

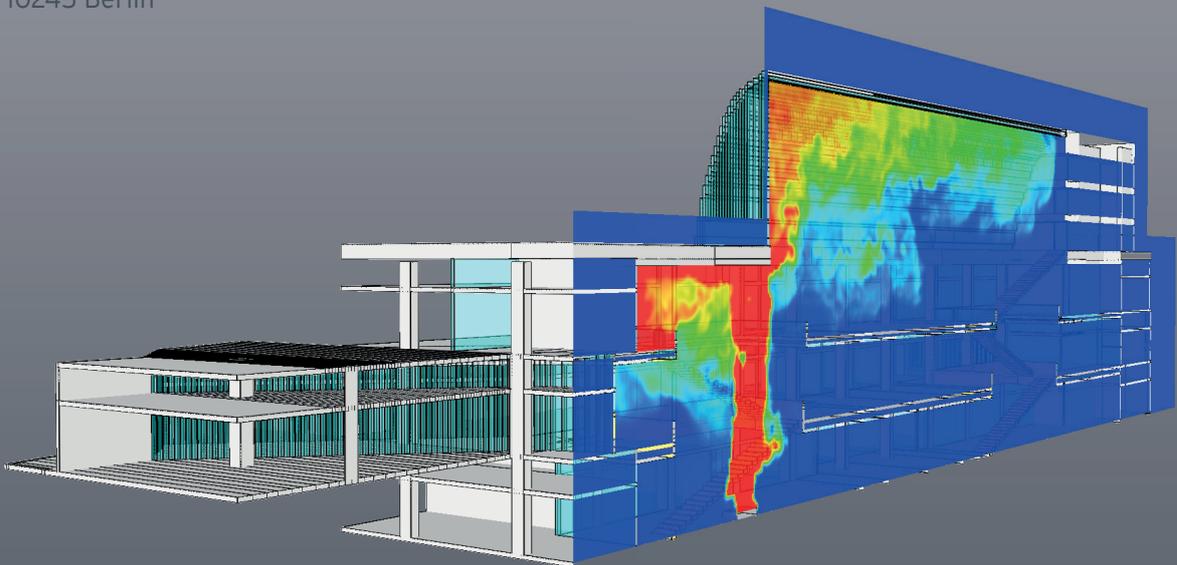
11. ANWENDERTREFFEN DER FDS USERGROUP

TAGUNGSBAND

ZUSAMMENSTELLUNG DER VORTRÄGE

9. - 10.11.2017

hhpberlin
Rotherstraße 19
10245 Berlin



INHALT

Vorträge 9.11.2017

Wärme, Pyrolyse, Verbrennung - Eine kurze Einführung Lukas Arnold	3
Pyrolysemodellierung mit FDS: Anwendung und Grenzen Jens Spille	4
Modelling Pyrolysis of Electrical Cables to Simulate Fire Propagation with FDS and its sensitivity Tristan Hehnen	21
Methoden zur Abschätzung der materialspezifischen Parameter zur Pyrolysemodellierung Patrick Lauer	37
Modellierung eines Schwelbrands mittels Pyrolyse mit FDS Pascal Matura, Benjamin Schaufelberger	53
Vergleich verschiedener Verbrennungsmodelle in FDS Florian Webner, Peter Wegener	63
Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen: Teil 1: Grundlagen Sven Kaudelka	91

INHALT

Vorträge 10.11.2017

Musik- und Kongresshalle Lübeck: Heißbemessung des Dachtragwerks und Nachweis der Rauchableitung mit FDS Andreas Vischer	105
Rauchableitung in Ladenstraßen mehrgeschossiger Verkaufsstätten - Erfahrungen aus der Praxis Michael Winkler, Peter Wegener	116
Denken wir in der richtigen Reihenfolge? - Gedankenanstöße zum Werkzeug ‚Entrauchungssimulation‘ Andreas Dahlitz	117
Wärmefreisetzung bei Vollbränden und Bedeutung für das Sicherheitskonzept für die Heißbemessung im Eurocode Burkhard Forell, Julian Park	133
Geschlossene vs. Offene Großgarage - Leistungsbezogene Untersuchung zur Schutzzielerreichung Benjamin Schröder	145
Simulation strömungstechnischer Effekte in druckbelüfteten Treppenträumen Marion Meinert	160
The SP retail store simulations revisited Bjarne Husted	175
Inverse Modellierung mit FDS Patrick Lauer	185
Lösung der Druckgleichung in FDS - Risiken und Nebenwirkungen Susanne Kilian	196

Wärme, Pyrolyse, Verbrennung

—
Eine kurze Einführung

FDS User Group Meeting 2017
Berlin, 9.–10.11.2017

Lukas Arnold

email: l.arnold@fz-juelich.de

Jülich Supercomputing Centre, Forschungszentrum Jülich



Hinweis zu den Materialien

Leider verfüge ich nicht über die Rechte für die Veröffentlichung der von mir verwendeten Bilder. Sollten Sie Fragen oder Anregungen zu dem Vortrag haben, so zögern Sie bitte nicht mich zu kontaktieren.



Lukas Arnold

Webseite: [→ Link](#)

Email: l.arnold@fz-juelich.de

Telefon: 02461 61 2301

Jens Spille:

Wärme, Pyrolyse, Verbrennung - Eine kurze Einführung

Abstract:

In diesem Vortrag wird das in FDS implementierte Submodell zur Berücksichtigung der Pyrolyse von Feststoffen vorgestellt. Zunächst wird der Nutzen von Pyrolysemodellen zur Prognose der Brandausbreitung im Rahmen ingenieurmäßiger Brandschutznachweisen dargelegt. Anhand von Validierungsrechnungen von Großversuche, die vom IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) im Rahmen des internationalen OECD/ NEA Forschungsprojektes PRISME 2 durchgeführt wurden, sollen einige Anwendungsgrenzen des derzeitigen Pyrolysemodells dargestellt werden.

Hierauf aufbauend werden die am iBMB erfolgten Arbeiten zur Entwicklung, Erprobung und Validierung eines gekoppelten Wärmeleitungs-Pyrolysemodells vorgestellt und anhand von Versuchen zur Brandausbreitung von Kabeltrassen die prinzipielle Anwendbarkeit des weiterentwickelten Modells aufgezeigt.

Sowohl für das derzeit in FDS implementierte Pyrolysemodell, als auch für die iBMB eigene Weiterentwicklung mangelt es derzeit an geeigneten Validierungsversuchen mit Randparametern, welche die Überprüfung des Einsatzes der Modelle für realistische Brandszenarien, wie unterventilierte Brände, ermöglichen. Abschließend wird daher auf die noch offenen Fragen bei der Modellierung von Pyrolyseprozessen und notwendige Erweiterungen eingegangen, die für einen möglichst breitgestreuten Einsatz in der Praxis erforderlich sind.



Technische
Universität
Braunschweig





Pyrolysemodellierung mit FDS
Anwendung und Grenzen

- Jens Spille, M.Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß, Dr.-Ing. Olaf Riese
- Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Technische Universität Braunschweig
- 11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup 09. – 10.11.2017

Einleitung

- Einfache Verbrennungsreaktion → Verbrennungswärme
(heat of combustion)

Brennstoff + Luft → Verbrennungsprodukte

$$C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$$

$$a C_3H_8 + b O_2 \rightarrow c CO_2 + d CO + e C + f H_2O$$

```

&REAC FUEL           = 'PROPANE'
      SOOT_YIELD      = 0.01
      CO_YIELD        = 0.02
      HEAT_OF_COMBUSTION = 46460. /
    
```

- Gasbrenner:

```

&SURF ID='FIRE', HRRPUA=500. /
    
```



Technische
Universität
Braunschweig

11. Anwender-Treffen FDS Usergroup | 09. November 2017 | J. Spille | Folie 3



Einleitung

- Einfache Verbrennungsreaktion → Verbrennungswärme
(heat of combustion)

Brennstoff + Luft → Verbrennungsprodukte

$$C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$$

$$a C_3H_8 + b O_2 \rightarrow c CO_2 + d CO + e C + f H_2O$$

```

&REAC FUEL           = 'PROPANE'
      SOOT_YIELD      = 0.01
      CO_YIELD        = 0.02
      HEAT_OF_COMBUSTION = 46460. /
    
```

Gasphase

- Gasbrenner:

```

&SURF ID='FIRE', HRRPUA=500. /
    
```

Feste Phase



Technische
Universität
Braunschweig

11. Anwender-Treffen FDS Usergroup | 09. November 2017 | J. Spille | Folie 4



Einleitung

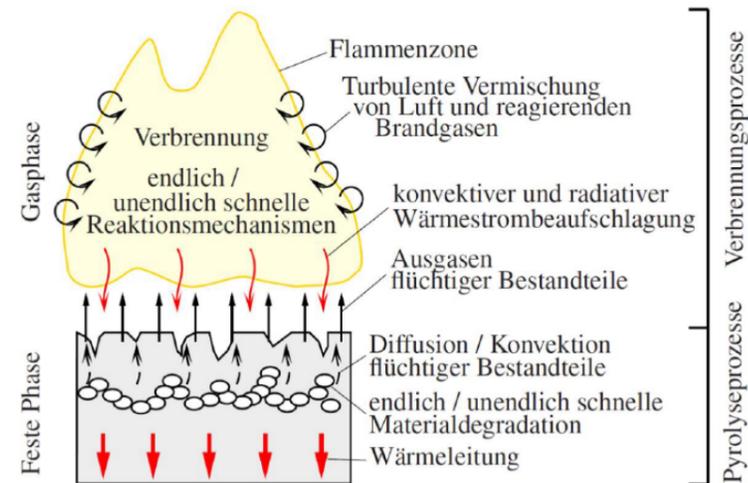
- Simple Pyrolysis:

$$\dot{m}''_{Propan} = \frac{500 \text{ kW}}{1 \text{ m}^2} \frac{1}{46.460 \text{ kJ/kg}} = 0,011 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$$

- Bei jeder FDS-Berechnung wird ein vereinfachtes materialunabhängiges Pyrolysemodell verwendet
- Pyrolyse liefert den Brennstoffmassenanteil für die Modellierung innerhalb der Gasphase
- „simple pyrolysis“-Modell bildet nicht das Materialverhalten während einer Verbrennung ab

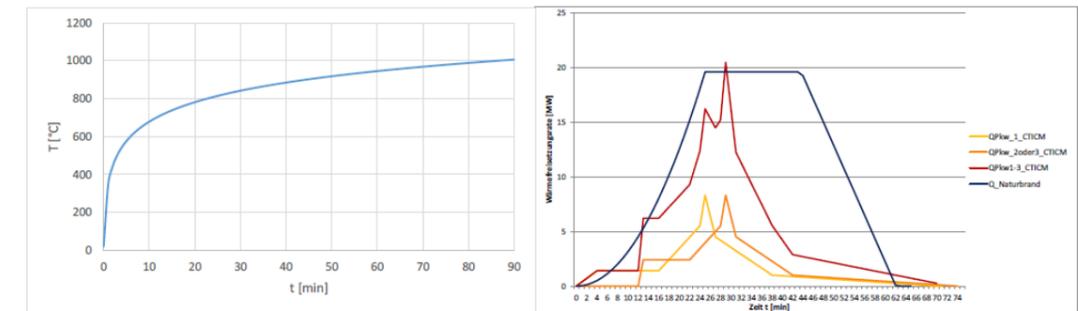
Einleitung

- Pyrolyse von Feststoffen



Einleitung

- Brandschutznachweise basieren auf der Definition eines Bemessungsbrandes:
 - Einheits-Temperaturzeitkurve,
 - Naturbrandmodell nach Eurocode oder
 - Individuelle Verläufe der Wärmefreisetzungsrates



Einleitung

- Die Brandausbreitung wird modelliert durch
 - Einen definierten zeitlichen Temperaturanstieg,

$$\Delta\theta(t) = \theta(t) - \theta(t_0 = 0) = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1)$$
 - Experimentelle Brandausbreitungsgeschwindigkeiten,
 - Zeit bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrates von 1 MW (Wohnungsnutzung): $t_{\alpha} = 200 \text{ s}$
 - Zeitliche Änderung der Brandfläche (z.B.: Travelling fire)
- Brandsimulationsmodelle nach derzeitigen Stand bilden nur die Folgen bei definierten Randbedingungen ab
- Pyrolysemodelle bieten die Möglichkeit die Auswirkungen des Materialverhalten auf die Brandausbreitung und die Freisetzung brennbarer Gase zu berücksichtigen

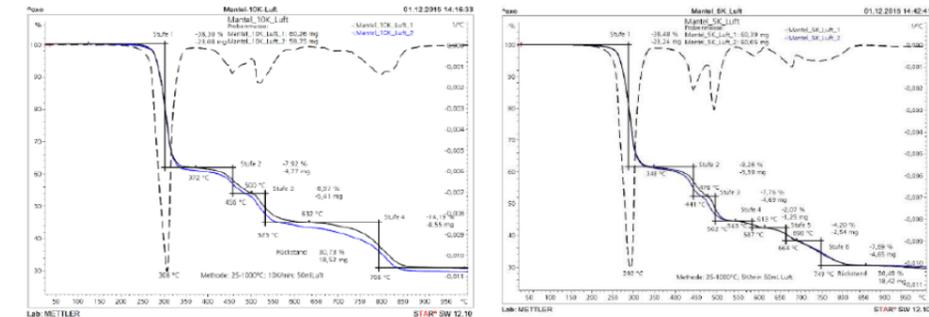
Einleitung

- Implementierung von Pyrolysemodellen wichtiger Schritt zur Verbesserung der Prognosefähigkeit für wirtschaftlichere Brandschutznachweise
- Potential bei Bewertung bestehender Gebäude und / oder brennbarer Konstruktionen
- Pyrolysemodelle bieten die Möglichkeit:
 - tatsächlich freigesetzte Brennstoffmenge zu berücksichtigen und
 - führen ggf. zu geringeren thermischen Beanspruchungen



Modellgrundlagen

- Modellreaktionen beschreiben die Zersetzung und Freisetzung von Pyrolysegasen, nicht jedoch die Reaktionskinetik im Detail



- Beispiel PVC:
 - Aufheizrate 10 K/min (links): 4 Zersetzungsstufen,
 - Aufheizrate 5 K/min (rechts): 6 Zersetzungsstufen,
 - Detaillierte Reaktionskinetik: 243 Reaktionen



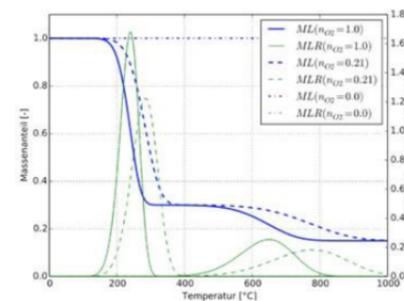
Modellgrundlagen

- Reaktionsrate nach Arrhenius:

$$r = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{R_m T}\right) \cdot w^N, \quad w = \frac{\rho}{\rho_0}$$

- Massenverlustrate mit Berücksichtigung der Zersetzung der Stoffkomponenten j und den Reaktionsschritten i:

$$\dot{m}_{\text{reac}}''' = \sum_i \sum_j A_{j,i} \rho_j \exp\left(\frac{-E_{j,i}}{R_m T}\right) w_{j,i}^N n_{O_2}^{N_{O_2}}$$



Modellierung in FDS

- Beschreibung der Reaktionsschritte erfolgt als Materialeigenschaft (MATL)
- Es ist zu unterscheiden zwischen:
 - Festen Reaktionsprodukten (NU_MATL_ID) und
 - Gasförmigen Reaktionsprodukten (NU_SPEC_ID) → Übergabe in die Gasphase

```

&SPEC ID = 'PYROLYZATE', MW=53.6 /
&SPEC ID = 'OXYGEN', MASS_FRACTION_0 = 0.23 /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR' /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE' /

&MATL ID = 'WOOD'
EMISSIVITY = 0.9
CONDUCTIVITY = 0.2
SPECIFIC_HEAT = 1.3
DENSITY = 570.
N_REACTIONS = 1
MATL_ID (1, 1) = 'CHAR'
NU_MATL (1, 1) = 0.18
SPEC_ID (1:4, 1) = 'PYROLYZATE', 'OXYGEN', 'WATER VAPOR', 'CARBON DIOXIDE'
NU_SPEC (1:4, 1) = 0.82, 0, 0, 0
HEAT_OF_REACTION (1) = 430.
HEAT_OF_COMBUSTION (1) = 14500. /
    
```



Modellierung in FDS

- Beschreibung der Reaktionsschritte erfolgt als Materialeigenschaft (MATL)
- Es ist zu unterscheiden zwischen:
 - Festen Reaktionsprodukten (NU_MATL_ID) und
 - Gasförmigen Reaktionsprodukten (NU_SPEC_ID) → Übergabe in die Gasphase

```
&SPEC ID = 'PYROLYZATE', MW=53.6 /
&SPEC ID = 'OXYGEN', MASS_FRACTION_0 = 0.23 /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR' /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE' /
```

Definition der gasförmigen Reaktionsprodukte

```
&MATL ID = 'WOOD'
EMISSIVITY = 0.9
CONDUCTIVITY = 0.2
SPECIFIC_HEAT = 1.3
DENSITY = 570.

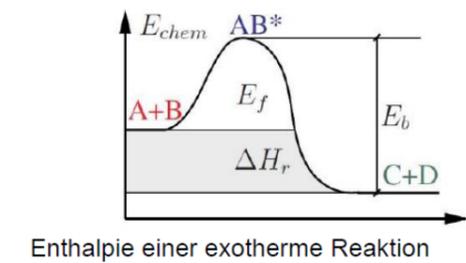
Ein-Schritt-Zersetzung:
100 % Wood → 18 % Char + 82 % Pyrolyzate

N_REACTIONS = 1
MATL_ID (1,1) = 'CHAR'
NU_MATL (1,1) = 0.18
SPEC_ID (1:4,1) = 'PYROLYZATE', 'OXYGEN', 'WATER VAPOR', 'CARBON DIOXIDE'
NU_SPEC (1:4,1) = 0.82, 0, 0, 0
```



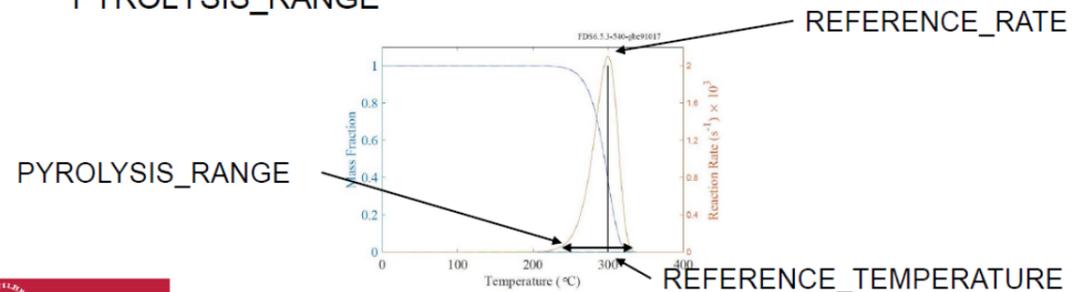
Modellierung in FDS

- Weitere erforderliche Parameter:
 - N_REACTIONS: Anzahl der Zersetzungsreaktion
 - HEATING_RATE (bei Ansatz der REFERENCE_TEMPERATURE): Aufheizgeschwindigkeit des TGA-Versuches
 - HEAT_OF_REACTION: Reaktionsenthalpie
 - HEAT_OF_COMBUSTION: Verbrennungswärme in der Gasphase



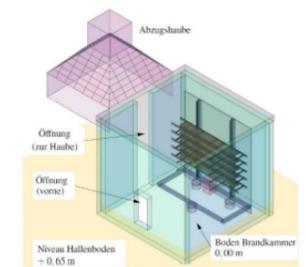
Modellierung in FDS

- Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Arrhenius-Ansatzes:
 - Übergabe des prä-exponentiellen Faktors A und der Aktivierungsenergie E
 - Übergabe der REFERENCE_TEMPERATURE und REFERENCE_RATE;
 - Übergabe der REFERENCE_TEMPERATURE und der PYROLYSIS_RANGE



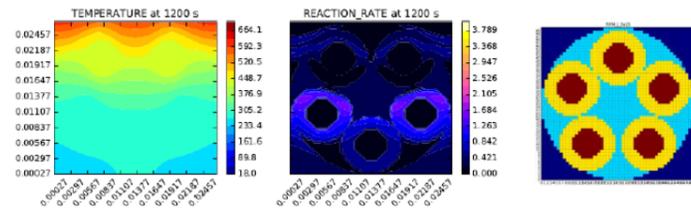
Modellierung in FDS

- Praktische Anwendungsgrenzen:
 - Vielzahl benötigter Parameter,
 - Aufwändige Bestimmung der Parameter,
 - Nur modellhafte Bestimmung der Parameter möglich,
 - Koppelung Pyrolysemodell an eindimensionales Wärmeleitungsmodell
 - Bei Bränden Temperaturbeaufschlagung durch:
 - Wärmestrahlung der Flamme und der Rauchgasschicht, Reflexion der Umfassungsbauteile
 - Konvektionströmungen
 - Wärmeleitung angrenzender Bauteile
- Temperaturverläufe in Objekten mehrdimensional



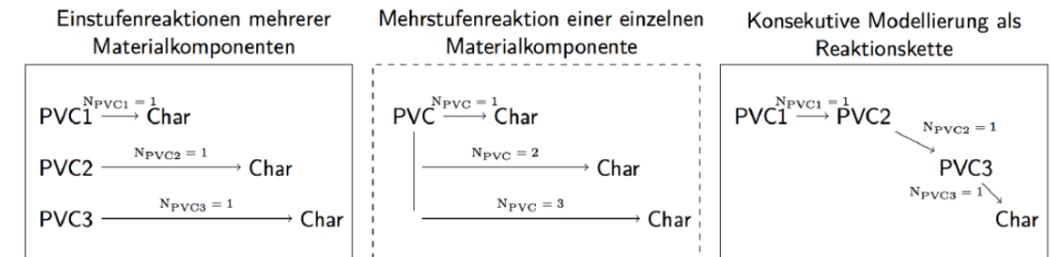
Gekoppeltes Wärmeleitungs-Pyrolysemodell

- Kopplung eines dreidimensionalen Wärmeleitungsmodell mit Pyrolysemodell (Hohm 2010, Siemon 2016)
 - Lösung der instationären Wärmeleitungsfunktion auf Grundlage der Finite Volumen Methode
 - Berücksichtigung der Pyrolyseprozesse über den mit Arrhenius-Ansatz ermittelten Massenverlust und der Reaktionsenthalpie
 - Zeitapproximation als explizites Verfahren
 - Anpassung der Zeitschrittweite in Abhängigkeit der Pyrolyseraktionen



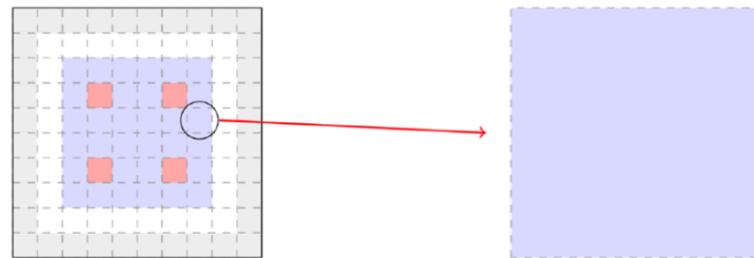
Gekoppeltes Wärmeleitungs-Pyrolysemodell

- Modellierung von Reaktionspfaden



Gekoppeltes Wärmeleitungs-Pyrolysemodell

Stoffebene (Temperaturberechnung) Komponentenebene (Pyrolyseberechnung)



- | | |
|---|--|
| <p>Stoffe:</p> <ul style="list-style-type: none"> Mantelmaterial Füller Aderisolierung Kupferfeder | <p>Komponenten:</p> <ul style="list-style-type: none"> PVC1 PVC2 PVC3 Char1 |
|---|--|

Gekoppeltes Wärmeleitungs-Pyrolysemodell

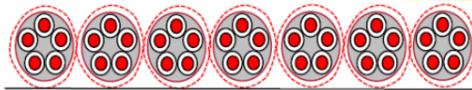
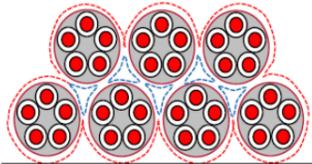
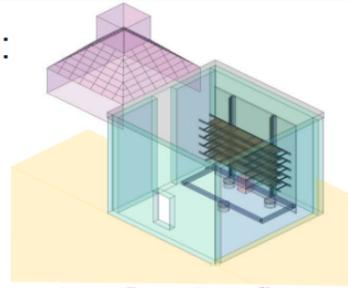
- Validierung anhand von Kleinversuchen
 - Cone-Calorimeter Versuche



- Validierung anhand von Großversuchen im Rahmen OECD PRISME 2:
 - Zielsetzung: Validierung von Brandsimulationsmodellen zur Berechnung der Wärme- und Rauchausbreitung für Anwendung im kerntechnischen Einsetzung

Gekoppeltes Wärmeleitungs-Pyrolysemodell

- Validierung anhand von Großversuchen:
 - Drei Versuchsaufbauten (T1 – T3)
 - Unterschiedliche Kabelanordnungen
 - Variabler Trassenabstand



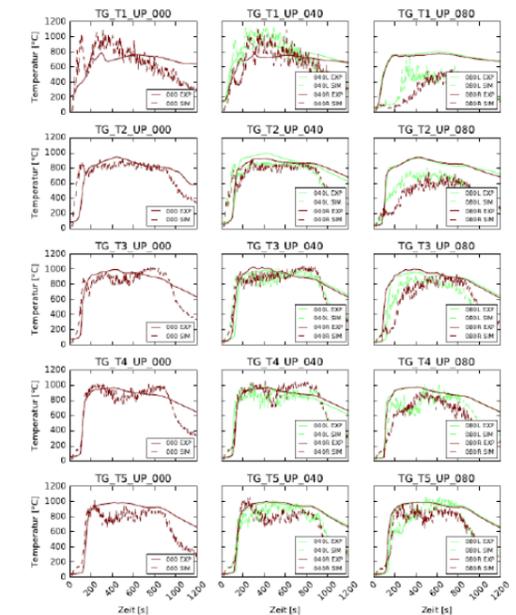
Kabelanordnung T1 und T3

Kabelanordnung T2



Gekoppeltes Wärmeleitungs-Pyrolysemodell

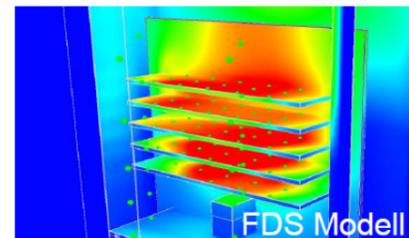
- Gute Prognosefähigkeit
 - Brandentstehungsphase von Vollbränden
 - Temperaturen im Brandnahbereich
 - Massenverluste
 - Brandausbreitung horizontale Kabeltrassen
- Weniger gute Prognosefähigkeit:
 - Geringe Wärmestromdichten
 - Ermittlung der Zündzeitpunkte



Gekoppeltes Wärmeleitungs-Pyrolysemodell

- Bestimmung materialspezifischer Eingangsparameter für PVC-Leistungskabel für FDS Modell

Kabelart	PVC – Leistungskabel
	Ø ≈ 27 mm
Typenkurzzeichen nach VDE 0250	



- TGA-Versuche zur Bestimmung des Massenverlustes

		Mantel	Füller	Aderisolierung
T_{max} (REFERENCE_TEMPERATURE)	1	300 °C	320 °C	295 °C
	2	446 °C	780 °C	446 °C
	3	525 °C	-	525 °C
	4	755 °C	-	755 °C
$\Delta T_{10\%}$ (PYROLYSIS_RANGE)	1	200 °C	2000 °C	200 °C
	2	1500 °C	100 °C	1500 °C
	3	1500 °C	-	1500 °C
	4	250 °C	-	200 °C



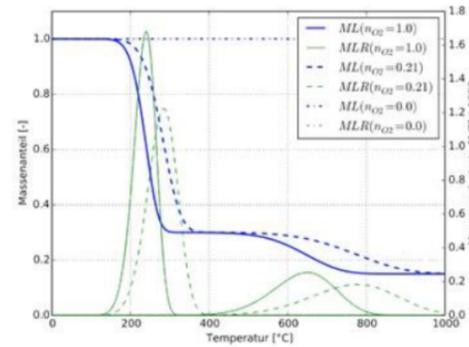
Offene Fragen

- Verbrennungsmodell / Pyrolysemodelle bei vertikaler Brandausbreitung:
 - Bei vertikaler Brandausbreitung sind die Temperaturen in der festen Phase zunehmend von der Konvektionsströmung und von der Wärmestrahlung abhängig
 - Pyrolysegase werden im Gasstrom mitgeführt



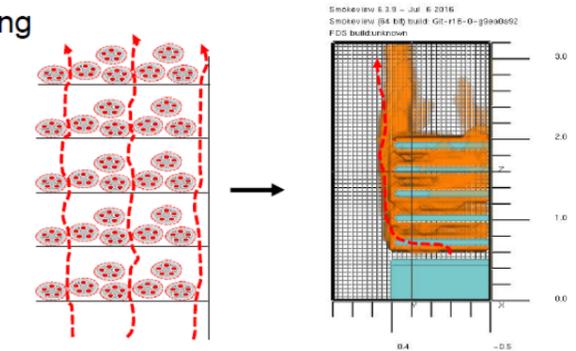
Offene Fragen

- Gültigkeit für unterventilierte Brände
 - Die Massenverlustrate in TGA-Versuchen ist abhängig von der Sauerstoffkonzentration
 - Bei Bränden liegt keine konstante Sauerstoffkonzentration vor, Übertragbarkeit von TGA-Versuche auf Großversuche
 - Bei unterventilierten Bränden sollte die Reaktionsgeschwindigkeit der Verbrennungsreaktionen berücksichtigt werden



Offene Fragen

- Ingenieurmäßige Verwendung erfordert akzeptable Rechenzeiten
- Halbierung des diskreten Ortschrittes Δx führt zu einem 16-fach höheren Rechenaufwand
- Verringerung des Rechenaufwandes
 - „Verschmieren“ der einzelnen Kabel auf größere Volumenelemente, aber
 - dadurch Verlust der lokalen Strömungsphänomene (bspw. Durchströmen von Kabeltrassen und Vorerwärmung)
- Parallelisierung der Berechnung

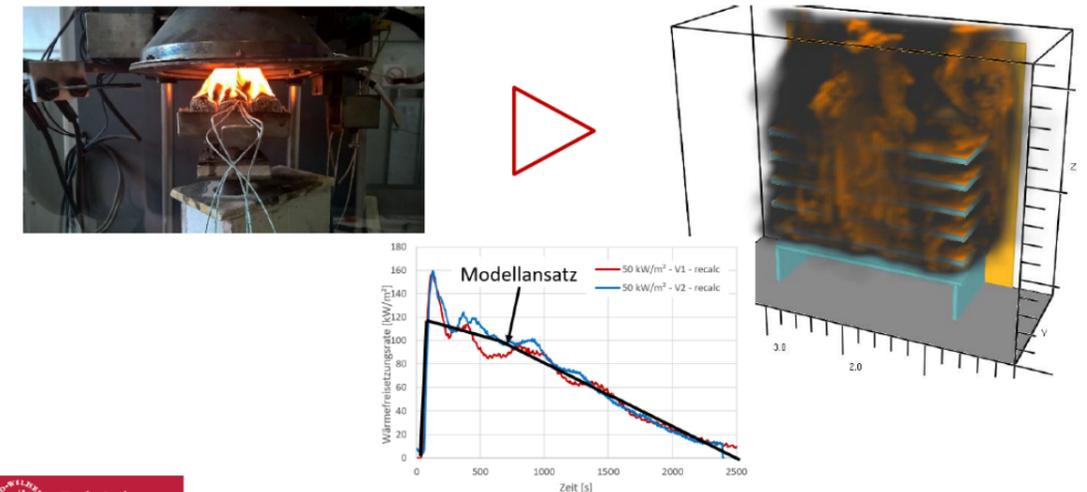


Offene Fragen

- Berücksichtigung von Transportprozessen (von Gasen) innerhalb der festen Phase
 - Unabhängig vom Ort innerhalb der festen Phase, an dem Pyrolysegase freigesetzt werden, werden diese direkt an die Gasphase übergeben
 - In porösen Medien, wie bspw. Wärmedämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, wird die Freisetzung von Pyrolysegasen überschätzt
- Materialien können schmelzen, tropfen und fließen
 - Diese Effekte haben erheblichen Einfluss auf die weitere Zersetzung und die Wärmefreisetzung
 - Materialien können sich z.B. dem Brand entziehen

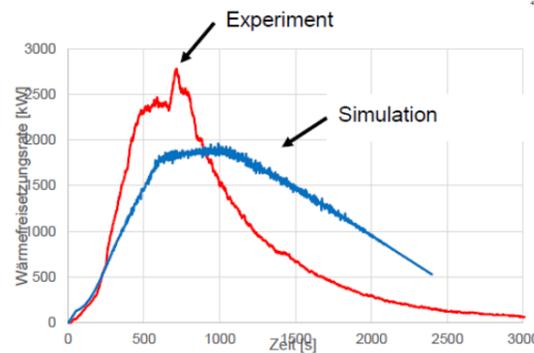
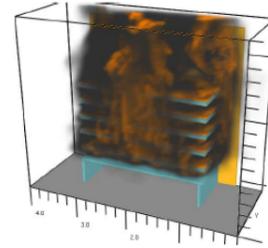
Offene Fragen

- Übertragbarkeit Klein-Versuche → Großversuche
 - Versuche haben gezeigt, dass eine Übertragung der Ergebnisse aus Kleinversuchen auf den großen Maßstab nicht einfach möglich ist



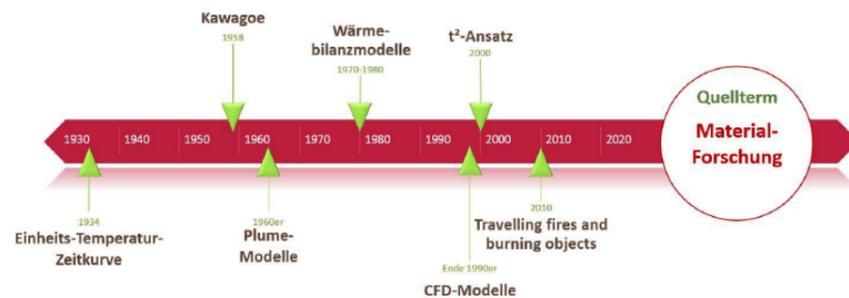
Offene Fragen

□ Übertragbarkeit Klein-Versuche → Großversuche



Zusammenfassung

- Pyrolysemodelle
 - bieten die Möglichkeit wirtschaftlicherer Brandschutznachweise und eine realistischere Prognose von Bränden,
 - sind für die praktische Anwendung derzeit nur eingeschränkt nutzbar und
 - benötigen weitergehende Forschung zur Entwicklung und Validierung



- Jens Spille, M.Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß, Dr.-Ing. Olaf Riese
- Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Technische Universität Braunschweig
- 11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup 09. – 10.11.2017

Tristan Hennen:

Modelling Pyrolysis of Electrical Cables to Simulate Fire Propagation with FDS and its sensitivity

Abstract:

Design fires are frequently used in fire safety engineering. They are relatively easy to use and allow for assessing the smoke management strategies to be applied for a given facility. They face limitations, specifically when the possible fire development within a structure is of importance. Even more so when it is necessary to estimate possible material release. Since the fire development is determined by the environmental conditions in the near field of the fire seat, it is of importance to utilise simulation models that can estimate the fire development within a compartment. One way to achieve this is by modelling the pyrolysis reaction of combustible materials.

A brief overview will be presented of efforts to generate material parameter sets that allow the simulation of pyrolysis of solid materials. This presented work should be regarded as a demonstrator of the procedure, however. Foundation of the presented work is the CHRISTIFIRE campaign, conducted by the U.S.NRC, published in 2012. An inverse modelling procedure is used on experimental data from Cone Calorimeter experiments to generate a material parameter set. It is then applied to predict the fire development within a cable tray installation. Compared are the HRR of a large scale cable fire test with the simulation response. The results are in good agreement with the main features present, however slightly shifted.

Afterwards, an overview is provided on the sensitivity of the presented parameter set. Specifically with the emphasis of the procedure being in a demonstration state for now. It works relatively well only in a tight frame and some of the limitations are highlighted.



WORKSHOP: FDS USERGROUP - PYROLYSIS

09. NOVEMBER 2017

HHP BERLIN, DEUTSCHLAND

MODELLIERUNG DER PYROLYSIS VON KABELN ZUR SIMULATION DER BRANDAUSBREITUNG MIT FDS

TRISTAN HEHLEN



1/22/2018

Document reference

2

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
 - CERN
 - Problemstellung
 - Bemessungsbrände
 - Brandausbreitung
- Kabel Materialparameter
 - Überblick
 - Kabelmodell
- Multiple Tray Simulation
- Sensitivität
 - Reaktionsparameter
 - Cone Simulation
 - Änderung REAC
 - Domain und FDS Version
 - Modell hohe Auflösung
 - Wichtigste Punkte
- Ausblick
 - „Bunte Bilder“



1/22/2018

Document reference

3

Einleitung

- Mitglied im Doktorandenprogramm des CERN
- Arbeit unterstützt durch das Wolfgang-Gentner-Programm des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
- Betreuer: Saverio La Mendola
- Doktorand an der Bergischen Universität Wuppertal
- Fachgebiet: Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr
- Betreuer: Armin Seyfried, Lukas Arnold



1/22/2018

Document reference

5

Einleitung



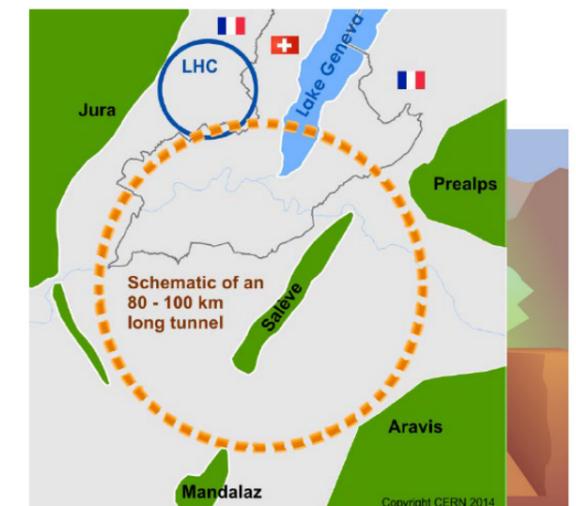
1/22/2018

Document reference

4

Einleitung CERN

- Ausgangspunkt: CERN
 - Einzigartige Anlagen (Tunnel und Versorgungsschächte ~ 76 km, Experiment-Kavernen, ...)
 - Einzigartige Anlagen
 - Große Mengen an Kabeln
- Schwierigkeiten für Arbeits- und Brandschutz
 - Design fires
 - Gefährdungsbeurteilungen, ...



<http://cds.cern.ch/record/1125888/files/bul-pho-2008-078.jpg>
https://cds.cern.ch/record/2134037/files/FCC_schematic.png?subformat=icon-1440
 Copyright CERN 2014



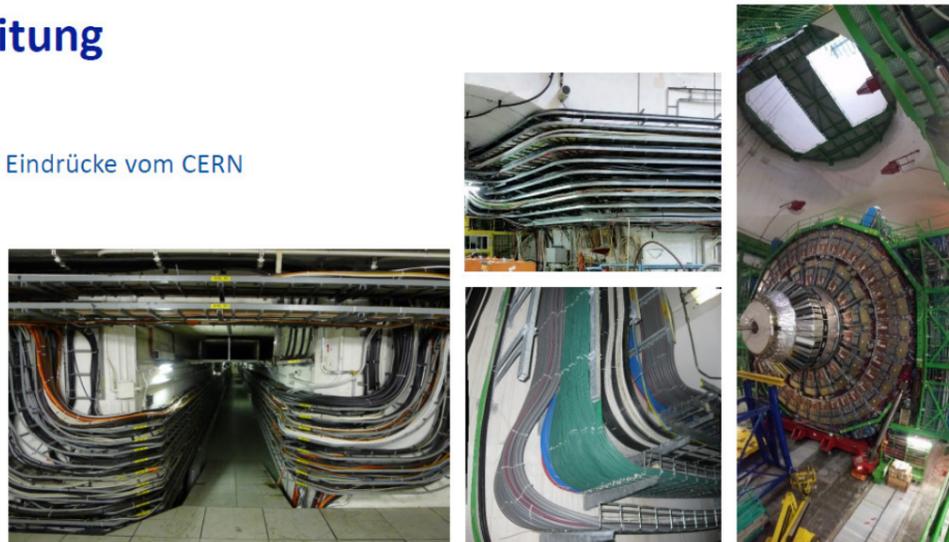
1/22/2018

Document reference

6

Einleitung CERN

- Einige Eindrücke vom CERN



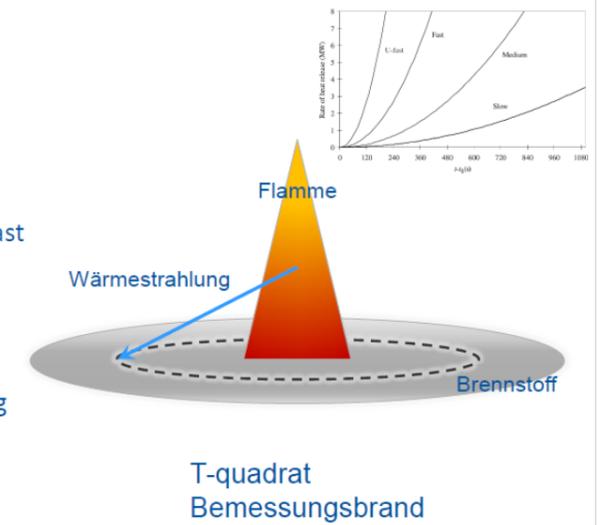
1/22/2018

Document reference

7

Einleitung Bemessungsbrände

- Einfache Anwendung, e.g. T-quadrat
- Annahmen:
 - Flach, homogen verteilte Brandlast
 - Kein Umgebungseinfluß
- Grenzen:
 - Verlauf vorgeschrieben
 - Umgebungseinfluß
 - Abschätzung von Stofffreisetzung ist schwierig
- Aufwändigere design fires möglich, aber hier vernachlässigt.



1/22/2018

Document reference

9

Einleitung Problemstellung

- Abschätzung von:
- Brandausbreitung
 - Stofffreisetzung
 - Entrauchung
 - Evakuierung



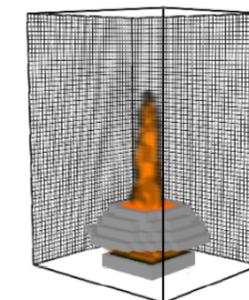
1/22/2018

Document reference

8

Einleitung Brandausbreitung

- Möglicher Ansatz:
- Brandausbreitung mit 3d-CFD Simulationsprogramm abschätzen
 - Parameter von Material Tests ableiten, e.g. Cone Calorimeter oder micro-combustion calorimetry (MCC)
 - Mit inverser Modellierung Parametersatz kalibrieren
 - Um Annahmen/Ungenauigkeiten im (Simulatio-)Modell zu auszugleichen



1/22/2018

Document reference

10

Kabel Materialparameter



1/22/2018

Document reference

11

Materialparameter Überblick

CHRISTIFIRE:

- Daten von Tests verschiedener Größen
- Nützlich für Simulationen (Validieren)

Pictures: CHRISTIFIRE, phase 1



1/22/2018

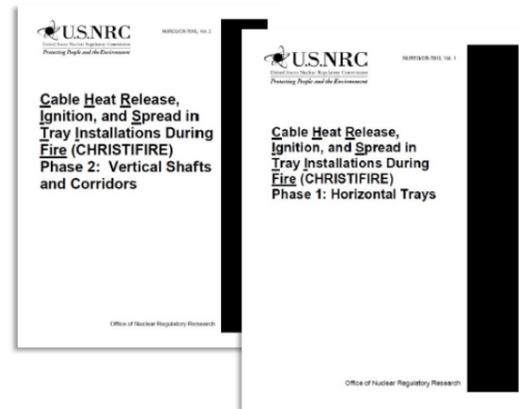
Document reference

13

Materialparameter Überblick

Basiert auf:

- Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE)
- Simulationen mit Fire Dynamics Simulator (FDS) durchgeführt



Source: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr7010/>



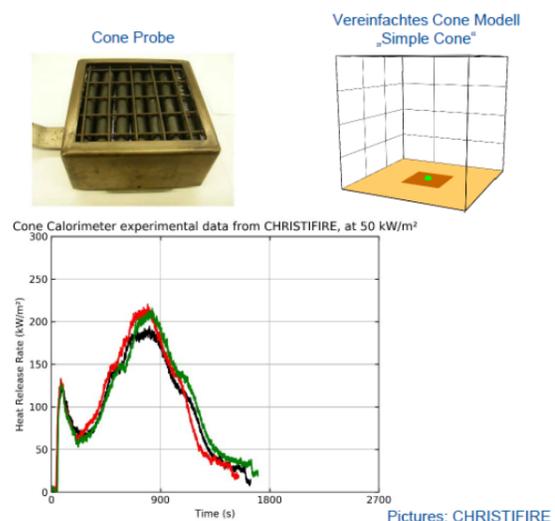
1/22/2018

Document reference

12

Materialparameter Kabel Modell

- Verfahren basiert auf inverser Modellierung
- Verwendung eines Shuffled Complex Evolutionary (SCE-UA) Algorithmus
- Prozess mittels Python 2.7 automatisiert
- Demonstration des Verfahrens:
 - Stark vereinfachtes Cone Calorimeter Modell „Simple Cone“
 - Nur Daten eines Versuches als Zieldaten verwendet



1/22/2018

Document reference

14

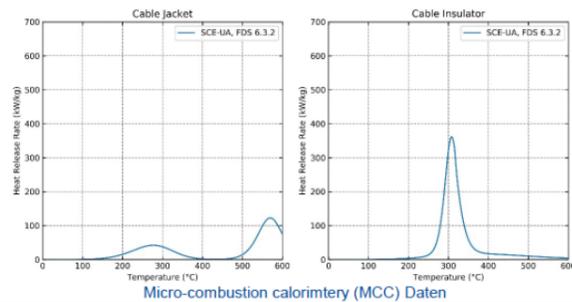
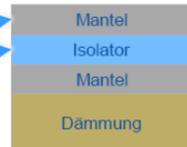
Materialparameter Kabel Modell

- Zwei Kabelkomponenten (MATL)
 - Isolator und Mantel
- Je zwei Zersetzungsreaktionen
 - Materialzerersetzung mit Arrhenius
 - Basiert auf MCC
- Ein Rückstand je Kabelkomponente

Annahme:

- REAC TOLUENE
 - Strahlungsanteil Flamme (0.45)
- Soot yield auf 0.178 g/g gesetzt

Struktur der SURF für Cone Simulation



1/22/2018

Document reference

15

Multiple Tray Simulation

Based on CHRISTIFIRE



1/22/2018

Document reference

17

Materialparameter Kabel Modell

- SCE-UA über insgesamt 35 Parameter:
 - Thermophysikalische Parameter
 - Rückstände
 - Reaktionskinetik
 - Schichtdicken
 - Heizwerte
- Übertragen des besten Parameterset in Simulation eines full-scale Test (Multiple Tray Test 3)



Pictures: CHRISTIFIRE



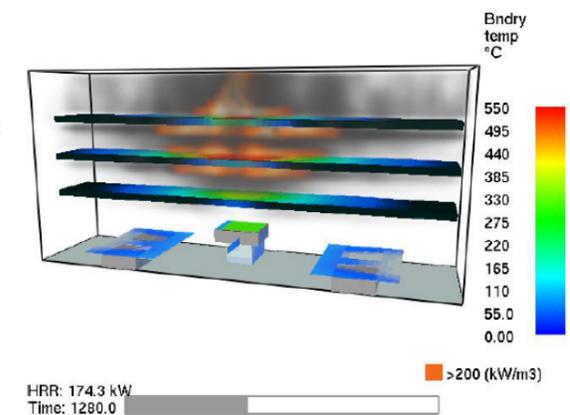
1/22/2018

Document reference

16

Multiple Tray Simulation Gitterauflösung 5 cm

- Brandausbreitung wurde in der Simulation des Realversuches erreicht
 - Mesh mit 5 cm würfelförmigen Zellen
 - Brenner Oberflächentemperatur auf 410°C gesetzt, langsames Abkühlen



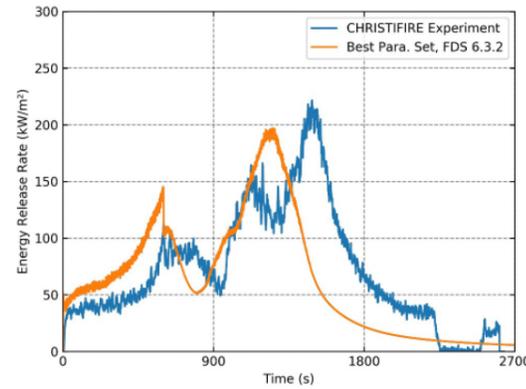
1/22/2018

Document reference

18

Multiple Tray Simulation Gitterauflösung 5 cm

- Vergleich der Energiefreisetzung
 - Brenner liefert 40 kW für 600 s
 - Wichtigste Merkmale vorhanden
 - Beginn wird überschätzt
 - Brand erlischt zu schnell
 - Min/max
- Experimentaldaten von CHRISTIFIRE MT-3



1/22/2018

Document reference

19

Sensitivität Überblick

Diskussion der Sensitivität auf den nachfolgenden Folien:

- Von klein nach groß; MCC → Kabelpitschen
- Aufzeigen von Grenzen
- Vorstellung von Möglichkeiten zum Erzielen besserer Ergebnisse
- Diskussion der bis hierher vorgestellten Bemühungen



1/22/2018

Document reference

21

Sensitivität



1/22/2018

Document reference

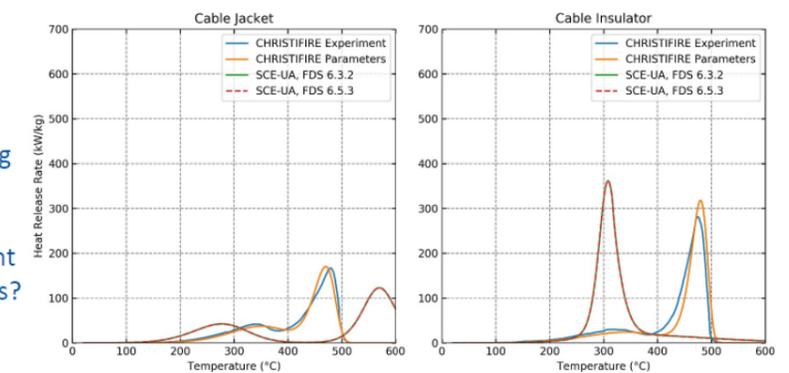
20

Sensitivität Reaktionsparameter

Vergleich MCC Daten:

- Experiment
- Simulation
- Inverse Modellierung (SCE-UA)

Welche Grenzen braucht der SCE-UA Algorithmus?



