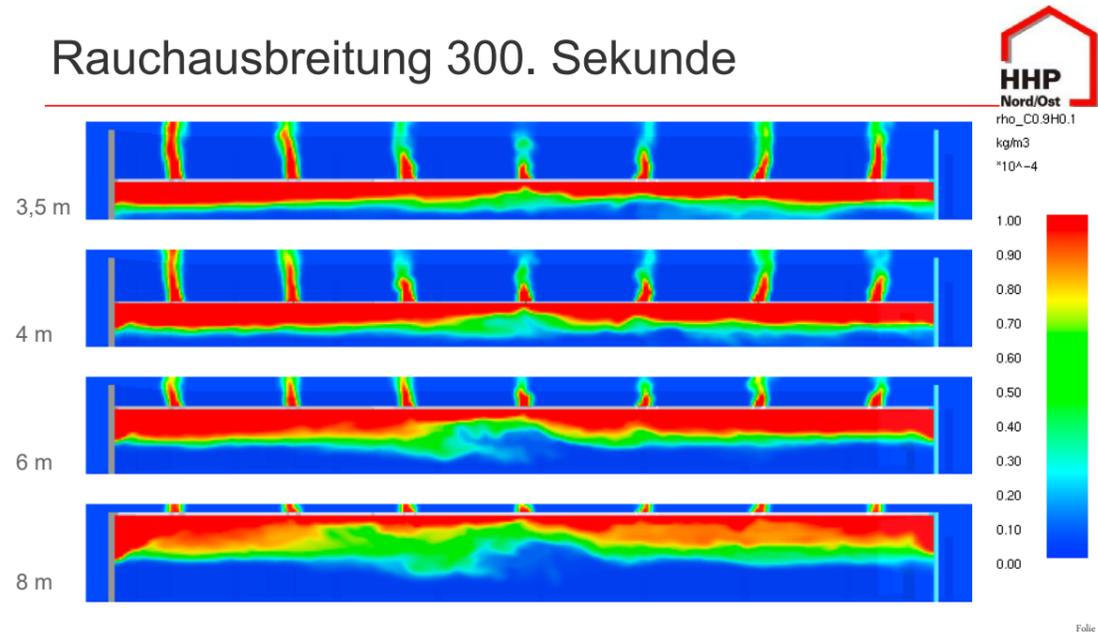
Folie 6

Beispiel

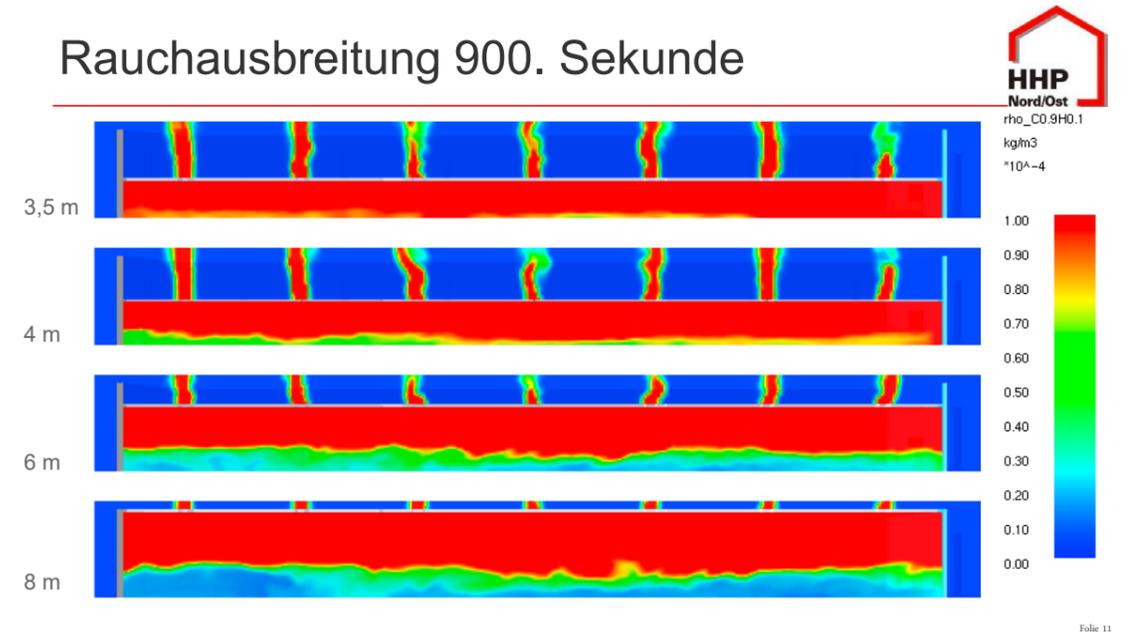


Folie 8

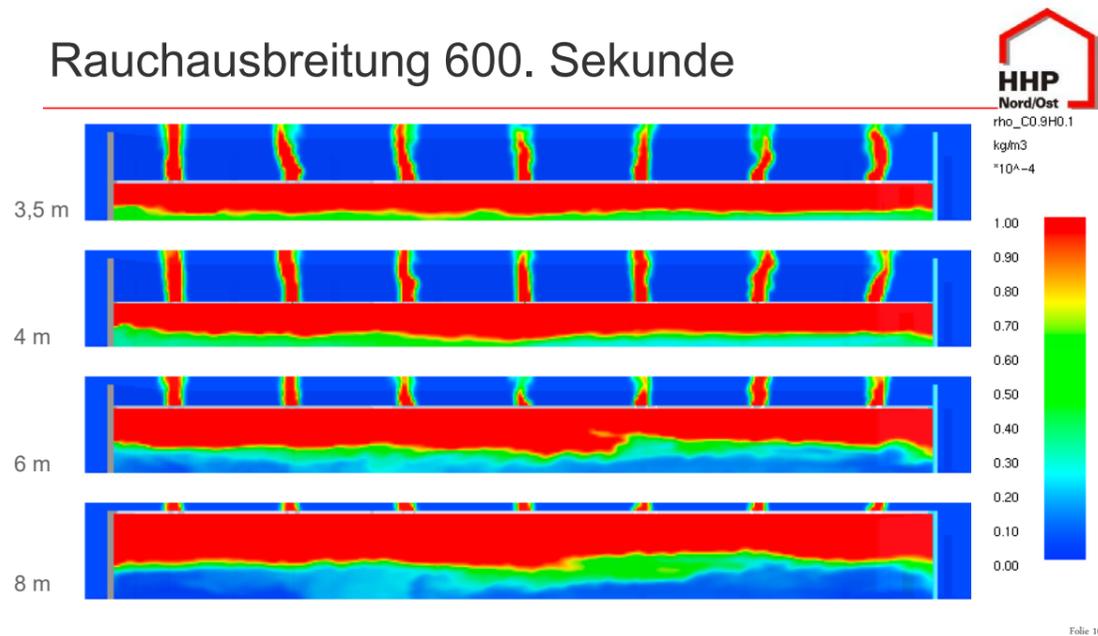
Rauchausbreitung 300. Sekunde



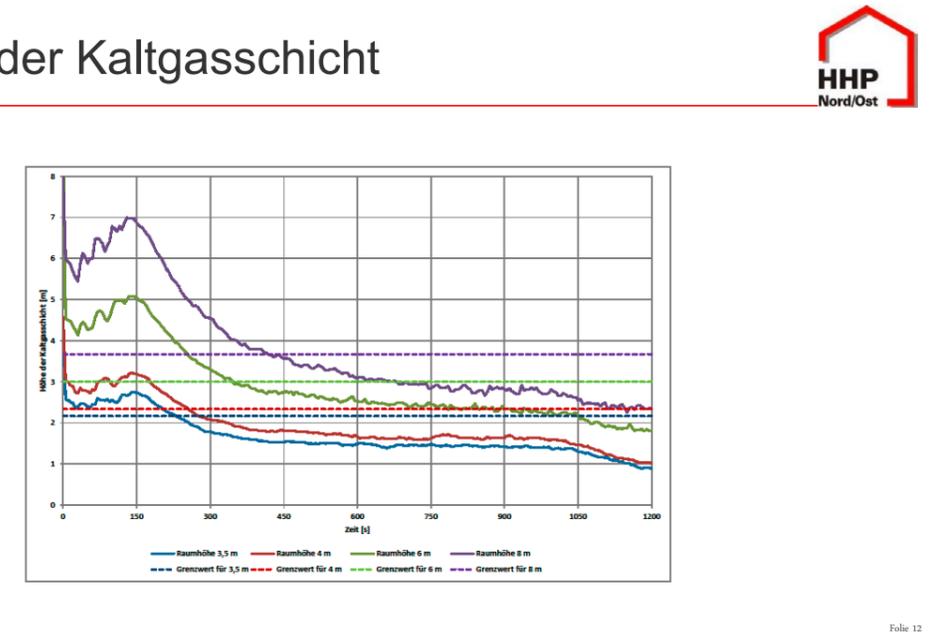
Rauchausbreitung 900. Sekunde



Rauchausbreitung 600. Sekunde



Höhe der Kaltgasschicht



Vorbemerkung für DIN 18232-2



- BMG 3, Brandleistung 6 MW:
 - BMA mit Rauchmeldern und Aufschaltung zur Feuerwehr
 - mittlere Brandentwicklung, öffentliche Feuerwehr
 - Alternativ: schnelle Brandentwicklung, Werkfeuerwehr
- BMG 2, Brandleistung 3 MW:
 - BMA mit Rauchmeldern und Aufschaltung zur Feuerwehr
 - geringe Brandentwicklung, öffentliche Feuerwehr
 - Alternativ: mittlere Brandentwicklung, Werkfeuerwehr
- BMG 1, Brandleistung 1,5 MW:
 - BMA mit Rauchmeldern und Aufschaltung zur Feuerwehr
 - geringe Brandentwicklung, Werkfeuerwehr

Folie 13

Vergleich mit DIN 18232-2



- Bezug auf $1600 \text{ m}^2 \Leftrightarrow A_w = 4 * 1,5 \text{ m}^2 = 6 \text{ m}^2$
- Oberkante Zuluft unteres Raumdrittel
- Schichtgrenze 1 m oberhalb Zuluftöffnung
- Erfüllt für
 - 3,5 m hoher Raum => 2,5 m raucharm, bis BMG 3 ($A_w \geq 5,8 \text{ m}^2$)
 - 4 m hoher Raum => 2,5 m raucharm, bis BMG 3 ($A_w \geq 4,7 \text{ m}^2$)
 - 6 m hoher Raum => 3,0 m raucharm, bis BMG 3 ($A_w \geq 4,6 \text{ m}^2$)
 - 8 m hoher Raum => 4,0 m raucharm, bis BMG 2 ($A_w \geq 5,2 \text{ m}^2$)
 - 8 m hoher Raum => 3,5 m raucharm, bis BMG 3 ($A_w \geq 5,0 \text{ m}^2$)

Folie 14

Vergleich mit DIN 18232-2



- Bezug auf $1200 \text{ m}^2 \Leftrightarrow A_w = 3 * 1,5 \text{ m}^2 = 4,5 \text{ m}^2$
- Oberkante Zuluft unteres Raumdrittel
- Schichtgrenze 1 m oberhalb Zuluftöffnung
- Erfüllt für
 - 3,5 m hoher Raum => 2,5 m raucharm, bis BMG 2 ($A_w \geq 4,4 \text{ m}^2$)
 - 4 m hoher Raum => 2,5 m raucharm, bis BMG 2 ($A_w \geq 3,6 \text{ m}^2$)
 - 6 m hoher Raum => 3,0 m raucharm, bis BMG 2 ($A_w \geq 3,6 \text{ m}^2$)
 - 8 m hoher Raum => 4,0 m raucharm, bis BMG 1 ($A_w \geq 3,6 \text{ m}^2$)
 - 8 m hoher Raum => 3,5 m raucharm, bis BMG 2 ($A_w \geq 3,9 \text{ m}^2$)

Folie 15

Bewertung



- BMA mit Rauchmeldern und Aufschaltung zur Feuerwehr erforderlich
 - für Versammlungsräume > 1000 m² vorhanden (MVStättVO)
 - für Verkaufsräume > 1000 m² NICHT erforderlich (MVKVO)
 - für Industriebau > 200 m² NICHT erforderlich (MIndBauR)
- Rauchabzugsfläche für Räume $\leq 1200 \text{ m}^2$ ($A_w \leq 4,5 \text{ m}^2$) NICHT ausreichend (mit BMA)
- Zuluftfläche $\geq 12 \text{ m}^2$ für Räume bis 1600 m^2 ($A_w \leq 6 \text{ m}^2$) ausreichend

Folie 16



Brandentwicklung

- Brandentwicklungsdauer (DIN VDI 6019 Blatt 1)
 - 120 s (BMA) + 780 s (Berufsfeuerwehr) = 900 s
 - 600 s (Telefon) + 1080 s (Freiwillige Feuerwehr) = 1680 s
 (DIN 18232-2: 600 s mit BMA, 1200 s ohne BMA, öffentliche Feuerwehr)
- Geschwindigkeit der Brandentwicklung / Brandintensitätskoeffizient α (DIN VDI 6019 Blatt 1)
 - Langsam: 0,0029 kW/s²
 - Mittel: 0,012 kW/s²
 - Schnell: 0,047 kW/s² (Verkaufsfläche, Ausstellung, Theater, Kinosaal)
 - Sehr schnell: 0,188 kW/s²

Folie 17



Ventilationsgesteuerter Brand

- Abschätzung Luftbedarf
 - mit 17100 kJ/m³ O₂, X_{O₂} = 20,98 %
⇒ Luftbedarf: 0,2787 m³_{Luft}/MJ
 - Luftbedarf: 0,2787 m³_{Luft}/s je 1 MW bei 1-fachem Zuluftverhältnis
- Abschätzung Volumenstrom Rauchableitungsöffnungen
 - mit Dichte 1,18 kg/m³ (Luft 20°C), Druckdifferenz 5 Pa
⇒ Strömungsgeschwindigkeit: ca. 2,9 m/s
 - Volumenstrom bei 1,5 m² Öffnungsquerschnitt: ca. 4,36 m³/s

Folie 19

Brandleistung (gemäß VDI 6019-1)



Brandentwicklung	Koeffizient [kW/s]	Dauer [s]	Brandleistung [MW]			
			600	900	1200	1680
langsam	0,0029	1,0	2,3	4,2	8,2	
mittel	0,012	4,3	9,7	17,3	33,9	
schnell	0,047	16,9	38,1	67,7	132,7	
sehr schnell	0,188	67,7	152,3	270,7	530,6	
langsam (DIN 18232-2)		3		12		
mittel (DIN 18232-2)		6		24		
schnell (DIN 18232-2)		12		-		

⇒ Brandleistung 2 MW nicht über VDI 6019 (oder DIN 18232) nachvollziehbar

Folie 18

Ventilationsgesteuerter Brand



➤ 15,64 MW je 1,5 m² bei 1-fachem Luftverhältnis
 2 MW je 1,5 m² bei 7,8-fachem Luftverhältnis
 Ist bei 7,8-fachem Luftverhältnis mit einem ventilationsgesteuertem Brand zu rechnen?

- Gleichung (AA.1) und (BB.6) in DIN EN 1991-1-2/NA
 - falsch (?): Rauchableitungsfläche 1,5 m² ⇒ ca. 2 MW
 - richtig (?): Zuluftfläche 12 m² ⇒ ca. 16 MW

⇒ Brandleistung 2 MW nicht mit ventilationsgesteuertem Brand erklärbar

Folie 20

Schlussfolgerungen



- Beispiel
 - Eine ausreichend hohe raucharme Schicht kann ggf. für hohe Räume (≥ 6 m) eingehalten werden.
 - Voraussetzung
 - ▲ Bemessungsbrand mit 2 MW
 - ▲ Automatische Auslösung der Maßnahmen zur Rauchableitung
 - Für Räume niedriger als 6 m kann eine nahezu vollständige Verrauchung nicht ausgeschlossen werden.
- Bemessung und Brandverlauf
 - nicht nachvollziehbar

Folie 21



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen oder Anmerkungen?

HHP Nord/Ost Beratende Ingenieure GmbH, Braunschweig
Jürgen Will

Folie 22

M. Sc. Manuel Osburg:

Ventilationssteuerung bei Raumbränden - Theorie und Praxis



Ventilationssteuerung bei Raumbränden

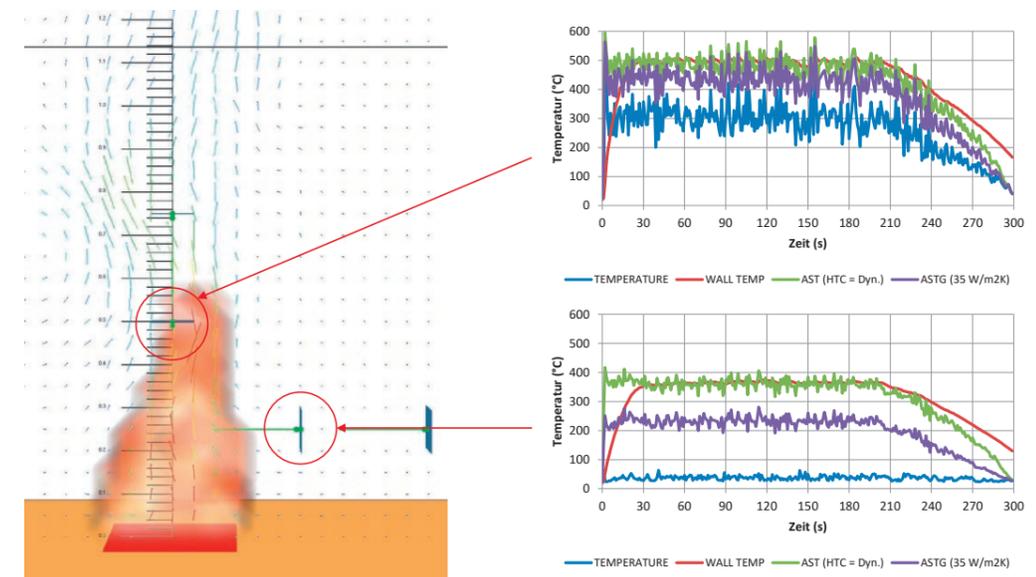
Eine experimentell gestützte Untersuchung zur
Ventilationssteuerung des Brandverlaufs bei Raumbränden

M.Sc. Manuel Osburg
Leiter Fachgebiet Ingenieurmethoden

07.11.2019 www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

Ergänzung meines Beitrags zur 12. FDS Usergroup... 

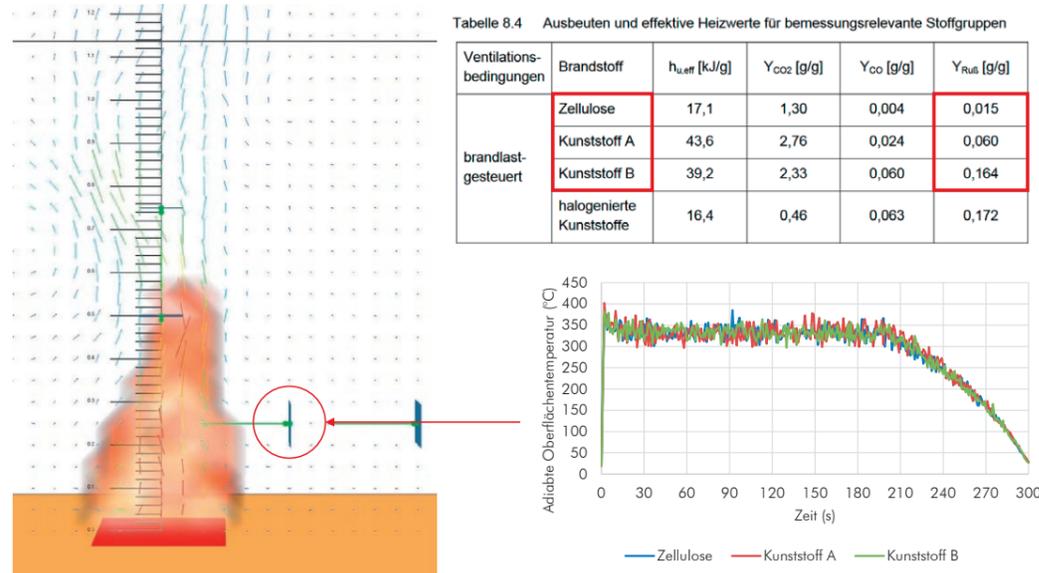
„Warum Temperatur nicht gleich Temperatur ist“



Ergänzung meines Beitrags zur 12. FDS Usergroup...



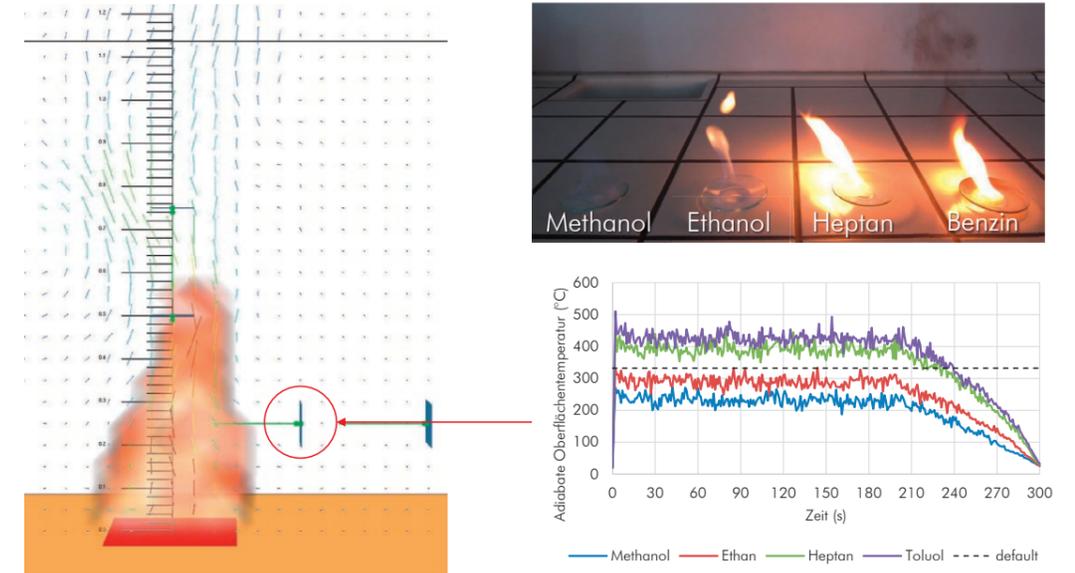
Einfluss der Verbrennungseffektivität / Rußausbeute:



Ergänzung meines Beitrags zur 12. FDS Usergroup...



Einfluss der Verbrennungseffektivität / Rußausbeute:



Ergänzung meines Beitrags zur 12. FDS Usergroup...

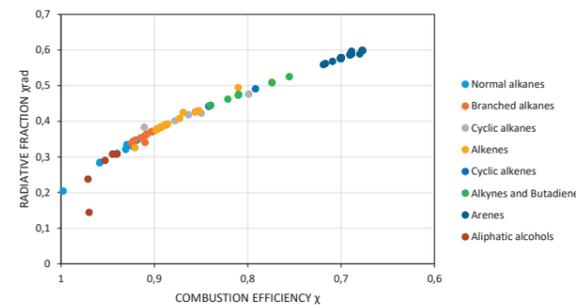
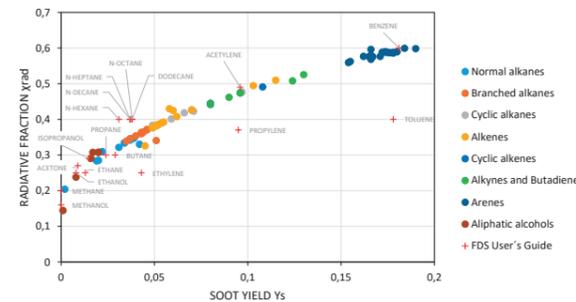


Table 17.1: Default radiative fraction for some common fuels.

Species	χ_r	Reference
ACETONE	0.27	[42]
ACETYLENE	0.49	[42]
BENZENE	0.60	[42]
BUTANE	0.30	[46]
DODECANE	0.40	[46]
ETHANE	0.25	[42]
ETHANOL	0.25	[42]
ETHYLENE	0.25	[46]
HYDROGEN	0.20	[46]
ISOPROPANOL	0.29	[42]
METHANE	0.20	[46]
METHANOL	0.16	[42]
N-DECANE	0.40	[46]
N-HEPTANE	0.40	[46]
N-HEXANE	0.40	[46]
N-OCTANE	0.40	[46]
PROPANE	0.30	[46]
PROPYLENE	0.37	[42]
TOLUENE	0.40	[47]
All other species	0.35	



Ventilationssteuerung bei Raumbränden

Eine experimentell gestützte Untersuchung zur Ventilationssteuerung des Brandverlaufs bei Raumbränden

M.Sc. Manuel Osburg
Leiter Fachgebiet Ingenieurmethoden

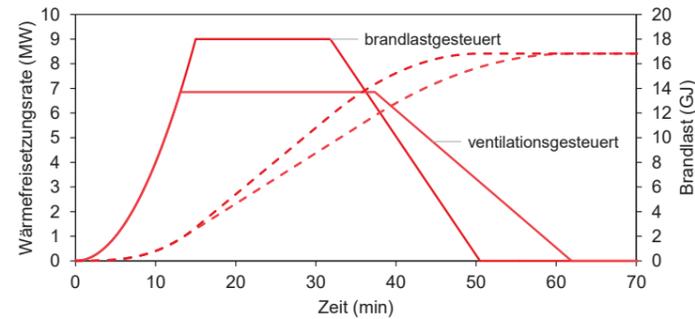
07.11.2019 www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

Idealisierter Brandverlauf bei Raumbränden



- Vollbrand (stationäre Phase) mit maximaler Wärmefreisetzungsrate im Anschluss an die Entwicklungsphase oder als Resultat des Flashover

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ brandlastgesteuert } \dot{Q}_{\max,f} \\ \bullet \text{ ventilationsgesteuert } \dot{Q}_{\max,v} \end{array} \right\} \dot{Q}_{\max} = \text{MIN}\{\dot{Q}_{\max,f}; \dot{Q}_{\max,v}\}$$



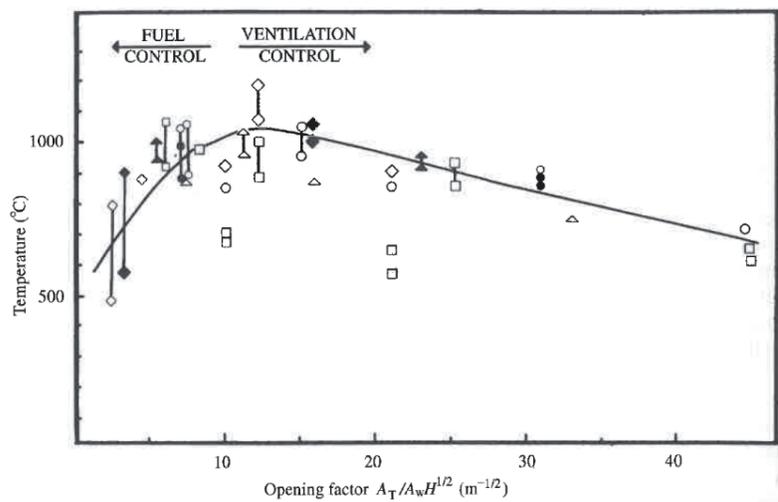
- Eurocode EC 1-1-2 enthält „vereinfachte Naturbrandmodelle“ zur Herleitung des zeitlichen Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate

07.11.2019

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

7

Ventilationssteuerung bei Raumbränden



Konservative Ergebnisse: Ansatz der potentiellen Öffnungsflächen (z. B. Verglasung) derart, dass maximale Brandeinwirkungen resultieren.

07.11.2019

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

8

„Leipziger Brandversuche“ (Wilk et al.)



- seit 1996 wurden insgesamt 400 Brandversuche realisiert
- seit 2012 werden die Ergebnisse u. a. in einer Serie von Aufsätzen mit dem Titel „Der Brand in Räumen“ in der vfdb-Zeitschrift veröffentlicht:



- Vorliegender Untersuchungsumfang beinhaltet **60 Brandversuche** in Räumen (Wohn- und Büronutzung) mit Grundflächen $A_f = 12 \text{ m}^2$ bis 20 m^2 und jeweiligen Öffnungsanteilen von $A_w/A_f = 0,12$ bis $0,30$
- Umfangreiche messtechnische Begleitung der Brandversuche
- Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate anhand verschiedener Methoden, u. a. Sauerstoffverbrauchskalorimetrie

07.11.2019

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

9

Brandlastgesteuerte Brände



- Wärmefreisetzungsrate eines sich entwickelnden Brandes $\dot{Q}(t)$ bzw. eines brandlastgesteuerten Brandes $\dot{Q}_{\max,f}$

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max,f} = \dot{m}_f \cdot h_{u,eff} = \dot{m}_f \cdot \chi \cdot h_u$$

- EC 1-1-2/NA Anhang BB

Für brandlastgesteuerte Brände kann der charakteristische Wert der maximalen Wärmefreisetzungsrate mit Gleichung (BB.5) bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{\max,f,k} = RHR_f \cdot A_f \quad \text{in MW} \quad (\text{BB.5})$$

Dabei ist

RHR_f der charakteristische Wert der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate nach Tabelle BB.2 in MW/m^2 ; RHR_f ist die maximale Wärmefreisetzungsrate, die auf 1 m^2 bei einem brandlastgesteuerten Brand erreicht wird;

A_f die maximale Brandfläche, in der Regel die Grundfläche des Brandraumes in m^2 .

07.11.2019

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

10

Brandlastgesteuerte Brände



Tabelle BB.2 — Parameter t_{α} für die Brandentwicklungsphase und maximale flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate RHR_f für die stationäre Phase bei verschiedenen Nutzungen (charakteristische Werte)

Zeile	Nutzung	Brandausbreitung	t_{α}	RHR_f
			s	MW/m ²
		1	2	3
1	Wohngebäude	mittel	300	0,25
2	Bürogebäude	mittel	300	0,25
3	Krankenhaus (Zimmer)	mittel	300	0,25
4	Hotel (Zimmer)	mittel	300	0,25
5	Bibliothek, Bücherei	mittel	450	0,50
6	Schule (Klassenzimmer)	mittel	300	0,15
7	Verkaufsstätte, Einkaufszentrum	schnell	150	0,25
8	Versammlungsstätte (Theater, Kino)	schnell	150	0,50
9	Transport (öffentlicher Bereich)	langsam	600	0,25

07.11.2019

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

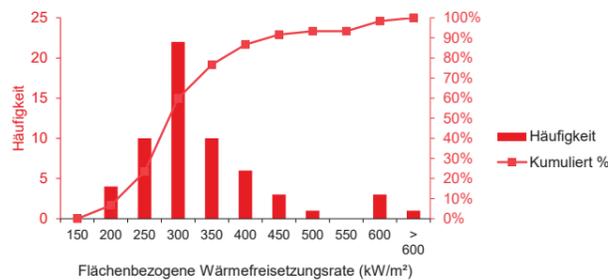
11

Brandlastgesteuerte Brände

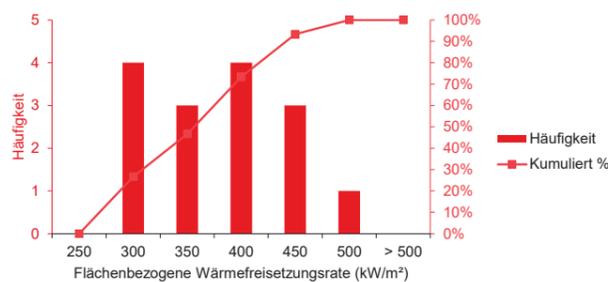


Häufigkeitsverteilung \dot{q}_{max} für „Leipziger Brandversuche“ ($A_f < 20 \text{ m}^2$, Wohn- und Büronutzung):

- alle Brandversuche (n = 60)
Mittelwert: 310 kW/m²
90 %-Quantil: 424 kW/m²



- nur brandlastgesteuerte Brände (n = 15)
Mittelwert: 350 kW/m²
90 %-Quantil: 438 kW/m²



07.11.2019

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

12

Ventilationsgesteuerte Brände



- EC 1-1-2/NA Anhang AA

Für ventilationsgesteuerte Brände in Wohn-, Büro- und vergleichbaren Nutzungen darf der charakteristische Wert der maximalen Wärmefreisetzungsrate im Brandraum vereinfacht nach Gleichung (AA.1) bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{max,v,k} = 121 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{in MW} \quad \text{(AA.1)}$$

Dabei ist

A_w die Fläche der Ventilationsöffnungen in m²;

h_w die gemittelte Höhe der Ventilationsöffnungen in m.

$\chi = 0,7$

- EC 1-1-2/NA Anhang BB

Für ventilationsgesteuerte Brände in Räumen bis 400 m² Grundfläche kann die maximale Wärmefreisetzungsrate im Brandraum vereinfacht nach Gleichung (BB.6) bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{max,v,k} = 0,1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{in MW} = 1,38 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{(BB.6)}$$

Dabei ist

H_u die Netto-Verbrennungswärme der maßgebenden Brandlast in MJ/kg; im Hochbau darf in der Regel der Wert für Holz $H_u = 17,3 \text{ MJ/kg}$ verwendet werden;

χ die Verbrennungseffektivität; im Hochbau darf für typische Mischbrandlasten pauschal $\chi = 0,8$ angenommen werden, ansonsten siehe z. B. [4].

24.09.2019

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

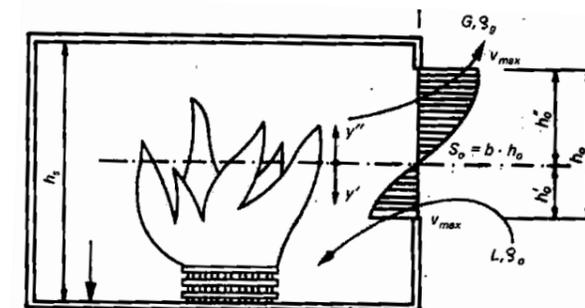
13

Ventilationsgesteuerte Brände



- Maximale Wärmefreisetzungsrate bei ventilationsgesteuerten Bränden $\dot{Q}_{max,v}$ resultiert aus einem Mangel an Verbrennungsluft bzw. Sauerstoff:

$$\dot{Q}_{max,v} = \dot{m}_{Zuluft,O_2} \cdot \chi_{O_2} \cdot E_{O_2} = \dot{m}_{Zuluft} \cdot \chi_{O_2} \cdot E_L$$



- Thornton's Rule: Bei der Verbrennung organischer Stoffe wird stets eine nahezu konstante Wärmemenge pro Masseneinheit verbrauchtem Sauerstoff freigesetzt ($E_{O_2} = 13,1 \text{ MJ/kg}_{O_2}$ oder $E_L = 0,232 \cdot E_{O_2} = 3,03 \text{ MJ/kg}_L$)

07.11.2019

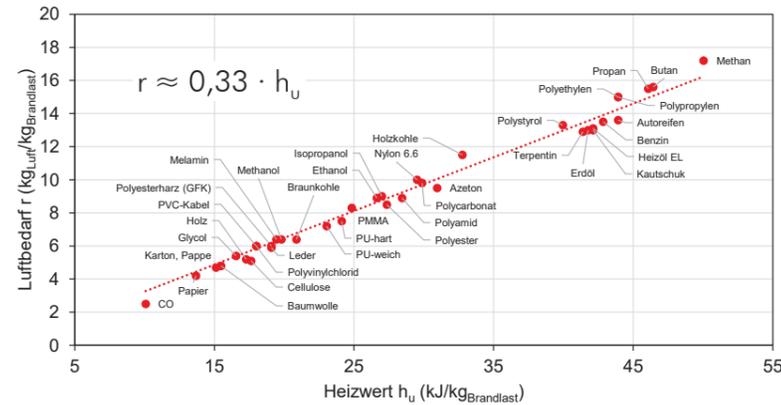
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

14

Ventilationsgesteuerte Brände



- Der Wert E_L kann auch als Quotient aus Heizwert h_u und Luftbedarf r ausgedrückt werden: $E_L = h_u/r$
- Heizwert und Luftbedarf organischer Brandlasten verhalten sich proportional zueinander:



07.11.2019

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

15

Ventilationsgesteuerte Brände



- Gilt dieser Zusammenhang auch für die unvollständige Verbrennung?

Vollständige Verbrennung:
 $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
 $16g CH_4 + 64g O_2 \rightarrow 44g CO_2 + 36g H_2O$
 $-74,9 kJ/mol + 0 \rightarrow -393,5 kJ/mol + 2 \cdot (-241,8 kJ/mol)$
 Sauerstoffbedarf: $r_{O_2} = 64g O_2 / 16g CH_4 = 4 g O_2 / g CH_4$
 Luftbedarf: $r_L = 4 g O_2 / g CH_4 / 0,233 g O_2 / g L = 17,2 g L / g CH_4$
 Reaktionsenthalpie: $\Delta_R H^0 = (-393,5 + 2 \cdot (-241,8)) - (-74,9) = -802,2 kJ/mol$
 Heizwert: $h_u = |\Delta_R H^0 / M_{CH_4}| = |-802,2 / 16| = 50,1 kJ/g$
 Verhältnis r/h_u : $r/h_u = 17,2 / 50,1 = 0,34$

Unvollständige Verbrennung:
 $4CH_4 + 6,5O_2 \rightarrow 2CO_2 + CO + C + 8H_2O$
 $64g CH_4 + 208g O_2 \rightarrow 88g CO_2 + 28g CO + 12g C + 144g H_2O$
 $4 \cdot (-74,9 kJ/mol) + 0 \rightarrow 2 \cdot (-393,5 kJ/mol) + (-110,5) + 0 + 8 \cdot (-241,8 kJ/mol)$
 Sauerstoffbedarf: $r_{O_2} = 208g O_2 / 64g CH_4 = 3,25 g O_2 / g CH_4$
 Luftbedarf: $r_L = 3,25 g O_2 / g CH_4 / 0,233 g O_2 / g L = 13,9 g L / g CH_4$
 Reaktionsenthalpie: $\Delta_R H^0 = -633 kJ/mol$
 Heizwert: $h_u = |\Delta_R H^0 / M_{CH_4}| = |-633 / 16| = 39,6 kJ/g$
 Verhältnis r/h_u : $r/h_u = 13,9 / 39,6 = 0,35$

24.09.2019

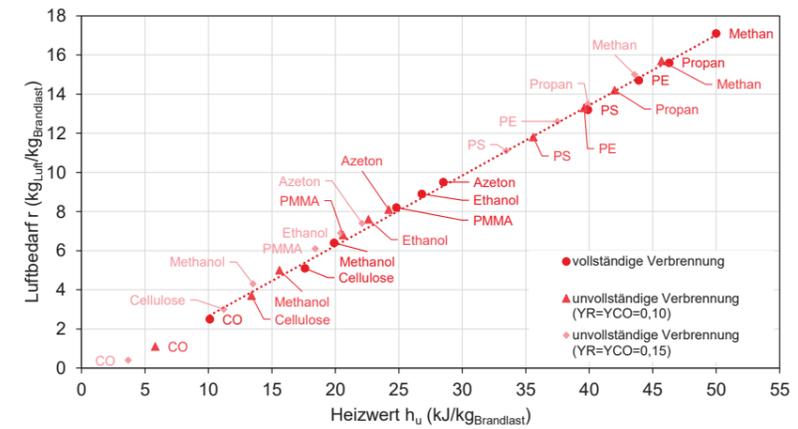
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

16

Ventilationsgesteuerte Brände



- Gilt dieser Zusammenhang auch für die unvollständige Verbrennung?



- Heizwert und Luftbedarf organischer Brandlasten verhalten sich – auch bei unvollständiger Verbrennung – proportional zueinander.

24.09.2019

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

17

Ventilationsgesteuerte Brände



- Für die Ermittlung des zur Verfügung stehenden Zuluftstroms in den Brandraum wird eine Verallgemeinerung der erstmals durch Kawagoe ermittelten Abhängigkeit des Zuluftstroms vom Ventilationsfaktor $\dot{m}_L \sim A_w \cdot \sqrt{h_w}$ verwendet:



$$\dot{m}_L = 0,52 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$$

- In Verbindung mit der Korrelation zwischen Heizwert und Luftbedarf lässt sich folgendes vereinfachte Brandmodell zur Ermittlung der maximalen Wärmefreisetzungsrate eines ventilationsgesteuerten Brandes formulieren:

$$\dot{Q}_{max,v} = 1,57 \cdot \chi_{O_2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$$

07.11.2019

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

18

Ventilationsgesteuerte Brände



- Maximale Wärmefreisetzungsrate bei ventilationsgesteuerten Bränden $\dot{Q}_{max,v}$ resultiert aus einem Mangel an Verbrennungsluft bzw. Sauerstoff:

$$\dot{Q}_{max,v} = \chi_{O_2} \cdot E_L \cdot \dot{m}_L = \chi_{O_2} \cdot \frac{h_u}{r} \cdot \dot{m}_L$$

Kawagoe: $\dot{m}_L = 0,52 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$
 $E_L = h_u/r \approx 3,03$
 semi-universal; brandstoff- und ventilationsunabhängig
 Sauerstoffausnutzungsgrad $\chi_{O_2} \leq 1$

- EC 1-1-2/NA Anhang BB

Für ventilationsgesteuerte Brände in Räumen bis 400 m² Grundfläche kann die maximale Wärmefreisetzungsrate im Brandraum vereinfacht nach Gleichung (BB.6) bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{max,v,k} = 0,1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \text{ in MW} \quad (\text{BB.6})$$

Dabei ist

- A_w die Fläche der Ventilationsöffnungen in m²; semi-variabel; brandstoff- und ventilationsabhängig, Widerspruch zu gezeigten Zusammenhängen
- h_w die gemittelte lichte Höhe der Ventilationsöffnungen in m;
- H_u die Netto-Verbrennungswärme der maßgebenden Brandlast in MJ/kg; im Hochbau darf in der Regel der Wert für Holz $H_u = 17,3$ MJ/kg verwendet werden;
- χ die Verbrennungseffektivität; im Hochbau darf für typische Mischbrandlasten pauschal $\chi = 0,8$ angenommen werden, ansonsten siehe z. B. [4]. \neq Sauerstoffausnutzungsgrad

07.11.2019

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

19

Zwischenfazit



- Die regelmäßig verwendete flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate von $RHR_f = 250$ kW/m² nach EC 1-1-2/NA Anhang BB ist im Vergleich zu den Ergebnissen der „Leipziger Brandversuche“ (Brandräume < 20 m²) zu niedrig.
- Die Brandstoff- und Ventilationsabhängigkeit (h_u und χ) der Gleichungen AA.1 bzw. BB.6 erscheint fragwürdig, da der Zusammenhang zwischen Sauerstoff- / Luftverbrauch und Wärmefreisetzungsrate annähernd universell ist.
- Es wird vorgeschlagen, die Gleichungen AA.1 und BB.6 mit der von der Brandlast und den Ventilationsbedingungen unabhängigen Kawagoe-Gleichung zu ersetzen. Im Entwurf der 4. Auflage des vdfb-Leitfadens wurde die entsprechende Gleichung bereits geändert.
- Um das etablierte Sicherheitsniveau des EC 1-1-2/NA beizubehalten kann ein Sauerstoffausnutzungsgrad von $\chi_{O_2} = 0,8$ eingeführt werden:

$$\dot{Q}_{max,v} = \dot{m}_L \cdot \chi_{O_2} \cdot E_L = 0,52 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \cdot 0,8 \cdot 3,03 = 1,26 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$$

07.11.2019

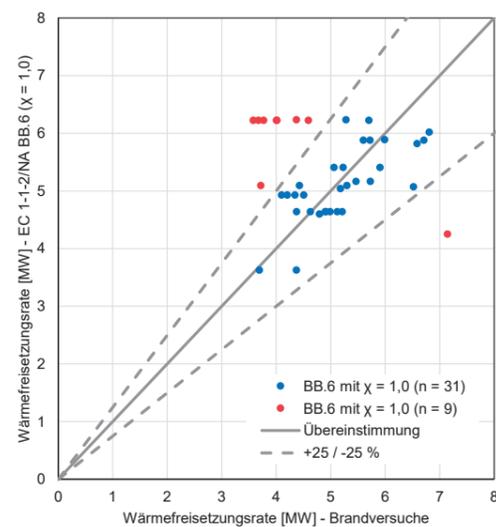
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

21

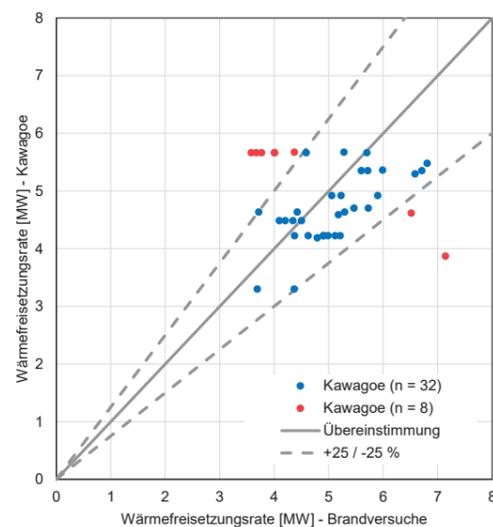
Ventilationsgesteuerte Brände



EC 1-1-2/NA BB.6 mit $\chi = 1,0$
 $(\dot{Q}_{max,v} = 1,73 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w})$



„Kawagoe“ mit $\chi_{O_2} = 1,0$
 $(\dot{Q}_{max,v} = 1,57 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w})$

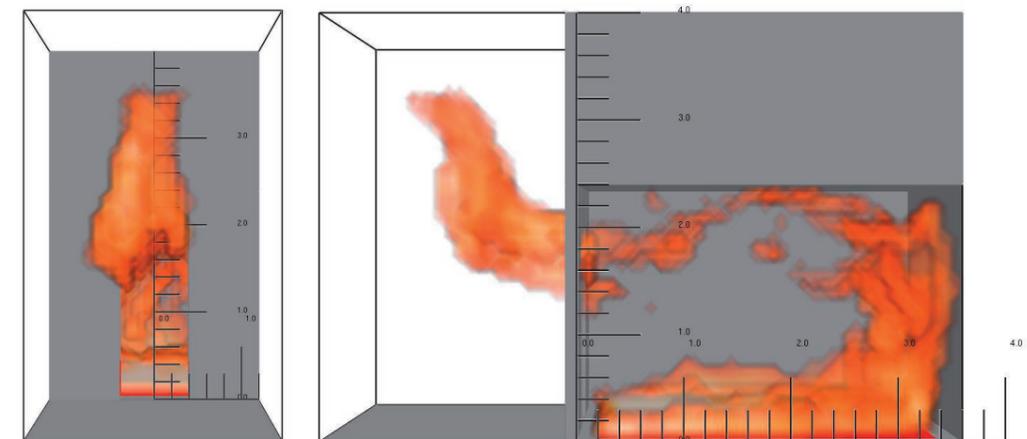


07.11.2019

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

20

Verbrennungsmodellierung in FDS



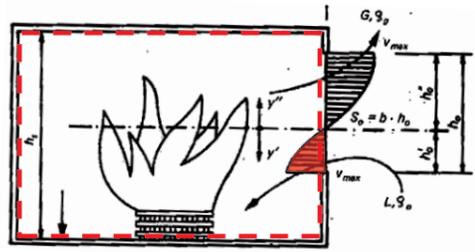
&MESH XB = -1.2, 1.2, -2.4, 3.6, 0.0, 4.0, IJK = 24, 60, 40 / $\delta x = 0,1$ m
 Innenabmessungen Brandraum: 2,4 m x 3,6 m x 2,4 m
 Abmessungen Türöffnung: B x H = 0,8 m x 2,0 m ($A_w = 1,6$ m², $h_w = 2,0$ m)
 Materialien & Oberflächen: Beton nach EC 2-1-2, d = 0,1 m

07.11.2019

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

22

Verbrennungsmodellierung in FDS



$$\dot{Q}_{max,v} = 1,57 \cdot \chi_{O_2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$$

	A_w	h_w	χ_{O_2}	$\dot{Q}_{max,v}$
1	1,6 m ²	2,0 m	1,0	3,55 MW
2			0,9	3,20 MW
3			0,8	2,84 MW
4			0,7	2,49 MW
5			0,6	2,13 MW
6			0,5	1,77 ₅ MW

07.11.2019

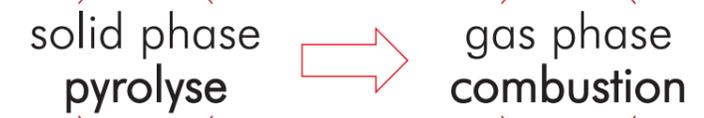
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

23

Verbrennungsmodellierung in FDS



fire modelling



Erzeugung des gasförmigen Brennstoffs an einer festen oder flüssigen Oberfläche

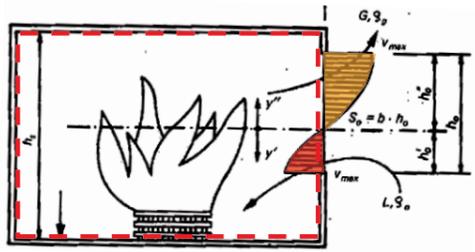
Reaktion des gasförmigen Brennstoffs mit Sauerstoff

07.11.2019

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

25

Verbrennungsmodellierung in FDS



$$\dot{Q}_{max,v,in} = 1,57 \cdot \chi_{O_2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$$

$$\dot{Q}_{max,v,out} = 1,57 \cdot (1 - \chi_{O_2}) \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$$

	A_w	h_w	χ_{O_2}	$\dot{Q}_{max,v,in}$	$\dot{Q}_{max,v,out}$
1	1,6 m ²	2,0 m	1,0	3,55 MW	0,00 MW
2			0,9	3,20 MW	0,35 MW
3			0,8	2,84 MW	0,71 MW
4			0,7	2,49 MW	1,06 MW
5			0,6	2,13 MW	1,42 MW
6			0,5	1,77 ₅ MW	1,77 ₅ MW

07.11.2019

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

24

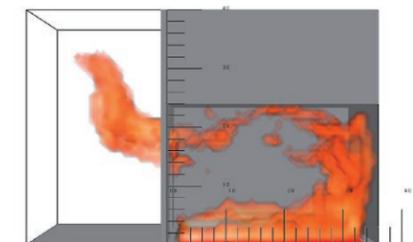
Verbrennungsmodellierung in FDS



Solid phase pyrolyse

```
&SURF ID = 'FIRE', COLOR = 'RED', HRRPUA = var, RAMP_Q = 'ramp_q' /
&RAMP ID = 'ramp_q', T = 0, F = 0 /
&RAMP ID = 'ramp_q', T = 300, F = 1 /
&RAMP ID = 'ramp_q', T = 1800, F = 1 /
&VENT XB = -1.0, 1.0, 0.2, 3.4, 0.0, 0.0, SURF_ID = 'FIRE' / A_f = 6,4 m2
```

Case	HRRPUA	HRR
A	250	1.600 kW
B	500	3.200 kW
C	750	4.800 kW
D	1.000	6.400 kW



07.11.2019

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

26

Verbrennungsmodellierung in FDS



Gas phase combustion

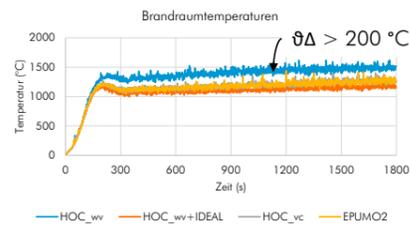
```
&REAC FUEL = 'PMMA', FORMULA = 'C5H8O2', CO_YIELD = 0.337,
      SOOT_YIELD = 0.029, HEAT_OF_COMBUSTION = var /
&COMB SUPPRESSION = .TRUE. vs. .FALSE. /
```

Vollständige Verbrennung:

```
CO_YIELD = 0.0, SOOT_YIELD = 0.0, HEAT_OF_COMBUSTION = 24840
```