1/22/2018

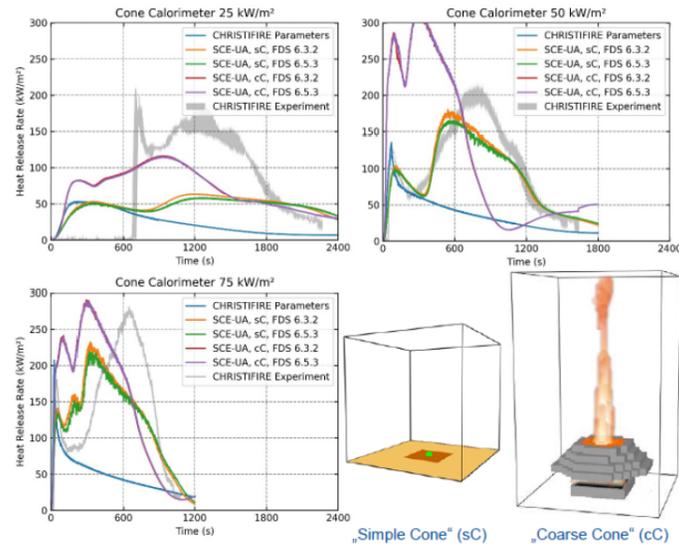
Document reference

22

Sensitivität Cone Simulation

Cone Calorimeter Vergleich,
Experiment und Simulation.

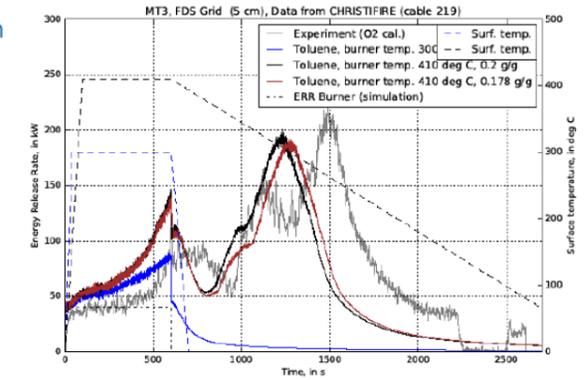
Unterschiede in der FDS Version
für Cone und MCC Simulation
kaum zu erkennen.



Sensitivität Änderungen REAC

Änderungen an REAC vorgenommen nach
Abschluss der inversen Modellierung

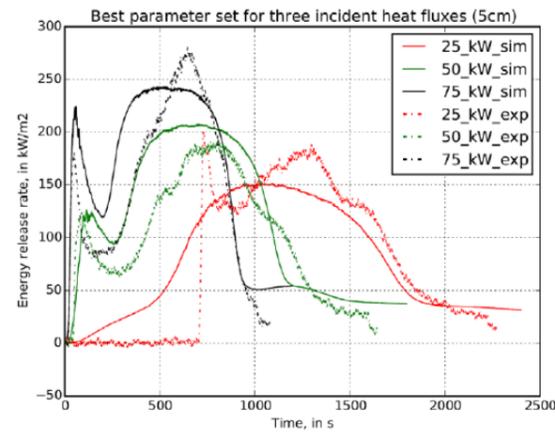
- REAC von METHANE zu TOLUENE
- Soot yield
 - Geraten: 0.2 g/g
 - Tabelliert für Toluene: 0.178 g/g
- Oberflächentemperatur des Brenners



Sensitivität Cone Simulation

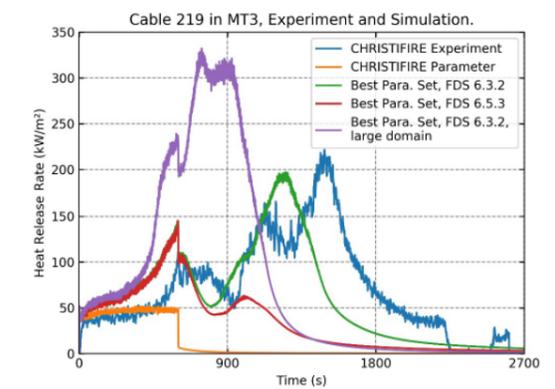
Verbesserung des inversen
Modellierungsverfahrens:

- Parametersatz in verschiedenen Umgebungen testen
- Höhere Gitterauflösung (Simple Cone)
- Zieldaten nicht als Linie, sondern Fläche?



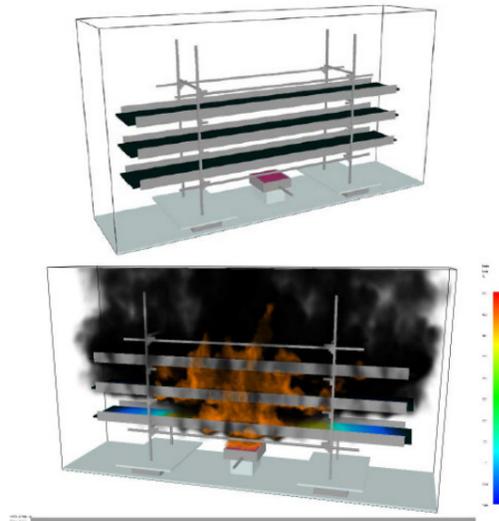
Sensitivität Domain und FDS Version

- Verschiedene FDS Versionen haben scheinbar großen Einfluss in real-scale
- Auf Domain-Größe achten!
- Parameter der Reaktionskinetik allein scheinbar nicht ausreichend um das Material zu beschreiben



Sensitivität Model hohe Auflösung

- Parameterset ist gitterabhängig
- Simulation mit 2 cm Zellen führt zu deutlich schnellerer Brandausbreitung
 - Höhere Auflösung der Flamme
- Soot yield und Strahlungsanteil waren anders während der inversen Modellierung
→ Unterschiedliches heat feedback



1/22/2018

Document reference

27

Sensitivität Wichtigste Punkte

Zusammenfassung:

- Ändern der FDS Version
- Ändern der Zellengröße (Simple Cone, Coarse Cone, HiRes Cone, Pritschenanordnung, ...)
- Beim Übergang „Simple Cone“ → „MT-3“ waren starke Änderungen der REAC nötig
- Inverse Modellierung benötigt breiteres Spektrum für die Zieldaten (von CHRISTIFIRE nehmen)
- Größere Domain ist nötig, um alle relevanten Prozesse abzudecken
- Welche Grenzen für SCE-UA setzen?



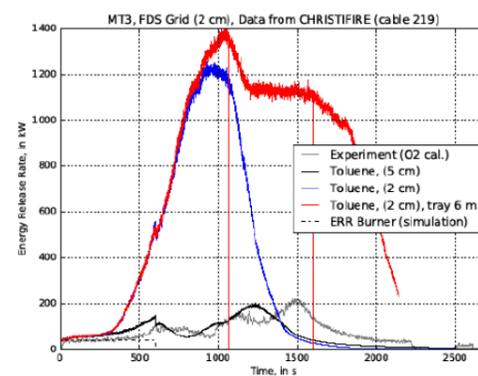
1/22/2018

Document reference

29

Sensitivität Model hohe Auflösung

- Energiefreisetzung (ERR) über Zeit, für 2 cm Gitter
- Kurz (3 m) und mittlere (6 m) Länge der Kabelpritschen
- Ergebnisse von 5 cm Simulation und Experiment zum Vergleich



1/22/2018

Document reference

28



1/22/2018

Document reference

30

Patrick Lauer:**Methoden zur Abschätzung der materialspezifischen Parameter zur Pyrolysemodellierung****Abstract:**

Um komplexe Brände mit Brandausbreitung simulieren zu können, muss die Pyrolyse von Feststoffen, also die thermochemische Dekomposition von Feststoffen und der Phasenwechsel von der Fest- in die Gasphase, modelliert werden.

Die Modellierung der Pyrolyse basiert maßgeblich auf den thermophysikalischen und reaktionskinetischen Eigenschaften eines Materials und des daraus produzierten Produkts. Der Vortrag stellt verschiedene Methoden vor, um aus vorliegenden kleinskaligen Laborversuchen diese Eigenschaften abzuleiten und bewertet sie qualitativ anhand Ihrer Eignung.

Neben dem manuellen graphischen Ableiten und einem graphischen Curve-Fitting-Ansatz in FDS wird eine Kopplung des in FDS implementierten Pyrolysemodells mit einem adaptierbaren metaheuristischen Optimierungsansatz vorgestellt. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere, zukünftig nutzbare Methoden gegeben.

Methoden zur Abschätzung

der materialspezifischen Parameter zur Pyrolysemodellierung

Patrick Lauer
Bergische Universität Wuppertal
lauer@uni-wuppertal.de

Inhalt

1. Inhalt
2. Einleitung
3. Ableiten aus TGA-Versuchen
4. Parameter abschätzen mit FDS
5. Weitere direkte Möglichkeiten
6. Diskussion direkte Methoden
7. Inverse Modellierung
8. Diskussion
9. Literatur

Einleitung

Was ist Pyrolyse?

Pyrolyse beschreibt die thermochemische Dekomposition von Feststoffen und den Phasenwechsel von der Fest- in die (reaktionsfähige) Gasphase und hängt ab von den materialspezifischen reaktionskinetischen (und thermophysikalischen) Parametern.

Warum wollen wir Pyrolyse modellieren?

Um komplexe Brände mit Brandausbreitung simulieren zu können, ist Pyrolysemodellierung notwendig.

Wie beschreibt man Pyrolyse?

Arrhenius-Gleichung:

$$r = AY^n \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

Modellierung von Pyrolyse in FDS

Modellierungsansatz:

Eigenschaften durch kleinskalige Laborversuche ermitteln und auf ganze Bauteile und -gruppen übertragen

Laborversuche:

- Thermogravimetrische Analyse (TGA)
- Cone Calorimeter
- und ähnliche...

Wichtige Parameter

Parameter	Formelzeichen
Aktivierungsenergie	E_a
präexponentieller Faktor	A
Reaktionsordnung	n
Dichte	ρ
Wärmeleitfähigkeit	k
Spezifische Wärmekapazität	c

Ableiten aus TGA-Versuchen

Grafische Ableitung der Aktivierungsenergie

Verschieden Methoden existieren für verschiedene Versuchsaufbauten

Vorstellung einer Methode[2] für TGA-Versuch mit konstanter Heizrate

Graphisches Ableiten I

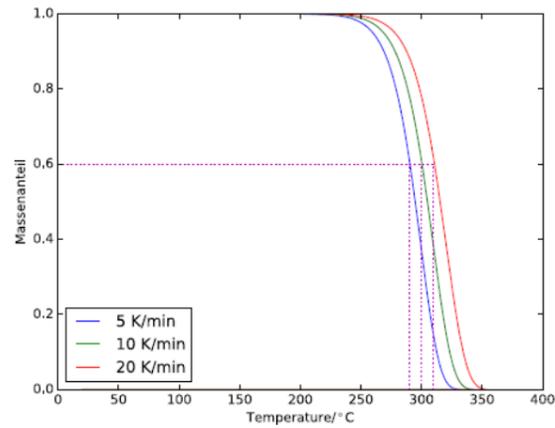


Figure 1. Massenverlust bei drei Heizraten

Graphisches Ableiten II

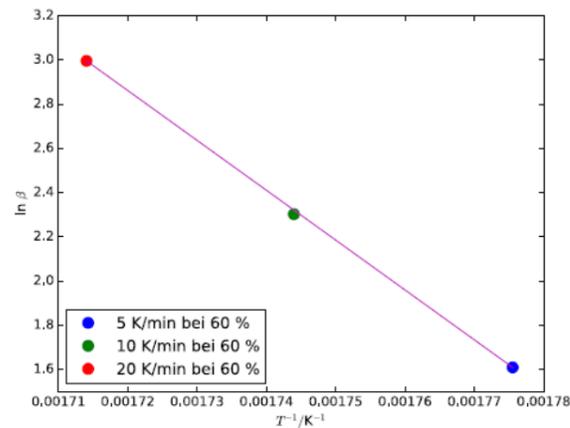


Figure 2. Drei Punkte bei gleichem Massenanteil und unterschiedlicher Heizrate

Graphisches Ableiten III

Berechnung der Aktivierungsenergie aus der sich ergebenden Steigung multipliziert mit der negativen Gaskonstante

$$E_a = -R \cdot \frac{\Delta \ln \beta}{\Delta 1/T} \quad (2)$$

Ermittlung des präexponentiellen Faktors dann bspw. per interaktiver Methode nach Zsako [9]

Parameter abschätzen mit FDS

Voraussetzung:

- Einzelne Reaktion(en) erster Ordnung
- TGA- oder MCC-Versuchsdaten

Dann:

Grafische Ableitung aus Massenverlustrate (TGA-Versuch) möglich [7]

Übersicht Parameter

Parameter	Zeichen	Einheit
Reference Temperature	$T_{p,i}$	$^{\circ}\text{C}$
Reference Rate	$\frac{r_{p,i}}{Y_{s,i}(0)}$	s^{-1}
Pyrolysis Range	ΔT	$^{\circ}\text{C}$
Heizrate	\dot{T}, β	$\frac{\text{K}}{\text{min}}$
Massenanteil	$Y_{s,i}$	
Rückstand	ν	

Definitionsmöglichkeiten

1. Reference Temperature
2. Reference Temperature + Reference Rate
3. Reference Temperature + Pyrolysis Range

zusätzlich jeweils Heating Rate und jeweils nicht Aktivierungsenergie und präexponentieller Faktor

T_p , r_p und ΔT

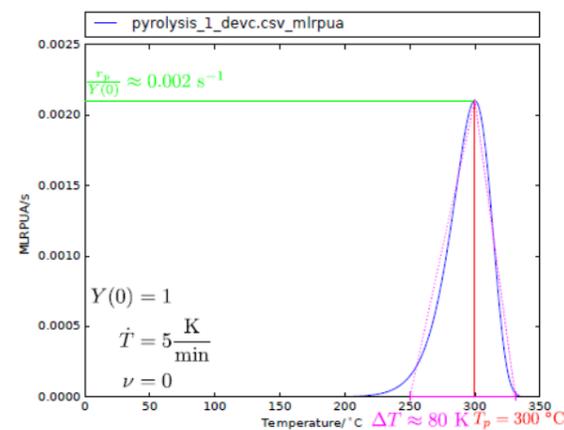


Figure 3. Reference Temperature, Reference Rate und Pyrolysis Range

Wie geht FDS mit den Werten um?

Berechnung Aktivierungsenergie

$$E_{i,1} = \frac{er_{p,i}}{Y_{s,i}(0)} \frac{RT_{p,i}^2}{\dot{T}} \quad (3)$$

Berechnung Präexponentieller Faktor

$$A_{i,1} = \frac{er_{p,i}}{Y_{s,i}(0)} e^{\frac{E}{RT_{p,i}}} \quad (4)$$

Zusammenhang Reference Rate und Pyrolysis Range

$$\frac{r_{p,i}}{Y_{s,i}(0)} = \frac{2\dot{T}}{\Delta T} (1 - \nu_{s,i}) \quad (5)$$

Weitere direkte Möglichkeiten

Matala/Lautenberger [6]

Friedeman [3]

...

Diskussion direkte Methoden

Direkte Methoden liefern aus TGA-Versuchen schnell ein Ergebnis, das ausreichend genau ist.

Aber: Lassen sich aus TGA-Versuchen die nötigen Parameter ableiten, um eine reale Brandentwicklung zu beschreiben?

Denn: Heizraten in TGA-Versuchen üblicherweise im Bereich 2...20 K/min, im realen Brandfall aber teilweise deutlich höher

Und: Im Bauteil interagieren Stoffe miteinander,

Sowie: TGA-Versuche sind nur praktikabel bei wenig komplexen Reaktionen

Daher: Inverse Modellierung mit Daten aus größerskaligen Laborversuchen (z.B. Cone Calorimeter) und Einbeziehung thermischer Parameter

Inverse Modellierung

Vorwärtsproblem:

- Modellparameter -> Daten

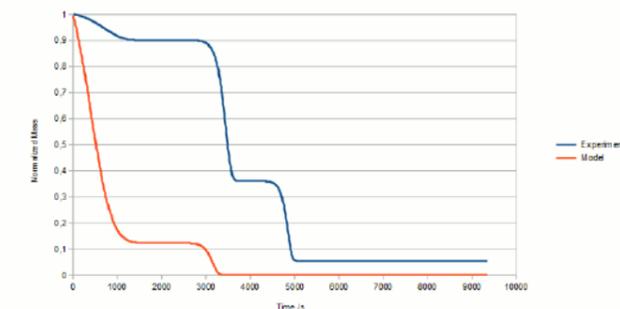
inverse Formulierung:

- Daten -> Modellparameter

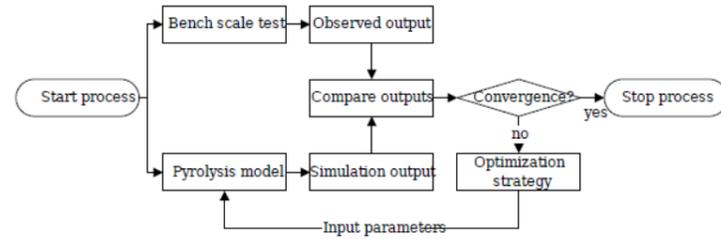
Anwendung:

- Massenverlust(rate) aus Versuchen -> Parameter für Pyrolysemodellierung

Curve Fitting



Methode

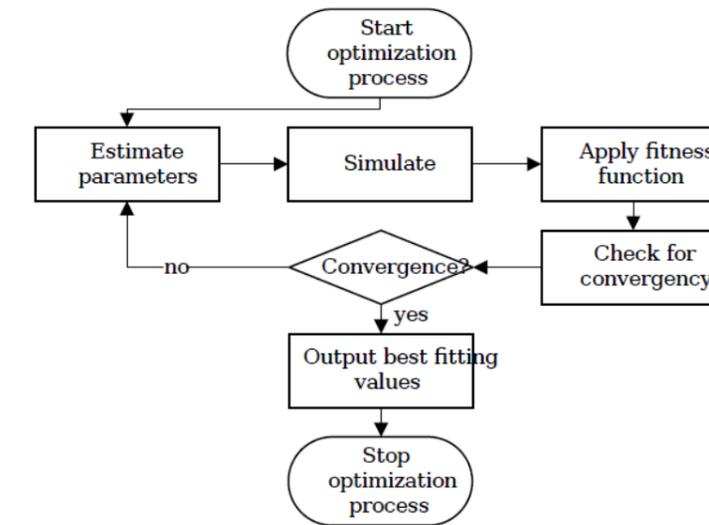


Lösungsansätze

Gesucht werden die Parameter für das Pyrolysemodell, bei der die Unterschiede zwischen experimentellen und modellierten Massenverlusten minimal werden.

Durch "Probieren" wird eine Lösung gefunden. Metaheuristische Optimierungsalgorithmen "probieren" Lösungen "clever" und suchen neue Lösungen durch vorherige "Erfahrung".

Optimization Process



Algorithmen

- Orientieren sich häufig an Naturphänomenen (Evolution, Schwarmverhalten...)
- suchen lokal, global und zufällig nach Lösungen
- brauchen mehrere 100...10000 Iterationen zur Lösung
- liefern zur Zeit die bestmöglich passenden Lösungen

Beispiel: Beschreibung

Vergleich von drei Algorithmen [5]

- Artificial Bee Colony (ABC) [4]
- Fitness Scaled Chaotic Artificial Bee Colony (FSCABC) [8]
- Shuffled Complex Evolution (SCE) [1]

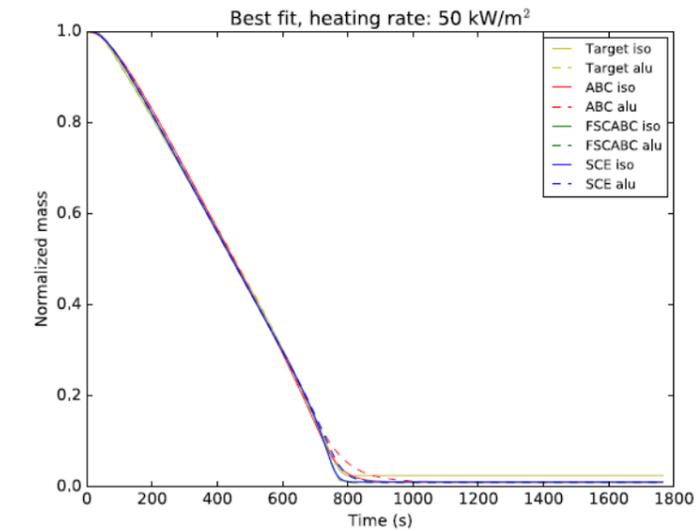
Material: PMMA

Versuch: Mass Loss Cone, 50 kW/m², isolierender und leitender Untergrund

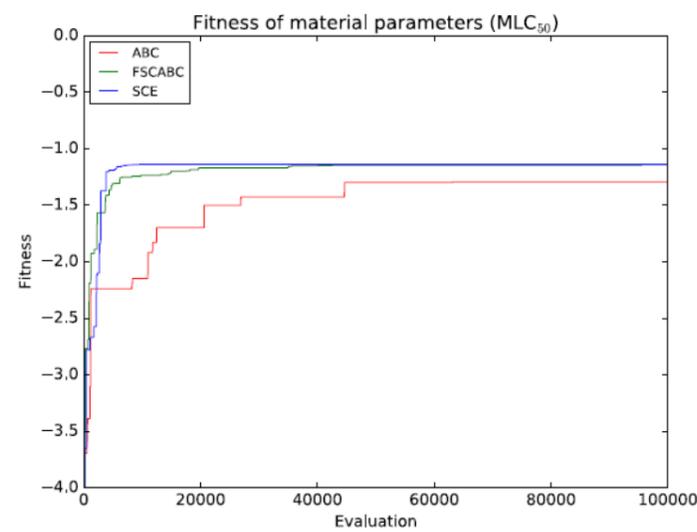
Reaktionen: Eine

Zielgrößen: Arrhenius-Parameter, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität

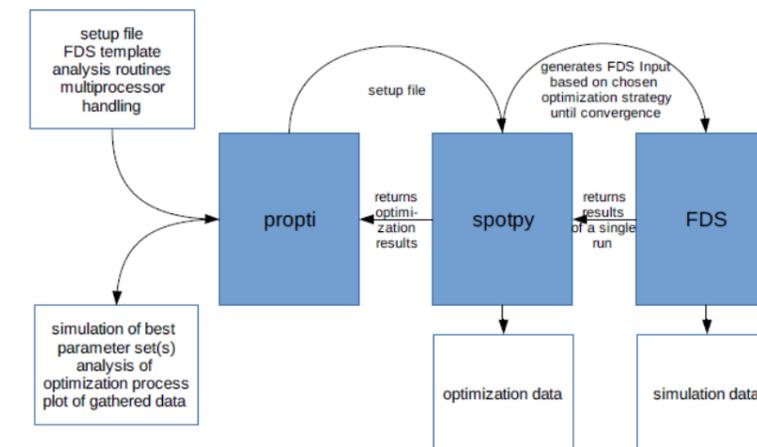
Beispiel: Ergebnisgüte



Beispiel: Optimierungsprozess



Ausblick: propti I



Ausblick: propti II

Tool in Entwicklung um ein Interface zu bieten, dass

- FDS mit einem Parameter Estimation Framework (spotpy) verknüpft
- auf die Anwendung der Parameterabschätzung zur Pyrolysemodellierung abgestimmt
- parallelisierbar und nutzbar auf HPC-Systemen ist
- Optimierungsergebnisse analysiert und anschauliche Grafiken erzeugt
- den Optimierungsalgorithmus modular auswählbar macht
- alle FDS-Funktionen nutzbar macht
- Vorlagen und Beispieldateien liefert

◦

Diskussion

Fragen? Erfahrungen? Anmerkungen?

◦

Literatur

- [1] QY Duan, Vijai K Gupta, and Soroosh Sorooshian. "Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization." *Journal of Optimization Theory and Applications* 76 (3). Springer: 501–521. 1993. [»](#)
- [2] Joseph H Flynn, and Leo A Wall. "A Quick, Direct Method for the Determination of Activation Energy from Thermogravimetric Data." *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Letters* 4 (5). Wiley Online Library: 323–328. 1966. [»](#)
- [3] Henry L Friedman. "New Methods for Evaluating Kinetic Parameters from Thermal Analysis Data." *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Letters* 7 (1). Wiley Online Library: 41–46. 1969. [»](#)
- [4] Dervis Karaboga. *An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization*. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department. 2005. [»](#)
- [5] Patrick Lauer, Corinna Trettin, Friedrich-Wilhelm Wittbecker, and Lukas Arnold. "PERFORMANCE OF OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR DERIVING MATERIAL DATA FROM BENCH SCALE TESTS." [»](#)
- [6] Anna Matala, Chris Lautenberger, and Simo Hostikka. "Generalized Direct Method for Pyrolysis

◦

Pascal Matura, Benjamin Schaufelberger:

Modellierung eines Schwelbrands mittels Pyrolyse mit FDS

Abstract:

Im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts GAS-O-CHROM1 untersucht das Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik den Aspekt der Brandgasentstehung und -ausbreitung mittels numerischer Simulationen, insbesondere mit FDS. Ein Szenarium befasst sich mit einem Buchenholzsichelbrand nach DIN EN 54, bei dem 10 Buchenholzquader auf einer Heizplatte positioniert und durch einen definierten Temperaturanstieg der Heizplatte zum Schwelen gebracht werden. Zur Modellierung der Brandgasentstehung in diesem Szenarium wird ein vereinfachtes Simulationsmodell in FDS unter Verwendung eines Pyrolysemodells für Buchenholz2 verwendet. Die Analyse der Simulationsergebnisse umfasst die Wärmeausbreitung im Buchenholz (solid) sowie die Temperaturdynamik insbesondere an der Holzoberfläche (welche unmittelbar in das Pyrolysemodell einfließt) und in ihrer unmittelbaren Umgebung. Die mit dem Pyrolysemodell errechnete Abbrandrate wird mit experimentellen Daten in Bezug gesetzt. Die Abweichungen werden diskutiert und ihre möglichen Ursachen identifiziert. Darauf basierend wird ein modifizierter Modellierungsansatz vorgestellt, der eine verbesserte Prognose der Abbrandrate und damit der Brandgasentstehung erlaubt.

MODELLIERUNG EINES SCHWELBRANDES MITTELS PYROLYSE MIT FDS

FDS Anwendertreffen, 09.11.2017, Berlin

Benjamin Schaufelberger, Dr. Pascal Matura

benjamin.schaufelberger@emi.fraunhofer.de, pascal.matura@emi.fraunhofer.de



Seite 1
© Fraunhofer EMI

AGENDA

- Hintergrund: BMBF-Förderprojekt GAS-O-CHROM
- Buchenholzsichelbrand nach DIN EN 54
- Modellierung der Brandgasausbreitung
 - Randbedingungen des FDS-Modells
 - Validierung
- Modellierung Brandgasentstehung
 - FDS-Ersatzmodell der Brandquelle
 - Verifizieren der Wärmeleitung in FDS
 - Pyrolyse-Funktion
 - Analyse der simulierten Temperatur- und Brandgas-Entwicklung
 - Verbesserter Modellierungsansatz
- Fazit

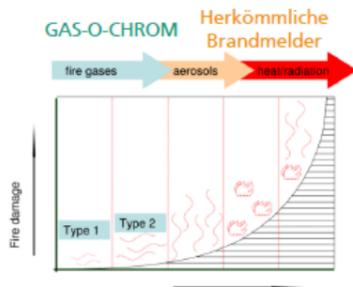
Seite 2
© Fraunhofer EMI



GAS-O-CHROM^[1]

Kurzvorstellung

- Problematik: Späte Alarmauslösung herkömmlicher Rauchwarnmelder aufgrund geringer Anzahl an Partikel in früher Brandphase
- Freisetzung von Brandgasen wie z.B. Kohlenstoffmonoxid (CO) bereits in früher Brandphase
- Ziel von GAS-O-CHROM: schnellere Feuerrettung



Entstehung von Brandprodukten und Brandschäden [2]

[1] https://www.sifo.de/files/Projektumriss_GAS-O-CHROM.pdf

[2] Lenkeit, M.: Gassensoren für die Branddetektion, 4.Gassensor-Workshop Freiburg, 2011



Herkömmlicher Brandmelder, Quelle: Siemens AG

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

Gesamtwendung
1,4 Mio. €

Projektlaufzeit
10/2016 – 10/2019

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

Assoziierte Partner:
Hekatron Vertrieb GmbH, Sulzburg
VSS Schadenverhütung GmbH, Köln
Feuerwehr Freiburg
Portbes-Herrn, Bonn

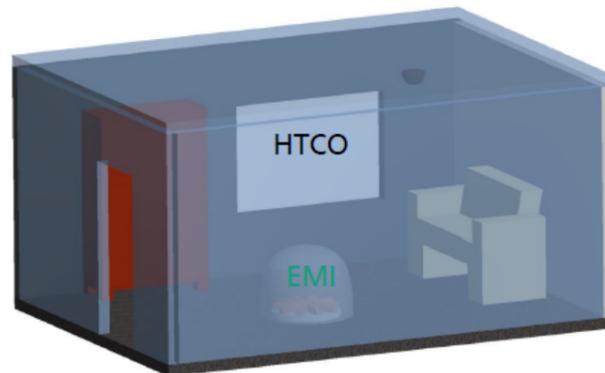
Vorhabenkoordinator
Roland Pohle
Siemens AG
E-Mail: roland.pohle@siemens.com

Quelle: [1]

GAS-O-CHROM

Modellierung der Entstehung und Ausbreitung von Brandgasen

- Simulation praxisrelevanter Szenarien zur Auslegung und Positionierung neuer Brandgasmelder
- Validierung des Modellierungsansatzes anhand durchgeführter Experimente
- EMI: Modellierung der Brandgasentstehung und der lokalen Brandgasausbreitung mit FDS
- HTCO: Modellierung der großräumigen Brandgasausbreitung im Brandraum und darüber hinaus



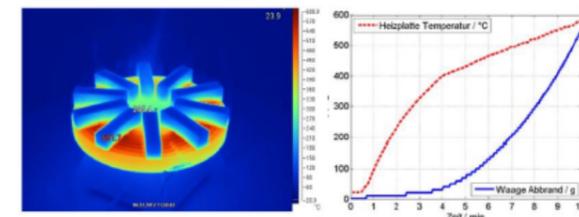
Buchenholzschwelbrand nach DIN EN 54

Versuchsaufbau und Messungen

- Durchführung im Brandlabor
- 10 Buchenholzstücke
- Definierter Temperaturanstieg
- Bestimmung des Abbrandes (Waage)
- Messung der Lufttemperatur und der CO-Konzentration



Durch Schwelbrand verursachte Rauchentwicklung. Quelle: Hekatron



Links: Brandquelle, 10 Buchenholzstücke (10 x 2 x 2,5 cm³) [3]. Rechts: definierter Temperaturanstieg der Heizplatte und gemessener Abbrand [3]

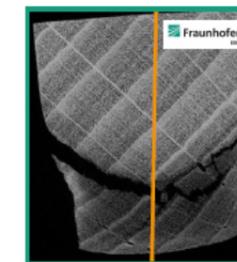
➔ Aufgrund definierter Bedingungen und detaillierten Messungen gut zur Validierung von Simulationsmodellen geeignet

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

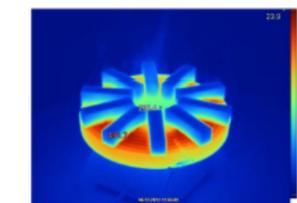
Buchenholzschwelbrand nach DIN EN 54

Untersuchung Brandquelle mittels CT-Aufnahmen

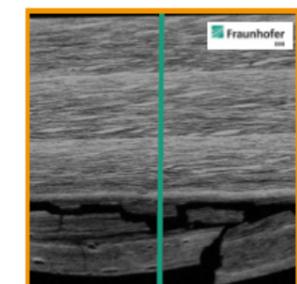
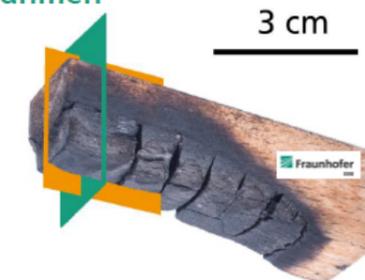
- Inhomogene Temperaturverteilung auf der Heizplatte führt zu unterschiedlich starker Verkohlung entlang der Längsachse
- Faserartige Holzstruktur, z.B. Jahresringe, gut in CT-Aufnahmen zu erkennen
- Verkohlte Bereiche geringer Dichte erscheinen in CT-Bildern dunkler
- U-förmiger Grenzbereich zwischen verkohltem und nicht verkohltem Holz (grüne Ebene)
- Verkohlung führt zu einem Massenverlust von ca. 20 %



U-förmiger Grenzbereich



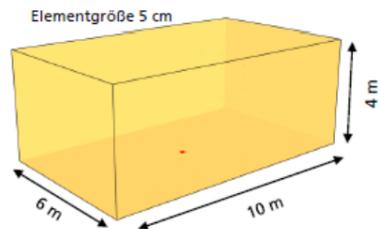
Inhomogenes Temperaturfeld, Gutmacher [3]



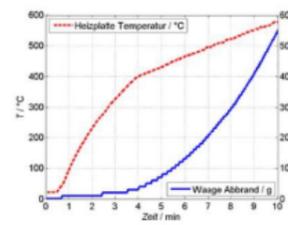
Gefaserte Struktur in verkohltem und nicht verkohltem Holz

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

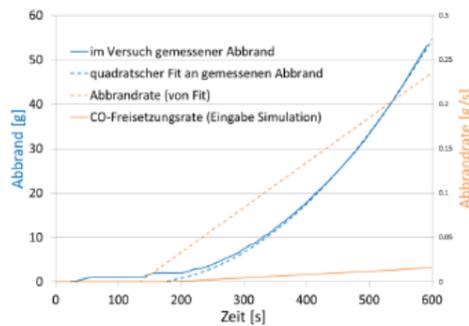
Modellierung Brandgasausbreitung Randbedingungen des FDS-Modells



- Abmessungen Raum und Heizplatte bekannt
- Temperaturrampe der Heizplatte als Randbedingung übernommen
- CO-Freisetzung (proportional zur Abbrandrate), Maximalwert von 0,016 g/s kalibriert anhand eines Sensorsignals, entspricht 7 % CO-Anteil, vgl. [4]



Definierter Temperaturanstieg der Heizplatte und gemessener Abbrand [3]

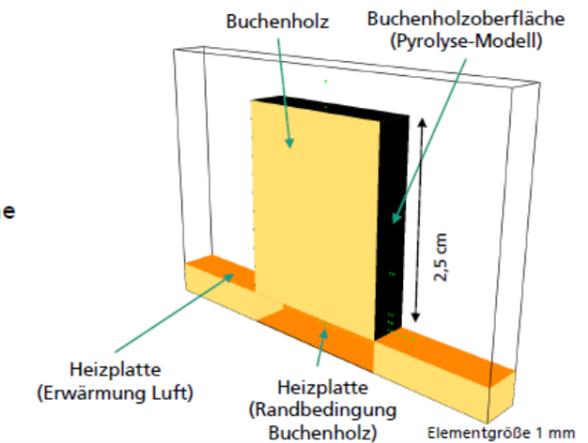


[3] Gutmacher, D.; Hofer, U.; Wöllenstein, J.: *Detektion und Ausbreitung von Brandgasen*; Lehrstuhl für Gassensoren Universität Freiburg
 [4] Gomez, C.; Velo, E.; Barontini, F.; Cozzani, V.: *Influence of Secondary Reactions on the Heat of Pyrolysis of Biomass*, Ind. Eng. Chem. 48, 2009

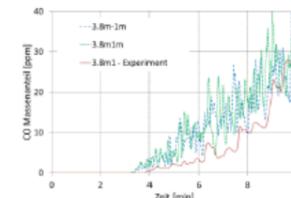
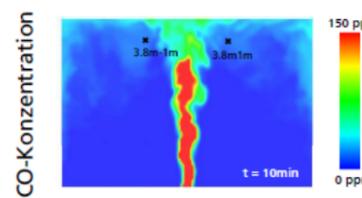
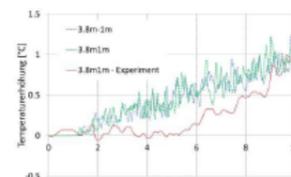
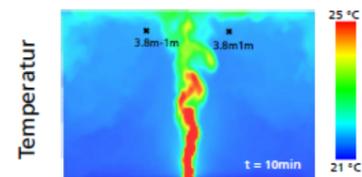
Modellierung der Brandgasentstehung FDS-Ersatzmodell der Buchenholzbrandquelle

- Modellierung der CO-Freisetzung im Buchenholzscharbrand mit Hilfe temperaturabhängiger Pyrolysefunktionen unter Berücksichtigung der Wärmeleitung (im Holz) und des Wärmeübertrages zwischen Luft und Holz

- Vereinfachte Modell-Annahmen
 - Ausschnitt eines einzelnen Buchenholzstückes (Quasi-2D-Modell)
 - Periodische Randbedingungen
 - Pyrolyse auf der Holzoberfläche als Funktion der lokalen Oberflächentemperatur



Brandgasausbreitung im Buchenholzscharbrand Temperatur- und Konzentrationsverläufe



Temperatur und CO-Konzentration nach 10 min (FDS-Simulation)

Vergleich zwischen FDS-Simulation (gestrichelte Linien) und Experiment [3]

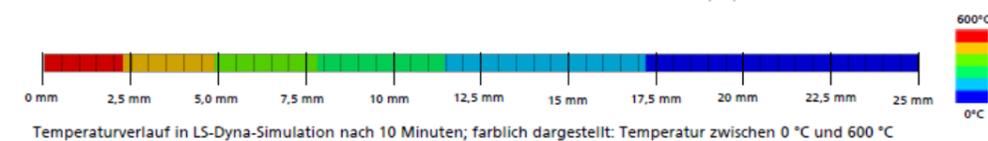
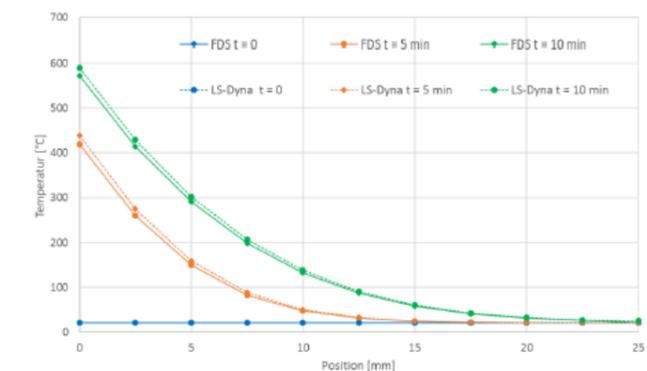
Die mit FDS simulierten Verläufe der Temperatur und CO-Konzentration stimmen gut mit den experimentellen Werten überein

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

Modellierung der Brandgasentstehung Verifizieren der Wärmeleitung in FDS

- Verifizieren der Wärmeleitung im FDS-Modell. Temperatur der Heizplatte als Randbedingung an der Unterseite, andere Oberflächen adiabatisch
- Im Vergleich dazu: eindimensionale Wärmeleitung mit LS-Dyna
- Elementgröße FDS und LS-Dyna Modell: 0,5 mm

Gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe



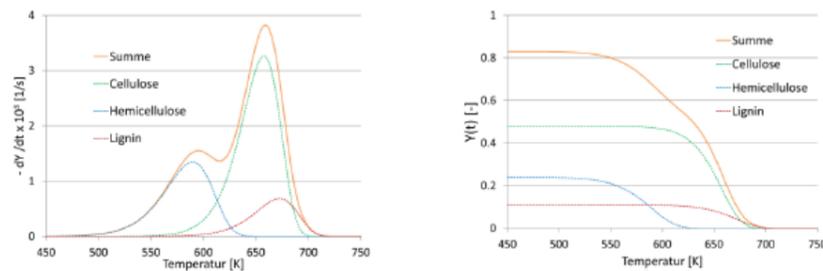
Modellierung der Brandgasentstehung Arrhenius-Funktionen zur Beschreibung der Pyrolyse von Buchenholz^[5]

- Beschreibung der Reaktionsrate $\frac{dY_i}{dt}$ und Reaktionswärme Q_i mit gewöhnlichen Differentialgleichungen
- Reaktionsrate der Komponente i als Funktion des entsprechenden Massenanteils Y_i und der Temperatur T . Im allgemeinen $T = T(t)$

$$\frac{dY_i}{dt} = -A_i Y_i e^{-\frac{E_i}{RT}} \quad Q_i = -\Delta H_i A_i Y_i e^{-\frac{E_i}{RT}}$$

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

- Parameter für Buchenholz nach Branca und Blasi [5]. Funktionen dargestellt für eine Temperaturrate von 20 K/min: $T(t) = 450 \text{ K} + 20 \frac{\text{K}}{\text{min}} \cdot t$

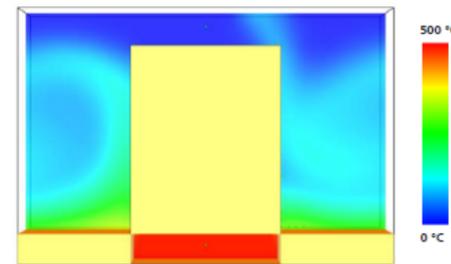
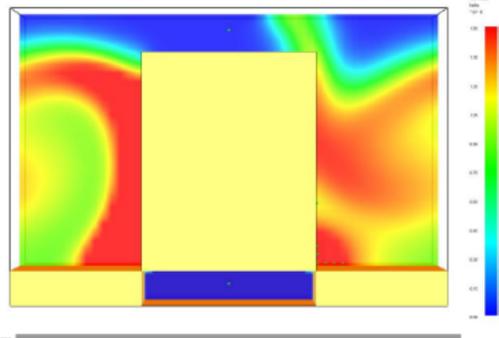


[5] Branca, C.; Blasi, C.: A summative model for the pyrolysis reaction heats of beech wood, Thermochemica Acta 638 10-16, 2016

Modellierung der Brandgasentstehung FDS-Ersatzmodell, simulierte Temperatur- und Brandgas-Entwicklung

- Temperaturabhängige Freisetzung von Brandgas auf den seitlichen Oberflächen des Holzstückes
- Höhere Brandgas-Konzentration im »linken« Bereich korreliert mit höherer Lufttemperatur-

Brandgas-Konzentration zwischen 0 und 1,5 ppm



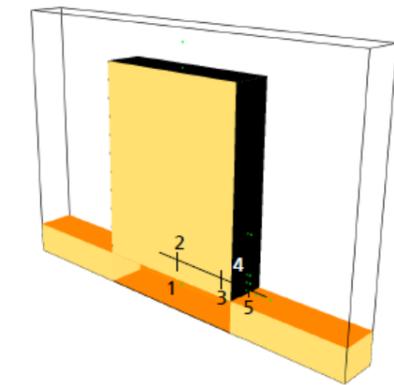
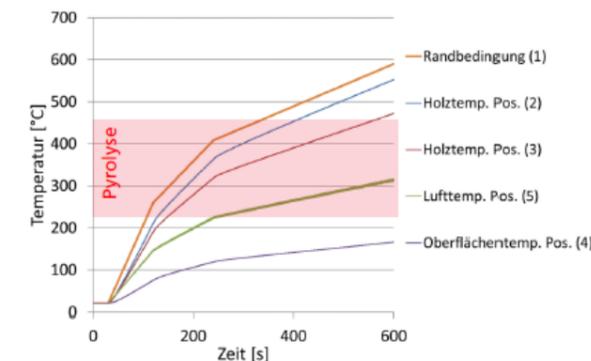
Temperatur zum Zeitpunkt 10 min

- Qualitativ sinnvolle CO-Verteilung
- Aber zu geringe Freisetzung
 - FDS-Simulation: 0,18 g
 - Experiment: 53 g

➔ Nächste Schritt:
Analyse der Temperaturentwicklung

Modellierung der Brandgasentstehung FDS-Ersatzmodell, Analyse der Temperaturentwicklung

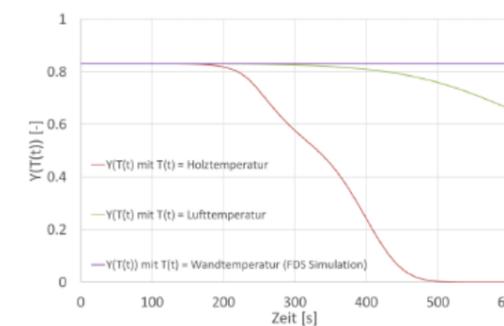
- Lufttemperatur (5) geringer als Holztemperatur in Probenmitte (2)
- Aufgrund geringer Lufttemperatur lokale Abkühlung des Holzes: Temperatur an Stelle (3) geringer als (2)
- Oberflächentemperatur (4) sowohl geringer als lokale Holztemperatur (3) als auch Lufttemperatur (5)



➔ Oberflächentemperatur nicht korrekt

Modellierung der Brandgasentstehung FDS-Ersatzmodell, Analyse stattfindender Pyrolyse

- Aufgrund der zu geringen Oberflächentemperatur findet selbst im wärmsten Bereich des Holzstückes quasi keine Pyrolyse statt
- Die Brandgasentstehung ist daher um mehrere Größenordnungen zu gering
- Bei Verwendung der lokalen Holztemperatur in Oberflächennähe anstelle der von FDS berechneten Oberflächentemperatur ist der Abbrand um ein Vielfaches höher



Lokaler spez. Massenverlust des Holzstückes für unterschiedliche Temperaturverläufe

Experimentell beobachteter Abbrand und Brandgas-Freisetzung kann mit dem erstellten FDS-Ersatzmodell nicht berechnet werden

Modellierung der Brandgasentstehung

Verbesserter Modellierungsansatz



Der experimentell gemessene Abbrand kann bei Verwendung korrekter Holztemperaturen an der Oberfläche sinnvoll abgebildet werden

Seite 15
© Fraunhofer EMI

Fraunhofer
EMI

Fazit

- Erfolgreiche Modellierung der Brandgasausbreitung im Buchenholzscharfbrand mit FDS
- Pyrolyse-Parameter für Buchenholz in der Literatur verfügbar
- Verwendetes FDS-Ersatzmodell ist nicht in der Lage, die im Experiment beobachtete Brandgasentstehung quantitativ richtig zu modellieren, da
 - die Oberflächentemperatur nicht korrekt berechnet wird
 - Pyrolyse lediglich auf den Oberflächen stattfindet
- Ein Modell, welches im Wesentlichen 2D-Wärmeleitung mit Pyrolyse-Daten koppelt, zeigt, dass bei realistischeren Oberflächentemperaturen auch eine verbesserte quantitative Modellierung der Brandgasentstehung möglich ist

Seite 16
© Fraunhofer EMI

Fraunhofer
EMI

Kontakt

Benjamin Schaufelberger, M.Sc.
Gruppe Computational Physics
Tel.: 0761 2714-335
Benjamin.Schaukelberger@emi.fraunhofer.de

Dr. Pascal Matura
Leiter Computational Physics
Tel.: 0761 2714-304
Pascal.Matura@emi.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut (EMI)
Eckerstraße 4
79104 Freiburg im Breisgau

Seite 17
© Fraunhofer EMI

Fraunhofer
EMI

Florian Webner, Peter Wegener:

Vergleich verschiedener Verbrennungsmodelle in FDS

Abstract:

- Kontrolle der spezifizierten Verbrennungsreaktion anhand der FDS-Ausgabefiles bzw. von Handrechnungen
- Vergleich „FDS5 versus FDS6“ und „Simple versus complex chemistry“ anhand einfacher Beispielfälle
- Anwendungsszenario und Fazit

Vergleich verschiedener Verbrennungsmodelle in FDS

Florian Webner
Peter Wegener

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

Agenda

1

Motivation

2

FDS 5 vs FDS 6

3

Testfälle

4

Zusammenfassung
und Ausblick

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

Rauchgassimulationen

- Ingenieurtechnische Nachweis
 - z.B. für den Nachweis der Selbststretungsphase
- Randbedingungen für die Simulation sind Projektbezogen
 - Wärmefreisetzung
 - Brandausbreitung
 - Brandlastzusammensetzung
 - Schutzzielkriterien

Next Generation Fire Engineering



Brandlastzusammensetzung

- Wärmefreisetzung – Heat of Combustion – massflux

$$HRR = HoC \cdot m^* \quad [kW = kJ/kg \cdot kg/s]$$

$$m^* = HRR / HoC$$

$$soot = m^* \cdot soot_yield$$

Next Generation Fire Engineering



	PVC	PP
Zusammensetzung	C ₂ H ₃ CL	C ₃ H ₆
Molare Masse [g/mol]	62,5	42,08
Heat of Combustion [kJ/kg]	16.400	43.400
Soot yield	0,172	0,059
Wärmefreisetzung 1 MW		
Rußmenge [g]	10,5	1,36

Brandlastzusammensetzung

- Kunststoffe
 - Polyvinylchlorid [PVC]
 - Polypropylen [PP]

	PVC	PP
Chemische Formel	C ₂ H ₃ CL	C ₃ H ₆
Molare Masse [g/mol]	62,5	42,08
Heat of Combustion [kJ/kg]	16.400	43.400
Soot yield	0,172	0,059