Unvollständige Verbrennung:

```
CO_YIELD = 0.337, SOOT_YIELD = 0.029, ...
```



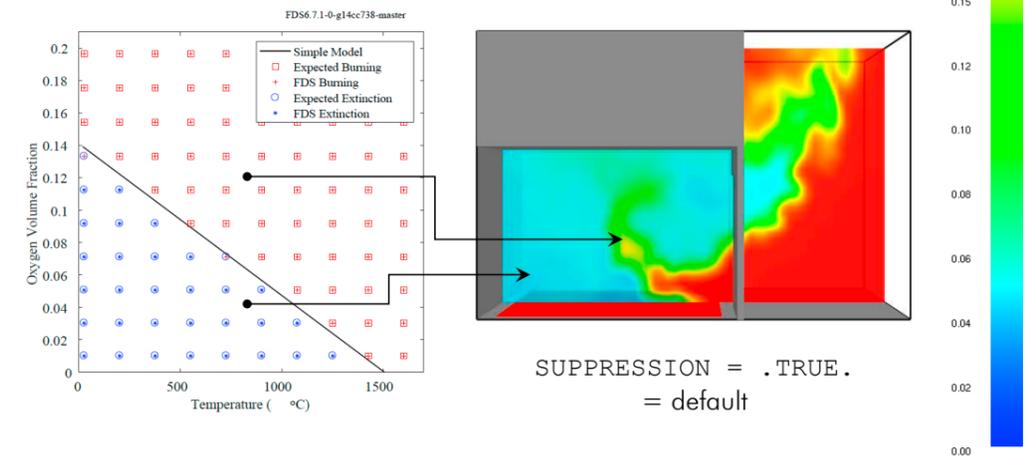
```
... HEAT_OF_COMBUSTION = 24840
... HEAT_OF_COMBUSTION = 24840, IDEAL = .TRUE.
... HEAT_OF_COMBUSTION = 21600
... EPUMO2 = 13100 (for simple chemistry only)
```

Verbrennungsmodellierung in FDS



Gas phase combustion

```
&REAC FUEL = 'PMMA', FORMULA = 'C5H8O2', CO_YIELD = 0.337,
      SOOT_YIELD = 0.029, HEAT_OF_COMBUSTION = var /
&COMB SUPPRESSION = .TRUE. vs. .FALSE. /
```

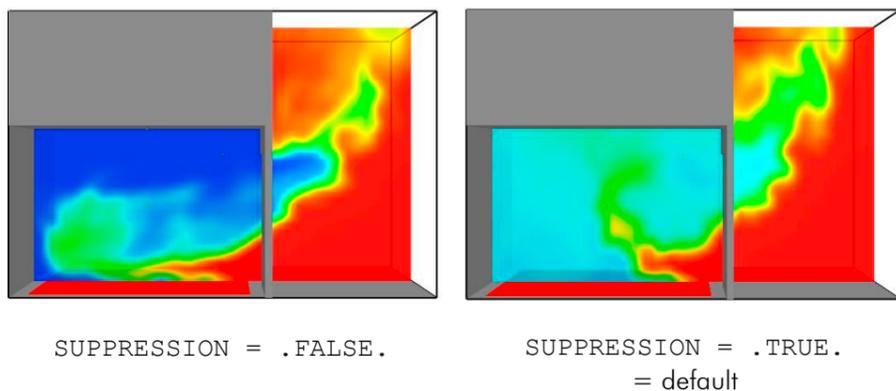


Verbrennungsmodellierung in FDS

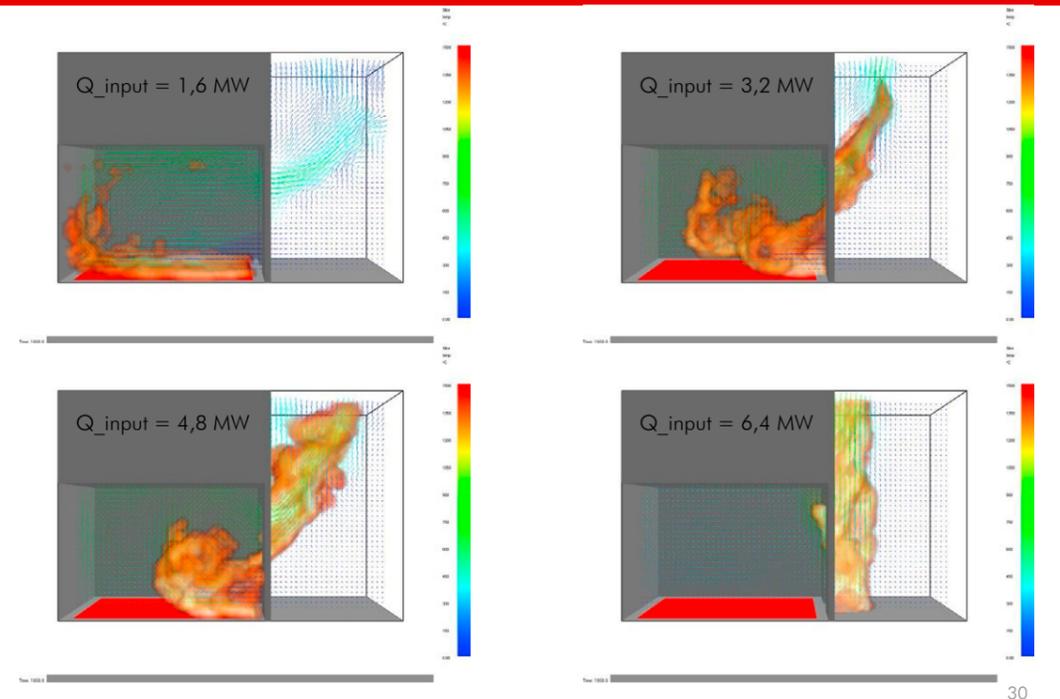


Gas phase combustion

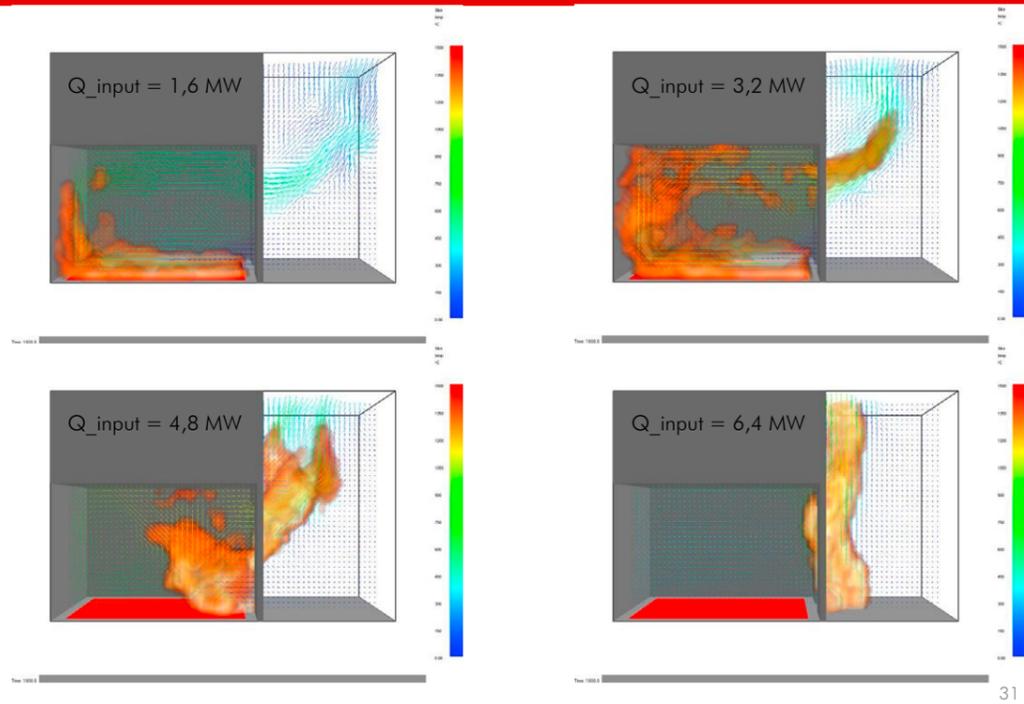
```
&REAC FUEL = 'PMMA', FORMULA = 'C5H8O2', CO_YIELD = 0.337,
      SOOT_YIELD = 0.029, HEAT_OF_COMBUSTION = var /
&COMB SUPPRESSION = .TRUE. vs. .FALSE. /
```



&COMB SUPPRESSION = .TRUE. / = default

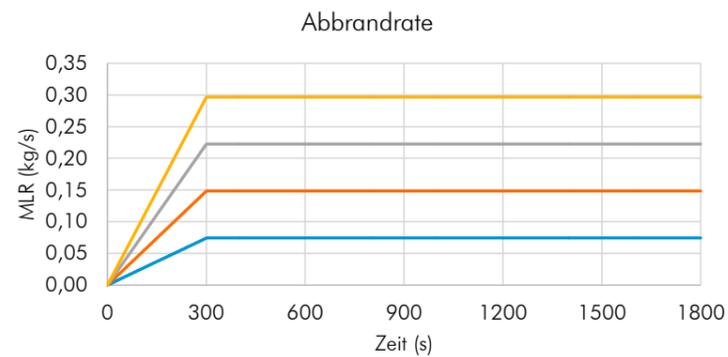


&COMB SUPPRESSION = .FALSE. / ≠ default



31

Ventilationssteuerung in FDS



— HRR = 1,6 MW — 3,2 MW — 4,8 MW — 6,4 MW

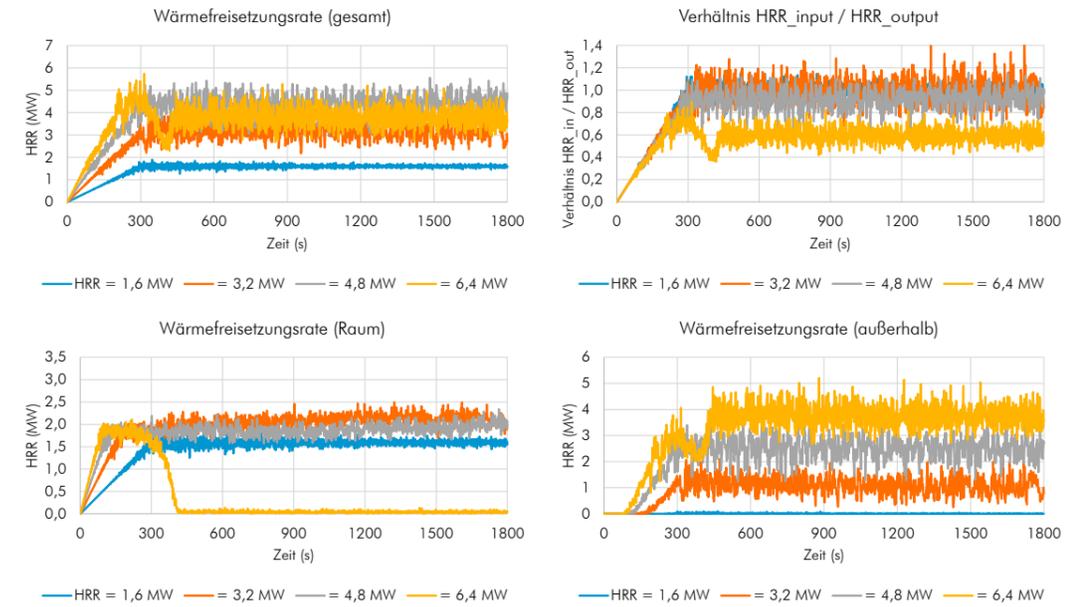
Case	HRRPUA	HRR	MLR
A	250	1.600 kW	0,074
B	500	3.200 kW	0,148
C	750	4.800 kW	0,222
D	1.000	6.400 kW	0,296

07.11.2019

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

32

&COMB SUPPRESSION = .TRUE. / = default

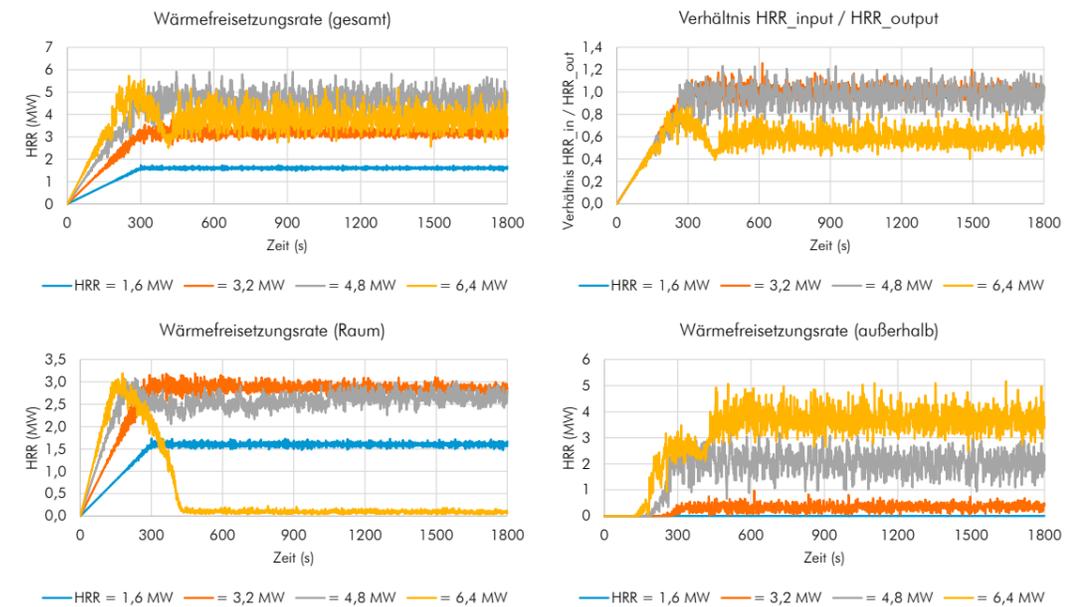


07.11.2019

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

33

&COMB SUPPRESSION = .FALSE. / ≠ default



07.11.2019

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

34

Ventilationssteuerung in FDS



Vergleich HRR (gesamt)

Case	HRRPUA	HRR_input	SUPPRESSION = .TRUE.	SUPPRESSION = .FALSE.
A	250	1.600 kW	1.600 kW	1.600 kW
B	500	3.200 kW	3.172 kW	3.200 kW
C	750	4.800 kW	4.385 kW	4.669 kW
D	1.000	6.400 kW	3.803 kW	3.804 kW

Vergleich HRR (Raum)

Case	HRRPUA	$= 1,57 \cdot \chi_{O_2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} (\chi_{O_2} = 0,8)$	SUPPRESSION = .TRUE.	SUPPRESSION = .FALSE.
A	250	1.600 kW	1.591 kW	1.600 kW
B	500	2.842 kW	2.109 kW	2.864 kW
C	750	2.842 kW	1.892 kW	2.616 kW
D	1.000	2.842 kW	40 kW	93 kW

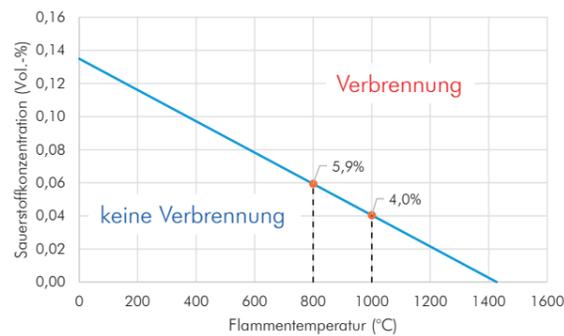
Ventilationssteuerung in FDS



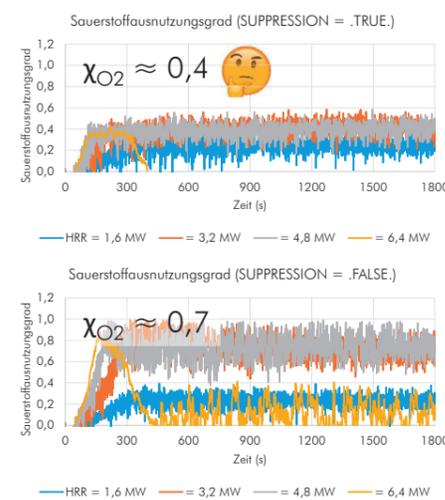
Herleitung eines Sauerstoffausnutzungsgrades χ_{O_2} :

LOWER_OXYGEN_LIMIT = 0.135

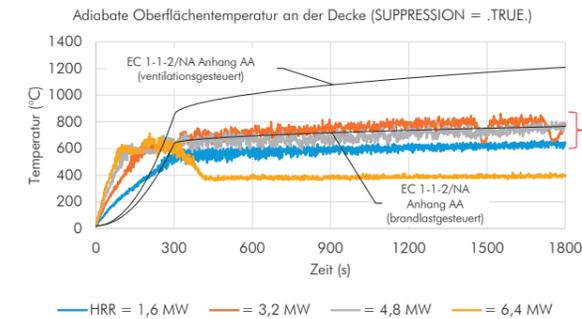
CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE = 1427



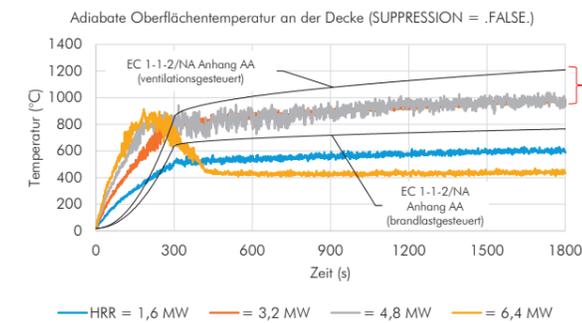
Bezogen auf eine initiale O₂-Konzentration von 21 %, ergibt sich ein O₂-Ausnutzungsgrad von $\chi_{O_2} = 0,7 - 0,8$.



Ventilationssteuerung in FDS



Im Vergleich zu den berechneten Temperaturen nach EC 1-1-2/NA sind die FDS-Temperaturen zu niedrig.

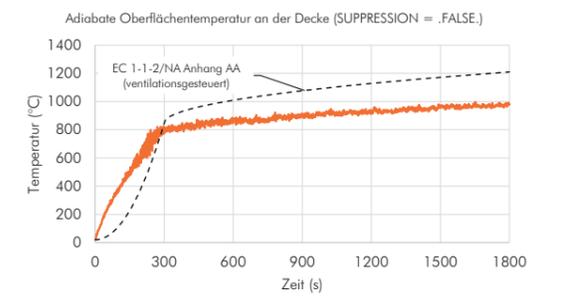
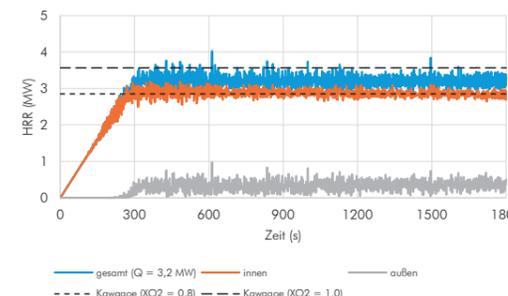


Die mit FDS berechneten Temperaturen sind mit denen des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2/NA Anhang AA vergleichbar.

Fazit



- Die Verwendung der Standard-Einstellung SUPPRESSION = .TRUE. führt zu nicht plausiblen Ergebnissen für den Fall des ventilationsgesteuerten Brandes.
- Bei der Verwendung der Einstellung SUPPRESSION = .FALSE. werden folgende Anwendungsempfehlungen gegeben:
 - Die in FDS vorzugebende Wärmefreisetzungsrate ist mit der Kawagoe-Gleichung und einem Sauerstoffausnutzungsgrad $\chi_{O_2} = 1,0$ vorzubemessen.
 - Damit wird die Wärmefreisetzungsrate etwa zu 80 % im Raum umgesetzt. Dies deckt sich mit normativen Vorgaben und Erkenntnissen aus Brandversuchen.
 - Die ermittelten Temperaturen erscheinen im Vergleich zu anderen Brandmodellen oder Brandversuchen ebenfalls plausibel.



Dr. Benjamin Schröder:

**NRWG in besonderen Einbausituationen:
Numerische Abschätzung von Strömungsbeiwerten**

Abstract:

In verschiedenen Sonderbauten sind ab bestimmten Raumgrößen regelmäßig Maßnahmen zur Rauchableitung erforderlich. Die aktuellen Muster-Vorschriften der ARGEBAU beinhalten hierfür mittlerweile vereinheitlichte Dimensionierungsvorgaben. Demnach können bei Räumen größer 1.000 m² natürliche Rauchabzugsanlagen vorgesehen werden, bei denen je 400 m² Raumfläche Rauchabzugsgeräte mit einer aerodynamisch wirksamen Fläche von 1,5 m² erforderlich sind.

Bei diesem Planungsansatz sind sog. Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte (NRWG) nach EN 12101-2 erforderlich. An NRWG werden in mehrfacher Hinsicht erhöhte Anforderungen gestellt (z. B. Funktionssicherheit, Schneelast, Umgebungstemperatur etc.). Ein zentraler Aspekt ist daneben aber die sog. aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche. Diese Fläche ist üblicherweise deutlich niedriger als die geometrische Öffnungsfläche der NRWG und berücksichtigt Strömungswiderstände z.B. aus typischen Einbausituationen oder Seitenwindeinflüssen. Das Verhältnis zwischen geometrischer und aerodynamisch wirksamer Öffnungsfläche wird über den sogenannten Strömungsbeiwert c_v beschrieben. Bei diesem Wert handelt es sich um ein produktspezifisches Leistungskriterium, welches über den Druckverlust in einem Prüfaufbau gemäß der Prüfnorm DIN EN 12101-2 ermittelt wird.

Im Planungsalltag steht der Einbau von natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsgeräten nicht selten im Widerspruch zu architektonischen Gestaltungsansprüchen. Aus diesem Grund sollen Rauch- und Wärmeabzugsgeräte regelmäßig durch Abhangkonstruktionen, Gitterroste oder Lamellensysteme verdeckt werden. Diese Ausführungen stehen in der Regel jedoch im Widerspruch zu den Randbedingungen der oben genannten Prüfnorm.

Der Beitrag zeigt eine einzelfallbezogene Betrachtung des Einflusses einer Lamellenkonstruktion auf die Strömungswiderstände an einem NRWG. Die erforderliche Berechnung der Druckverluste wurde mit FDS durchgeführt. Grundlage der Untersuchung bildet der Prüfaufbau für horizontal angeordnete NRWG entsprechend DIN EN 12101-2. Im Rahmen einer vergleichenden Analyse werden Einbausituationen ohne Lamellenverkleidung bzw. mit Lamellenverkleidung untersucht. Darauf aufbauend wird die prozentuale Abminderung des Strömungsbeiwertes c_v ermittelt. Der Beitrag umfasst darüber hinaus zusätzliche Betrachtungen zur Gittersensitivität.

**NRWG in besonderen Einbausituationen:
Numerische Abschätzung von Strömungsbeiwerten**

Benjamin Schröder | FDS Usergroup 2019

Agenda

- Regelwerke
- Anlass & Methodik
- Berechnungen
- Auswertung
- Fazit

görtzen
Ingenieure

Regelwerke.

görtzen
Ingenieure

Baurecht

- Wirksame Löscharbeiten müssen möglich sein (§ 14 MBO)
- Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht „Rettung von Personen“ und „wirksame Löscharbeiten“ aus 2008
 - Rauchfreihaltung von Rettungswegen
 - Rauchableitung zur Unterstützung wirksamer Löscharbeiten

görtzen
Ingenieure

Baurecht

Regel-Beispiel-Katalog der Muster-Vorschriften

- HRR \approx 2 MW als übliche Brandleistung eines in der Entstehungs- und Entwicklungsphase brandlastgesteuerten Brandes
- Natürliche Rauchableitung
 - Öffnungen zur Rauchableitung (bis 1.000 m²)
 - Rauchabzugsanlagen
- Maschinelle Rauchableitung
 - Lüftungsanlagen (Sprinklerung)
 - Rauchabzugsanlagen

görtzen
Ingenieure

Baurecht

Entsprechend MVStättVO müssen

- Versammlungsräume und sonstige Aufenthaltsräume mit jeweils mehr als 50 m² Grundfläche sowie
- Magazine, Lagerräume und Szenenflächen mit jeweils mehr als 200 m² Grundfläche,
- Bühnen und
- notwendige Treppenträume

zur Unterstützung der Brandbekämpfung entraucht werden können.

Baurecht

Begründung MVStättVO

- Für Versammlungsräume (...) mit mehr als jeweils 1.000 m² Grundfläche kann das Schutzziel durch natürlich wirkende Rauchabzugsanlagen erfüllt werden.
- Es sind Rauchabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2 zu verwenden.
- Definierte „Leistungsanforderungen“

MVV TB

Leistungsanforderungen eines NRWG nach DIN EN 12101-2	Mindestwert für den Einbau in das Dach
Funktionssicherheit; Klassifizierung der Funktionssicherheit	Re 50
Öffnung unter Umweltbedingungen; Öffnen mit Last	SL 500
Öffnung unter Umweltbedingungen; Niedrige Umgebungstemperatur	T (-05)
Funktionssicherheit; Windlast	WL 1500
Leistung unter Brandbedingungen; Wärmebeständigkeit	B 300
Brandverhalten von Baustoffen	E
Wirksamkeit der Rauch- und Wärmeableitung; Aerodynamische wirksame Öffnungsfläche	≥ 1,5 m ²



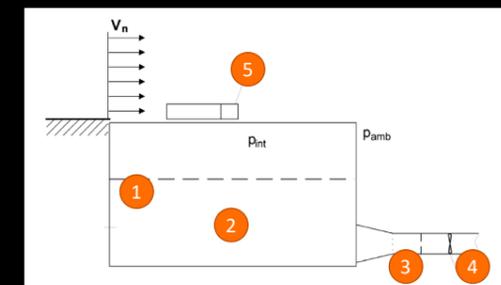
MVV TB

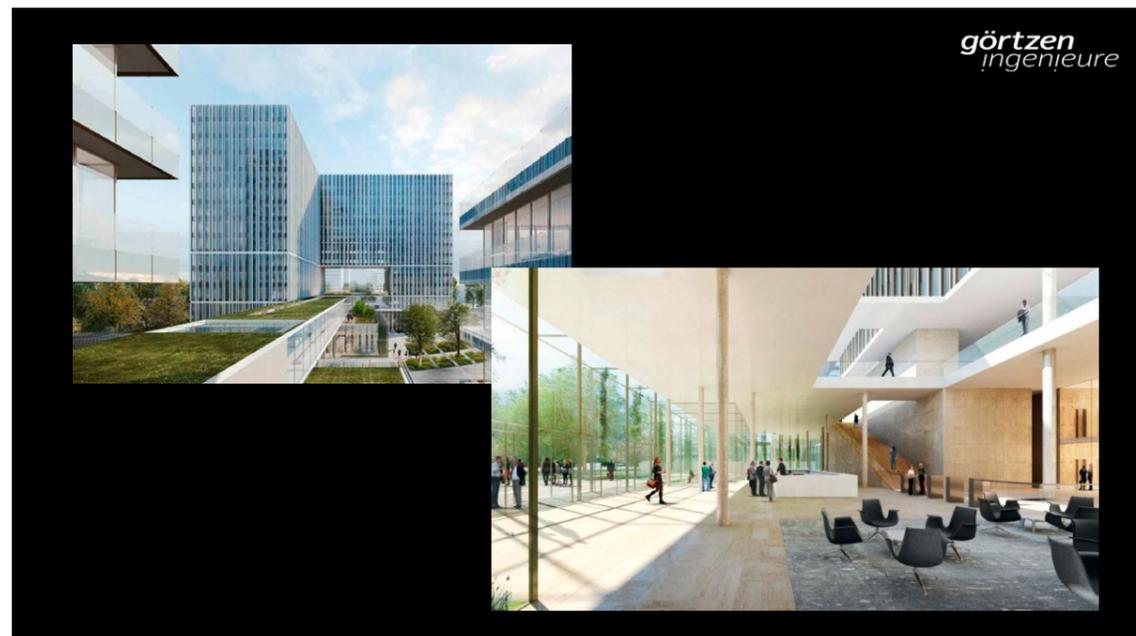
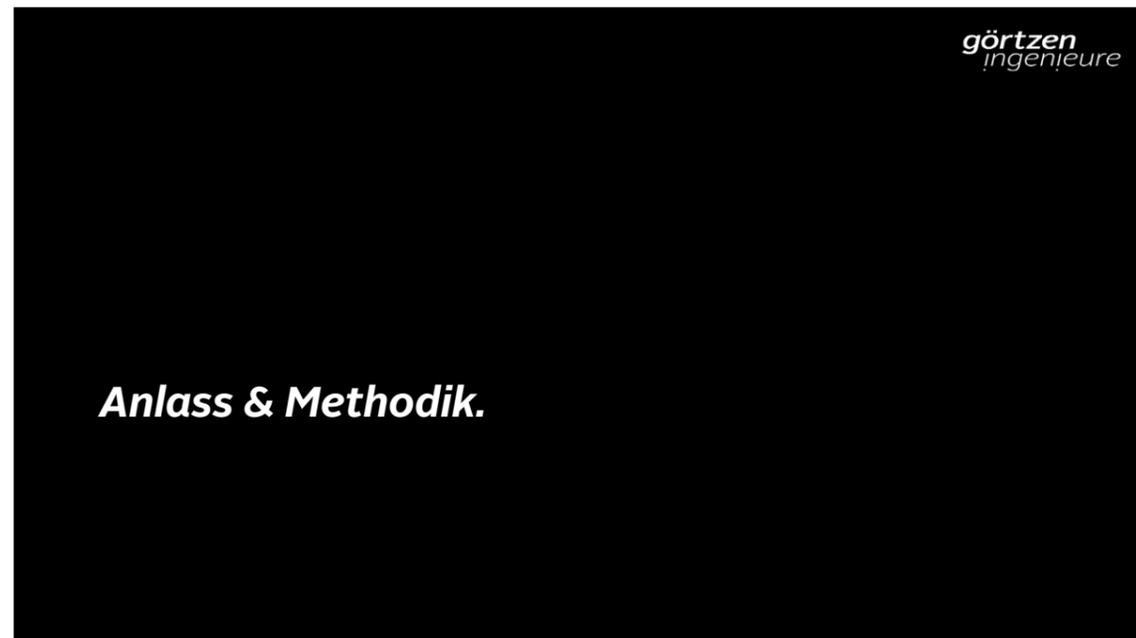
Leistungsanforderungen eines NRWG nach DIN EN 12101-2	Mindestwert für den Einbau in das Dach
Funktionssicherheit; Klassifizierung der Funktionssicherheit	Re 50
Öffnung unter Umweltbedingungen; Öffnen mit Last	SL 500
Öffnung unter Umweltbedingungen; Niedrige Umgebungstemperatur	T (-05)
Funktionssicherheit; Windlast	WL 1500
Leistung unter Brandbedingungen; Wärmebeständigkeit	B 300
Brandverhalten von Baustoffen	E
Wirksamkeit der Rauch- und Wärmeableitung; Aerodynamische wirksame Öffnungsfläche	≥ 1,5 m ²

Technische Regeln

Prüfaufbau DIN EN 12101-2

- Lochsieb 50 mm (1)
- Beruhigungskammer (2)
- Volumenstrommessung (3)
- Ventilator (4)
- NRWG (5)





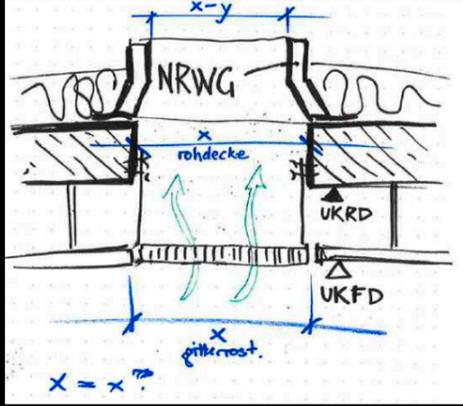
Anlass

- Foyer in mehrgeschossiger Versammlungsstätte
- Rauchableitung über 5 NRW mit jew. $A_w = 1,5 \text{ m}^2$
- Ziel: Gestalterisch ansprechender Einbau der NRWs

görtzen
Ingenieure

Anlass

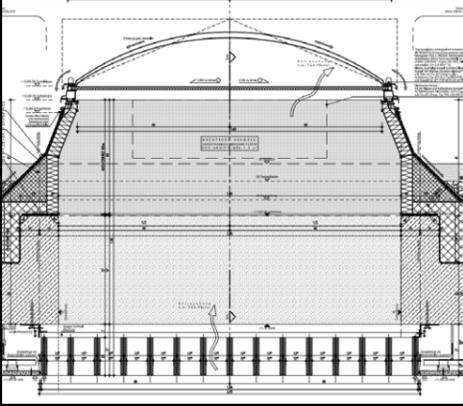
- 1. Variante
 - Gitterrost
 - Öffnungsanteil ca. 80-85%
 - Pressrostmasche 66 x 66 mm
 - Tragstab 60 mm hoch und 2 mm stark
- Lösungsvorschlag
 - Überdimensionierung GiRo-Fläche ca. $1,25 \times 1,50 = 1,875$ ($c_v \approx 0,53$)



görtzen
Ingenieure

Anlass

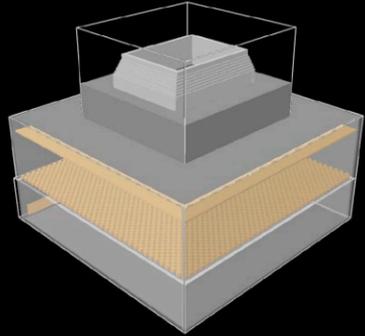
- 2. Variante
 - Lamellenkonstruktion
 - Höhe 200 mm
 - Breite 30 mm
- Lösungsvorschlag
 - Strömungsbeiwert c_v mittels Strömungssimulation abschätzen



görtzen
Ingenieure

Methodik

- Strömungssimulation in Anlehnung an die Prüfgrundsätze der DIN EN 12101-2 Anh. B (ohne Seitenwind)
- Referenzberechnung
- Vergleichende Betrachtung
 - NRWG ohne Lamellen
 - NRWG mit Lamellen
- Gitterstudie

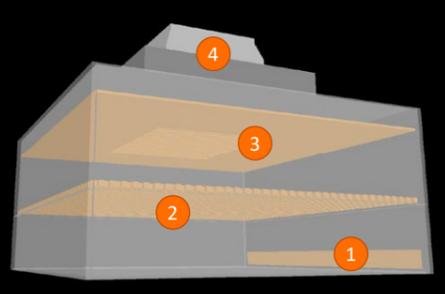


görtzen
Ingenieure

Berechnungen.

Strömungssimulation

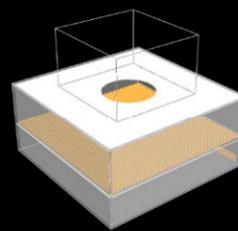
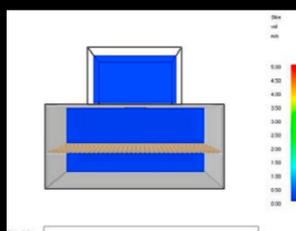
- FDS 6.7.1
- 3 MESHes
- MPI/OpenMP
- Zuluftsystem / &HVAC (1)
- Beruhigungskammer mit Lochblech / &OBST (2)
- Lamellen / &OBST (3)
- NRW mit Aufsatzkranz / &OBST (4)



görtzen
Ingenieure

Strömungssimulation

- Referenzberechnung
- Bestimmung Massenstrom durch Referenzöffnung
- Bestimmung Druckdifferenz
 - Beruhigungskammer
 - Umgebung

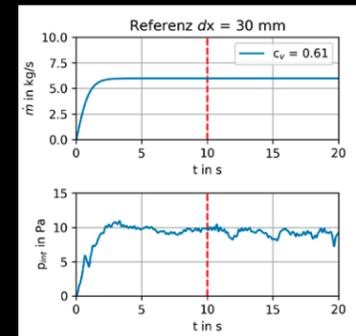



görtzen
Ingenieure

Strömungssimulation

$$C_v = \frac{\dot{m}_{ing}}{A_v \times \sqrt{2 \times \rho_{air} \times \Delta p_{int}}}$$

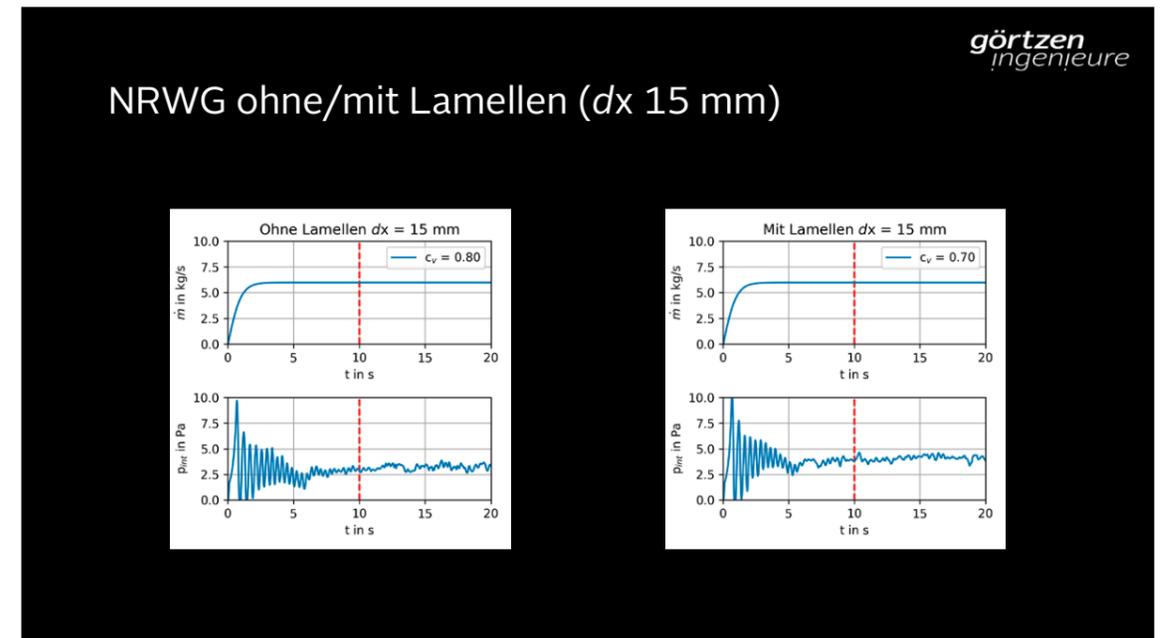
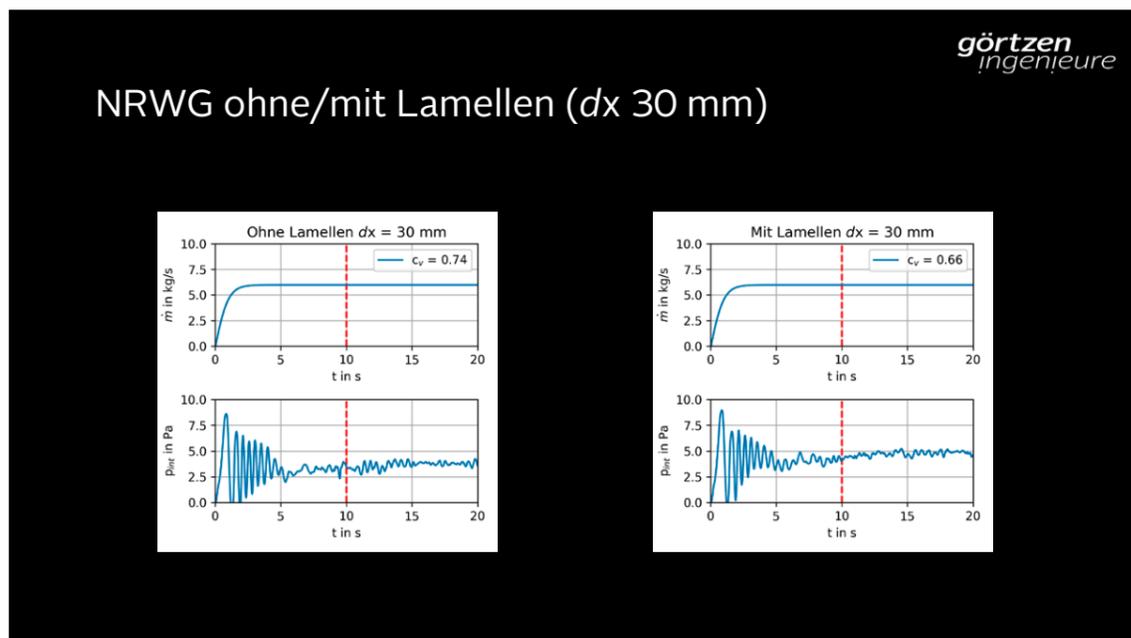
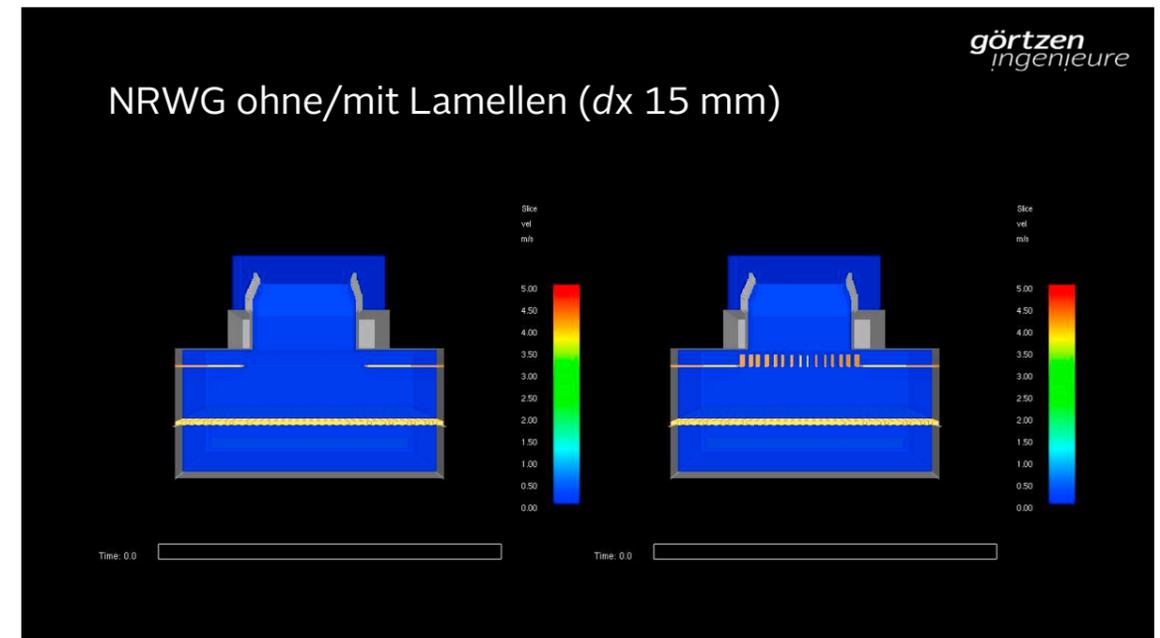
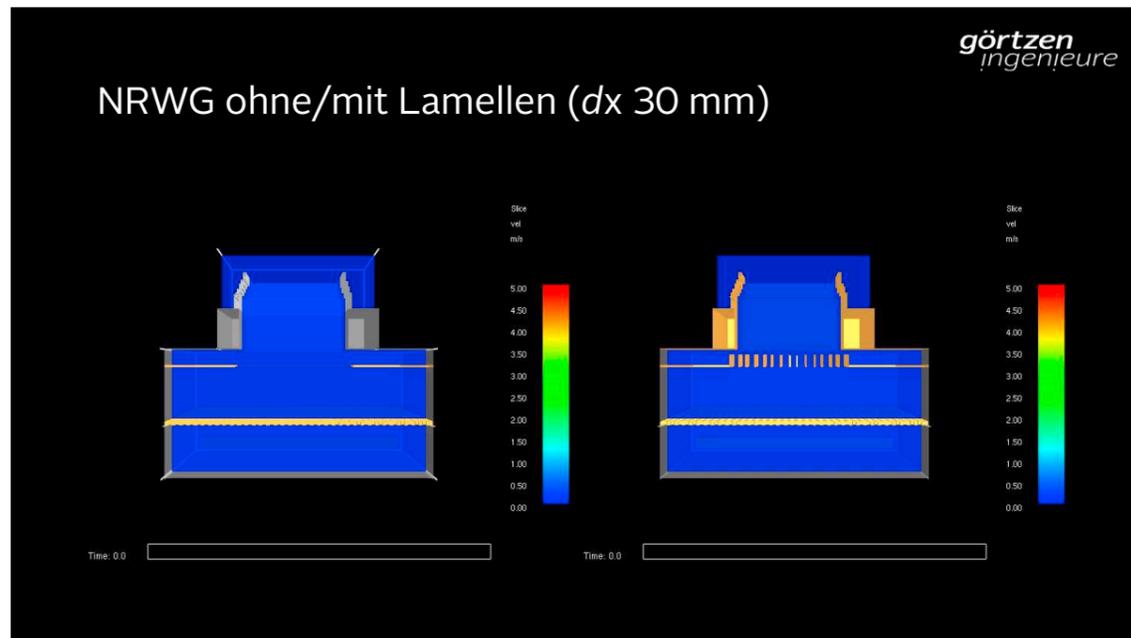
- Sollwert $c_{v0} = 0,62 \pm 0,01$
- bei 5, 10, 15 und 20 Pa



görtzen
Ingenieure

Auswertung.

görtzen
Ingenieure



Fazit.

*görtzen
ingenieure*

Fazit

- Normative Referenzprüfung ist mittels Strömungssimulation reproduzierbar
- Geringfügig niedrigere Druckdifferenzen bei $dx = 15 \text{ mm}$
- Abgeschätzte Abminderung Durchflussbeiwert $c_{v0} \approx 13\text{-}14 \%$
- Abgeschätzte Abminderung steigt mit größerer Gitterweite (auf der sicheren Seite)

*görtzen
ingenieure*

Fazit

- Überdimensionierung der aerodynamisch wirksamen Fläche um mind. 15 %
- $A_w = 1,5 \text{ m}^2 \times 1,15 = 1,725 \text{ m}^2$
- Geplante NRWGs: $A_w = 1,94 \text{ m}^2$

*görtzen
ingenieure*

Vielen Dank!

*görtzen
ingenieure*

Literatur

- (1) Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht: „Rettung von Personen“ und „wirksame Löscharbeiten“ - bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung. 17.12.2008
- (2) Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättVO) von Juli 2014
- (3) Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättVO) – Begründung der Änderungen - von Juli 2014
- (4) Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)
- (5) DIN EN 12101-2:2017-08 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte

Dr. Andreas Vischer:

Eine Analyse der Rauchfreihaltung bei offenen Gängen / „Laubengängen“

Abstract:

Offene Gänge (ugs. Laubengänge) sind einseitig offene Gänge die zur Erschließung von Nutzungseinheiten bzw. Wohnungen in Obergeschossen angeordnet werden. Im Brandfall dienen diese Gänge als Rettungswege und werden in den Bauordnungen als vor den Außenwänden liegende „notwendige Flure“ behandelt. In Brandschutznachweisen werden diese oft positiv bewertet, da ein Rauchabzug ins Freie möglich ist, aufgrund der Anordnung im Freien und der Kaltluftzumischung geringe Temperaturen im Plumbereich zu erwarten sind und der Rettungsweg durch Brüstungen im unteren Bereich geschützt wird, so dass eine Selbstrettung (ggf. in gebückter Haltung) unterstellt werden kann.

Die Analyse geht der Frage nach, wie sicher die offenen Gänge im Brandfall sind und wie sich das Sicherheitsniveau bzw. Gefährdungsrisiko durch bauliche Änderungen verändert.

Der Vortrag greift zunächst den unbestimmten Rechtsbegriff „offener Gang“ auf und geht der Frage nach, wann kann ein offener Gang als offen eingestuft werden?

Darauf aufbauend werden die grundsätzlichen bauordnungsrechtlichen Anforderungen an seitlich offene Gänge erläutert. Ausgehend von einem Anwendungsfall aus der Praxis, bei der ein offener Gang mittels numerischer Brand- und Rauchsimulationen mit FDS untersucht wurde, werden weitere systematische Analysen anhand eines gewählten „Standardmodells“ mit FDS durchgeführt. Als Variationen wurde der „Standardfall“, Brandszenario im Erdgeschoss, geschlossene Brüstung, Gangbreite 1,20m und ohne Dachdecke mit den entsprechenden Varianten, offene Brüstung, teilweise offene Brüstung, Gitterrostebene, Gangbreite 1,60m und mit Dachdecke sowie einem Brandszenario im 1. Obergeschoss verglichen. Dabei wird im Vortrag der Fokus auf die Auswertung der Rauchdichte sowie der Heißgastemperaturen gelegt und die Differenzen bei den unterschiedlichen Varianten anhand von Auswertungen auf festgelegten Slice-Files erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse und Schlussfolgerungen sowie die möglichen weiteren Untersuchungen dargestellt.