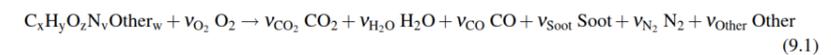
Next Generation Fire Engineering



REAC für PVC in FDS 5

FDS 5

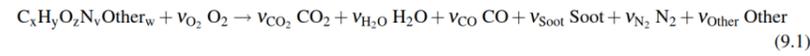
```
&REAC ID='Mischbrandlast '  
FYI='Mischbrandlast aus: 100% Polyvinylchlorid,'  
C= 1  
H= 1.5  
O= 0  
N= 0  
Other= 0.5  
MW_OTHER = 35.453  
  
SOOT_YIELD= 0.172  
CO_YIELD= 0.063  
HEAT_OF_COMBUSTION= 16400 /
```



Next Generation Fire Engineering



Reaktionsgleichung in FDS 5



$$v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{CO}}{2} + \frac{v_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2}$$

$$v_{CO_2} = x - v_{CO} - (1 - X_H) v_S$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} - \frac{X_H}{2} v_S$$

$$v_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO}$$

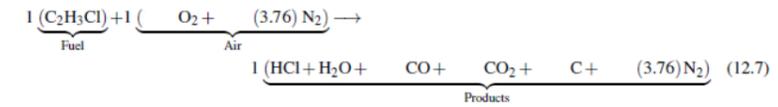
$$v_S = \frac{W_F}{W_S} y_S$$

$$v_{N_2} = \frac{v}{2}$$

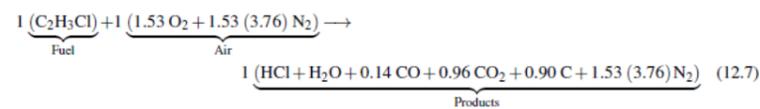
$$W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C$$



Chemische Gleichung



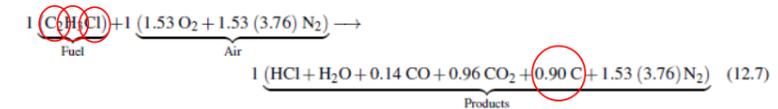
Aus dem User Guide (S. 136)



```
&SPEC ID = 'PVC', FORMULA = 'C2H3Cl' /
&SPEC ID = 'OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
(...)
&SPEC ID='AIR', BACKGROUND=.TRUE.
SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)=1.53,
SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)=5.76 /
&SPEC ID='PRODUCTS',
SPEC_ID(1)='HYDROGEN CHLORIDE', VOLUME_FRACTION(1)=1.0,
SPEC_ID(2)='WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(2)=1.0,
SPEC_ID(3)='CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(3)=0.14,
SPEC_ID(4)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(4)=0.96,
SPEC_ID(5)='SOOT', VOLUME_FRACTION(5)=0.90,
SPEC_ID(6)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(6)=5.76 /
```



Reaktionsgleichung



Masse PVC =
2 • 12,01 g
+ 3 • 1,01 g
+ 1 • 35,45 g
= 62,5 g
SOOT_YIELD= 0,172
→ X= 62,5 g • 0,172
= 10,75 g
10,75 g/ 12,01g = 0,90



FDS 6 – complex stoichiometry

FDS 5

```
&BREC ID= 'Mischbrandlast'
PVI=Mischbrandlast aus: 100% Polyvinylchlorid,
C=1
H=1.5
O=0
N=0
Other=0.5
MW_OTHER = 35.453
SOOT_YIELD= 0.172
CO_YIELD= 0.063
HEAT_OF_COMBUSTION= 16400 /
```

FDS 6 – complex stoichiometry

```
&SPEC ID = 'PVC', FORMULA='C1H1.5Cl0.5'
ELEMENTE DER REAKTION
+
&SPEC ID = 'OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'SOOT', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'HYDROGEN CHLORIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
+
LUFTR(EAKTIONSGAS)
+
&SPEC ID = 'AIR', BACKGROUND=.TRUE.
SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)= 1.0000
SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)= 3.7600 /
+
REAKTIONSPRODUKTE(VOLUMENANTEIL)
+
&SPEC ID='PRODUCTS_PVC',
SPEC_ID(1)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(1)= 0.48635
SPEC_ID(2)='CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(2)= 0.0703
SPEC_ID(3)='WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(3)= 0.47535
SPEC_ID(4)='SOOT', VOLUME_FRACTION(4)= 0.4926
SPEC_ID(5)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(5)= 2.854404
SPEC_ID(6)='HYDROGEN CHLORIDE', VOLUME_FRACTION(6)= 0.5000 /
+
REAC_LINE
&BREC ID= 'pvc'
FUEL= 'PVC'
HEAT_OF_COMBUSTION= 16400
SPEC_ID_LU = 'PVC'
AIR, PRODUCTS_PVC, NU= -1, -0.75915 , 1 /
```

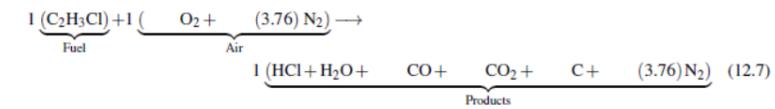
FDS 5 vs. FDS 6

2

MASS_FILE

```
&DUMP MASS_FILE=.TRUE. /
```

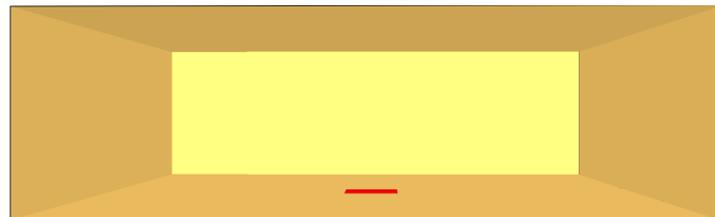
1 s	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2 Time	Total	PVC	OXYGEN	NITROGEN	WATER VAPOR	CARBON MONOXIDE	CARBON DIOXIDE	SOOT	HYDROGEN CHLORIDE		
3	0	359.744	0	83.823236	275.92076	0	0	0	0	0	0
4	0.19248629	359.74411	4.411E-005	83.823183	275.92076	1.849248E-005	4.252172E-006	4.622065E-005	1.161E-005	3.9367577E-005	0
5	0.38497257	359.74443	0.00014667	83.823009	275.92076	7.9988726E-005	1.8392648E-005	0.0001999262	5.020E-005	0.0001702833	0.0004058469
6	0.57745895	359.74495	0.00039381	83.822835	275.92076	0.0001906422	4.3836353E-005	0.0004764966	0.00011965	0.0004058469	0.00074072



FDS 5 vs. FDS 6

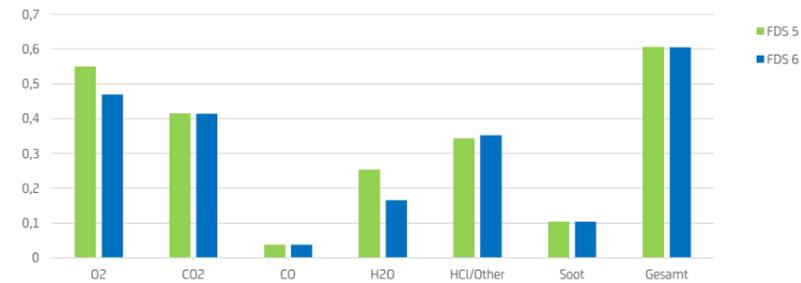
2

Geschlossener Raum



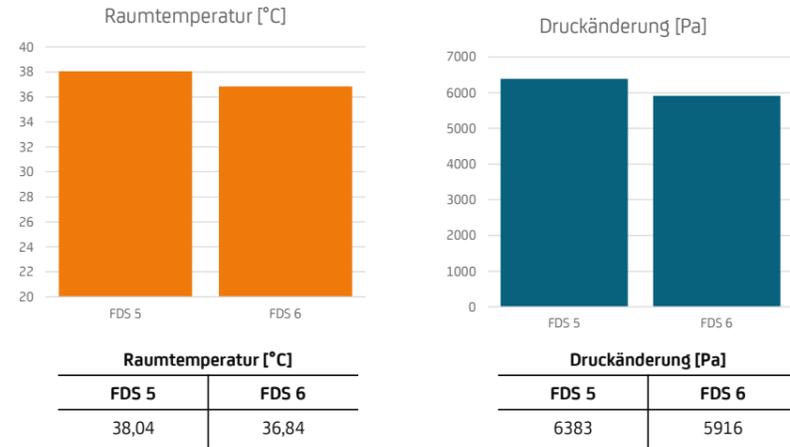
- 10 m x 10 m x 3 m
- 1 m² Brandherd
- 100 kW HRRPLA
- PVC
- Keine Materialeigenschaften
- FDS 5 und FDS 6

Massenanteile der Produkte



[kg]	O ₂	CO ₂	CO	H ₂ O	HCl	Other	Soot	Gesamt
FDS 5	-0,549	0,415	0,038	0,253		0,344	0,104	0,606
FDS 6	-0,469	0,414	0,038	0,166	0,352		0,104	0,605

Druck und Temperatur

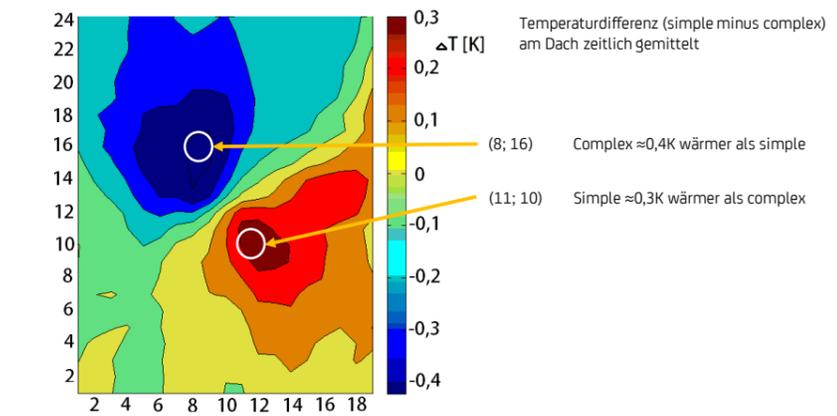


Next Generation Fire Engineering

2
FDS 5 vs. FDS 6



Simple vs. complex: 100 kW



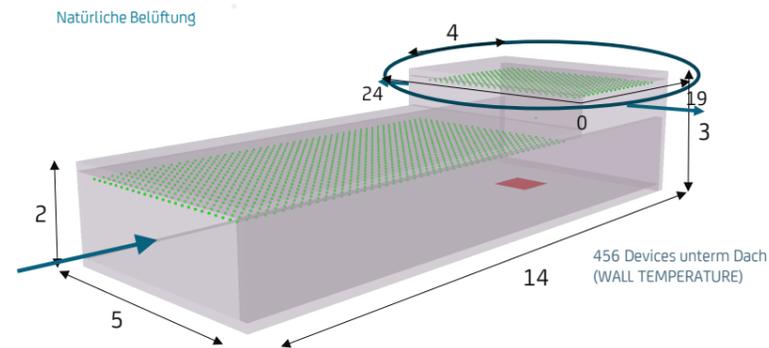
Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- 100 kW



Testfall 1



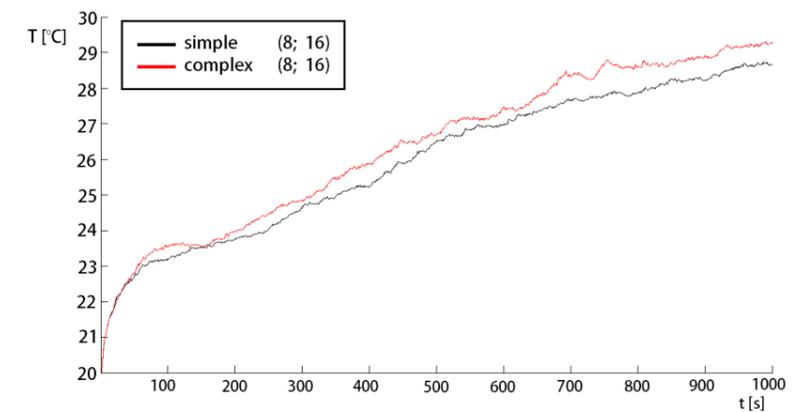
Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- HRR: 100 kW
- Meshgrenze: OPEN
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex



Simple vs. complex: 100 kW



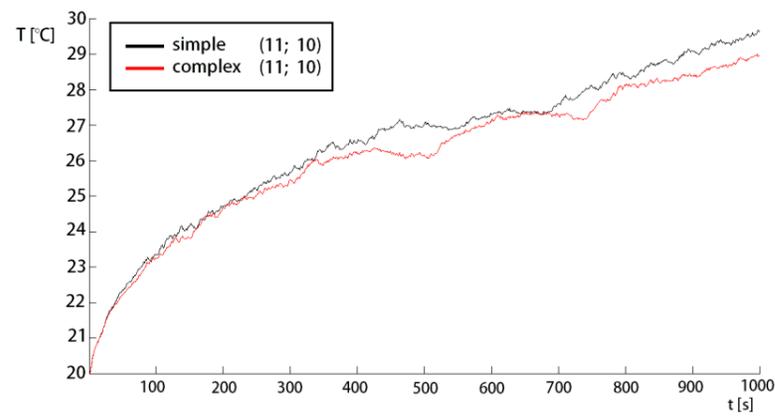
Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- 100 kW



Simple vs. complex: 100 kW



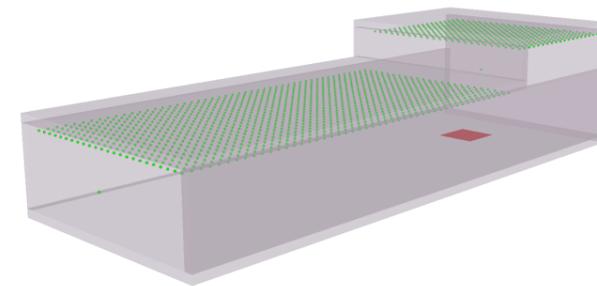
Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- **100 kW**



Testfall 2



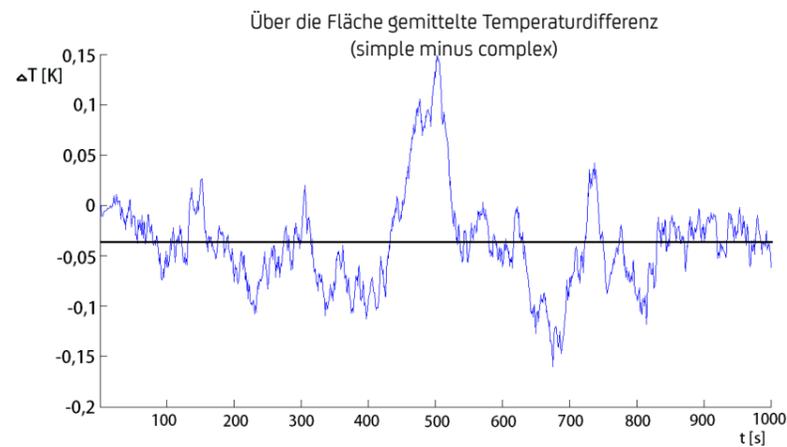
Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- Meshgrenze: OPEN
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- HRR: 800 kW



Simple vs. complex: 100 kW



Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- **100 kW**



Testfall 2

FDS 5

```

&REAC FUEL= CARBON '
F1=Mischbrandst. aus 100% Polyvinylchlorid, '
C=1,
H=0,
O=0,
N=0,
SOOT_YIELD= 0.15,
CO_YIELD= 0,
IDEAL= FALSE, /
    
```

HRR aus _hrr.csv:

Simple	798.06
complex	797.97

Next Generation Fire Engineering

FDS 6 – complex stoichiometry

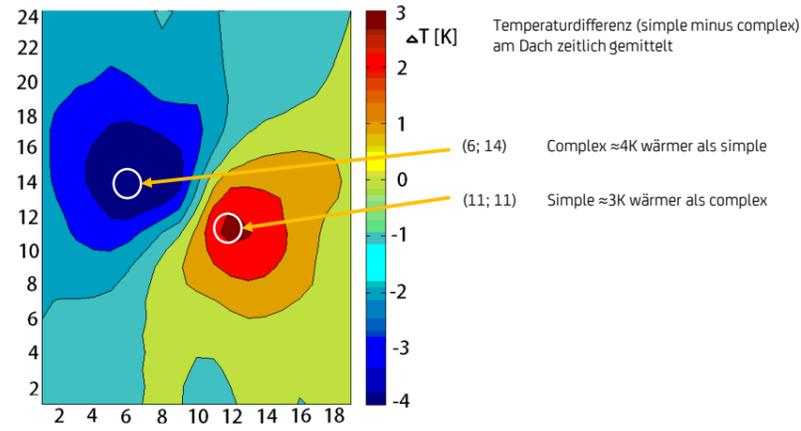
```

&SPEC ID= CARBON, FORMULA=C/
*
ELEMENTE DER REAKTION
*
&SPEC ID= OXYGEN, LUMPED_COMPONENT_ONLY=TRUE/
&SPEC ID= NITROGEN, LUMPED_COMPONENT_ONLY=TRUE/
&SPEC ID= CARBON DIOXIDE, LUMPED_COMPONENT_ONLY=TRUE/
&SPEC ID= SOOT, FORMULA=C, LUMPED_COMPONENT_ONLY=TRUE/
*
LUFT(REAKTIONSGAS)
*
&SPEC ID= AIR, BACKGROUND=TRUE,
SPEC_ID(1)=OXYGEN, VOLUME_FRACTION(1)= 1.0000,
SPEC_ID(2)=NITROGEN, VOLUME_FRACTION(2)= 3.7600 /
*
REAKTIONSPRODUKTE(VOLUMENANTEIL)
*
&SPEC ID=PRODUCTS_PVC,
SPEC_ID(1)=CARBON DIOXIDE, VOLUME_FRACTION(1)= 0.85,
SPEC_ID(2)=SOOT, VOLUME_FRACTION(2)= 0.15,
SPEC_ID(3)=NITROGEN, VOLUME_FRACTION(3)= 3.196 /
*
REAC_LINE
*
&REAC ID= CARBON '
FUEL= CARBON '
HEAT_OF_COMBUSTION= 29803
SPEC_ID_NU= CARBON ' ,AIR, PRODUCTS_CARBON, NU= -1, -0.85, 1/
    
```

3
Testfälle



Simple vs. complex: 800 kW



Next Generation Fire Engineering

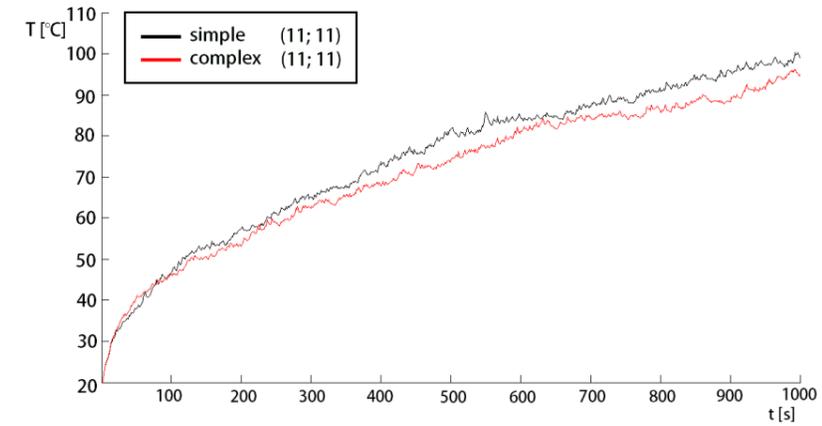
3

Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- 800 kW



Simple vs. complex: 800 kW



Next Generation Fire Engineering

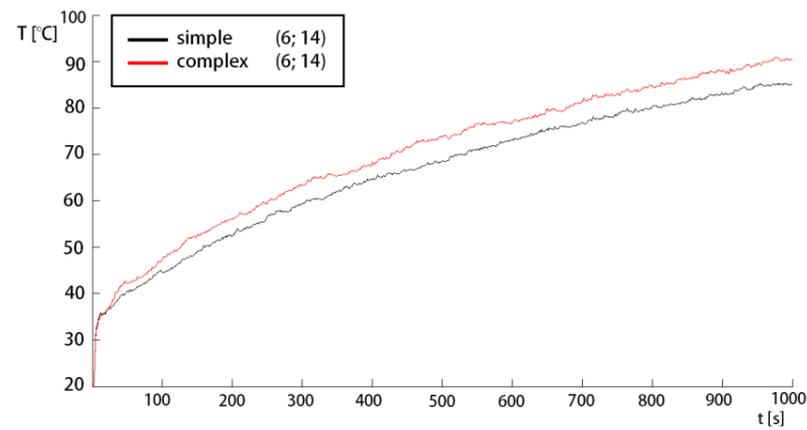
3

Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- 800 kW



Simple vs. complex: 800 kW



Next Generation Fire Engineering

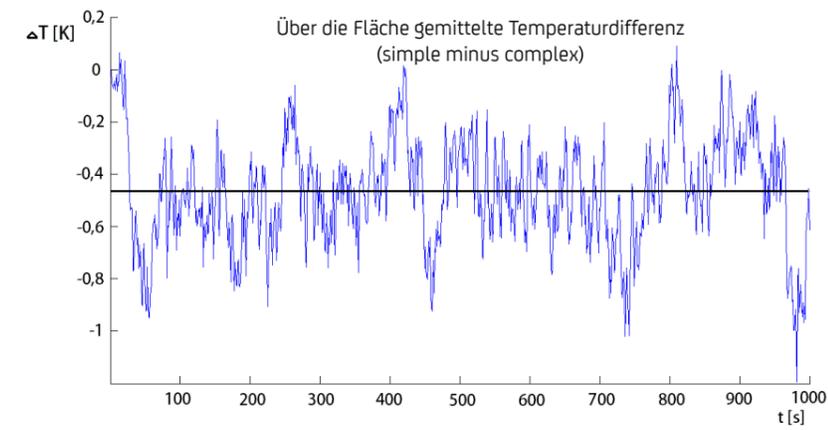
3

Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- 800 kW



Simple vs. complex: 800 kW



Next Generation Fire Engineering

3

Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6: simple u. complex
- 800 kW



Vergleich der .out-Dateien

3
Testfälle

simple

Molecular Weight (g/mol) 0.454
Ambient Density (kg/m³) 0.00E+00
Enthalpy of Formation (J/kg) 0.00E+00

Tracked (Lumped) Species Information

AIR
Molecular Weight (g/mol) 28.76564
Ambient Density (kg/m³) 1.196
Initial Mass Fraction 1.000
Enthalpy of Formation (J/kg) -7.44E+04

Sub Species	Mass Fraction	Mole Fraction
NITROGEN	7.630774E-01	7.835682E-01
OXYGEN	2.311814E-01	2.078229E-01
CARBON DIOXIDE	5.919362E-04	3.869034E-04
WATER VAPOR	5.149269E-03	8.222023E-03

Viscosity (kg/m/s) Ambient, 293 K: 1.80E-05
500 K: 2.61E-05
1000 K: 4.13E-05

complex

Molecular Weight (g/mol) 0.499
Ambient Density (kg/m³) 0.00E+00
Enthalpy of Formation (J/kg) 0.00E+00

Tracked (Lumped) Species Information

AIR
Molecular Weight (g/mol) 28.85067
Ambient Density (kg/m³) 1.199
Initial Mass Fraction 1.000
Enthalpy of Formation (J/kg) 0.00E+00

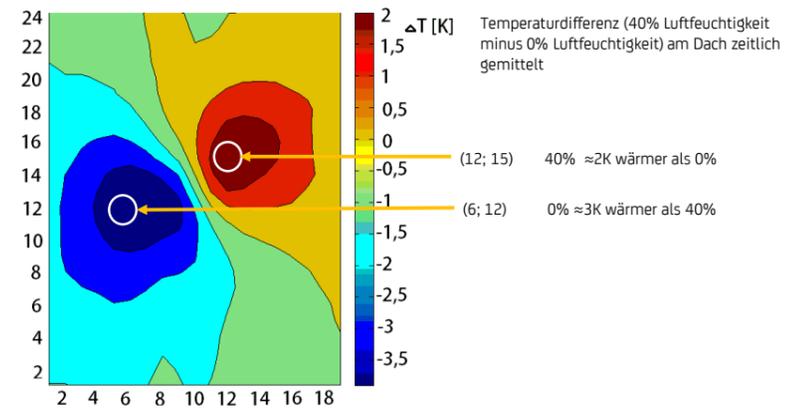
Sub Species	Mass Fraction	Mole Fraction
OXYGEN	2.330080E-01	2.100840E-01
NITROGEN	7.669920E-01	7.899160E-01

Viscosity (kg/m/s) Ambient, 293 K: 1.80E-05
500 K: 2.62E-05
1000 K: 4.13E-05



Luftfeuchtigkeit simple: 0% vs. 40%

3
Testfälle

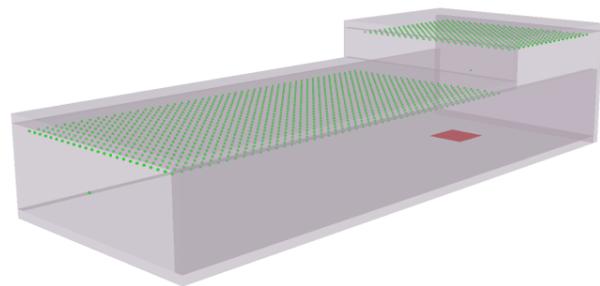


- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6 simple: Luftfeuchtigkeit 0% vs. 40%



Testfall 3

3
Testfälle

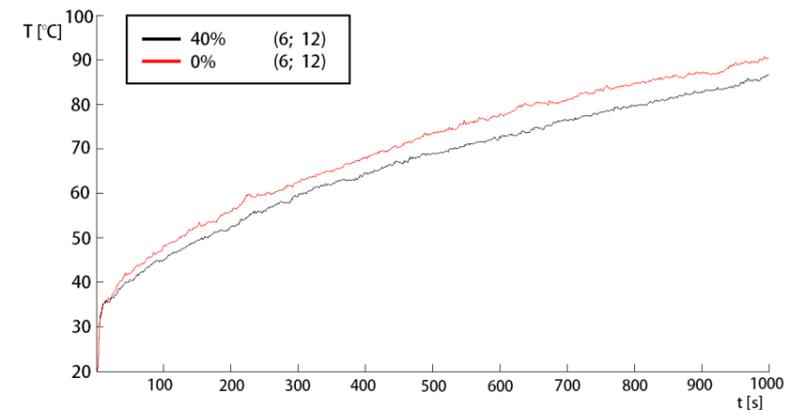


- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- 800 kW HRR
- FDS 6 simple: Luftfeuchtigkeit 0% vs. 40%



Luftfeuchtigkeit simple: 0% vs. 40%

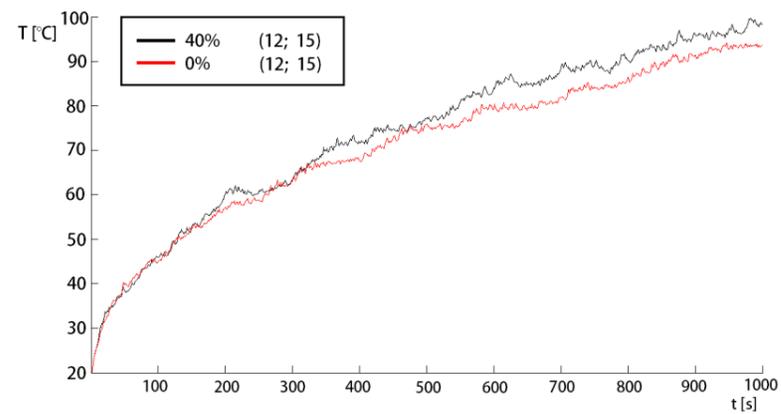
3
Testfälle



- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6 simple: Luftfeuchtigkeit 0% vs. 40%



Luftfeuchtigkeit simple: 0% vs. 40%



Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6 simple:
Luftfeuchtigkeit 0% vs. 40%



Testfall 4 - Ansätze

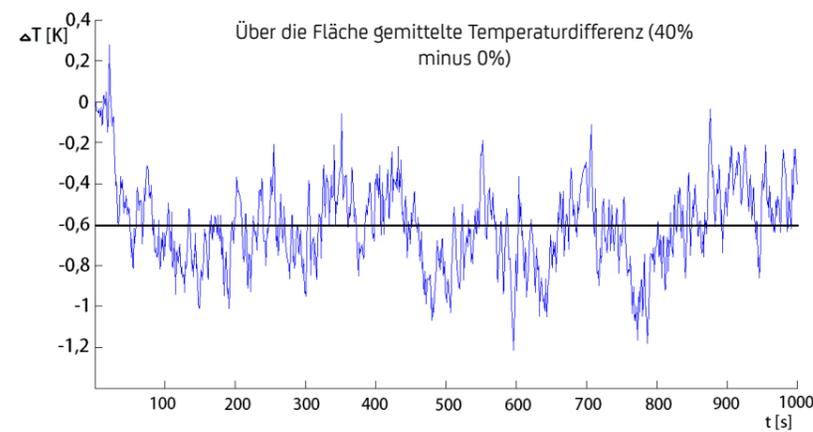
- ungestörte Rauchgasschicht
- Größere Wärmefreisetzung -> Projektbezug
- Zusammensetzung der Umgebungsluft

Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle



Luftfeuchtigkeit simple: 0% vs. 40%



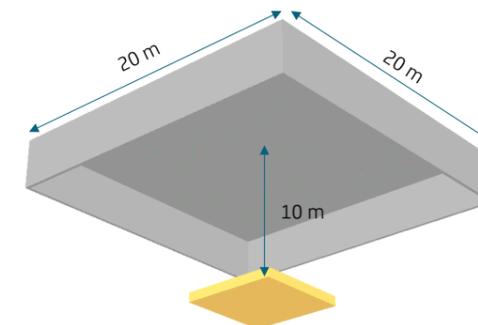
Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- 1 m² Brandherd
- reiner Kohlenstoff
- Betonwände
- FDS 6 simple:
Luftfeuchtigkeit 0% vs. 40%



Testfall 4 - Geometrie



Next Generation Fire Engineering

3
Testfälle

- Fläche: 400m²
- HRR: 9 MW
- Brandfläche: 36 m²
- Brandlast: C
- Material: Beton
- Mesh: 1 (open)
20 cm Gitter
- Auswertung: AST, WT



Testfall 4 - Varianten

- simple_01 mit Luftfeuchtigkeit (40%) und CO2 als Luftbestandteil
- simple_02 ohne Luftfeuchtigkeit und ohne CO2 als Luftbestandteil
- complex_01 mit Luftfeuchtigkeit (40%) und CO2 als Luftbestandteil
- complex_02 ohne Luftfeuchtigkeit und ohne CO2 als Luftbestandteil

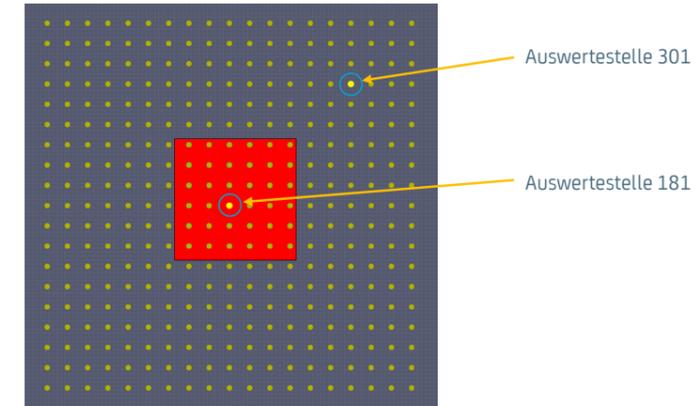
Next Generation Fire Engineering

3 Testfälle

Testfall 4
 Fläche: 400m²
 HRR: 9 MW
 Brandfläche: 36 m²
 Brandlast: C
 Material: Beton
 Mesh: 1 (open)
 20 cm Gitter
 Auswertung: AST, WT



Testfall 4



Next Generation Fire Engineering

3 Testfälle

Testfall 4



Testfall 4 - REAC

```

&REAC FUEL=' Mischbrandlast ',
FYI='Mischbrandlast aus: 100% Carbon, '
C= 1 ,
H= 0 ,
O= 0 ,
N= 0 ,
SOOT_YIELD= 0.15 ,
SOOT_H_FRACTION=0,
CO_YIELD= 0 ,
IDEAL= .FALSE.,
HEAT_OF_COMBUSTION=29803/
&SURF ID='Burner',
COLOR='RED',
HRRPUA=250.0,
RAMP_Q='Burner'/
&RAMP ID='Burner', T=0, F=0/
&RAMP ID='Burner', T=10, F=1/

AUSGANGSTOFFE
+
&SPEC ID = 'CARB',          FORMULA='C'/
ELEMENTE DER REAKTION
+
&SPEC ID = 'OXYGEN'          LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'WATER VAPOR'     LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'NITROGEN'        LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE',  LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID = 'SOOT', FORMULA='C', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
+
LUFT (REAKTIONSGAS)
+
&SPEC ID='AIR',BACKGROUND=.TRUE.,
&SPEC_ID(1)='NITROGEN',      VOLUME_FRACTION(1)    = 0.7835682 ,
&SPEC_ID(2)='OXYGEN',        VOLUME_FRACTION(2)    = 0.2078229 ,
&SPEC_ID(3)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(3)    = 0.0003869 ,
&SPEC_ID(4)='WATER VAPOR',   VOLUME_FRACTION(4)    = 0.0082220 /
+
REAKTIONSPRODUKTE (VOLUMENANTEIL)
+
&SPEC ID='PRODUCTS_CARB',
&SPEC_ID(1)='NITROGEN',      VOLUME_FRACTION(1)    = 3.2048103 ,
&SPEC_ID(2)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(2)    = 0.851582443 ,
&SPEC_ID(3)='WATER VAPOR',   VOLUME_FRACTION(3)    = 0.03362825 ,
&SPEC_ID(4)='SOOT',          VOLUME_FRACTION(4)    = 0.15 /
+
REAC_LINE
+
&REAC ID= 'CARB' ,
FUEL= 'CARB' ,
HEAT_OF_COMBUSTION= 29803 ,
&SPEC_ID_NU = 'CARB', 'AIR', 'PRODUCTS_CARB', NU= -1.0 , -4.05002 , 1 /
&SURF ID= 'Burner',
COLOR= 'FIREBRICK',
&SPEC_ID(1) = 'CARB', MASS_FLUX(1) = 0.008388 , RAMP_MF(1)='Burner'/
&RAMP ID = 'Burner', T=0, F=0/
&RAMP ID = 'Burner', T=10, F=1/
    
```

Next Generation Fire Engineering

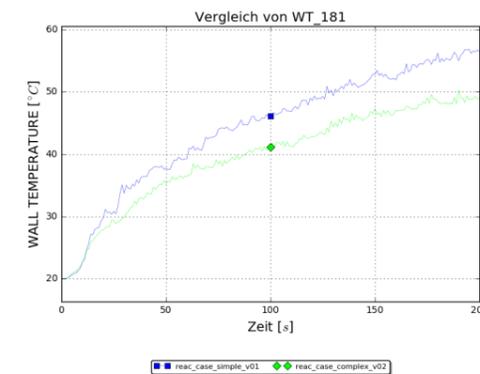
3 Testfälle

Testfall 4



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_02



Next Generation Fire Engineering

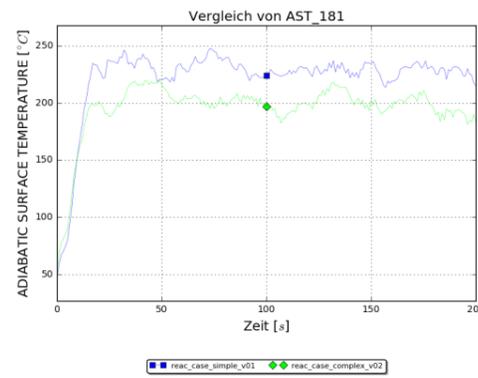
3 Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_02 - Water Vapor
 - CO₂
 Auswertung: WT
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_02



Next Generation Fire Engineering

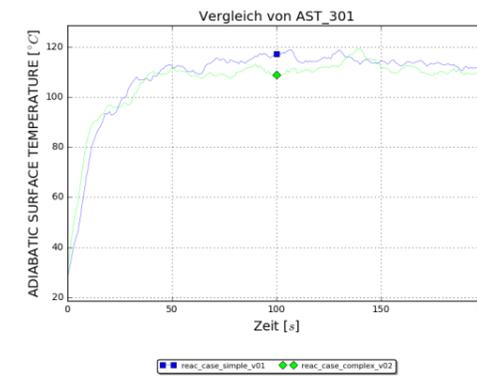
3 Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_02 - Water Vapor
 - CO₂
 Auswertung: AST
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_02



Next Generation Fire Engineering

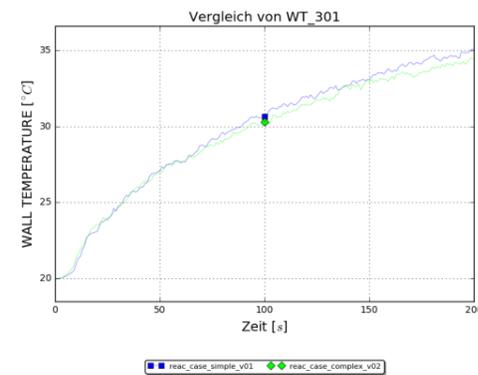
3 Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_02 - Water Vapor
 - CO₂
 Auswertung: AST
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_02



Next Generation Fire Engineering

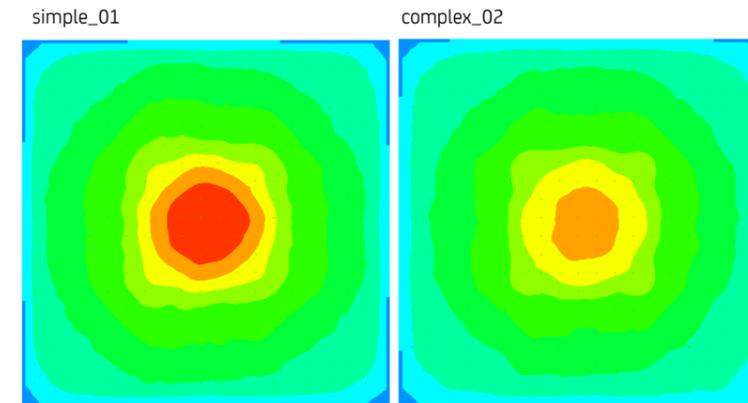
3 Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_02 - Water Vapor
 - CO₂
 Auswertung: WT
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_02



Next Generation Fire Engineering

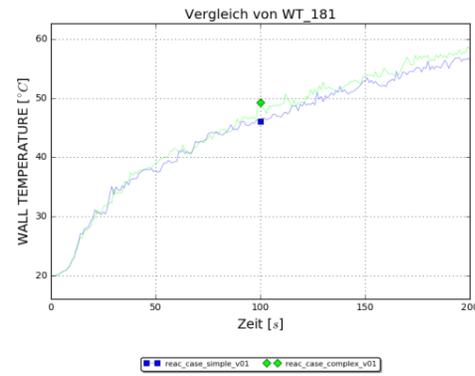
3 Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_02 - Water Vapor
 - CO₂



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_01



Next Generation Fire Engineering

3

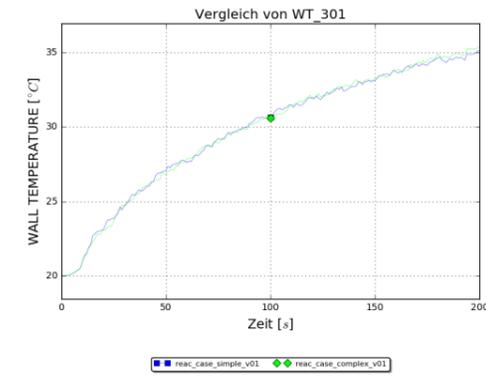
Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_01 + Water Vapor
 + CO₂
 Auswertung: WT
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_01



Next Generation Fire Engineering

3

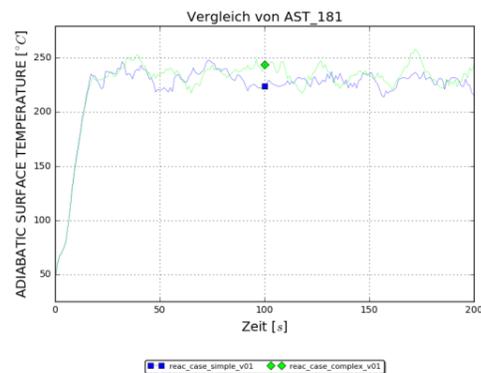
Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_01 + Water Vapor
 + CO₂
 Auswertung: WT
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_01



Next Generation Fire Engineering

3

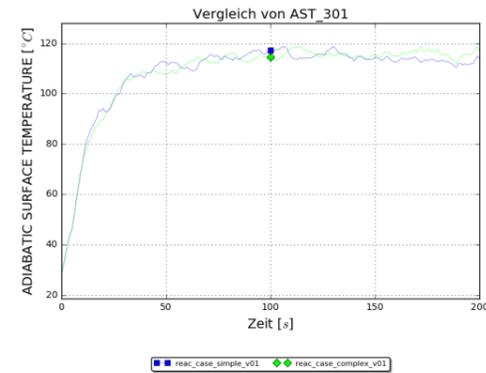
Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_01 + Water Vapor
 + CO₂
 Auswertung: AST
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW



Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_01



Next Generation Fire Engineering

3

Testfälle

Testfall 4
 simple_01 + Water Vapor
 + CO₂
 complex_01 + Water Vapor
 + CO₂
 Auswertung: AST
 Glättung: 5 s
 Ort: Brandherdnah
 HRR: 9 MW

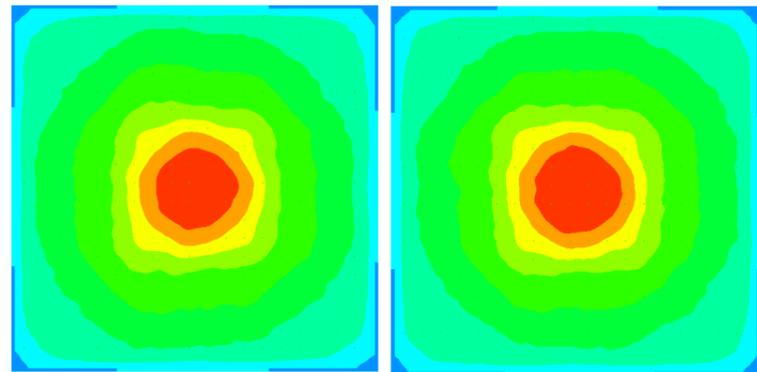


Testfall 4

Vergleich simple_01 vs. complex_01

simple_01

complex_01



3
Testfälle

Testfall 4
simple_01 + Water Vapor + CO₂
complex_01 + Water Vapor + CO₂

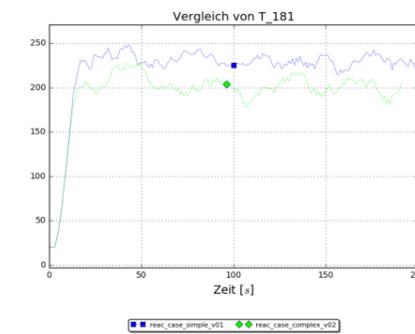
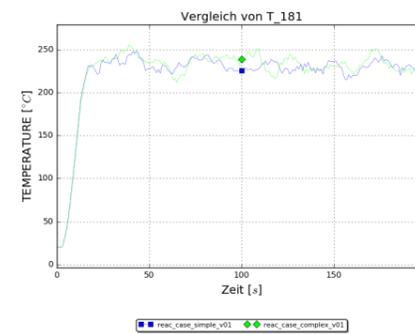


Next Generation Fire Engineering

Testfall 4

Vergleich der Messstelle 181

TEMPERATURE
simple_01 + complex_01 vs. simple_01 + complex_02



3
Testfälle

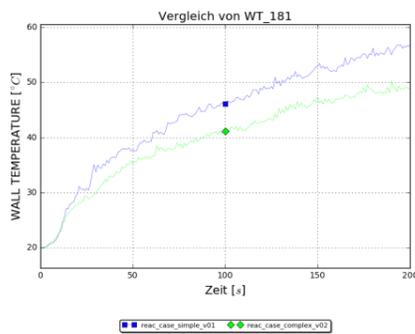
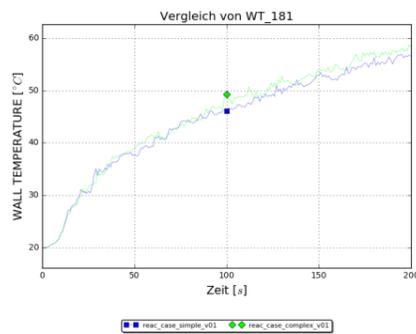


Next Generation Fire Engineering

Testfall 4

Vergleich der Messstelle 181

WALL TEMPERATURE
simple_01 + complex_01 vs. simple_01 + complex_02



3
Testfälle



Next Generation Fire Engineering

Zusammenfassung

- Nachvollziehbarkeit der Verbrennungsreaktion
– *.out Datei und massfile
- Einfluss der Luftzusammensetzung auf die Temperaturegebnisse

4
Zusammenfassung und Ausblick



Next Generation Fire Engineering

Ausblick

- Einfluss der Zusammensetzung der Umgebungsluft
- Was ist mit weiteren Bestandteilen der Luft?
 - Argon
 - Spurengase .. ?
- Untersuchung mit Mischbrandlasten
 - Lassen sich die Ergebnisse bestätigen?

Next Generation Fire Engineering



hhpberlin 

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 Hossler
Dr.-Ing. Karl-Heinz Schubert

hhpberlin 

Diskussion

- Definition der Verbrennungsreaktion mit complex
 - Vorteile
 - Nachteile
- Was ist in der Projektanwendung sinnvoll ?
- Wie sieht Ihre Erfahrung / Herangehensweise aus ?

Next Generation Fire Engineering



hhpberlin 

Sven Kaudelka:

Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen: Teil 1: Grundlagen

Aufgrund einer Häufung von Brandereignissen an EPS-basierten Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) analysierte eine von der Bauministerkonferenz einberufene Projektgruppe gesammelte Brandereignisse. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass brennende Abfallbehälter oder Kraftfahrzeuge im Sockelbereich von EPS-basierten WDVS eine Gefahr darstellen können. Daraufhin wurde ein Forschungsvorhaben initiiert, dessen Ziel es war, das Brandverhalten dieser WDVS durch Brandbeanspruchungen von Außenbrandszenarien zu untersuchen. Dazu wurde im Fassadenprüfstand der MFPA Leipzig GmbH ein Brandszenario („Sockelbrandszenario“) entwickelt, bei dem eine repräsentative Brandlast für realmaßstäbliche Großbrandversuche definiert wurde. In Folge der Brandprüfungen wurden konstruktive Brandschutzmaßnahmen an EPS-basierten WDVS untersucht und für die Zulassung als schwerentflammbares WDVS zwingend vorgeschrieben. Das Sockelbrandszenario wird im Rahmen der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) ebenfalls eingeführt. Dadurch wird die brandschutztechnische Untersuchung von WDVS auf der Grundlage eines repräsentativen Brandszenarios ermöglicht. Während der Brandbeanspruchung verschiedener EPS-basierter WDVS durch das Sockelbrandszenario konnten Phänomene beobachtet werden, die zum Versagen der Konstruktion und somit zum Nichtbestehen der Prüfung führten. Ziel ist es, die Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen durch das Sockelbrandszenario zu modellieren. In dem ersten Teil der Vortragsreihe werden der Versuchstand und das Sockelbrandszenario sowie erste Ansätze zur Modellierung des Sockelbrandszenarios vorgestellt.

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup

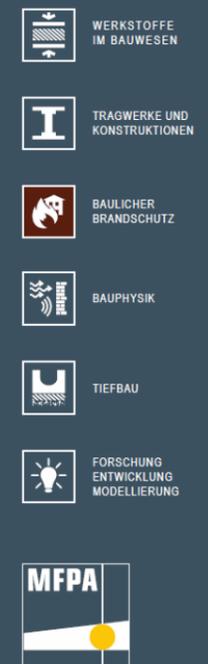
Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen

Teil 1: Grundlagen



Gliederung

1. Anforderungen an Außenwandbekleidungen
2. Prüfung von Außenwandbekleidungen
3. Problembeschreibung
4. Sockelbrandprüfverfahren
5. Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung



11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 3

Anforderungen an Außenwandbekleidungen

§14, MBO 2016

Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass

- (1) der Entstehung eines Brandes und der
- (2) Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand
- (3) die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

§28, MBO 2016

Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen sind so auszubilden, dass eine

- (4) Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist.

Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließlich ihrer Dämmstoffe schwerentflammbar sein (GK 4 bis 5).

www.mfpa-leipzig.de

Gliederung

1. Anforderungen an Außenwandbekleidungen
2. Prüfung von Außenwandbekleidungen
3. Problembeschreibung
4. Sockelbrandprüfverfahren
5. Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung

5

-  WERKSTOFFE IM BAUWESEN
-  TRAGWERKE UND KONSTRUKTIONEN
-  BAULICHER BRANDSCHUTZ
-  BAUPHYSIK
-  TIEFBAU
-  FORSCHUNG ENTWICKLUNG MODELLIERUNG
-  MFPA

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 4

Anforderungen an Außenwandbekleidungen

Die bauaufsichtlichen Anforderungen an Außenwandbekleidungen finden im normierten Verfahren ausschließlich über die Einstufung in Baustoffklassen nach Din 4102-1 statt.

Gebäude	bauaufsichtliche Anforderung	Baustoffklasse
Hochhaus	nichtbrennbar ohne/mit brennbaren Bestandteilen	A1/A2
GK 4 und 5	schwerentflammbar	B1
GK 1, 2 und 3	normalentflammbar	B2

Tabelle 1: [1]

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 6

Prüfung von Außenwandbekleidungen

Aufbau eines Wärmedämmverbundsystems

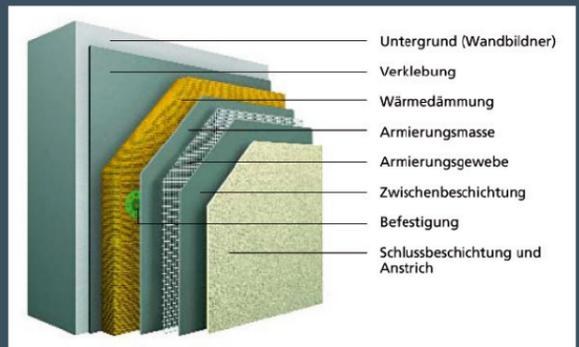


Abbildung 1: [2]

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 7

Prüfung von Außenwandbekleidungen

Nachweis der Schwerentflammbarkeit

Hierzu muss u.a. die Schwerentflammbarkeit im Brandschacht oder in der SBI-Prüfapparatur nachgewiesen werden.