FDS|USERGROUP



Eine Analyse der Rauchfreihaltung bei offenen Gängen / „Laubengängen“

Dr.-Ing. Andreas Vischer
 Prüfsachverständiger für Brandschutz

Sachverständiger für Brandschutz und Ingenieurmethoden

Lehrbeauftragter Brandschutz und Ingenieurmethoden der
 Fachhochschule Münster, University of Applied Sciences

Inhalt

1. Begriff: Offene Gänge / Laubengänge
2. Gesetzliche Grundlagen
3. Ausgangsbeispiel
4. Untersuchungen aus Literatur
5. Weitere Berechnungen
6. Ergebnisse und Fazit

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de

2



Offenen Gänge / Laubengänge - Begriff

Beschreibung verschiedener Formen von Erschließungs- und Wandelgängen

- **Laubengang ursprünglich:** Ort im Freien durch belaubte Spalieren umgeben
- **Heute:** meist einseitig offener Gang zur Erschließung von Nutzungseinheiten (Wohnungen) in Obergeschossen
- z.T. geschützt durch Verglasungen
- dienen auch als Rettungswege
- meist positive Bewertung in Brandschutznachweisen
 - Rauchabzug ins Freie
 - geringe Temperaturen
 - Schutz durch Brüstungen




Von MrsMyerDE - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2653461>

Von E.mil.mil - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18917376>

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de

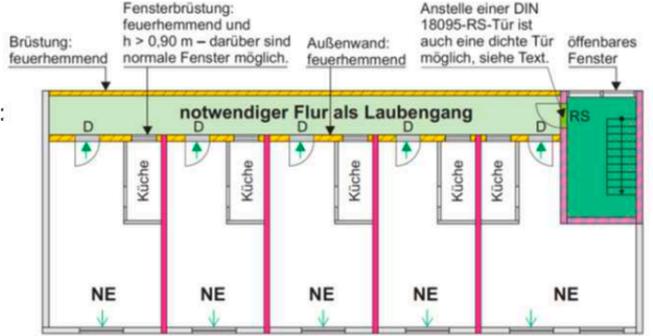
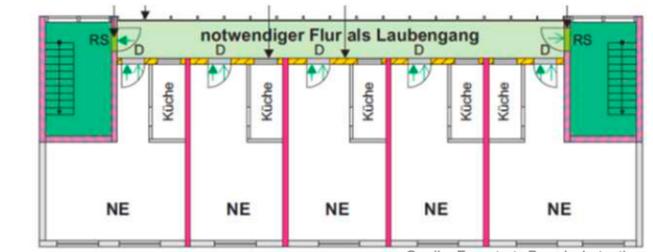
3



Gesetzliche Grundlagen

Unterscheidung:

- mit nur einer Fluchrichtung: Anforderung an Brüstungen und Wände
- mit zwei Fluchrichtungen: keine Anforderungen (Außenwände nach MBO)

Quelle: Feuertrutz Brandschutzatlas

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de

5



Gesetzliche Grundlagen

§36 MBO: Notwendige Flure, offene Gänge

„Definition“: notwendige Flure, Anordnung als offene Gänge vor den Außenwänden

- Wände und Brüstungen von Gängen **mit nur einer Fluchrichtung** wie notwendige Flure → feuerhemmend, Türen dichtschießend
- Fenster in diesen Außenwänden ab Brüstungshöhe $\geq 0,90$ m zulässig

§31 MBO: Decken

Gänge die als notwendige Flure dienen müssen, wie Decken, im Brandfall ausreichend lang standsicher und widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sein

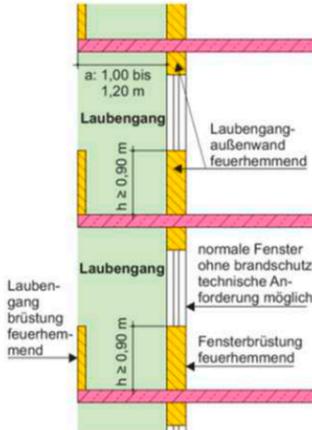
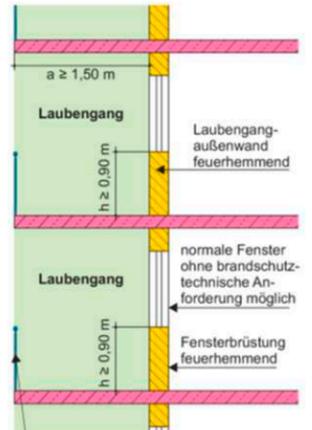
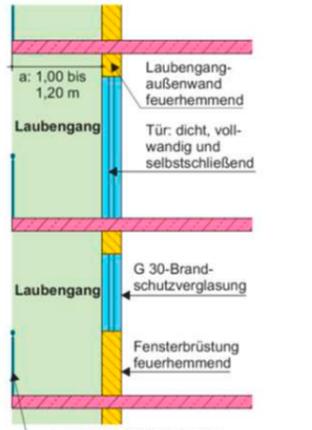
13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de

4



Gesetzliche Grundlagen

Vorschläge zur Kompensation offener Brüstungen / ohne Feuerwiderstandsdauer

Quelle: Feuertrutz Brandschutzatlas

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de

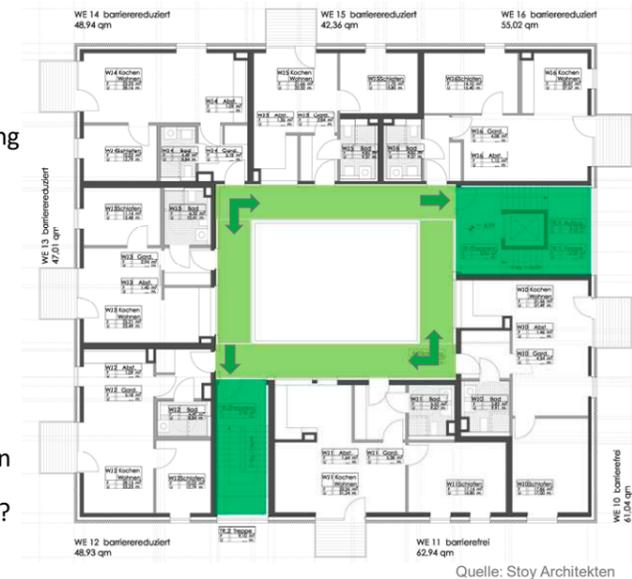
6

Wann ist ein offener Gang/Laubengang ein offener Gang?

- in MBO selbst keine genaue Definition
 - Bayr. Staatsministerium:
 - auf einer Längsseite offene Gänge, seitlich von Außenwänden und Brüstungen begrenzte Gänge
 - Bauprüfdienst Hamburg:
 - Öffnung oberhalb der Brüstung für Belichtung, Belüftung und Rauchabzug ausreichend,
 - Gesamtheit geschlossener Teile ≤ 30%
 - Einzelbreite geschlossener Elemente ≤ 2,0m
- i.d.R. keine Querlüftung möglich!
 → bei Verschluss der Öffnungen: **offener Gang wird zu notwendigem Flur**

Ausgangsbeispiel

- „offener“ Gang mit **zwei** Fluchrichtungen
 - Brüstung: geschl. Verglasung
 - zwei notw. Treppenträume
 - offener Gang offen?
 - Lüftung, Rauchabzug?
- Aufgabenstellung:**
- Innenhofbereich soll als Terrasse genutzt werden
 - Wetterschutzdach möglich?



Ausgangsbeispiel

Wohngebäude mit Tagespflegebereich im EG mit Innenhof

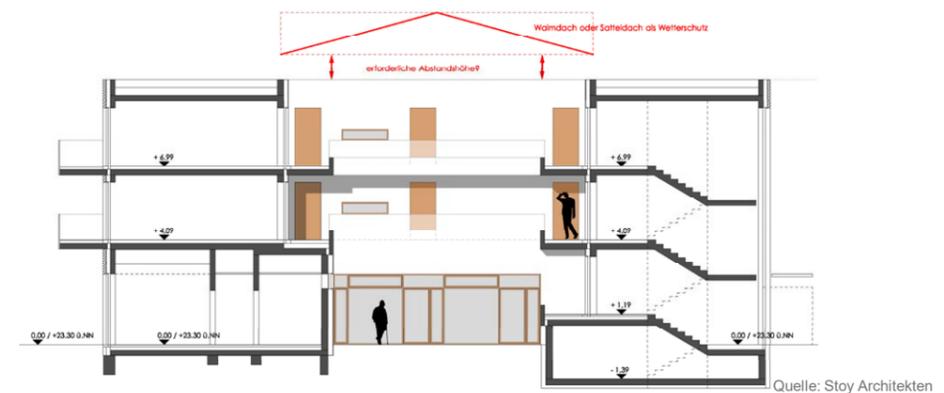


- Wohnungen im EG und in den OG's werden über offene Gänge erschlossen
- offene Gänge zum Innenhof
- Innenhof als offene Terrasse für Tagespflege

Ausgangsbeispiel

Fragestellung:

- Wie Ausbildung Wetterschutzdach?
- Welcher Abstand zur Bedachung/Attika erforderlich?



VISCHER
Ingenieure

Ausgangsbeispiel – Simulation mit FDS

Variantenberechnungen:

- Verschiedene Abstände
- mit NRW im Dach
- ohne Dach

Wetterschutzdach

2. OG
1. OG
EG

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 11

VISCHER
Ingenieure

Ausgangsbeispiel – Simulation mit FDS

Vergleich Wetterschutzdach ohne (links) und mit (rechts)

Extinktionskoeffizient Ebene Kopfhöhe über 1. OG (1.200 sec.)

Heißgastemperaturen Ebene Schnitt durch Brandquelle (1.200 sec.)

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 13

VISCHER
Ingenieure

Ausgangsbeispiel – Simulation mit FDS

Erste Ergebnisse:

- Vollständige Verrauchung des Innenhofes!
- Analyse: Zuströmung von „Kaltluft“ über Öffnung unter Wetterschutzdach

Lösung:

Anordnung von Zuluftschächten über Kellergeschoss / Erdreich

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 12

VISCHER
Ingenieure

Veröffentlichte Arbeiten / Untersuchungen

Master Thesis Martina Schwarz:
„Benutzbarkeit horizontaler außenliegender Rettungswege bei einer Brandbeaufschlagung“,
Betreuer: Thomas Kolb
Artikel: Feuertrutz Magazin, Ausgabe 03/2018

Ergebnisse:

- notwendiger Flur: vollständige Verrauchung bereits nach 180 sec.
- Brüstungen geschlossen oder offen: geringe Bedeutung

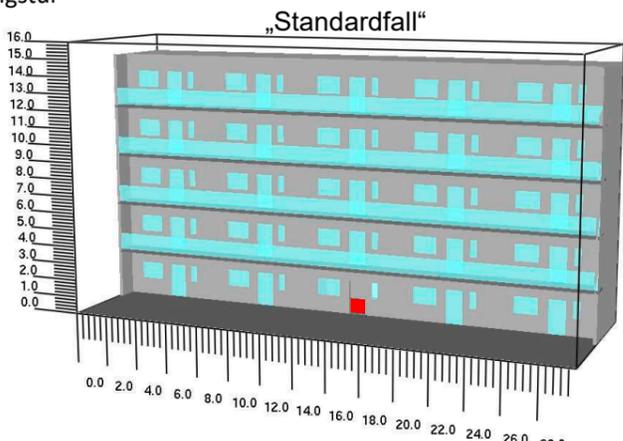
Quelle: Feuertrutz Magazin 03/2018, Martina Schwarz

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 14

VISCHER
Ingenieure

Untersuchungen mit FDS 6.7.1

- Modell 16,0m x 30,0m, Breite 10,0m
- 5 Geschosse, Geschosshöhe 3,0m, Breite Laubengang 1,2m, Länge 30m
- Brand im EG, offene Wohnungstür
- Variationen:
 - Brandszenario im 1. OG
 - geschlossene Brüstung
 - teilweise offene Brüstung
 - Offene Brüstung
 - Gitterroste
 - Breite Laubgänge 1,60m
 - Dachdecke geschlossen

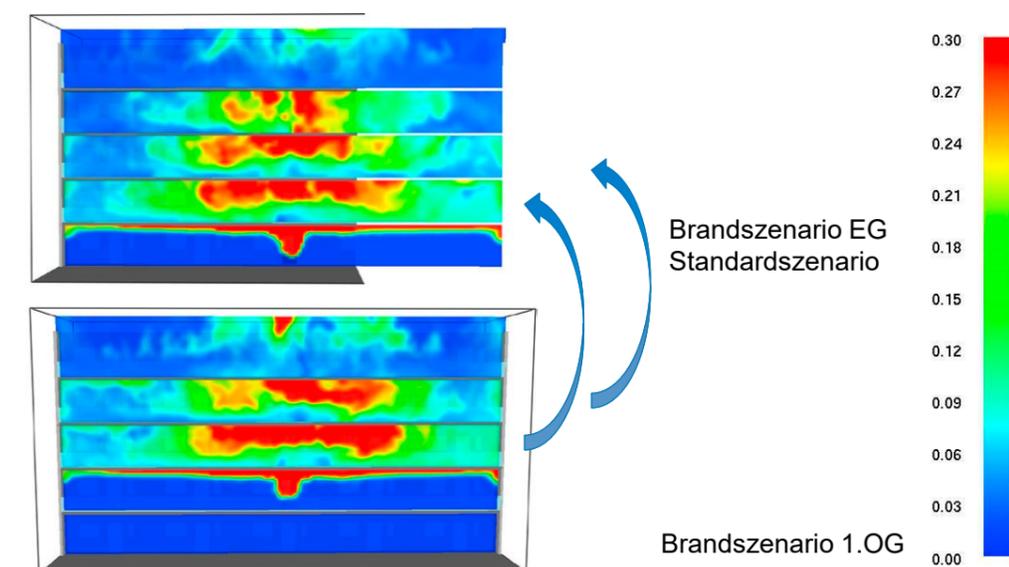


„Standardfall“

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 15

VISCHER
Ingenieure

Untersuchungen – Ergebnisse 300 sec. – Lage Brandszenario



Slice
OD_Co.9H0
1/m

0.30
0.27
0.24
0.21
0.18
0.15
0.12
0.09
0.06
0.03
0.00

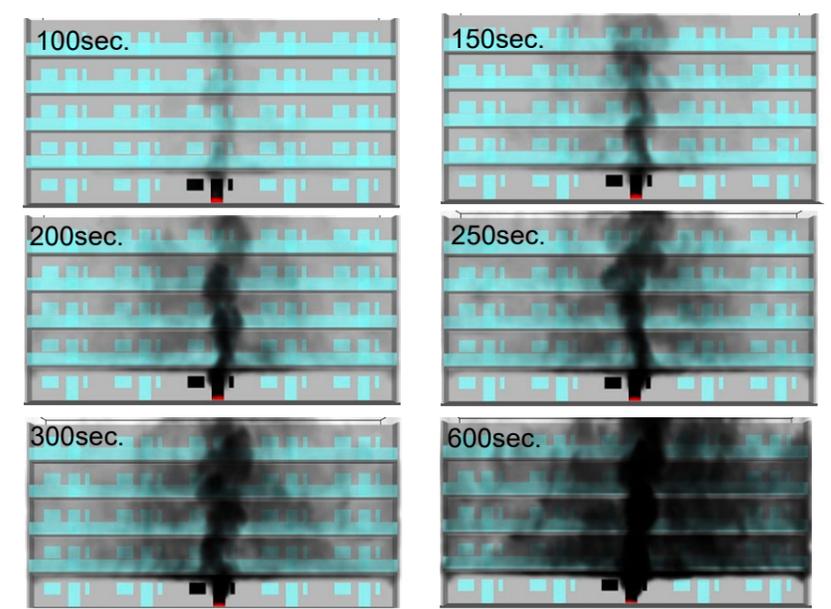
Brandszenario EG
Standardszenario

Brandszenario 1.OG

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 17

VISCHER
Ingenieure

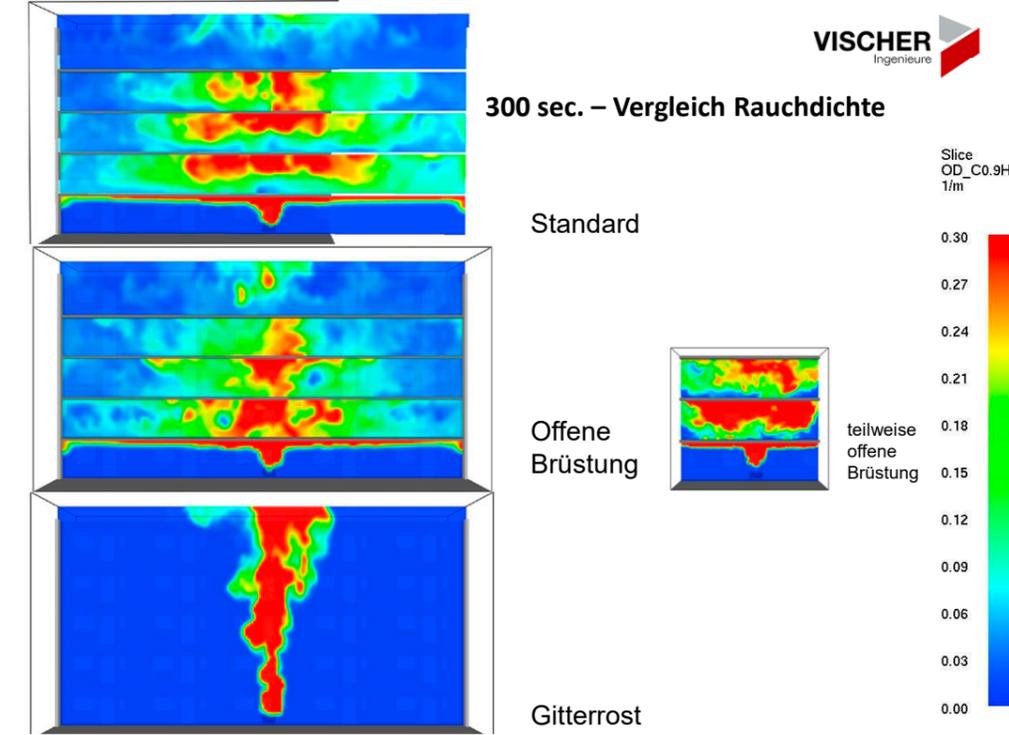
Untersuchungen – Ergebnisse – Standardszenario - Rauchausbreitung



13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 16

VISCHER
Ingenieure

300 sec. – Vergleich Rauchdichte



Slice
OD_Co.9H0
1/m

0.30
0.27
0.24
0.21
0.18
0.15
0.12
0.09
0.06
0.03
0.00

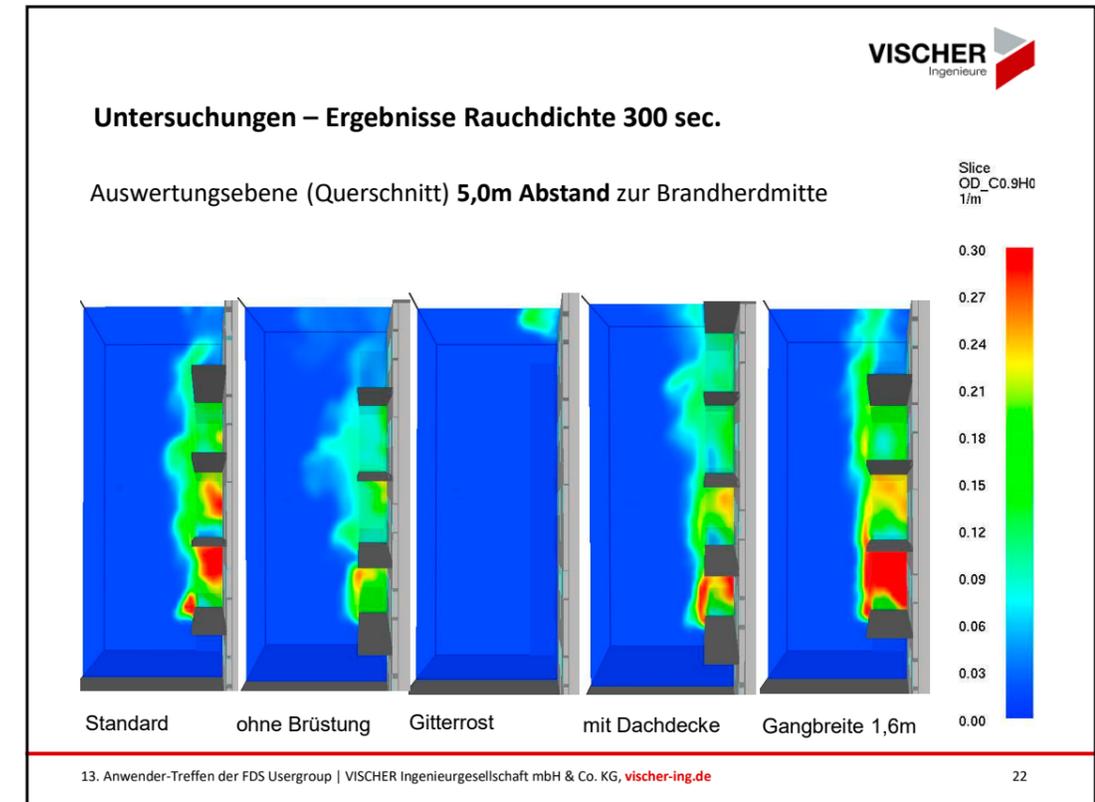
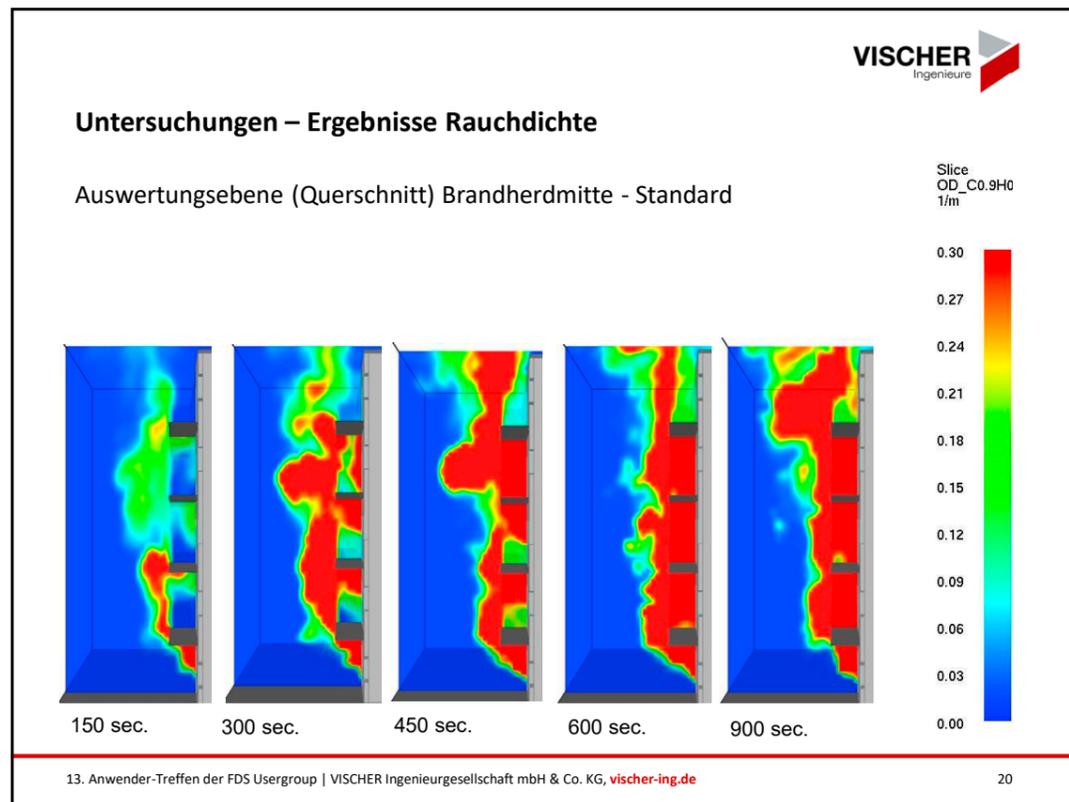
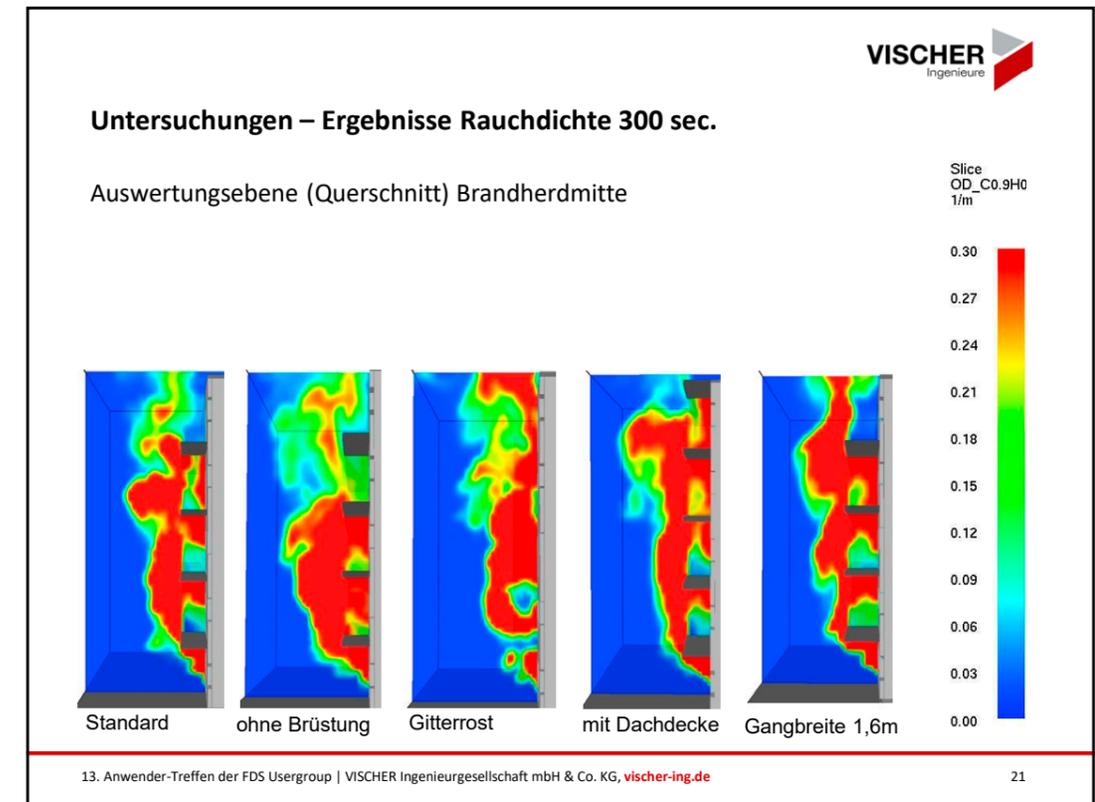
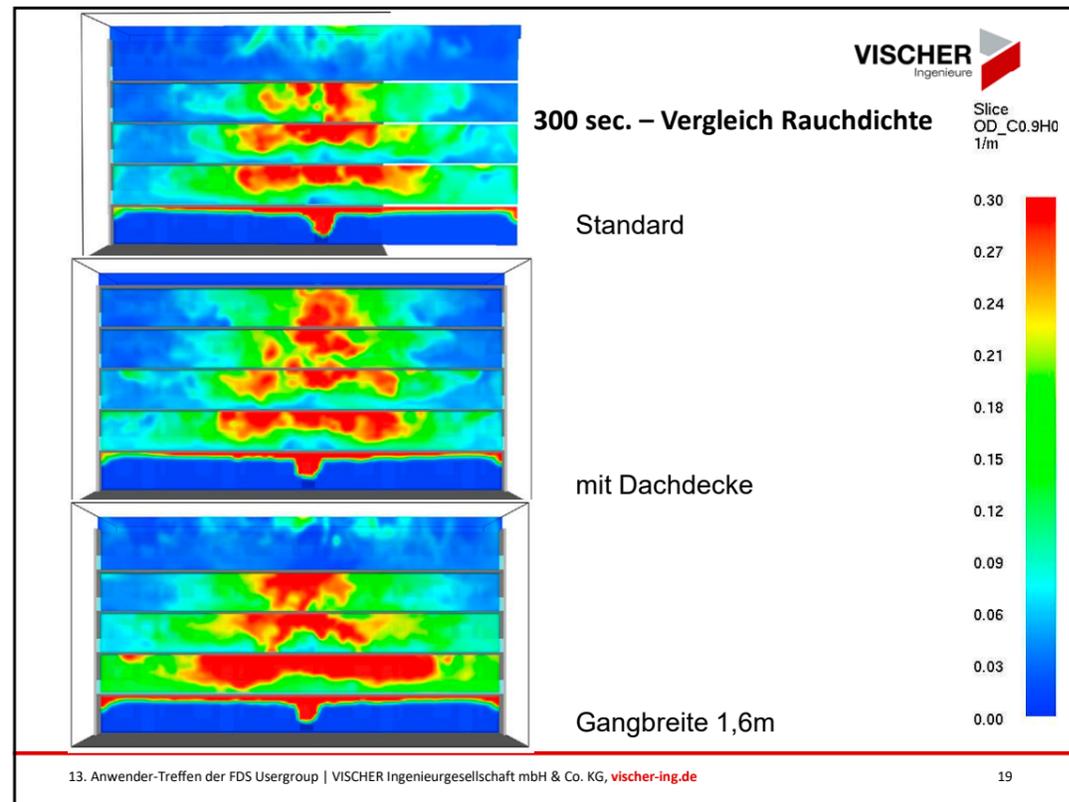
Standard

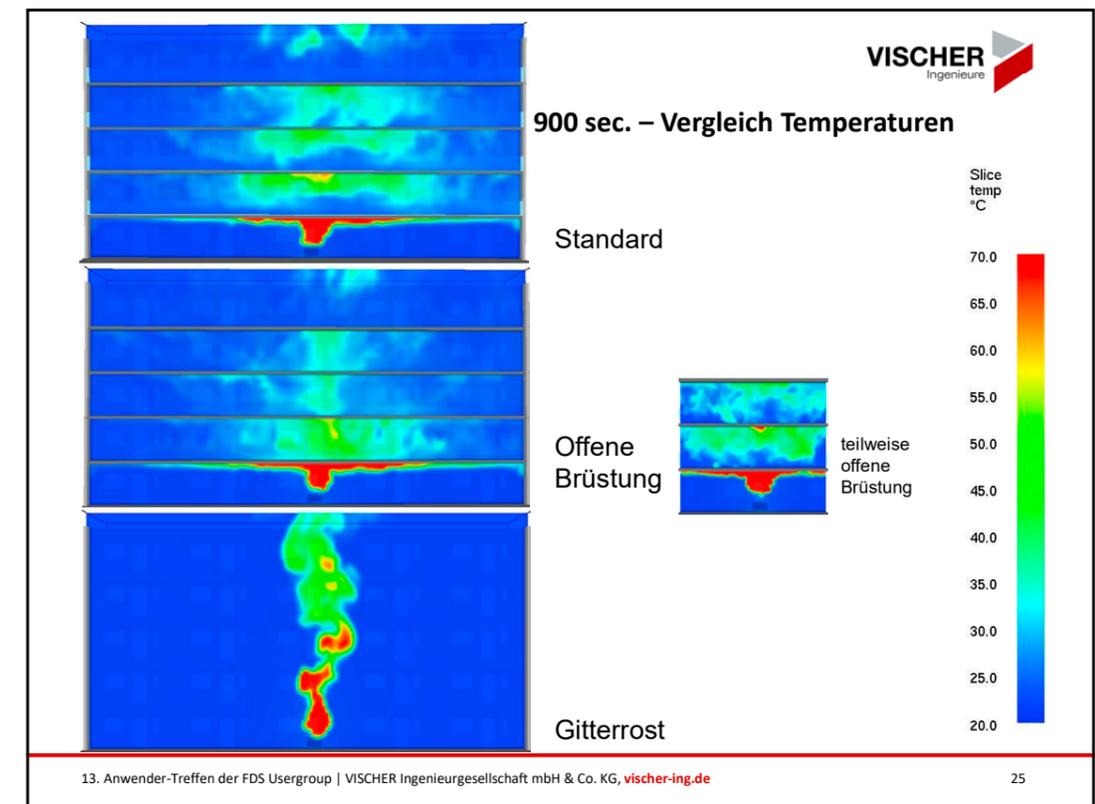
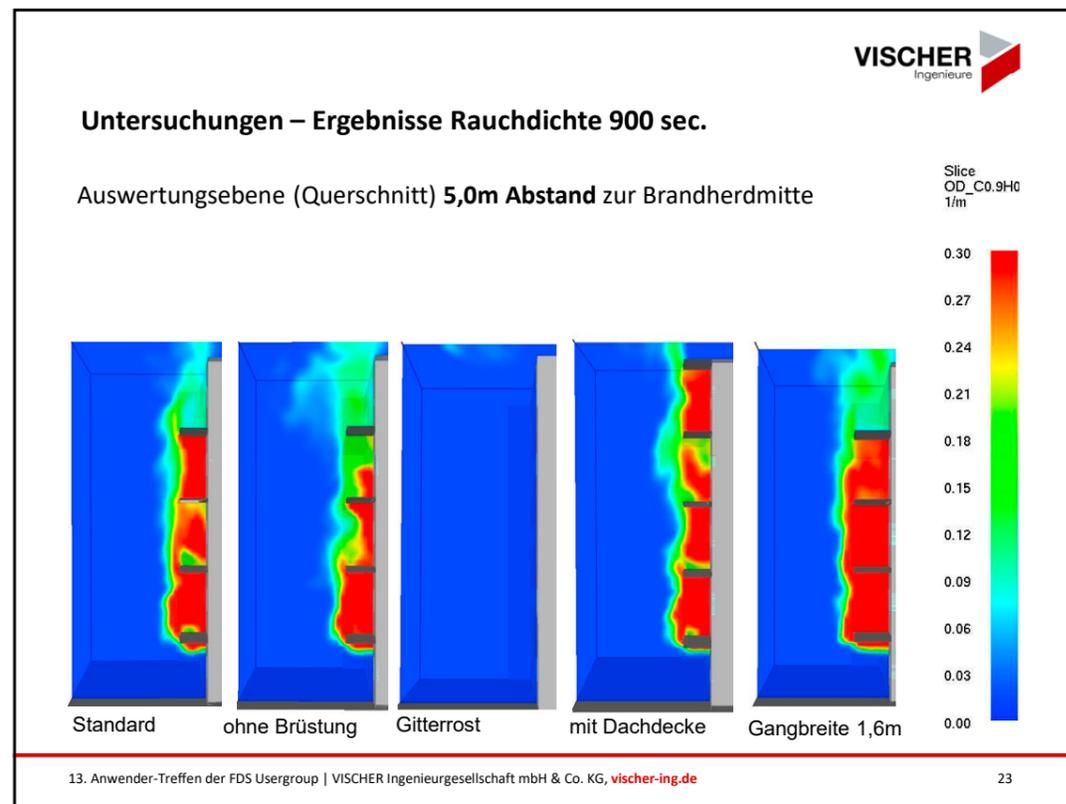
Offene
Brüstung

teilweise
offene
Brüstung

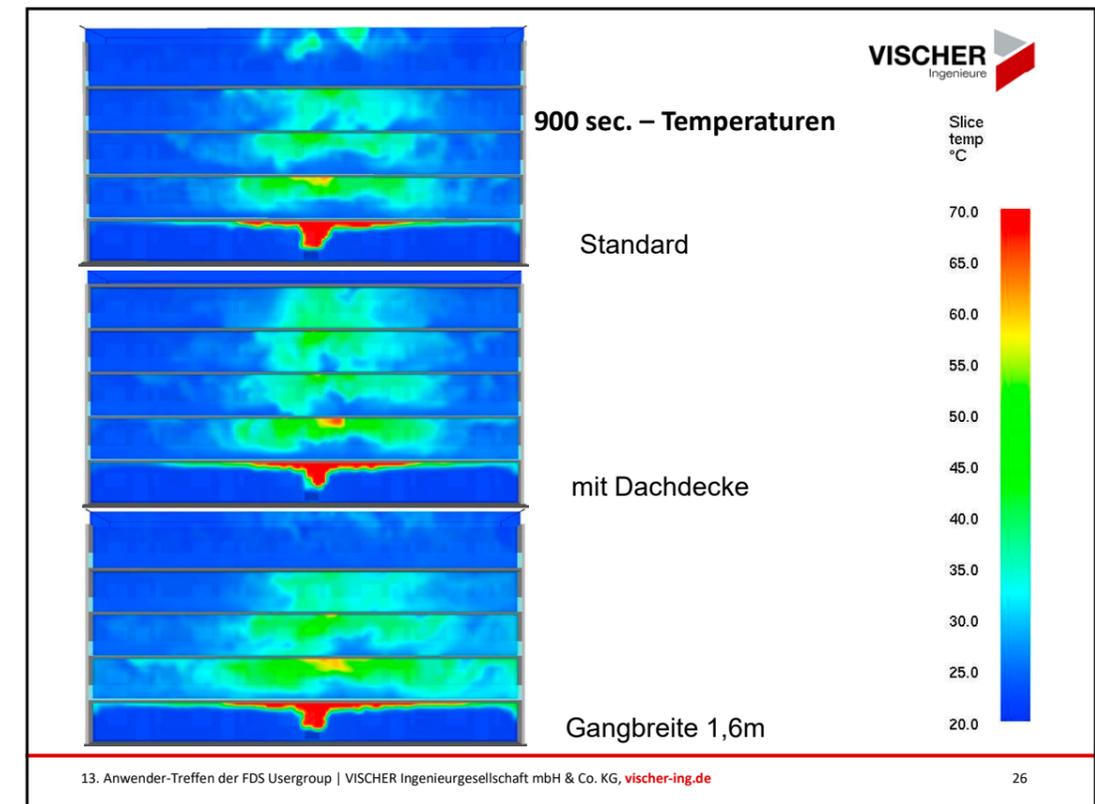
Gitterrost

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 18





- Bewertung**
- Vergleich mit notw. Flure: ähnliche Ergebnisse bzgl. OD im Bereich Öffnung
 - bei 900 Sekunden Rauchdichte im Bereich der Gänge ähnlich, Ausnahme Gitterrost
 - Ähnliche Ergebnisse bei geschlossener und offener Brüstung
 - bei geschlossener Brüstung geringere Rauchdichten unterhalb Brüstungen innerhalb der ersten 300 Sekunden
 - bei Gitterrost-Gängen hohe Rauchdichten und Temperaturen im Bereich der oberhalb Brandraumöffnung, jedoch weniger im seitlichen Abstand
 - Anordnung Dachdecke: Rauchbeaufschlagung auch des obersten Ganges
13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 24





Fazit

- Keine einheitliche (unklare) Definition von Laubengängen / offenen Gängen
- Abstände zu anderer Bebauung / geschlossene Bepflanzung?
- Überdachungen möglich? (Größe, Abstände?) → Entstehung eines (Teil-)Raumes
- Vergleich mit notw. Flure: ähnliche Ergebnisse bzgl. OD im Bereich Öffnung
- Keine signifikanten Unterschiede bei Vergrößerung der Gangbreite erkennbar
- Temperaturen im akzeptablen Bereich

Weitere Untersuchungen:

- Detailuntersuchungen stehen aus
- Simulationen mit geringerer Zellgröße
- Weitere Analyse und Auswertungen z.B. FED etc.

13. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, vischer-ing.de 27





Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Andreas Vischer
Prüfingenieur für Brandschutz
Sachverständiger für Brandschutz
und Ingenieurmethoden

Kontakt:
VISCHER Ingenieurgesellschaft
mbH & Co. KG
Baus Blick 5 |49835 Wietmarschen

vischer-ing.de
info@vischer-ing.de

M. Sc. Benjamin Schaufelberger, Dr. Hans-Fridtjof Pernau, Marco Böhler, Dr. Pascal Matura:

Analyse und Simulation des temperaturabhängigen Massenverlustes im Buchenholzscharbrand (Testfeuer TF2 nach DIN EN 54)

Abstract:

Aufgrund der deutlichen Rauchentwicklung wird für die Zulassung optischer Rauchmelder häufig der Buchenholzscharbrand (Testfeuer 2 nach DIN EN 54) verwendet. In diesem Brandszenario werden Buchenholzstücke durch eine Heizplatte erwärmt, wodurch es im Holzstück zur Pyrolyse kommt. Dabei werden Ruß und Brandgase freigesetzt.

Da im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes GAS-O-CHROM dieser Versuch auch für Untersuchungen zu Brandgasmeldern verwendet wird, wurden weiterreichende Studien zur Buchenholzbrandquelle durchgeführt: Es wurde ein numerisches Modell entwickelt, das auf einer Kopplung zwischen der Wärmeleitungsgleichung (zur Berechnung der lokalen Temperatur im Buchenholz) und einem geeigneten Arrhenius-Gesetz (zur Beschreibung der Pyrolyse) basiert. Zur Untersuchung des Pyrolysevorgangs und zur Ermittlung von Modellparametern wurden thermogravimetrische Analysen unter verschiedenen Gasumgebungen (Helium und synthetischer Luft) durchgeführt und die Parameter für die Arrheniusgleichungen unter Verwendung von PROPTI ermittelt. Zur ersten Einschätzung der bei der Pyrolyse freigesetzten Gase wurden auch Analysen mithilfe eines Massenspektrometers durchgeführt.

In unserem Beitrag stellen wir den Modellierungsansatz vor und diskutieren die erhaltenen Ergebnisse zum Abbrand unter anderem auch im Zusammenhang mit den Resultaten aus den thermogravimetrischen Analysen.

ANALYSE UND SIMULATION DES TEMPERATURABHÄNGIGEN MASSENVERLUSTES IM BUCHENHOLZSCHWELBRAND (TESTFEUER TF2 NACH DIN EN 54)

Benjamin Schaufelberger, Dr. Hans-Fridtjof Pernau, Marco Böhler, Dr. Pascal Matura



GEFÖRDERT VOM



Donnerstag, 07. November 2019

Seite 1
© Fraunhofer EMI

AGENDA

- Motivation
 - Buchenholzscharbrand nach DIN EN 54
 - Simulationen zur CO-Ausbreitung
- Analyse der Brandquelle
 - Thermogravimetrische Analyse
 - Massenspektrometerdaten
- Simulation der Brandquelle
- Fazit

Seite 2
© Fraunhofer EMI



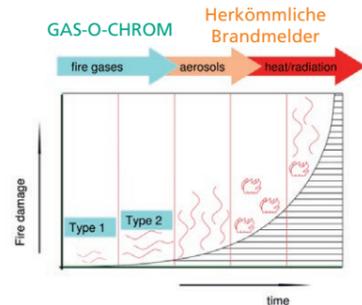
GAS-O-CHROM^[1]

Kurzvorstellung

- Problematik: Späte Alarmauslösung herkömmlicher Rauchwarnmelder aufgrund geringer Anzahl an Partikel in früher Brandphase
- Forschung an Brandgasmeldern basierend auf der Detektion von Kohlenstoffmonoxid (CO)



Herkömmlicher Brandmelder, Quelle: Siemens AG



Entstehung von Brandprodukten und Brandschäden, Lenkeit [2]

Programm
Forschung für die zivile Sicherheit
Bekanntmachung: „Zivile Sicherheit – Innovative Rettungs- und Sicherheitssysteme“

Gesamtzusendung
1,4 Mio. €

Projektlaufzeit
10/2016 – 10/2019

Projektpartner
Siemens AG, München
ams Sensors Germany GmbH, Jena
Thieme GmbH & Co. KG, Teningen
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM), Freiburg
Fraunhofer-Institut für Kurzzeiddynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI), Freiburg
HTCO GmbH, Freiburg

Assoziierte Partner:
Hekatron Vertriebs GmbH, Sulzburg
VdS Schadenverhütung GmbH, Köln
Feuerwehr Freiburg
Perthes-Heim, Bonn

Verbandkoordinator
Roland Pohle
Siemens AG
E-Mail: roland.pohle@siemens.com

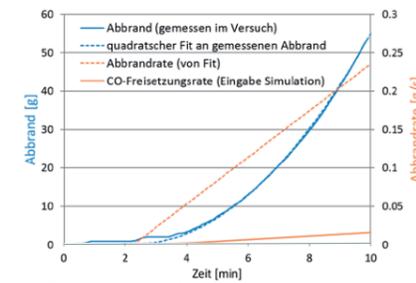
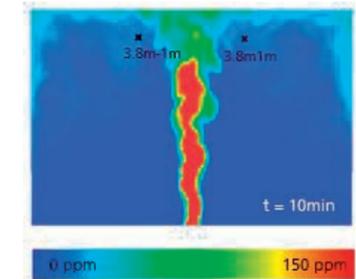
Quelle: [1]

[1] https://www.sifo.de/files/Projektumriss_GAS-O-CHROM.pdf
[2] Lenkeit, M.: Gassensoren für die Branddetektion, 4. Gassensor-Workshop Freiburg, 2011

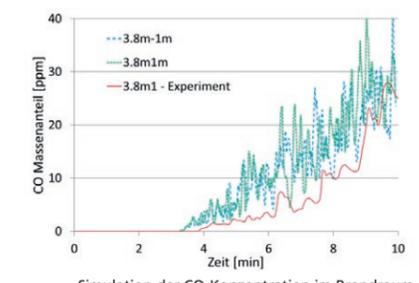
Simulationen zur Brandgasausbreitung

Validierung anhand des TF2

- Temperaturanstieg der Heizplatte als Randbedingung übernommen
- Abmessungen: 10 m lang, 6 m breit und 4 m hoch; Elementgröße: 5 cm
- CO-Freisetzung (proportional zur Abbrandrate), kalibriert anhand eines Sensorsignals, entspricht 7 % CO (Massenanteil), vgl. [4]



Definition der CO-Freisetzung anhand des Abbrandes



Simulation der CO-Konzentration im Brandraum

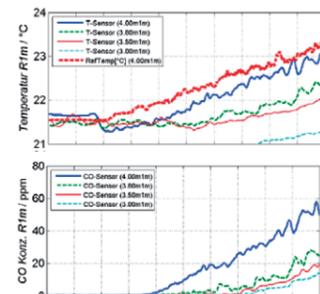
[4] Gomez, C.; Velo, E.; Barontini, F.; Cozzani, V.: Influence of Secondary Reactions on the Heat of Pyrolysis of Biomass, Ind. Eng. Chem. 48, 2009

Buchenholzscherbrand

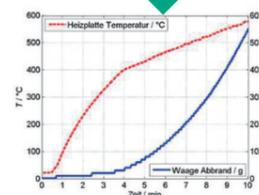
TF2 nach DIN EN 54



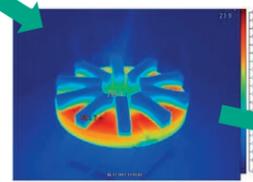
Buchenholzscherbrand im Brandlabor
Quelle: Hekatron Brandschutz



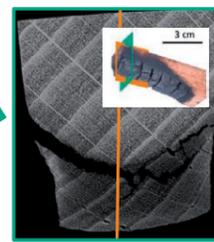
Temperatur und CO-Messungen an ausgewählten Stellen im Brandraum [3]



Heizplattentemperatur und gemessener Abbrand [3]



Infrarotbild der Brandquelle [3]



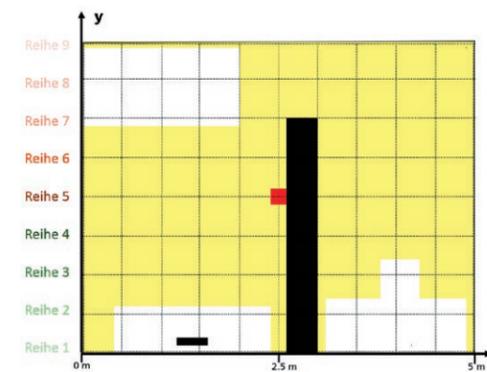
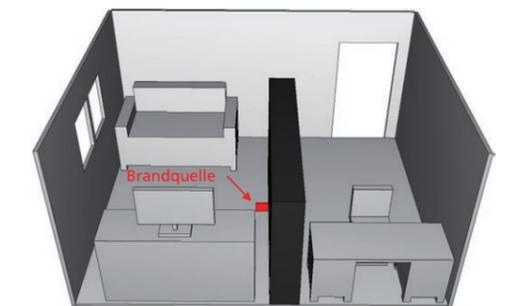
CT-Aufnahme Holzstück

[3] Gutmacher, D.; Hoefel, U.; Wöllenstein, J.: Detektion und Ausbreitung von Brandgasen; Lehrstuhl für Gassensoren Universität Freiburg

Simulationen zur Brandgasausbreitung

Ausgewähltes Szenarium

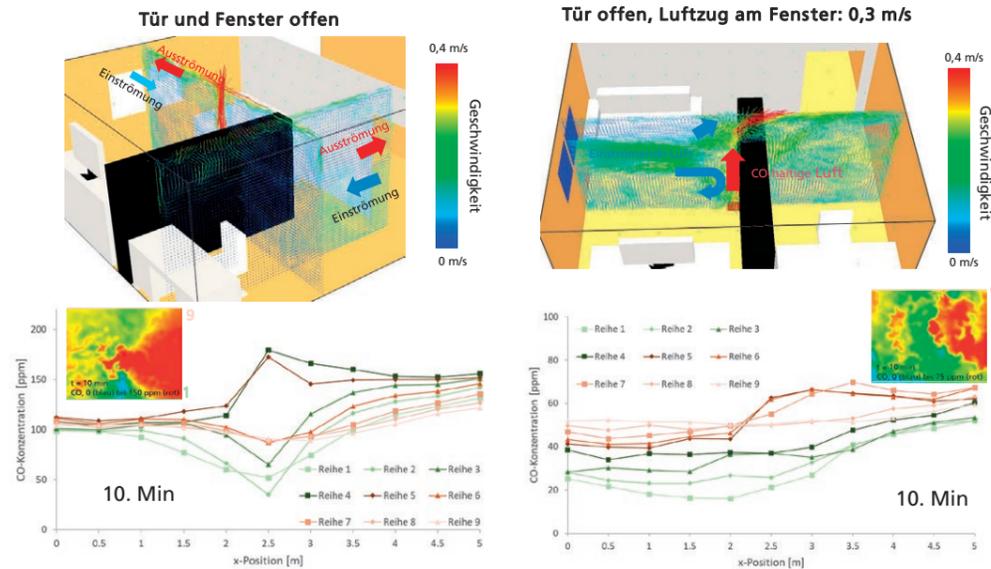
- Möblierter Raum, Abmessungen: 5 m lang, 4 m breit und 2,5 m hoch
- Kennzeichnend: 2 m hoher Raumteiler
- Zwei Fenster (jeweils 0,5 m²) und Tür (2 m²)
- Brandquelle entsprechend TF2



- Analyse der CO-Konzentration: Messpunkte im Abstand von 0,5 m (10 cm unterhalb der Decke)
- Mittelung über die Dauer einer Minute
- Darstellung der CO-Konzentration in Messreihen als Funktion der x-Position

Simulationen zur Brandgasausbreitung

Möbliertes Zimmer, Fenster und Tür geöffnet



Seite 7
© Fraunhofer EMI

Simulationen zur Brandgasausbreitung

Zusammenfassung

- Bei bekannter Brandquelle kann die Brandgaskonzentration im Brandraum durch FDS simuliert werden
 - Für die Simulation der Brandgasausbreitung notwendige Randbedingungen
 - Umgebungsbedingungen
 - Temperatur
 - Belüftung
 - Brandquelle
 - Temperaturverlauf der Heizplatte → Definition vor Versuchsbeginn
 - Abbrand → Versuchsdurchführung notwendig
- Im Folgenden: Analyse anhand des TF2

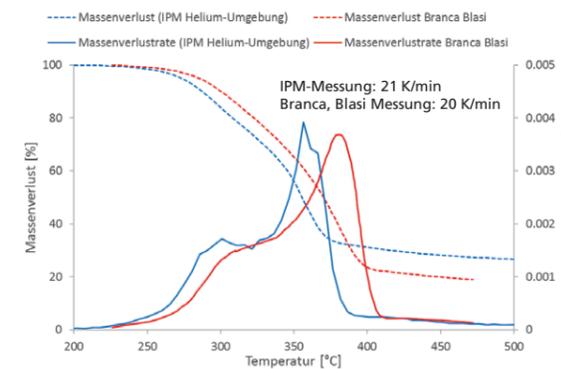
Im TF2 und bei Zimmerbränden: geringe (bzw. keine) Belüftung, Thermik durch die Brandquelle dominiert

Seite 8
© Fraunhofer EMI

Analyse der Brandquelle

TGA in Helium-Umgebung

- TGA-Messungen an Buchenholzproben (ca. 30 mg) durchgeführt am Fraunhofer IPM
- Ergebnisse vergleichbar mit Literaturwerten [5]
 - Pyrolyse findet etwas früher statt (ca. 20 °C)
 - Gesamtabbrand ca. 8 % geringer



[5] Branca, C.; Blasi, C.: A summative model for the pyrolysis reaction heats of beech wood, Thermochimica Acta 638 10-16, 2016

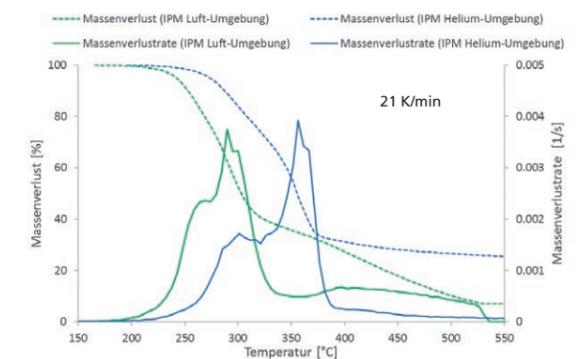
Seite 9
© Fraunhofer EMI



Analyse der Brandquelle

TGA in Luft-Umgebung

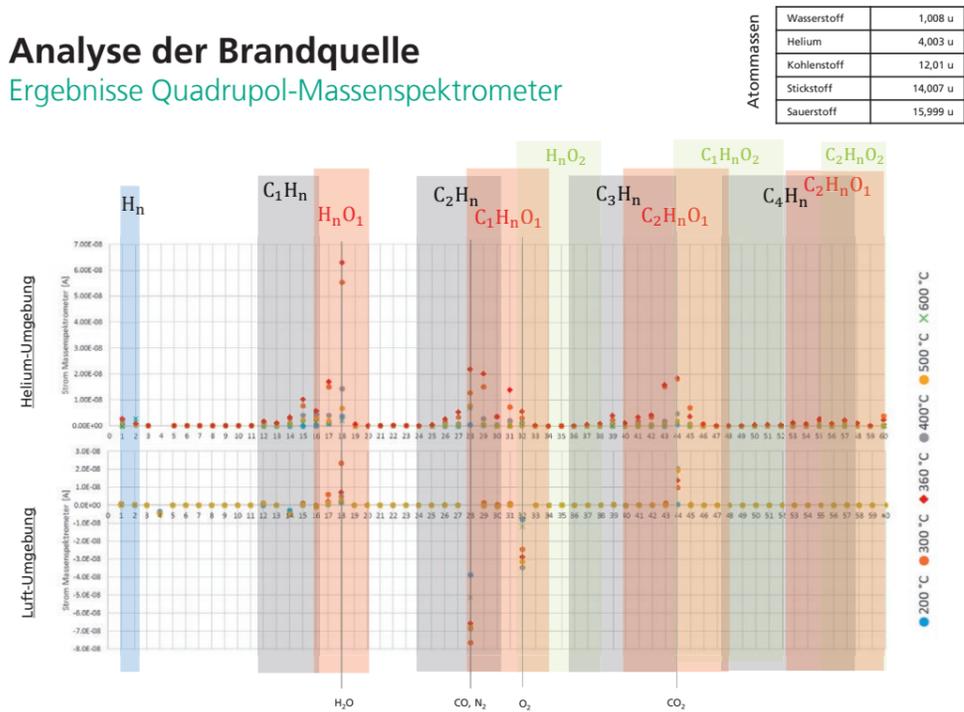
- Bisherige Versuche in der Literatur in inerter Umgebung, d.h. keine Reaktion mit Sauerstoff möglich
- Durchführung von TGA-Versuchen am Fraunhofer IPM in synthetischer Luft (80 % Stickstoff und 20 % Sauerstoff)
- TGA-Versuche in Luft
 - Abbrand bereits bei geringeren Temperaturen (max. Abbrandrate 60 °C früher)
 - Höherer Gesamt-massenverlust (93 % im Vergleich zu 75 %)



Seite 10
© Fraunhofer EMI

Analyse der Brandquelle

Ergebnisse Quadrupol-Massenspektrometer



Seite 11
© Fraunhofer EMI

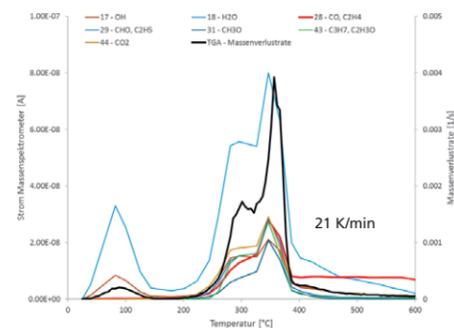
Analyse der Brandquelle

Ergebnisse Quadrupol-Massenspektrometer

Aufgrund der gleichen Molekülmasse von Stickstoff (N₂) und Kohlenstoffmonoxid (CO) kann bei Luft-Umgebung mit der Massenspektrometrie keine Aussage zur CO-Entstehung getroffen werden

Vergleich des zeitlichen Verlaufes der Massenspektrometerdaten (Helium-Umgebung) mit der Massenverlustrate zeigt

- Wasser (H₂O) und OH entstehen bereits in einer frühen Phase (um 100 °C)
- Die meisten Brandgase entstehen näherungsweise proportional zur Massenverlustrate



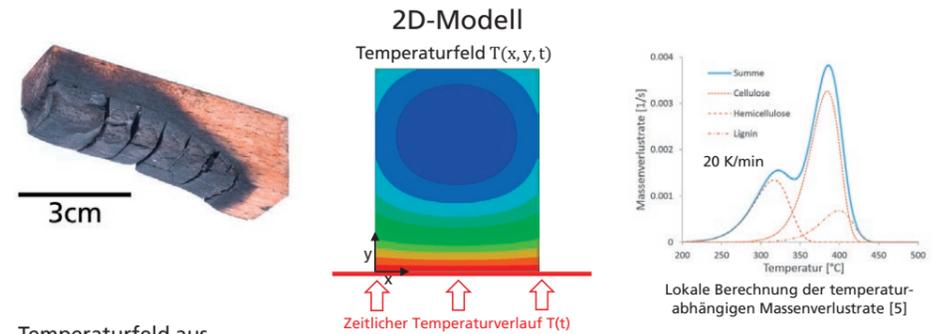
Durch Massenspektrometrie ermittelter zeitlicher Verlauf der Brandgasentstehung in den TGA-Versuchen (Helium-Umgebung)

Seite 12
© Fraunhofer EMI

Modellierung der Brandquelle

Simulationsmodell

- Buchenholzschnitzschmelbrand: Modellierung basierend auf Arrheniuskinetik



Temperaturfeld aus Lösung der homogenen Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_v} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) T(x,y,t)$$

- Parameter:
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,1 \text{ W/(mK)}$
 - Wärmekapazität $c_v = 1700 \text{ J/(kgK)}$
 - Dichte $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$
 - Wärmeübertragungskoeffizient $h = 5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 - Diskretisierung: $\Delta x = 1 \text{ mm}, \Delta y = 0,5 \text{ mm}$

[5] Branca, C.; Blasi, C.: A summative model for the pyrolysis reaction heats of beech wood, Thermochimica Acta 638 10-16, 2016

Seite 13
© Fraunhofer EMI

Modellierung der Brandquelle

Arrhenius-Modelle zur Beschreibung des Massenverlustes

- Arrhenius-Gleichungen zur Beschreibung der temperaturabhängigen Reaktionsrate

$$\frac{dY_m}{dt} = -A_m Y_m e^{-\frac{E_m}{RT(t)}}$$

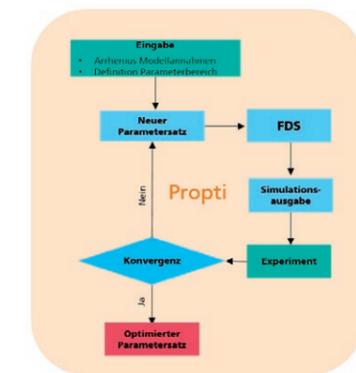
A: Materialspez. Vorfaktor [-]
R: Gaskonstante [J/(kg K)]
E: Aktivierungsenergie [J/kg]

- Parameteridentifikation mit PROPTI [6]
 - 4-Schritt-Modell für Helium-Umgebung: 12 freie Parameter
 - 5-Schritt-Modell für Luft-Umgebung: 15 freie Parameter

```

4SURF ID = 'TGA-Surface'
TGA_ANALYSIS = '.TRUE.'
TGA_HEATING_RATE = 20.6
COLOR = 'RED'
BACKING = 'INSULATED'
THICKNESS = 0.01
HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT = 10.
MATERIAL ID (1,1) = 'comp-1'
MATERIAL ID (1,2) = 'comp-2'
MATERIAL ID (1,3) = 'comp-3'
MATERIAL ID (1,4) = 'comp-4'
MATERIAL ID (1,5) = 'comp-5'
MATERIAL MASS FRACTION (1,1) = #v1#
MATERIAL MASS FRACTION (1,2) = #v2#
MATERIAL MASS FRACTION (1,3) = #v3#
MATERIAL MASS FRACTION (1,4) = #v4#
MATERIAL MASS FRACTION (1,5) = #v5#

4MATERIAL ID = 'comp-1'
SPECIFIC_HEAT = 1.7
CONDUCTIVITY = 0.1
DENSITY = 700
N_REACTIONS = 1
E-HEAT#
A-HEAT#
HEATING_RATE = 20.6
HEAT_OF_REACTION = 401
NU_SPEC = 1.0
SPEC_ID = 'CARBON MONOXID'
    
```

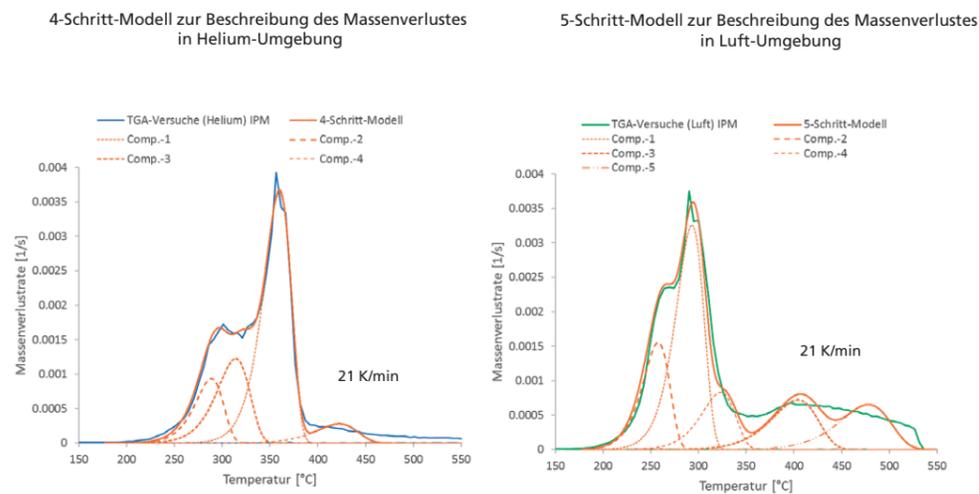


[6] Arnold, L.; Lauer, P.; Hehnen, T.; Trettin, C.: PROPTI – A Generalized Inverse Modelling Framework, European Symposium on Fire Safety Science, Nancy (France) 2018.

Seite 14
© Fraunhofer EMI

Modellierung der Brandquelle

Arrhenius-Modelle zur Beschreibung des Massenverlustes

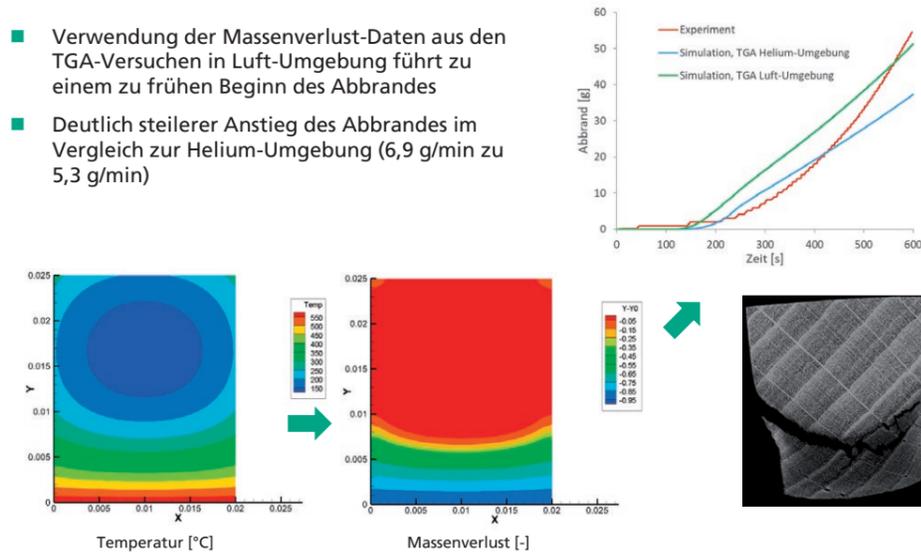


Seite 15
© Fraunhofer EMI

Modellierung der Brandquelle

Simulation des Massenverlustes, TGA Luft-Umgebung

- Verwendung der Massenverlust-Daten aus den TGA-Versuchen in Luft-Umgebung führt zu einem zu frühen Beginn des Abbrandes
- Deutlich steilerer Anstieg des Abbrandes im Vergleich zur Helium-Umgebung (6,9 g/min zu 5,3 g/min)

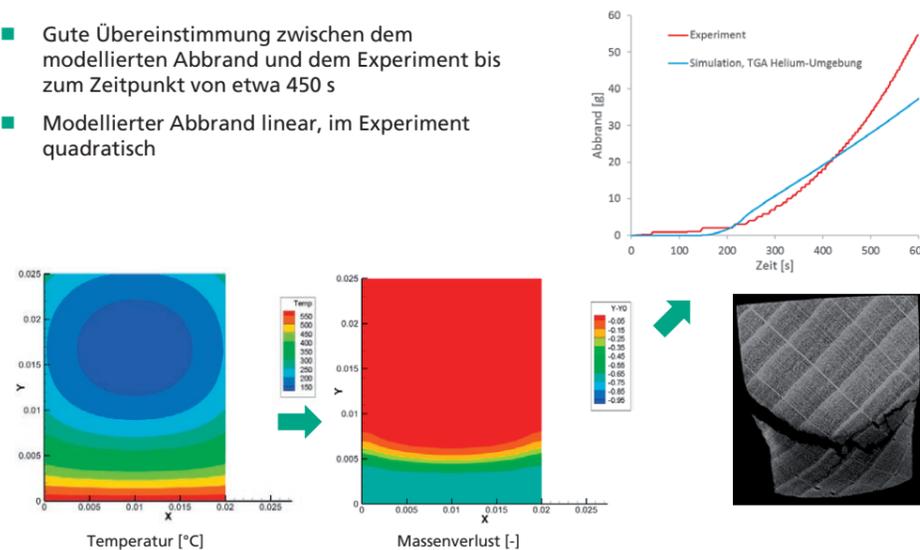


Seite 17
© Fraunhofer EMI

Modellierung der Brandquelle

Simulation des Massenverlustes, TGA Helium-Umgebung

- Gute Übereinstimmung zwischen dem modellierten Abbrand und dem Experiment bis zum Zeitpunkt von etwa 450 s
- Modellierter Abbrand linear, im Experiment quadratisch



Seite 16
© Fraunhofer EMI

Fazit

- Brandgasfreisetzung im Buchenholzschwelbrand
 - TGA-Versuche in Helium- und Luft-Umgebung zeigen deutlichen Einfluss der jeweiligen Umgebungsbedingung auf das Abbrandverhalten
 - Brandgasfreisetzung im Wesentlichen proportional zur Abbrandrate
- Simulation der Brandquelle
 - Kopplung von Wärmeleitungsgleichung mit Arrhenius-Gleichungen erlaubt näherungsweise Bestimmung des Abbrandes
 - Verwendung von TGA-Daten ermittelt in Luft-Umgebung führt zu einer 30 % höheren Abbrandrate (im Vergleich zur inerten (Helium-) Umgebung)
 - Für eine bessere Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment ist die Berücksichtigung weiterer Phänomene notwendig, z.B.
 - Wärmestrahlung der Heizplatte
 - Materialschwund
 - Änderung der thermischen Eigenschaften durch Verkohlung

Seite 18
© Fraunhofer EMI

Dipl.-Inf. Christian Niemand:

Entwicklung eines Echtzeit Brandsimulators für die Ausbildung bei der Feuerwehr

Abstract:

In Deutschland sind 94 % der 1,3 Millionen Feuerwehrleute ehrenamtlich tätig. Besonders in den ländlichen Regionen haben freiwillige Feuerwehren oftmals nur wenig Einsätze, woraus eine ungenügende Einsatzerfahrung resultiert. Am Fachgebiet Technische Informatik der Universität Kassel beschäftigen wir uns deshalb mit der virtuellen Simulation von Trainings- und Ausbildungsszenarien für die Feuerwehr. Dazu nutzen wir moderne Techniken aus der grafischen Simulation und der Computergrafik. Für das Training im Bereich Innenbrandbekämpfung, Überdruckbelüftung sowie Suchen und Retten von vermissten Personen entwickeln wir derzeit einen GPU basierten Echtzeit Brandsimulator, der in ein Virtual Reality Training integriert werden soll. Als Basis für den Brandsimulator dienen, FDS Referenzdaten, Erfahrungswerte von Einsatzkräften und Videos von realen Bränden.

Entwicklung eines Echtzeit Brandsimulators für die Ausbildung bei der Feuerwehr

13. Treffen der FDS Usergroup
Berlin 7.-8. November

Christian Niemand
c.niemand@uni-kassel.de

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Technische Informatik
Leitung Prof. Dr.-Ing. M. Eng. Dieter Wloka

Übersicht

1. Motivation und Anwendungsfälle
2. Anforderungen
3. Technische Umsetzung
4. Verifikation

Motivation

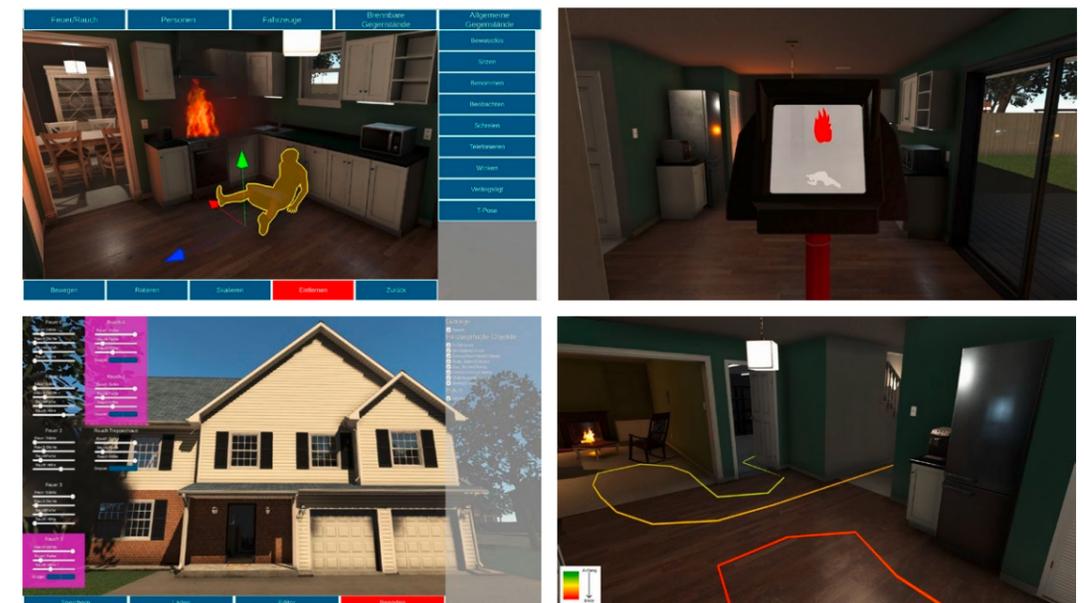
Mögliche Anwendungsfälle

- Atemschutztraining
 - Atemschutzüberwachung
 - Suchen und Retten
- Taktisches Training
 - Gruppen-/Zug-/Verbandsführer und Stäbe
- Einsatzstellenbelüftung
- Hohlstrahlrohr Simulator (Innenangriff)

Motivation

- Warum Echtzeit Brandsimulationen?
 - 1,3 Millionen ehrenamtliche Feuerwehrleute
 - Ungenügende Einsatzerfahrung in ländlichen Regionen
 - Viele Ressourcen stehen nur eingeschränkt zur Verfügung
 - Brandcontainer/-haus, Drehleiter, Brandmeldeanlagen, etc.
 - Deutsche Feuerwehren suchen nach Ausbildungsalternativen
 - Steigerung der Effizienz in der Gruppenführer Ausbildung

Beispielanwendung PC und VR



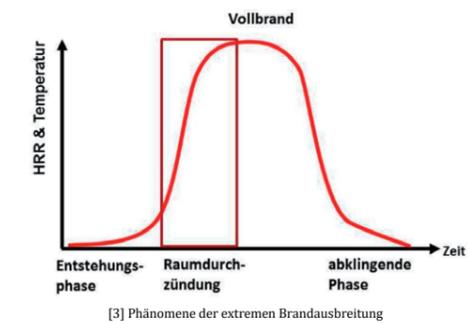
Anforderungen

Anforderungen seitens der Feuerwehr Ausbildung

Brandverlauf

- Deckt den Standard Einsatz ab

- 1) Entstehungsbrand
- 2) Raumdurchzündung
- 3) Vollbrand
- 4) Abklingphase



Anvisiertes Ziel

- Brandcontainer/Zimmerbrand



[6] Forschungsstelle für Brandschutztechnik, TH Karlsruhe

Anforderungen an Rauch

- Rauchausbreitung
 - Rauch dringt durch offene Türen/Fenster etc.
 - Rauch dringt durch Türritzen
 - Verwendung von mobilem Rauchverschluss
- Rauchsicht
- Rauchfarbe
 - Saubere/Unsaubere Verbrennung
 - Anteile: Ruß, Wasserdampf

Anforderungen an Flammen

- Brandherd
- Rauchgasdurchzündung
- Dancing Angels

Anforderung an die Darstellung

- So realitätsnah/glaubhaft wie möglich
 - Volumetrisches Feuer und Rauch
 - Verbrennungserscheinungen
 - Beleuchtung

Anforderung an Wärmesicht

- Abbildung der Raum- und Brandtemperatur
- Darstellung von Personen
- Wärmereflexion an Glas
- Flüssigkeiten in Tanks und Gasflaschen

Anforderungsstufen

Stufe	Anforderung	Anwendungsfall
1	Darstellung von Rauch Rauchschicht und Rauchausbreitung Strömungsmechanik Voxelisierung von 3D Geometrie Wärmebildkamera	Suchtaktik in verrauchten Gebäuden Atemschutztraining Einsatzstellenbelüftung
2	Darstellung von nicht ausbreitendem Feuer	Taktisches Gruppenführer Training (kurze Simulation mit ca. 5-10 Minuten)
3	Darstellung von ausbreitendem Feuer Darstellung von Feuer Phänomenen Darstellung von zersetzenden Gegenständen Einfache Berechnung für Pyrolyse und Verbrennung Wärmeübertragung Löschvorgang	Löschtechniken (Raum und Rauchkühlung) Taktik Training mit dynamischen Bränden (lange Simulation mit 10-120 Minuten)
4	Berechnung von Reaktionen verschiedener Brennstoffe Komplexe Pyrolyse und Verbrennung	Messtechnik
5	Physikalisch realistische Parametrierung	Simulationen ähnlich wie FDS

Technische Umsetzung

Was benötigen wir?

- Game/Grafik Engine zur Darstellung
 - Unreal, Unity, Lumberyard
- Konvertierung von 3D Geometrie in numerisch berechenbare Daten
- Schnelle parallel implementierte Algorithmen
- Referenzdaten z. B. aus FDS und Videos
- Hardware: NVIDIA GeForce 1080 oder besser

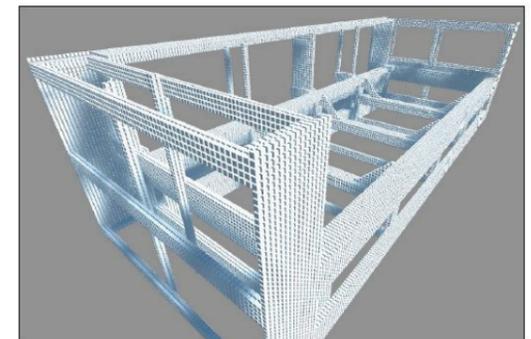
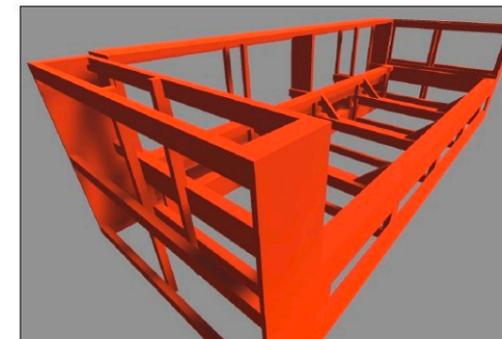
Simulation/Anwendung muss mit mindestens 30-60 Bildern pro Sekunde laufen! VR mit 90.

Auf der Suche nach dem minimalen Modell

- Performance ist König
- Realismus ist Königin
- Jede Berechnung kostet Performance
- Sobald ein Modell in Echtzeit funktioniert ...
 - ... gehen wir zu komplexeren Modellen über
 - ... und fügen Funktionalität hinzu

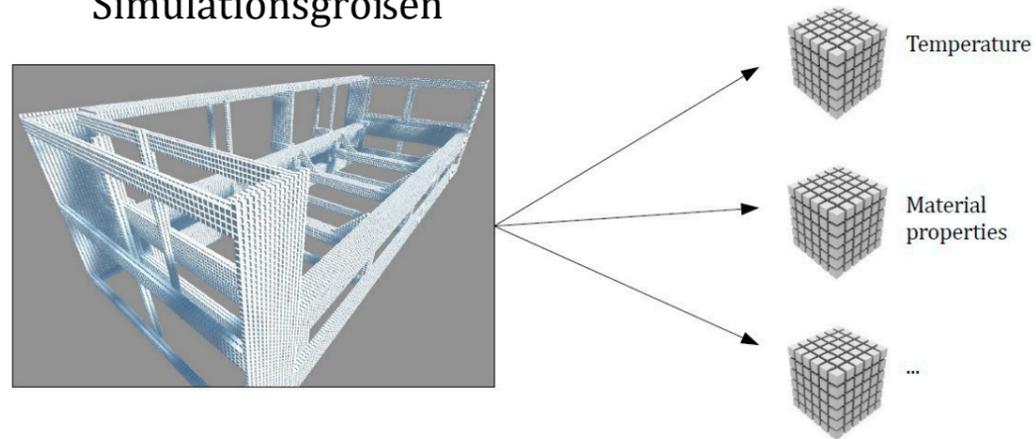
Voxelisierung (1)

- Konvertieren von 3D Geometrie in diskrete Informationen

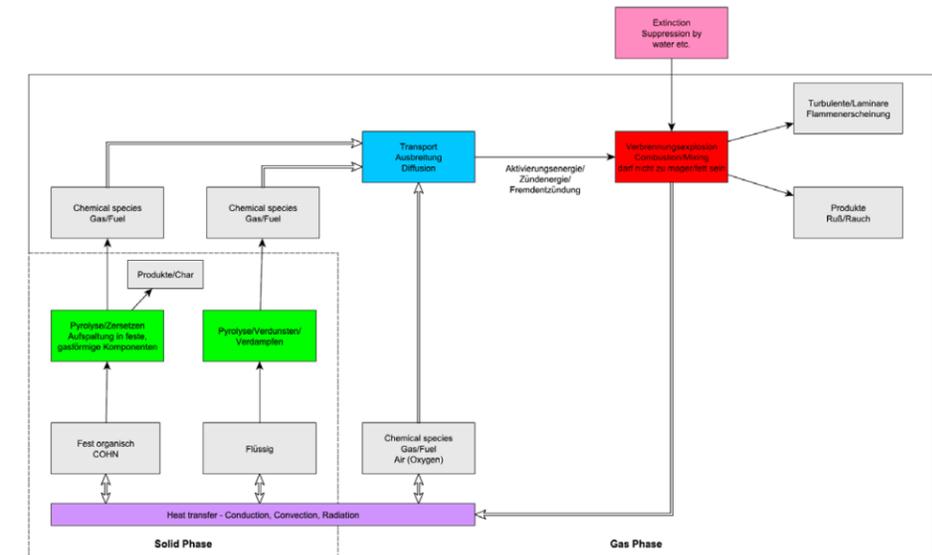


Voxelisierung (2)

- Erstellen von **3D Texturen** für alle Simulationsgrößen



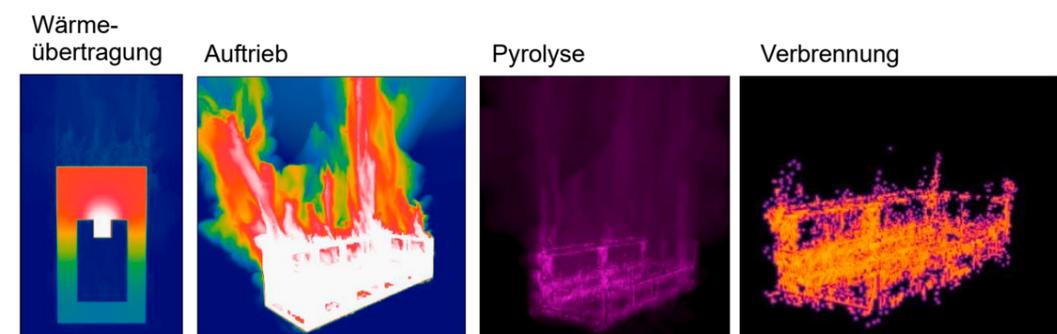
Simulationsablauf



Benötigte 3D Texturen

Name	Verwendung
Temperatur Luft	Enthält die Temperatur von Luft Zellen.
Temperatur Solide	Enthält die Temperatur von soliden Zellen.
Wärmequellen	Wärmequellen setzen die Temperatur in den Zellen.
Sauerstoff	Enthält den Sauerstoffanteil in Luft Zellen.
Brennstoff Solide	Enthält den Brennstoffanteil in soliden Zellen.
Brennstoff Gas	Enthält den Brennstoffanteil in Luft Zellen.
Zellen Typ	Definiert das Verhalten einer Zelle (Solide, Luft, Adiabat).
Licht	Enthält die Emission von Licht.
Rauch	Enthält die Menge an Rauch, die bei Verbrennung entsteht.
Geschwindigkeit	Enthält das zum Transport notwendige Geschwindigkeitsfeld.
Divergenz	Notwendig für die Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes.
Druck	Notwendig für die Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes.
Render Textur	Von der Game Engine zur Darstellung verwendet.

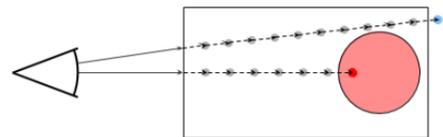
Aktueller Stand (1)



Noch keine Wärmestrahlung!

Ray Marching

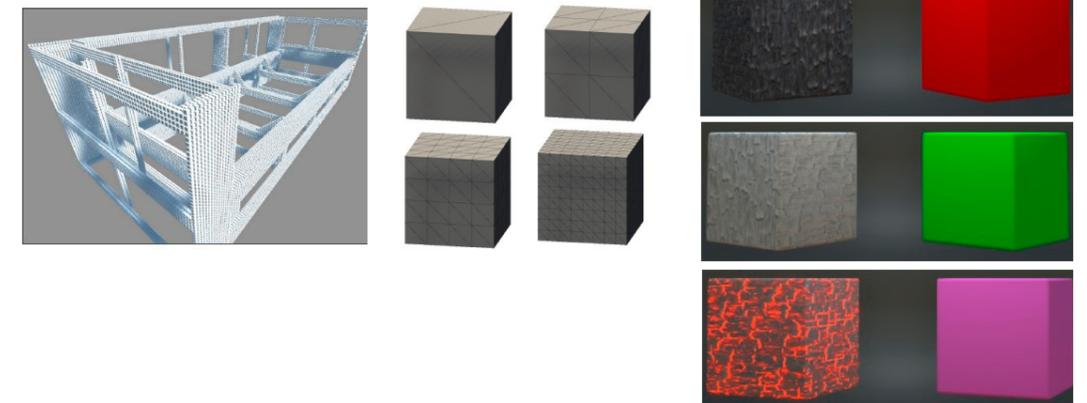
- Technik zur Darstellung von 3D Texturen/Volumen
- Man schießt Strahlen von der Kamera ausgehend durch eine 3D Textur/Volumen
- Man liest die Werte an N Stellen im Volumen ...
- ... und verarbeitet diese zu einem sichtbaren Pixel



Quelle: <https://www.alanzucconi.com/2016/07/01/raymarching/>

Verbrennungsercheinungen (1)

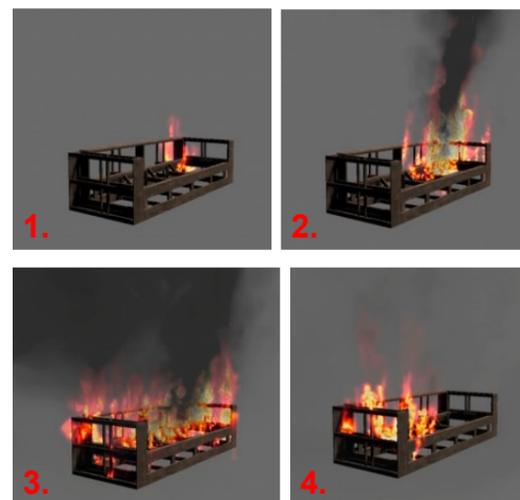
Voxel -> Vertex -> Material



Aktueller Stand (2)

- **Simulation bei 32fps**
 - Grid 256³
 - NVIDIA GeForce 780Ti
 - Intel i7 3.6Ghz
 - 16 GB RAM

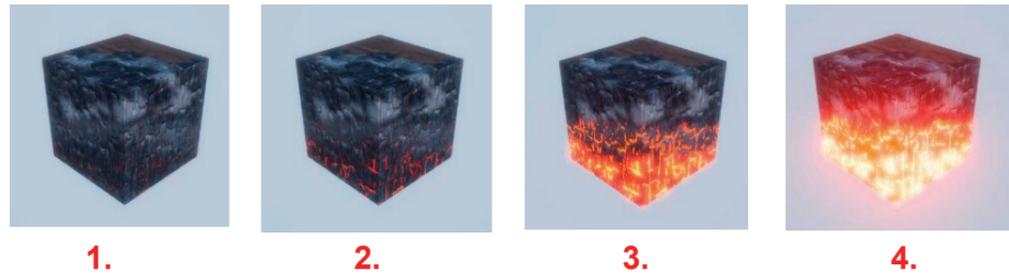
Video!



Verbrennungsercheinungen (2)

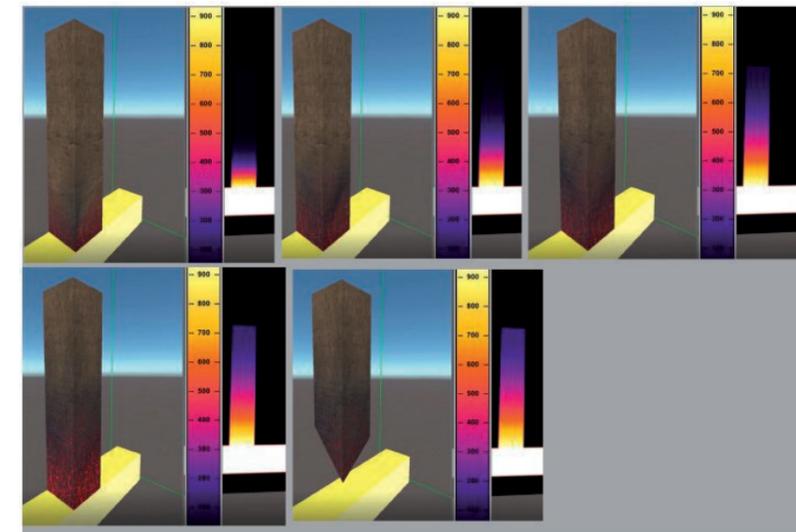


Verbrennungsercheinungen (3)



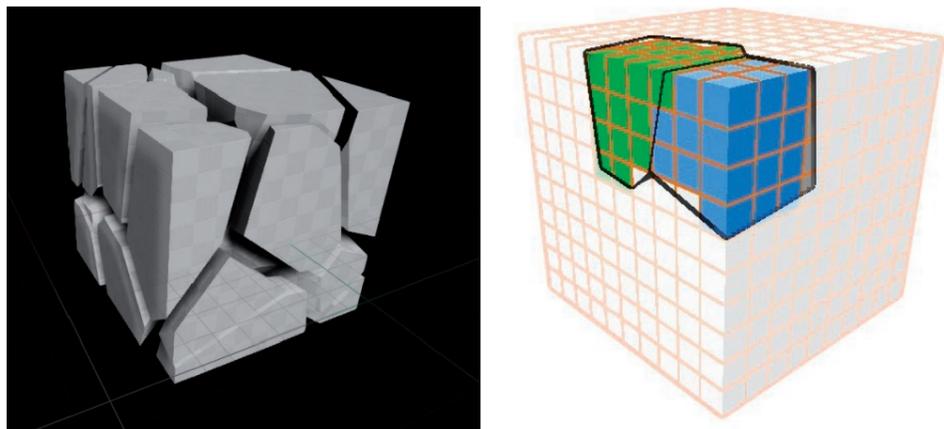
Video!

Verbrennungsercheinungen (5)



Verbrennungsercheinungen (4)

- Zerlegung der Meshes in Chunks (Voronoi)



Verifikation

Wo kommt FDS dabei ins Spiel?

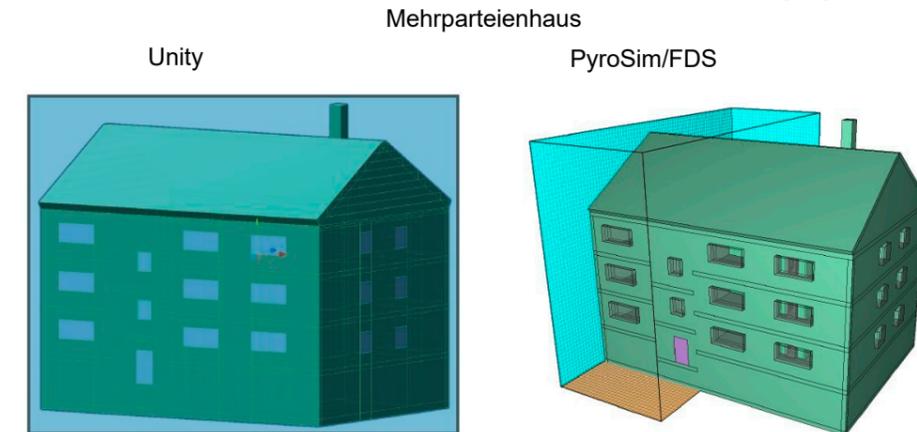
1. Erstellen von Referenzdaten

- Vergleich von FDS und Echtzeit Simulation
 - Innerhalb der Zielanwendung

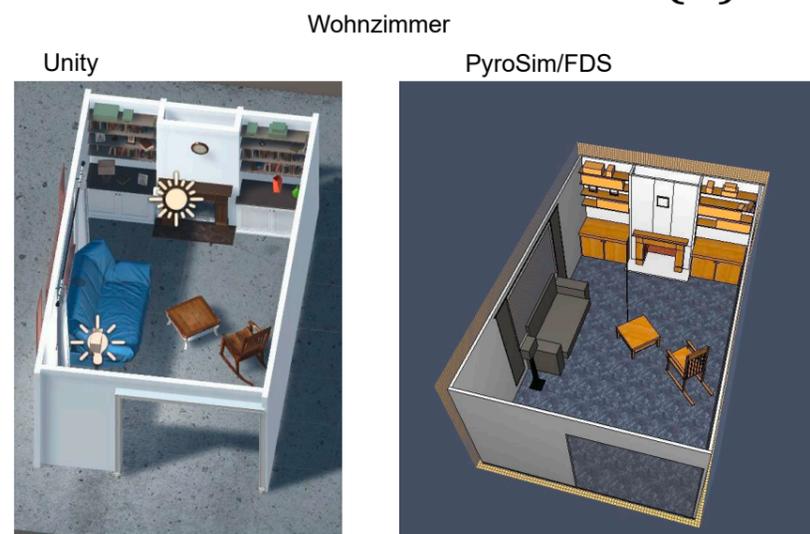
2. Vorberechnung von Simulationsdaten

- Abspielen vorberechneter Daten (keine Dynamik)
- Übergabe an Echtzeit Simulation (mit Dynamik)

Nachbau von Szenarien (2)



Nachbau von Szenarien (1)

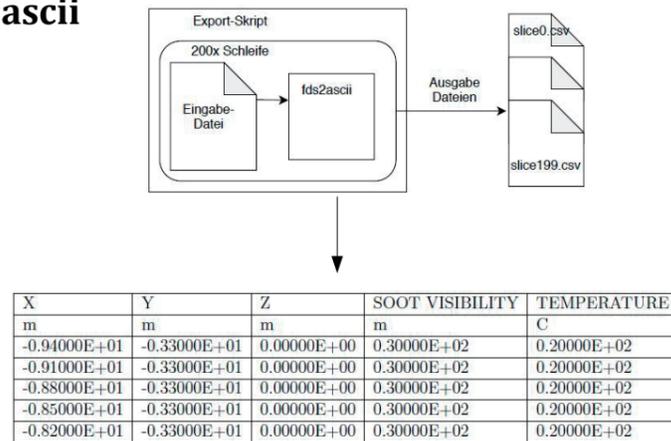


Simulation in PyroSim/FDS

1. 3D-Slices/Sensoren in **PyroSim/FDS** einfügen
 - Temperatur, Druck, Geschwindigkeit, Rußdichte, etc.
2. Simulation durchführen
 - Aus der Simulation erhalten wir für **Smokeview** Daten

Export von FDS 3D-Slices

- Smokeview Daten in lesbares .csv Format umwandeln
- **fds2ascii**

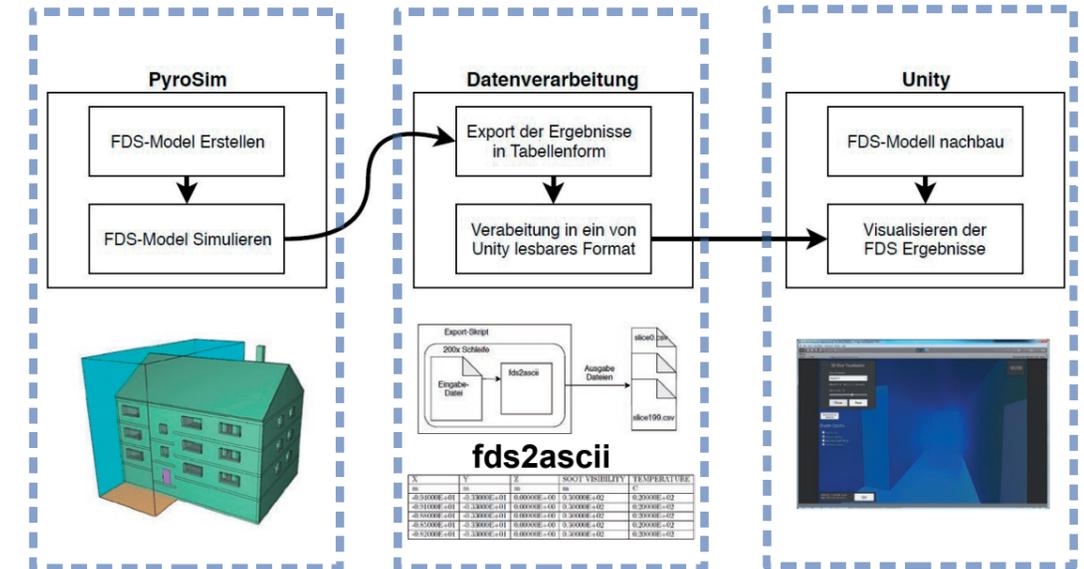


Christian Niemand
c.niemand@uni-kassel.de

13. Treffen der FDS Usergroup
Berlin 7.-8. November 2019

35

Gesamtablauf im Überblick



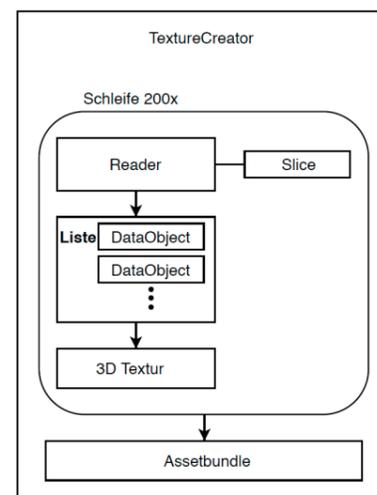
Christian Niemand
c.niemand@uni-kassel.de

13. Treffen der FDS Usergroup
Berlin 7.-8. November 2019

37

Erstellen von 3D Texturen

- **Slice:** FDS .csv Daten
- **DataObject:** Eigene Datenstruktur für (Zellen)Position, Wert und Einheit
- **3D Textur:** Unity, DirectX, OpenGL Datenstruktur
- **Assetbundles:** Unity Dateipakete, die verschiedene Ressourcen, enthalten
- **Simulationsdauer:** 200 Sekunden
- **Sampling:** 1x pro Sekunde

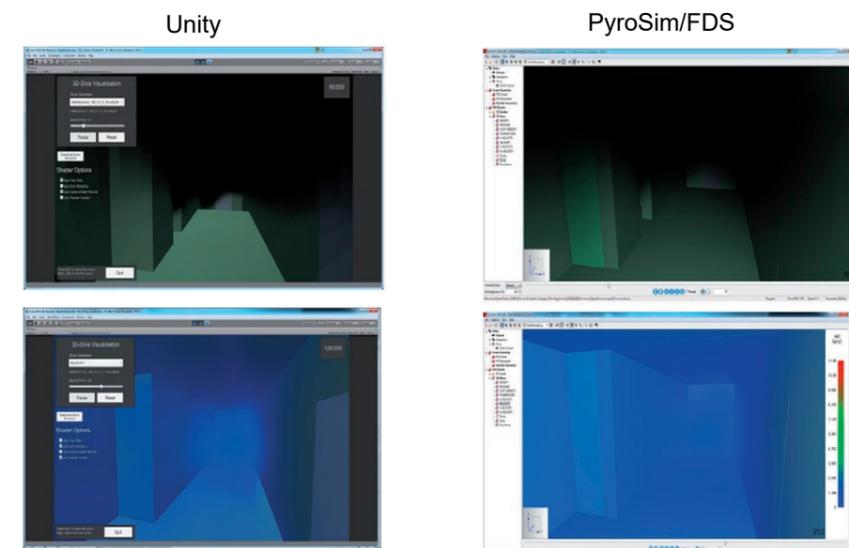


Christian Niemand
c.niemand@uni-kassel.de

13. Treffen der FDS Usergroup
Berlin 7.-8. November 2019

36

Vergleich Unity mit PyroSim/FDS

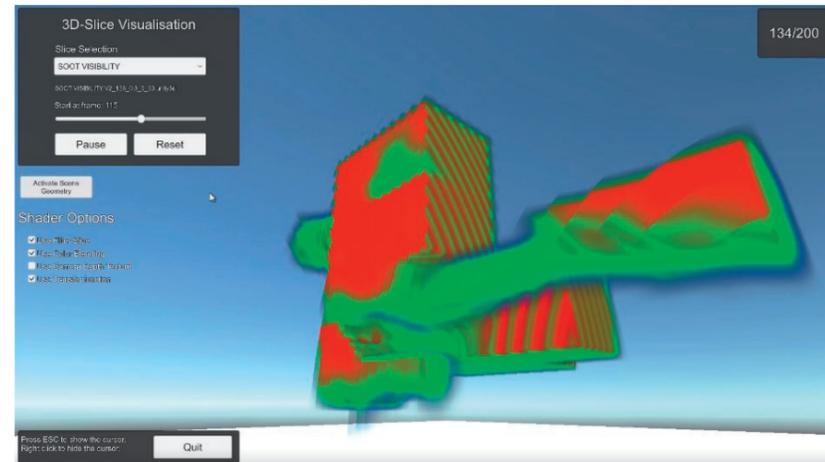


Christian Niemand
c.niemand@uni-kassel.de

13. Treffen der FDS Usergroup
Berlin 7.-8. November 2019

38

Ergebnis



Video!

Quellen

- [1] Niemand Christian, Simulating Real-Time Fire For Firefighting Training, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference (FEMTC) 2018, Gaithersburg, Maryland, October 1-3, 2018
- [2] Reitz Dominik, Echtzeit-Visualisierung vorberechneter Simulationen von Rauchentwicklung in Brandeinsatzszenarien mit Ventilation, Bachelorarbeit, Universität Kassel, August 2019
- [3] Entwurf und Entwicklung von Darstellungskonzepten für 3D-Modelle einer voxelbasierten Echtzeitverbrennungssimulation, Bachelorarbeit, Universität Kassel, April 2018
- [4] Phänomene der extremen Brandausbreitung
https://www.atemschutzunfaelle.de/download/Ausbildung/LU_B1-401_Phaenomene_der_extremen_Brandausbreitung.pdf
- [5] Den Brand lesen
https://www.atemschutzunfaelle.de/download/Ausbildung/RLWF_deutsch.pdf
- [6] Forschungsstelle für Brandschutztechnik, TH Karlsruhe

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

Fragen?