Zusätzlich wird das Brandverhalten in Fassadenbrandversuchen verifiziert.

- DIN 4102-20
- MVV-TB, DIN 4102-24 (NA)



Abbildung 2: [3]

Prüfkörperhöhe: 100 cm
HRR: 5,4 kW
Prüfdauer: 10 Minuten
Prüfkriterium: Flammenausbreitung + Rauchgastemperaturen + brennendes Abtropfen / Abfallen

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 9

Prüfung von Außenwandbekleidungen

Nachweis der Schwerentflammbarkeit

Hierzu muss u.a. die Schwerentflammbarkeit im Brandschacht oder in der SBI-Prüfapparatur nachgewiesen werden.

Zusätzlich wird das Brandverhalten in Fassadenbrandversuchen verifiziert.

- DIN 4102-20
- MVV-TB, DIN 4102-24 (NA)



Abbildung 4: [3]

Prüfkörperhöhe: < 520 cm
HRR: 340 kW
Prüfdauer: 20 Minuten
Prüfkriterium: Flammenausbreitung + brennendes Abtropfen / Abfallen

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 8

Prüfung von Außenwandbekleidungen

Nachweis der Schwerentflammbarkeit

Hierzu muss u.a. die Schwerentflammbarkeit im Brandschacht oder in der SBI-Prüfapparatur nachgewiesen werden.

Zusätzlich wird das Brandverhalten in Fassadenbrandversuchen verifiziert.

- DIN 4102-20
- MVV-TB, DIN 4102-24 (NA)



Abbildung 3: [3]

Prüfkörperhöhe: 150 cm
HRR: 30 kW
Prüfdauer: 20 Minuten
Prüfkriterium: Wärme- und Rauchfreisetzung + Flammenausbreitung + brennendes Abtropfen / Abfallen

www.mfpa-leipzig.de

10

Gliederung

1. Anforderungen an Außenwandbekleidungen
2. Prüfung von Außenwandbekleidungen
3. Problembeschreibung
4. Sockelbrandprüfverfahren
5. Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung

- WERKSTOFFE IM BAUWESEN
- TRAGWERKE UND KONSTRUKTIONEN
- BAULICHER BRANDSCHUTZ
- BAUPHYSIK
- TIEFBAU
- FORSCHUNG ENTWICKLUNG MODELLIERUNG



www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 11

Problembeschreibung

Brandentstehung vs. Brandausbreitung (Baustoffverhalten vs. Bauteilverhalten)

Regelungsumfang nach Bauordnung	Verhalten brennbarer Baustoffe		Verhalten nichtbrennbarer Baustoffe	
	B3 (Verbot leicht-entflammbare Baustoffe)	B2 normal-entflammbare Baustoffe	B1 schwer-entflammbare Baustoffe	Brandverhalten der Bauteile (Feuerverstanddauer) Brandverhalten der Konstruktion
Schema Brandverlauf	Entzündung		Ausbreitung	
	Schwellen		Vollbrand	
T_{set}	T_{set}	T_{set}	T_{set}	T_{set}
I_{set}	I_{set}	I_{set}	I_{set}	I_{set}
T_{res}	T_{res}	T_{res}	T_{res}	T_{res}
I_{res}	I_{res}	I_{res}	I_{res}	I_{res}
50 - 100	< 25	> 100	25 - 50	> 700
20				> 50 - 1200
				Flashover
				Zeit t
Risiken	Entzündbarkeit Erflammbarkeit	Flammenausbreitung Wärmeentwicklung	Substanzerhaltung der Konstruktion Veränderung der Branddurchdringung	

Abbildung 5: [4] www.mfpa-leipzig.de



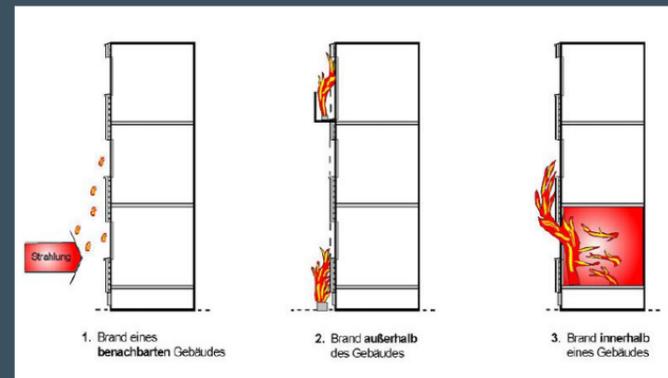
Abbildung 6: [1] www.mfpa-leipzig.de

4. OG
3. OG
2. OG
1. OG
EG
Holzkrippe

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 13

Sockelbrandprüfverfahren

Brandszenarien (Außenwandbekleidungen)



1. Brand eines benachbarten Gebäudes
2. Brand außerhalb des Gebäudes
3. Brand innerhalb eines Gebäudes

Abbildung 7: [5] www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 12

Gliederung

- Anforderungen an Außenwandbekleidungen
- Prüfung von Außenwandbekleidungen
- Problembeschreibung
- Sockelbrandprüfverfahren
- Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung

- WERKSTOFFE IM BAUWESEN
- TRAGWERKE UND KONSTRUKTIONEN
- BAULICHER BRANDSCHUTZ
- BAUPHYSIK
- TIEFBAU
- FORSCHUNG ENTWICKLUNG MODELLIERUNG

Mfpa

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 14

Sockelbrandprüfverfahren

Repräsentatives Brandszenario

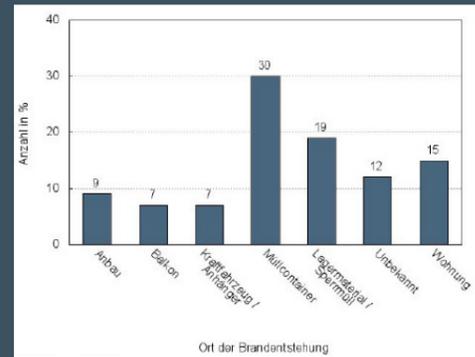


Abbildung 8: [6] www.mfpa-leipzig.de



Abbildung 9: [6] www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 15

Sockelbrandprüfverfahren

Holzkippe (200 kg)

Abbildung 10: [6]

Abbildung 11: [6]

Abbildung 12: [6]

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 17

Sockelbrandprüfverfahren

Untersuchungsgegenstand

- repräsentatives EPS-basiertes WDV
- Dämmstoffdicke: 300 mm
- konstruktive Brandschutzmaßnahmen:
 - Versuch 1: 1 Brandriegel
 - Versuch 2 und 3: 3 Brandriegel

Abbildung 15: [6]

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 16

Sockelbrandprüfverfahren

Prüfstand

Abbildung 13: [6]

Abbildung 14: [6]

www.mfpa-leipzig.de

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 18

Sockelbrandprüfverfahren

Brandbeanspruchung

Abbildung 16: [6]

Abbildung 17: [6]

www.mfpa-leipzig.de

Gliederung

1. Anforderungen an Außenwandbekleidungen
2. Prüfung von Außenwandbekleidungen
3. Problembeschreibung
4. Sockelbrandprüfverfahren
5. Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung

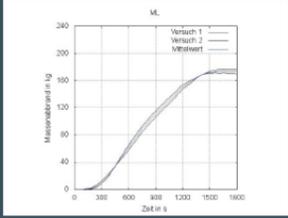
19

-  WERKSTOFFE IM BAUWESEN
-  TRAGWERKE UND KONSTRUKTIONEN
-  BAULICHER BRANDSCHUTZ
-  BAUPHYSIK
-  TIEFBAU
-  FORSCHUNG ENTWICKLUNG MODELLIERUNG
-  MFPA

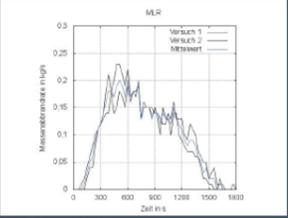
www.mfpa-leipzig.de

Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung

Methode (Modellierung des Sockelbrandszenarios)



ML



HRR

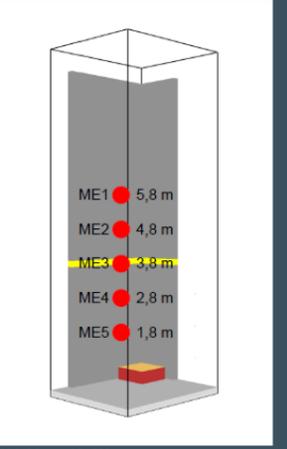


Abbildung 19: [3]

Abbildung 18: [3]

www.mfpa-leipzig.de

Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung



Untersuchungsziele

- Untersuchung von Wärmeübertragungsprozessen
- Untersuchung von Außenwandbekleidungs-systemen
- Untersuchung von Brandszenarien

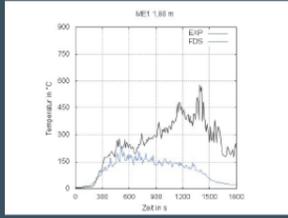
Untersuchungsmethode

- Schritt 1: Modellierung des Sockelbrandszenarios (Holzkrippe, 200 kg)
 - Stoff: Holz
 - HRR: MLR, effective Heat of Combustion
 - Gitterweite: 10 cm
- Schritt 2: Modellierung der Wärmeübertragung

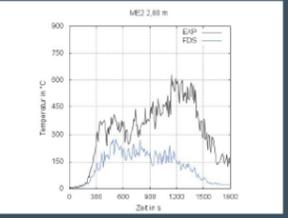
Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung



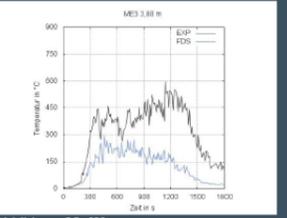
Ergebnisse (Modellierung des Sockelbrandszenarios)



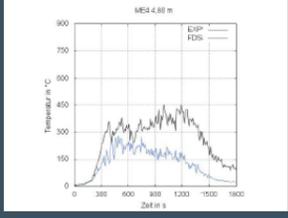
ME1 1.80 m



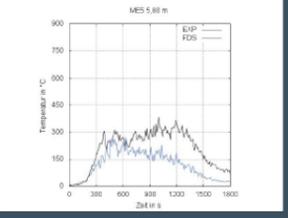
ME2 2.80 m



ME3 3.80 m



ME4 4.80 m



ME5 5.80 m

11. Anwendertreffen der FDS-Usergroup | 23

Numerische Modellierung der Brandbeanspruchung

Ergebnisse (Modellierung des Sockelbrandszenarios)



Probleme

- Prüfbedingungen (links)
- Prüfkörper (rechts)

Abbildung 21: [3]

www.mfpa-leipzig.de



Mit Sicherheit geprüfte Qualität

Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

www.mfpa-leipzig.de



24

Quellenverzeichnis

[1] Hauswaldt, S., Kaudelka, S.: Schutzzielbetrachtungen zum Brandverhalten von Außenwandbekleidungen. Bauphysik 39 (2017), H. 6, S. 1-5

[2] <https://wdvs.enbausea.de/wp-content/uploads/2012/11/wdvs-aufbau-sto.jpg> (5.11.2017)

[3] MFPA Leipzig GmbH

[4] Schneider, U.: Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2. Auflage. Werner Verlag, 2009

[5] hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH

[6] Kaudelka, S., Hauswaldt, S.: Untersuchungen zum Brandverhalten EPS-basierter Wärmedämm-Verbundsysteme bei Brandbeanspruchungen im Sockelbereich. Bauphysik 39 (2017), H. 1, S. 10-22

Kontakt

Sven Kaudelka
s.kaudelka@mfpa-leipzig.de
www.mfpa-leipzig.de

Andreas Vischer:**Musik- und Kongresshalle Lübeck: Heißbemessung des Dachtragwerks und Nachweis der Rauchableitung mit FDS**

Die Musik- und Kongresshalle Lübeck (MuK) wurde vom international renommierten Architekten Meinhard von Gerkan entworfen und von 1992 bis 1994 als multifunktionales Veranstaltungsgebäude errichtet.

Bei einer Verkehrssicherheitsbegehung wurden mehrere Gefahrenpotenziale aufgedeckt, die durch eine brandschutztechnische Untersuchung und Ertüchtigung abgestellt werden sollen. Als Folge der Begehung wurde der Konzertsaal aufgrund wesentlicher konstruktiver Baumängel im Bereich der Saaldecke durch die Bauaufsicht gesperrt.

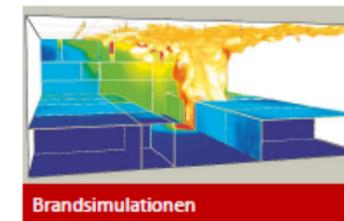
Die Saaldecke sowie die Dachkonstruktion wird durch eine ungeschützte Stahlkonstruktion getragen, die zunächst keine Feuerwiderstandsdauer aufweist. Weiterhin ist eine wirksame Entrauchung aufgrund der Schließung von Randfugen der Deckenbekleidung nicht vorhanden.

Für den Nachweis der Feuerwiderstandsdauer der Saaldecke sowie für den Nachweis und die Entwicklung des Entrauchungskonzeptes wurden daher Brand- und Rauchsimulationen mit FDS durchgeführt.

Der Vortrag erläutert zunächst die Ausgangssituation und die Aufgabenstellung und geht dann auf die Entwicklung der maßgebenden Bemessungsbrände und Bemessungsbrandszenarien ein.

Hierbei wird auch der Ansatz des Bemessungsbrandes nach DIN EN 1991-1-2 Anhang BB.4 kritisch hinterfragt und zur Diskussion gestellt.

Abschließend werden die Ergebnisse und Schlussfolgerungen sowie die Überprüfung mittels Heißrauchversuchen präsentiert.



Brandsimulationen



Rauchsimulationen



Evakuierungssimulationen



Heißbemessung von Tragwerken

Praxisvortrag: Musik- und Kongresshalle Lübeck

Dr.-Ing. Andreas Vischer
Geschäftsführer

Sachverständiger für Brandschutz und Ingenieurmethoden

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



Inhalt

1. Vorstellung
2. Ausgangslage
3. Aufgabenstellung
4. Entwicklung der Bemessungsbrände
5. Ergebnisse und Fazit
6. Überprüfung durch Rauchversuche



Ausgangslage

Objektbeschreibung der Musik- und Kongresshalle in Lübeck:

- Entwurf des Architekten Meinhard von Gerkan
- erbaut von 1992 bis 1994 als multifunktionales Veranstaltungsgebäude
- Versammlungsstätte mit bis zu 3.500 Personen
- Foyer und Konzertsaal (ca. 18.000 m² BGF)
- Tonnendach mit ungeschütztem Stahltragwerk
- Stilllegung Konzertsaal aufgrund von Brandschutzmängeln:
 - Entrauchung nicht möglich
 - ungeschützte Stahldachkonstruktion



Dr.-Ing. Andreas Vischer - Kurzvita

Studium:

- RWTH Aachen, Dipl.-Bauingenieur, Konstruktiver Ingenieurbau

Doktorarbeit:

- Lehrstuhl für Mechanik und Baukonstruktionen, RWTH Aachen
- Promotion:

„Entwicklung eines numerischen Sub-Modells zur Berechnung der instationären dreidimensionalen Wärmeübertragung in Bauteilen bei Brandsimulationen“

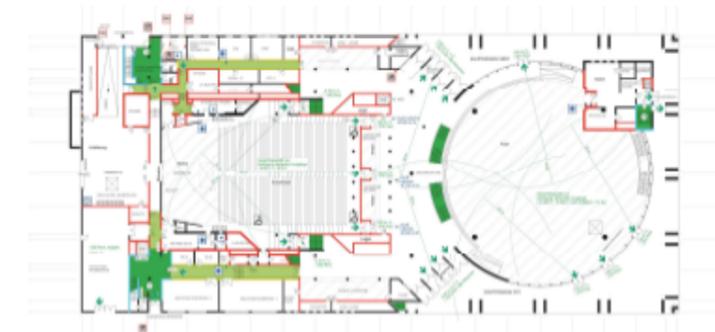
Tätigkeiten:

- seit 2003 Nebentätigkeit als Tragwerksplaner, Statiker, Prüfung von Statischen Berechnungen
- seit 2004 tätig im Bereich der Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz
- ab 2009 Tragwerksplaner und Statiker sowie Leiter Brandschutzabteilung
- ab 2011 Sachverständiger für Brandschutz und Ingenieurmethoden
- seit 2008 aktives Mitglied der FDS Usergroup
- ab 04/2017 Geschäftsführer VISCHER Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, Nordhorn



Aufgabenstellung

- Erstellung eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes durch Assmann Schmidt Ingenieure
- Dachtragkonstruktion soll als ungeschützte Stahlkonstruktion verbleiben
- Entwicklung und Nachweis der Rauchableitung





Aufgabenstellung

- Abstimmung mit der Bauaufsicht und der Feuerwehr Lübeck
- Nachweis des Dachtragwerkes nach DIN EN 1993-1-2 i. V. m. DIN EN 1991-1-2 Anhang BB (Naturbrandverfahren)
- Nachweis feuerhemmende Konstruktion
- Dimensionierung des Rauch- und Wärmeabzuges
 - maschineller Rauchabzug
 - maschinelle / natürliche Zuluft

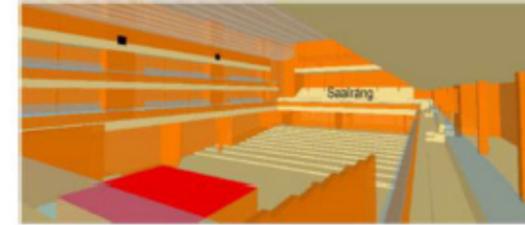


Quelle: Dr.-Ing. A. Vischer

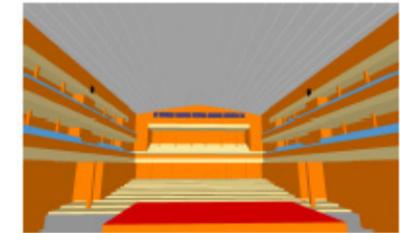
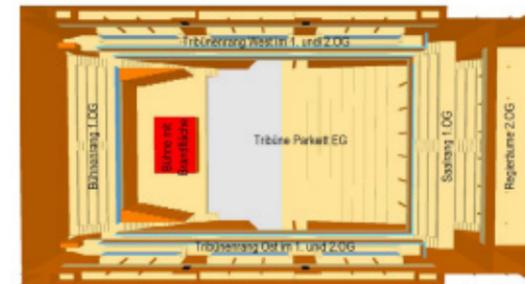
→ Brand- und Rauchsimulationen mit FDS



Modell in FDS



Quelle: Dr.-Ing. A. Vischer

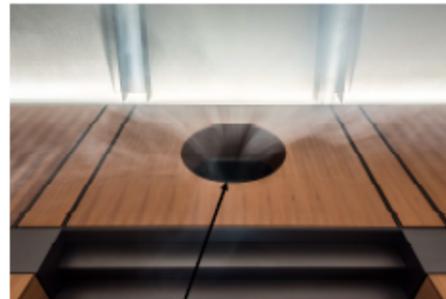


Quelle: Dr.-Ing. A. Vischer

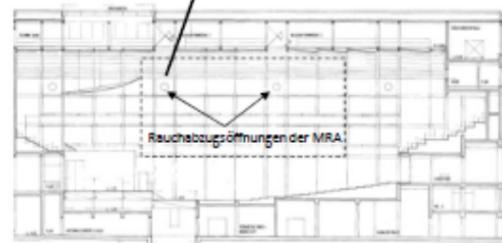


Anlagentechnik und Entrauchungsanlage

- flächendeckende BMA
- Bühne mit Sprühflutanlage
- NRWG im Dachraum
- maschinelle Rauchabzugsanlage (Absaugstellen im oberen Wandbereich des Saales)
- natürliche Zuluft über Zugangstüren
- maschinelle Zuluft über Lüftungsanlage (Sitzreihen)



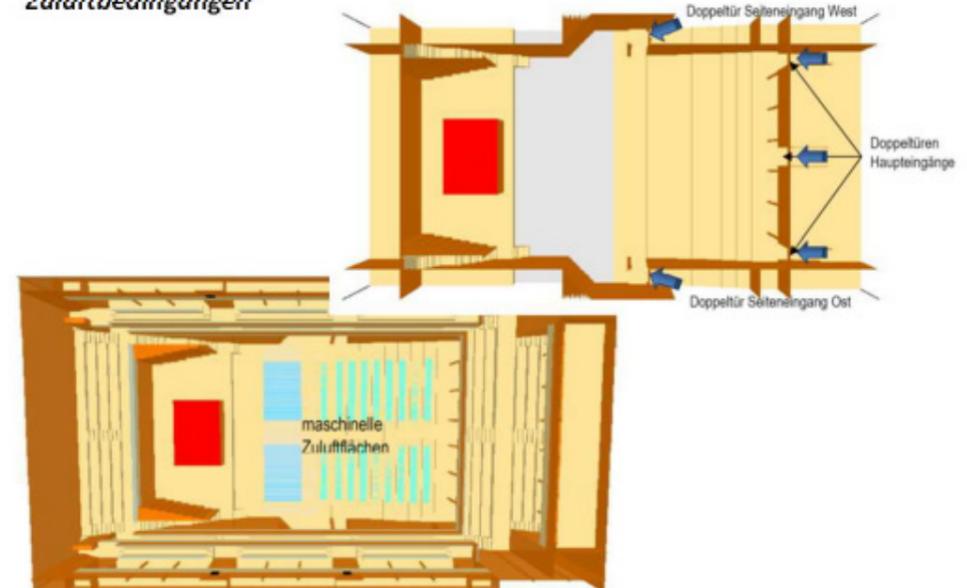
Quelle: Jörg Schwarzl Fotografie



Rauchabzugsöffnungen der MRA



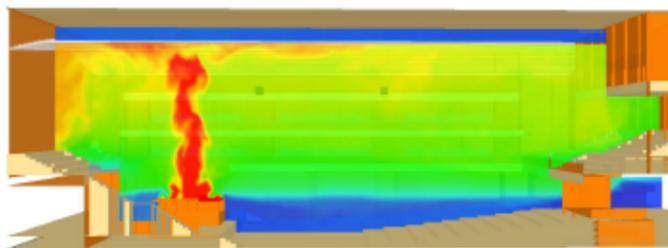
Zuluftbedingungen





Brandszenarien

- Shows, Konzerte, Theater etc.
- Holzverkleidung schwerentflammbar
- Temperaturermittlung:
Brand auf Bühne:
 - 3,0m Höhe (1,0m über Bühne)
- Rauchableitung:
 - in Anlehnung an DIN 18230-5: 6 MW



Entwicklung Brandszenario „Heißbemessung“

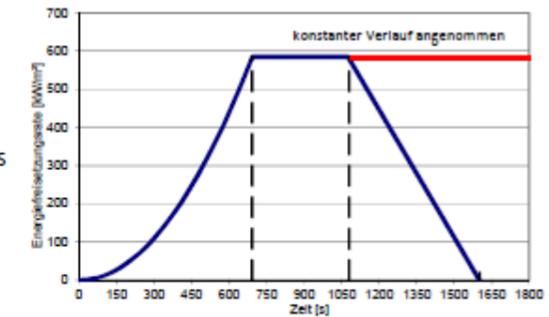
- Annahme: Auslösung der Sprühflutanlage oberhalb der Bühne automatisch oder manuell durch Brandwachen 5 min. nach Brandbeginn
- Schnelle Brandausbreitung auf der Bühne: 70 cm /min. und 20% Aufschlag:

$$A_{\text{Brand}} = \pi \times (0,70\text{m/min.} \times 5 \text{ min.})^2 \times 1,2 = 46 \text{ m}^2$$

→ max. Energiefreisetzungsrate:

$$Q = 46,0 \text{ m}^2 \times 585 \text{ kW/m}^2 = 26,9 \text{ MW}$$

→ aber: kein Verlöschen des Brandes
konstanter Verlauf bis 1.800 sec.



Entwicklung Brandszenario „Heißbemessung“

Brandlastdichte:

DIN EN 1991-1-2, Anhang BB.3 und vfdb-Leitfaden:

- $q = 417 \text{ MJ/m}^2$ (90%-Fraktil, Theater, Kinos)

Energiefreisetzungsrate:

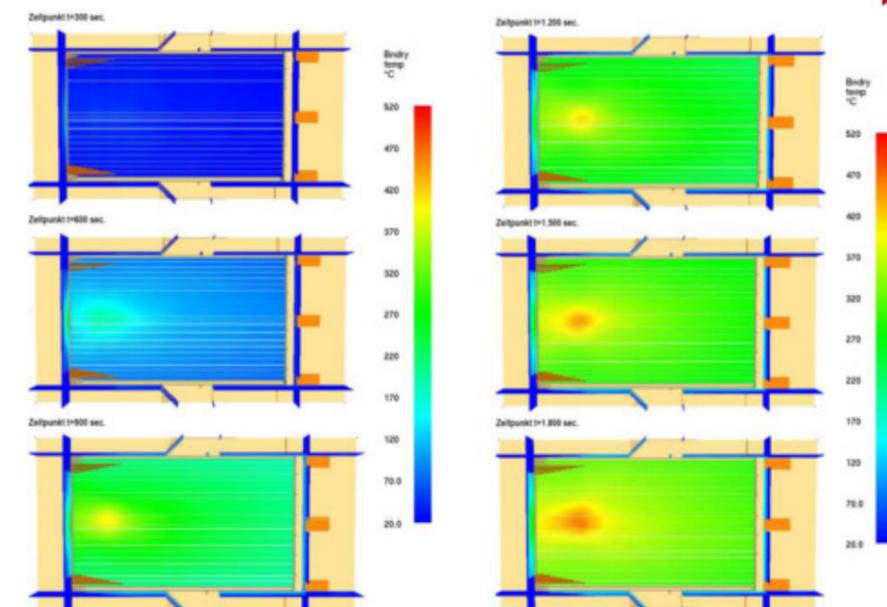
- DIN EN 1991-1-2, Anhang BB.4: $\dot{q} = 500 \text{ kW/m}^2$ (Theater, Kinos)
- vfdb-Leitfaden: $\dot{q} = 250 - 500 \text{ kW/m}^2$ (Theater, Kinos)

Sicherheitskonzept nach Anhang BB.5:

$$\rightarrow \gamma_{fi} = 1,17 (\dot{q}) \quad | \quad \gamma_{fi} = 1,23 (Q)$$

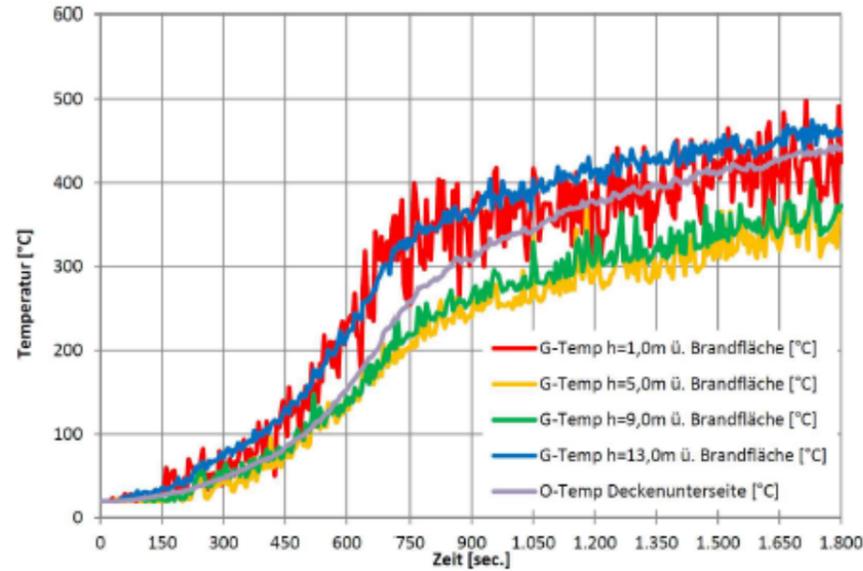
$$\rightarrow \dot{q} = 500 \text{ kW/m}^2 \times 1,17 = 585 \text{ kW/m}^2$$

$$\rightarrow q = 417 \text{ MJ/m}^2 \times 1,23 = 513 \text{ MJ/m}^2 \text{ (Gesamt: 23,6 GJ)}$$





Ergebnisse

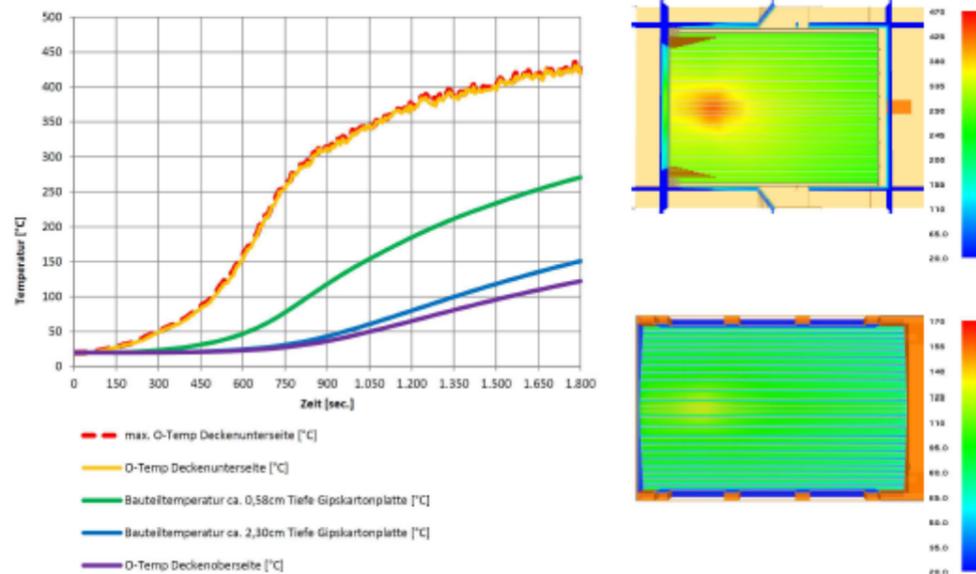


Brand- und Rauchsimulation – Video

VISCHER
Ingenieure



Ergebnisse



Überprüfung durch Rauchversuche

- Durchführung durch FAHO GmbH
- Rauchmenge 62.000 m³/h bei Raumvolumen 20.000 m³/h
- 30 kW Leistung: Erwärmung auf 120°C

Fazit:

- Bestätigung der Simulationsergebnisse
 - 2. Stufe der Entrauchung muss früher automatisch zugeschaltet werden
- automatische Ansteuerung der Zuluftöffnungen und aller 4 Rauchgasventilatoren



Quelle: Jörg Schwarze Fotografie

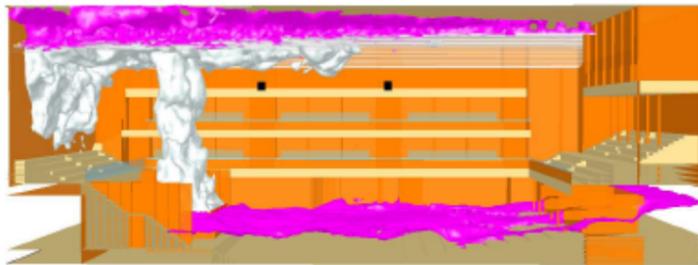


Quelle: Jörg Schwarze Fotografie



Fazit

- max. Oberflächentemperatur (Deckenoberseite): 125°C
- kritische Temperatur gemäß DIN EN 1993-1-2 vereinfacht mit:
 $\mu_0 = \eta_{fi} (\gamma_{M,fi} / \gamma_{M,0}) = 0,65 \times (1,0 / 1,0) = 0,65$
 $\rightarrow \vartheta_{s,cr} (\mu_0 = 0,65) = 539^\circ\text{C} > 125^\circ\text{C} \text{ und } > 430^\circ\text{C}!$
- Nachweis des ungeschützten Stahldachtragwerkes!
- Erarbeitung Entrauchungskonzept!
- Feuerwehrinterventionszeit < 15 Minuten!



Michael Winkler, Peter Wegener:

Rauchableitung in Ladenstraßen mehrgeschossiger Verkaufsstätten - Erfahrungen aus der Praxis

Abstract:

Ladenstraßen moderner Verkaufsstätten stellen mit komplexen Deckendurchbrüchen eine Herausforderung für die Entrauchung dar.

Sowohl die MVkVO 1995 als auch die MVkVO 2014 stellen für Ladenstraßen mehrgeschossiger Verkaufsstätten keine konkreten Anforderungen hinsichtlich der Entrauchungsleistung.

Im Zuge des Vortrags werden die maßgebenden Einflussfaktoren des abzuführenden Rauchgasvolumens beleuchtet. Anhand eines Praxisbeispiels sollen verschiedene Lösungsansätze zur Entrauchung einer Ladenstraße mit komplexen Deckendurchbrüchen erarbeitet und diskutiert werden.

Aus rechtlichen Gründen kann der Vortrag leider nicht veröffentlicht werden.



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

Kontakt:

VISCHER Ingenieurgesellschaft
mbH & Co. KG
Prahmweg 7 | 48531 Nordhorn

vischer-ing.de

info@vischer-ing.de

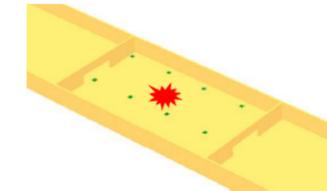


Andreas Dahlitz:

Denken wir in der richtigen Reihenfolge? – Gedankenanstöße zum Werkzeug ‚Entrauchungssimulation‘

Abstract:

Aus der praktischen Erfahrung heraus soll die Standardvorgehensweise bei der Anwendung des Werkzeugs ‚Entrauchungssimulation‘ hinterfragt und auf Basis neuer Gedankenanstöße diskutiert werden.



Denken wir in der richtigen Reihenfolge?

Ein Impulsvortrag zum Werkzeug
„Entrauchungssimulation“ !

Andreas Dahlitz

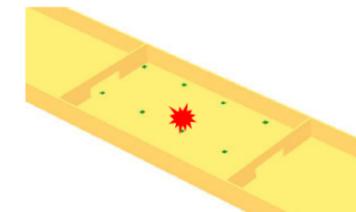
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

Denken wir in der richtigen Reihenfolge?

... und zwar zur Wahl der Brandherdlage (BHL)

Welche BHL ist die Richtige? Gibt es überhaupt
eine Richtige?

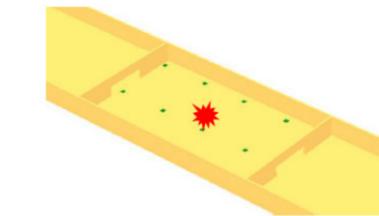


Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

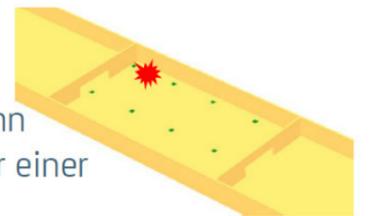
Unser Vorgehen heute!

Wir legen im Brandraum eine Brandherdlage (BHL) fest. Diese zumeist zentral und mittig.

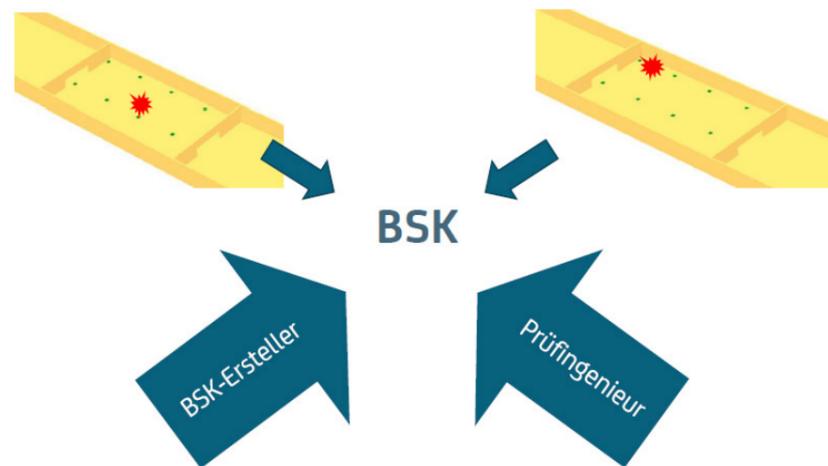


UND

Vielleicht noch eine Zweite, diese dann außermittig aber bloß nicht direkt vor einer Zuluftfläche.



Unser Vorgehen heute!



Unser Vorgehen heute!



behauptet, dass die gewählten zwei BHLs mit hoher Wahrscheinlichkeit alle möglichen Brandorte abdecken

folgt der Behauptung, dann alles ok

folgt dieser nicht, was dann?

Impuls

Vielleicht müssen wir in einer anderen Reihenfolge denken!

1. Wir bauen uns den Brandraum im FDS und legen alle Nachströmwege und -flächen fest.
2. Wir legen entweder über unsere Erfahrung, über eine Handrechnung oder über Tabellenwerte den maschinellen Abluftvolumenstrom fest und verteilen die Absaugpunkte gleichmäßig im oberen Drittel im Raum.
3. Wir simulieren „ohne Brand“ den Absaugvolumenstrom im Raum für die ersten Minuten an und betrachten uns die entstehenden Strömungsfelder in der Nachströmhöhe (z. B. in der Schnitthöhe 1 m über OKFF)

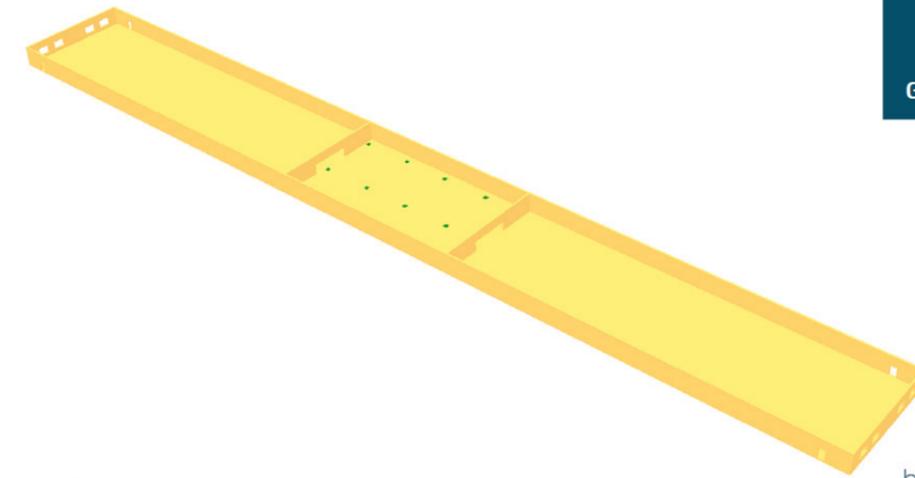
Impuls

4. Aus der Bewertung dieser Strömungsfelder (Geschwindigkeitsvektoren) legen wir dann
 - eine günstige BHL (Bereiche geringer Strömung) fest und simulieren mit dieser weiter und
 - betrachten ungünstige BHL (Bereiche hoher bzw. turbulenter Strömung) bei denen wir dann
 - Gegenmaßnahmen festlegen (Zuluftflächen verteilen oder in ihrer Charakteristik verändern) oder/und
 - z. B. Verkehrswege bzw. Verbotszonen (ohne feste Brandlasten) definieren → mobile Brandlasten müssen dort nach wie vor akzeptiert werden, bei diesen kann jedoch von einer geringen Brandleistung und von einer geringen Wahrscheinlichkeit des Eintritts ausgegangen werden

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

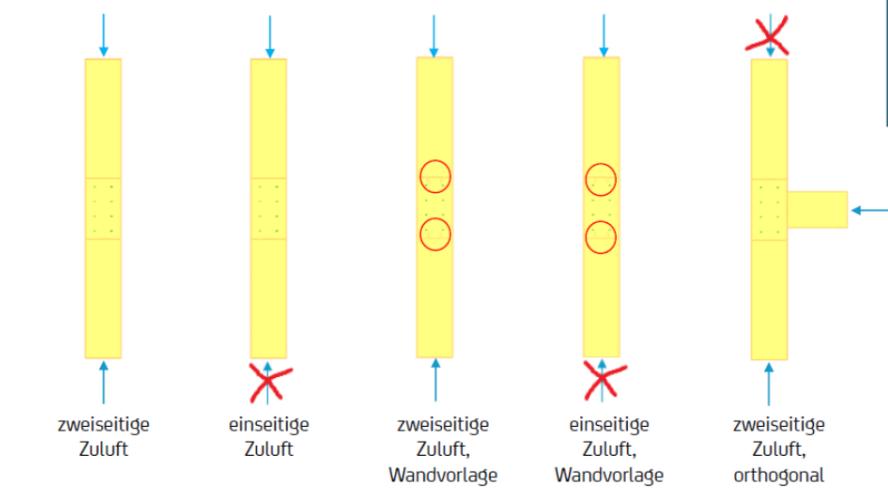
Geometrie



Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

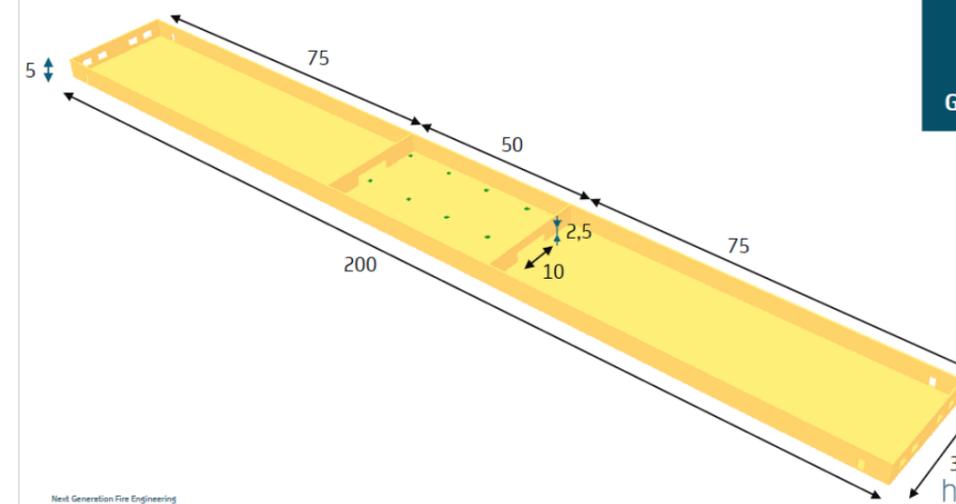
Hierzu ein Testlauf mit 5 Varianten



Next Generation Fire Engineering

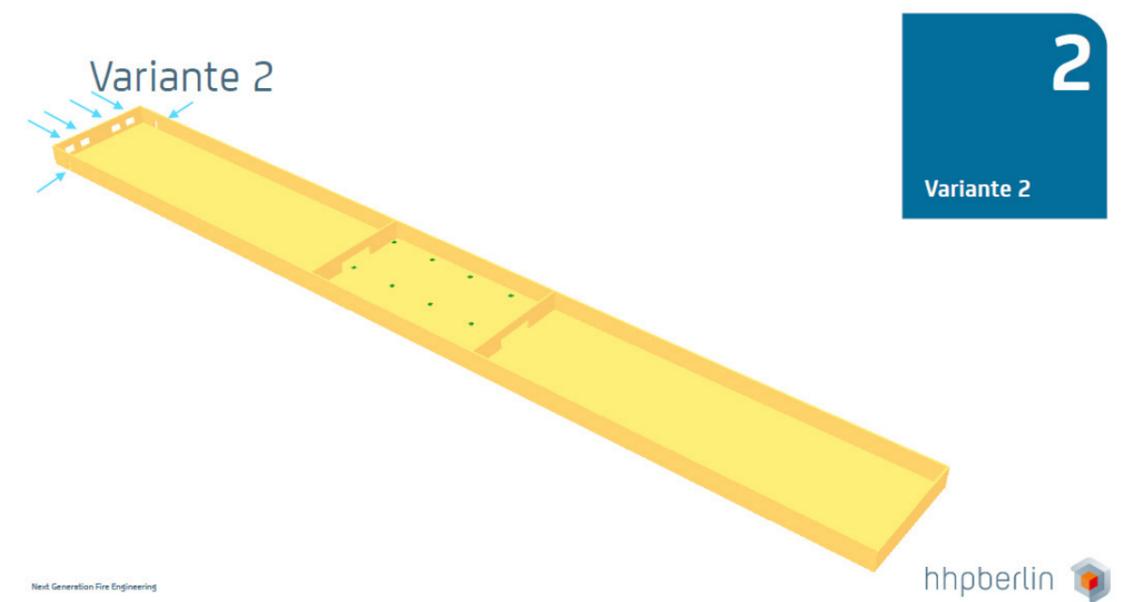
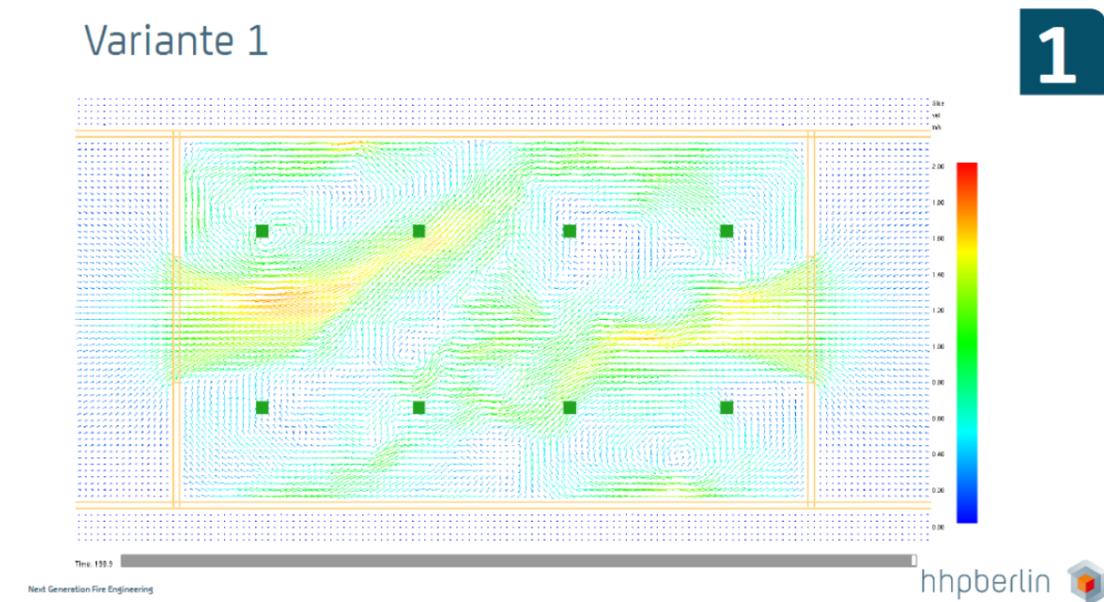
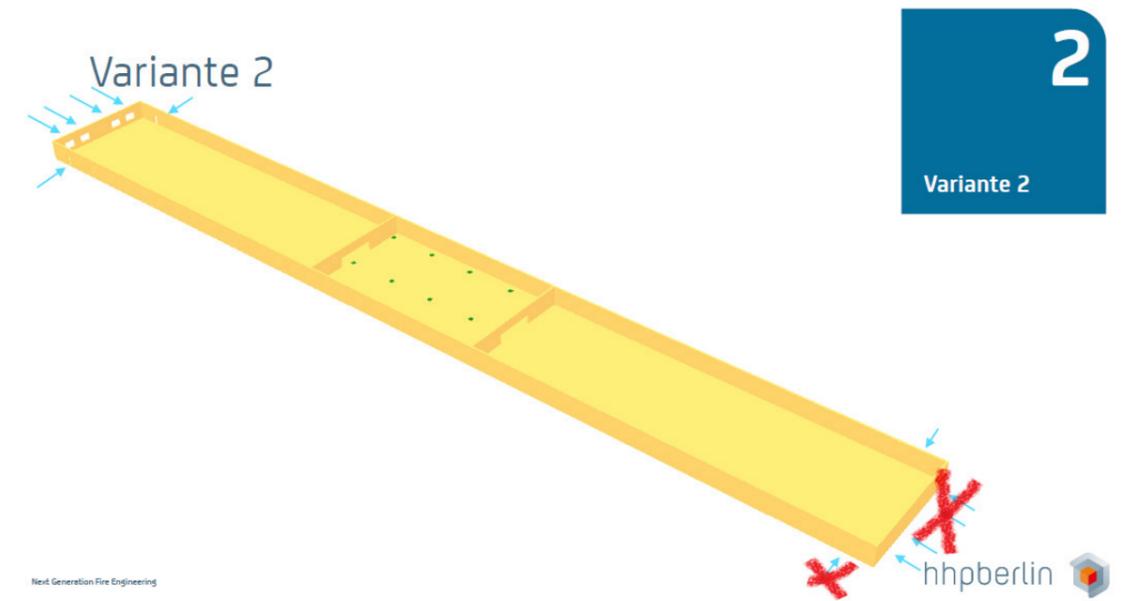
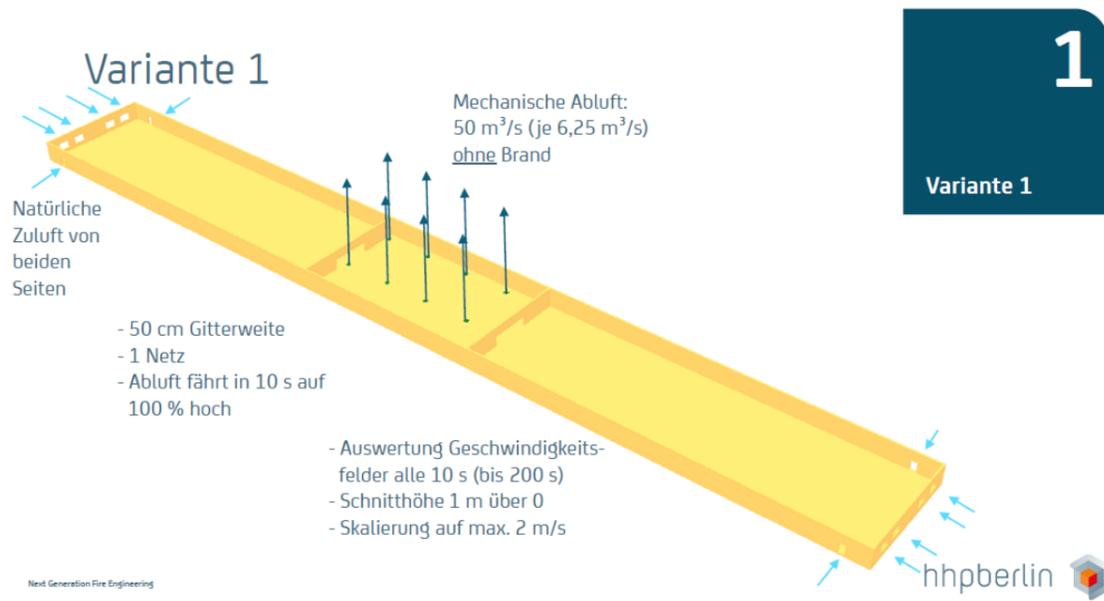
hhpberlin 