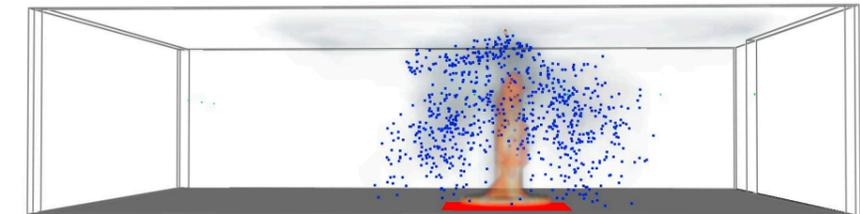
Dipl.-Ing. Thomas Kolb:

Sichtweiteinschränkungen bei Sprinkleranlagen



BRANDSCHUTZ

14. Stuttgarter Brandschutztage



Quelle: Bachelorarbeit Yasmin-Sophie Roth

Dipl.-Ing. Thomas Kolb,
Brandschutzconsult GmbH & Co. KG,
Ettenheim

Erkenntnisse aus der Bachelor-Arbeit von
Yasmin-Sophie Roth:

Sichtweiteinschränkungen bei Sprinkleranlagen

1



BRANDSCHUTZ

Einführung

Bachelorarbeit wurde 2019 an der
Hochschule Furtwangen verfasst

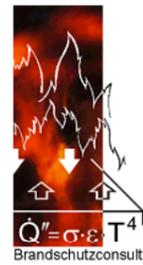


Eigentliches Thema war:

„VERÄNDERUNG DER RÄUMUNGSZEITEN DURCH
SICHTEINSCHRÄNKUNGEN BEI SPRINKLERANLAGEN“

Dabei kam es zu interessanten Ergebnissen bezüglich der
Auswirkungen auf die Sichtweite bei dem Einsatz von
Sprinkleranlagen

2



BRANDSCHUTZ

Einführung

Automatische Feuerlöschanlagen werden in verschiedenen Sonderbauten von vornherein gefordert, wie z. B. in

- Versammlungsstätten mit Versammlungsräumen größer 3600 m² (vgl. § 19 VStättVO) oder
- in Industriebauten der Sicherheitskategorie K 4 (vgl. Tabelle 2 IndBauRL)

Diese führen dann teilweise auch zu Erleichterungen bei der Rettungswegführung



BRANDSCHUTZ

Einführung

Andererseits werden immer wieder die negativen Auswirkungen der Löschanlagen auf die Sichtweite aufgeführt und auch nachgewiesen, z. B. im Forschungsbericht 143 des KIT von Dipl.-Ing. Kunkelmann:

Numerus des Berichtes: 143	Titel des Berichtes: Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer Brandgefahrklasse. Teil 1: <ul style="list-style-type: none"> • Brand- und Löscheversuche mit Hochdruck-Wassernebel im Holztropfenraum (ohne und mit Windinfluss auf einen natürlichen Rauchsog) • Vergleich mit Niederdruck-Wassernebel und Sprinkler. 	ISBN: 0170-0060
Autor: Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann	durchführende Institution: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Numerus des Auftrages: 107 (3/2005) Abschlussdatum: Januar 2007	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und -sonoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Seitenzahl: 105 (61 Seiten in Farbe)	Bilder: 50	Tabellen: 4
Literaturverweise: 10		
Kurzfassung: Bei im Realmaßstab durchgeführten Versuchen konnte festgestellt werden, dass sowohl durch Sprinkler als auch Nieder- und Hochdruck-Wassernebel die Brandausbreitung auf den Bereich im Treppenraum begrenzt werden konnte und der Brandschaden somit gering war. Durch sämtliche Löschanlagen wurde das Temperaturniveau unmittelbar nach Löscheinsetzen auf untere Werte abgesenkt. Die gemessenen Brandgaskonzentrationen blieben bei schwachem Löscheinsetzen bei der überwiegenden Anzahl der Versuche im Verhältnis zu einem nicht bekämpften Brand im unkritischen Bereich. Die erforderliche Löschwassermenge bis zum vollständigen Löschen des Brandes ist hierbei bei einem einzelnen Normalsprinkler bei einem Brandherd direkt unter dem Sprinkler aufgrund der Hängegablung weitaus am höchsten. Die Nebelkissen haben gegenüber einem Sprinkler den Vorteil einer gleichmäßigeren Wasserverteilung über dem Sprühquerschnitt. Bei Niederdruck- und Hochdruckwassernebel sind bedeutend geringere Löschwassermengen erforderlich, wobei der Löschwasserbedarf beim Niederdruck-Wassernebel um ca. 20 % über dem von Hochdruck-Wassernebel bei den hier im Treppenraum durchgeführten Brandversuchen liegt. Der Niederdruck-Wassernebel benötigt ca. 20 %, der Hochdruck-Wassernebel ca. 15 % der Löschwassermenge eines Normalsprinklers. Die Verschlechterung der Sicht durch Sprühnebel, Wassernebel und Brandrauch ist bei Niederdruck-Wassernebel am geringsten, gefolgt vom Normalsprinkler. Beim Hochdruck-Wassernebel ergibt sich bei den Versuchen ohne Windinfluss die größte Verschlechterung der Sicht (bis zum 4-fachen des Wertes von Niederdruck-Wassernebel), zum einen aufgrund des feinen Sprühnebels selbst, zum anderen aufgrund der Brandbekämpfung durch das in beträchtlichen Mengen entweichende Sprühnebel-Wassernebel. Brandrauchnebel, insbesondere beim Hochdruck-Wassernebel ergibt sich weiterhin eine Verschlechterung der Sicht durch über die Abstrahlung des Sprühnebel-Wassernebel-Brandrauchnebel, das Erloschen des Brandes und dem Vor-		

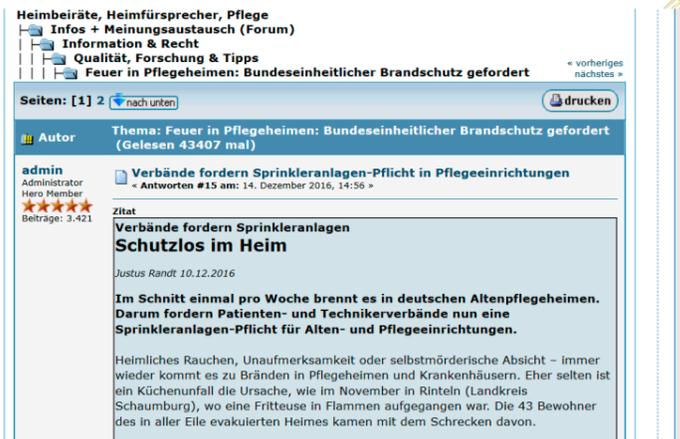
Quelle: www.ffb.kit.edu



BRANDSCHUTZ

Einführung

Es wird zum einen immer wieder der Einsatz von Löschanlagen in Sonderbauten gefordert, bei denen dies derzeit nicht der Fall ist z. B. in Pflegeheimen:



Quelle: www.heimmitwirkung.de



BRANDSCHUTZ

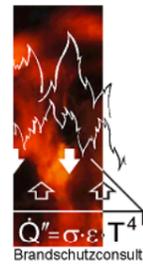
Einführung

Ziel von Löschanlagen ist in der Regel Ausmaß des Brandes begrenzen und wirksame Löscharbeiten ermöglichen, nicht aber das vollständige Löschen des Brandes

Dennoch:

Bereits ca. 80 % aller größeren Brände werden bereits durch Auslösung von einem oder zwei Sprinklern gelöscht

Lediglich in ca. 1 % bis 5 % aller Fälle kommt es zu einem Versagen der Sprinkleranlage

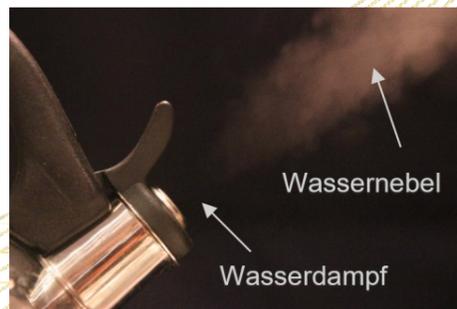


Sichtweitereinschränkungen

Zu Sichtweitereinschränkungen kann es kommen durch:

- Wasserdampf bzw. Wassertröpfchen in der Luft
- Verwirbelungen der Rauchgase durch z. B. Sprinklerausstoß

Wasserdampf hingegen ist durchsichtig und führt im relevanten Bereich zu Einschränkung der Sichtweite:



Quelle:
Bachelorarbeit
Yasmin-Sophie Roth

7



Sichtweitereinschränkungen

Vergleich Sichtweiten mit und ohne Löschanlage



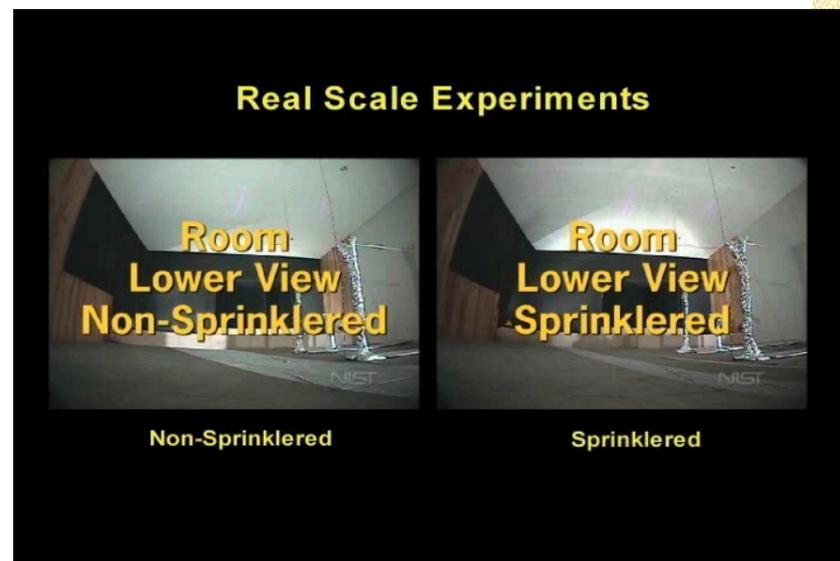
Quelle: NIST, Grosshandler et al., 2005 (Dokumentation zum Station Club Fire)

9



Sichtweitereinschränkungen

Vergleich Sichtweiten mit und ohne Löschanlage



Quelle: NIST, Grosshandler et al., 2005 (Dokumentation zum Station Club Fire)

8



Berechnungen mit FDS

200 m² großer und 20 m langer Versammlungsraum mit Brandszenarium nach DIN 18232-2

Bemessungsgruppe 3: Brandleistung 300 kW/m² bei einer Fläche von 20 m² (Brandleistung 6 000 kW)

Es gab Berechnungen mit besonders geringen, mittleren und hohen Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Brennstoff Polyurethan mit $Y_{RuB} = 0,194$ g/g

Zwei dauerhaft offene Türen an den Enden, keine weiteren Öffnungen

Berechnungszeit 15 Minuten

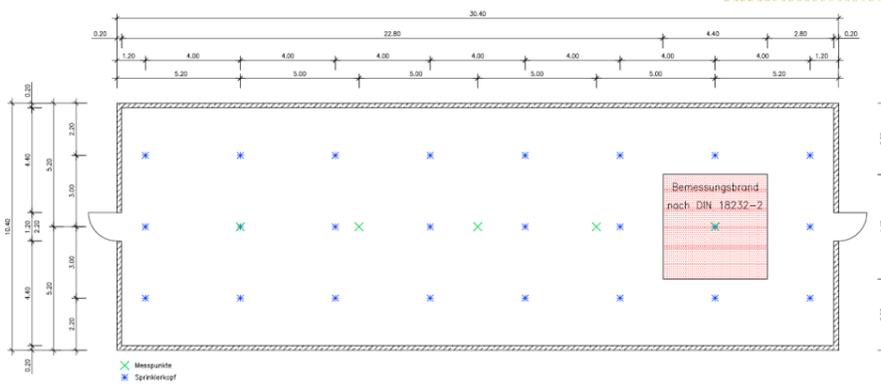
10



Berechnungen mit FDS

200 m² großer und 20 m langer Versammlungsraum mit Brandszenarium nach DIN 18232-2

Auslegung der Sprinkleranlage nach DIN EN 12845 mit mittlere Brandgefahrenklasse OH4

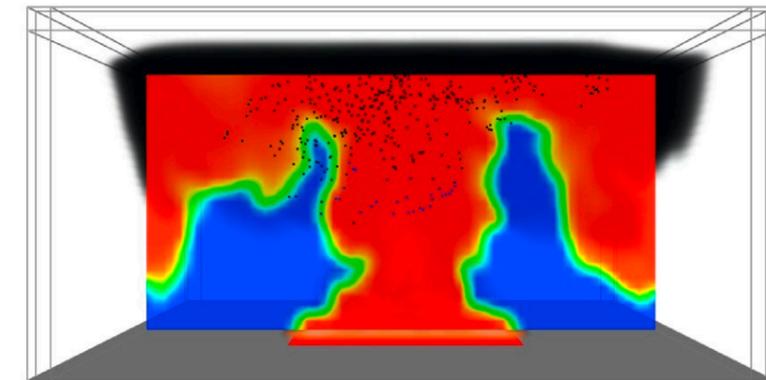


Quelle: Bachelorarbeit Yasmin-Sophie Roth



Berechnungen mit FDS

Zum Vergleich: Sichtweitereinschränkungen durch Rauch

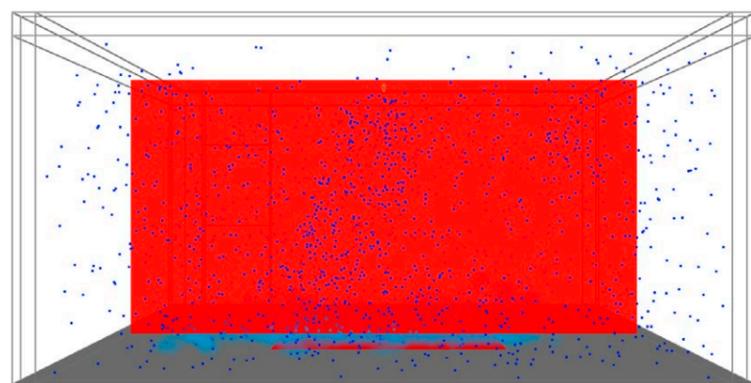


Quelle: Bachelorarbeit Yasmin-Sophie Roth



Berechnungen mit FDS

FDS berücksichtigt jedoch keine Einschränkung der Sichtweite durch Wasserdampf und -tröpfchen



Quelle: Bachelorarbeit Yasmin-Sophie Roth



Berechnungen mit FDS

Verwirbelungen werden durch die Simulation abgebildet

Diese führen in den berechneten Fällen zu lokalen Einschränkungen der Sicht im Umkreis von bis zu ca. 10 m um den Brandherd

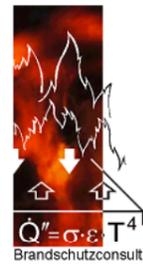


Besonders geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit, ohne Sprinkler



Besonders geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit, mit Sprinkler

Quelle: Bachelorarbeit Yasmin-Sophie Roth



BRANDSCHUTZ

Berechnung von Wassernebel

Kritischer ist Wassernebel

Sättigungspartialdruck in Abhängigkeit der Temperatur:

Lufttemperatur [°C]	Sättigungspartialdruck [Pa]
20	2339,2
30	4246,8
40	7385,1
50	12352,5
60	19947,4

Quelle: Baehr, Kabelac, 2016; S. 284

17



BRANDSCHUTZ

Berechnung von Wassernebel

Kritischer ist Wassernebel

Berechnung mit FDS:

- Absoluter Wassergehalt (auch unter Berücksichtigung des Sprinklereinsatzes) und
- Lufttemperatur

In den Bereichen, in denen bei der vorhandenen Temperatur der für eine relative Luftfeuchte von 100 % erforderliche Wassergehalt überschritten ist, muss mit der Bildung von Wassernebel gerechnet werden

19



BRANDSCHUTZ

Berechnung von Wassernebel

Kritischer ist Wassernebel

Erforderlicher absoluter Wassergehalt in Abhängigkeit der Temperatur:

Lufttemperatur [°C]	Wassergehalt [kg/kg]
20	0,0146
40	0,0489
50	0,0863
60	0,1520

Quelle: Bachelorarbeit Yasmin-Sophie Roth

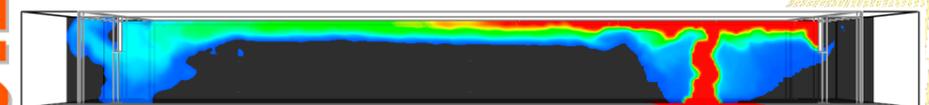
18



BRANDSCHUTZ

Berechnung von Wassernebel

100 Sekunden nach Brandbeginn



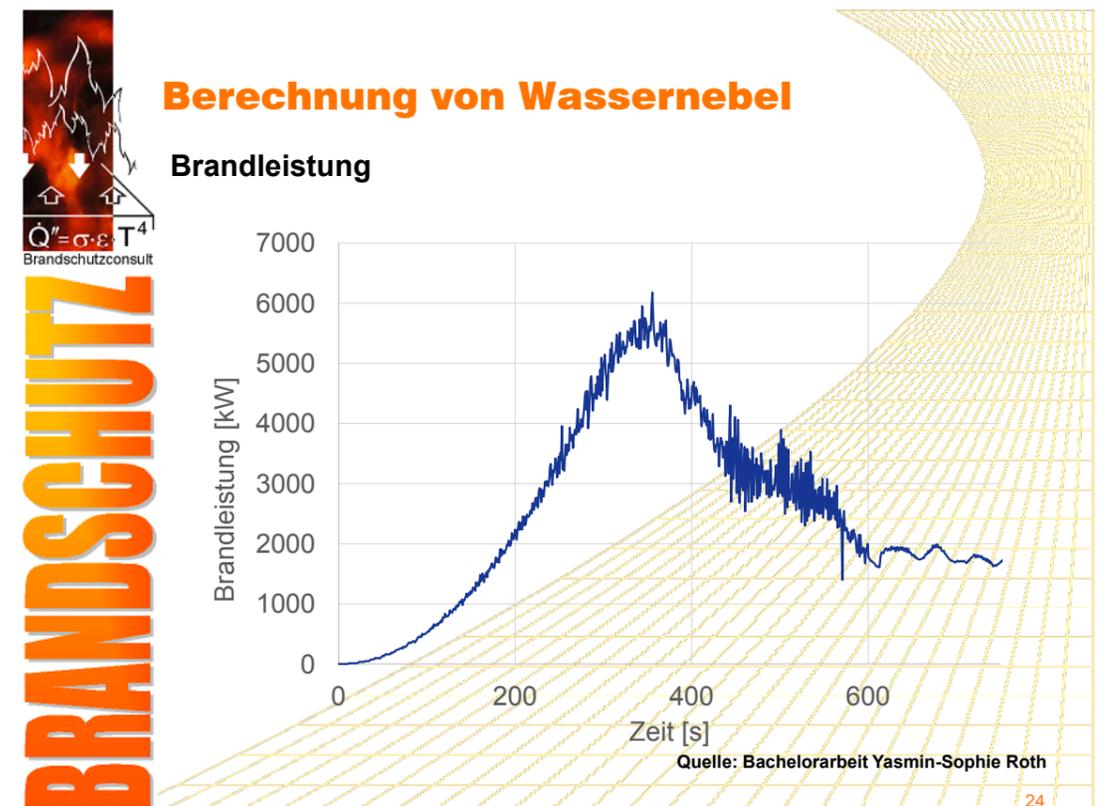
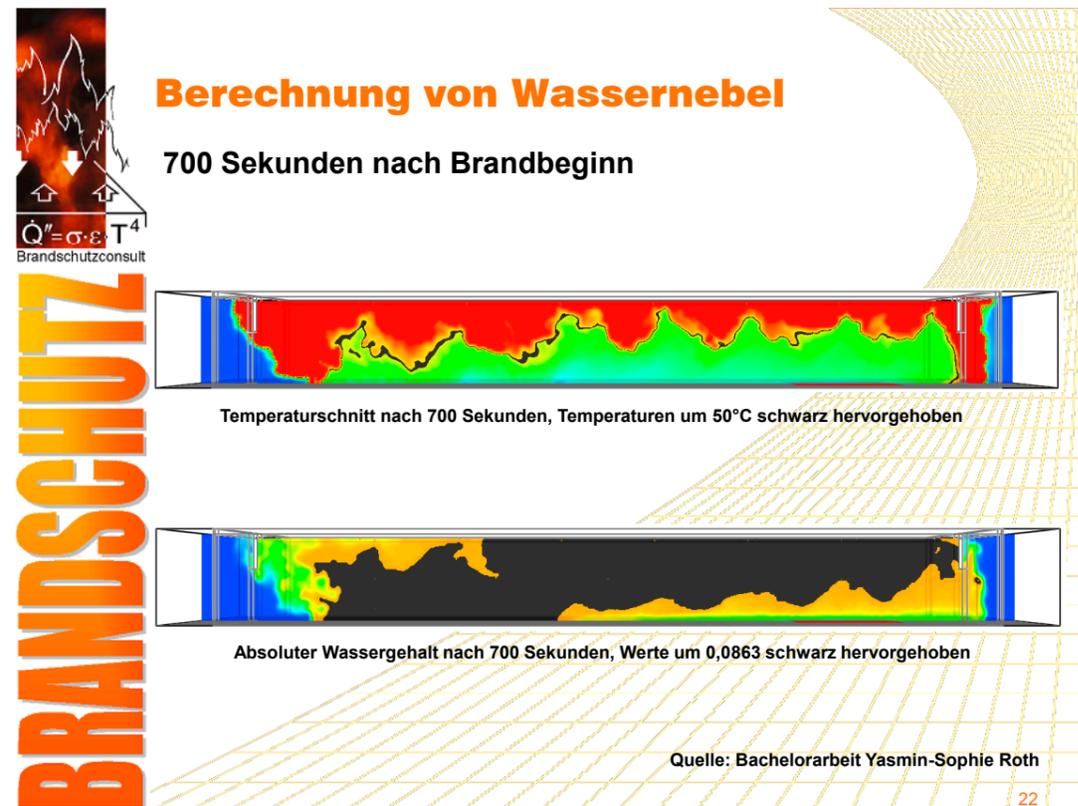
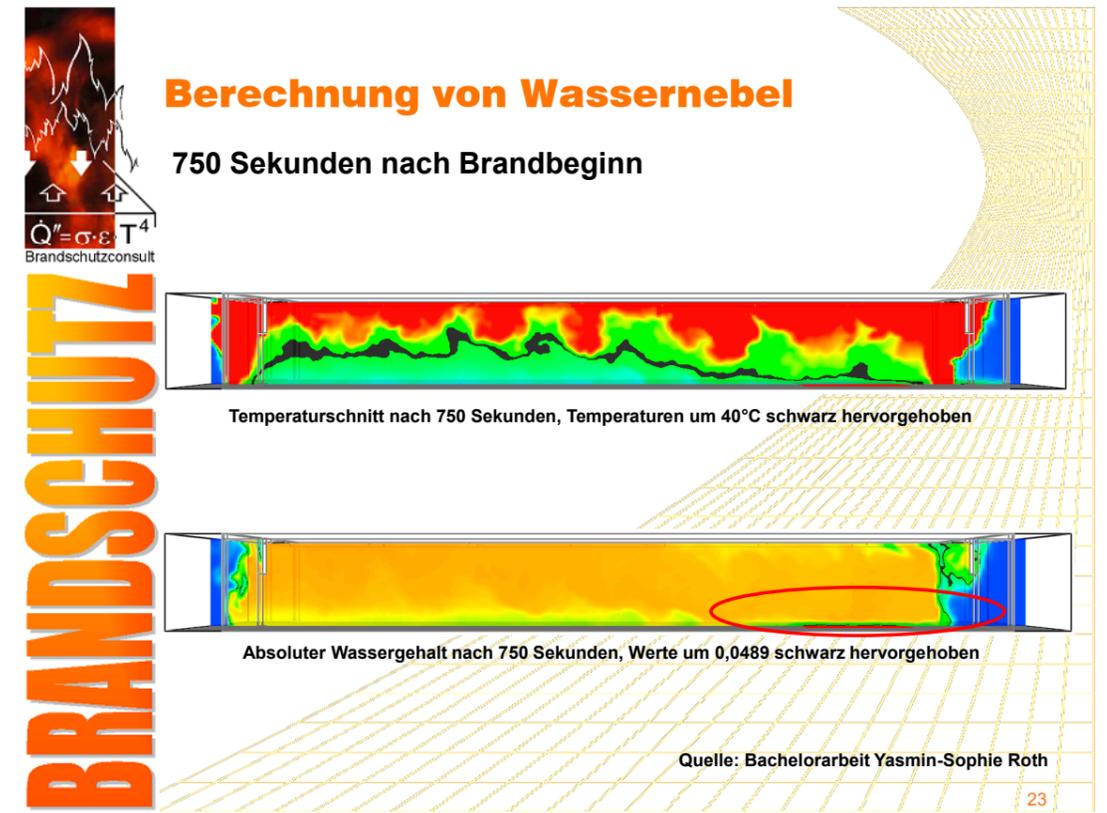
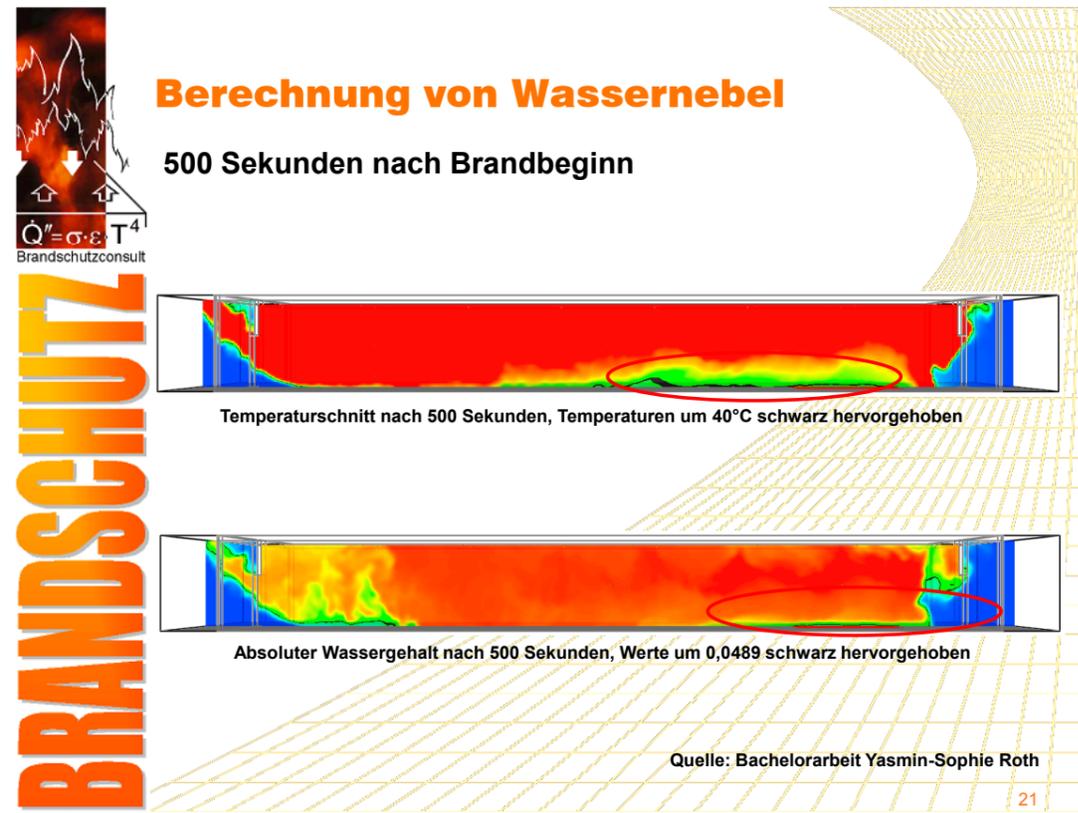
Temperaturschnitt nach 100 Sekunden, Temperaturen um 20°C schwarz hervorgehoben

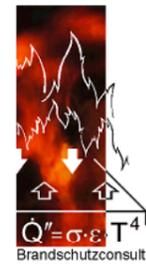


Absoluter Wassergehalt nach 100 Sekunden, Werte um 0,0146 schwarz hervorgehoben

Quelle: Bachelorarbeit Yasmin-Sophie Roth

20





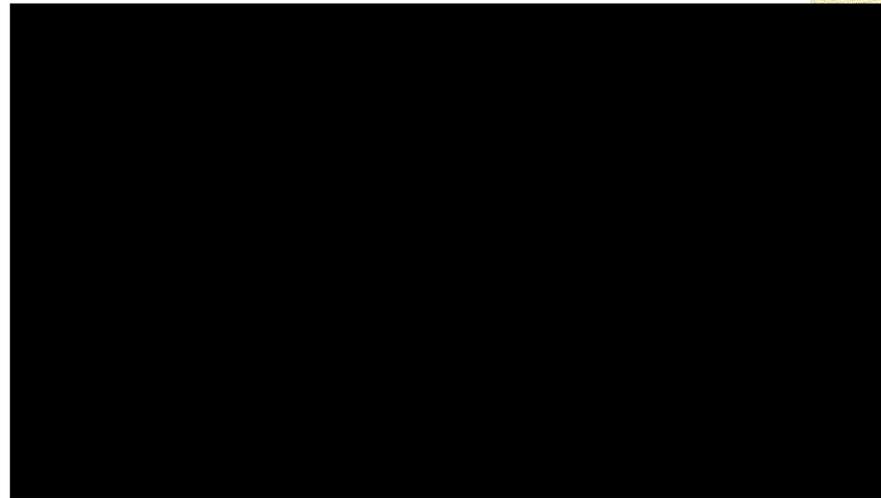
Berechnung von Wassernebel

Brandversuch

$$\dot{Q}'' = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$$

Brandschutzconsult

BRANDSCHUTZ



Quelle: BRE Group, 2018



Berechnung von Wassernebel

Brandversuch

$$\dot{Q}'' = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$$

Brandschutzconsult

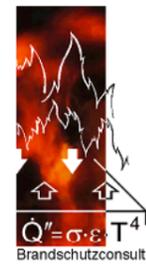
BRANDSCHUTZ



BRE Group - Water Mist Fire Demonstration +00:05:13:13

Kurz nach Auslösung Löschanlage

Quelle: BRE Group, 2018



Berechnung von Wassernebel

Brandversuch

$$\dot{Q}'' = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$$

Brandschutzconsult

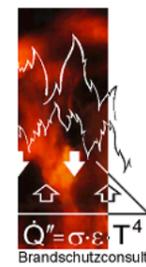
BRANDSCHUTZ



BRE Group - Water Mist Fire Demonstration +00:04:30:04

Kurz vor Auslösung Löschanlage

Quelle: BRE Group, 2018



Berechnung von Wassernebel

Brandversuch

$$\dot{Q}'' = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$$

Brandschutzconsult

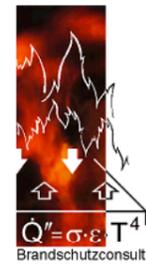
BRANDSCHUTZ



BRE Group - Water Mist Fire Demonstration +00:09:31:01

Wassernebel entsteht nur am Boden und verdampft schnell

Quelle: BRE Group, 2018



$\dot{Q}'' = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$
Brandschutzconsult

BRANDSCHUTZ

Berechnung von Wasserdampf

Brandversuch



BRE Group - Water Mist Fire Demonstration +00:09:37:07

Wasserdampf entsteht nur am Boden und verdunstet schnell

Quelle: BRE Group, 2018



$\dot{Q}'' = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$
Brandschutzconsult

BRANDSCHUTZ

Noch Fragen?



Quelle: WEKA-Verlag



$\dot{Q}'' = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$
Brandschutzconsult

BRANDSCHUTZ

Berechnung von Wasserdampf

Brandversuch



BRE Group - Water Mist Fire Demonstration +00:17:58:08

Stabiler Wasserdampf erst in der Endphase

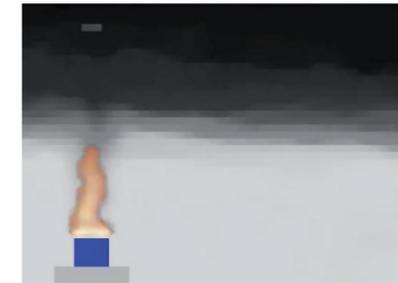
Quelle: BRE Group, 2018

Dr. Alexander Belt:

Sichtweitenbestimmung - Teil 1: Experimente

Abstract:

Die durch Brände verursachte Ausbreitung von Rauchgasen spielt bei sicherheitstechnischen Fragestellungen eine zentrale Rolle, da sie z. B. die Sichtbarkeit der Beschilderung von Fluchtwegen stark beeinträchtigen. Dieser Effekt wird durch Extinktion des Lichts an brandspezifischen Aerosolen hervorgerufen. Im Rahmen einer experimentellen Studie wurden im Brandentdeckungslabor an der Universität Duisburg Essen brandspezifische (TF 2, TF 4, TF 5 aus DIN EN 54), örtlich und zeitlich aufgelöste Extinktionsmessungen durchgeführt. Hierzu wurde die Änderung der Intensität im Raum verteilter Lichtquellen (LED) mit einer CCD-Kamera gemessen. Zur Einordnung der Qualität der Messmethode wurden Extinktionsmessungen mit der bewährten MIREX (mid-infrared extinction) Messtechnik gemessen.

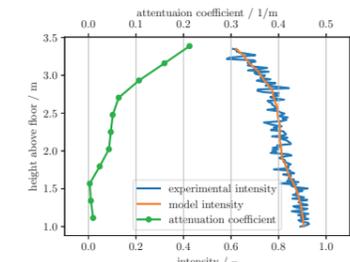
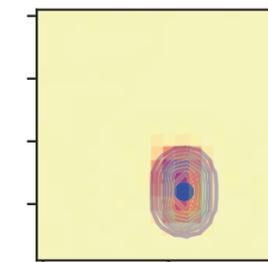


Visibility during Compartment Fires: Experiments and Simulations

07.11.2019 | Lukas Arnold^{ab}, Alexander Belt^a, Ben Hein^b, Thorsten Schultze^c & Lea Sichma^c

^a Forschungszentrum Jülich, ^b Bergische Universität Wuppertal, ^c University Duisburg-Essen

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft



Part 1: Experiments

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft



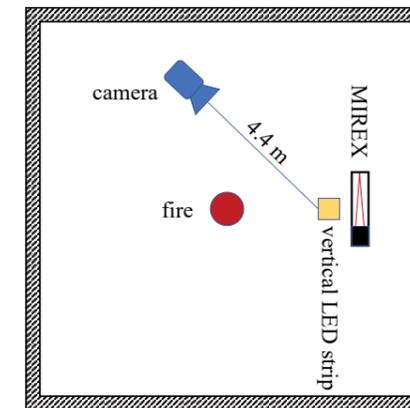
Introduction and Goals

- Visibility is a major safety factor in case of fire, e.g. in ASET-RSET concept
- Modelling of visibility relies on spatially resolved validation data
- Visibility is modelled by determining the transmission T , which is a function of the extinction cross section c_{ext} , the particle number density n and the light path Δs

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\tau) \quad \tau = c_{ext} \cdot n \cdot \Delta s = \sigma \cdot \Delta s$$

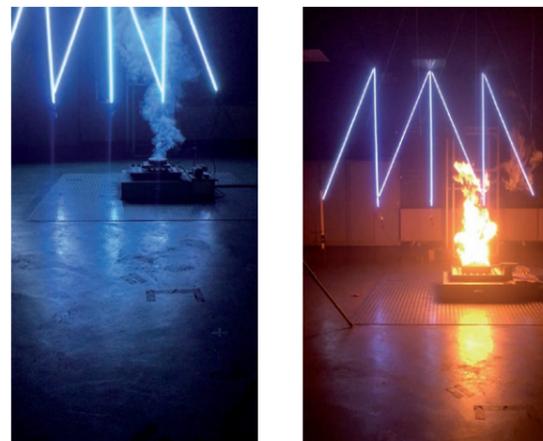
- Goals:
 - Simple, easy and spatially resolved methodology for measuring of the light extinction coefficient σ
 - Use data to improve prediction models

Experimental Setup



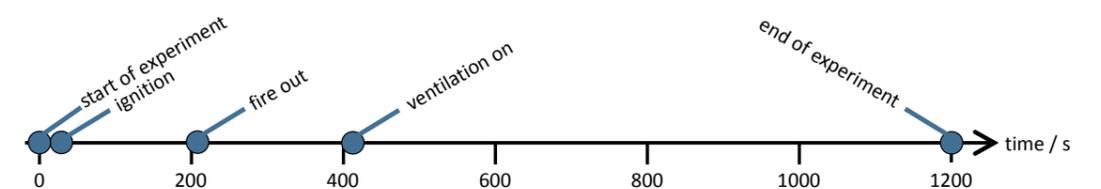
- Here, focus on only the heptane pool fire (TF5) with a fuel mass of 500 g
- Compartment extension of about 10 m in each direction and a ceiling height of 3.37 m
- MIREX measurement just below the ceiling
- Vertical LED strip starting just under the ceiling with a length of about 2.35 m
- CCD camera captures the LEDs from a distance of about 4.4 m

DIN EN 54 Test Fires



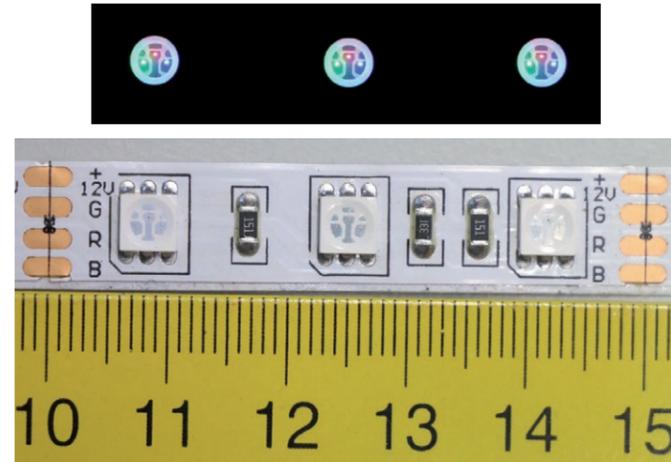
- Experimental setup following EN 54 with well know boundary condition
- Run at the Heinz-Luck fire detection laboratory at the university of Duisburg-Essen, Germany
- Multiple test fires, i.e. flaming and non-flaming fires
- In combination with the measurement of gas temperatures, mass loss rates as well as localised light extinction

Experimental Procedure and Timeline



- Three phases:
 - Ignition and fire, duration of about 200 s
 - Fire is out and no ventilation turned on, duration of about 200 s
 - Ventilation is turned on for about 800 s

LED units

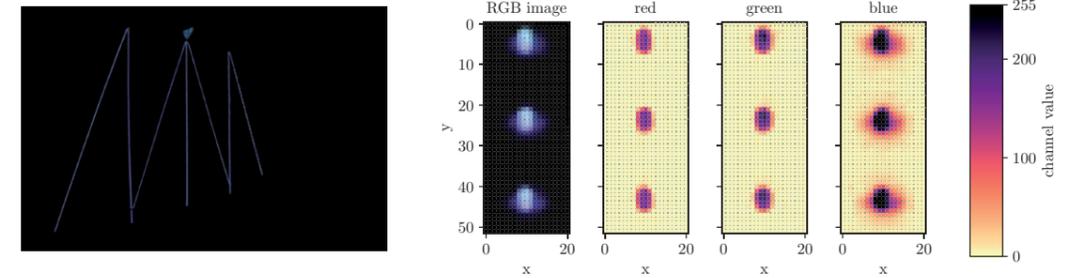


- Consumer product
- Three LED dots per unit
- Red, green and blue
- LED separation 1.67 cm
- About 140 units arranged on a line
- All LEDs are turned on and set to maximal intensity

FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 7



Captured Images



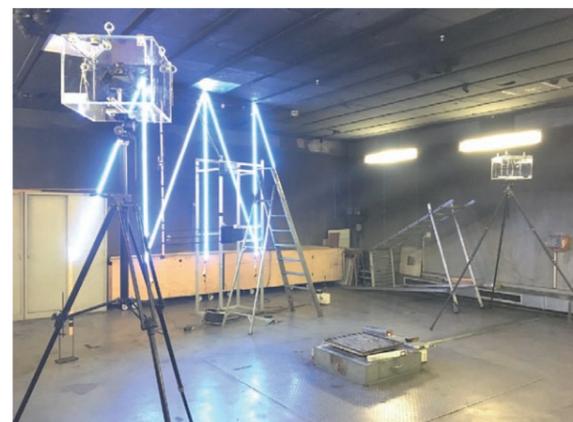
- Images taken every second
- Value range (for jpeg images) between 0 and 255
- Images split into red, green and blue channels

FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 9



Image capturing

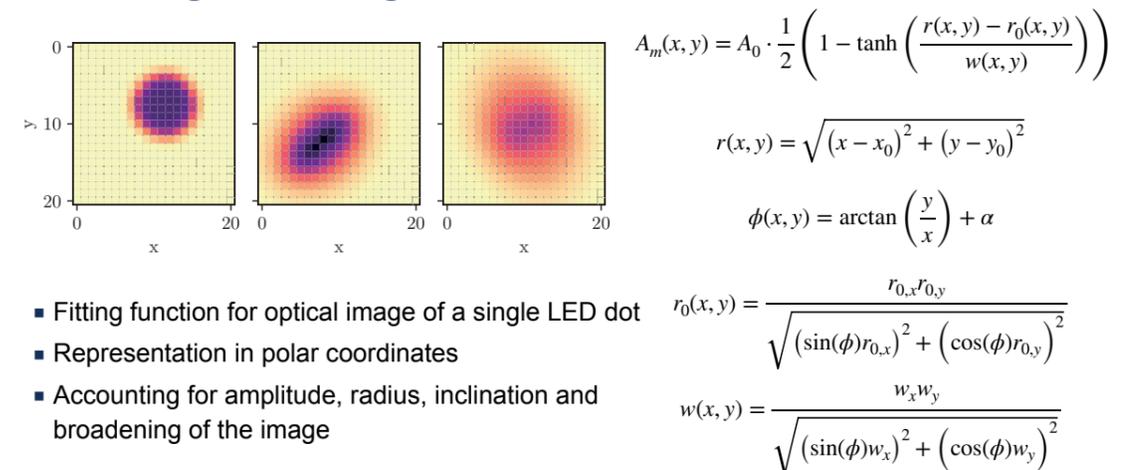
- Consumer CCD camera
- Full manual mode, i.e. fixed exposure time, focus and aperture as well as sensitivity
- Exposure set to not saturate LED images, low ISO number to limit noise
- High focal ratio for a long depth of field



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 8



LED Image Modeling Ansatz

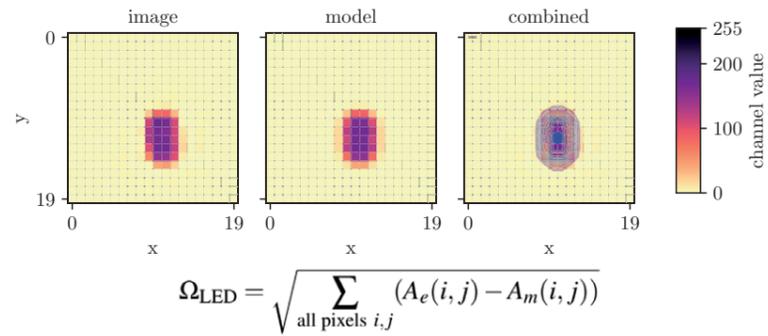


- Fitting function for optical image of a single LED dot
- Representation in polar coordinates
- Accounting for amplitude, radius, inclination and broadening of the image

FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 10

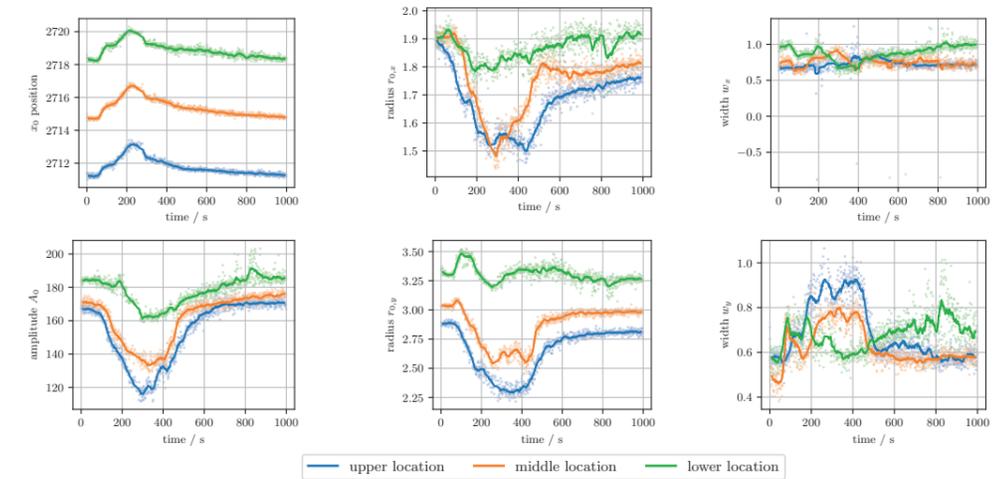


Fitting Model Parameters

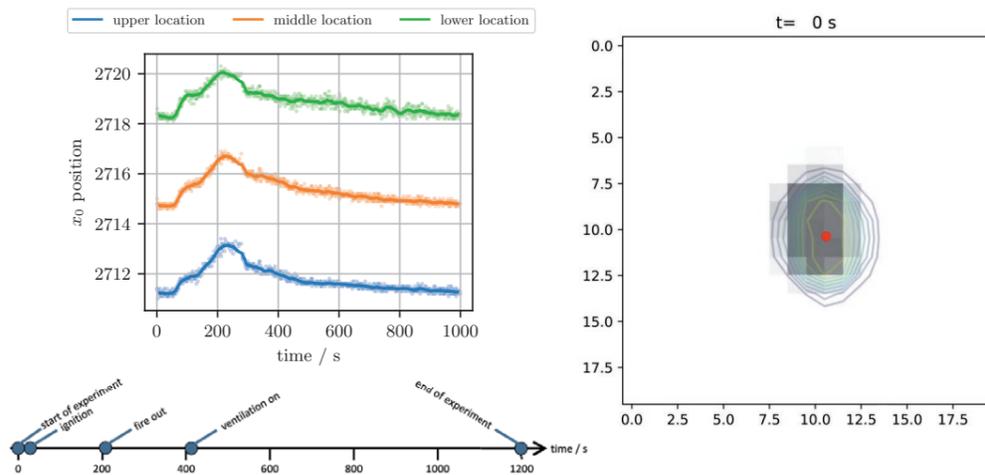


- Locate all LEDs on a reference image
- Optimise model parameters to represent LED image in a selected area
- In general very good representation

LED Parameters



Tracking LED Positions



Extinction Layer Model – Formulation

$$\tau = \int_s c_{ext} n(s) ds = \int_s \sigma(s) ds \quad \tau_j = \sum_{i=1}^{N_{layers}} \sigma_i \Delta s_{i,j} \quad I_{m,j} = \exp\left(-\sum_{i=1}^{N_{layers}} \sigma_i \Delta s_{i,j}\right)$$

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

- Find best matching parameters, here σ_i , to match the experimental LED intensities I_e
- Two weighting factors
 - ϕ_s : smoothness of the resulting function
 - ϕ_a : enforce low or high coefficients

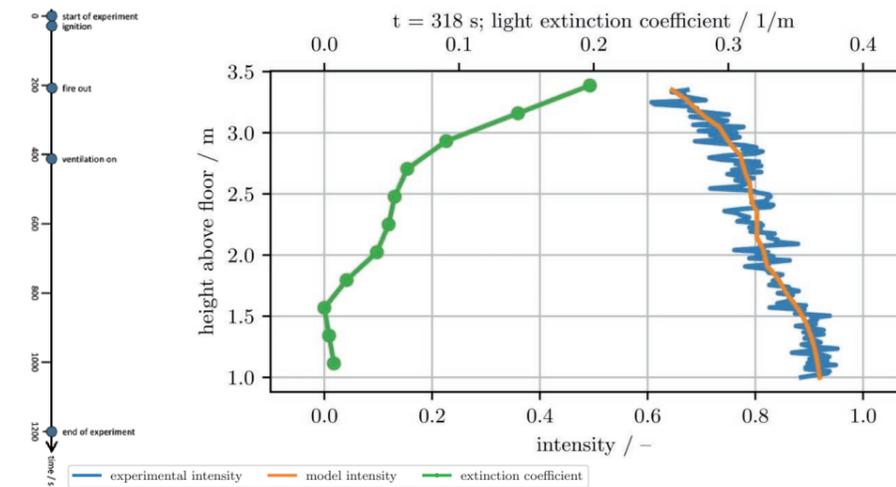
Extinction Layer Model – Formulation

$$\tau = \int_s c_{ext} n(s) ds = \int_s \sigma(s) ds \quad \tau_j = \sum_{i=1}^{N_{layers}} \sigma_i \Delta s_{i,j} \quad I_{m,j} = \exp\left(-\sum_{i=1}^{N_{layers}} \sigma_i \Delta s_{i,j}\right)$$

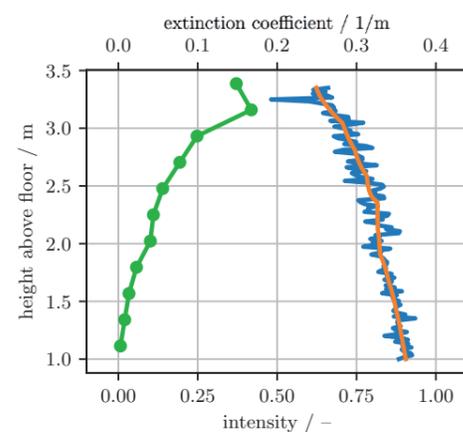
$$\Omega_{\sigma} = \sum_{j=1}^{N_{LEDs}} (I_{m,j} - I_{e,j})^2 + \phi_s \sum_{i=2}^{N_{layers}-1} (\sigma_{i-1} - 2\sigma_i + \sigma_{i+1}) + \phi_a \sum_{i=1}^{N_{layers}} \sigma_i$$

- Find best matching parameters, here σ_i , to match the experimental LED intensities I_e
- Two weighting factors
 - ϕ_s : smoothness of the resulting function
 - ϕ_a : enforce low or high coefficients

Model Evaluation – Temporal Development



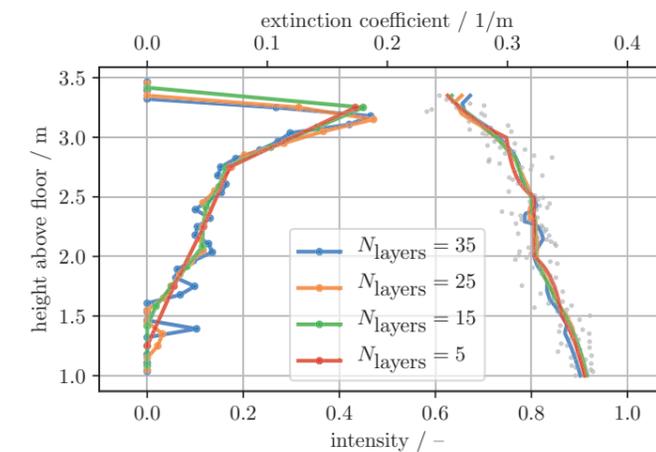
Model Evaluation – Single Frame



- Determine the amplitude of all LED visible on the image, here red channel only
- Use the experimental intensity to find minimum of the cost function
- Reduce the over-adaption to experimental data by reducing the number of layers or enforce smoothness
- If the LED signal vanishes or there are only few layer crossings, an amplitude tendency during optimisation must be specified and interpreted

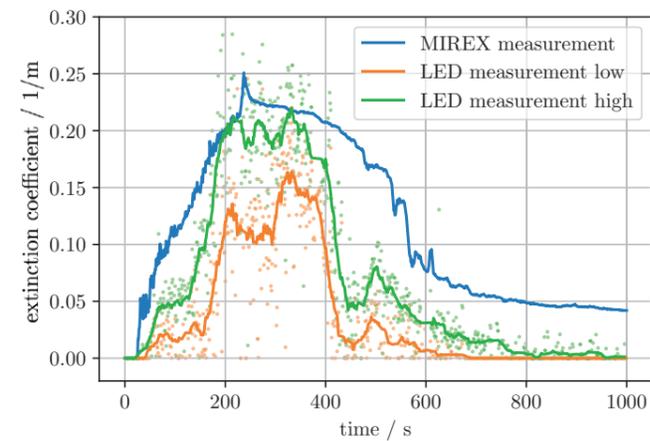
— experimental intensity — model intensity — extinction coefficient

Number of Layers



- No significant impact of the number of layers due to high signal fluctuations
- High layer numbers lead to weakly determined top layers

MIREX Comparison



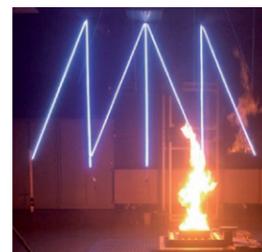
- Comparison of IR vs 'red' wavelengths:
 - reasonable and similar amplitude
 - disagreement in decay phase
- Plausible LED measurement, w.r.t. the experimental time line
- Result depends on amplitude constrains during optimisation, allows to estimate model's prediction interval

FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 19



Outlook

- Here, just the methodology – data capturing, analysis and modelling – is presented and demonstrated
- Future work includes
 - Evaluation of multiple strips and color channels
 - Sensitivity of the model and its ansatz
 - Reduction of long-term LED signal fluctuations
 - Combination with particle properties measurements (diameter and mass spectrum)
 - Use for CFD model validation
 - Smouldering fires (TF2)
- Analysis software is (to be made) publicly available



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 20

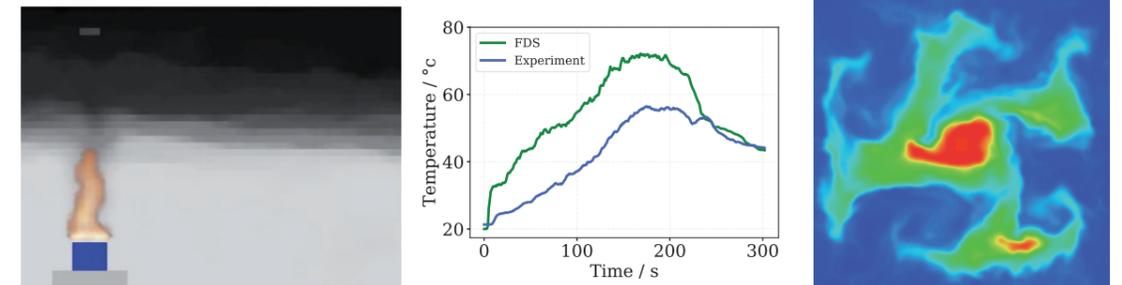


Prof. Dr. Lukas Arnold:

Sichtweitenbestimmung – Teil 2: Modellierung

Abstract:

FDS wird unter anderem zur Vorhersage der Rauchgasausbreitung und somit implizit zur Vorhersage von Sichtweiten genutzt. Um diese zu bestimmen müssen optische Eigenschaften des Rauchs definiert werden. Der Vortrag umreißt die physikalischen und historischen Zusammenhänge und erläutert woher die für diese Bestimmung eingesetzten Standardwerte in FDS herkommen. Anhand der in Teil 1 vorgestellten experimentellen Daten werden die Ergebnisse von FDS Simulationen diskutiert. Hierbei wird jedoch einzig der Poolbrand (TF-5) berücksichtigt, um die Modellierungsunsicherheiten zu reduzieren. Doch bereits in diesem recht einfachen Szenario können deutliche Unterschiede festgestellt werden.