Geometrie



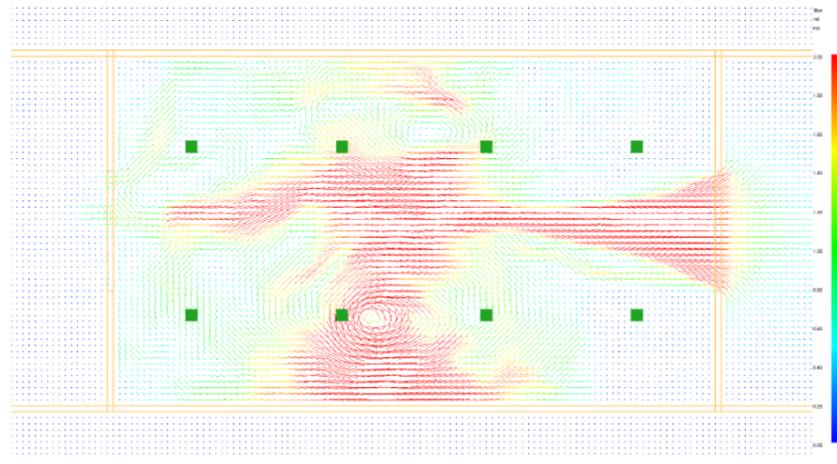
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 



Variante 2

2

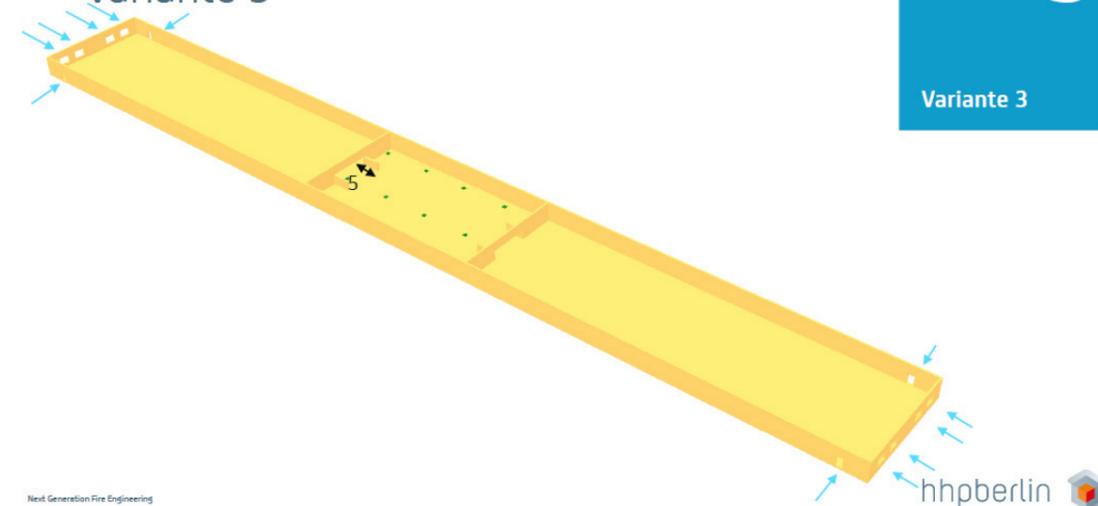


Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Variante 3

3
Variante 3

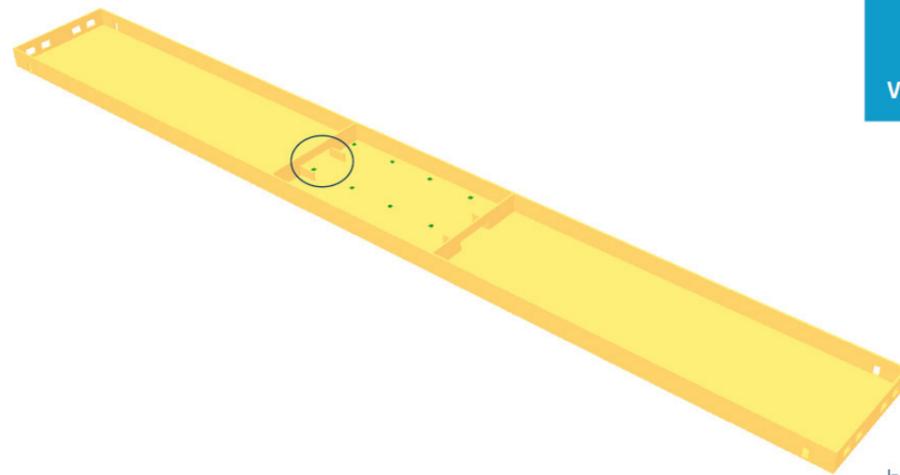


Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Variante 3

3
Variante 3

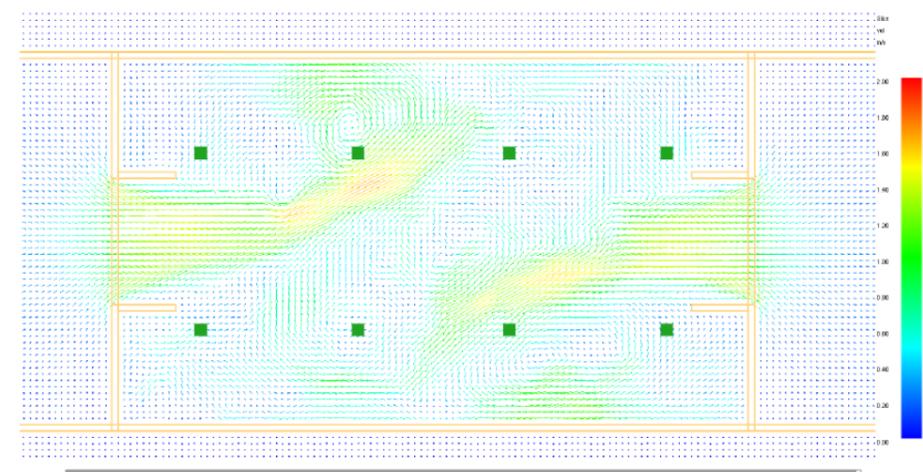


Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

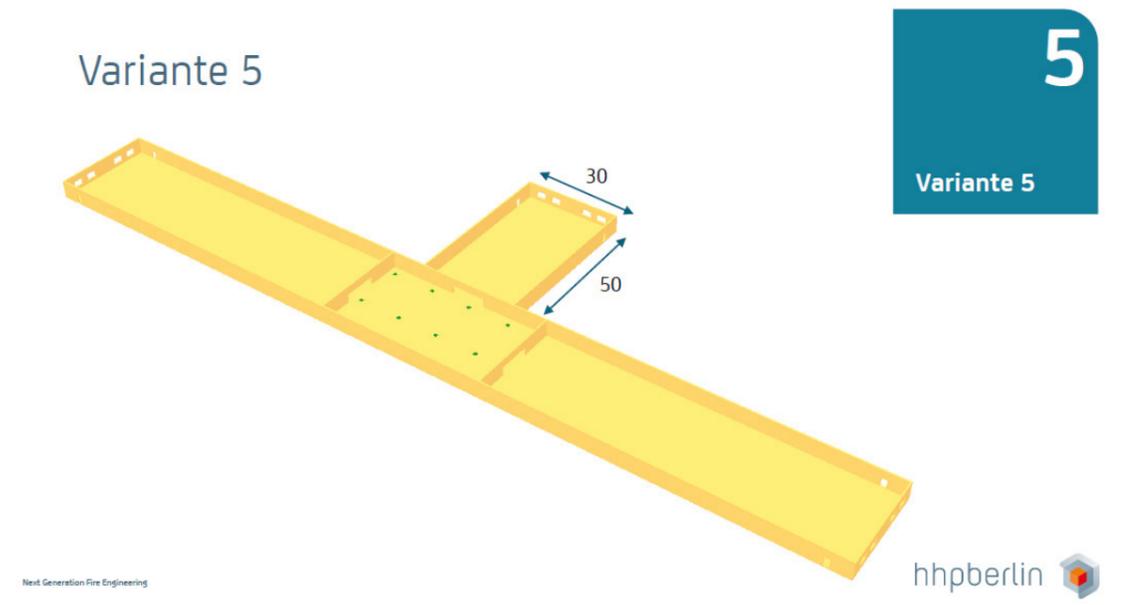
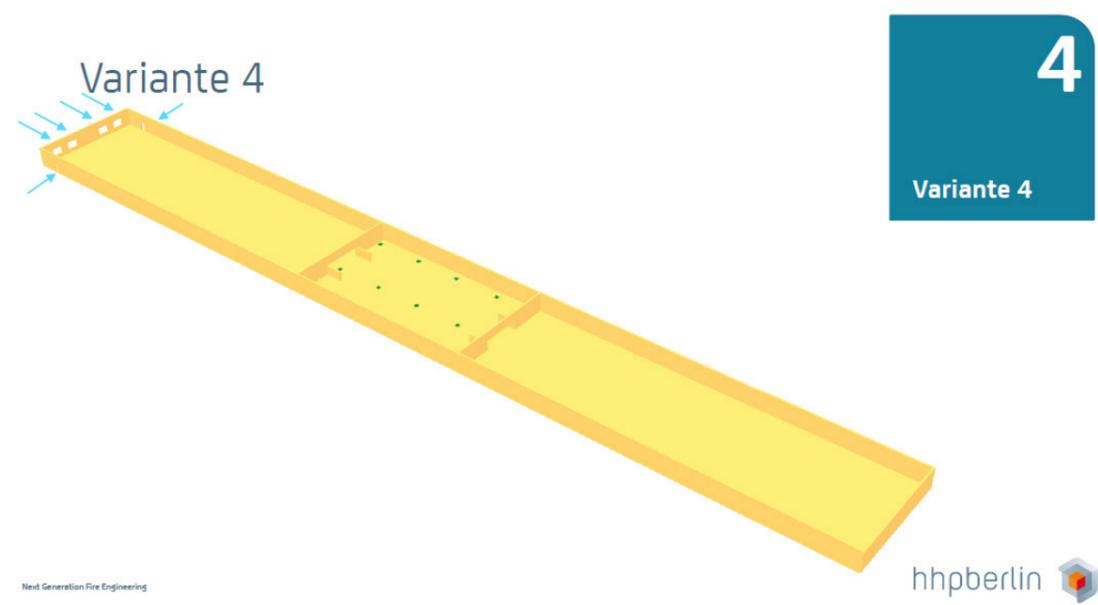
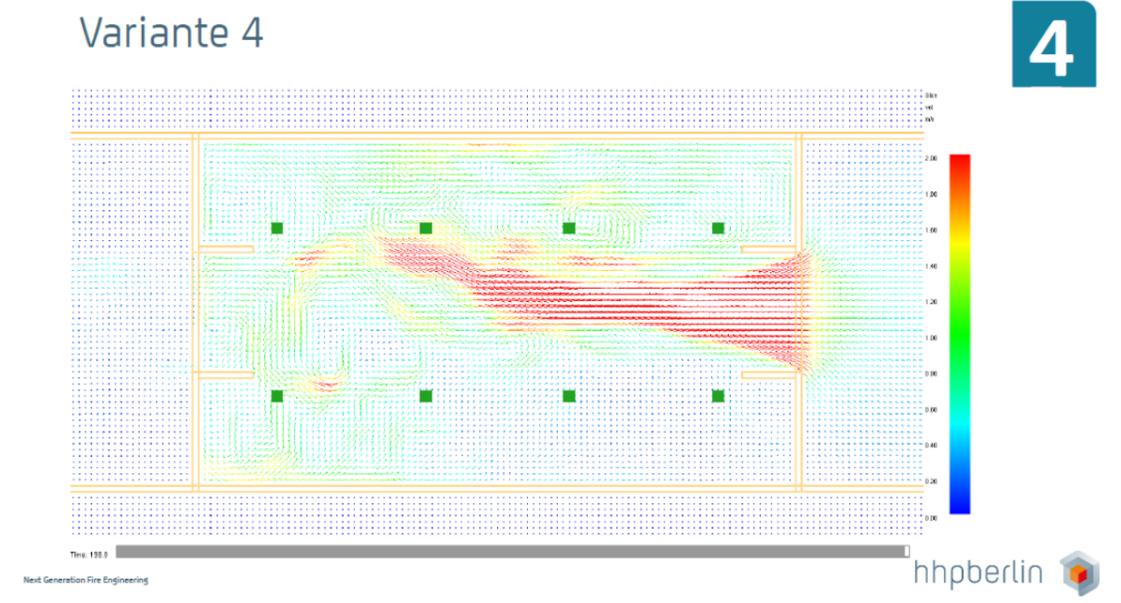
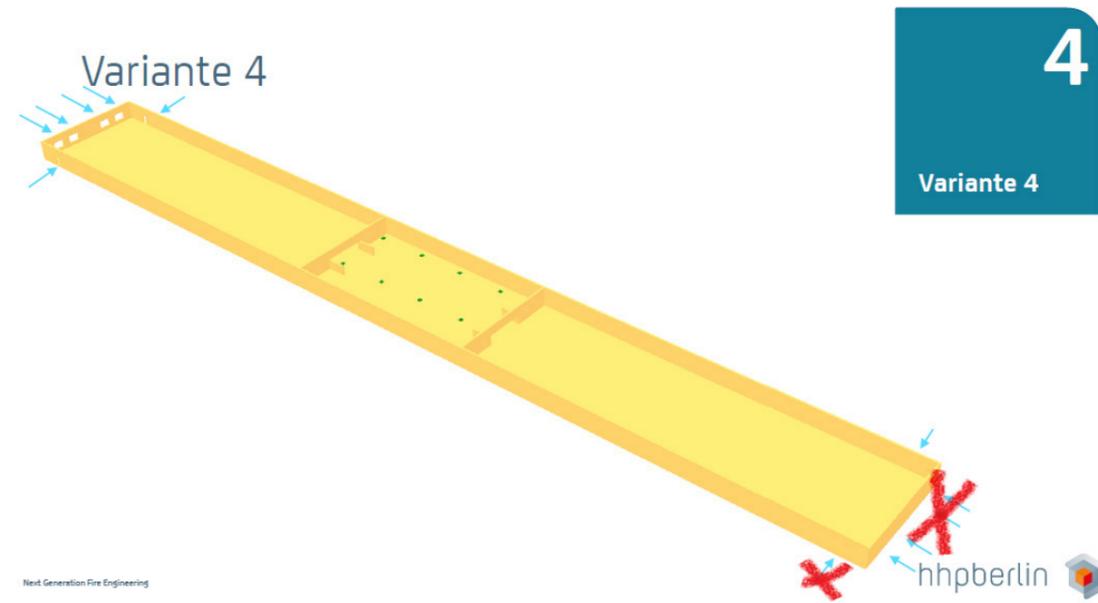
Variante 3

3



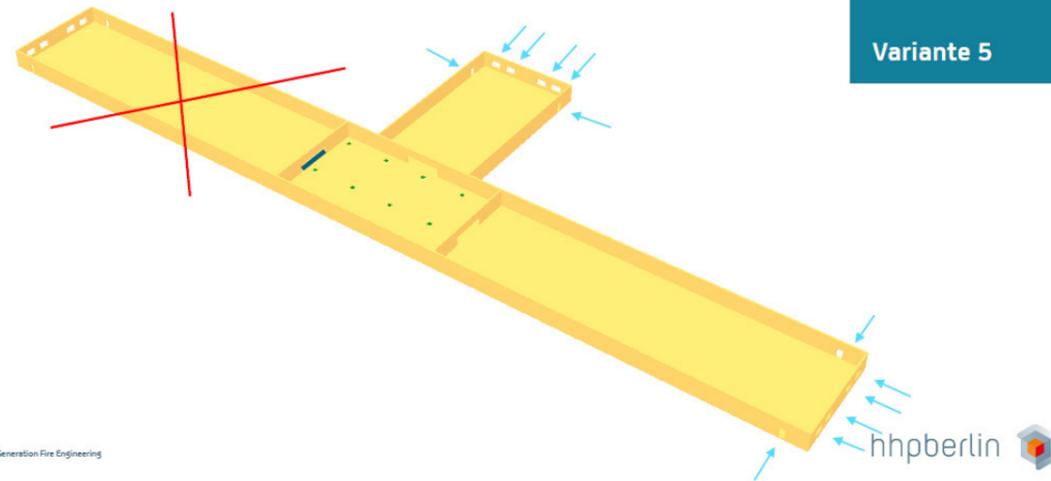
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin



Variante 5

5
Variante 5



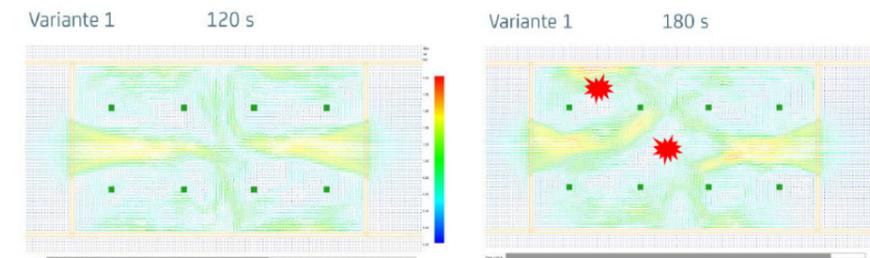
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Diskussion Variante 1

1
Diskussion

- aufeinander zuströmende Felder weichen > 120 s aus und bilden an den Wänden rückströmende Turbulenzen
- zwei BHL zentral und in einen der Quadranten (in Wandnähe)



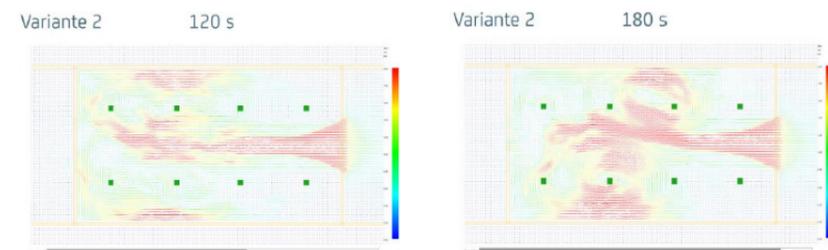
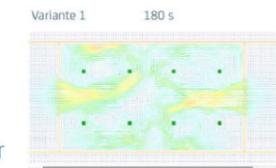
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Diskussion Variante 2

2
Diskussion

- Geschwindigkeiten erhöhen sich wie zu erwarten auf über 3 m/s
- Rückströmungen verstärken die einströmenden Felder
- mehrseitige Nachströmung würde die Situation verbessern

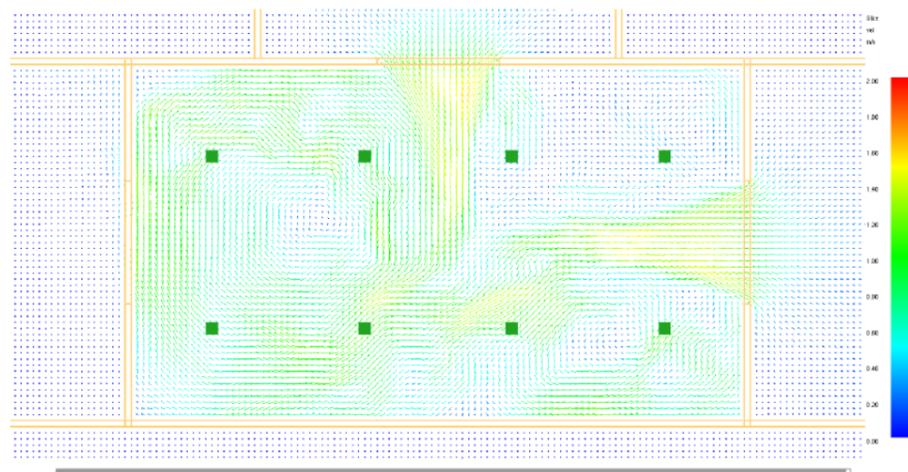


Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Variante 5

5

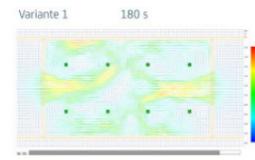


Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Diskussion Variante 3

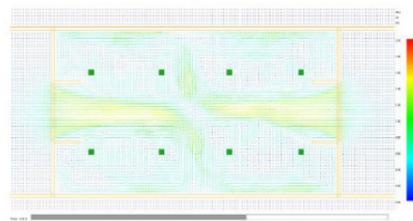
- die Wandvorlagen zeigen Wirkung
- aufeinander zuströmende Felder weichen > 120 s aus und beginnen an den Wänden rückströmende Turbulenzen auszubilden
- zwei BHL zentral und in einen der Quadranten



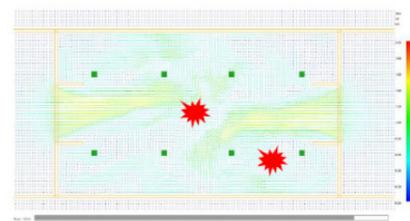
3

Diskussion

Variante 3 120 s



Variante 3 180 s

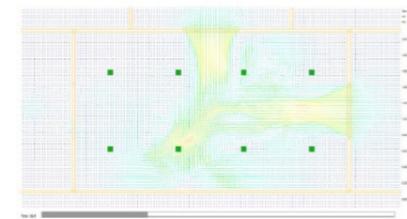


Next Generation Fire Engineering

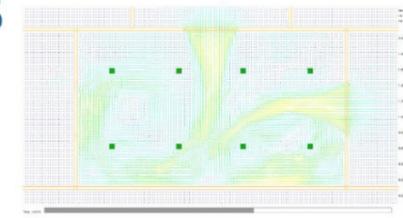
hhpberlin

Diskussion Variante 5

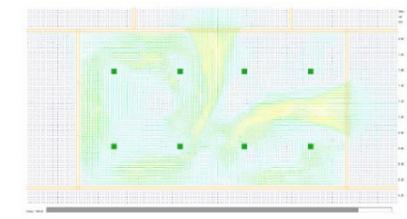
Variante 5 60 s



Variante 5 120 s



Variante 5 180 s



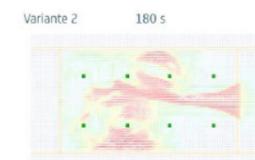
- Strömungsfelder stoßen aufeinander und strömen später aneinander vorbei
- > 180 s bilden sich Rückströmungen aus, die auf die einströmenden Felder wirken

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Diskussion Variante 4

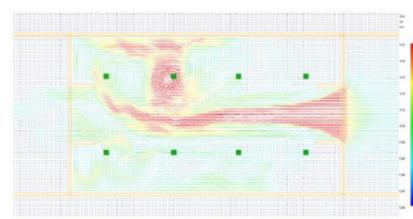
- auch hier zeigt die Wandvorlage Wirkung
- die linke Wandvorlage stört die Strömung
- linke Öffnung ist nicht dicht !!!
- Zuluftwege zu einseitig



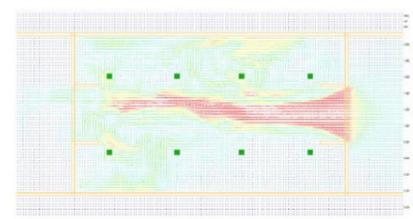
4

Diskussion

Variante 4 120 s



Variante 4 180 s



Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Mein Fazit und offene Diskussion

- für Brandräume mit maschineller Entrauchung, freier Nachströmung und wenigen Nachströmmöglichkeiten mit relativ hohen Einströmgeschwindigkeiten wäre dies ein Lösungsansatz, um die Wahl der BHL begründen zu können
- die Vorsimulationen müssten etwas länger angesetzt werden (300 s)
- Strömungsfelder strömen aneinander vorbei und bilden Turbulenzen (Wirbel), gilt auch für orthogonal aufeinander stoßende Strömungen
- abblendende Scheiben (Wandvorlagen), die ein Wiedereinströmen von Rückwirkungen vermeiden, können positiv wirken
- Danke für die Aufmerksamkeit

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

Burkhard Forell, Julian Park:

Wärmefreisetzung bei Vollbränden und Bedeutung für das Sicherheitskonzept für die Heißbemessung im Eurocode

Abstract:

Die Wärmefreisetzung (HRR) im Brandraum im ventilationsgesteuerten Fall hängt von der Ausnutzung des Sauerstoffs ab. Gängige Brandsimulationsmodelle wie FDS und CFAST liefern hier deutlich unterschiedliche Ergebnisse.

Die Unsicherheiten wirken sich auf die Festlegung von Bemessungsbränden für den ventilationsgesteuerten Fall nach Gl. BB.6 des nationalen Anhangs des EC 1 Teil 1-2 aus. Im zugrundeliegenden Forschungsbericht wurden die HRR und die Brandlast (Q) als wichtigste Einflussfaktoren für die Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall identifiziert und deshalb im Sicherheitskonzept mit dem Sicherheitsbeiwert γ_{fi} belegt.

Im Anwendungsbeispiel zeigt sich, dass bei normenkonformer Anwendung des Sicherheitskonzepts u. U. unter-ventilierte Brände modelliert werden, die nicht konservativ sind. Die entsprechend des Sicherheitskonzepts bei steigendem γ_{fi} erhöhten Q und HRR werden dann im Wesentlichen außerhalb des Brandraums frei. Konservativ und realistisch ist dagegen ein ausreichend-ventilierter Brand, bei dem eine reduzierte Massenverlustrate zu einer längeren Branddauer führt. Der Beiwert γ_{fi} ist dabei nur für Q zu verwenden. Anwender von Brandsimulationsmethoden müssen die modell- und einstellungsspezifischen Grenzen ventilationsgesteuerter Brände kontrollieren und den Wärmefreisetzungsverlauf entsprechend anpassen. Das standardmäßig aktivierte Löschungsmodell von FDS ist ggfs. zu deaktivieren. Es sollte überlegt werden, inwieweit die beschriebenen, teilweise anwendungs- und modellspezifischen Belange künftig in der Normung berücksichtigt werden können.

Die Gl. BB.6 des nationalen Anhangs des EC 1 Teil 1-2 sowie der dortige Untertext sollte nicht mehr Holz-spezifisch erläutert, sondern für ventilationsgesteuerte Brände allgemeingültig abgeleitet werden. So können Fehlanwendungen durch Einsetzen unpassender Heizwerte oder Verbrennungseffektivitäten vermieden werden.

GRS

Wärmefreisetzung bei Vollbränden und Bedeutung für das Sicherheitskonzept für die Heißbemessung im Eurocode

Burkhard Forell*
Julian Park**

*Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln
**Technische Hochschule Köln, Köln

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

1

GRS

Background (1)

- Design fire

Wärmefreisetzungsrate [kW] vs Zeit [s]

HRR fuel-controlled: $\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot X \cdot H_u$

HRR ventilation-controlled: $\dot{Q} = \dot{m}_L \cdot X_{O_2} \cdot E_L = \dot{m}_{O_2} \cdot X_{O_2} \cdot E_{O_2}$

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

Background (1): HOC vs. EPUMO
(Heizwert vs. Wärmefreisetzung pro Sauerstoffeinsatz)

□ Combustion of typical fuels:

- Propane: $C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$
 $3 \cdot 12 \text{ g} + 8 \text{ g} \quad 5 \cdot 32 \text{ g} \quad r_{O_2} = 160 \text{ g}_{O_2} / 44 \text{ g}_f = 3.636 \text{ g}_{O_2}/g_f$
 $\Delta H_u = 50.35 \text{ MJ/kg} \quad r_{air} = r_{O_2} / 0.23 \text{ g}_{O_2}/g_{air} = 15.8 \text{ g}_{air}/g_f$
- Cellulose: $C_6H_{10}O_5 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 5 H_2O$
 $6 \cdot 12 \text{ g} + 10 \text{ g} + 5 \cdot 16 \text{ g} \quad 6 \cdot 32 \text{ g} \quad r_{O_2} = 384 \text{ g}_{O_2} / 342 \text{ g}_f = 1.19 \text{ g}_{O_2}/g_f$
 $\Delta H_u = 17.47 \text{ MJ/kg} \quad r_{air} = r_{O_2} / 0.23 \text{ g}_{O_2}/g_{air} = 5.15 \text{ g}_{air}/g_f$

▪ molar masses: C: 12 g/mol, H: 1 g/mol, O: 16 g/mol

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

Background (1): HOC vs. EPUMO
(Heizwert vs. Wärmefreisetzung pro Sauerstoffeinsatz)

□ Slight dependence of EPUMO on CO/CO₂-ratio (2 to 3 % reduction)

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

Background (1): HOC vs. EPUMO
(Heizwert vs. Wärmefreisetzung pro Sauerstoffeinsatz)

□ HRR related to oxygen/air consumption is quite fuel-independent!

Comparison by pure HC:
C: 12.3 MJ/kg_{O₂}
H₂: 16.4 MJ/kg_{O₂}

(Hosser et al. 1996)

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

Interim conclusion

Research since 1990ies (e.g. Blume, Will) took over in e.g. DIN SPEC 18230-4, EC, KTA 2101.2, tabulated (e.g. Tewarson) fuel-dependent

Fuel-dependent, large margin !

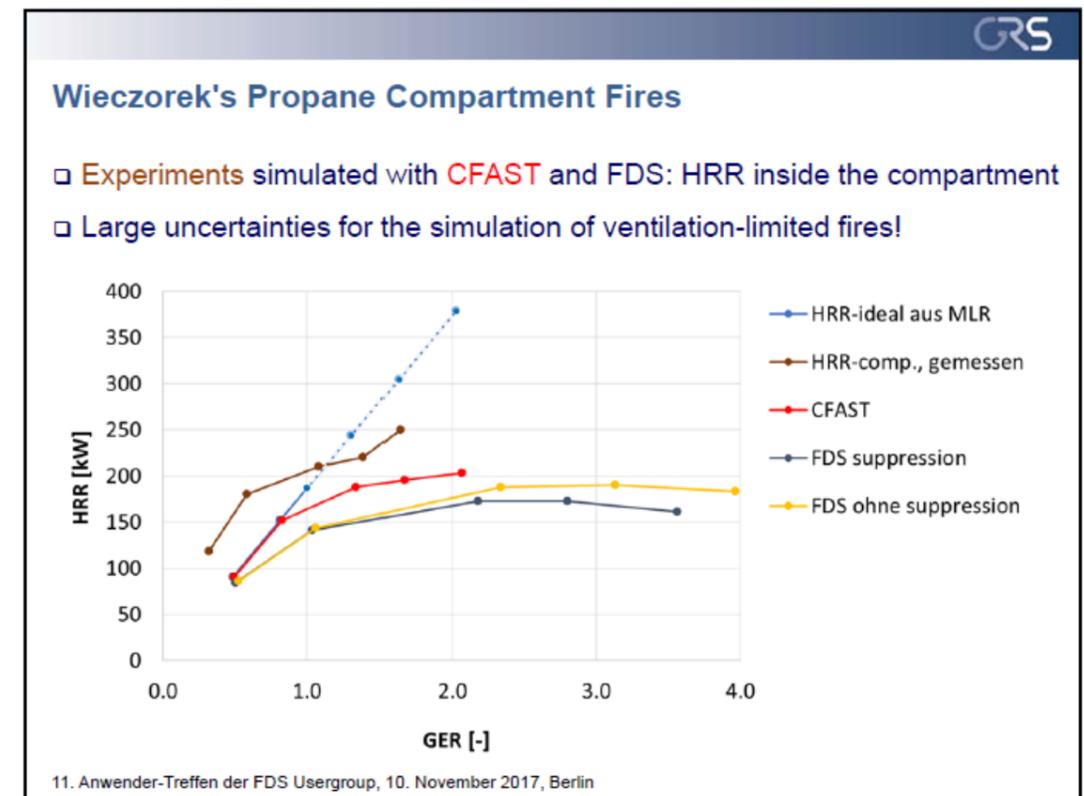
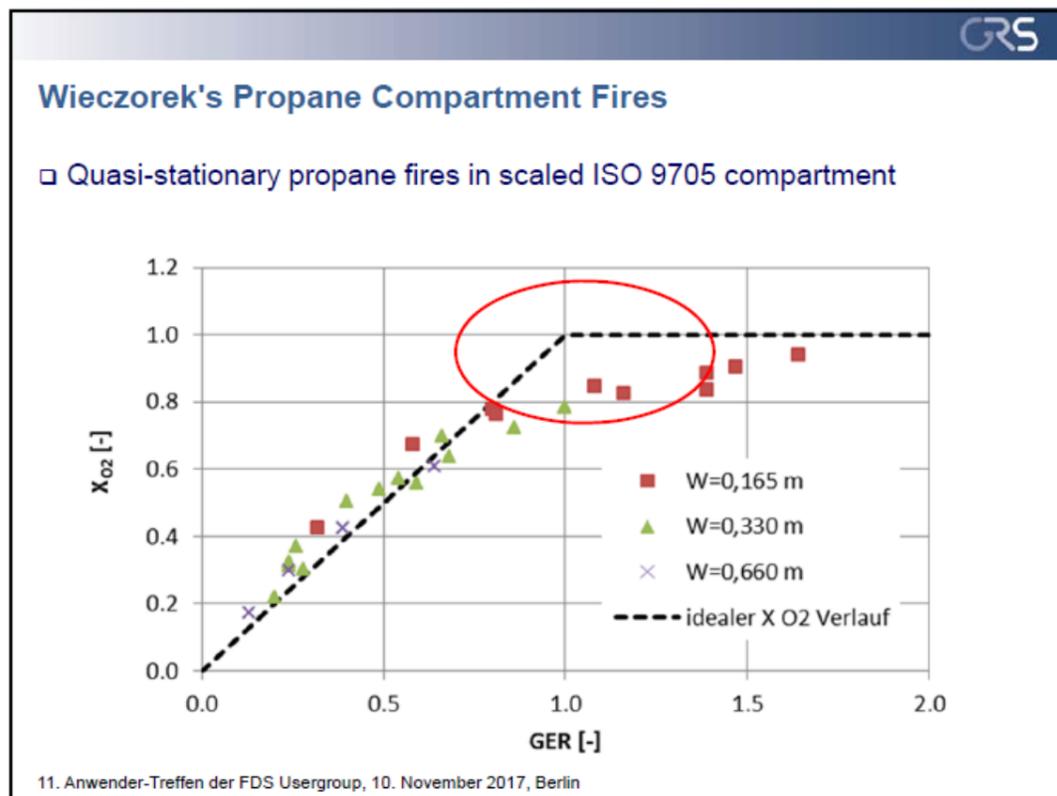
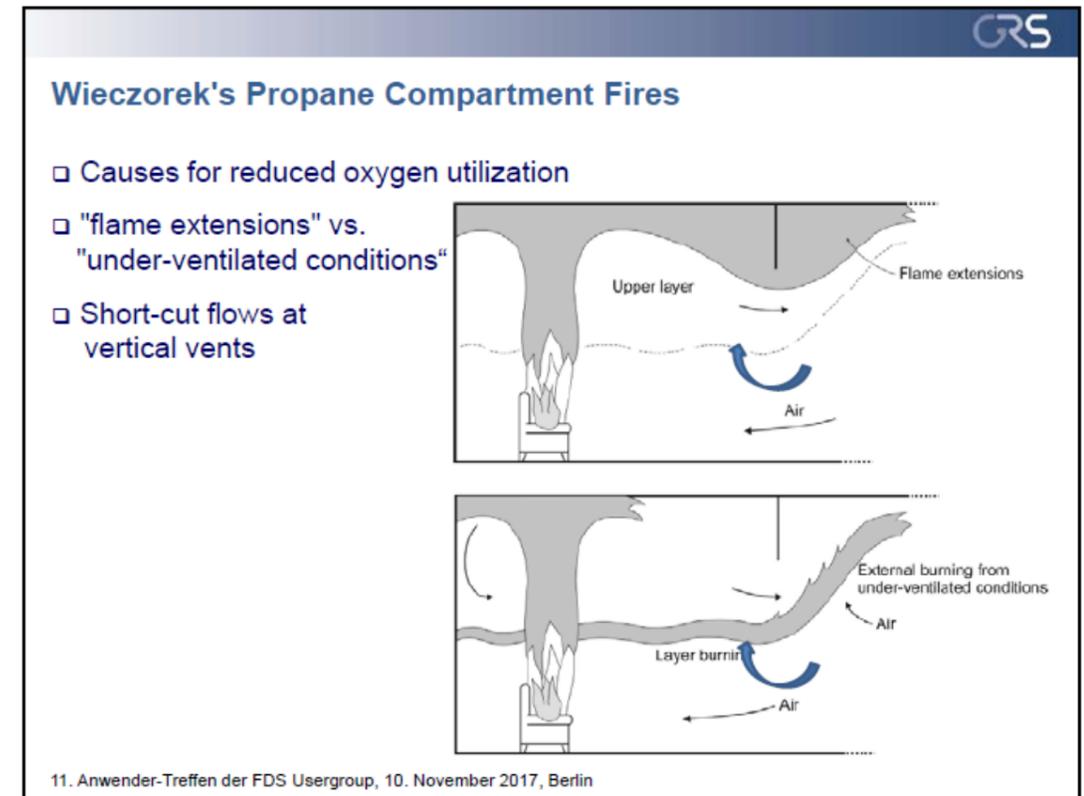
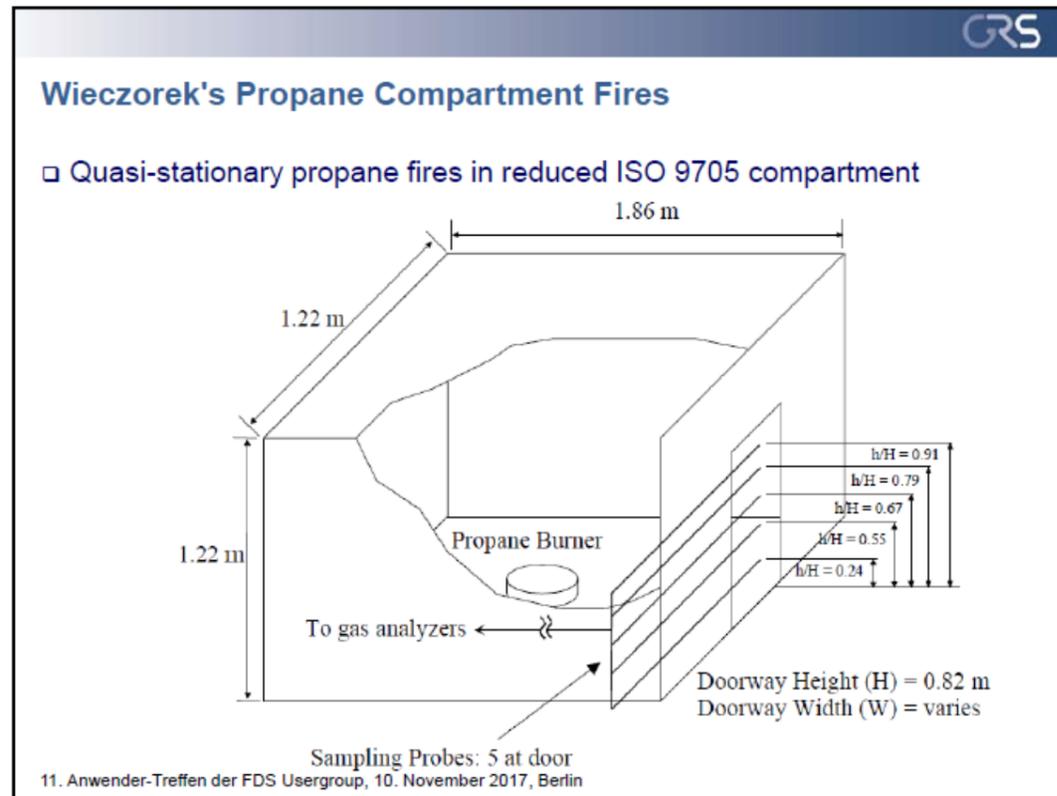
HRR fuel-controlled: $\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot X \cdot H_u$

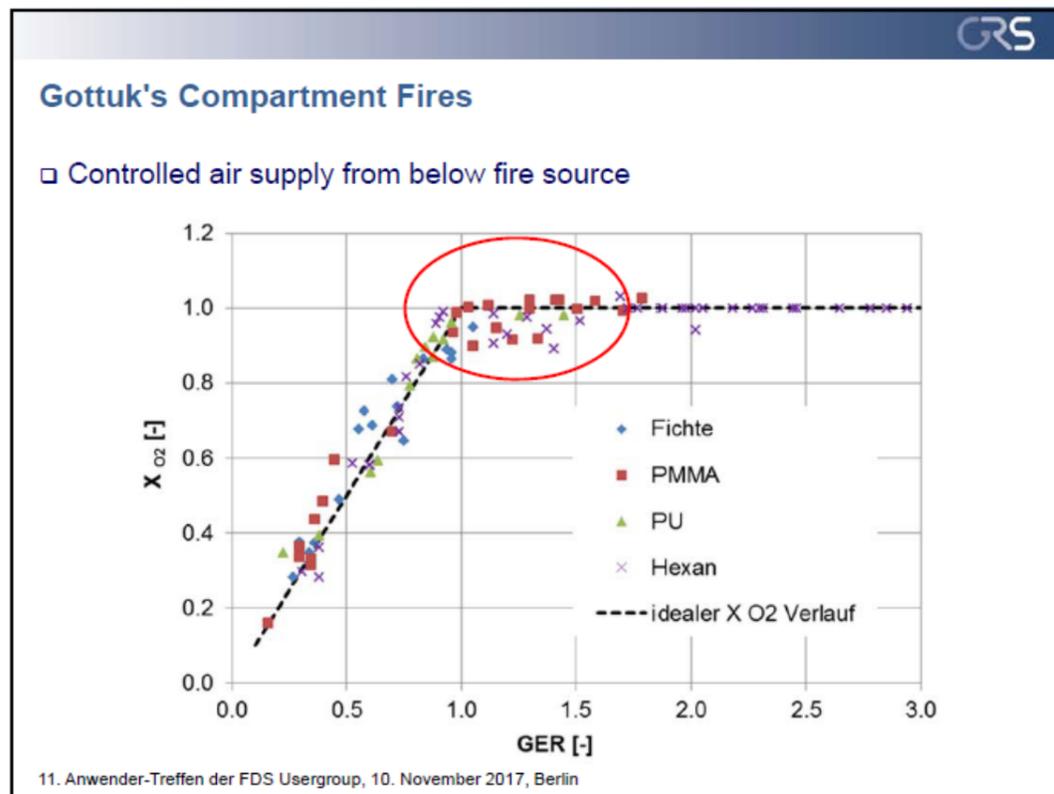
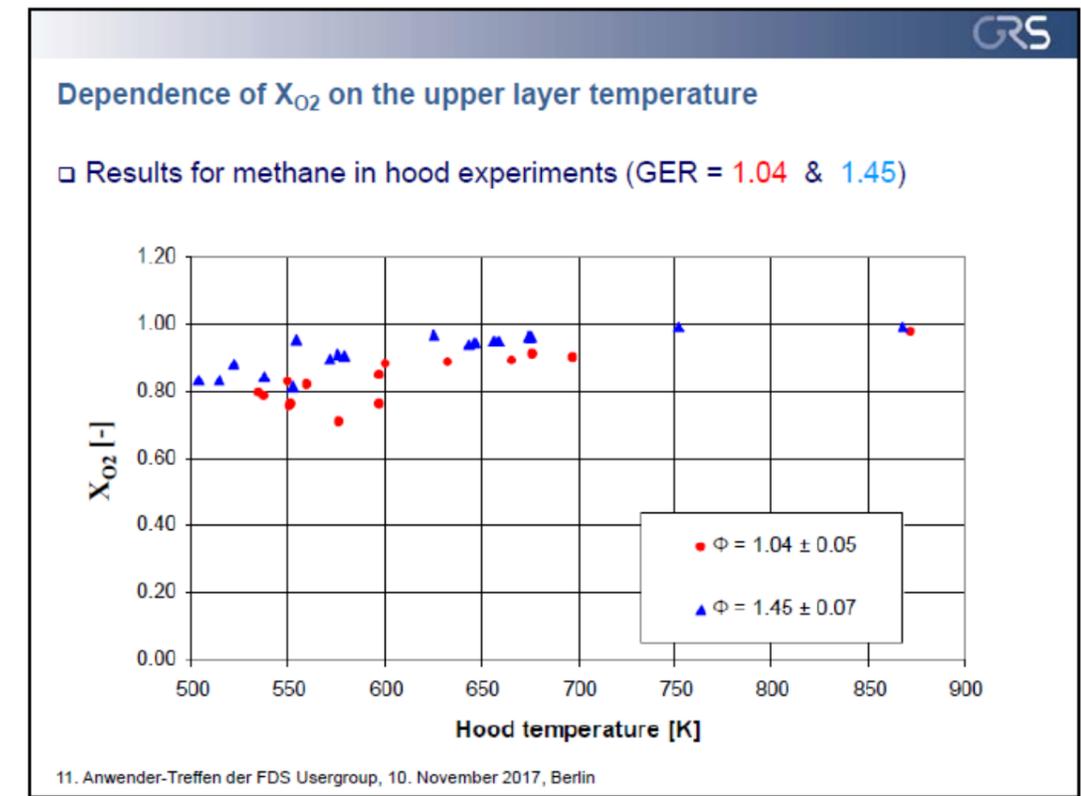
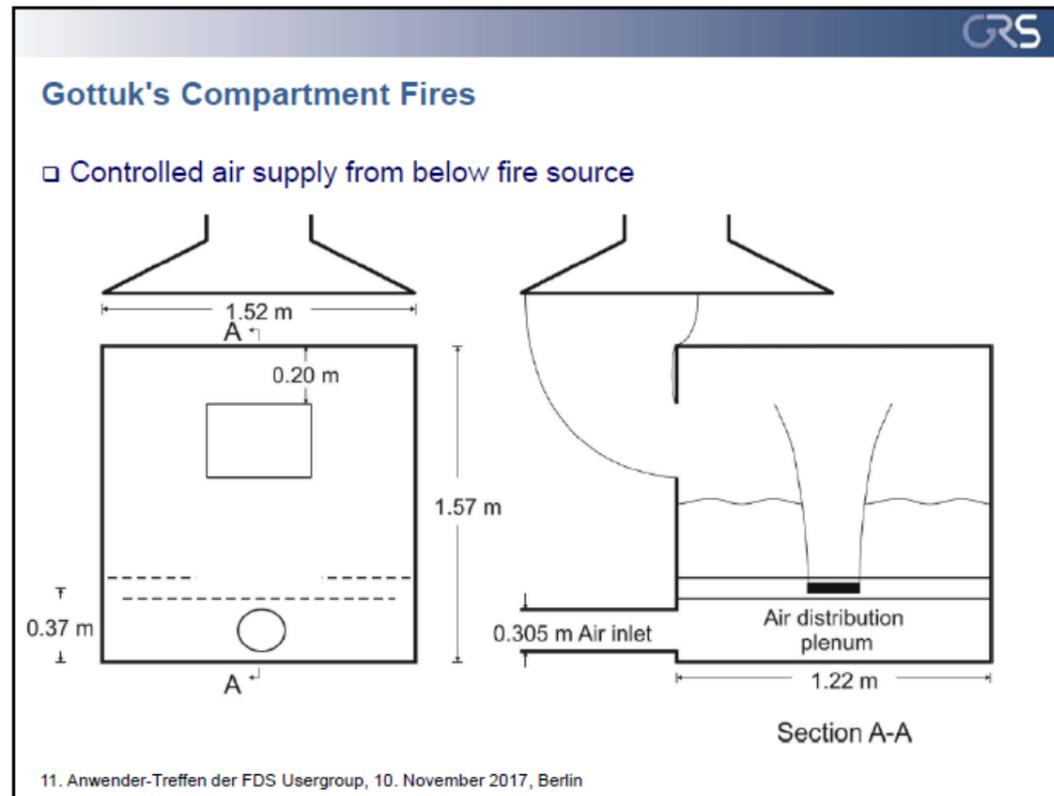
HRR ventilation-controlled: $\dot{Q} = \dot{m}_L \cdot X_{O_2} \cdot E_L = \dot{m}_{O_2} \cdot X_{O_2} \cdot E_{O_2}$

Not focussed in research yet dependent on ventilation

Semi-universal !
E_L = 3 MJ/kg_{air},
E_{O₂} = 13.1 MJ/kg_{O₂}

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin





Max. HRR in ventilation-controlled compartment fires

Kawagoe equation for air mass-flow through vertical vents:

$$\dot{m}_L \approx 0.52 \cdot A_w \sqrt{h_w} \quad \text{in kg/s}$$

Example: Door: $A_w = 2 \text{ m}^2$, $h_w = 2 \text{ m}$

$$\dot{m}_L \approx 0.52 \cdot 2\sqrt{2} = 1.47 \text{ kg/s}$$

Max. HRR in compartment for ventilation-controlled fire with vertical vents:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{max} &= X_{O_2} \cdot E_L \cdot \dot{m}_L \approx X_{O_2} \cdot E_L \cdot 0.52 \cdot A_w \sqrt{h_w} \quad \text{in MW} \\ &\approx 0.85 \cdot 3010 \cdot 0.52 \cdot A_w \sqrt{h_w} = 1.331 \cdot A_w \sqrt{h_w} \end{aligned}$$

Nearly fuel-independent max. HRR!

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

GRS

Max. HRR in ventilation-controlled compartment fires

- Max. HRR in compartment $\dot{Q}_{max} \approx 1.331 \cdot A_w \sqrt{h_w}$ in MW
- Cf. EC 1, Part 1-2, National Annex, Sect. BB.4

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

$$\dot{Q}_{max,v,k} = \frac{0,52}{\chi} \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{in MW} = 0.1 \cdot 0.8 \cdot 17.3 \cdot A_w \sqrt{h_w} \quad \text{(BB.6)}$$

Dabei ist

- A_w die Fläche der Ventilationsöffnungen in m²; **0.1 safes physically misleading eq.**
- 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; **In der Regel?**
- χ die Verbrennungseffektivität; im Hochbau darf für typische Mischbrandlasten pauschal $\chi = 0,8$ angenommen werden, ansonsten siehe z. B. [4].
No "ansonsten" - X does not influence HRR_{vc}

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

GRS

Sample application of EC 1-1-2 National Annex Sect. BB.4

- Fire impact assessed by equivalent fire duration (c.f. DIN 18230-1, DIN SPEC 18230-4)
- Reference concrete slab, temperature in 35 mm depth
- Scenario gives $t_{\delta} = 46$ min according to DIN 18230-1 (HRRPUA = 75 kW/m² equals DIN 18230-1 standard case assumptions)

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

GRS

Sample application of EC 1-1-2 National Annex Sect. BB.4

- 300 m² squared compartment, 6 m high, normal concrete
- 1 door: $h_w = 3.00$ m, $w_w = 3.13$ m
- Max. HRR in compartment for *ventilation-controlled* fire (eq. BB.6)
 $\dot{Q}_{max} = 1.384 \cdot A_w \sqrt{h_w} = 22.5$ MW
- Fire load: $Q = 104\ 625$ MJ
- Design fire (charact.)

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup,

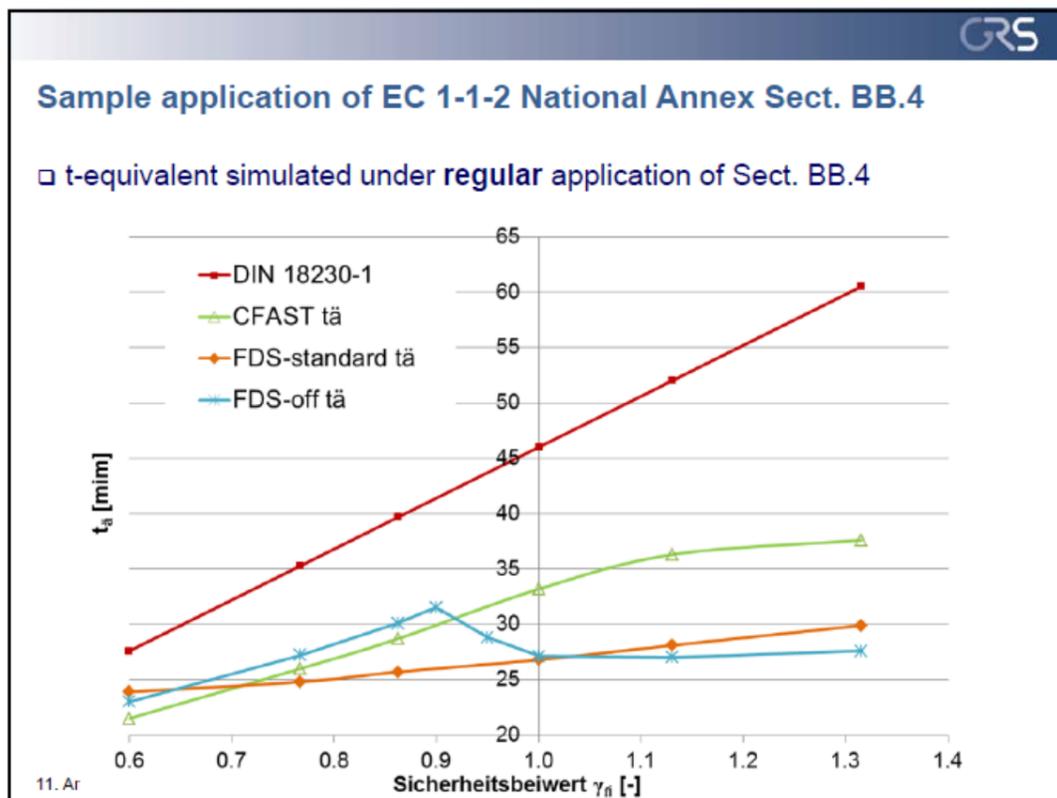
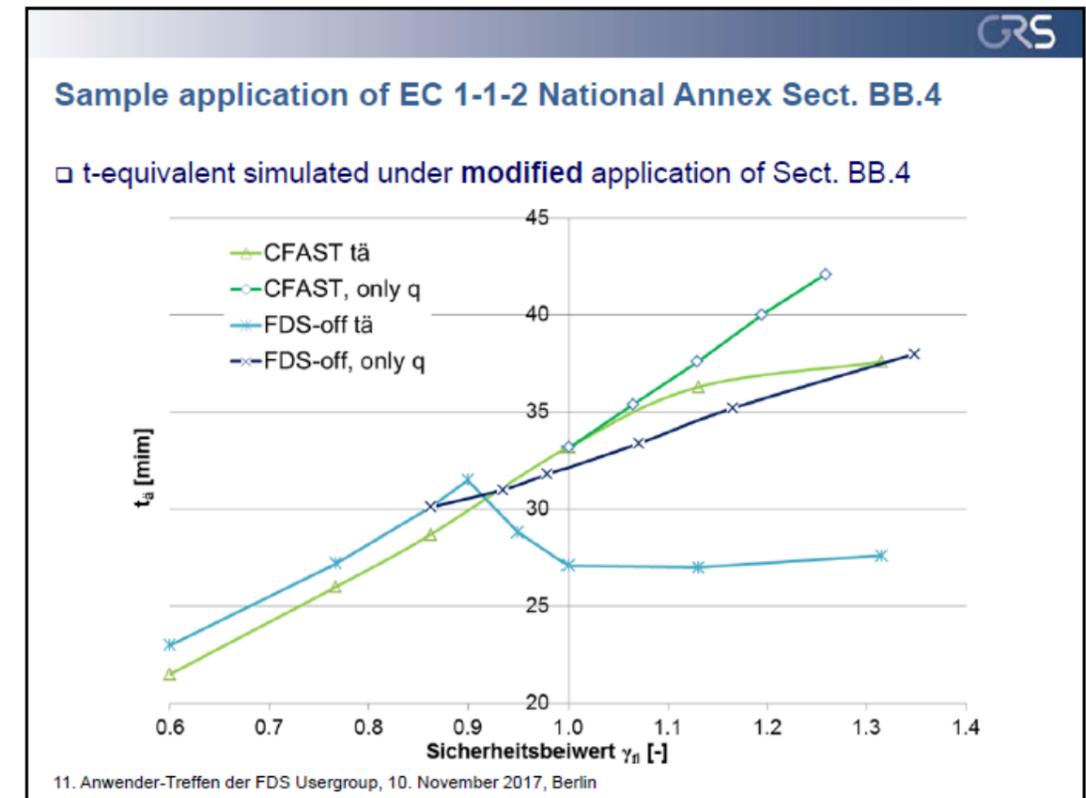
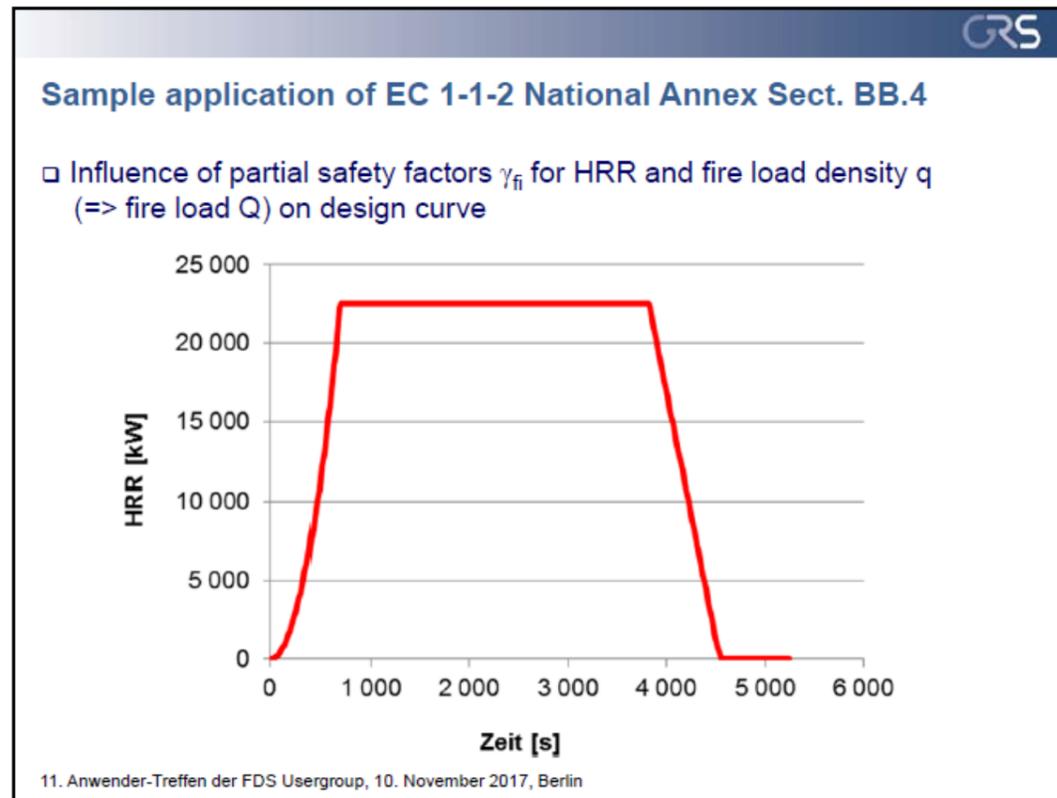
GRS

Sample application of EC 1-1-2 National Annex Sect. BB.4

- Partial safety factor γ_{fi} for HRR and fire load density q

$p_{f,\beta}$	β_{fi}
0,5	0
0,401	0,25
0,309	0,50
0,227	0,75
0,159	1,00
0,106	1,25
0,067	1,50
0,040	1,75
0,0228	2,00
0,0122	2,25
0,00621	2,50
0,00298	2,75
0,00135	3,00
0,000578	3,25
0,000233	3,50

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin



Conclusions

- Still some uncertainty about max. HRR in fully developed compartment fires
- Fire simulation tools show considerably different results for fires with GER = 1
- A formal correct application of Sect. BB.4 of EC 1-1-2 National Annex will underestimate fire effects according to our study
 - for $\gamma_{fi} > 1$ using CFAST
 - for $\gamma_{fi} > 0.6$ (grid dependent) using FDS „default“
 - for $\gamma_{fi} > 0.9$ (grid dependent) using FDS „suppression – off“
- \Rightarrow user must check for and avoid under-ventilated fires!
- \Rightarrow put partial safety factor on fire load density $q \Rightarrow$ fire duration!
- Eq. BB.6 needs r_{air} as additional factor for physical correctness and applicability

11. Anwender-Treffen der FDS Usergroup, 10. November 2017, Berlin

Benjamin Schröder:

Geschlossene vs. Offene Großgarage – Leistungsbezogene Untersuchung zur Schutzzielerreichung

Abstract:

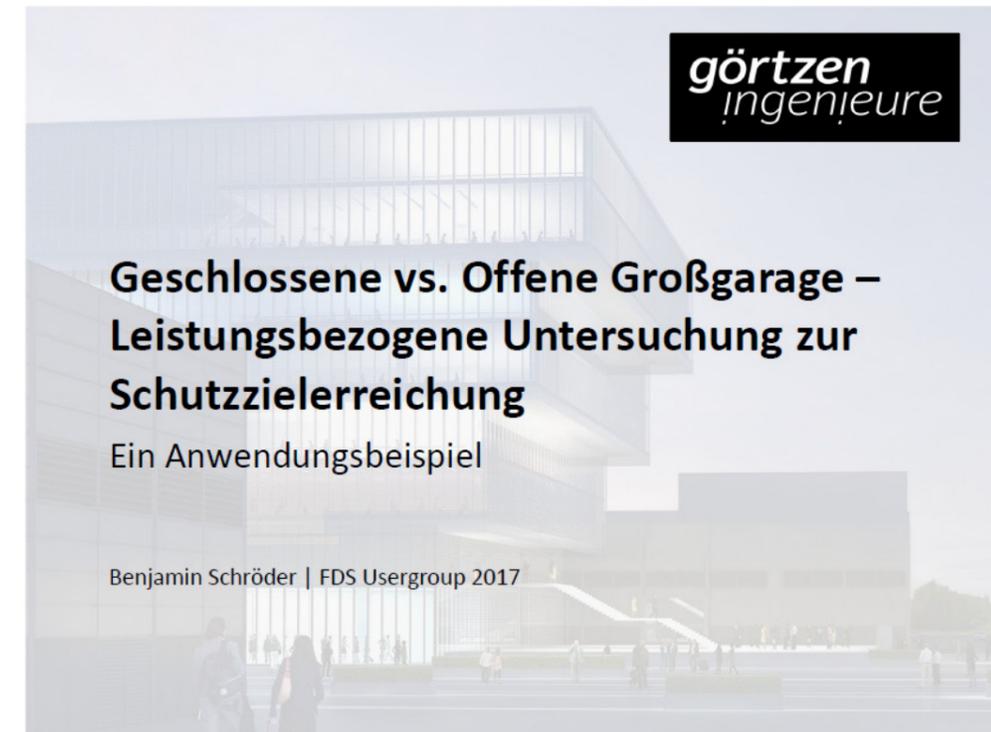
Die Muster-Garagenverordnung (M-GarVO) beinhaltet ein abgestuftes Anforderungsniveau für den bau-lichen und anlagentechnischen Brandschutz, welches u.a. aus der Anordnung und Beschaffenheit der Umfassungswände abgeleitet wird. Demnach müssen offene Garagen Öffnungen in einer Größe von ins-gesamt mindestens einem Drittel der Gesamtfläche der Umfassungswände haben. Dabei dürfen zwei sich gegenüberliegende Umfassungswände mit den ins Freie führenden Öffnungen nicht mehr als 70 m voneinander entfernt sein. Andernfalls liegt eine geschlossene Garage vor.

Im zuletzt genannten Fall gelten erhöhte Anforderungen wie z.B. die Ausbildung von Rauchabschnitten. So muss die Nutzfläche einer oberirdischen, geschlossenen Garage in Rauchabschnitte von maximal 5.000 m² ohne bzw. 10.000 m² mit automatischer Löschanlage unterteilt werden. Eine solche Kompart-mentalierung ist aus Betreibersicht oftmals unerwünscht und führt außerdem zu Erschwernissen in anderen Planungsdisziplinen wie z.B. der Lüftungsplanung.

Der Beitrag stellt ein Anwendungsbeispiel dar, bei dem der Verzicht auf die Unterteilung einer oberir-dischen, geschlossenen Garage in Rauchabschnitte begründet werden soll. Im Rahmen einer kompara-tiven Analyse wird die geplante Großgarage (Ausdehnung ca. 220 m x 120 m) mit einem modifizierten, fiktiven Entwurf gegenübergestellt, der die Anforderungen an eine offene Garage im Sinne der M-GarVO erfüllt (Abstand von zwei Umfassungswänden max. 70 m). Auf Grundlage dieser Gegenüberstellung soll die Erreichung der baurechtlichen Schutzziele verglichen werden.

Als methodischer Rahmen dient die leistungsbezogene Nachweisführung entsprechend DIN 18009-1. Bei der Festlegung der 12 Brandszenarien wurden neben den erforderlichen Variationen an der Gebäudeku-batur unterschiedliche anlagentechnische Maßnahmen und damit einhergehend verschiedene Brand-orte und Brandverläufe berücksichtigt. Des Weiteren wurden der Einfluss zwei verschiedener Decken-systeme und Variationen im Hinblick auf die Chronologie anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen betrachtet.

Für die beschriebene Untersuchung wurde der Fire Dynamics Simulator in der Version 6.5.3 mit einem MPI-Parallelisierungsansatz verwendet. Neben der Darlegung der oben beschriebenen Nachweisstrategie und der Thematisierung handwerklicher Themen soll der Beitrag insbesondere auch auf weitere inhaltliche Fragestellungen eingehen, die im Zuge der Untersuchungen z.B. mit dem Prüfenieur für Brandschutz erörtert wurden.



Inhalt

- § Anlass & Fragestellung
-  Brandszenarien
-  Berechnung
-  Analyse
- ?! Fazit & Diskussion

Anlass & Fragestellung

- Ersatzneubau einer Verkaufsstätte bei München
- Grundfläche ca. 30.000 m²
- 2. OG: Möbelausstellung, Restaurant, Verwaltung
- 1. OG: Abhollager, Markthalle und Logistik
- EG: Großgarage mit 1.850 Stellplätzen

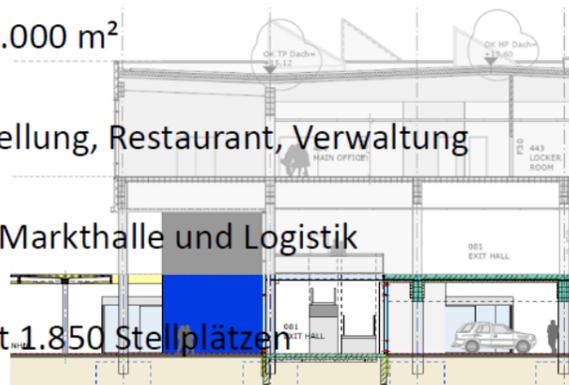


3

görtzen
Ingenieure

Anlass & Fragestellung

- Ersatzneubau einer Verkaufsstätte bei München
- Grundfläche ca. 30.000 m²
- 2. OG: Möbelausstellung, Restaurant, Verwaltung
- 1. OG: Abhollager, Markthalle und Logistik
- EG: Großgarage mit 1.850 Stellplätzen



4

görtzen
Ingenieure

Anlass & Fragestellung

- Garagen- und Stellplatzverordnung (GaStellV)
 - Großgarage ($A \gg 1.000 \text{ m}^2$)
 - Oberirdisch ($h_{\text{Mittel}} < 1,5 \text{ m}$ unterhalb GOF)
 - Geschlossen, weil ...
- Offene (Groß-) Garagen haben...
 - unmittelbar ins Freie führende unverschließbare Öffnungen in einer Größe von **insgesamt mindestens einem Drittel** der Gesamtfläche der Umfassungswände.
 - diese Öffnungen mindestens in gegenüberliegenden Umfassungswänden, die nicht mehr als **70 m voneinander entfernt** sind

6

görtzen
Ingenieure

Anlass & Fragestellung

- Garagen- und Stellplatzverordnung (GaStellV)
 - Großgarage ($A \gg 1.000 \text{ m}^2$)
 - Oberirdisch ($h_{\text{Mittel}} < 1,5 \text{ m}$ unterhalb GOF)
 - Geschlossen, weil ...
- Offene (Groß-) Garagen haben...
 - unmittelbar ins Freie führende unverschießbare Öffnungen in einer Größe von **insgesamt mindestens einem Drittel** der Gesamtfläche der Umfassungswände. 
 - diese Öffnungen mindestens in gegenüberliegenden Umfassungswänden, die nicht mehr als **70 m voneinander entfernt** sind

7

görtzen
Ingenieure

Anlass & Fragestellung

- Geplante geschlossene Großgarage: Verzicht auf Ausbildung von Rauchabschnitten zu max. 10.000 m^2 mit Sprinkleranlage



9

görtzen
Ingenieure

Anlass & Fragestellung

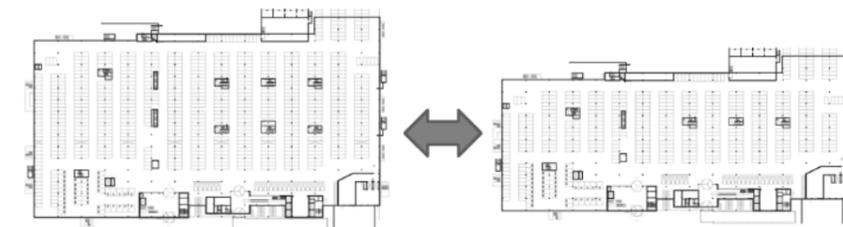
- Garagen- und Stellplatzverordnung (GaStellV)
 - Großgarage ($A \gg 1.000 \text{ m}^2$)
 - Oberirdisch ($h_{\text{Mittel}} < 1,5 \text{ m}$ unterhalb GOF)
 - Geschlossen, weil ...
- Offene (Groß-) Garagen haben...
 - unmittelbar ins Freie führende unverschießbare Öffnungen in einer Größe von **insgesamt mindestens einem Drittel** der Gesamtfläche der Umfassungswände. 
 - diese Öffnungen mindestens in gegenüberliegenden Umfassungswänden, die nicht mehr als **70 m voneinander entfernt** sind 

8

görtzen
Ingenieure

Anlass & Fragestellung

- Nachweisweg: Vergleichende Untersuchung mit fiktiver, offener Großgarage aus Entwurfsmodifikation ohne Sprinkleranlage



10

görtzen
Ingenieure

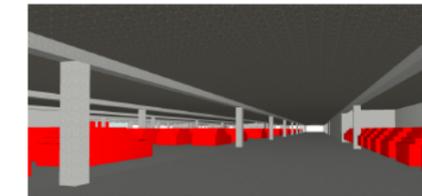
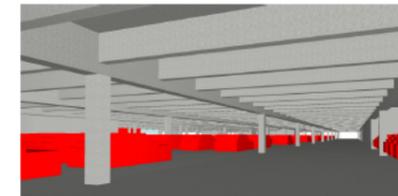
Anlass & Fragestellung

- Schutzzielbetrachtung
 - Wirksame Löscharbeiten
 - (Rettung von Menschen)
- Funktionale Anforderungen
 - Einsehbarkeit für Löscharbeiten und Fremdrettung
 - Begehbarkeit während des Innenangriffs
- Leistungskriterien
 - Optische Dichte [0.2 1/m]
 - Temperatur [50 °C]

11

Brandszenarien – Deckensysteme

- Haupt- und Nebenunterzüge offen
- Abgehängte Decke unterhalb der Nebenunterzüge



13

Brandszenarien

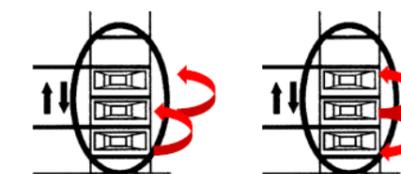
- 2 Entwürfe/Brandverläufe
- 2 Deckensysteme
- 3 Brandorte

ID	Garage	Deckensystem	Brandort	Brandverlauf
1	Offen	Ohne Unterdecke	Links	3 PKW
2	Offen	Unterdecke	Mitte	
3	Offen	Unterdecke	Rechts	
4	Offen	Mit Unterdecke	Links	Bemessungsbrand 1
5	Offen	Unterdecke	Mitte	
6	Offen	Unterdecke	Rechts	
7	Planung	Ohne Unterdecke	Links	1 PKW
8	Planung	Unterdecke	Mitte	
9	Planung	Unterdecke	Rechts	
10	Planung	Mit Unterdecke	Links	Bemessungsbrand 2
11	Planung	Unterdecke	Mitte	
12	Planung	Unterdecke	Rechts	

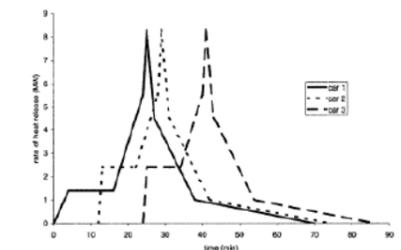
12

Brandszenarien – Brandverläufe

- Zahlreiche Brandversuche
 - Steinert (D) 2000
 - Joyeux (L) 2002
 - BRE (GB) 2010
- Ohne Sprinklerung: Ausbreitung auf bis zu 3 PKW
- Mit Sprinklerung: auf 1 PKW begrenzt

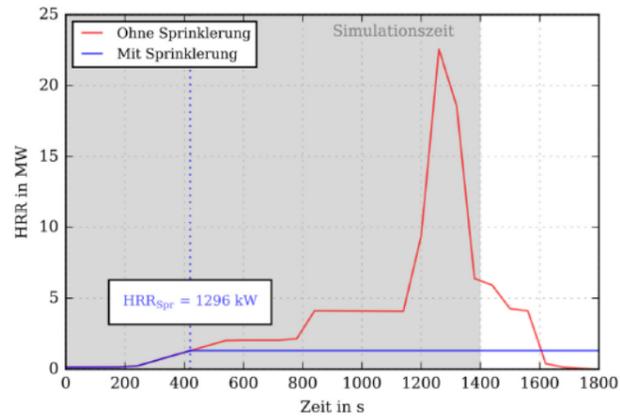


Bilder: Joyeux



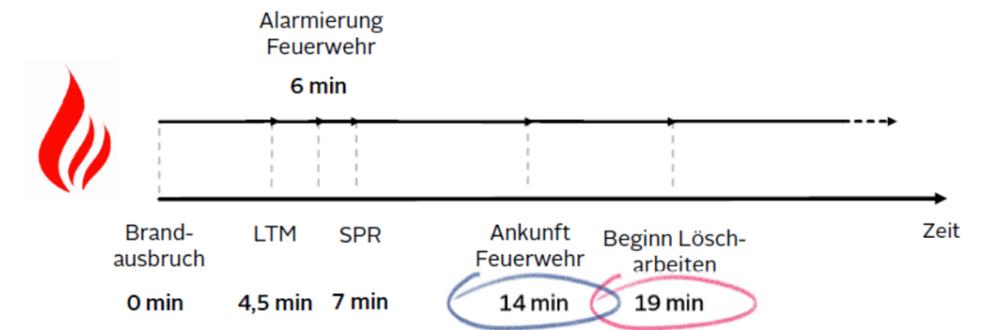
14

Brandszenarien – Brandverläufe



15

Analyse



17

Berechnung

- FDS 6.5.3 Linux 64 bit
- 32 bzw. 72 MPI Prozesse
- $dx = dy = dz = 0,15\text{ m}$
- 24 Mio. bzw. 38 Mio. Zellen
- 2 bzw. 3 JURECA-Nodes
- Simulationszeit 1.400 s
- Rechenzeit ca. 7-10 d



Bild: FZ Jülich

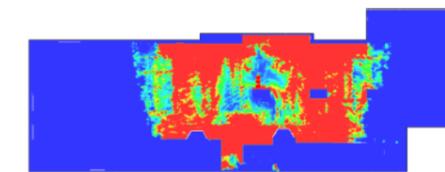
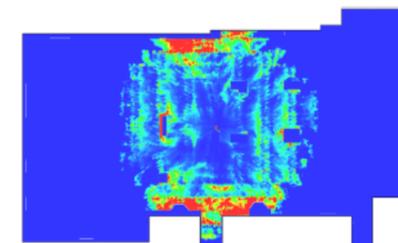
16

Analyse

Geplante Garage
ohne Unterdecke

Offene Garage
ohne Unterdecke

t = 14 min
Ankunft
Feuerwehr



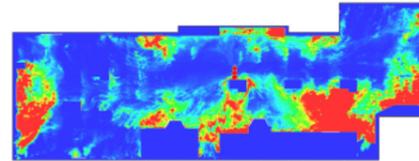
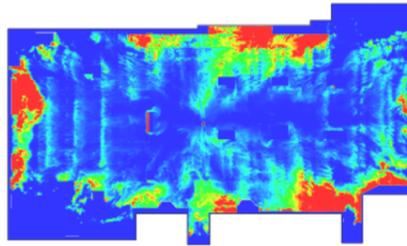
0.0 0.05 0.10 0.15 0.20
Optische Dichte in 1/m

17

Analyse

Geplante Garage
mit UnterdeckeOffene Garage
mit Unterdecke

t = 14 min

Ankunft
Feuerwehr

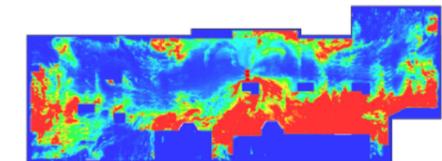
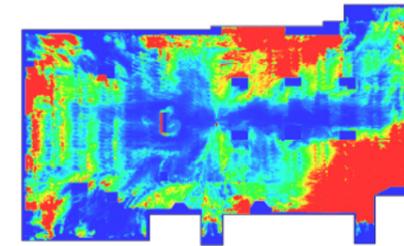
0.0 0.05 0.10 0.15 0.20
Optische Dichte in 1/m

görtzen
Ingenieure

Analyse

Geplante Garage
mit UnterdeckeOffene Garage
mit Unterdecke

t = 19 min

Beginn
Löscharbeiten

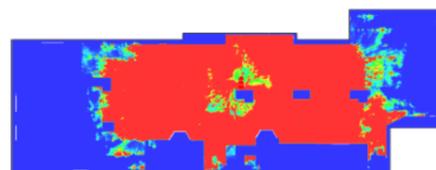
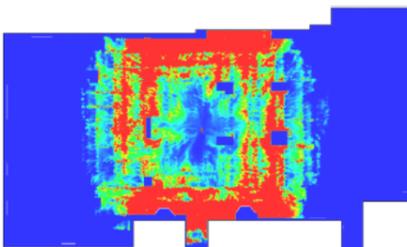
0.0 0.05 0.10 0.15 0.20
Optische Dichte in 1/m

görtzen
Ingenieure

Analyse

Geplante Garage
ohne UnterdeckeOffene Garage
ohne Unterdecke

t = 19 min

Beginn
Löscharbeiten

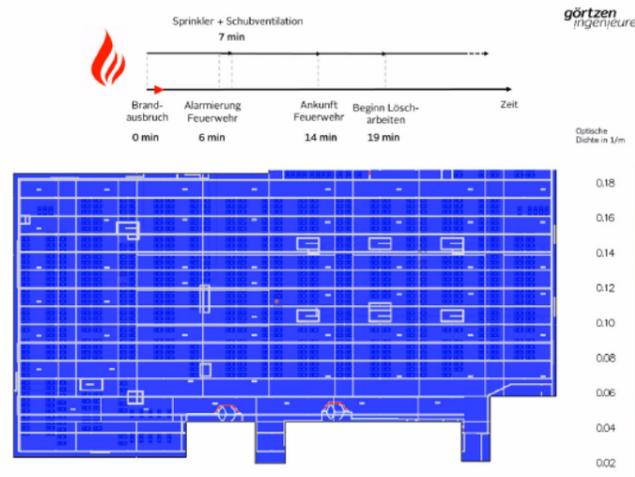
0.0 0.05 0.10 0.15 0.20
Optische Dichte in 1/m

görtzen
Ingenieure

Zusatzuntersuchung – Rauchableitung

- Unterstützung des Löschangriffs der Feuerwehr
- Maschinelle Abluftanlage i.V.m. Löschanlage
- 55 Schubventilatoren, HVAC-Submodell
- Nennförderstrom 2,36 m³/s
- Reihenweise, zeitlich versetzte Aktivierung
- Untersuchung unterschiedlicher Auslösezeitpunkte
 - Automatisch bei Auslösung Sprinkleranlage
 - Manuell nach Lagebeurteilung Feuerwehr

Zusatzuntersuchung – Rauchableitung



23

görtzen
Ingenieure

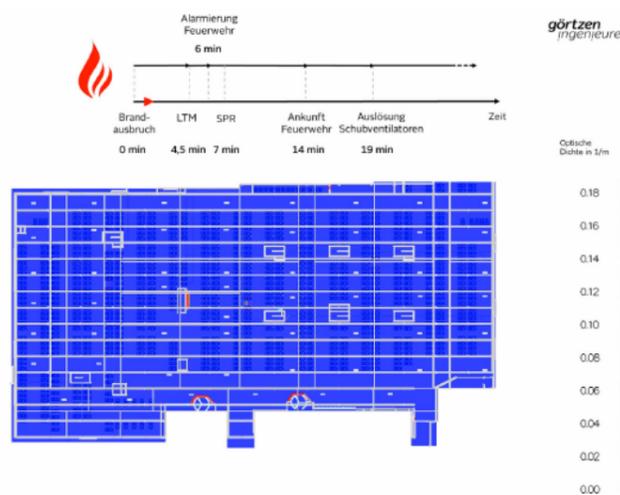
Fazit

- Sichtbedingungen zwischen geplanter und offener Garage mindestens gleichwertig
- Temperaturbedingungen unproblematisch
- Schutzzieleerreichung bzgl. wirksamer Löscharbeiten identisch bzw. z.T. höherwertig
- Sachschutzaspekte bleiben unberührt
- Erheblicher Einfluss des Deckensystems

25

görtzen
Ingenieure

Zusatzuntersuchung – Rauchableitung



24

görtzen
Ingenieure

Diskussion

- Annahmen zu Brandverläufen
- Multi MESH Simulationen
- Zusatzuntersuchungen Rauchableitung
- Ausfallbetrachtung Sprinkleranlage
- Validität Modellbildung Schubventilatoren
- Konsequenzen frühzeitiger/automatischer Auslösung

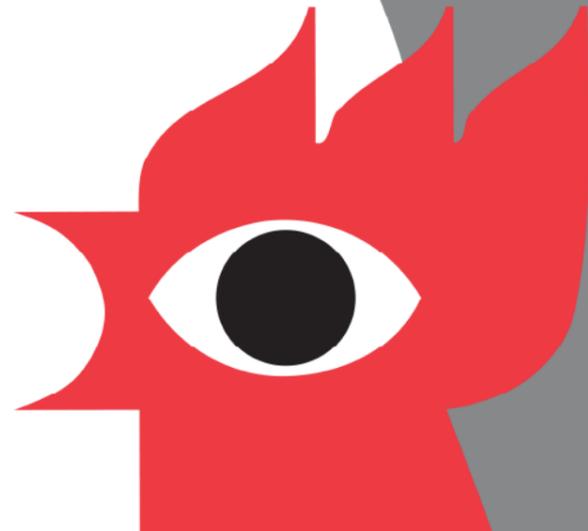
26

görtzen
Ingenieure

**Marion Meinert:****Simulation strömungstechnischer Effekte in druckbelüfteten Treppenträumen****Abstract:**

Die Funktion druckbelüfteter Treppenträume ist von vielen strömungsmechanischen Effekten abhängig, die mit unterschiedlicher Genauigkeit mit Hilfe von empirisch-analytischen Gleichungen oder CFD Methoden abgebildet werden können.

Der Einsatz des Fire Dynamics Simulators im Vergleich mit Multizonenmodellen oder RANS-Modellen (OpenFOAM) wird anhand verschiedener Beispiele beurteilt. Grenzen und Möglichkeiten der einzelnen Methoden werden herausgestellt.



DBI

ANALYSIS OF FLUID DYNAMIC EFFECTS IN PRESSURIZED STAIRWELLS WITH FDS

Marion Meinert



Marion Meinert

Civil Engineer - Muenster University of Applied Sciences
 Dr. - Ing. & M.Sc. - Bergische Universität Wuppertal



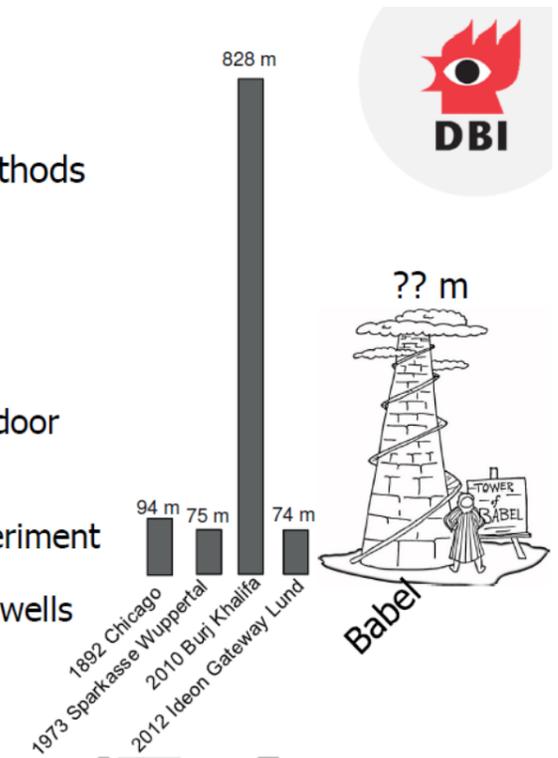
Dissertation: Fluid Dynamic Analysis of Pressurized Stairwells

Supervisors: Prof. Wolfram Klingsch – Bergische Universität Wuppertal
 Associate Prof. Bjarne Husted – Lund University

Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut
 mmm@dbi-net.dk

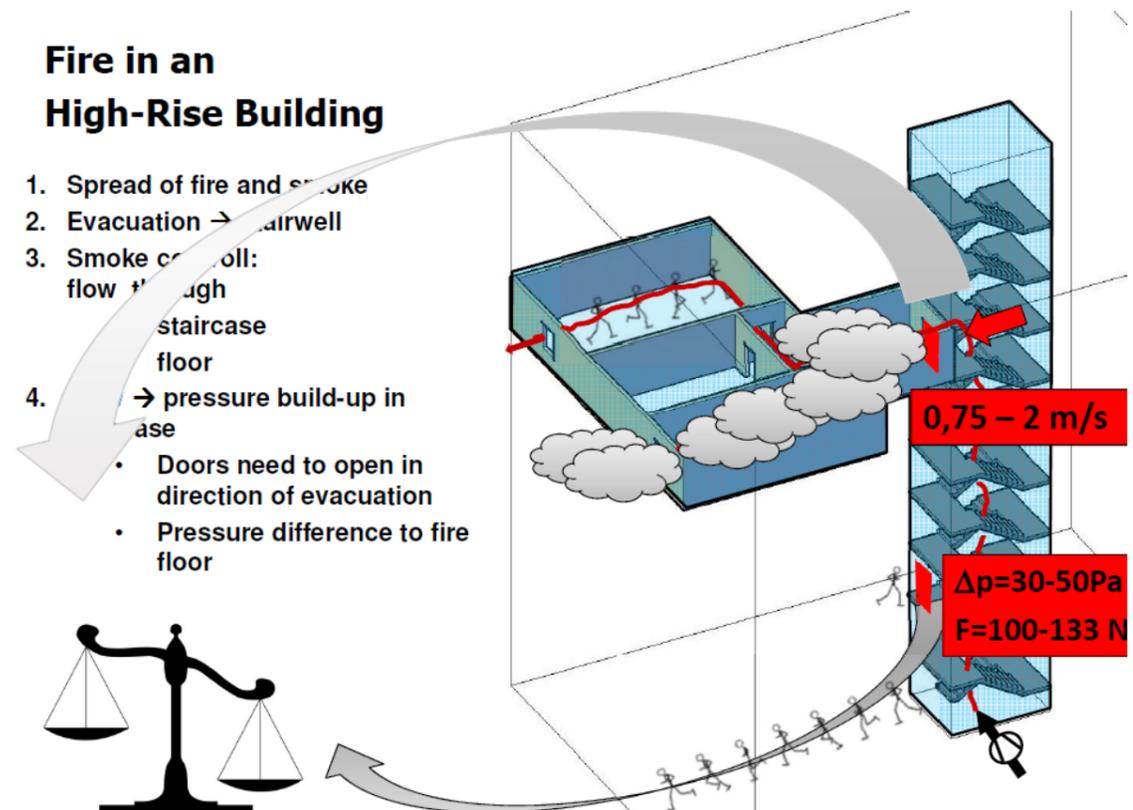
Outline

- problem & existing design methods
- simulation of:
 - flow distribution via floors
 - pressure loss of one single door
 - pressure losses in stairwells
FDS vs. OpenFoam vs. Experiment
 - flow distribution within stairwells
- further research



Fire in an High-Rise Building

1. Spread of fire and smoke
2. Evacuation → stairwell
3. Smoke control: flow through staircase floor
4. → pressure build-up in case
 - Doors need to open in direction of evacuation
 - Pressure difference to fire floor



In 9 out of 10 worldwide examined fires in High-rise Buildings, there was smoke in the Stairwell despite the work of the pressurization system
[Cowlard et al, 2013]

2010 CFD-Sim. ...
Quelle: Intech GmbH ...
Therefore, for elements in series as long as ρ and μ are constant ...
of influences ...
Given by:
 $w_2 = (\rho/\mu) K_2 (P_1 - P_2)$
 $w_2 = (\rho/\mu) (K_1 + K_2) (P_1 - P_2)$ where $K_w = K_1 + K_2$
 $K_w = \sum K_i$

DESIGN METHODS

Bernoulli Equation 1D
 $p_1 + \frac{1}{2} u_1^2 \rho_1 + h_1 \rho_1 g = p_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \rho_2 + h_2 \rho_2 g + \Delta p_{loss 1-2}$

Handbook of Smoke Control
Multizone Software
CONTAM
Multizone Airflow and Contaminant Transport Analysis Software

Computational Fluid Dynamics 3D
Fire Dynamics Simulator (FDS)

DESIGN METHODS

Bernoulli Equation 1D
 $p_1 + \frac{1}{2} u_1^2 \rho_1 + h_1 \rho_1 g = p_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \rho_2 + h_2 \rho_2 g + \Delta p_{loss 1-2}$

PRESSURE LOSS COEFFICIENTS
 $C = \xi = K = \frac{\Delta p_{loss 1-2}}{\frac{\rho}{2} \cdot u^2} = \frac{\Delta p_{loss 1-2}}{\frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2}$

Computational Fluid Dynamics 3D
Fire Dynamics Simulator (FDS)

LEAKAGES

DESIGN METHODS

CALCULATION PROCEDURE

Bernoulli Equation 1D
 $p_1 + \frac{1}{2} u_1^2 \rho_1 + h_1 \rho_1 g = p_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \rho_2 + h_2 \rho_2 g$

PRESSURE LOSS COEFFICIENTS
 $C = \xi = K = \frac{\Delta p_{loss 1-2}}{\frac{\rho}{2} \cdot u^2} = \frac{\Delta p_{loss 1-2}}{\frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2}$

ELECTRICAL CIRCUIT = **FLOW DISTRIBUTION**

ELECTRICAL RESISTANCE

PARALLEL **SERIES**

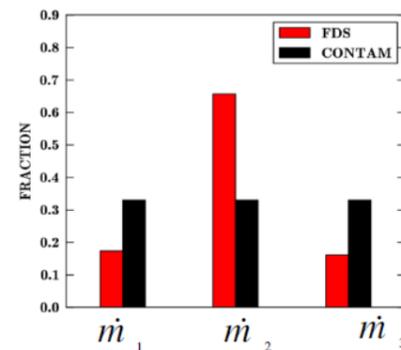
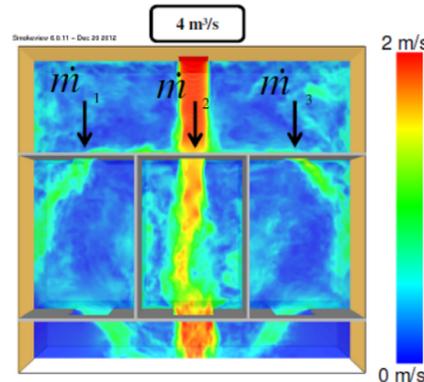
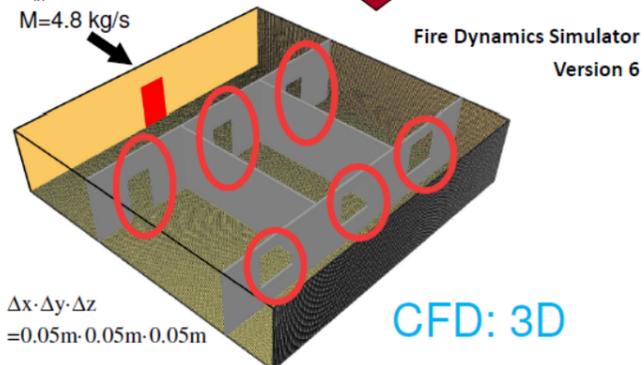
LIMITATIONS

CALCULATION PROCEDURE

Bernoulli Equation 1D



$V_{in} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$
 $M = 4.8 \text{ kg/s}$



LIMITATION

CALCULATION OF ΔP VIA FLOW ELEMENTS

Bernoulli Equation 1D

$$p_1 + \frac{1}{2} u_1^2 \rho_1 + h_1 \rho_1 g = p_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \rho_2 + h_2 \rho_2 g + \Delta p_{loss\ 1-2}$$

Pressure loss coefficient

$$C = \zeta = K = \frac{\Delta p_{loss\ 1-2}}{\frac{\rho}{2} \cdot u^2} = \frac{\Delta p_{loss\ 1-2}}{\frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2}$$

experimentally determined:

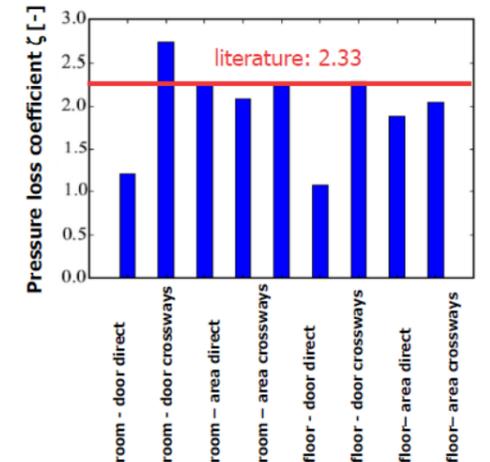
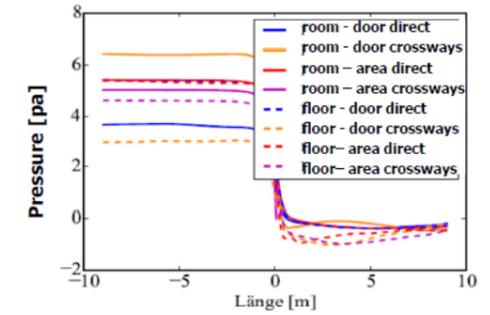
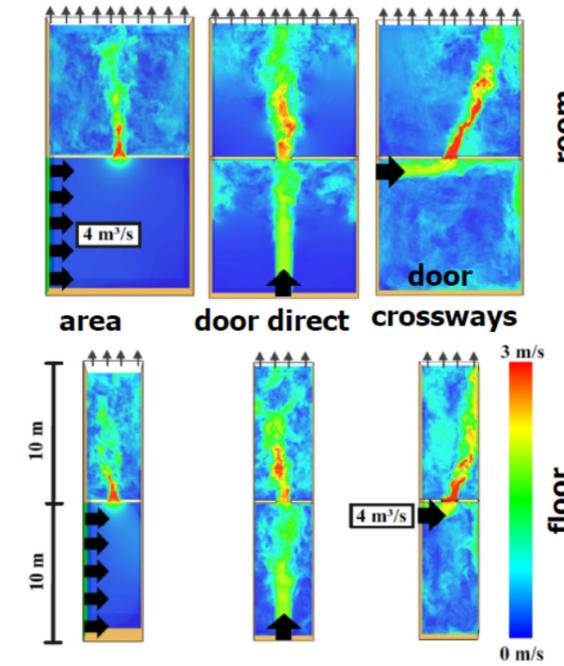
- Idelchik 1975/ 1989
- Recknagel
- VDI-Wärmeatlas

ELEMENT	R/D=	Pressure loss coefficient ζ		Abweichung	
		Recknagel	Idelchik		
BOW round 90°	0,54	0,9	1,19	-24%	
	1	0,33	0,21	57%	
	1,5	0,24	0,17	41%	
	2	0,19	0,15	27%	
KNEE	h/b=	0,25	2,1	1,24	69%
		0,5	1,7	1,21	40%
		1	1,2	1,15	4%
		2	0,6	1,07	-44%

- large variations in experimental determined and longtime used values
- C, K, ζ depends on inflow conditions

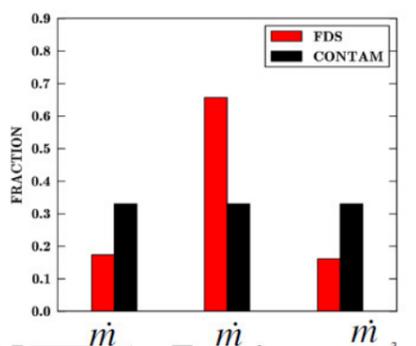
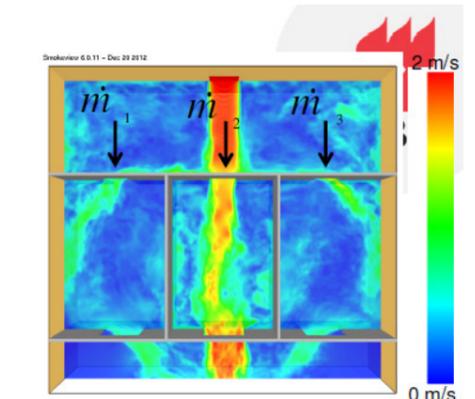
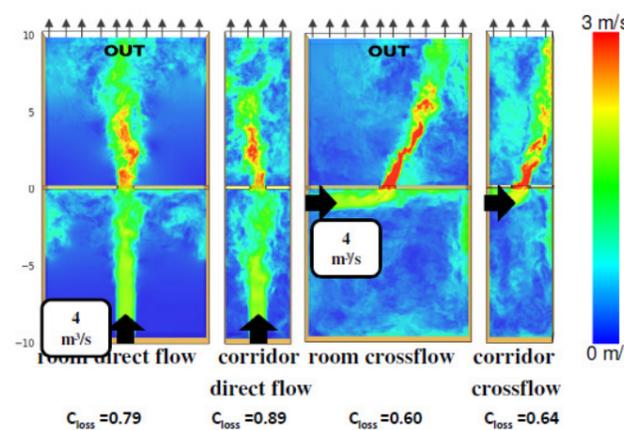
LIMITATION