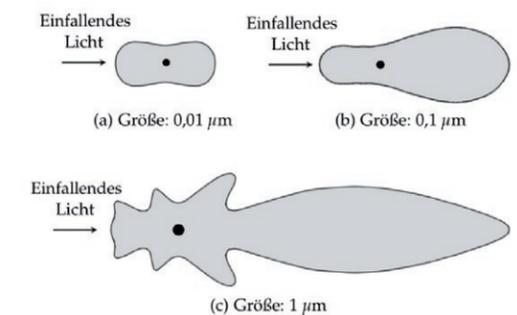
Part 2: Theory and Simulations

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft



Particle Light Absorption and Scattering

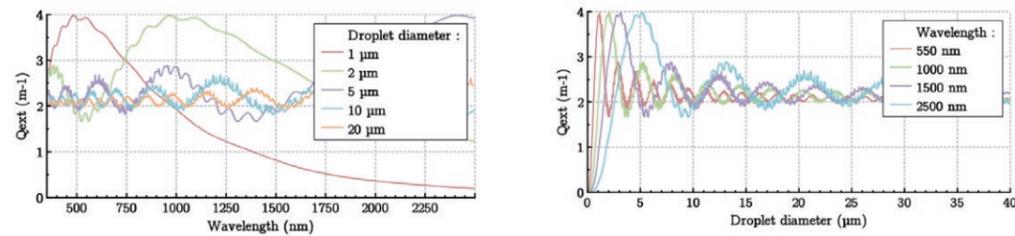
- Particle: structure with many molecules
- Light, i.e. electromagnetic waves, interacts with particle
- Interaction is in general complex, non-isotropic and depends on wavelength to particle size ratio
- Ratio limits:
 - Small particle – long wavelength, no / little interaction
 - Large particle – short wavelength, full absorption (reflection)



Pavlić, PhD thesis, 2014



Example Dependency on Wavelength and Diameter



Duthon et al., Applied Science, 2019

- Process modelled by Mie scattering
- Interaction of electromagnetic waves with spherical particles
- In general, cross section depends on the ratio of circumference and wavelength
- Example: light scattering of mist particles



Beer-Lambert Law

- Effective model for macroscopic description of absorption

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\tau)$$

$$\tau = \int_s c_{ext} n(s) ds = \int_s \sigma(s) ds$$

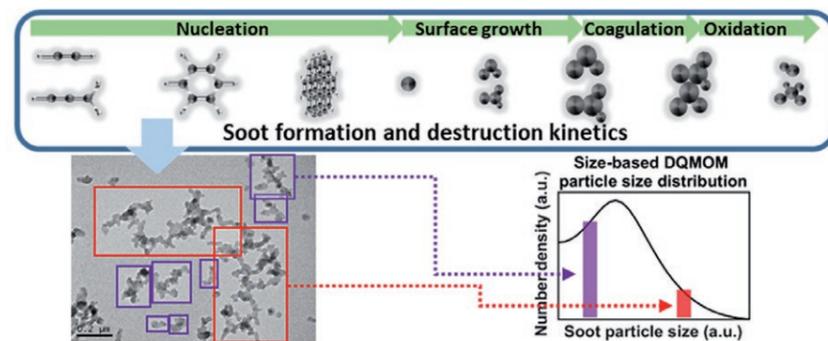
- Extinction coefficients are based on particle number, size and properties and wave length



Wikipedia



Aerosols – Soot Particles

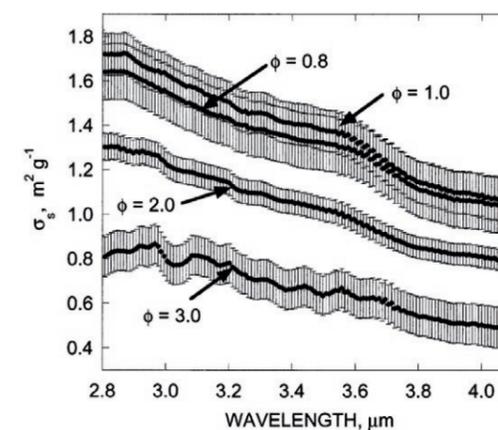


Wang et al., Journal of the Energy Institute, 2019

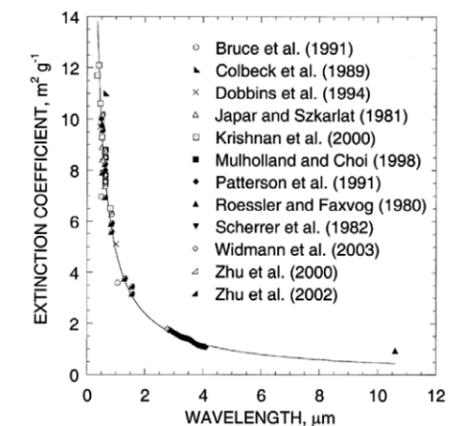
- No spherical shape
- No single size, particle size distribution
- Mie scattering based on equivalence diameter



Wavelength Dependency



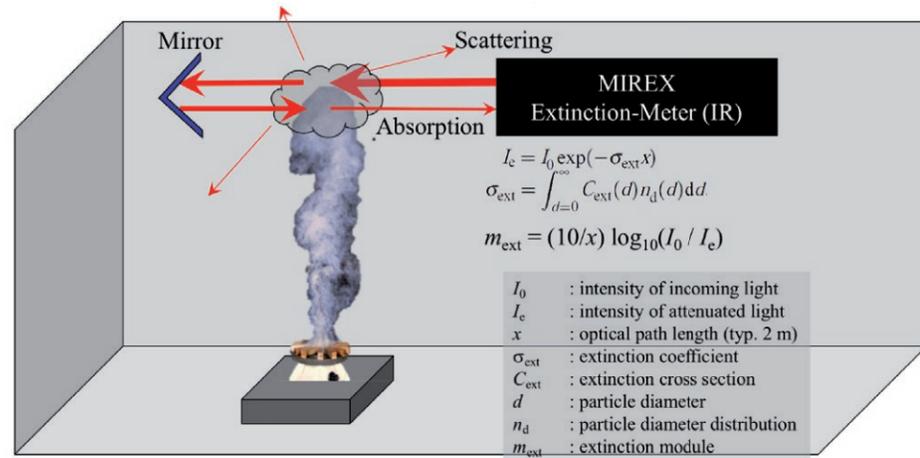
Widmann et al., Combustion and Flame, 2003



Widmann, Combust. Sci. and Tech., 2003



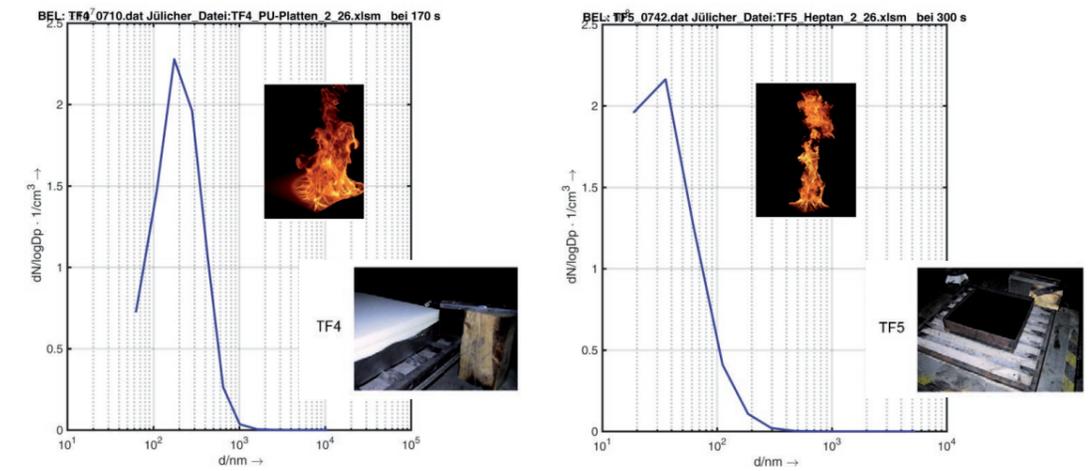
MIREX Measurement Principle



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 27



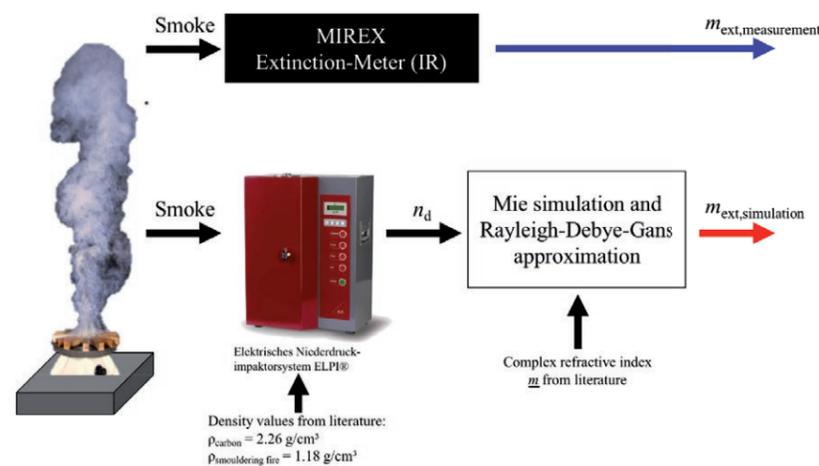
Particle Size Spectra



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 29



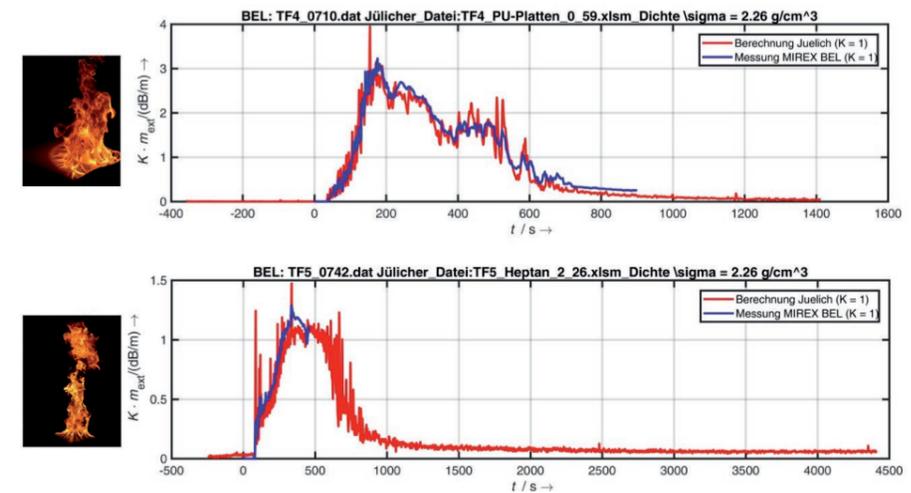
Measurement of Particle Number Density



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 28



Mie Simulation vs. MIREX Measurements



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 30



Light Extinction within FDS (FDS User Guide)

- Beer-Lambert law
- light extinction coefficient, K
- mass specific extinction coefficient, K_m

$$I/I_0 = e^{-KL} \quad K = K_m \rho Y_S$$

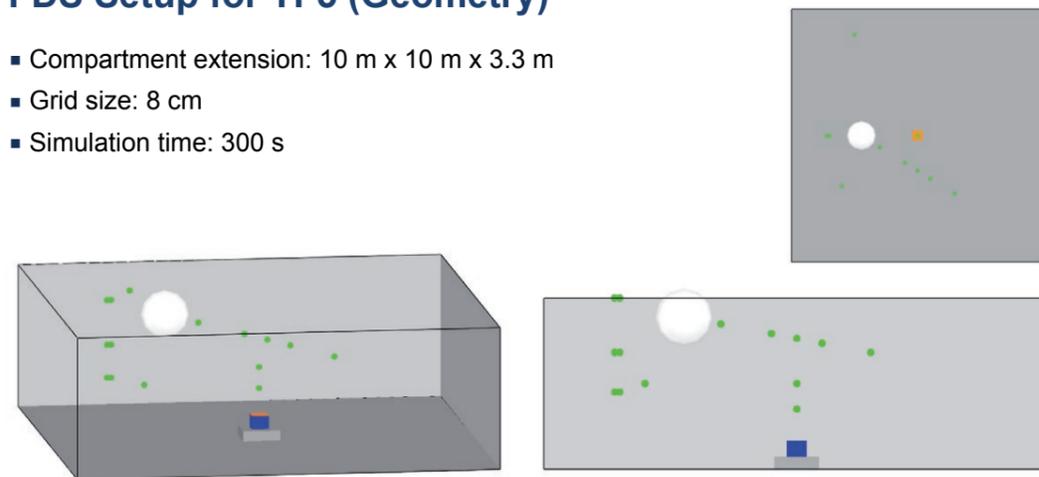
- 'MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT', default value 8700 m²/kg @ 633 nm
- Value ±1100 m²/kg, suggested for flaming fires
- 4000 m²/kg – 5000 m²/kg for smouldering fires
- Extinction depends on soot density (source and transport) and K_m

- Output quantity 'EXTINCTION COEFFICIENT' for K
- Output quantity 'OPTICAL DENSITY' for D

$$D \equiv -\frac{1}{L} \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = K \log_{10} e$$

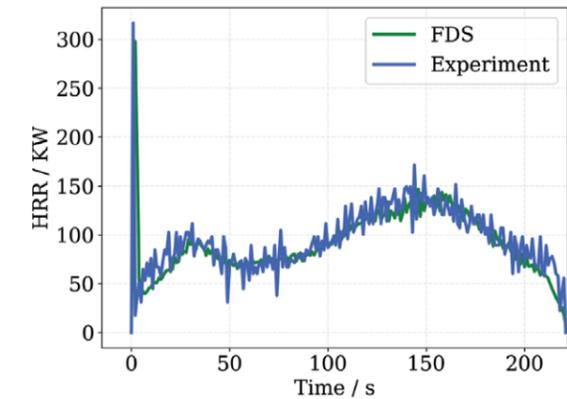
FDS Setup for TF5 (Geometry)

- Compartment extension: 10 m x 10 m x 3.3 m
- Grid size: 8 cm
- Simulation time: 300 s

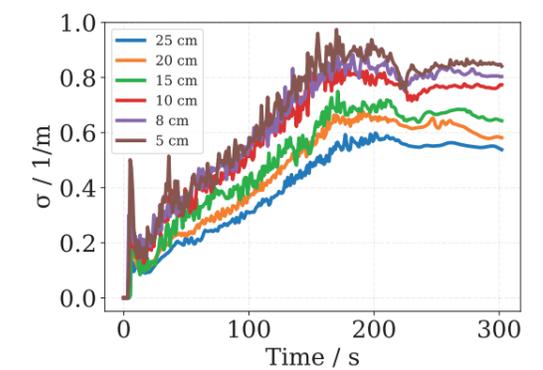
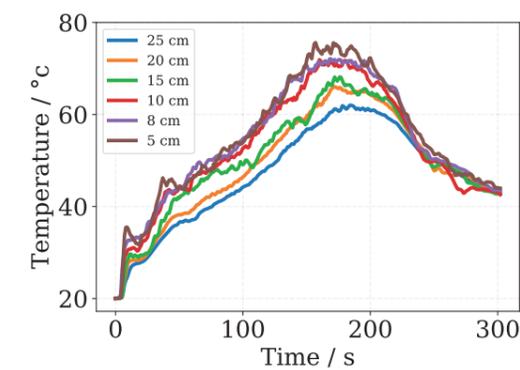


FDS Setup for TF5 – Design Fire

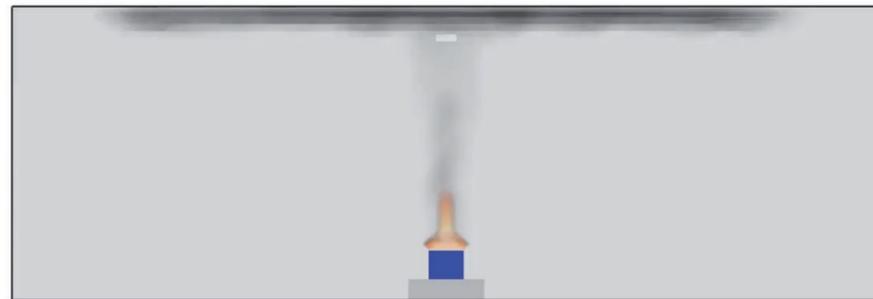
- 450 g heptane
- Measured fuel mass
- HRR based on heat of combustion and mass loss rate



FDS Setup for TF5 – Mesh sensitivity

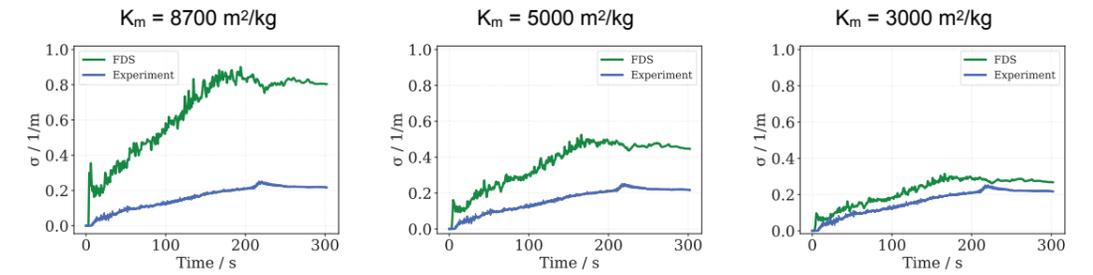


FDS Simulations – Smoke Spread



Time: 0.0

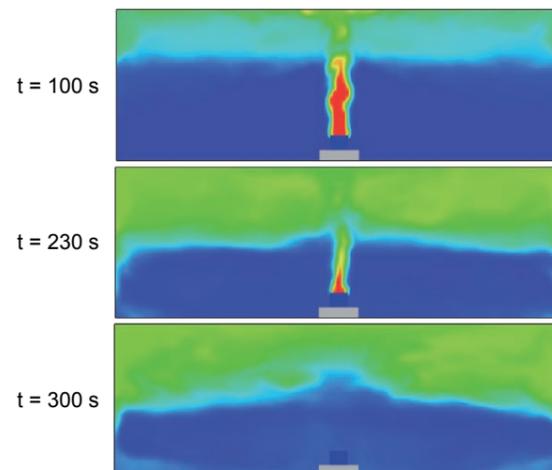
FDS Simulations – Comparison with MIREX Measurement



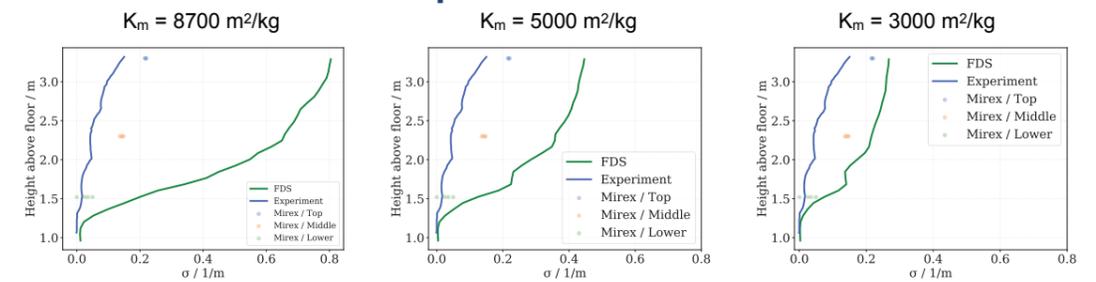
- Default values for K_m heavily over-predict the light extinction

FDS Simulations – Soot Concentration Layers

- Assumption of layers seems valid
- Layer moves down at walls



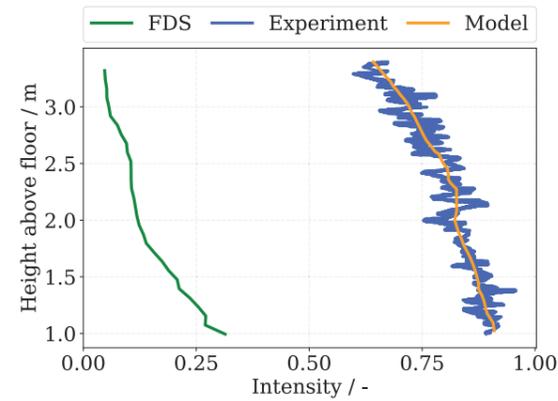
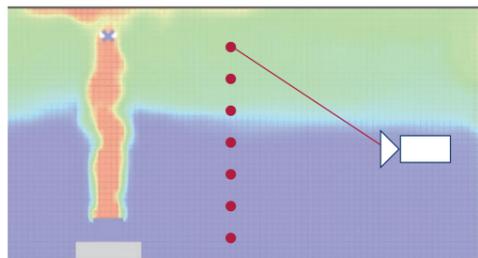
FDS Simulations – Comparison with LED Measurement



- comparison of extinction coefficient as a function of height
- $t = 300$ s

FDS Simulations – Comparison with LED Measurement

- Artificial LED strips
 - Use slice file data
 - Integration of Beer-Lambert law



Visibility Experiments

3. 装置と実験の概要
 装置の略図を Fig. 3 に示す。発煙は河紙 (東洋洋
 m のときには 10 cmφ に、15.5 m のときには 15 cmφ
 にした。観測は集煙箱の他端 (標識を設けた側の反対
 側) の一部を透明ガラスとし、箱の中をのぞき込むよ

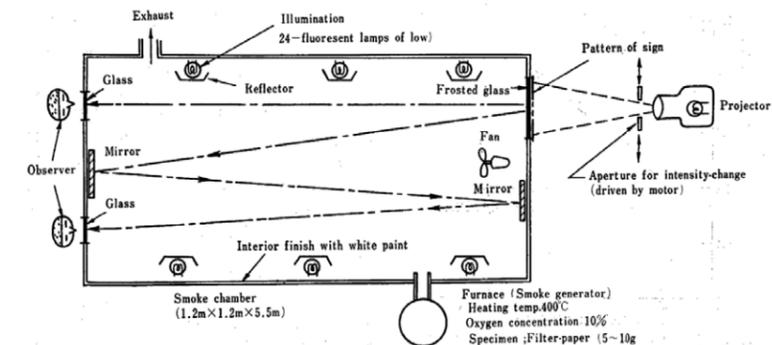
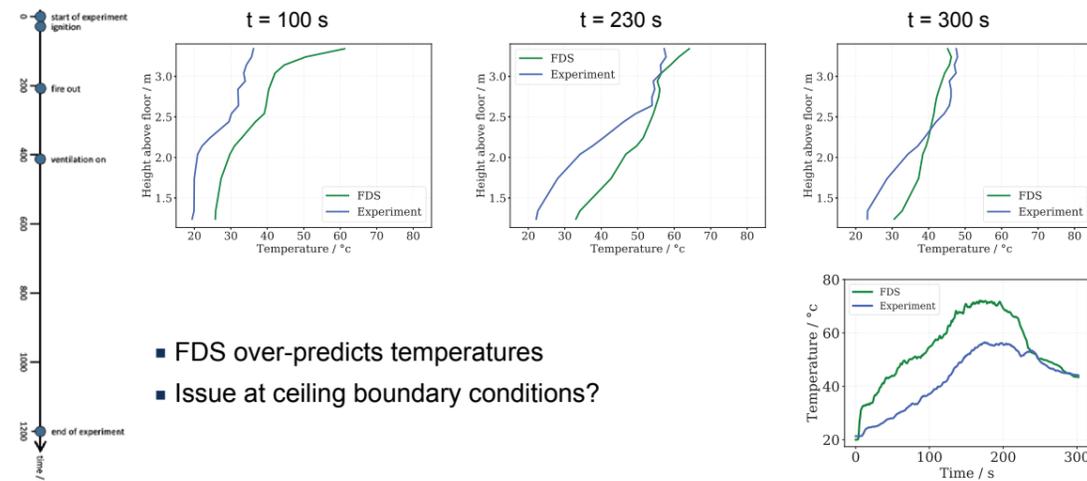


Fig. 3 Apparatus of smoke chamber.

Jin, Fire Prevention Society in Japan, 1970

FDS Simulations – Comparison with Temperature Measurement



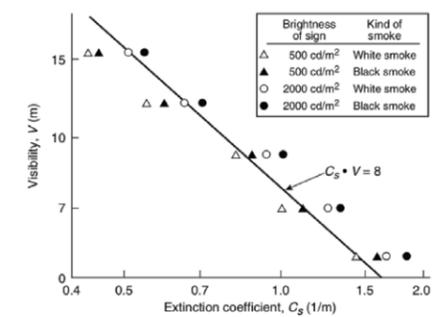
- FDS over-predicts temperatures
- Issue at ceiling boundary conditions?

Visibility as a Function of Light Extinction

- Relation of visibility and light extinction coefficient

$$S = C/K$$

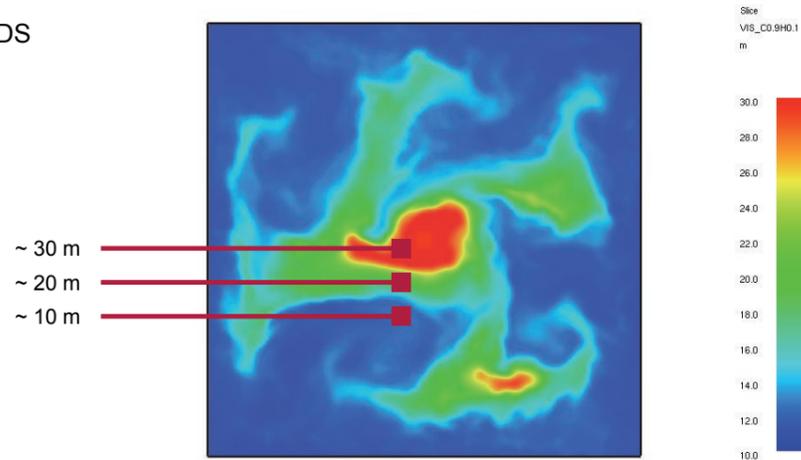
- Values for C, depending on type of sign
 - light emitting C = 8
 - light reflecting C = 3



SFPE Handbook, 5th edition, 2016

Visibility Computation in FDS

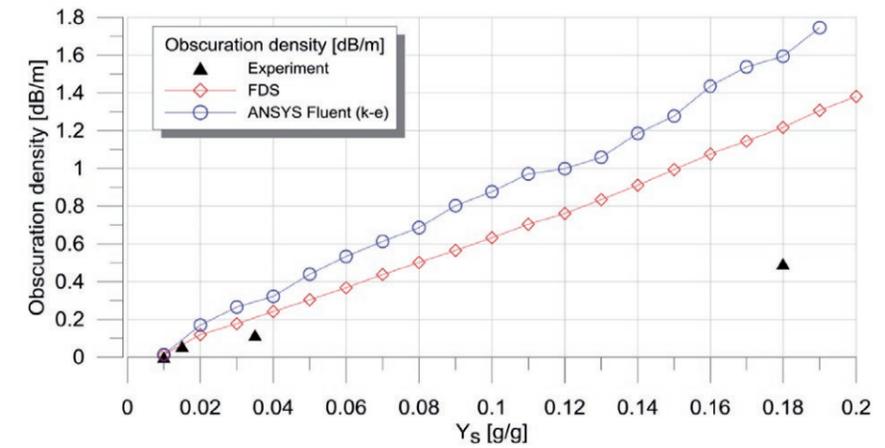
- Representation in FDS
 - local quantity
 - non-directional
 - applicability?



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 43



Comparison to Węgrzynski et al., Fire Safety Journal, 2017

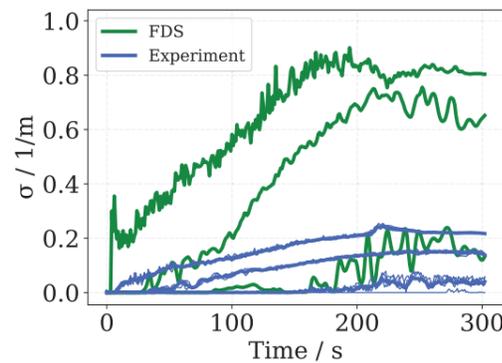


FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 45



Discussion of Simulation vs. Experimental Data

- Simulations were part of the ivbs workshop, same results produced by three participants
- What did we do wrong?
 - Focus on TF5 due to simple fire modelling
 - Simple geometry
 - Temperature as indicator for an issue?
- What consequences are induced?
 - Strong reduction of visibility (factor ~4)
 - Too conservative for ASET-RSET?

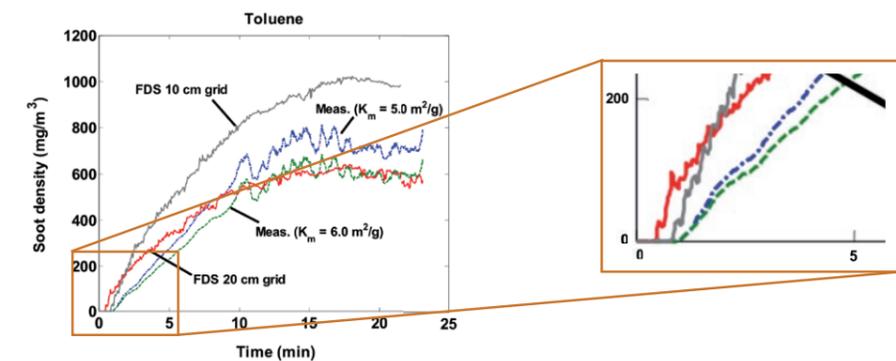


FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 44



Comparison to Rinne et al, VTT Report, 2007

- Soot density for TF5: 40 mg/m³ @ K_m=6000 kg/m²

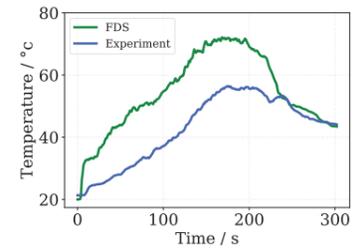


FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 46



Outlook

- Do we have a modelling issue?
- Investigate simulation deviations
 - Temperature field
 - Thermal boundary conditions
 - Velocity field
- Modelling topics
 - particle ageing
 - deposition on walls
 - leakage and obstacle impact
- Investigate other TF, new uncertainties
 - material parameters & pyrolysis
 - combustion



FDS User Group Meeting | Lukas Arnold et al. | 7.11.2019 | Slide 47

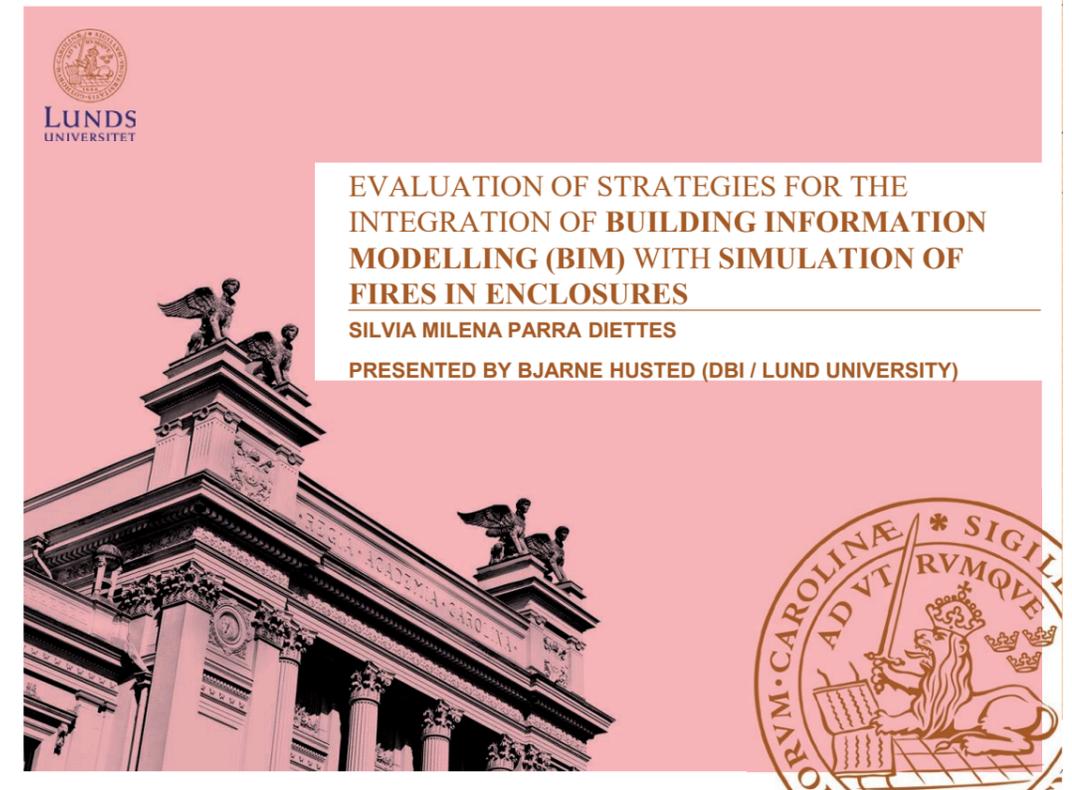


M. Sc. Silvia Milena Parra Diettes, Prof. Bjarne Husted, Dr. Pete Thompson:

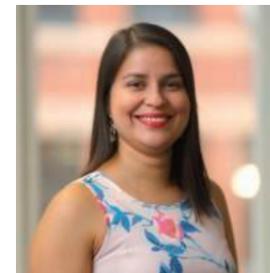
Evaluation of strategies for the integration of building information modelling (BIM) with simulation of fires in enclosures

Abstract:

In this study, different data-exchange options were investigated to migrate the information from BIM software to CFD, including concepts for the understanding of the different approaches and workflows for sharing BIM data such as Open BIM (use of vendor-neutral formats) and Closed BIM (use of proprietary formats). The Open BIM approach and its leading file format, Industry Foundation Classes (IFC), was explored in more detail to understand the different Model View Definitions offered in the IFC format, its data structure and versions. The study identified the relevant information contained in the BIM model and the data losses that occur when bringing this information into FDS using Pyrosim. Further, a Python based tool was developed, which mitigate the data losses during the transfer to FDS.



Author



Silvia Parra Diettes
Holmes fire, Australia

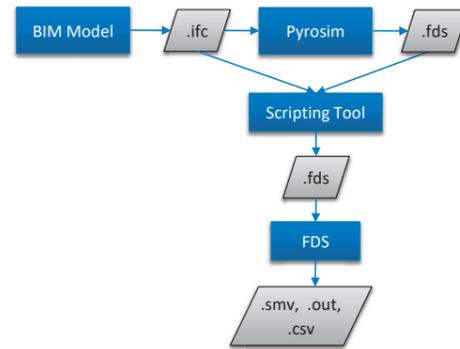


Pete Thompson, Co-supervisor
Autodesk (Revit development
team), Scotland
Lund University, Sweden



Introduction

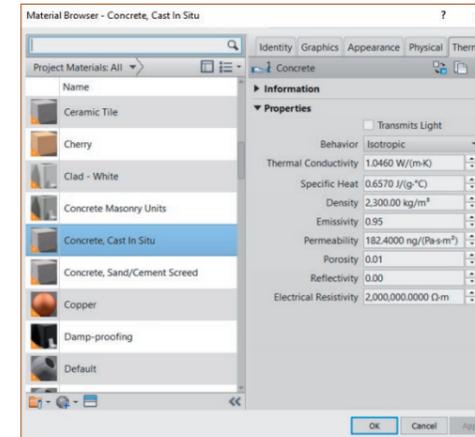
1. Building Information Modelling.
2. Simulation of Fires in Enclosures.
3. Evaluation of parametric definitions in different building models.
4. Scripted enhancement to FDS data from IFC
5. FDS results
6. Limitations and future work



Implementation workflow diagram



Information: Material properties



Thermal conductivity (k) [W/m*K]

Specific Heat (C) [J/g*°C]

Density (ρ) [kg/m³]

• Thickness (δ) [m]



Building Information Modelling (BIM)



- Detailed 3D drawing
- Information
- Collaboration
- Decision making
- Project Life Cycle



Computational Fluid Dynamics (CFD)

Study of fluid flows in systems to analyse associated phenomena such as chemical reactions or heat transfer by scenarios simulated in a computer-based environment.



Objective 1

Determine methodologies of **coupling** BIM and CFD through a **suitable data-exchange**.



Approaches for data exchange

Closed BIM

- Proprietary formats



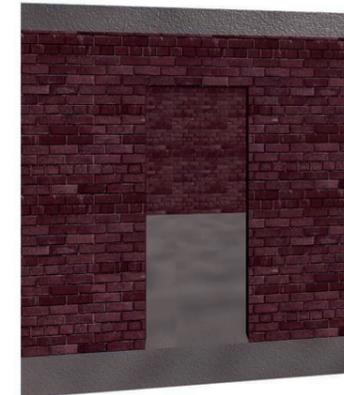
Open BIM

- Vendor-neutral formats

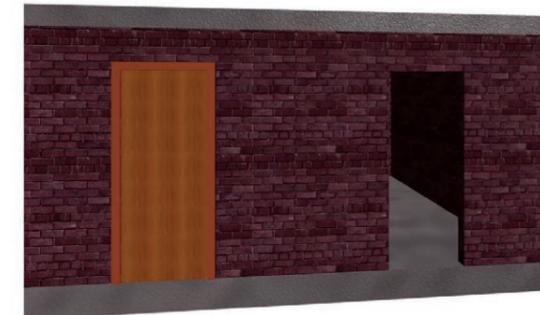


Building models

Basic Building model

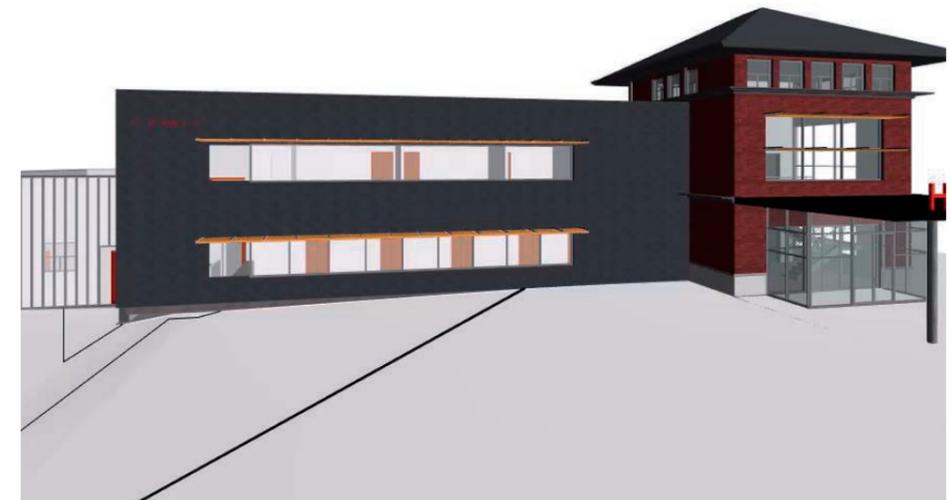


Two-Room model

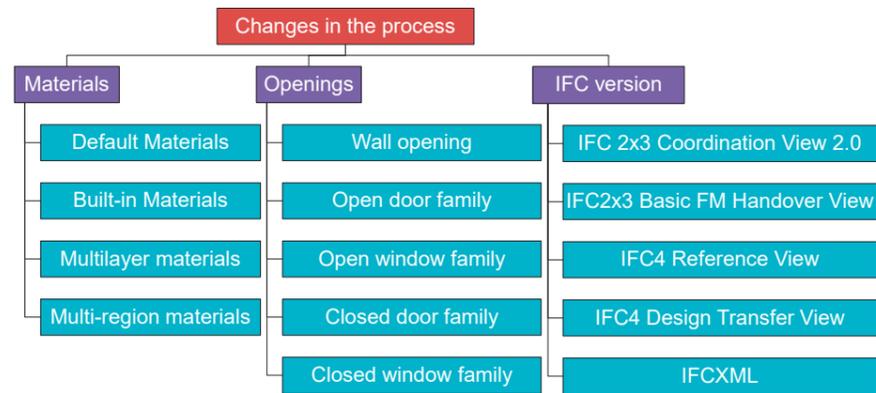


Building models

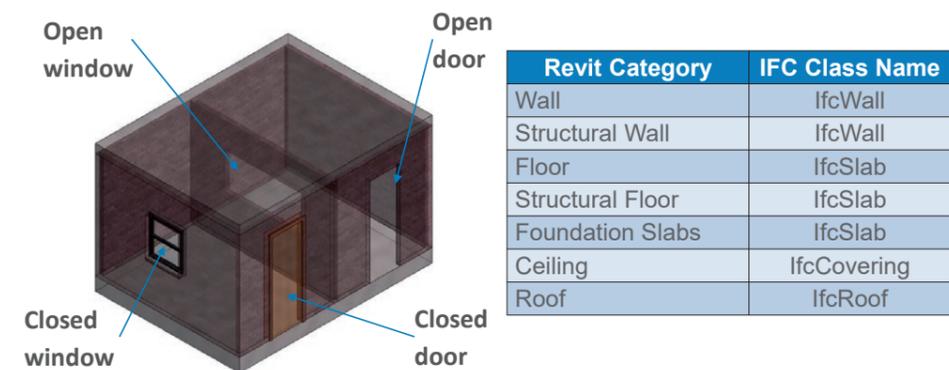
Health Center



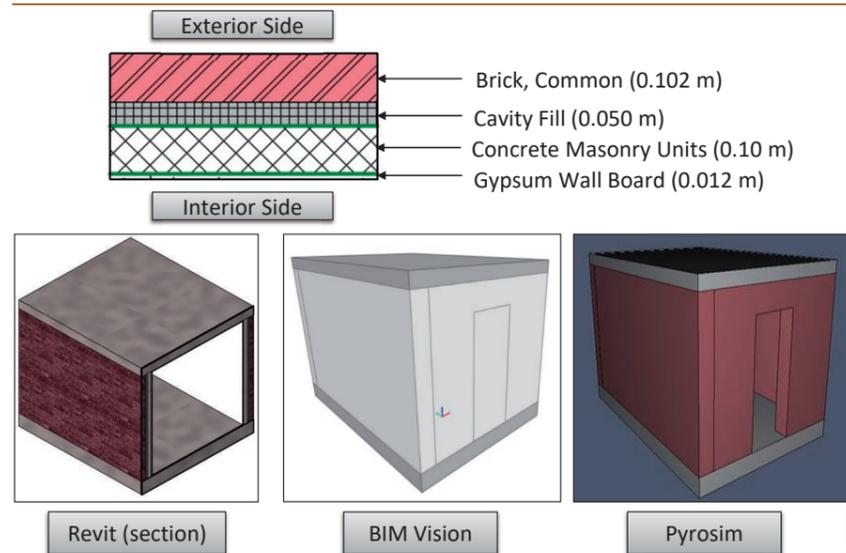
Parametric definitions and adjustments



Changes in type of opening

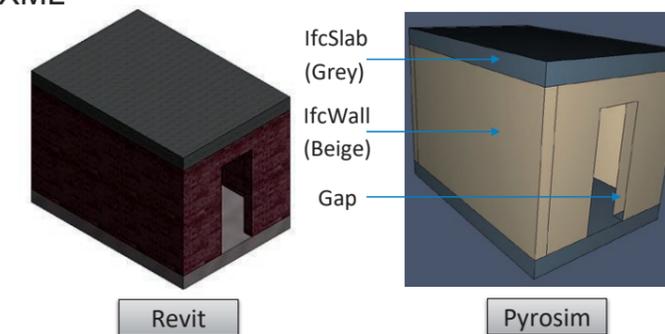


Changes in materials: Multilayer



Changes in IFC version

- IFC4 Reference View
- IFC4 Design Transfer View
- IFCXML



Thermal properties in IFC:

$$\text{Heat transfer coefficient} = \frac{\text{Thermal Conductivity} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]}{\text{Thickness}}$$

$$\text{Thermal mass} = \text{Density} \times \text{Thickness} \times \text{Specific heat} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

$$\text{Thermal Resistance} = \frac{\text{Thickness}}{\text{Thermal Conductivity} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]}$$

- Multilayer materials are not supported
- Density is not included in the IFC property sets

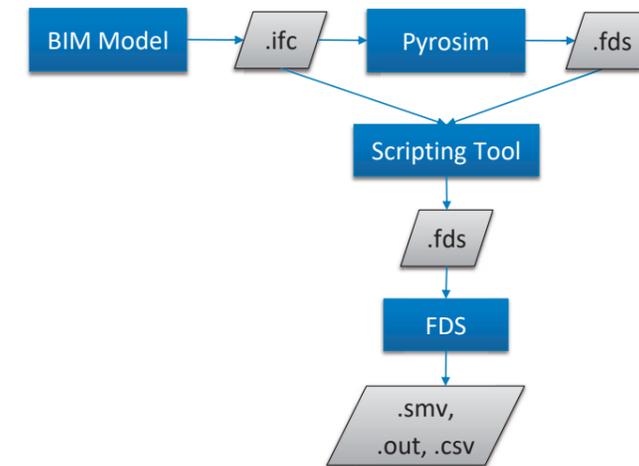


Objective 2

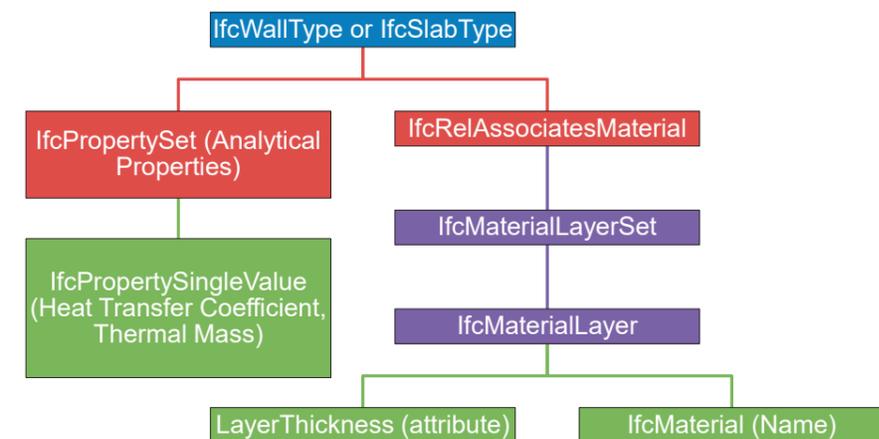
Create and evaluate a **prototype tool** to address shortcomings in the model data transport from BIM to CFD



Implementation process



IFC structure: Walls and Slabs



Scripting Tool - Python

$$\text{Specific heat} = \frac{\text{Thermal mass}}{\text{Density} \times \text{Thickness} \times 1000} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\text{Thermal Conductivity} = \text{Heat Transfer Coefficient} \times \text{Thickness} \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Density: by pre-defined values in a list

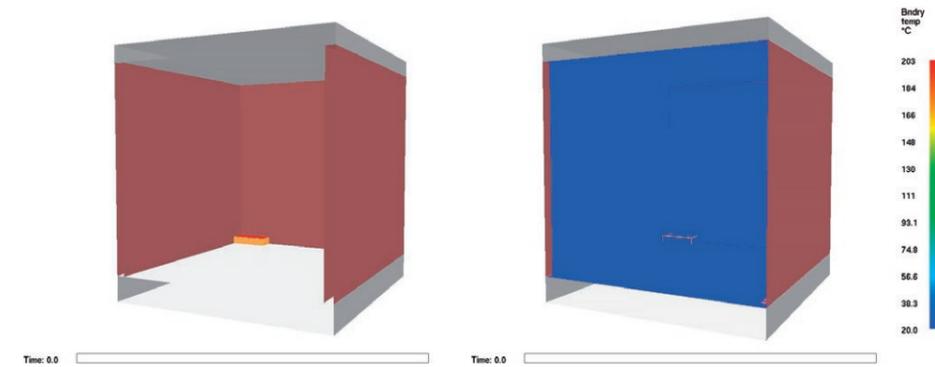
```

Location Pane x  DA:_Python_thesis\FC_FDS_Tool\FC_FDS_Tool_v20_iso_room_v13\iso_room_v13.fds  DA:_\FC_FDS_Tool\FC_FDS_Tool_v20_iso_room_v13\fdx_new_file.fds
&MATERIAL ID='Concrete, Cast In Situ(1)',
SPECIFIC HEAT=0.657,
CONDUCTIVITY=1.0460000000000001,
DENSITY=2300.0,
EMISSIVITY=0.95/
&MATERIAL ID='Brick, Common',
SPECIFIC HEAT=0.84,
CONDUCTIVITY=0.54,
DENSITY=1550.0,
EMISSIVITY=0.95/
&SURF ID='Concrete, Cast In Situ(1)',
BACKING='VOID',
MATERIAL ID(1,1)='Concrete, Cast In Situ(1)',
MATERIAL MASS FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.3,
COLOR='SILVER'/
&SURF ID='Brick, Common',
BACKING='VOID',
MATERIAL ID(1,1)='Brick, Common',
MATERIAL MASS FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.1,
RGB=170,100,105/
&SURF ID='Concrete, Cast In Situ',
BACKING='VOID',
MATERIAL ID(1,1)='Concrete, Cast In Situ',
MATERIAL MASS FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.1,
RGB=170,100,105/
    
```

Diff tool: WinMerge



FDS results: Basic Building

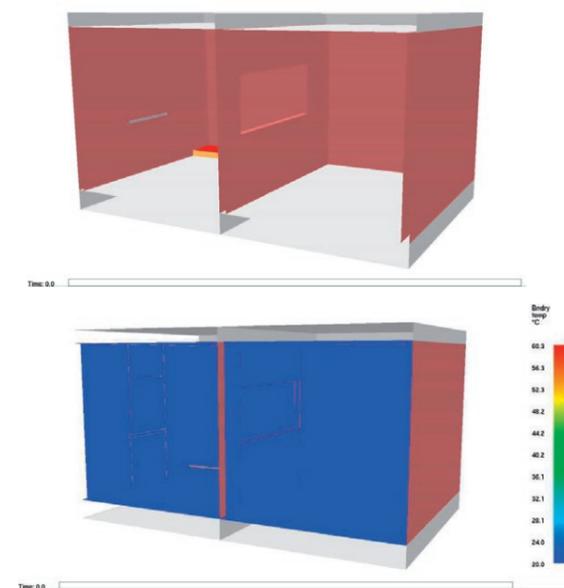


Objective 3

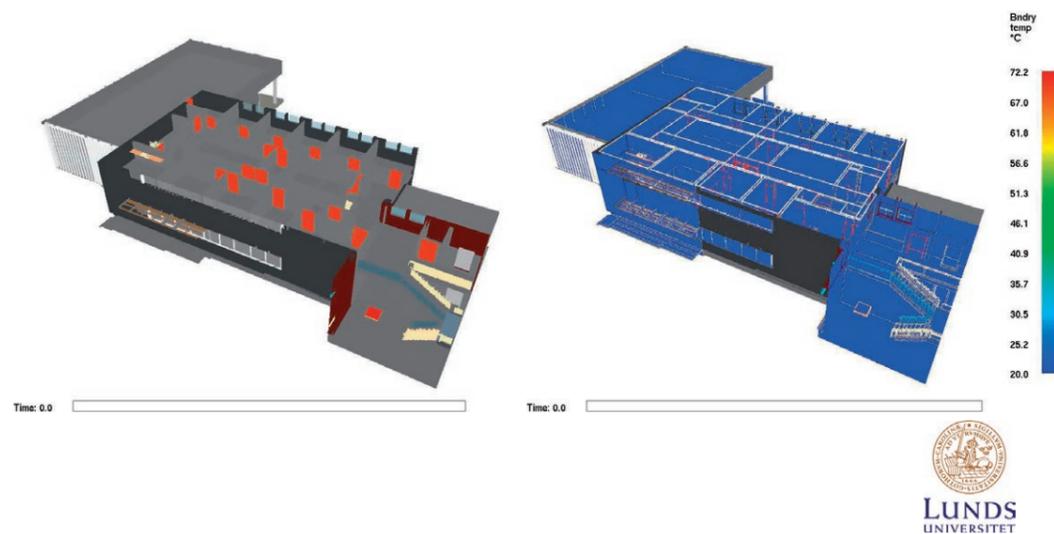
Evaluate the feasibility of performing a CFD simulation of a fire event in a case study by the use of information obtained from BIM



FDS results: Two-room Building



FDS results: Health Center



Objective 4

Identify the **required data in BIM** to get the necessary input for simulating a fire in CFD

Required data

BIM use:

- To **forecast** the future performance of the building by a fire scenario.
- To **generate** information during the design phase.
- To **transform** this information into an open format such as IFC.

Geometry:

- Arrangement of obstructions
- Openings

Information:

- Thermal properties of the construction materials of floors, walls, ceilings and roofs

Objective 5

Analyse **limitations and challenges** during the implementation for integrating BIM with CFD and **communicate** these outcomes to developers and researchers.

Limitations

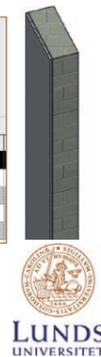


Family: Basic Wall			
Type: LMSStud - 4 7/8" Partition			
Total thickness: 0' 4 7/8"			
Resistance (R): 21.1904 (h·ft²·°F)/BTU			
Thermal Mass: 1.4406 BTU/°F			
Layers			
	Function	Material	Thickness
1	Finish 2 [5]	Gypsum Wall Board	0' 0 5/8"
2	Core Boundary	Layers Above Wrap	0' 0"
3	Structure [1]	Metal Stud Layer	0' 3 5/8"
4	Core Boundary	Layers Below Wrap	0' 0"
5	Finish 2 [5]	Gypsum Wall Board	0' 0 5/8"

No information about the detailed properties of each material layer.

No difference when the fire is located in one side or the other.

Family: Basic Wall			
Type: Elevator Wall			
Total thickness: 1' 1"			
Resistance (R): 1.4308 (h·ft²·°F)/BTU			
Thermal Mass: 26.0694 BTU/°F			
Layers			
	Function	Material	Thickness
1	Finish 1 [4]	Gypsum Wall Board	0' 0 5/8"
2	Finish 1 [4]	Metal Furring	0' 0 3/4"
3	Core Boundary	Layers Above Wrap	0' 0"
4	Structure [1]	Concrete Masonry Units	0' 11 5/8"
5	Core Boundary	Layers Below Wrap	0' 0"



Final Conclusions

- The use of BIM for the simulation of fires should be done together fire safety engineering concepts and the understanding of limitations of both, BIM and CFD.
- The Scripting tool enhanced the FDS input file from Pyrosim with thermal properties of the construction materials by using information from the IFC file.
- It is feasible to perform CFD simulations with information taken from a BIM model, as shown in the implementation process on the three different buildings.
- More software development should be done to achieve a higher degree of integration of BIM with CFD.



Potential Future Work

- Wider library of material densities, for example by the use of .adsklib
 - Information related to fire size, type of fuel, or mesh size
 - Allow to work in Imperial Units
 - Name surfaces by element type instead of the outer material layer
 - Export material properties for each material layer
 - Support multilayer materials
 - Interpret materials from BIM as the materials of FDS
- Scripting tool
- Pyrosim
- Revit IFC export Tool
- Pyrosim or Scripting Tool



Want to know more

Silvia's M.Sc. thesis

<https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8983643>



By Silvia Milena Parra Diettes, International Masters in Fire Safety Engineering (IMFSE); Bjarne Husted, Lund University; Pete Thompson, Lund University & Autodesk Inc.



M. Sc. Gregor Jäger, Dipl.-Ing. (FH) Christian Kraft, M. Sc. Manuel Osburg:

Simulation der Flammenwirkung an der inneren Gebäudeecke

Abstract:

Auf dem Gelände der Brandprüfstelle der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen (MFPA) Leipzig mbH in Laue wurden durch die MFPA Leipzig GmbH, die Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig und dem Landeskriminalamt Sachsen in den Jahren 1996 bis 2012 insgesamt ca. 400 Brandversuche im Originalmaßstab durchgeführt und durch die Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig ausgewertet und in einer Artikelreihe veröffentlicht.

In diesem Vortrag soll die Validierung des Programms Fire Dynamics Simulator (FDS) durch Vergleich mit den Auswertungen von Brandversuchen in Räumen gezeigt, die Anwendbarkeit auf unterschiedliche Problemstellungen überprüft und mögliche Fehlerbandbreiten und Schwachstellen unter Berücksichtigung des von Münch [1] vorgestellten Konzeptes erfasst werden. Zu Beginn wird der Brandversuch BV05-20 - Brand eines Wohnraumes anhand des vorliegenden Versuchsberichtes [2,3] und der Experimentaldaten vorgestellt. Der Brandversuch BV05-20 war Teil einer sechsteiligen Versuchsreihe im Jahr 2005, mit denen die Flammenwirkung an der inneren Gebäudeecke untersucht wurde [4]. Die Anforderung nach § 30 (6) MBO über den erforderlichen Abstand von 5 m zwischen Öffnungen von benachbarten Brandabschnitten, die über Eck zusammenstoßen, sollte überprüft werden. Insgesamt liegen der Auswertung dieser Fragestellung 29 Versuche aus dem Zeitraum von 1997 bis 2005 zu Grunde. Bei den Versuchen im Jahr 2005 wurden insbesondere die Wärmestrahlung an der Eckwand, die thermische Belastung von Bauglas und die Entzündung von brennbaren Materialien ermittelt und ausgewertet.

Der zweite Teil des Vortrages umfasst die Modellierung des Prüfstandes und des Bemessungsbrandes, den Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Experiment mit aktuellen Veröffentlichungen [5, 6].

Literatur

- [1] Matthias Münch. Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr. Forschung im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr. Berlin: Verl. INURI, 2013.
- [2] Erhardt Wilk. Dokumentation zu Originalbrandversuchen. Techn. Ber. Leipzig: Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, 2015.
- [3] Erhardt Wilk. Versuchsbericht zu dem Brandversuch BV05-20. Techn. Ber. Leipzig: Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, 2015.
- [4] Erhardt Wilk, Ingolf Kottho und Markus Scheide. \Der Brand in Räumen - Teil 7". In: vfdb - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 63.3 (2014), S. 130-147.
- [5] Jakob Degler und Andreas Eliasson. \A Priori Modeling of the Tisova Fire Test in FDS". Bachelor Thesis. Lulea University of Technology, 2015.
- [6] Jochen Zehfuß. \Festlegung von Bemessungs-Brand Szenarien und Bemessungsbränden". In: vfdb - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 68.3 (2019), S. 159-167.



Flammenwirkung an der inneren Gebäudeecke Simulation mit Fire Dynamics Simulator

08.11.2019 | Gregor Jäger, Christian Kraft, Manuel Osburg |

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

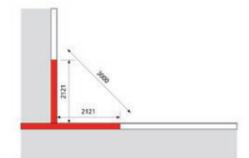
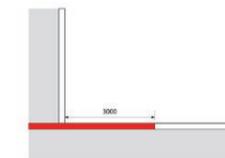
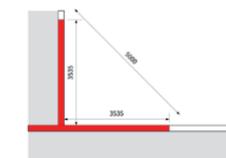
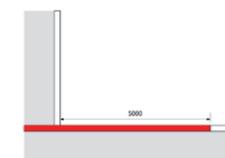


Brandwände – Horizontale Abschottung

Bauordnungsrechtliche Anforderungen [7]

Musterbauordnung (MBO)
Sächsische Bauordnung (SächsBO)

Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen
(BauO NRW)



Verifizierung und Validierung

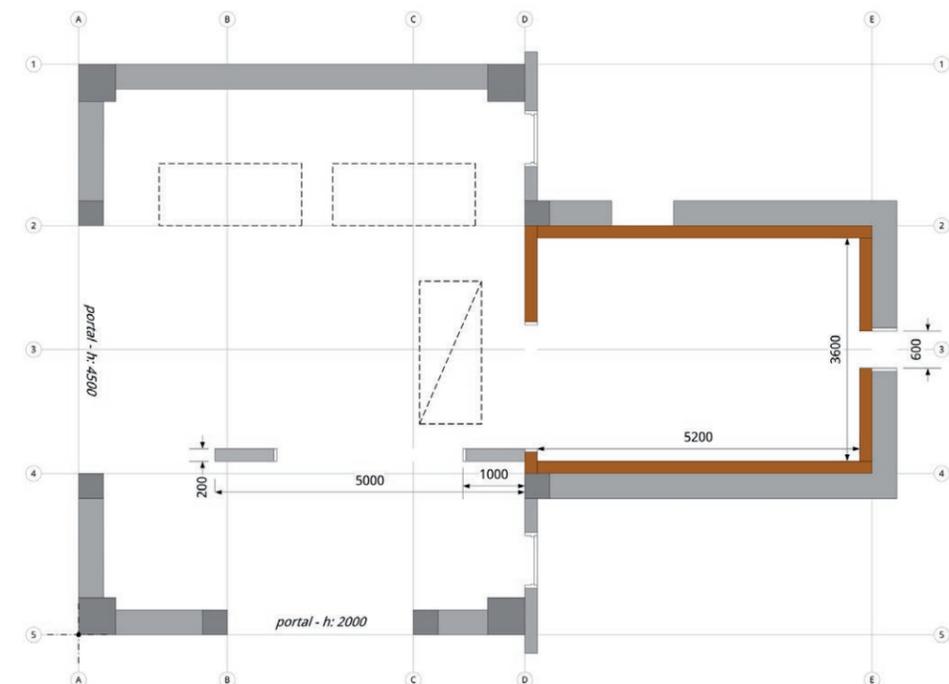
Klassifizierung nach Münch [3, S. 21]

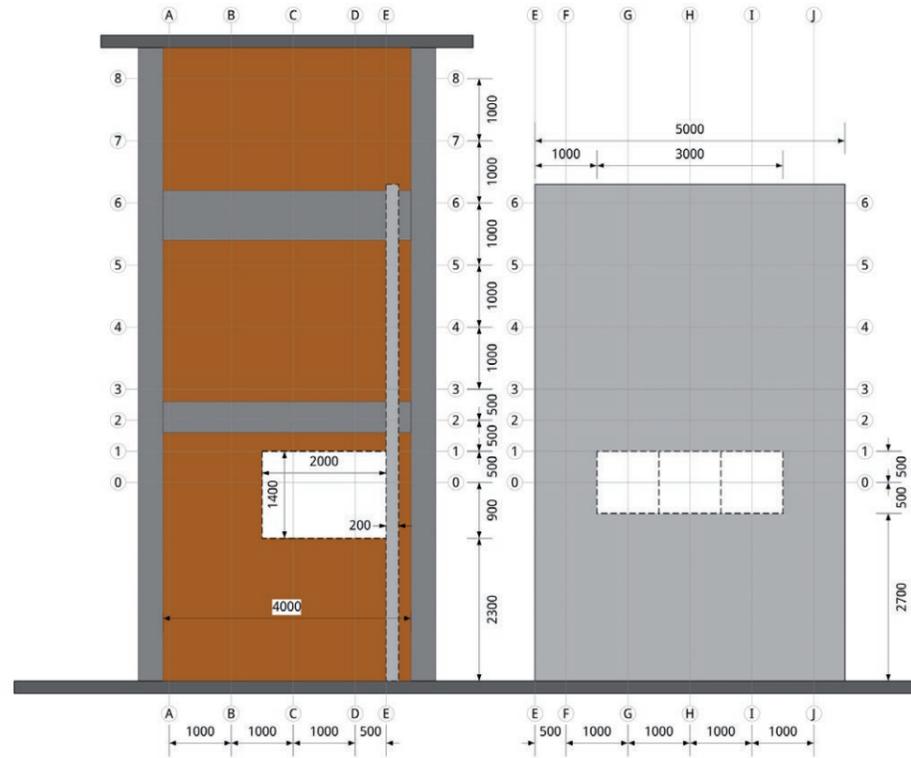
- Analytische Tests
- Numerische Tests
- Semi-experimentelle Tests
- experimentelle Tests
 - „*A priori*“ -Vergleich
 - „*Blind*“ -Vergleich
 - „*Offener*“ Vergleich

Brandversuch BV05-20 [4, 5]

- Brandstoff und Verbrennung
- Messtechnik
 - Thermoelemente
 - Wärmestahlungsaufnehmer
 - Rauchgasanteile (CO₂, O₂, Ruß)
 - Druck
- Analyse
 - Wärmefreisetzungsrate
 - Wandtemperatur, Wärmestrom

Brandversuch BV05-20





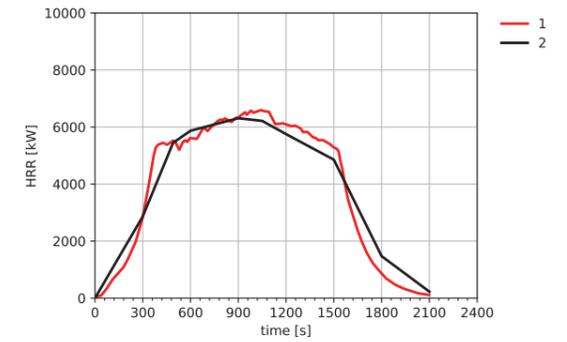
Brandversuch BV05-20

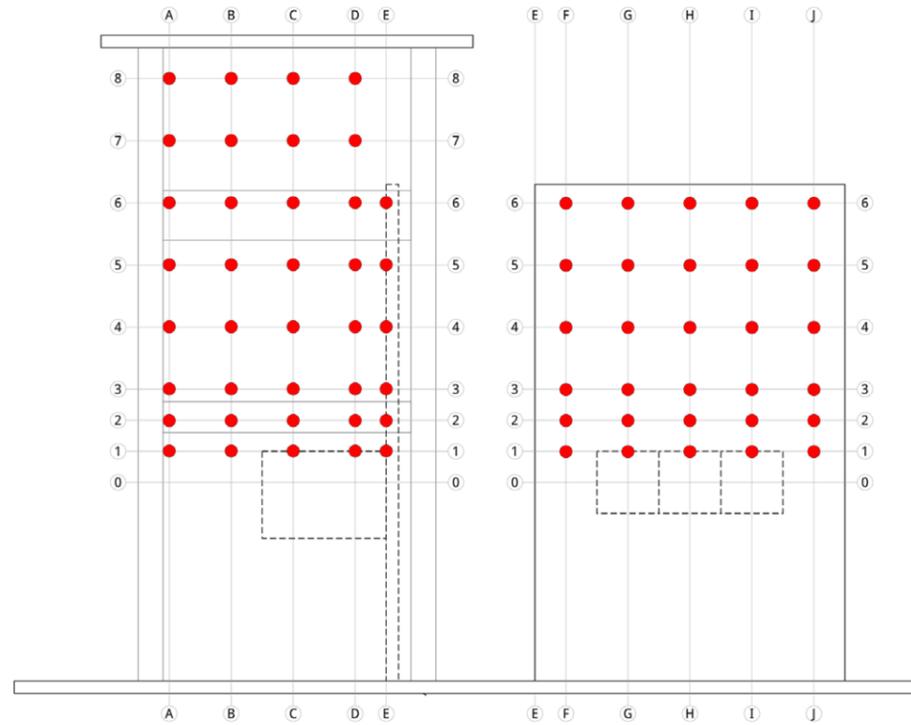


Brandversuch BV05-20

Wärmefreisetzung

- Messtechnik:
 - Abbrandwaage
 - Sauerstoffverbrauchsmethode nach DIN 18230-2
 - Enthalpiestrom nach DIN 4102-19
 - Zeit-Temperatur-Kurve
- Messdaten:
 - 1 Mittelwert
 - 2 Wärmefreisetzungskurve für Simulation [5]

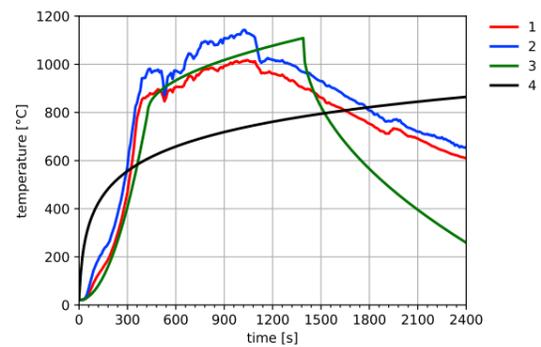




Brandversuch BV05-20

Temperaturen im Brandraum

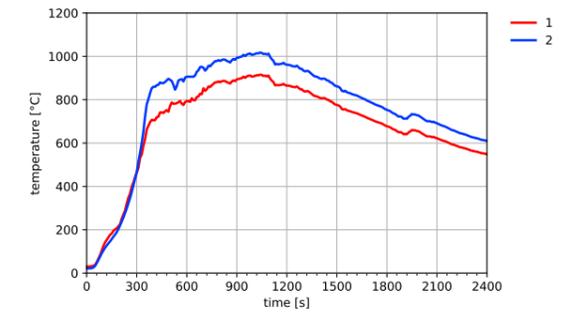
- Messtechnik:
 - Mantelthermoelement, 1 mm bis 3 mm, Ni-CrNi
- Messdaten:
 - 1 Mittlere Temperatur im Brandraum
 - 2 Maximale Temperatur im Brandraum
 - 3 Naturbrandkurve nach DIN EN 1991-1-2
 - 4 Einheitstemperaturzeitkurve



Brandversuch BV05-20

Temperaturen an der Brandraumöffnung

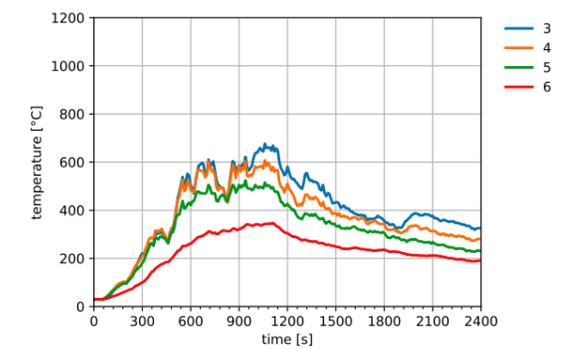
- Messtechnik:
 - Mantelthermoelement, 1 mm bis 3 mm, Ni-CrNi
- Messdaten:
 - 1 Mittelwert der Messstellen C1 und D1
 - 2 Mittlere Brandraumtemperatur



Brandversuch BV05-20

Temperaturen über der Höhe der Fassade

- Messtechnik:
 - Mantelthermoelement, 1 mm bis 3 mm, Ni-CrNi
 - Wärmestahlungsaufnehmer
- Messdaten:
 - 3 Messreihe 3 (1 m üS)
 - 4 Messreihe 4 (2 m üS)
 - 5 Messreihe 5 (3 m üS)
 - 6 Messreihe 6 (4 m üS)

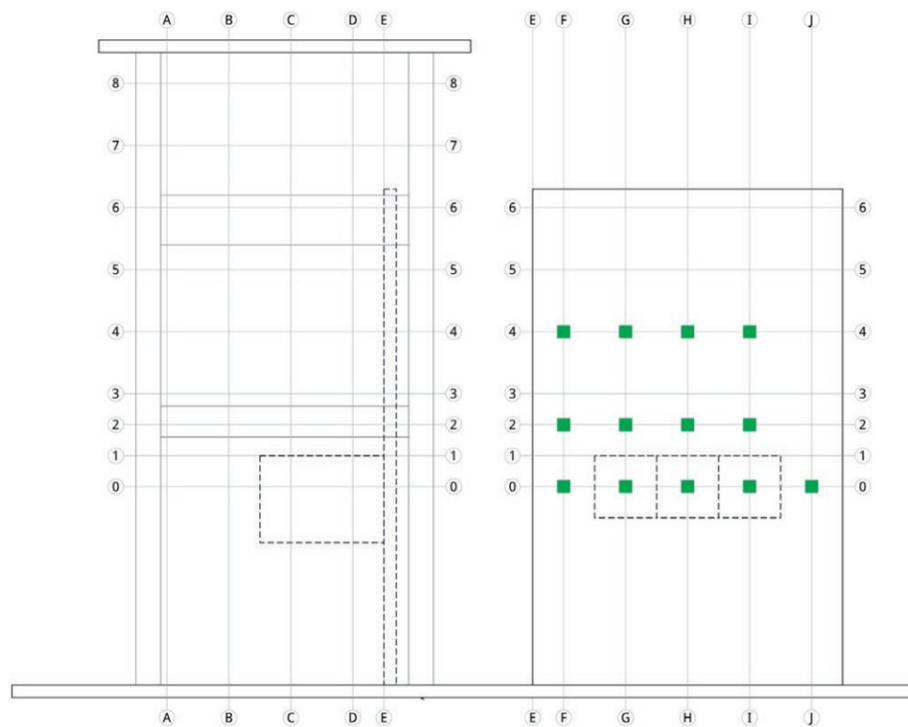
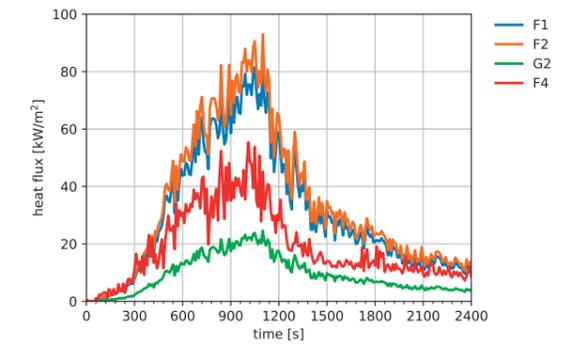


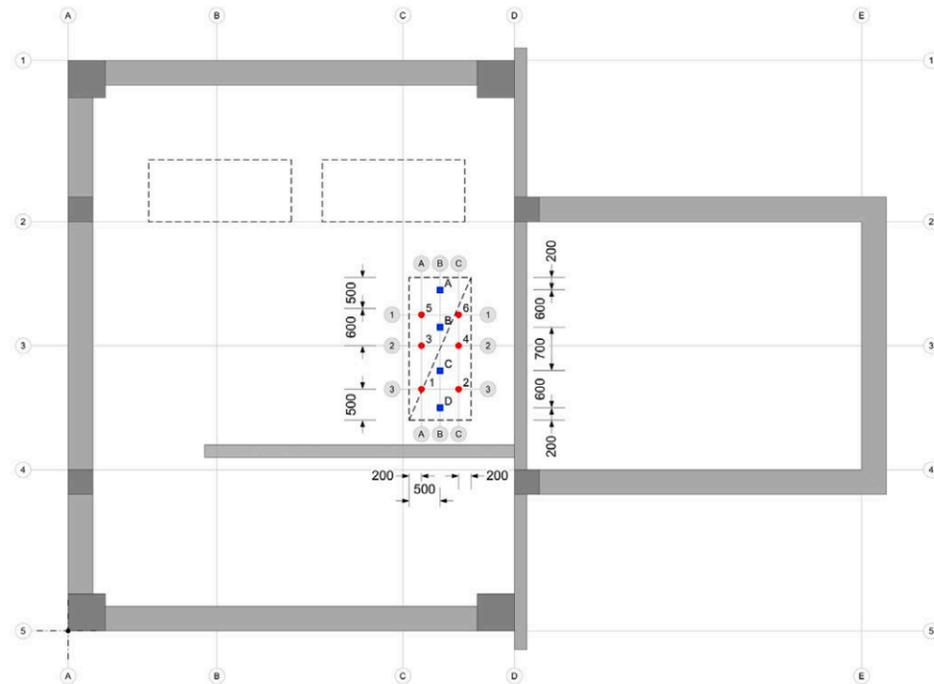


Brandversuch BV05-20

Wärmeströme an der Eckwand

- Messtechnik:
 - Wärmestrahlungsaufnehmer

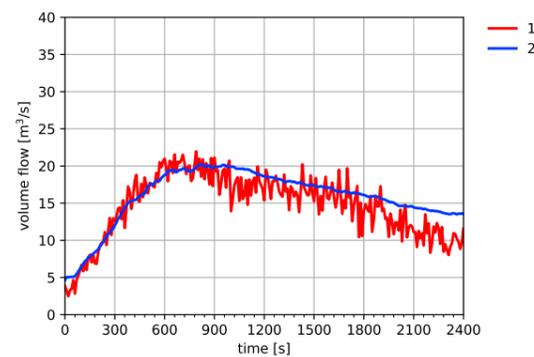




Brandversuch BV05-20

Rauchgasstrom im Schlot des Prüfstandes

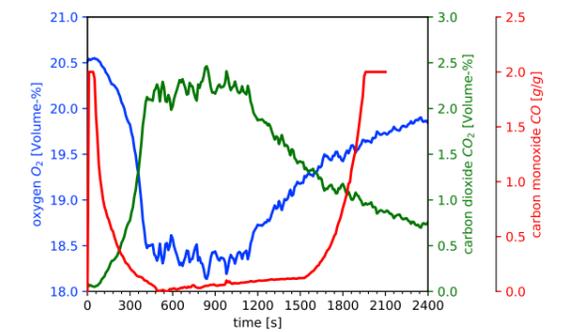
- Messtechnik:
 - Mantelthermoelement, 1 mm bis 3 mm, Ni-CrNi
 - Wärmestrahlungsaufnehmer
- Berechnungsverfahren:
 - 1 auf der Basis der Differenzdruckmessung
 - 2 auf der Basis des Gasgesetzes und der Abgastemperatur



Brandversuch BV05-20

Rauchgasanteile im Schlot des Prüfstandes

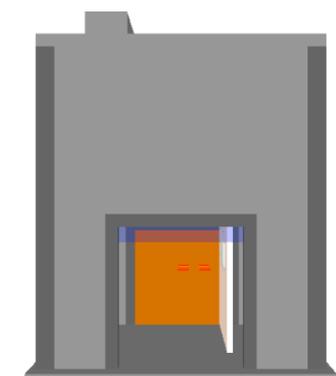
- Messtechnik
 - Sonde zur Messung der Rauchgasanteile



Simulation

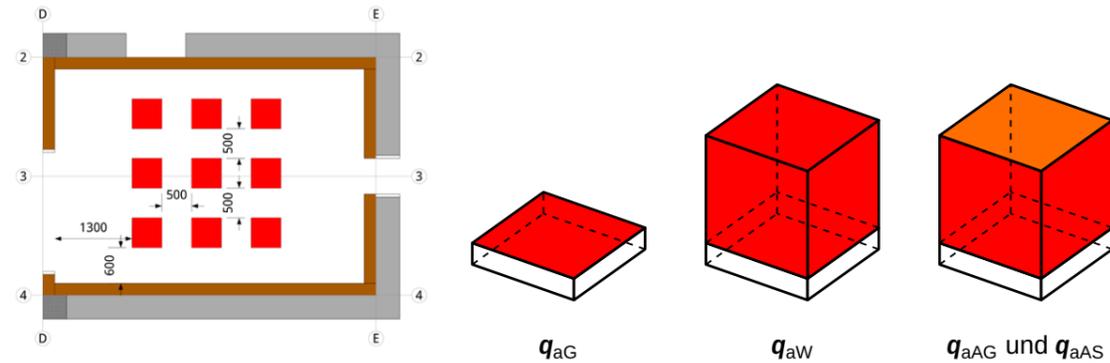
Ziele:

- Modellierung der Brandfläche
- Wärmefreisetzungsrate
- Verbrennung
- Messtechnik



Simulation

Brandraum und Brandfläche [1, 8]



Simulation

Brandfläche und Wärmefreisetzung [2, 6]

case	q_{aG} [kW/m ²]	q_{aW} [kW/m ²]	q_{aAS} [kW/m ²]	q_{aAG} [kW/m ²]	A/A_{crib} [m ²]	q_{crib} [kW]	N_{crib}	Q_{max} [kW]
1	328				18,72			6140
2		342			2,05	701	9	6310
3			470	610	2,05	999	9	8987
4			330	429	2,05	701	9	6310

Simulation

Rauchausbeuten [5]

Brandphase	CO ₂	CO
Brandentwicklungsphase	1,020 g/g	0,615 g/g
Brandausbreitung und Vollbrand	1,394 g/g	0,068 g/g

Simulation

Rauchausbeuten [1]

```
&SPEC ID= 'WOOD', FORMULA='CH1.700.74N0.002' /
```

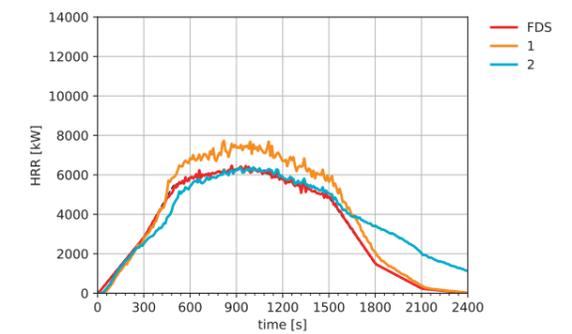
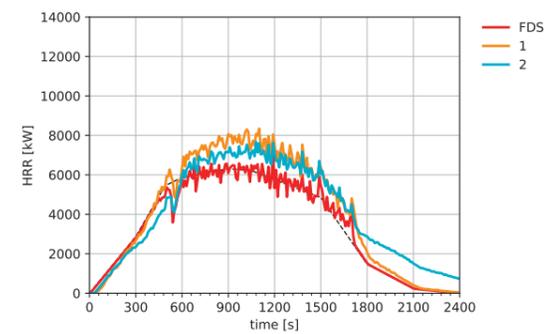
```
&SPEC ID='PRODUCT',
SPEC_ID(1)= 'NITROGEN',           VOLUME_FRACTION(1)= 0.669799,
SPEC_ID(2)= 'WATER VAPOR',       VOLUME_FRACTION(2)= 0.154970,
SPEC_ID(3)= 'CARBON DIOXIDE',    VOLUME_FRACTION(3)= 0.168462,
SPEC_ID(4)= 'CARBON MONOXIDE',   VOLUME_FRACTION(4)= 0.000637,
SPEC_ID(5)= 'SOOT',              VOLUME_FRACTION(5)= 0.006132 /
```

```
&REAC ID           = 'wood',
FUEL                = 'WOOD',
HEAT_OF_COMBUSTION = 17300,
RADIATIVE_FRACTION = 0.35,
SPEC_ID_NU          = 'WOOD', 'AIR', 'PRODUCT'
NU                  = -1.0, -4.905522, 5.737654 /
```

Simulation – Auswertung

- Wärmefreisetzung
- Temperaturen an der Brandraumöffnung
- Temperaturen an der Eckwand
- Rauchgas- und Zuluftströme
- Rauchgasanteile

Simulation – Auswertung Wärmefreisetzung

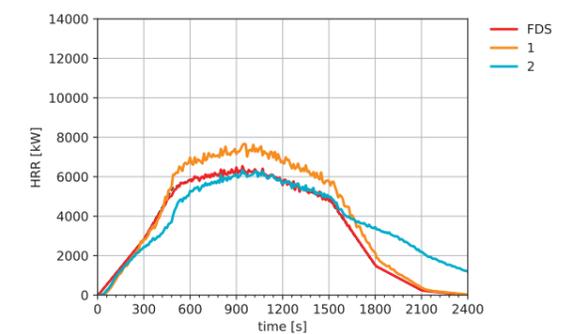
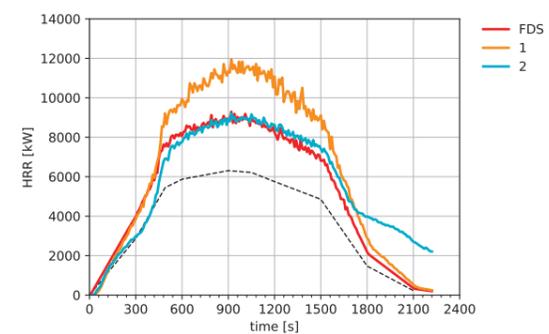


Simulation – Auswertung Wärmefreisetzung

- FDS Fire Dynamics Simulator
- 2 Sauerstoffverbrauchsmethode
- 3 Enthalpiestrom

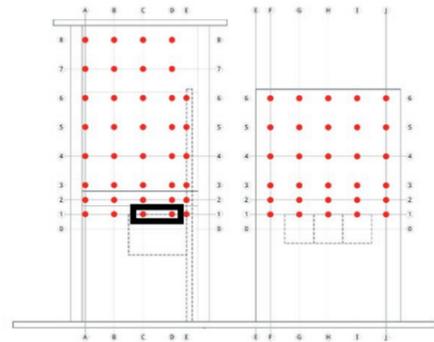


Simulation – Auswertung Wärmefreisetzung



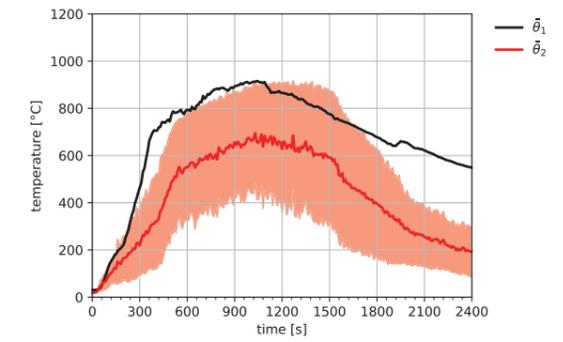
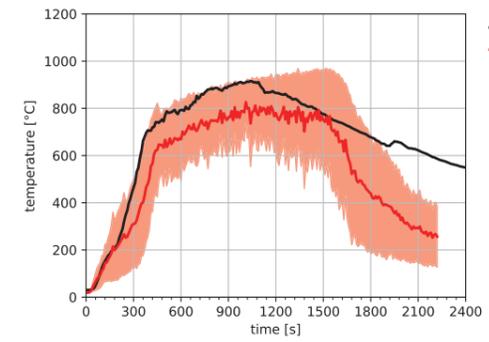
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Brandraumöffnung



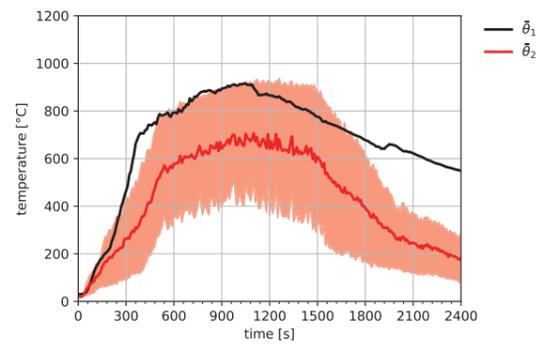
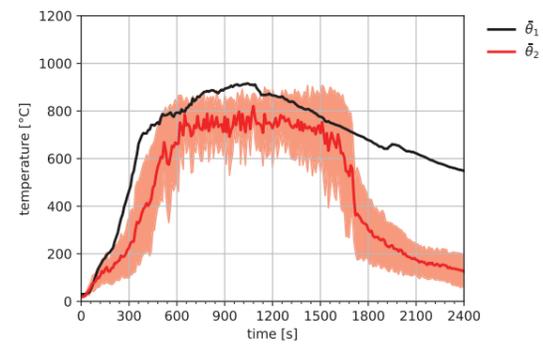
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Brandraumöffnung



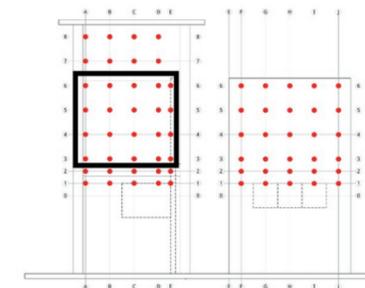
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Brandraumöffnung



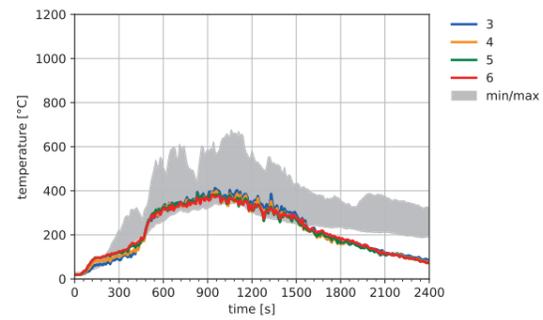
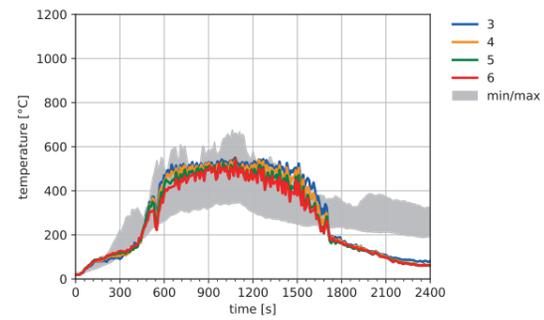
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Fassade



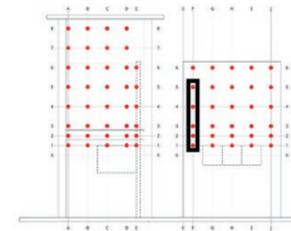
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Fassade



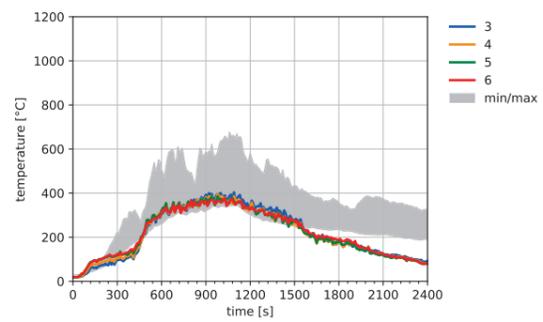
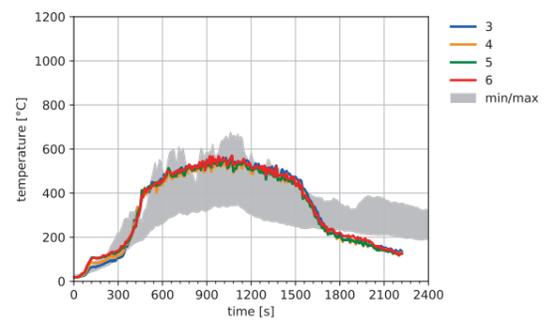
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Eckwand



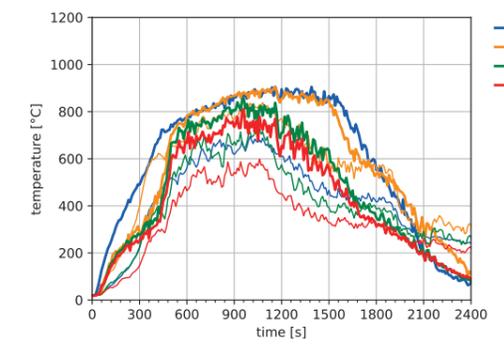
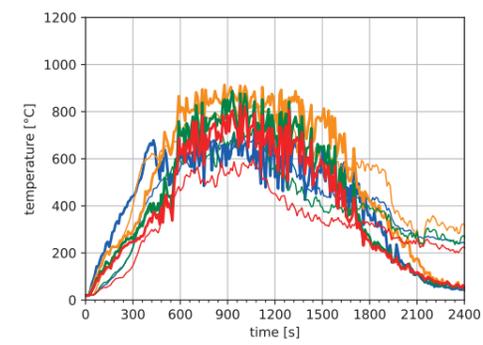
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Fassade



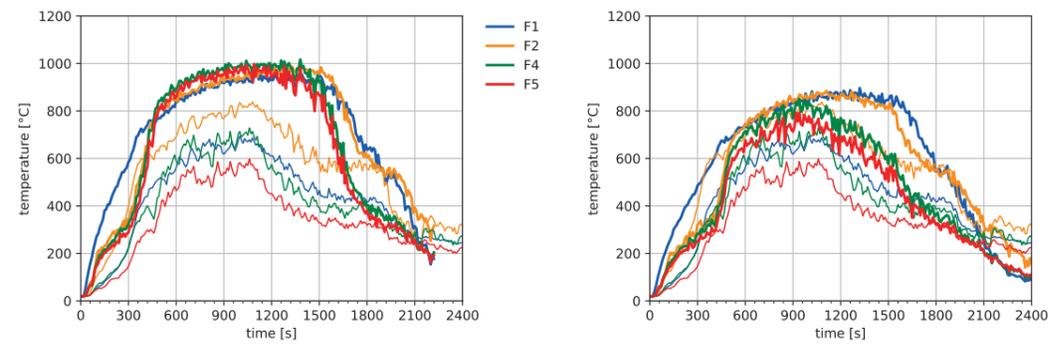
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Eckwand



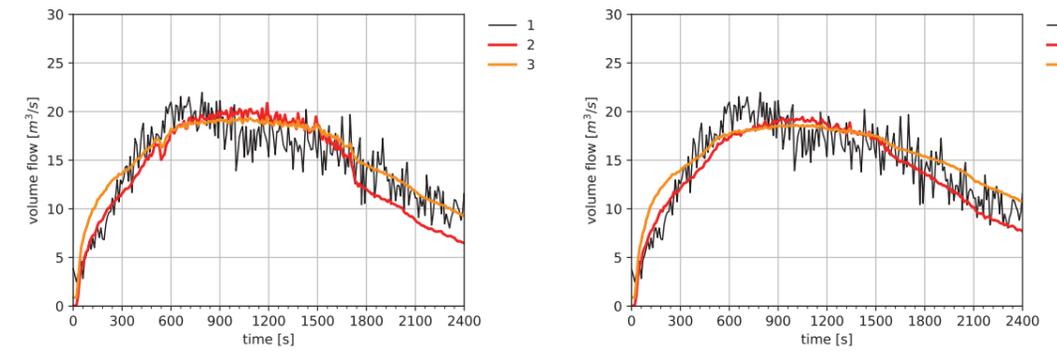
Simulation – Auswertung

Temperaturen an der Eckwand



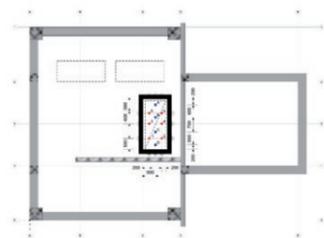
Simulation – Auswertung

Rauchgasströme



Simulation – Auswertung

Rauchgasströme

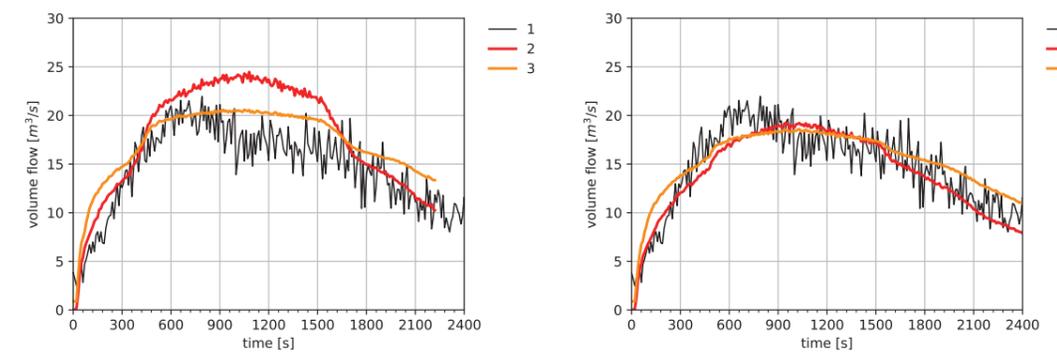


- Berechnungsverfahren:
 - 1 Brandversuch auf der Basis der Differenzdruckmessung
 - 2 FDS mit VOLUME FLOW
 - 3 FDS auf der Basis des Gasgesetzes und der Abgastemperatur



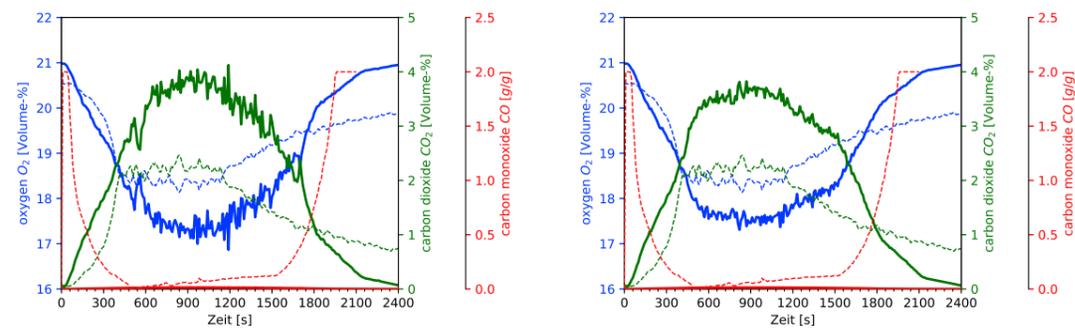
Simulation – Auswertung

Rauchgasströme



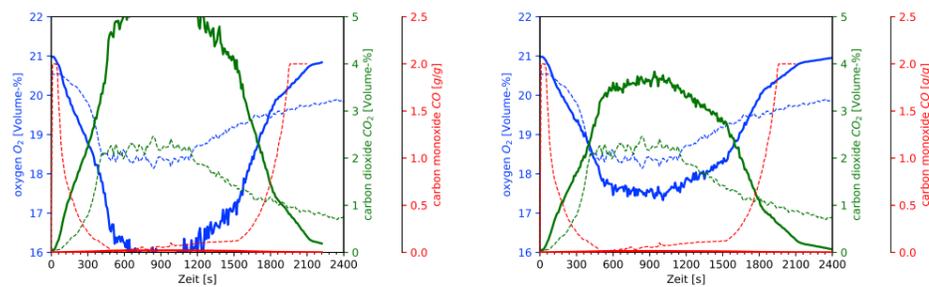
Simulation – Auswertung

Rauchgasanteile



Simulation – Auswertung

Rauchgasanteile



Zusammenfassung

- Wandtemperatur (Fassade, Eckwand) abhängig von der Temperatur am Sturz der Brandraumöffnung
- Temperatur am Sturz der Brandraumöffnung abhängig von der Brandmodellierung
- Die Messabweichungen stimmen mit der experimentellen Beobachtung überein.
- O₂-, CO₂- und CO-Rauchgasanteile stark Abhängigkeit von REAC-Modellierung
- Zeitverlauf nur bedingt vergleichbar
- Maximalwerte sind vergleichbar
- Qualitative Beurteilung möglich

Literaturverzeichnis

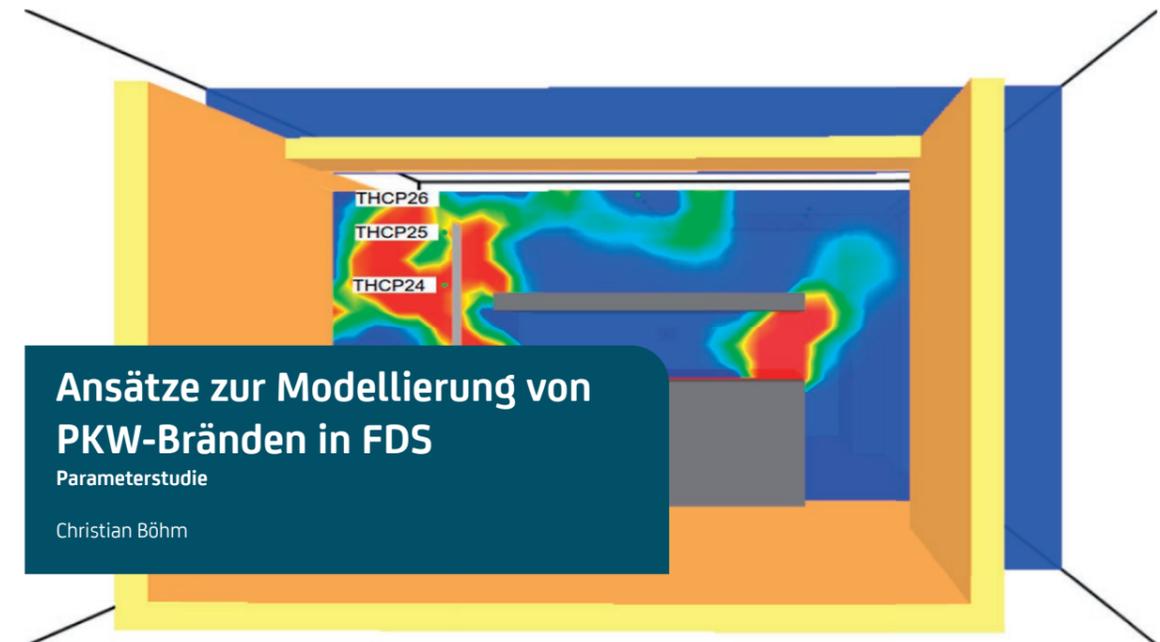
- [1] Jakob Degler und Andreas Eliasson. „A Priori Modeling of the Tisova Fire Test in FDS“. Bachelor Thesis. Lulea University of Technology, 2015.
- [2] Kerstin Hegemann, Erhardt Wilk und Ingolf Kotthoff. „Der Brand in Räumen - Abbrand von Lagergütern - Teil 8-4“. In: vfdB - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 65.2 (2016), S. 90–105.
- [3] Matthias Münch. Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr. Forschung im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr. Berlin: Verl. INURI, 2013.
- [4] Erhardt Wilk. Dokumentation zu Originalbrandversuchen. Techn. Ber. Leipzig: Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, 2015.
- [5] Erhardt Wilk. Versuchsbericht zu dem Brandversuch BV05-20. Techn. Ber. Leipzig: Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, 2015.
- [6] Erhardt Wilk. Zusammenfassung der Messungen zu Messungen zu Wärmefreisetzungsraten bezogen auf Flächeneinheiten an Holzrippen. Techn. Ber. Leipzig: Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, 2016.
- [7] Erhardt Wilk, Ingolf Kotthoff und Markus Scheide. „Der Brand in Räumen - Teil 7“. In: vfdB - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 63.3 (2014), S. 130–147.
- [8] Jochen Zehfuß. „Festlegung von Bemessungs-Brandzenarien und Bemessungsbränden“. In: vfdB - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 68.3 (2019), S. 159–167.

B.Sc. Christian Böhm:

Ansätze zur Modellierung von PKW-Bränden in FDS

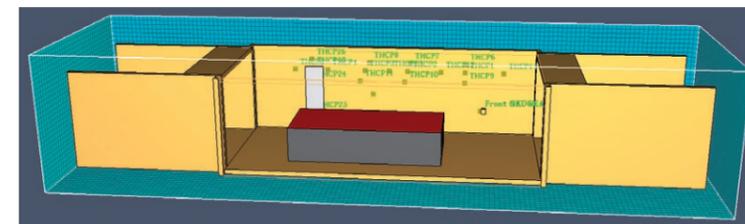
Abstract:

Es wird eine Parameterstudie durchgeführt, in dessen Rahmen 13 verschiedene Variationen der PKW-Geometrie mit den Temperaturverläufen eines Realbrandexperimentes verglichen werden. Hierfür werden die Rahmenparameter des Realbrandversuches als Eingangsgrößen für die Simulation verwendet. Der Brandverlauf orientiert sich an der im Realbrandversuch gemessenen Energiefreisetzungsrate. Die Simulationen werden mit der Software „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) durchgeführt. Es wird herausgearbeitet, welche Parameter bei der Modellierung einen Einfluss auf das Temperaturumfeld haben und was bei der zukünftigen Modellierung zu beachten ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Darstellung des Daches, sowie die Modellierung der Brandfläche einen maßgeblichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im näheren Umfeld des PKW haben. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die verschiedenen Bereiche oberhalb und seitlich des PKW durch jeweils verschiedene Modellierungsvarianten genauer simuliert werden.