CALCULATION OF ΔP VIA ONE DOOR



LIMITATIONS

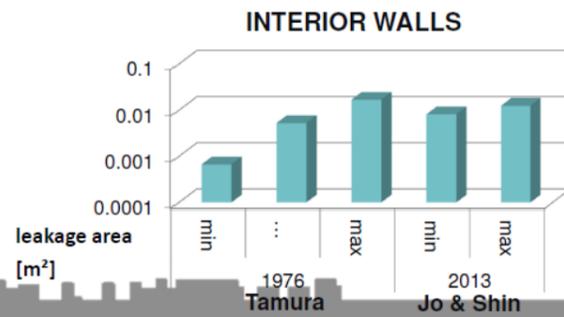
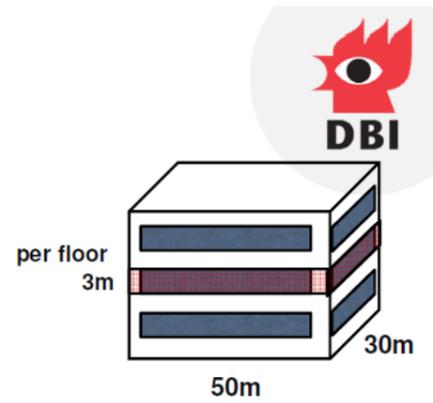
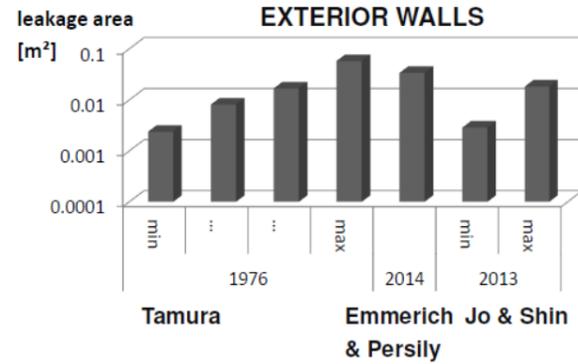
CALCULATION PROCEDURE



Δp_{DOOR} depends on flow direction
electrical circuit analogy depends on local flow phenomena

LIMITATIONS

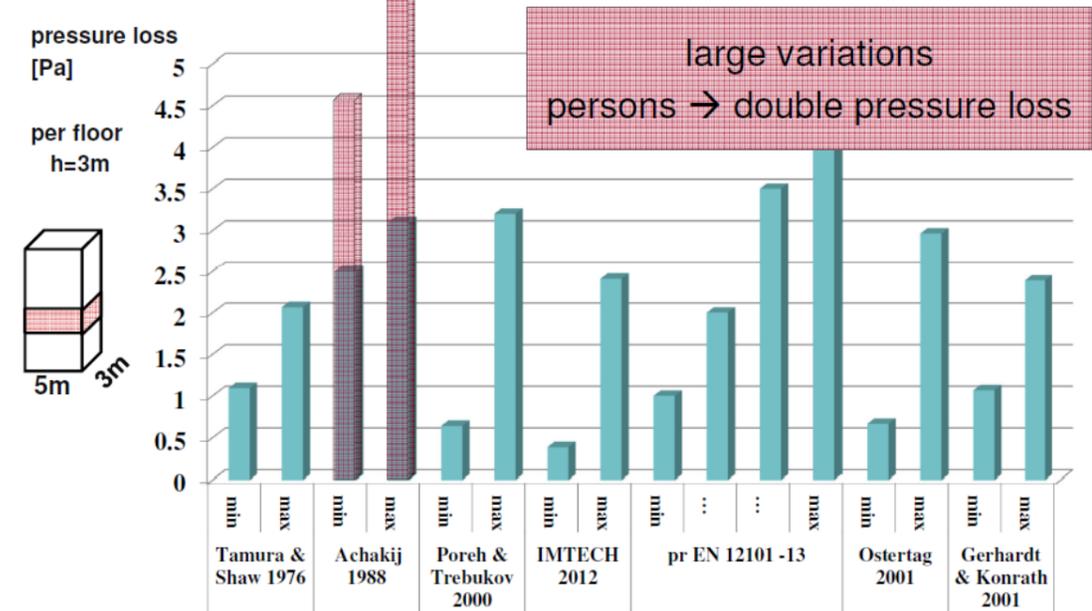
LEAKAGE ESTIMATION



large variations
planning ≠ construction site

LIMITATIONS

ESTIMATION OF PRESSURE LOSS IN STAIRWELL



LIMITATIONS

ESTIMATION OF PRESSURE LOSS IN STAIRWELL

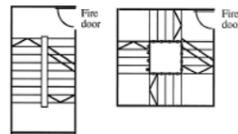
Pressure Drop Characteristics of Typical Stairshafts in High-Rise Buildings 1988

by G.Y. Achakji and G.T. Tamura 1 building full scale: H=30m

Resistance per floor
orifice area per floor

$$K = \frac{\Delta P_{F(z)}}{h_i \frac{\rho_i}{D_e} \frac{Q_{s+1}}{A_s}^2}$$

Wind effects on smoke motion in buildings
M. Poreh, S. Trebukov *Fire Safety Journal* 35 (2000)



$$P = \zeta \rho U_{st}^2 / 2,$$

Ostertag, D. Überdruckbelüftungsanlagen für Sicherheitstreppe in Hochhäusern, Fraunhofer IRB 2004.

$$\Delta p_{R, Gesch.} = \frac{\rho}{2} w_L^2 = \frac{\rho}{2} \frac{\dot{V}_L^2}{A_{eff}^2}$$



IMTECH:

Schalau, S.: Bachelors Thesis - Beuth University of Applied Sciences, Berlin, Germany, 2013.
Siemers, Magda-Lena. Bachelors Thesis - Hamburg University of Applied Sciences, Germany 2012.
"Experimentelle Bestimmung von Druck-verlusten in Sicherheitstreppe unter Berücksichtigung wesentlicher baulicher Merkmale"

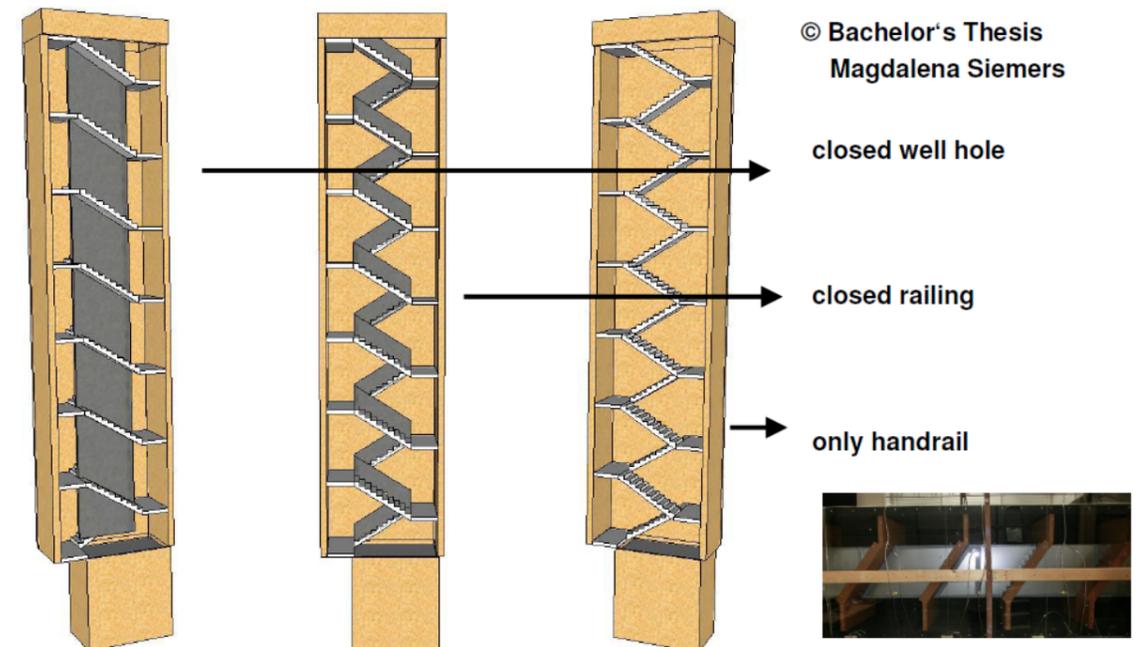


PRESSURE LOSS INSIDE STAIRWELL

EXPERIMENTS IMTECH

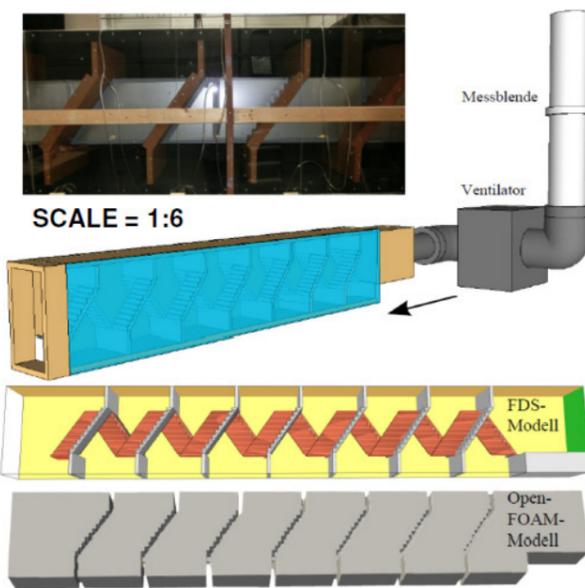
SCALE = 1:6

© Bachelor's Thesis
Magdalena Siemers



PRESSURE LOSS IN STAIRWELL

EXPERIMENTS IMTECH VS. SIMULATION

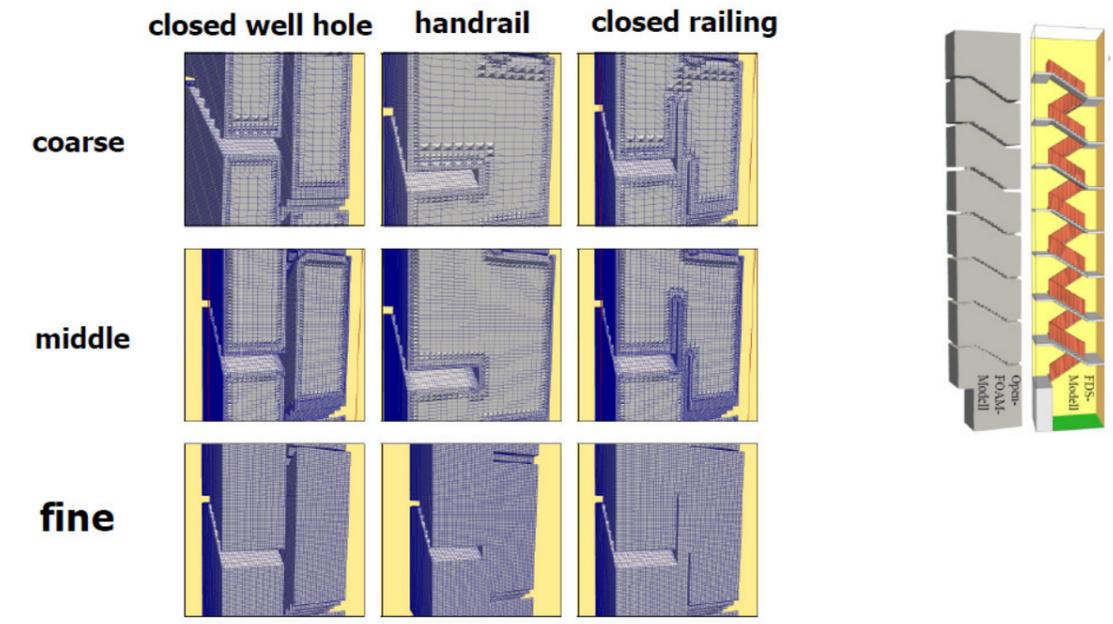


FDS	Gesamte Zellanzahl	$n_x \cdot n_y \cdot n_z$ $d_x \cdot d_y \cdot d_z$ [m]	Verhältnis Stufen- / Zell- breite	Stufen- / Zell- höhe
sehr fein	11.404.800	66 · 192 · 180 (parallel: 5 Meshes) 0,0075 m · 0,0047 m · 0,0062 m	10	5
fein	1.425.500	66 · 96 · 90 33 · 48 · 90	10	5
mittel	1.425.500	0,015 m · 0,0188 m · 0,0062 m	2 · 3	5
grob	212.800	0,03 m · 0,0188 m · 0,0124 m	2 · 3	2 · 5
sehr grob	712.800	0,015 m · 0,0367 m · 0,0124 m	3 · 2	2 · 3
lang	712.800	33 · 48 · 225 0,015 m · 0,0188 m · 0,0248 m	3 · 2	1 · 2

OpenFOAM	fein	mittel	grob
Brüstung	5-6 cells per step width		
geschl. Auge	5.192.784	3.845.650	1.040.751
Handlauf	5.387.704	40.603	848.126
Stufen- Zellbreite	5-6	10-11	5-6
Teilung blockMesh	(56 80 1000) (56 24 1000)	(28 40 500) (28 12 500)	(14 20 250) (14 6 250)

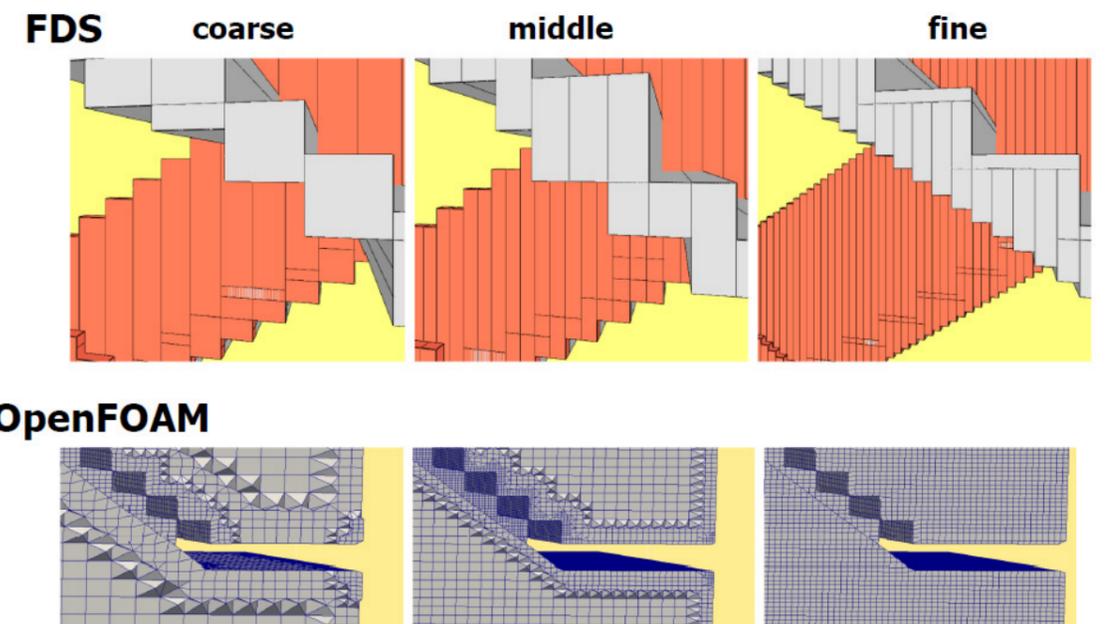
PRESSURE LOSS IN STAIRWELL

EXPERIMENTS IMTECH VS. SIMULATION: OPENFOAM



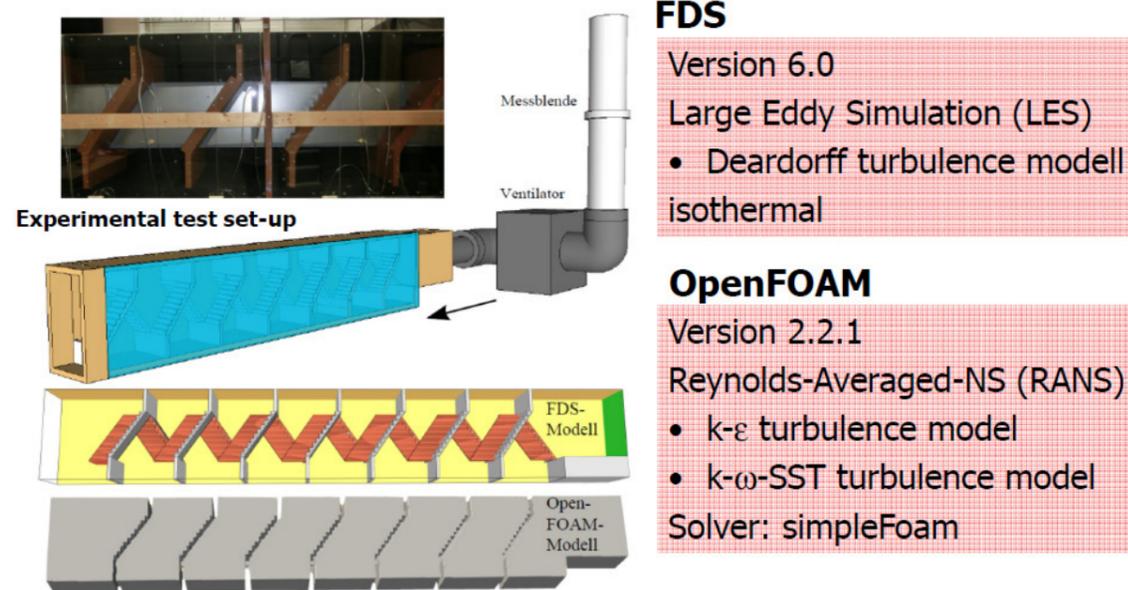
PRESSURE LOSS IN STAIRWELL

EXPERIMENTS IMTECH VS. SIMULATION: OPENFOAM



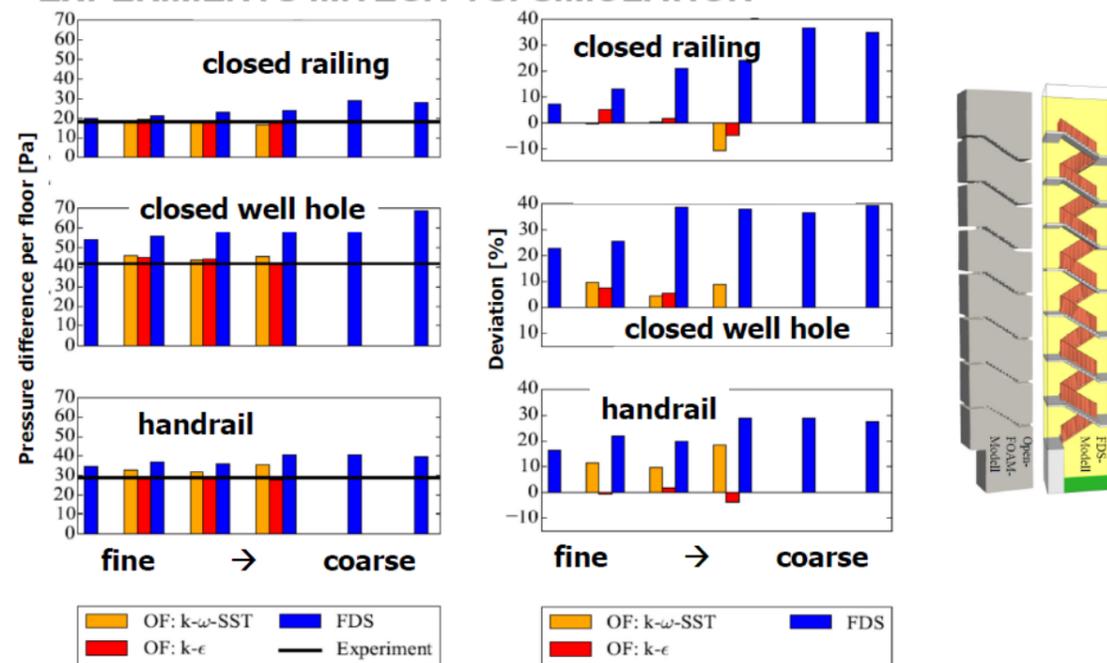
PRESSURE LOSS IN STAIRWELL

EXPERIMENTS IMTECH VS. SIMULATION



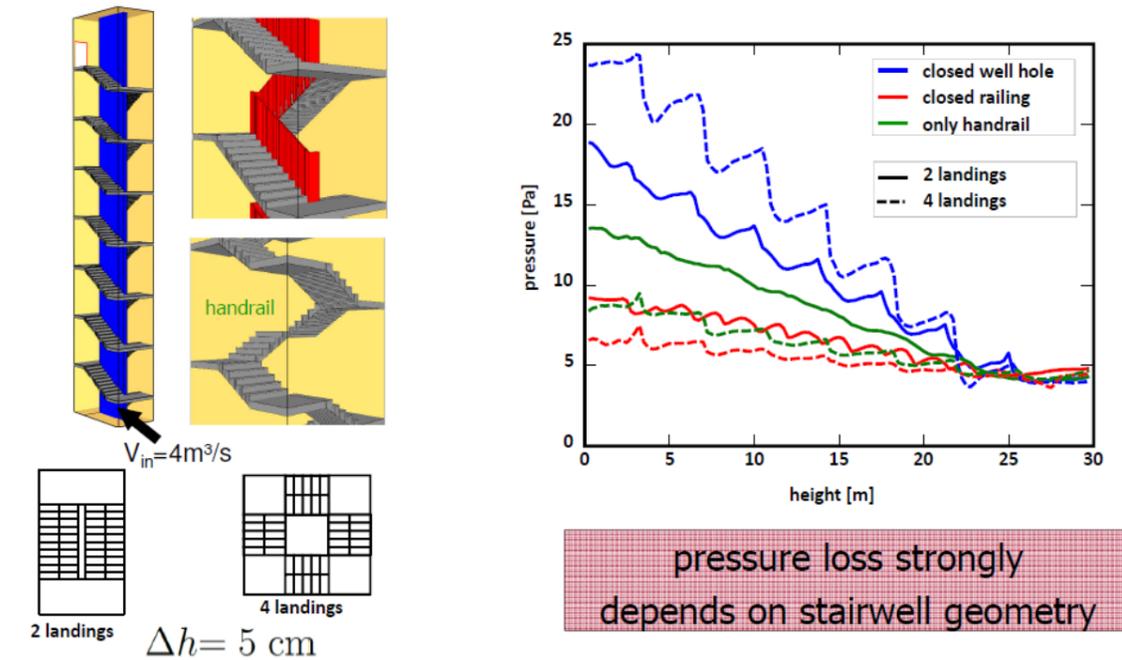
PRESSURE LOSS IN STAIRWELL

EXPERIMENTS IMTECH VS. SIMULATION



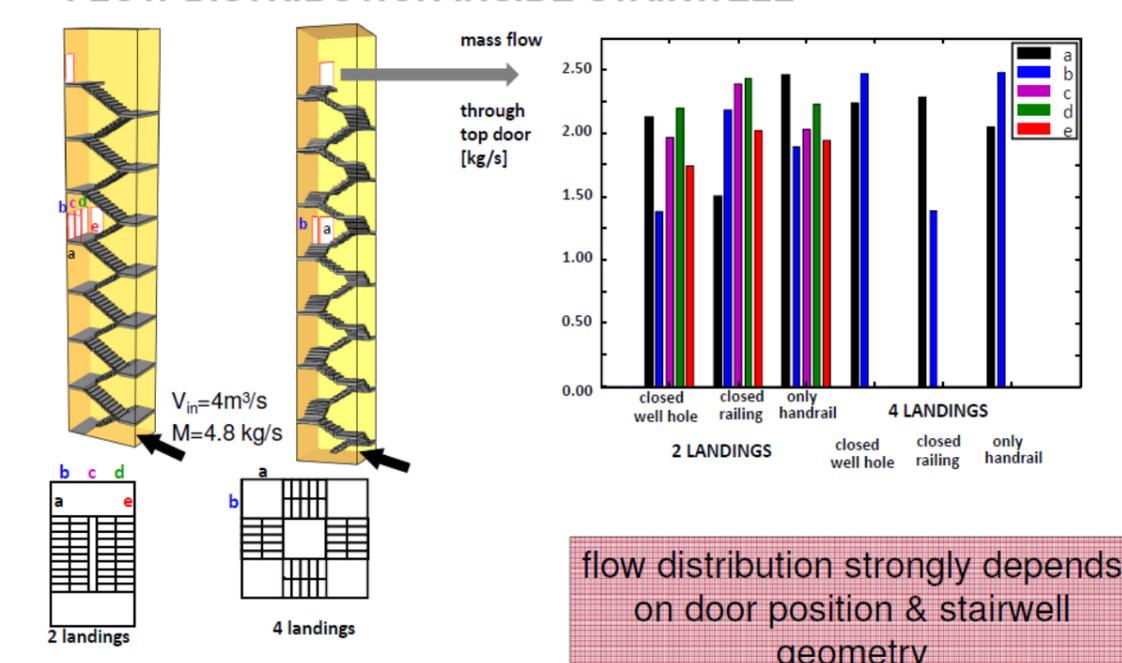
LIMITATIONS

ESTIMATION OF PRESSURE LOSS IN STAIRWELL



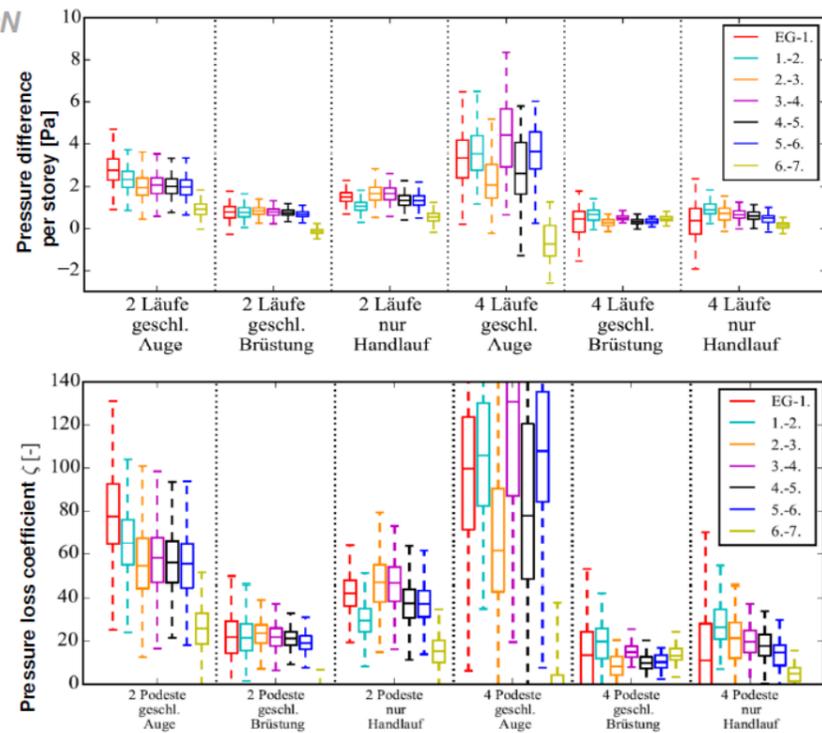
LIMITATIONS

FLOW DISTRIBUTION INSIDE STAIRWELL

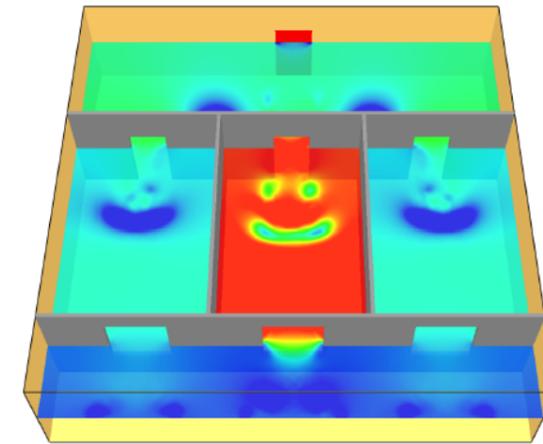


ESTIMATION OF PRESSURE LOSS IN STAIRWELL

FDS SIMULATION



Thank you very much
for your attention!

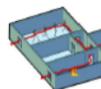


Questions to: mmm@dbi-net.dk

FURTHER RESEARCH



Influence of wind effects



Include flow distribution & Δp in evacuation concept

→ time-dependent flow paths via floors & inside stairwell



Influence of climatic effects



Δp → persons in the flowpath / leakages

→ extend distribution calculation

→ develop safety concept

Bjarne Husted:**The SP retail store simulations revisited****Abstract:**

The case has previously been presented at the FDS user meeting, but new simulations have been performed, making it worth looking at it again.

Turbulent mixing plays an important part in fire safety engineering. The turbulent mixing in the plume determines the amount of hot gases in the smoke layer. The flow of hot gases past obstacles determines if the smoke will come down or stay at the ceiling. The experimental scenario chosen was a retail store in the model size 1:2 with limited ventilation (SP retail store).

A sensitivity analysis study was conducted and it showed that grid independency could be achieved for D^*/dx between 8 and 16. An overestimation of temperatures for the lower gas layer was found.

This could be the result of a too large turbulence mixing in the lower area. Further simulations were carried out using all the different sub-grid turbulence models in the Fire Dynamics Simulator (FDS). There was no clear indication that different sub-grid turbulence models would significantly affect the results. Therefore, the choice of sub-grid model seems to have limited effect on the mixing in the lower zone.

Further it is shown that the mixing could perhaps be due to the hot smoke layer impinging on the far wall and recirculation downwards into the lower part of the room.

Key words: cfd, fds, validation, turbulence, experiments



Acknowledgment



B.Sc. thesis from
2016

Can be
downloaded from
www.brand.lth.se

Fire Dynamics Simulator, User's Guide

The need for verification and validation of the Fire Dynamic Simulator

Disclaimer

The US Department of Commerce makes no warranty, expressed or implied, to users of the Fire Dynamics Simulator (FDS), and accepts no responsibility for its use. **Users of FDS assume sole responsibility under Federal law for determining the appropriateness of its use in any particular application;** for any conclusions drawn from the results of its use; and for any actions taken or not taken as a result of analysis performed using these tools.

Users are warned that FDS is intended for use only by those competent in the fields of fluid dynamics, thermodynamics, heat transfer, combustion, and fire science, and is intended only to supplement the informed judgment of the qualified user. The software package is a computer model that may or may not have predictive capability when applied to a specific set of factual circumstances. **Lack of accurate predictions by the model could lead to erroneous conclusions with regard to fire safety.** **All results should be evaluated by an informed user.**

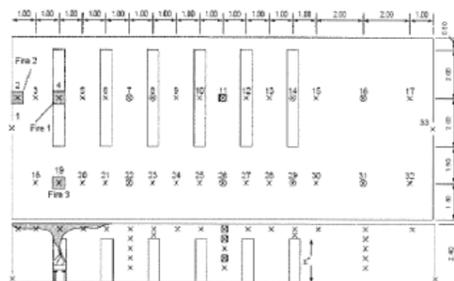


LUND UNIVERSITY

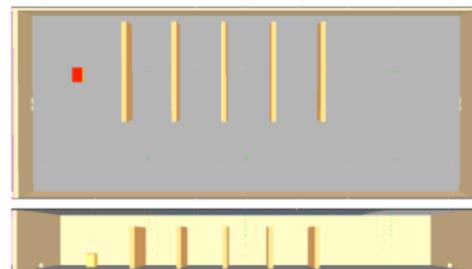
Scenario – SP Retail Store

Length 18 m
Width: 7.5 m
Height: 2.4 m
Pool fire with Heptane
Two openings
5 shelves

Scale 1:2
Simulations in same scale as experiments



Experiment

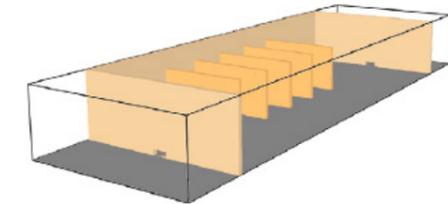


Fire Dynamics Simulator 6.5.3



LUND UNIVERSITY

Scenario – retail store



LUND UNIVERSITY

Grid and calculation time

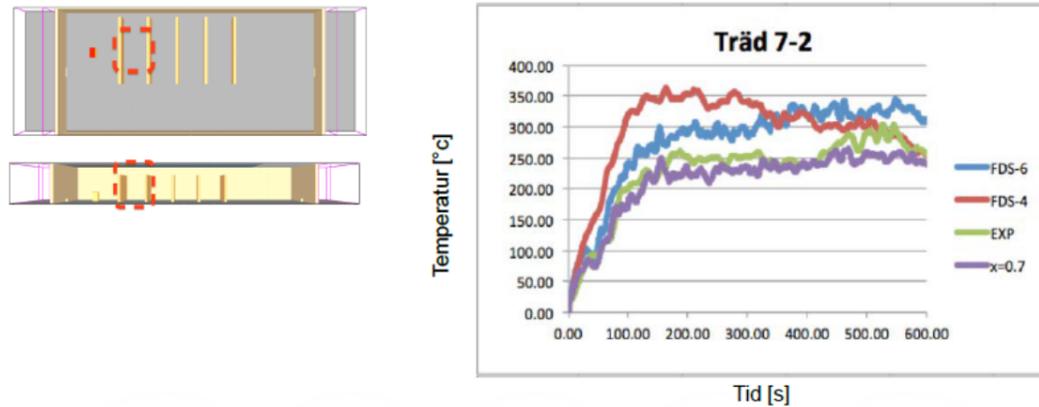
dx [cm]	D*/dx [-]	Number of cells	Time to simulate 180 seconds of the fire
20	4	54000	Less than 1 day
10	8	432000	About 4 days on normal PC
5	16	3456000	About 6 days on supercomputer using 20 cores
2.5	32	27648000	About 10 days on supercomputer using 200 cores



LUND UNIVERSITY

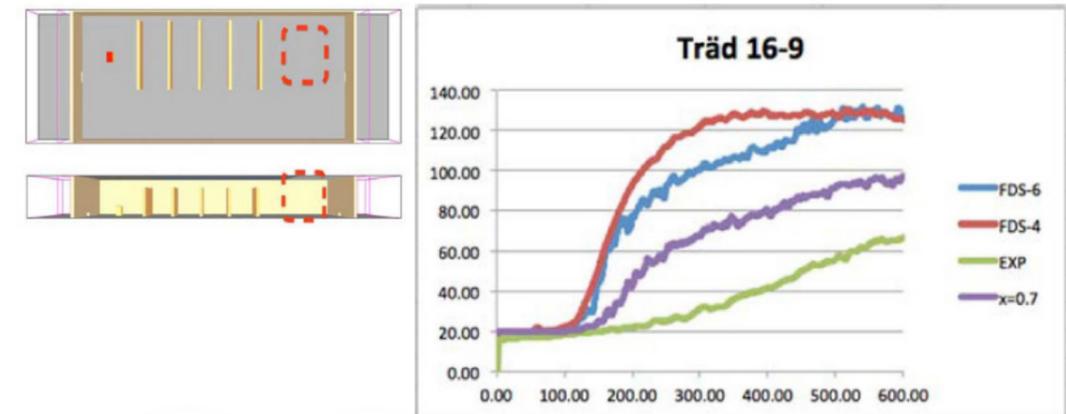
Temperature close to the fire

10 cm below ceiling at thermocouple tree 7



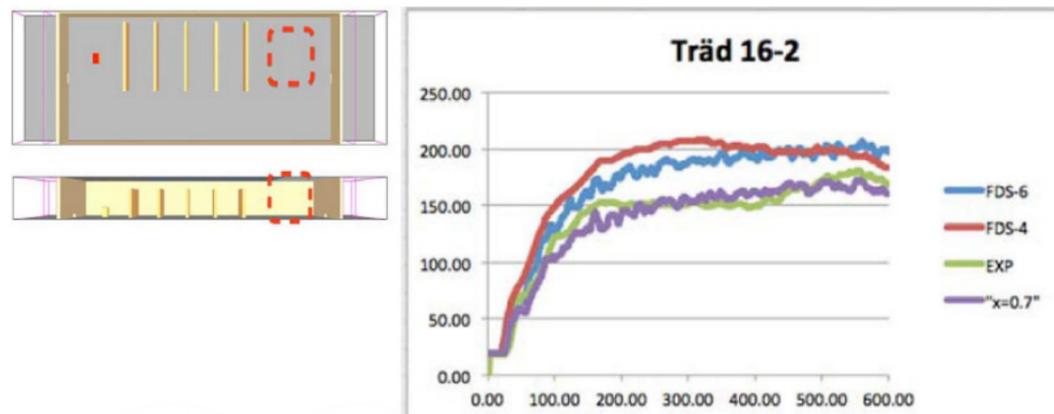
Temperature far from the fire

50 cm above floor at thermocouple tree 16



Temperature far from the fire

10 cm below ceiling at thermocouple tree 16



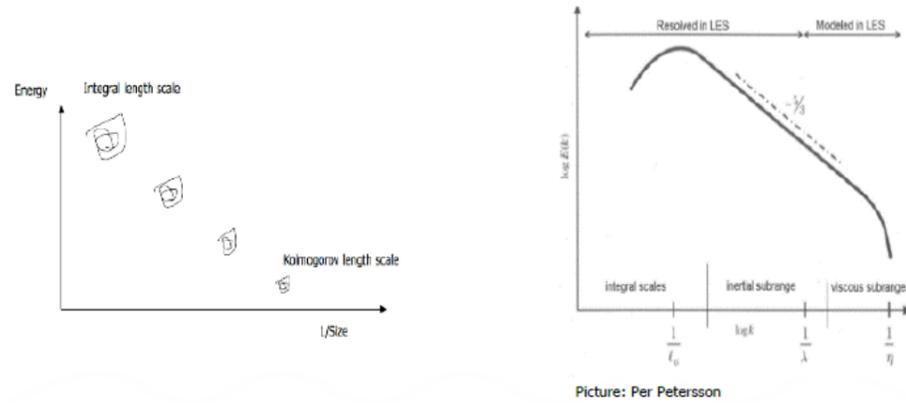
Reason for difference in temperature at low positions

- Errors in the experiment
 - Wrong setup in FDS compared to drawing
 - Measurement errors
 - Other errors
- Modelling errors
 - Heat transfer modelling
 - **Turbulence mixing**



Turbulent mixing and LES

- Grid independent solution
- Modelling of sub grid turbulent



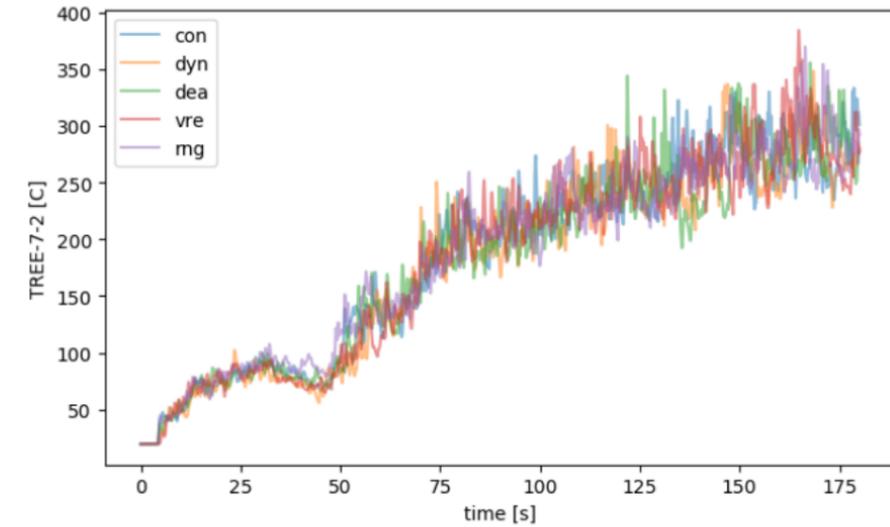
LES and sub-grid model

- Filtering of the equations
 - Eddies below given size Δ are handled by the "sub grid" model
 - $\Delta > h$, h is the grid size
 - Model to handle the "small" eddies, turbulent viscosity
 - Constant Smagorinsky
 - Dynamic Smagorinsky
 - Deardorff (Default in FDS 6)
 - Vreman
 - RNG

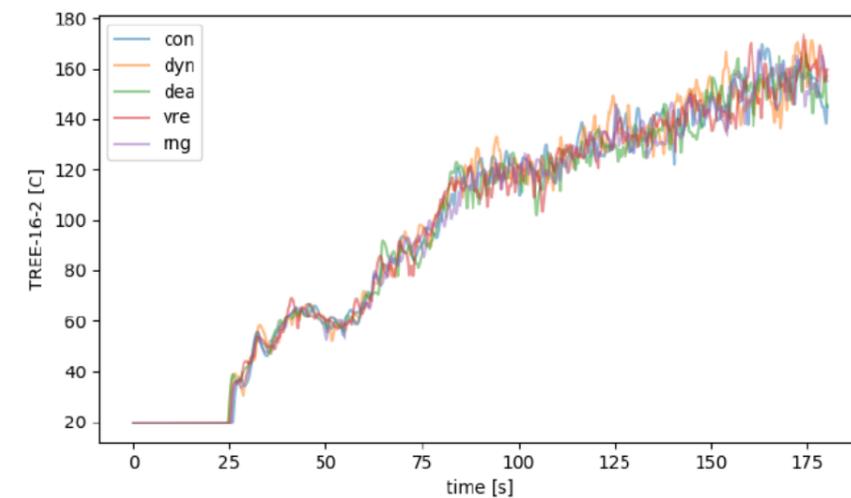
TURBULENCE_MODEL	Description	Coefficient(s)
'CONSTANT SMAGORINSKY'	Constant coefficient Smagorinsky model [11]	C_SMAGORINSKY
'DYNAMIC SMAGORINSKY'	Dynamic Smagorinsky model [12, 13]	None
'DEARDORFF'	Deardorff model [9, 10]	C_DEARDORFF
'VREMAN'	Vreman's eddy viscosity model [14]	C_VREMAN
'RNG'	Renormalization group eddy viscosity model [15]	C_RNG, C_RNG_CUTOFF



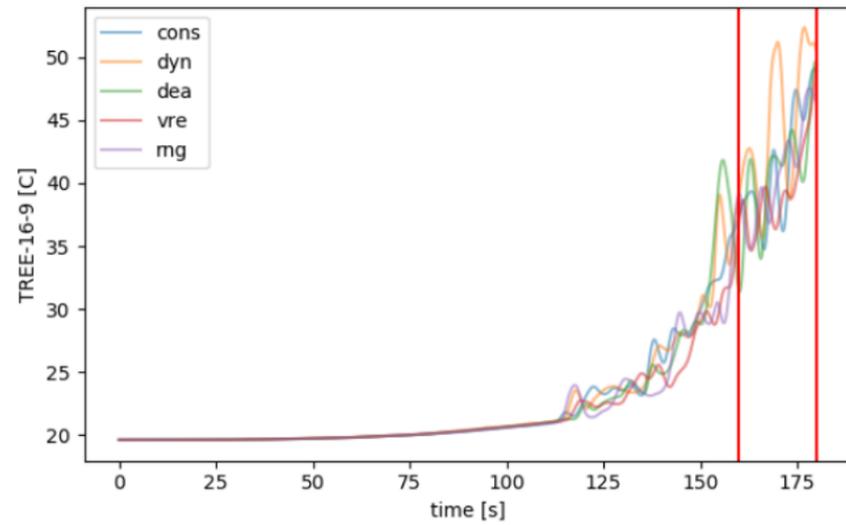
Temperature close to the fire, 10 cm below ceiling



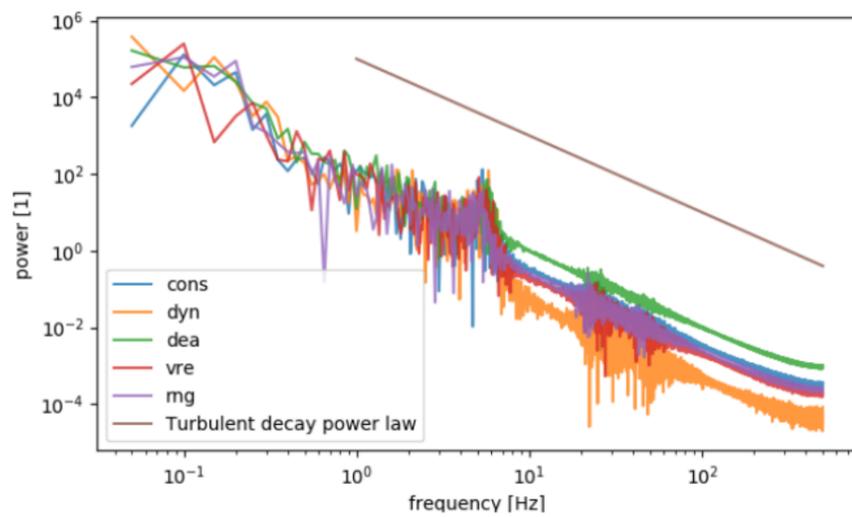
Temperature far from the fire, 10 cm below ceiling



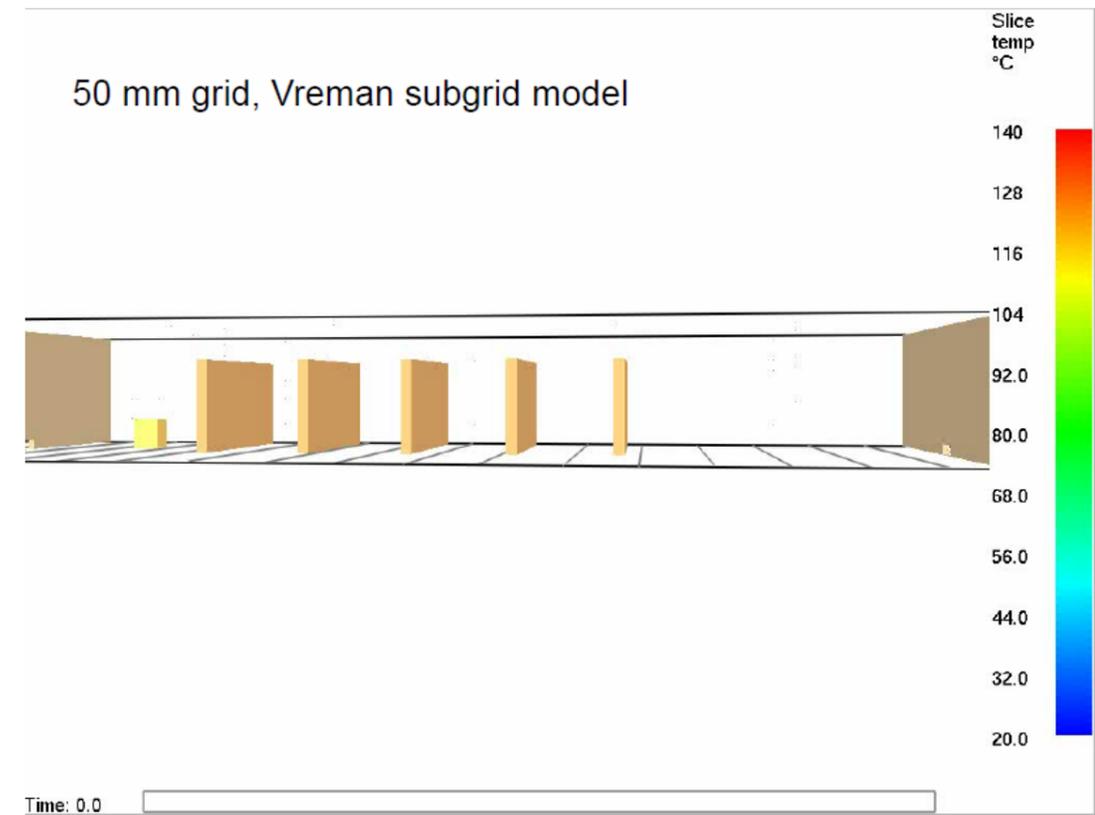
Temperature far from the fire, 50 cm above floor



Frequency spectrum of velocity at point16-9 (Fast Fourier Transform)



50 mm grid, Vreman subgrid model



Conclusion

- Good agreement between temperature in the upper part of the smoke layer
- Poor agree between temperatures far from the fire and behind the shelves and close to the floor
- Choice of turbulent sub-grid models can not explain the difference
- A possible reason could be the modelling of the boundary conditions at the ceiling and the far wall



Patrick Lauer:

Inverse Modellierung mit FDS

Abstract:

Durch steigende Rechenleistung, flexibel verfügbare HPC-Systeme und verbesserte Parallelisierbarkeit von Programmcode gewinnt eine inverse Modellierung von Problemen in der Brandsimulation eine immer größere Attraktivität. Es wird, im Gegensatz zur üblichen Vorwärtsmodellierung, vom gewünschten Ergebnis des Modellierungsprozesses auf die nötigen Modellparameter geschlossen.

Der Vortrag leitet mit einer generellen Beschreibung des Konzepts "Inverse Modellierung" und Ansätzen zur Lösung ein. Anschließend werden bisherige Anwendungen in der Brandsimulation, im speziellen mit FDS, vorgestellt. Angefangen bei der Abschätzung von Materialeigenschaften zur Pyrolysemodellierung mithilfe kleinskaliger Laborversuche über die Ermittlung von Wärmefreisetzungsraten und der Prognose der Brandentwicklung bei Raumbränden bis zur Brandrekonstruktion und der Lokalisierung der Brandquelle bieten diese Beispiele eine Übersicht der momentanen Anwendung. Es wird jeweils auch kurz auf die technische Umsetzung eingegangen. Ein anschließender Ausblick charakterisiert mögliche weitere Anwendungsszenarien.

Dies bietet eine Grundlage, um über gegenwärtige und zukünftige Brandsimulations- Fragestellungen, die per inverser Modellierung gelöst werden können, zu diskutieren und Erfahrungen auszutauschen.

Inverse Modellierung mit FDS

Ein Überblick und Denkanstoß

Patrick Lauer

Bergische Universität Wuppertal

lauer@uni-wuppertal.de

Inhalt

1. Inhalt
2. Was ist inverse Modellierung?
3. Beispiele
4. Pyrolyse - Problem
5. Brandrekonstruktion - Problem
6. Forecasting - Problem
7. Vorschlag 1
8. Vorschlag 2
9. Diskussion
10. Literatur

Was ist inverse Modellierung?

Vom Ergebnis auf die Ursache schließen...