Zielstellung

Ziel ist die Modellierung der Fahrzeuggeometrie in FDS unter gleichen Rahmenbedingungen zu variieren und Aussagen für die zukünftige Modellierung von PKW in FDS zu treffen



Next Generation Fire Engineering



Einleitung

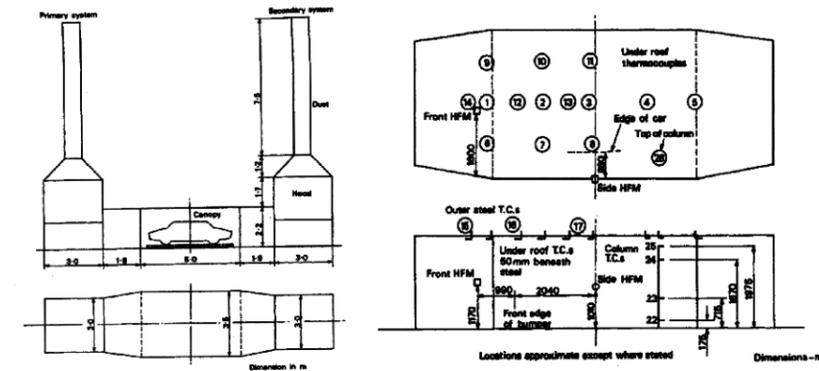
hnpberlin 

Vorgehensweise

1. Nachstellung der Rahmenbedingungen & Energiefreisetzungsrate eines Realbrandes in FDS
2. 13 Variationen der Fahrzeuggeometrie
3. Vergleich des Temperaturumfeldes zwischen Realbrand und Simulation



Shipp & Spearpoint, 1995



Agenda



Simulationsparameter

- Mesh 0,125*0,125*0,125
- Mischbrandlast/Verbrennungsreaktion
- Energiefreisetzungsrate/Firevent
- Modellierung der Messinstrumente
 - Thermocouples
 - Heat Flux



Mischbrandlast/Verbrennungsreaktion

Tabelle 4: Inputparameter der Verbrennungsreaktion in FDS

Inputparameter für FDS	Werte
C	1
H	1,4295
O	0,123937
N	0,240117
ΔH_T in kJ/kg	29627,26
χ_r	0,3
y_s in g/g	0,10687

Next Generation Fire Engineering



Messinstrumente

- Thermocouples

Tabelle 5: Eigenschaften der modellierten Thermocouples in FDS

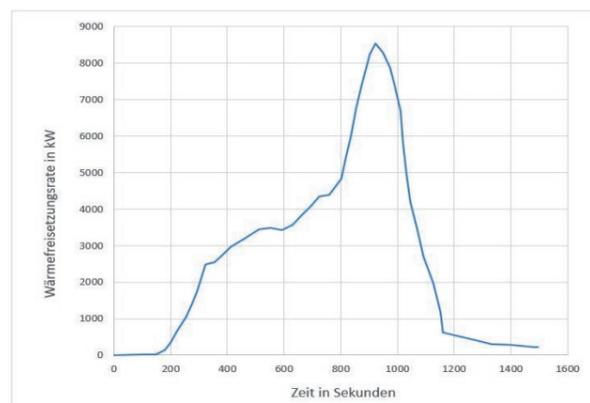
Inputparameter Thermoelemente	Werte
Bend Density in kg/m^3	7850
Bend Specific Heat in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	0,46
Bend Diameter in mm	1,5

- Net Heat Flux

Next Generation Fire Engineering



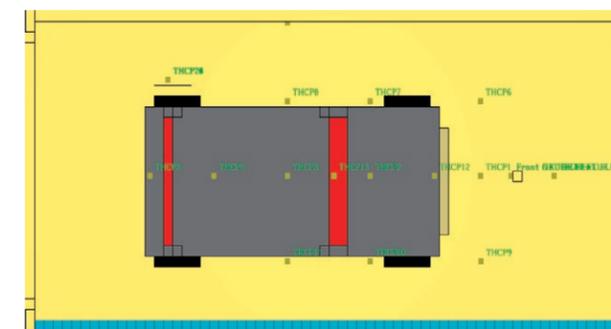
Energiefreisetzungsrate



Next Generation Fire Engineering



Messinstrumente und Gruppen



Insgesamt 13 Modellierungsvarianten mit jeweils 20 Messinstrumenten

Next Generation Fire Engineering



TCM
TCS
TCT
HF



Nutzwertanalyse

Nr.	Kriterien	n	1	2	3	4	Summe	GW
1.	Erreichungsgrad von T _{max}	1	x	3	3	3	9	37.5 %
2.	Genauigkeit des Temperaturanstieges	2	1	x	2	3	6	25 %
3.	Genauigkeit der Kurvenform	3	1	2	x	3	6	25 %
4.	Stärke der Schwankungen	4	1	1	1	x	3	12.5 %
							24	100 %

$$NW = \sum_{n=1}^4 (W_n * E_n)$$

Next Generation Fire Engineering

4
Methodik



Variationsparameter

- Grundmodell
 - Brandhöhe
 - Brandfläche
 - Dachstärke
 - Lüftungsöffnungen
 - Brandöffnungen
 - Dachbreite
- Blockdarstellungen
- Kombinierte Parameter

Next Generation Fire Engineering

5
Parameter



PKW-Modellierungen



Abbildung 42: Modellierungsvariante Nr. 1 "PKW"

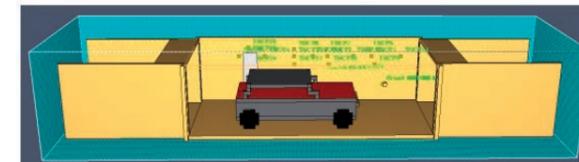


Abbildung 43: Modellierungsvariante Nr. 2 "Variation der Brandhöhe"

Next Generation Fire Engineering

6
Modelle



PKW-Modellierungen

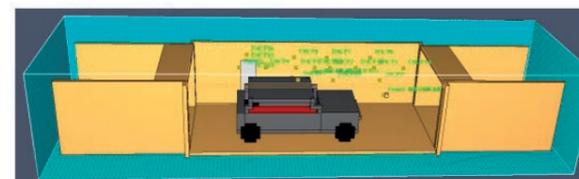


Abbildung 44: Modellierungsvariante Nr. 3 "Variation der Brandfläche"



Abbildung 45: Modellierungsvariante Nr. 4 "Variation der Dachstärke"

Next Generation Fire Engineering

6
Modelle



PKW-Modellierungen

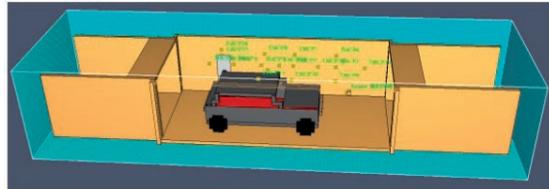


Abbildung 46: Modellierungsvariante Nr. 5 "Brandöffnungen"

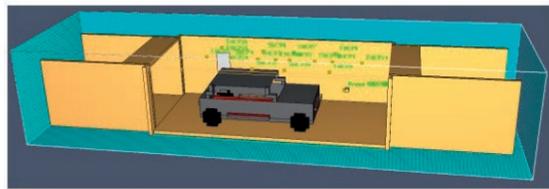


Abbildung 47: Modellierungsvariante Nr. 6 "Lüftungsschlitze"

Next Generation Fire Engineering



PKW-Modellierungen

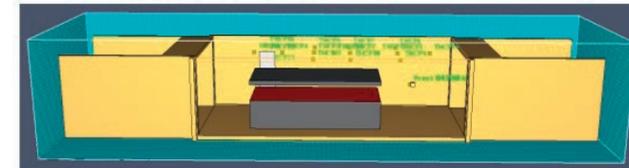


Abbildung 50: Modellierungsvariante Nr. 9 "Blockdarstellung mit Dach"

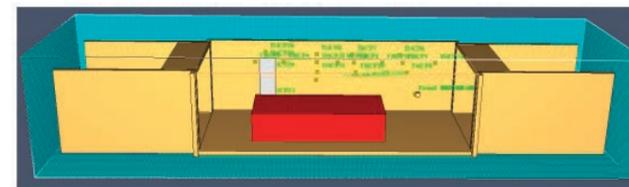


Abbildung 51: Modellierungsvariante Nr. 10 "Blockdarstellung Brandfläche"

Next Generation Fire Engineering



PKW-Modellierungen

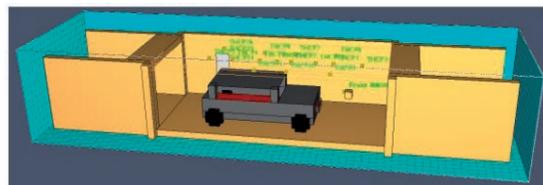


Abbildung 48: Modellierungsvariante Nr. 7 "Variation der Meshgröße"

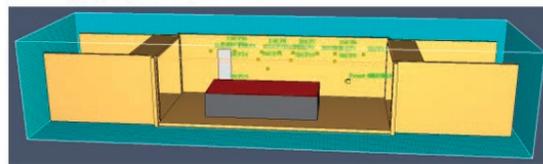


Abbildung 49: Modellierungsvariante Nr. 8 "Blockdarstellung"

Next Generation Fire Engineering



PKW-Modellierungen

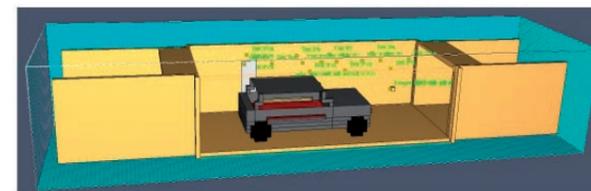


Abbildung 52: Modellierungsvariante Nr. 1.1 "Kombination PKW"

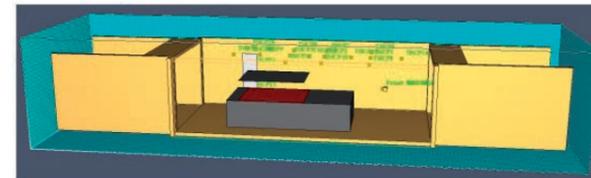


Abbildung 54: Modellierungsvariante Nr. 8.1 "Kombination Blockdarstellung"

Next Generation Fire Engineering



PKW-Modellierungen



Abbildung 53: Modellierungsvariante Nr. 1.2 "Kombination PKW"

- Temperaturen meist leicht unter dem Tmax des Realbrandes
- Mittig oberhalb des Daches geringeres Tmax als Blockdarstellung
- Seitlich im unteren Bereich geringeres Tmax als im Realbrand

Next Generation Fire Engineering

6
Modelle



Einflussreiche Parameter

- Größe der Brandfläche
 - Einfluss auf Flammenlänge
- Höhe der Brandfläche
 - Realistische Darstellung der Flammen
- Modellierung des PKW-Daches
 - Einfluss auf Ausbreitung des Plumes
 - Wichtig bei der Betrachtung der thermischen Einwirkung auf Stützen
- Höhe Fensterunterkante und Dachhöhe
 - Einfluss auf Ausbreitung des Plumes

Next Generation Fire Engineering

7
Ergebnisse



Ergebnisbeispiel

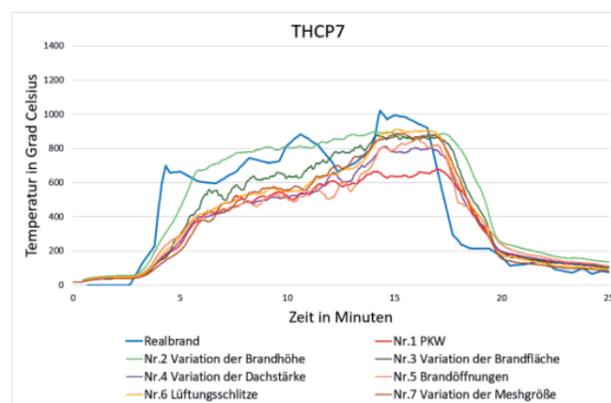


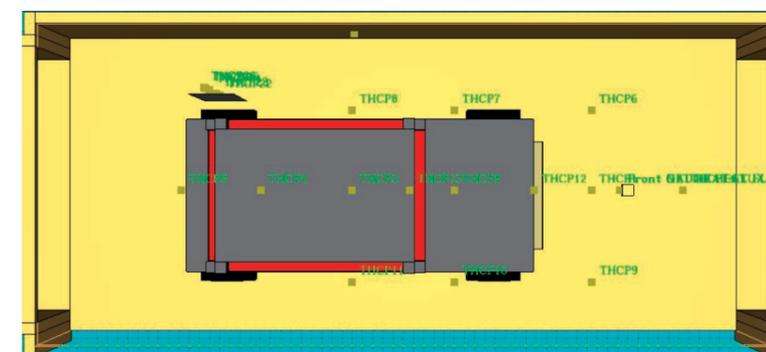
Abbildung 19: Ergebnisse: Parametervariation; THCP7

Next Generation Fire Engineering

7
Ergebnisse



Modellierung des Daches



Next Generation Fire Engineering

8
Anwendung



Was ist bei der Modellierung zu beachten?

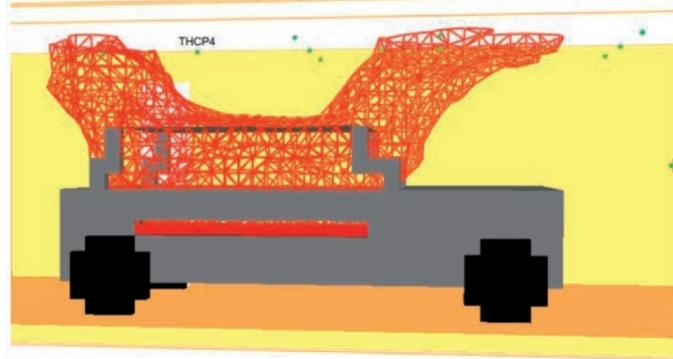


Abbildung 37: Darstellung der Plumeausbreitung der Modellierungsvariante Nr. 1.1 bei 946 Grad Celsius in der Sekunde 900; Auszug aus Smokeview Plot 3D

Next Generation Fire Engineering

8
Anwendung



hpbberlin
Ingenieure für Brandschutz GmbH

Hauptsitz
Rotherstraße 19 · 10245 Berlin

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. Karl-Heinz Schubert

Wo besteht noch Untersuchungspotential ?

- Reifenabbrand
- Lackabbrand
- Sonstiges?

8
Anwendung



Dr. Susanne Kilian:

Numerische Einblicke in die Lösung der FDS-Druckgleichung

Abstract:

Welches Gleichungssystem wird bei der FDS-Druckgleichung gelöst? Welche Randbedingungen müssen berücksichtigt werden und wie werden sie ins zu lösende Gleichungssystem integriert? Wie wird die entstehende Matrix für verschiedene Drucklöser programmtechnisch behandelt und welche Unterschiede ergeben sich daraus für die Laufzeit-Performance? Diese und weitere Fragen sollen anhand einfacher Testfälle erläutert und illustriert werden.

Numerische Einblicke in die Lösung der FDS Druckgleichung

Dr. Susanne Kilian
hhpberlin - Ingenieure für Brandschutz
10245 Berlin

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

Themenbereiche

Behandlung verschiedener Randtypen im Diskretisierungsprozess

- externe Gebietsränder
- interne Meshgrenzen
- interne Solids

Part 1 - separate Folien,
bei Interesse bitte nachfragen

Performance-Analysen für die strukturierte Diskretisierung

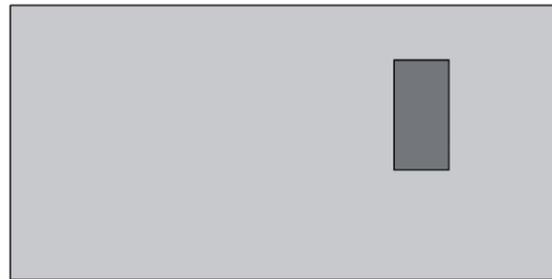
- verschiedene Speichertechniken für die Matrix des Druck-Gleichungssystems
- Laufzeit-Vergleiche auf verschiedenen Rechnersystemem

Part 2 - Vortrag heute

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

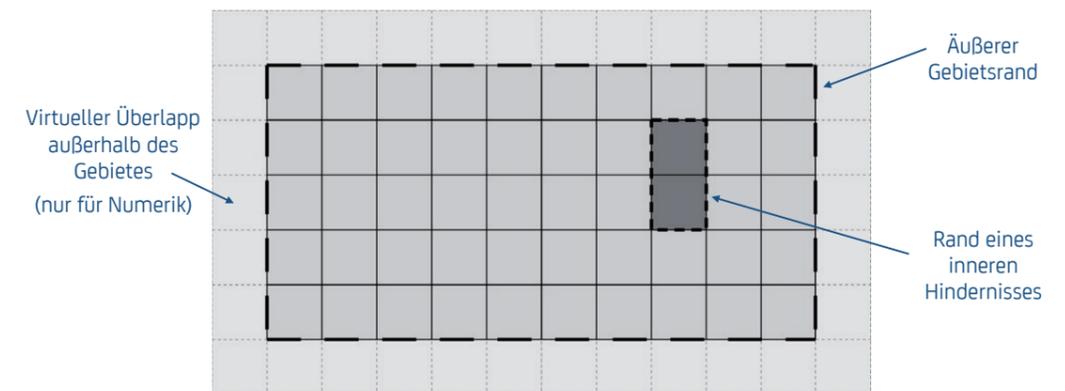
Einfaches 2D-Gebiet mit innerem Solid



Next Generation Fire Engineering



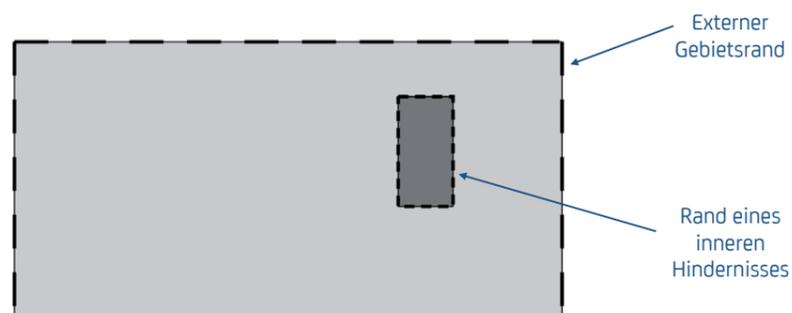
Diskretisierung mit virtuellem Überlapp



Next Generation Fire Engineering



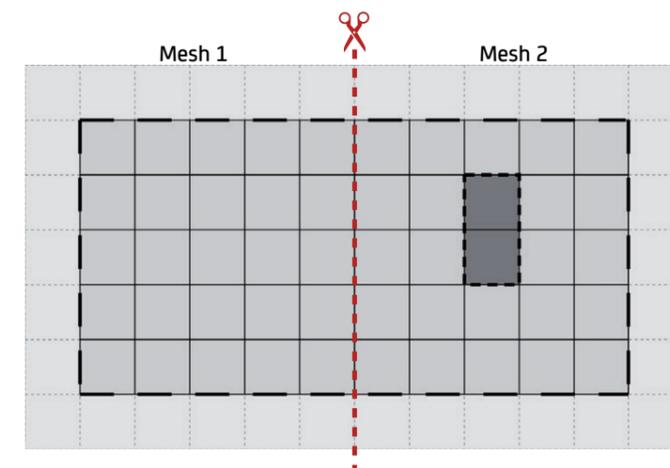
Verschiedene Rand-Typen



Next Generation Fire Engineering



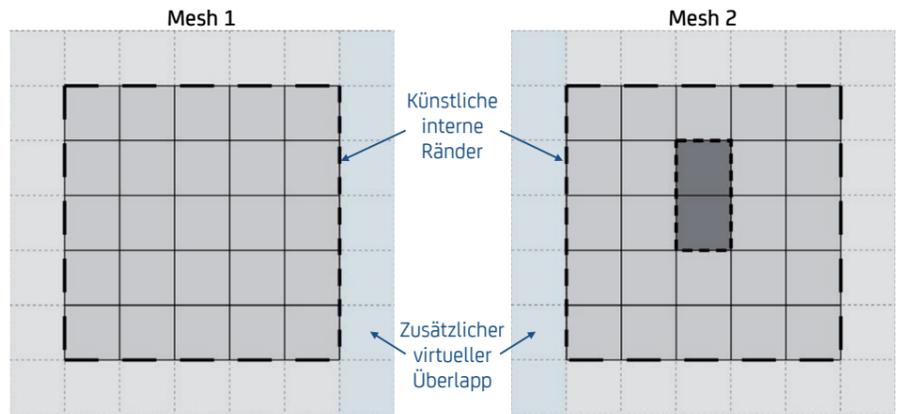
Zerlegung in Teilgebiete



Next Generation Fire Engineering



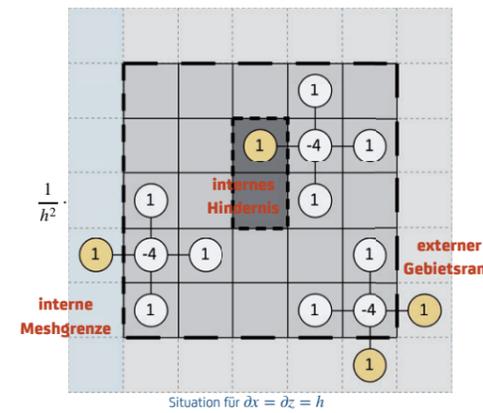
Zusätzliche Ränder entlang Meshgrenzen



Next Generation Fire Engineering



Was passiert mit Matrixstern an Rändern?



Next Generation Fire Engineering

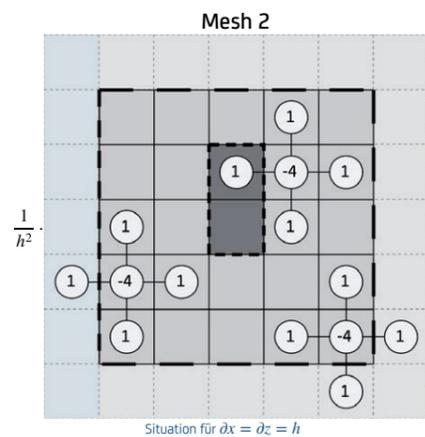
5-Punkte Stern in 2D

$$\frac{H_{i+1,k} - 2H_{i,k} + H_{i-1,k}}{\delta x^2} + \frac{H_{i,k+1} - 2H_{i,j} + H_{i,k-1}}{\delta z^2} = R_{i,k}$$

„Beinchen“ im Überlapp oder Hindernis müssen passend spezifiziert werden!



Diskretisierung mit finiten Differenzen



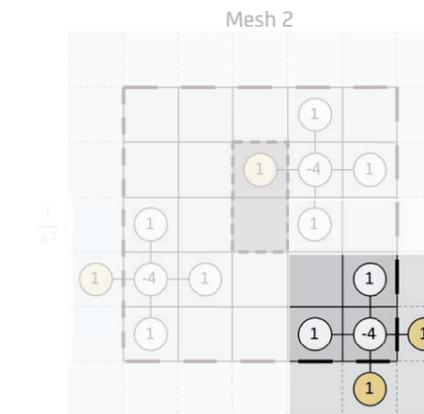
Next Generation Fire Engineering

5-Punkte Stern in 2D

$$\frac{H_{i+1,k} - 2H_{i,k} + H_{i-1,k}}{\delta x^2} + \frac{H_{i,k+1} - 2H_{i,j} + H_{i,k-1}}{\delta z^2} = R_{i,k}$$



Was passiert mit Matrixstern an Rändern?



Next Generation Fire Engineering

Externer Gebietsrand

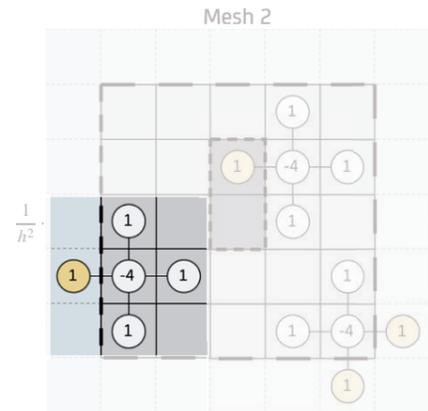
Anpassung an physikalische Rand-Situation, z.B.:

- Öffnung
- Ventilation
- Wärmequelle

→ Details siehe Part 1 der Folien, Auszug aus FDS Summerschool Jülich 2019



Was passiert mit Matrixstern an Rändern?



Interne Meshgrenzen

Gewährleistung eines korrekten Strömungsfeldes

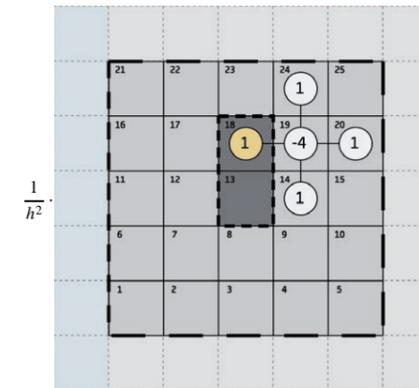
- keine Brüche/Knicke beim Übergang
- möglichst gleiche Normalenableitungen

→ Details siehe Part 1 der Folien,
Auszug aus FDS Summerschool Jülich 2019

Next Generation Fire Engineering



Strukturierte Diskretisierung



Ignorieren innerer Solids

- gleicher Matrixstern im ganzen Gebiet
- einheitliches Muster für Nummerierung benachbarter Zellen

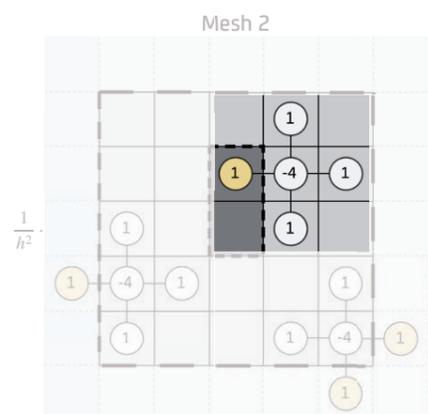
Hoch-reguläre Druck-Matrix

Anwendung optimierter Löser möglich (FFT!)

Next Generation Fire Engineering



Was passiert mit Matrixstern an Rändern?



Internes Hindernis

Gewährleistung eines korrekten Strömungsfelds

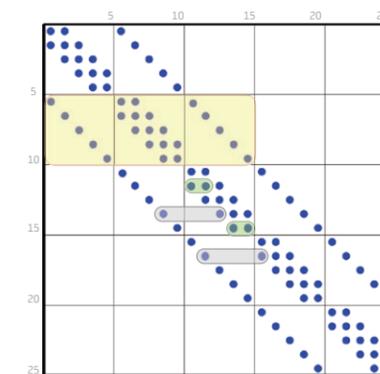
- korrekte Umströmung des Hindernisses
- keine Penetration in das Hindernis hinein

→ für Default-FFT-Löser ist eine zusätzliche
,Pressure Iteration' erforderlich!

Next Generation Fire Engineering



Strukturierte Diskretisierung



Dünn besetzte Matrix

← immer gleiches Muster pro Matrix-Abschnitt

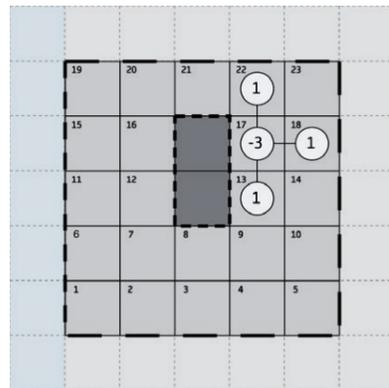
← immer gleiche Abstände der Diagonalen zueinander

- Wechselwirkung linker Nachbar in x-Richtung
- Wechselwirkung unterer Nachbar in z-Richtung

Next Generation Fire Engineering



Unstrukturierte Diskretisierung



Berücksichtigung innerer Solids

- UNGLEICHE Matrixsterne im Gebiet
- KEIN einheitliches Muster für Nummerierung benachbarter Zellen

Irreguläre Druck-Matrix

Anwendung optimierter Löser schwierig

Vergleich Drucklöser

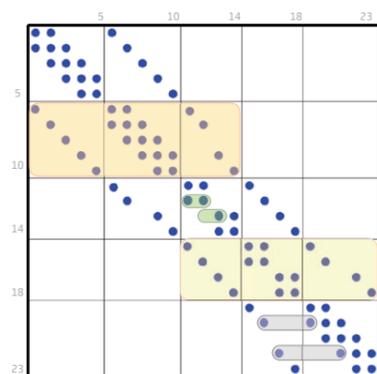
Drucklöser	Diskretisierung	Single-Mesh	Multi-Mesh		Zusatzaufwand 'Pressure Iteration' nötig?
			innere Meshgrenzen	Ränder innere Solids	
FFT	strukturiert	mit Abstand schnellster Löser	nicht exakt	nicht exakt	für Mesh-Grenzen und innere Solids
ScaRC	strukturiert	langsamer als FFT, > Faktor 2	exakt	nicht exakt	nur für Solids
UScaRC	unstrukturiert	langsamer als FFT > Faktor 2	exakt	exakt	keine

Vergleich Drucklöser

Druck-Löser	Single-Mesh	Multi-Mesh		Pressure Iteration nötig?
		innere Meshgrenzen	Ränder innere Solids	
FFT	mit Abstand			für Mesh-Grenzen und Solids
ScaRC	langsamer als FFT, > Faktor 2	exakt	nicht exakt	nur für Solids
UScaRC	langsamer als FFT > Faktor 2	exakt	exakt	keine

Performance-Optimierung (U)ScaRC möglich?

Unstrukturierte Diskretisierung



Dünn besetzte Matrix (noch weniger Nicht-Nullen)

← unterschiedliche Muster pro Gitterzeile

← unterschiedliche Abstände der Diagonalen zueinander

- Wechselwirkung linker Nachbar in x-Richtung
- Wechselwirkung unterer Nachbar in z-Richtung

Kernbestandteile (U)ScaRC

Vektor-Vektor-Operationen (VV)

$$\alpha x + \beta y = z \quad \longrightarrow \quad \alpha x_i + \beta y_i = z_i, \quad i = 1, \dots, n$$

α, β Skalare
 x, y, z Vektoren

Matrix-Vektor-Operationen (MV)

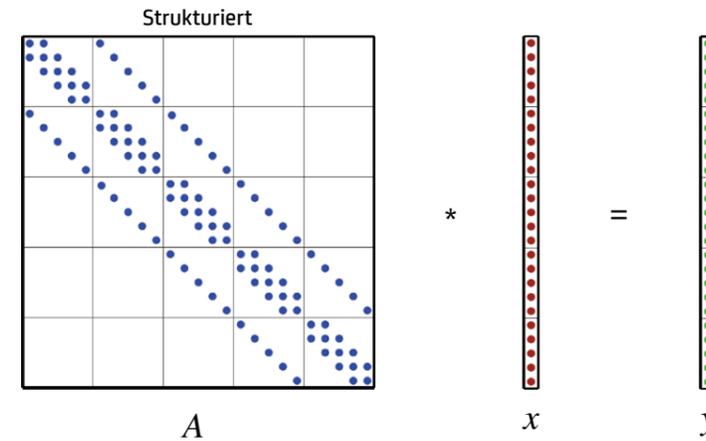
$$Ax = y \quad \longrightarrow \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = y_i, \quad i = 1, \dots, n$$

A Matrix
 x, y Vektoren

Next Generation Fire Engineering



Matrix-Vektor-Multiplikation $Ax = y$



Next Generation Fire Engineering

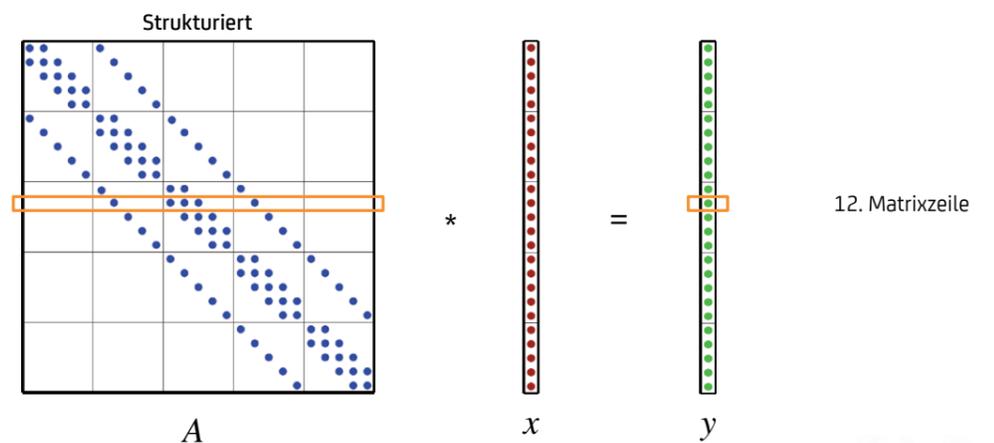


Performance-Tool Scalasca

Next Generation Fire Engineering



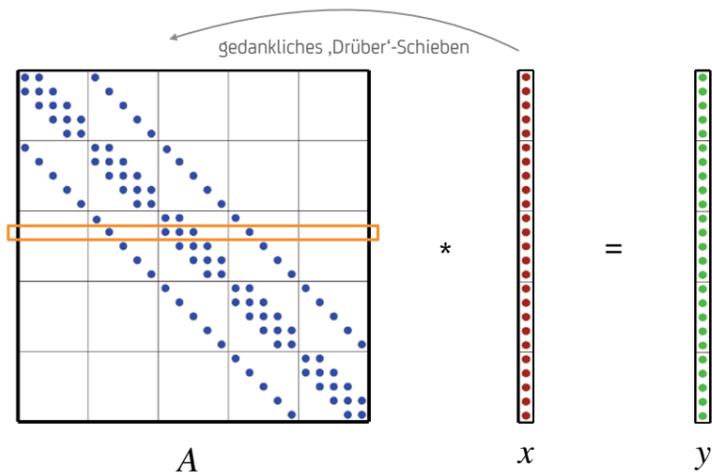
Matrix-Vektor-Multiplikation $Ax = y$



Next Generation Fire Engineering



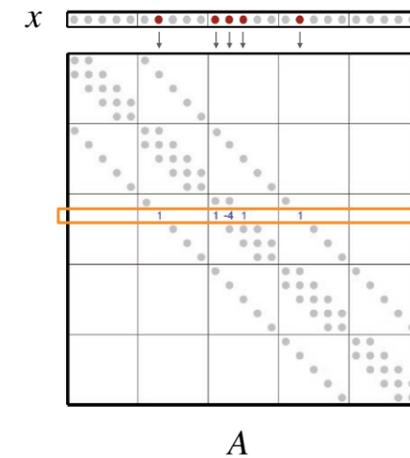
Matrix-Vektor-Multiplikation $Ax = y$



Next Generation Fire Engineering



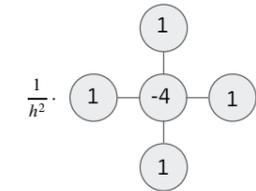
Matrix-Vektor-Multiplikation $Ax = y$



Next Generation Fire Engineering

Antwort

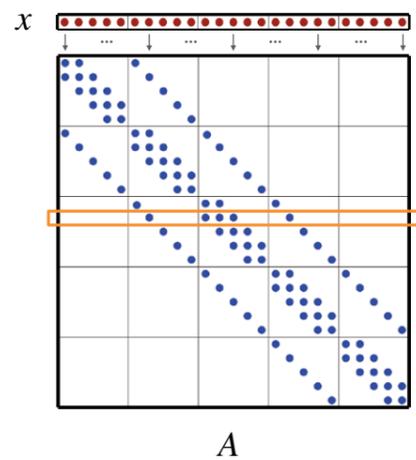
Nur wenige!



Anzahl entspricht Elementen im Matrix-Stern,
Rest der Matrix-Zeile ist Null!



Matrix-Vektor-Multiplikation $Ax = y$



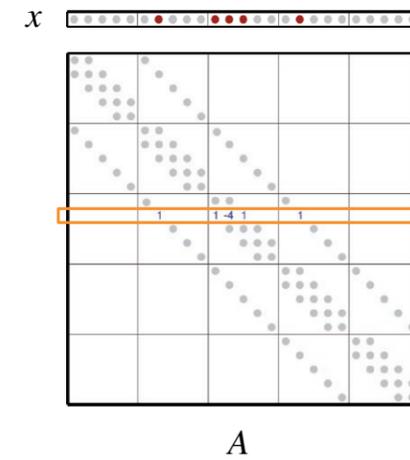
Next Generation Fire Engineering

Frage

Welche Einträge von x werden
für das Matrix-Vektor-Produkt
in Zeile 12 überhaupt benötigt?

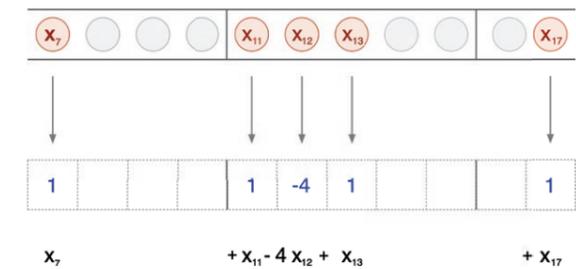


Ergebnis für 12. Matrixzeile



Next Generation Fire Engineering

Zoom



Kompakte Speichertechnik (CSR)

Speichere pro Matrixzeile nur Nicht-Null-Einträge plus Positionen



12. Matrixzeile

Kompakte Speichertechnik (CSR)

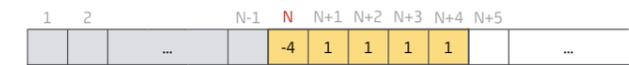
Speichere pro Matrixzeile nur Nicht-Null-Einträge plus Positionen



12. Matrixzeile

• Beginn Zeile im Matrix-Speicherbereich:

• Matrixwerte



Kompakte Speichertechnik (CSR)

Speichere pro Matrixzeile nur Nicht-Null-Einträge plus Positionen



12. Matrixzeile

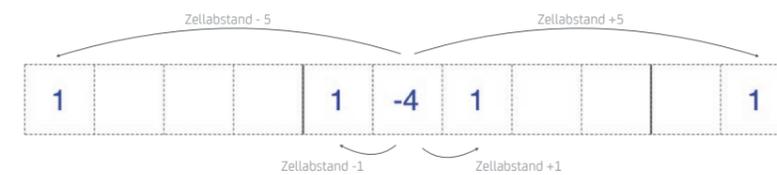
• Beginn Zeile im Matrix-Speicherbereich:

• Matrixwerte



Kompakte Speichertechnik (CSR)

Speichere pro Matrixzeile nur Nicht-Null-Einträge plus Positionen

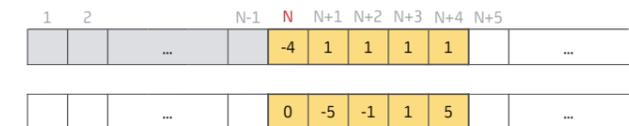


12. Matrixzeile

• Beginn Zeile im Matrix-Speicherbereich:

• Matrixwerte

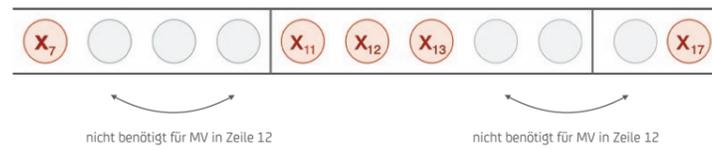
• Abstände zueinander



Kompakte Speichertechnik (CSR)

Problem

Benötigte Komponenten von Vektor x liegen nicht zusammenhängend im Speicher!

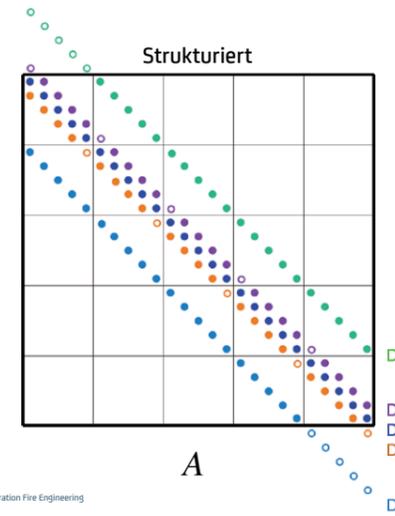


- für kleinere Vektorlängen unproblematisch
- für größere Vektorlängen keine effiziente Cache-Nutzung

Next Generation Fire Engineering



Abhilfe: Diagonalweise Speichertechnik



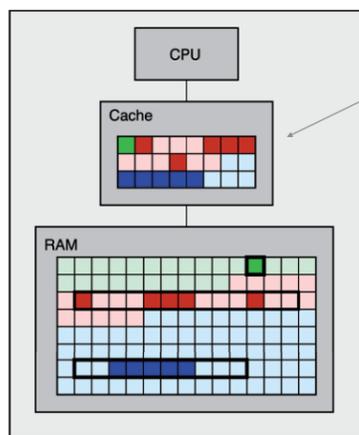
Speicherung der Matrixdiagonalen

- alle Diagonalen werden als gleich lang angenommen
- fehlende Einträge werden als Null gespeichert
- keine zusätzlichen Abstands-Pointer nötig

Next Generation Fire Engineering



Ineffiziente Cache-Ausnutzung



Komponenten für 12. Matrixzeile

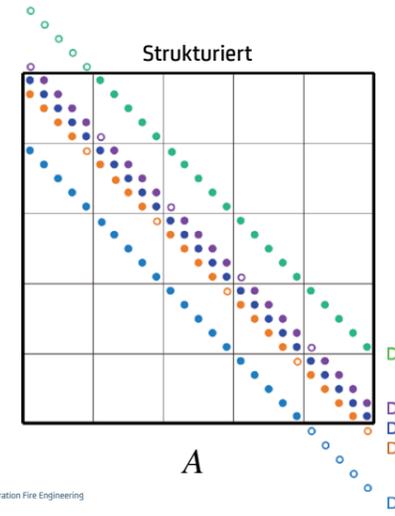
Falls Gesamtlänge der benötigten Komponenten von x (inklusive Leerräumen) größer als Cache

→ häufiges Nachladen erforderlich

Next Generation Fire Engineering



Diagonalweise Speichertechnik



Alternative Form der MV

Summe aus komponentenweisen Multiplikationen von x mit Diagonalen D_j

$$x \cdot D_1 + \dots + x \cdot D_5$$

↑ komponentenweise
↑ Berücksichtigung der zugehörigen Zeilennummern

Next Generation Fire Engineering



Diagonalweise Speichertechnik

Vorteil

Daten für ‚Vektor · Diag‘ liegen zusammenhängend im Speicher

$$x \cdot D_k = \sum_i x(i) \cdot D_k(i), \quad k = 1, \dots, 5$$

→ lässt sich mit optimierten Routinen durchführen:

- effizientere Cache-Ausnutzung
- Verwendung von OpenMP - Direktiven

```
!$OMP PARALLEL DO
DO I = 1, N
DZ(I) = DX(I) * DK(I)
ENDDO
!$OMP END PARALLEL DO
```

Testrechnungen auf 2 Rechnersystemen

Laptop (Windows)

Intel Xeon E-2186M
6 Kerne,
64 GB RAM
2.9 Ghz

Lunarc (Linux)

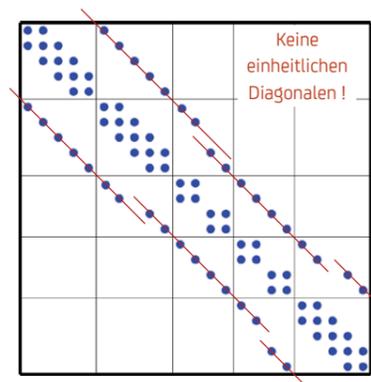
Intel Xeon E5-2650 v3
2 x 10 Kerne,
64 GB RAM
2.3 Ghz

Diagonalweise Speichertechnik

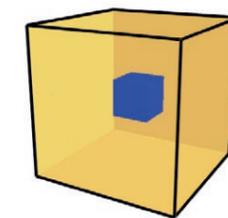
Nachteil

funktioniert nur für strukturierte Diskretisierung!

- Lohnt, falls Performance-Gewinn den Zusatz-Aufwand ‚Pressure-Iteration‘ mehr als wett macht



Performance-Analysen



Einfacher 3D-Würfel in FDS

Auf Basis der Vektor- und Matrix-Datenstrukturen von FDS:

- Vektor mal Diagonale: $x \cdot D_k$
- Matrix mal Vektor: $A x = y$

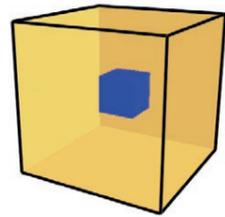
Jeweils 10.000-fache Durchführung und Berechnung zeitlicher Mittelwerte für

$N = 16, 32, 48, 64, 128, 196, 256, 384, 512$

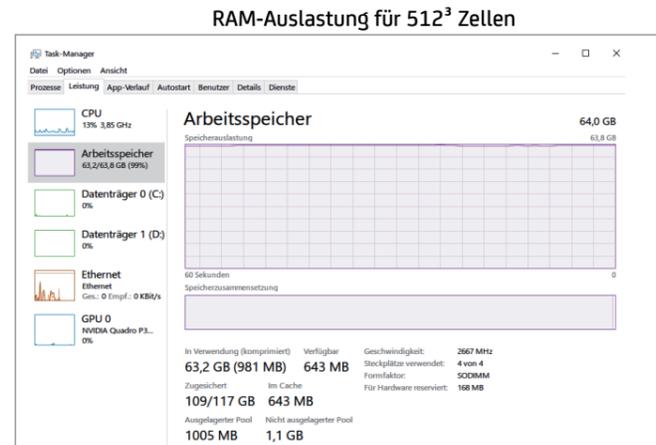
~2 Mio Zellen

~134 Mio Zellen

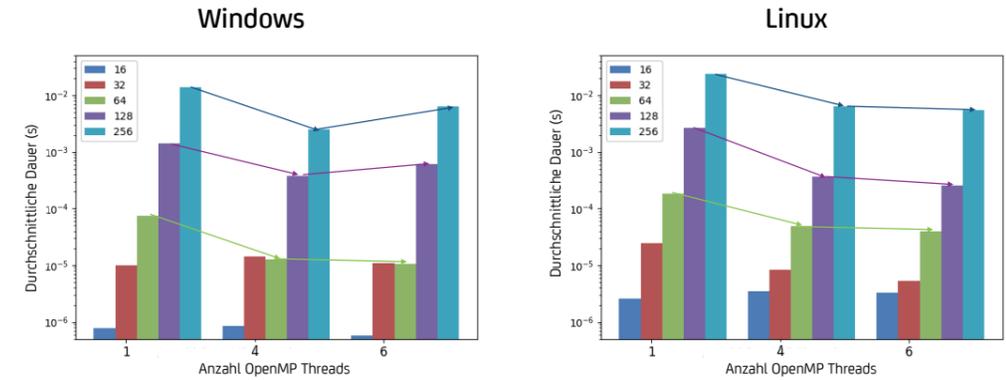
Performance-Analysen



Einfacher 3D-Würfel in FDS



OpenMP: Vergleich 1, 4, 6 Threads



Bessere Ausbeute auf Linux-Cluster, 6 Threads nicht besser als 4!



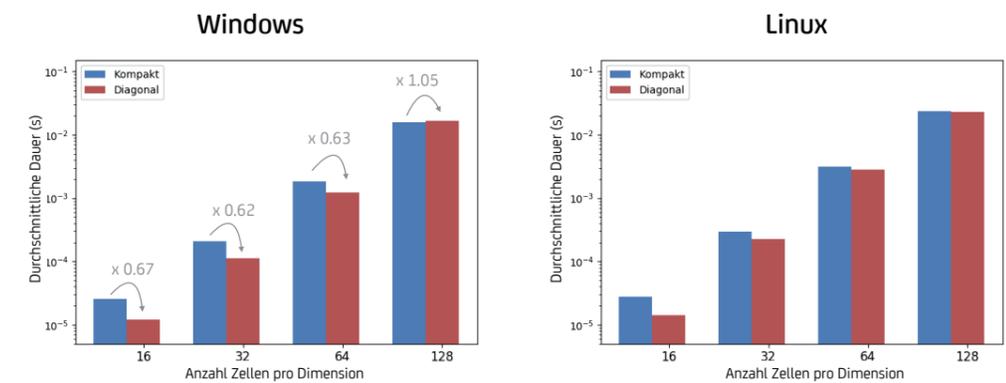
Intel Performance-Tool Advisor

Ausbeute OpenMP mit 4 Kernen für ‚Vektor·Diag‘ und ‚Matrix·Vektor‘

Function Call Sites and Loops	CPU Time	Type	Vectorized Loops			
			Total Time	Efficiency	Gain...	
[loop in SCRC_mp_SCARC_MEASURE_PERFORMANCE at scrc.f90:15834]	16,426s	Vectorized (Body)	AVX2	64%	1,27x	2
[loop in SCRC_mp_SCARC_MEASURE_PERFORMANCE at scrc.f90:15834]	2,262s	Vectorized (Body)	AVX2	88%	3,52x	4
[loop in SCRC_mp_SCARC_MEASURE_PERFORMANCE at scrc.f90:15873]	2,195s	Vectorized (Body)	AVX	77%	3,06x	4
[loop in SCRC_mp_SCARC_MEASURE_PERFORMANCE at scrc.f90:15815]	1,461s	Vectorized (Body)	AVX2	88%	3,53x	4
[loop in SCRC_mp_SCARC_MEASURE_PERFORMANCE at scrc.f90:15854]	1,458s	Vectorized (Body)	AVX	88%	3,51x	4
[loop in SCRC_mp_SCARC_MEASURE_PERFORMANCE at scrc.f90:15795]	1,442s	Vectorized (Body)	AVX2	96%	3,85x	4
[loop in SCRC_mp_SCARC_MATVEC_PRODUCT at scrc.f90:15834]	1,173s	Vectorized (Body)	AVX2	64%	1,27x	2
[loop in SCRC_mp_SCARC_SETUP_WORKSPACE at scrc.f90:11651]	0,139s	Scalar				
[loop in SCRC_mp_SCARC_RELAXATION at scrc.f90:10276]	0,120s	Scalar Versions				
[loop in SCRC_mp_SCARC_METHOD.CG at scrc.f90:12399]	0,105s	Scalar Versions				
[loop in SCRC_mp_SCARC_SETUP_WORKSPACE at scrc.f90:11561]	0,062s	Scalar Versions				
[loop in SCRC_mp_SCARC_MATVEC_PRODUCT at scrc.f90:9125]	0,053s	Vectorized (Body)	AVX	87%	3,48x	4



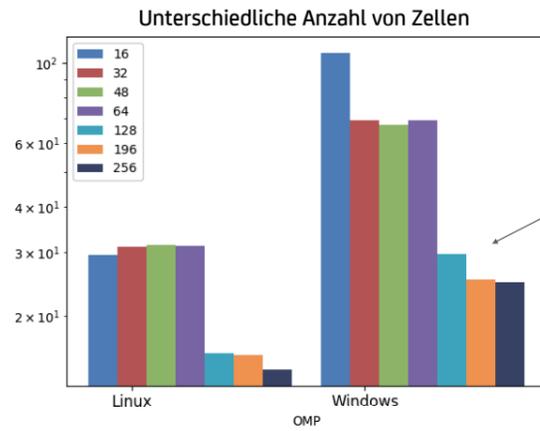
Matrix-Vektor: Kompakt versus Diagonal



Für Zellanzahlen bis 64³ deutlicher Vorteil der diagonalweisen Speichertechnik



Gflop-Raten von ‚Vektor · Diagonale‘



Einbruch für größere Vektorlängen
(länger als Cache-Größe)

Danke fürs Zuhören

Next Generation Fire Engineering



Next Generation Fire Engineering

hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz GmbH

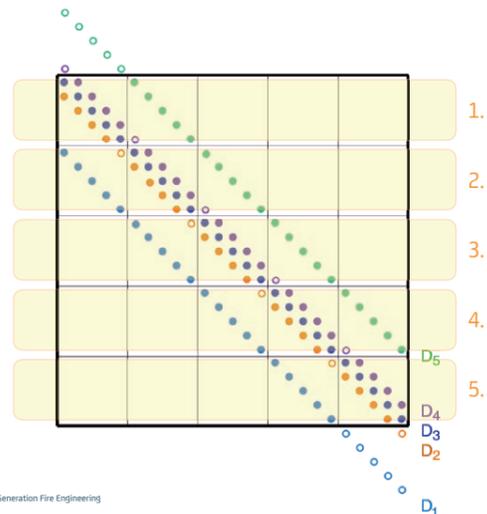
Hauptsitz
Rotherstraße 19 · 10245 Berlin

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 Hosser
Dr.-Ing. Karl-Heinz Schubert

Blockweise Diagonale MV



Mögliche Abhilfe

Gestaffelte Blockweise Durchführung,
mit Blockgrößen, die gut in Cache passen

→ Wird aktuell getestet

Next Generation Fire Engineering



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
13. Tagungsband
FDS Usergroup
Jahrgang 2019

hhpberlin 

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