Vorwärtsproblem:

- Modellparameter -> Daten

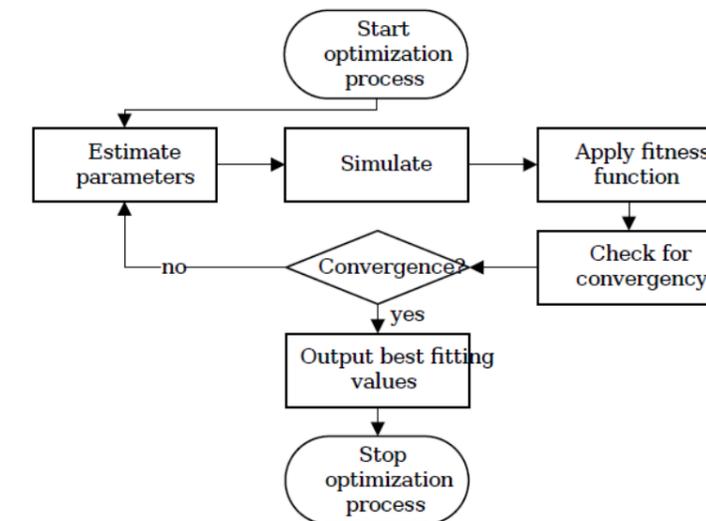
inverse Formulierung:

- Daten -> Modellparameter

Lösungsansätze

Metaheuristische Optimierungsalgorithmen erlauben die Bearbeitung von Fragestellungen mit vielen Parametern effizient die optimale Lösung zu finden.

Lösungsansätze



Beispiele

- Pyrolyse
- Brandrekonstruktion
- Forecasting

Pyrolyse - Problem

Um Verbrennung von Feststoffen und damit Brandausbreitung simulieren zu können, werden materialspezifische reaktionskinetische und teilweise thermische Eigenschaften benötigt. Zur Simulation besitzt FDS ein Pyrolysesubmodell.

Diese Parameter sind nur zum Teil und sehr aufwendig über Laborversuche zu ermitteln. Außerdem können sie nicht immer angemessen im Modell berücksichtigt werden.

Pyrolyse - Ansatz

1. Ermittlung des Materialverhaltens bei Wärmeexposition im Labormaßstab (TGA, Cone, etc.), genauer: der Materialzersetzung
2. "Ausprobieren" von Eingabeparametern in das Pyrolysemodell.
3. Vergleich des Ergebnisses des Pyrolysemodells mit den Labordaten
4. Wiederholen von Schritt 2 und 3 bis eine ausreichend gute Übereinstimmung gefunden ist
5. Übertragen der so abgeschätzten Parameter auf andere Szenarien mit diesem Material

Verschiedene Optimierungsalgorithmen sorgen für "cleveres" "Ausprobieren".

[1, 5-8]

Ergebnis

Es werden z.T. mehrere tausend Iterationen benötigt, regelmäßig werden aber sehr gute Übereinstimmungen erzielt.

Verschiedene Optimierungsalgorithmen erreichen unterschiedlich schnell (Anzahl der Iterationen) ein unterschiedlich gutes Ergebnis (Übereinstimmung mit Laborwerten).

Brandrekonstruktion - Problem

Im Bereich Brandrekonstruktion und Brandermittlung, insbesondere bei Raumbränden herrscht oft große Unsicherheit über die Wärmefreisetzungsraten, den Ort und die Größe des Brandes und die Rauchgasproduktion

Brandrekonstruktion - Ansatz

1. Messen der Temperaturen während eines Brandes
2. "Probieren" von Wärmefreisetzungsraten in Simulation mit FDS und CFAST
3. Vergleichen der resultierenden Temperaturen mit den gemessenen Temperaturen
4. Wiederholen von Schritt 2 und 3 bis eine ausreichend gute Übereinstimmung gefunden ist
5. Abgeleitete Wärmefreisetzungsraten in Brandrekonstruktion einbeziehen

Zusätzlich über Wärmestromsensoren, bayessche Statistik, MCMC-Algorithmen und FDS-Simulationen Wahrscheinlichkeitsabschätzung von Brandort und -größe

[9]

Brandrekonstruktion - Ergebnis

Es konnte in beiden Fällen eine große Übereinstimmung sowohl für synthetische, als auch reale Versuchsdaten erreicht werden.

Forecasting - Problem

Momentan ist es nicht möglich, die Brandentwicklung während eines Brandes in Echtzeit durch CFD-Modelle zu prognostizieren, um so Handlungsmöglichkeiten zu eröffnen.

Forecasting - Ansatz

1. Temperatursensordaten des Brandraumes werden aufgenommen
2. "Probieren" der Wärmefreisetzungsraten über Variation der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und des Brennstoffmassenstroms
3. Vergleichen der resultierenden Temperaturen mit den gemessenen Temperaturen
4. Wiederholen von Schritt 2 und 3 bis eine ausreichend gute Übereinstimmung gefunden ist
5. Mit den gefundenen Parametern die weitere Brandentwicklung prognostizieren
6. Bei Abweichung der Prognose von der realen Brandentwicklung neue Iteration ab Schritt 2

[2-4]

Forecasting - Ergebnis

Es wurden, nicht zuletzt über eine starke Vereinfachung und grobe Diskretisierung, ausreichend genaue Prognosen zur Evakuierung und Brandbekämpfung bei synthetischen und realen Daten gefunden.

Die Berechnungszeit ist allerdings noch so hoch, dass sich eine Prognose zwar schnell, aber nicht in Echtzeit umsetzen lässt.

Vorschlag 1

Trend geht von der Simulation weniger Szenarien zu multivariater Analyse durch besseres Verständnis, höheren Anforderungen und größeren Rechenkapazitäten.

Formuliert man das Problem nun invers, d.h. man definiert als Ausgangswert das Leistungskriterium und definiert dann einen Parameterraum mit Eingangsparametern (z.B. für den Brandort, Leistung, Entwicklung, Zu- und Abluft, etc...), die wahrscheinlich in zu definierenden Betriebszuständen erreicht werden, kann man explizit danach suchen, wie nah das System an die schlechteste Performance kommt.

Vorschlag 2

Zusätzlich kann man nun Maßnahmen parametrisieren (Entrauchungsflächen, bauliche Änderungen, etc...) und daraus erneut nach der optimalen Lösung suchen.

Diskussion

Was bringt das? - Wer fordert das? - Wer zahlt das? - Wie rechnet man das?

Chancen - Risiken - Möglichkeiten

Eigene Erfahrungen? - Anwendungsfelder? - Anwendbarkeit?

Literatur

- [1] Marcos Chaos, Mohammed M Khan, Niveditha Krishnamoorthy, John L de Ris, and Sergey B Dorofeev. "Evaluation of Optimization Schemes and Determination of Solid Fuel Properties for CFD Fire Models Using Bench-Scale Pyrolysis Tests." *Proceedings of the Combustion Institute* 33 (2). Elsevier: 2599–2606. 2011. [↗](#)
- [2] Wolfram Jahn, Guillermo Rein, and José L Torero. "DATA ASSIMILATION IN ENCLOSURE FIRE DYNAMICS—TOWARDS ADJOINT MODELLING." *EUROGEN, Cracow, Poland*. 2009. [↗](#)
- [3] Wolfram Jahn, Guillermo Rein, and José L Torero. "Forecasting Fire Dynamics Using Inverse Computational Fluid Dynamics and Tangent Linearisation." *Advances in Engineering Software* 47 (1). Elsevier: 114–126. 2012. [↗](#)
- [4] W. Jahn, G. Rein, and J. L. Torero. "Forecasting Fire Growth Using an Inverse Zone Modelling Approach." *Fire Safety Journal* 46 (3): 81–88. 2011. [↗](#)
- [5] Mohammed M. Khan, Archibald Tewarson, and Marcos Chaos. "Combustion Characteristics of Materials and Generation of Fire Products." In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, edited by Morgan J. Hurley, Daniel T. Gottuk, John R. Hall Jr., Kazunori Harada, Erica D. Kuligowski, Milosh Puchovsky, Jose L. Torero, John M. Watts Jr., and CHRISTOPHER

Susanne Kilian:

Lösung der Druckgleichung in FDS - Risiken und Nebenwirkungen

Abstract:

Die effiziente Lösung der Druckgleichung in FDS stellt nach wie vor eine große Herausforderung innerhalb des Lösungsalgorithmus von FDS dar. Aufgrund des gebietsübergreifenden Druck-Charakters kann die Verwendung einer höheren Anzahl an Meshes zum Verlust des physikalischen Zusammenhangs führen, was gegebenenfalls durch zusätzliche/alternative algorithmische Maßnahmen abgefangen werden muss.

Im Verlauf des Vortrags sollen hier am Beispiel bekannter Problemfälle unterschiedliche Strategien präsentiert und miteinander verglichen werden:

- der Standard-Drucklöser auf Basis lokaler FFT-Methoden (Fast Fourier Transformation) mit iterativer Korrektur der Geschwindigkeitsnormalen entlang innerer Meshgrenzen,
- der ab FDS 6.6.0 verfügbare GLMAT-Löser auf Basis des Intel MKL Sparse Cluster Solver, der eine globale Drucklösung ohne Notwendigkeit weiterer Korrekturschritte berechnet,
- verschiedene ScaRC-Löser auf Basis von Kyrlov- und Mehrgittertechniken, insbesondere in Kombination mit speziellen FFT-Techniken zur Vorkonditionierung sowie Berechnung optimierter Initiallösungen.

Lösung der Druckgleichung in FDS

Risiken und Nebenwirkungen

Dr. Susanne Kilian
hpbberlin - Ingenieure für Brandschutz
10245 Berlin

Next Generation Fire Engineering



Diskretisierung der Poisson-Gleichung

Strukturierte versus unstrukturierte kartesische Gitter

Next Generation Fire Engineering



Agenda

- 1**
Diskretisierung
Poisson-Gleichung
- 2**
Poisson-Löser
- 3**
Testreihen
- 4**
Fazit

Next Generation Fire Engineering



Druckgleichung in FDS

1

Diskretisierung
Poisson-Gleichung

Elliptische partielle Differentialgleichung Typ „Poisson“

$$\nabla^2 \mathcal{H} = - \frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{F} + \text{Randwerte}$$

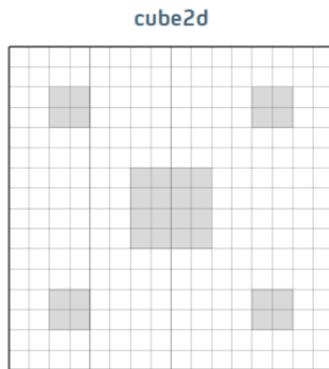
↑
eng gekoppelt mit dem
Geschwindigkeitsfeld
↑
Quellterme aus dem vorangehenden Zeitschritt
(Strahlungstransport, Combustion, Pyrolyse, etc.)

- mindestens 2x pro Zeitschritt zu lösen
- extrem hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit für Informationen
- paralleler Löser muss globalen Informationsfluss adäquat abbilden

Next Generation Fire Engineering



Diskretisierung der Poisson-Gleichung



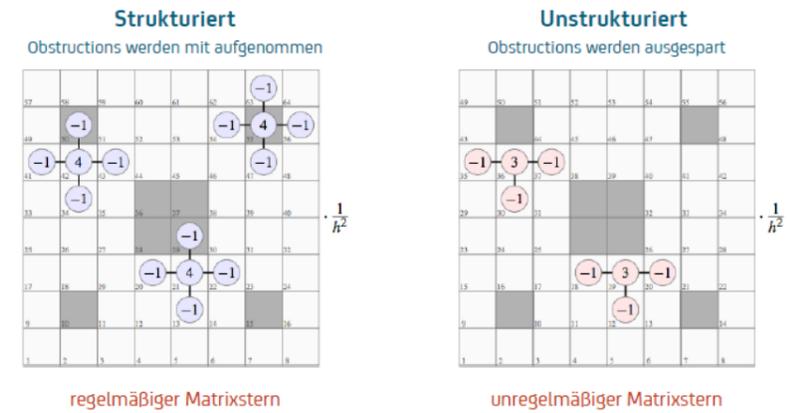
- Demofall zur Analyse verschiedener Diskretisierungstechniken
- einfache 2D-Geometrie mit inneren Obstructions
- spätere Durchführung von Vergleichsrechnungen

Next Generation Fire Engineering

1
Diskretisierung Poisson-Gleichung



cube2d: Verschiedene Diskretisierungen



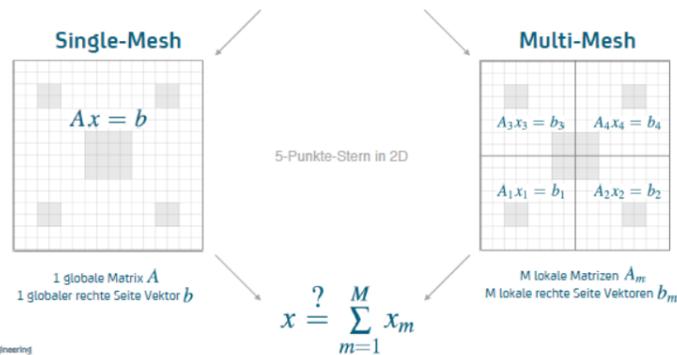
Next Generation Fire Engineering

1
Diskretisierung Poisson-Gleichung



Diskretisierung mit Finiten Differenzen

$$\frac{1}{h^2}(-\mathcal{H}_{i,k-1} - \mathcal{H}_{i-1,k} + 4\mathcal{H}_{i,k} - \mathcal{H}_{i,k+1} - \mathcal{H}_{i+1,k}) = R_{i,k}$$



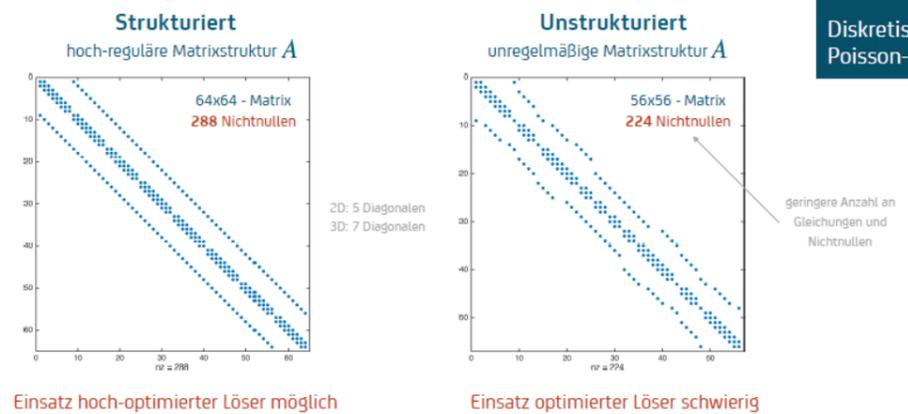
Next Generation Fire Engineering

1
Diskretisierung Poisson-Gleichung

Zerstückelung des physikalischen Zusammenhangs für Multi-Mesh



cube2d: Verschiedene Matrixstrukturen



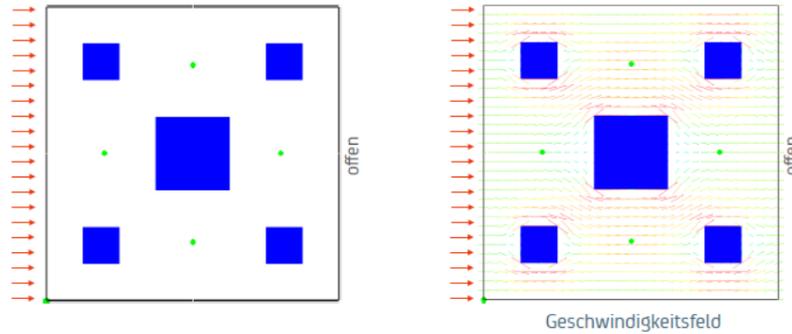
Next Generation Fire Engineering

1
Diskretisierung Poisson-Gleichung



cube2d: Vergleich der Diskretisierungen

Frage 1: Wie exakt wird die Umströmung der Obstructions berechnet?



Next Generation Fire Engineering

1
Diskretisierung
Poisson-Gleichung



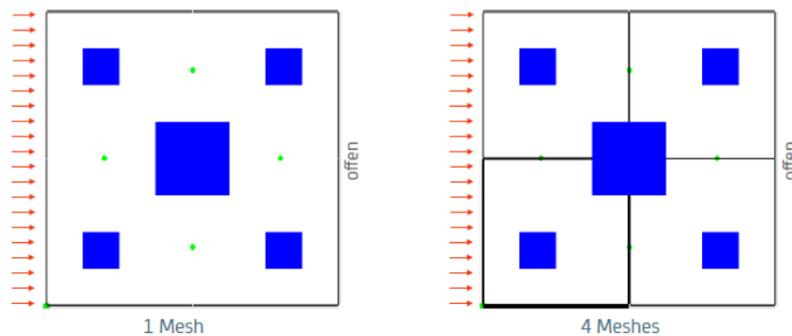
Lösung der Poisson-Gleichung
Präsentation verschiedener FDS-Drucklöser

Next Generation Fire Engineering



cube2d: Vergleich der Diskretisierungen

Frage 2: Welchen Einfluss hat die Zerlegung in einzelne Meshes?



Next Generation Fire Engineering

1
Diskretisierung
Poisson-Gleichung



Vergleich verschiedener Poisson-Löser in FDS

2
Poisson-Löser

Löser	Verfügbarkeit	Beschreibung
FFT	langjähriger FDS-Drucklöser	meshweise FFT-Methoden mit Kopplung der lokalen Lösungen
GLMAT	seit FDS 6.6.0 (beta)	parallele, globale LU-Zerlegung
ScaRC	in Entwicklung (beta)	parallele globale Krylov- und Mehrgitter-Methoden mit meshweisen Vorkonditionierungsstrategien

Next Generation Fire Engineering



FFT - Fast Fourier Transformation

Funktionsweise:

- Eigenfunktionen des Poisson-Problems bekannt (Produkte aus Sinusfunktionen)
- Approximation der Lösung aus entsprechender Fourierreihe

$$\mathcal{H}(x, y) = \sum_i \sum_k \mathcal{H}_{ik} \sin(\pi i x) \sin(\pi k y)$$

- Verwendung des hoch-optimierten Solver-Packages CRAYFISHPAK für elliptische Gleichungen
- nur für strukturierte Gitter anwendbar

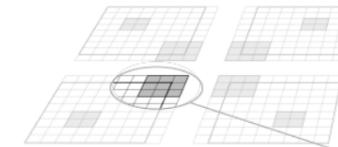
Next Generation Fire Engineering



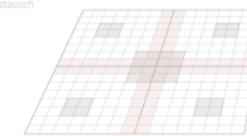
FFT - Fast Fourier Transformation

k-ter Zeitschritt:

lokale Berechnung

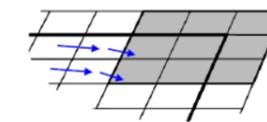


Datenaustausch



Problem 1:

mögliche Penetration der Geschwindigkeits-Normalen in innere Obstructions



wegen Beschränkung auf strukturierte Gitter keine korrekte Setzung innerer Randwerte möglich

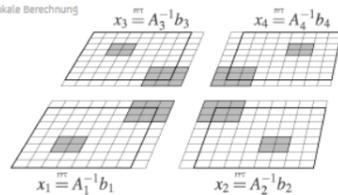
Next Generation Fire Engineering



FFT - Fast Fourier Transformation

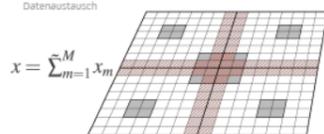
k-ter Zeitschritt:

lokale Berechnung



- Berechnung der lokalen rechten Seiten b_m
 - Berechnung lokaler Lösungen x_m mit FFT
- sehr komplex, aber extrem schnell und robust

Datenaustausch



- Mittelung an inneren Meshgrenzen
 - Berechnung der globalen Lösung X
- nur 1 Kommunikation pro FFT-Lösung

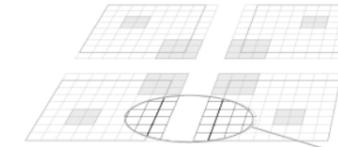
Next Generation Fire Engineering



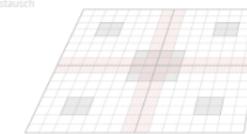
FFT - Fast Fourier Transformation

k-ter Zeitschritt:

lokale Berechnung

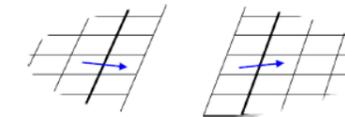


Datenaustausch



Problem 2:

mögliche Unterschiede der Geschwindigkeits-Normalen an inneren Meshgrenzen



keine globale Multi-Mesh Diskretisierung, künstliche innere Randwerte

Next Generation Fire Engineering



FFT(tol) - mit Geschwindigkeits-Korrektur



k-ter Zeitschritt:

lokale Berechnung $x_3 = A_3^{-1}b_3$ $x_4 = A_4^{-1}b_4$

$x_1 = A_1^{-1}b_1$ $x_2 = A_2^{-1}b_2$

Datenaustausch $x = \sum_{m=1}^4 x_m$

Vel-err Obstruktions < tol ?
Vel-err Meshgrenzen < tol ?

Iterative Korrektur an Obstruktions und inneren Meshgrenzen:

- Iteration bis die Geschwindigkeitsfehler unter vorgegebene Toleranz **tol** sinken
- z.B.: `&PRES VELOCITY_TOLERANCE = 0.001,`
`MAX_PRESSURE_ITERATIONS = 1000`

default: $0.5 \cdot \text{characteristic_cell_size}$
default: 10

Zusatzaufwand und meist langsame Konvergenz

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

GLMAT - Parallele LU-Zerlegung



Initialisierung:

Datenaustausch A_3 A_4
 A_1 A_2

- Berechnung der globalen LU-Zerlegung $LU = \sum_{m=1}^M A_m$
- verteilte Speicherung der Dreiecksmatrizen

teure Initialisierung, aber meist nur einmalig
außer bei Änderungen der Obstruktions

k-ter Zeitschritt:

lokale Berechnung $x_3 = L^{-1}U^{-1}b_3$ $x_4 = L^{-1}U^{-1}b_4$

$x = \sum_{m=1}^4 x_m$

$x_1 = L^{-1}U^{-1}b_1$ $x_2 = L^{-1}U^{-1}b_2$

- lokales Vorwärts-/Rückwärtseinsetzen
- Korrekte Setzung der Randwerte möglich

höchste Genauigkeit (nur Rundungsfehler),
keine zusätzliche Korrektur notwendig

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

GLMAT - Parallele LU-Zerlegung



Funktionsweise:

- Zerlegung der globalen Matrix **A** in linke untere und rechte obere Dreiecksmatrix

$A = L \times U$

- Lösung durch einfaches Vorwärts-/Rückwärtseinsetzen: $Ly = b$, $Ux = y$
- Verwendung von 'Cluster Sparse Solver' aus der Intel Math Kernel Library (MKL)
- anwendbar für strukturierte und unstrukturierte Gitter

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

GLMAT - Analyse des Speicherbedarfs



Frage: Wieviel Speicher wird im 3D-Fall für die LU-Zerlegung benötigt?

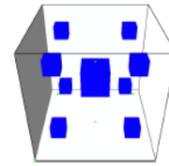
cube2d

cube3d

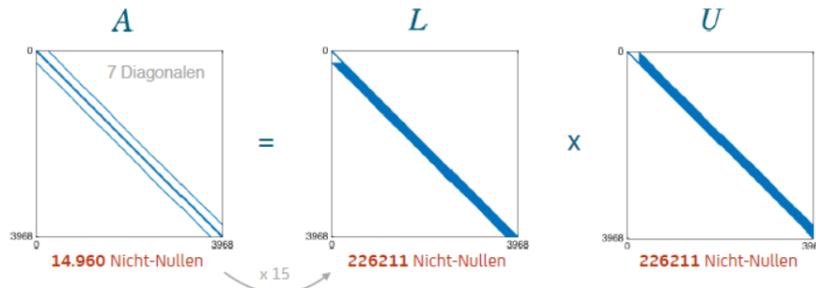
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

GLMAT - Matrixstrukturen für cube3d



Beispiel: 16^3 Gitterzellen mit unstrukturierter Diskretisierung



- für A müssen nur die mittlere Diagonale und die oberen Diagonalen gespeichert werden (Symmetrie)
- U muss nicht gespeichert werden (Symmetrie)

Next Generation Fire Engineering



ScaRC- Scalable Recursive Clustering



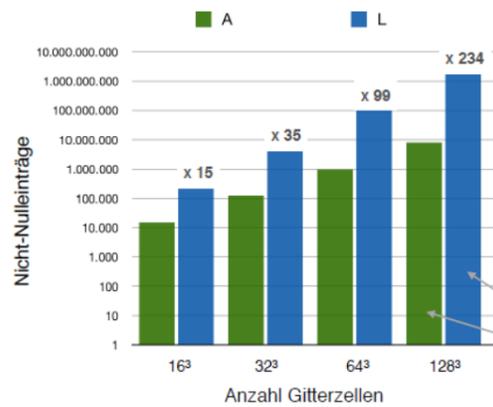
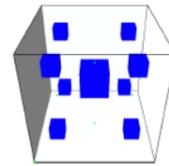
Funktionsweise:

- Parallele Versionen von:
 - konjugierten Gradienten-Verfahren (CG)
 - geometrischen Mehrgitterverfahren (GMG)
- meshweise Vorkonditionierung/Glättung auf Basis von FFT, SSOR und LU
- lokale Verwendung der hoch-optimierten Bibliotheken CRAYFISHPAK und Intel MKL
- anwendbar für strukturierte Gitter (ScaRC) und unstrukturierte Gitter (UScaRC)

Next Generation Fire Engineering



GLMAT - Speicherbedarf bei Gitterverfeinerung



Sehr hoher Speicherbedarf

- massiver „Fill-in“: LU hat viel mehr Nicht-Nullen als A
- FFT und ScaRC können auf gleichen Rechnersystemen feinere Probleme rechnen

~ 1,9 Milliarden
~ 8,1 Millionen

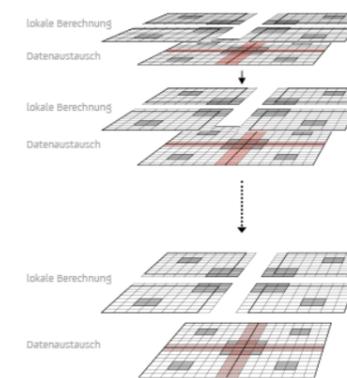
Next Generation Fire Engineering



ScaRC- Scalable Recursive Clustering



k-ter Zeitschritt:



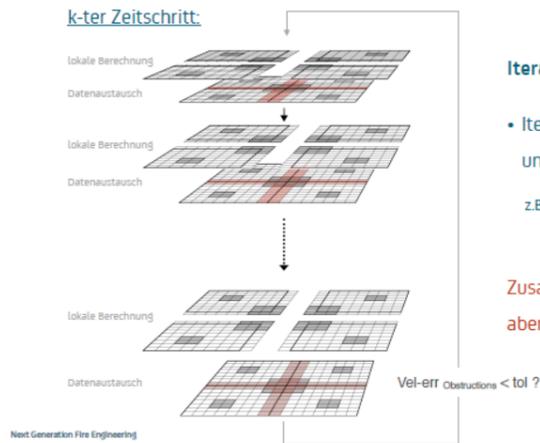
- iterative lokale „Defekt-Korrektur“-Schritte
- globale Matrix-Vektor- und Skalarprodukte
- einzelne Schritte von geringer Komplexität

- Durchführung bis Konvergenzkriterium erfüllt
- korrektes Geschwindigkeitsfeld an inneren Meshgrenzen
- keine korrekte Setzung innerer Randwerte möglich

Next Generation Fire Engineering



ScaRC- mit Geschwindigkeitskorrektur



Iterative Korrektur an Obstructions

- Iteration bis die Geschwindigkeitsfehler unter vorgegebene Toleranz **tol** sinken
- z.B.: &PRES VELOCITY_TOLERANCE = 0.001,
MAX_PRESSURE_ITERATIONS = 1000

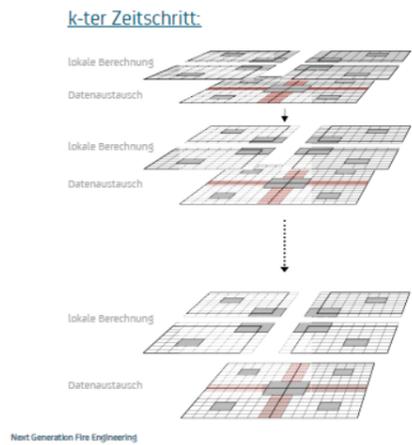
Zusatzaufwand,
aber relativ schnelle Konvergenz

2
Poisson-Löser

Numerische Testreihen

Vergleich der verschiedenen FDS-Drucklöser

UScaRC- für unstrukturierte Gitter



Keine Korrektur erforderlich

- Aussparung der Obstructions aus Diskretisierung
- korrekte innere Randwerte
- korrekte Werte an inneren Meshgrenzen

eventuell langsamere Konvergenz als strukturiert,
aber sehr hohe Genauigkeit (ähnlich GLMAT)

2
Poisson-Löser

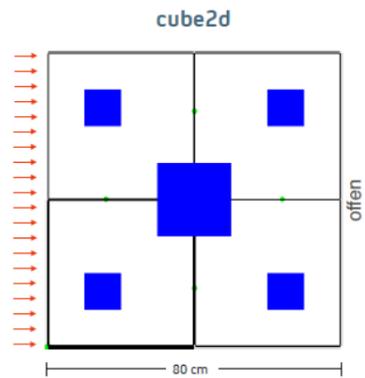
Numerischer Vergleich der Löser

FFT tol = default, 10 ^{-k} Strukturiert	ScaRC tol = default, 10 ^{-k} Strukturiert	GLMAT, UScaRC Unstrukturiert
Toleranz bezieht sich sowohl auf innere Meshgrenzen als auch auf Obstructions	Toleranz bezieht sich nur noch auf Obstructions	keine Toleranz nötig

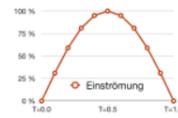
- als Referenz-Lösung wird die jeweilige 1-Mesh GLMAT-Rechnung betrachtet
- folgende Maximalanzahl von Pressure Iterations wird verwendet:
 - MAX_PRESSURE_ITERATIONS = 10 für tol = default
 - MAX_PRESSURE_ITERATIONS = 1000 für tol < default

3
Testreihen

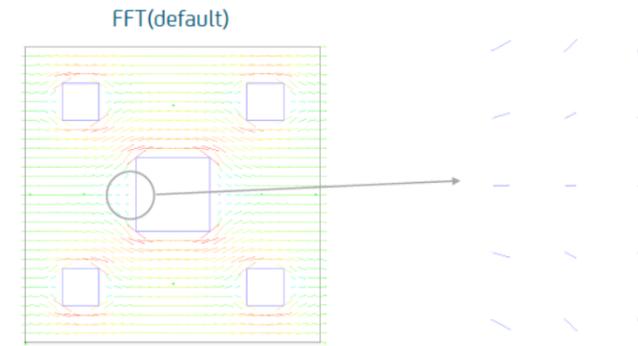
cube2d: 2D-Cube mit Obstructions



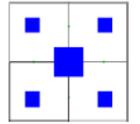
- T_END=1
- 32² Zellen
- Gitterweite 0,025 cm
- offene Ausströmung rechts
- Einstromung von links bis maximal 1 m/s via sinusförmige Ramp



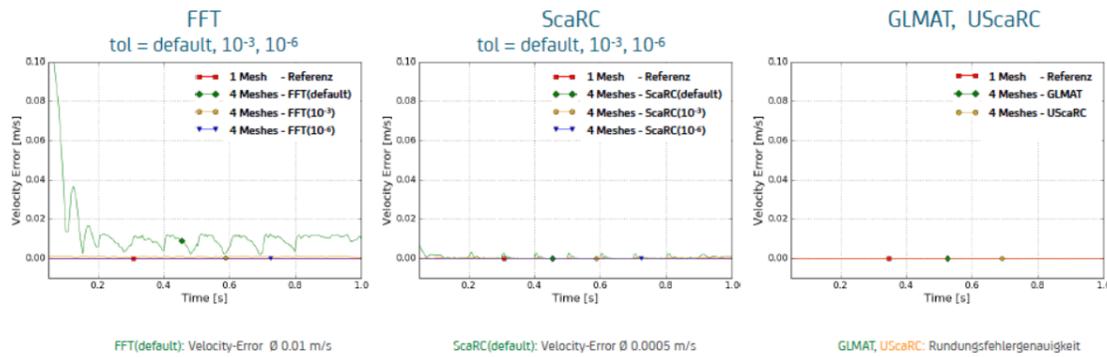
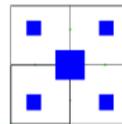
cube2d: Detailansicht Strömungsfeld



Eindringen in innere Obstruction:
Velocity Error ~0.01



cube2d: Velocity Error

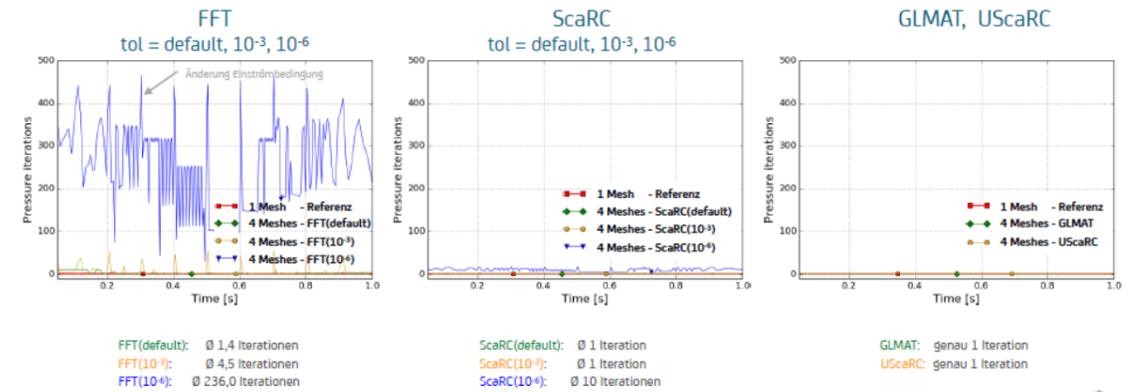
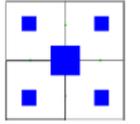


FFT(default): Velocity-Error Ø 0.01 m/s

ScaRC(default): Velocity-Error Ø 0.0005 m/s

GLMAT, UScaRC: Rundungsfehlergenauigkeit

cube2d: Pressure Iterations

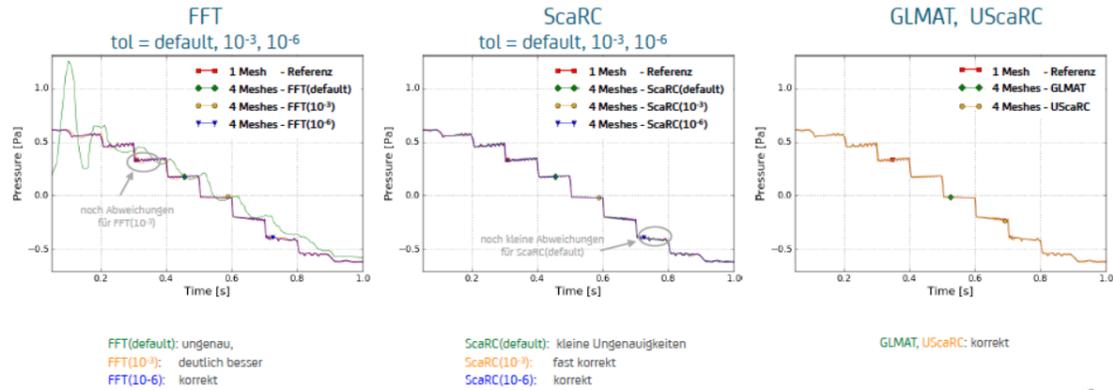
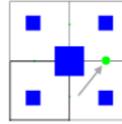


FFT(default): Ø 1,4 Iterationen
FFT(10⁻³): Ø 4,5 Iterationen
FFT(10⁻⁶): Ø 236,0 Iterationen

ScaRC(default): Ø 1 Iteration
ScaRC(10⁻³): Ø 1 Iteration
ScaRC(10⁻⁶): Ø 10 Iterationen

GLMAT: genau 1 Iteration
UScaRC: genau 1 Iteration

cube2d: Pressure Device



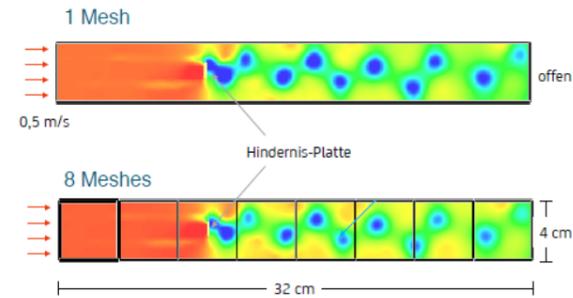
Next Generation Fire Engineering



dancing_eddies: von Karman Wirbelstraße



aus Verification/Pressure_Solver

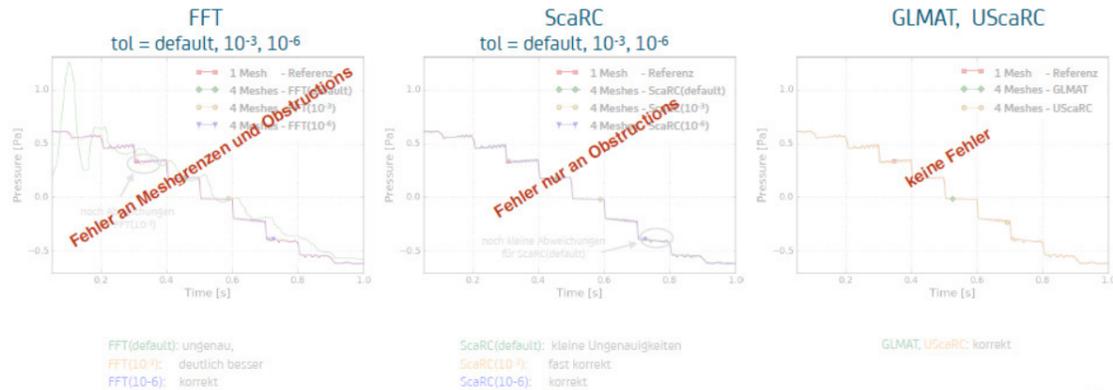
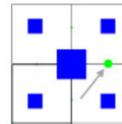


- T_END = 2
- 160 x 20 Zellen,
- Gitterweite 0,2 cm
- Einströmung 0,5 m/s
- offene Ausströmung

Next Generation Fire Engineering



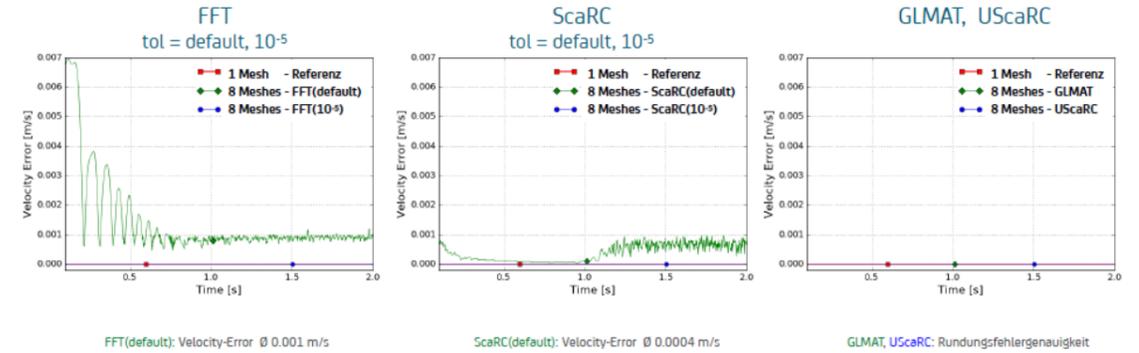
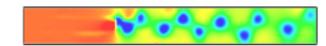
cube2d: Pressure Device



Next Generation Fire Engineering



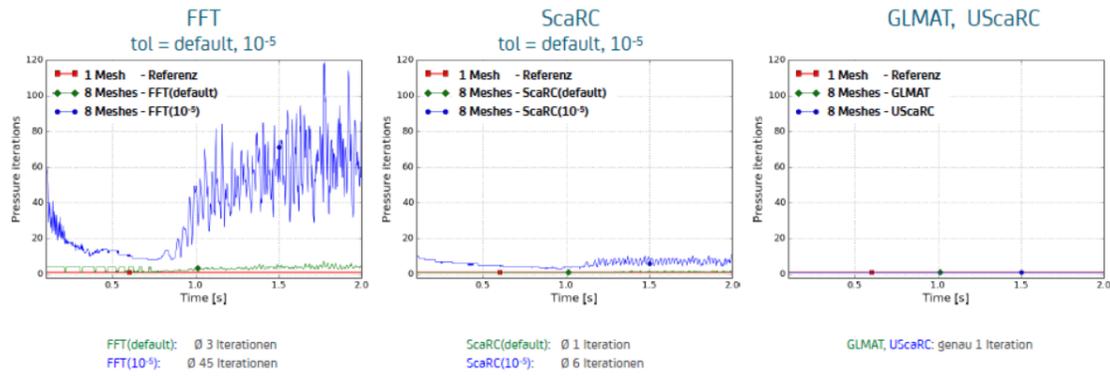
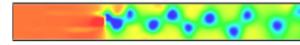
dancing_eddies: Velocity error



Next Generation Fire Engineering



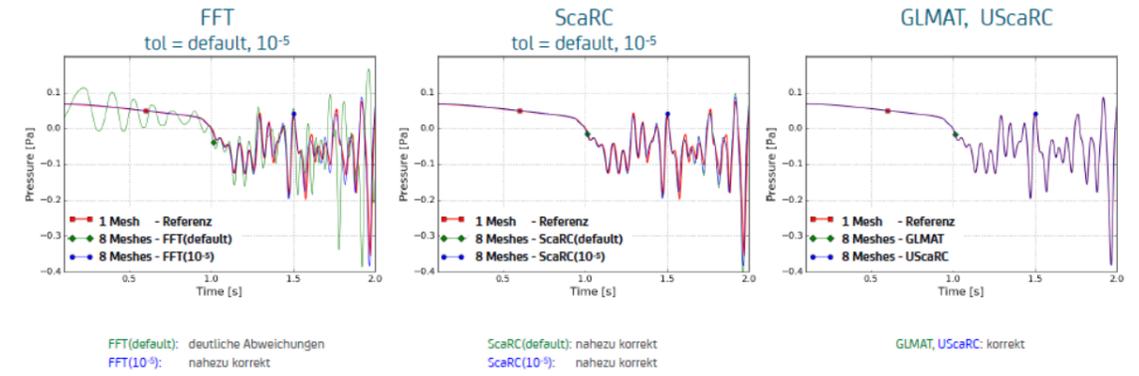
dancing_eddies: Pressure iterations



Next Generation Fire Engineering



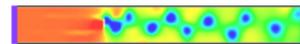
dancing_eddies: Pressure device



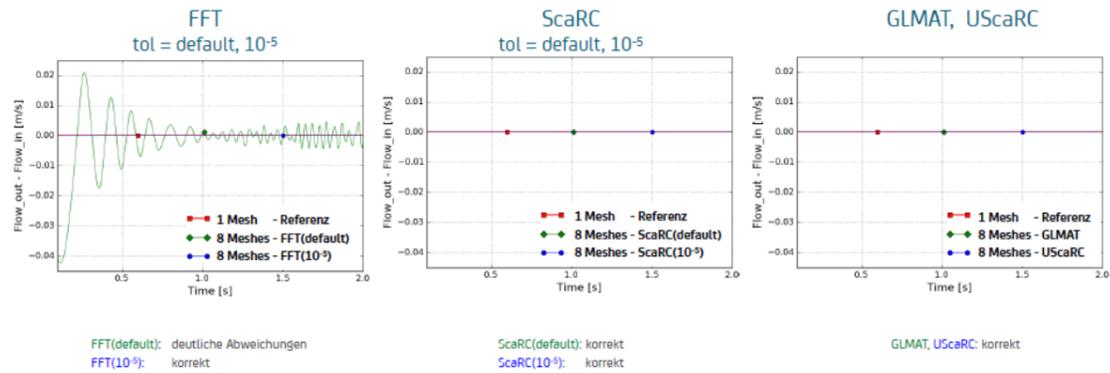
Next Generation Fire Engineering



dancing_eddies: Flow_out versus Flow_in



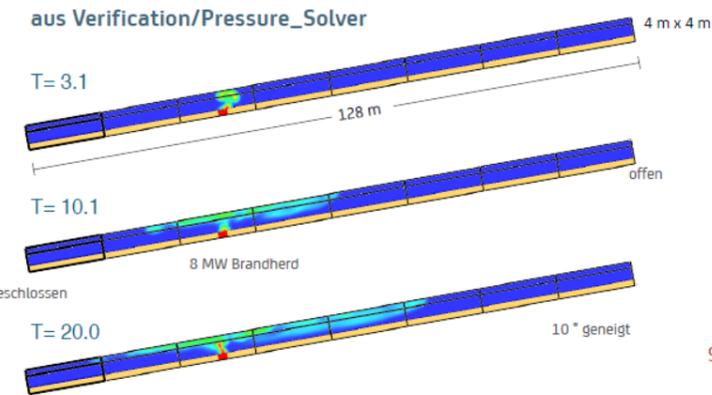
Differenz



Next Generation Fire Engineering



tunnel_demo: Langer Tunnel mit Brandherd



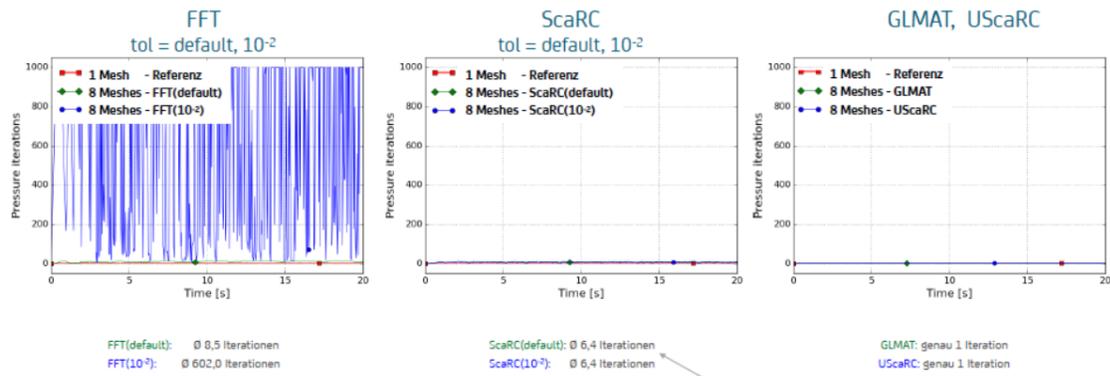
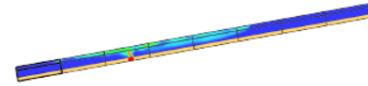
Next Generation Fire Engineering



- T_END = 20.0
- 320 x 10 x 10 Zellen
- Gitterweite 0,4 m
- linker Rand geschlossen
- rechter Rand offen

große Schwankungen im Druck

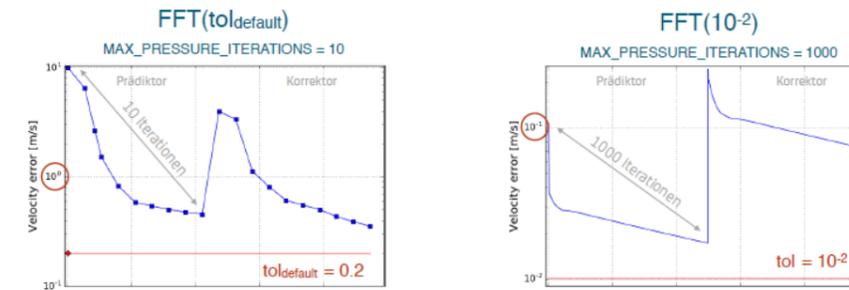
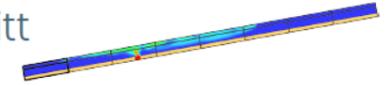
tunnel_demo: Pressure Iterations



keine inneren Obstructions,
daher gleich



tunnel_demo: Exemplarischer Zeitschritt

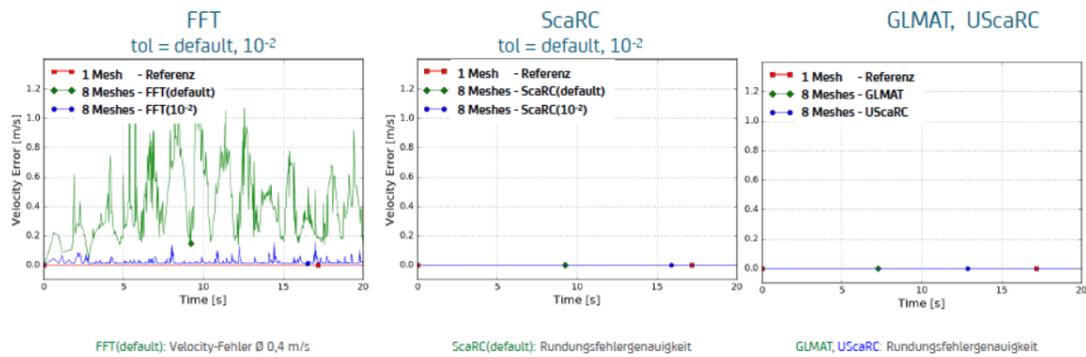
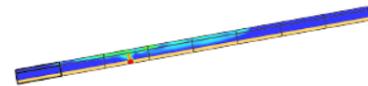


selbst die grobe Default-Toleranz wird nach
10 Default-Iterationen NICHT erreicht

extrem langsame Konvergenz, selbst nach
1000 Iterationen wird 10^{-2} nicht erreicht



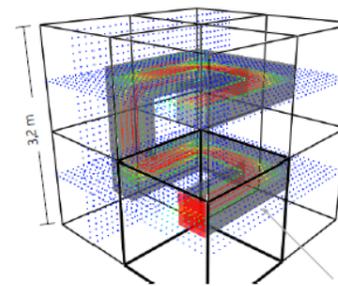
tunnel_demo: Velocity Error



DUCT_FLOW: Kanaldurchströmung



aus Verification/Pressure_Solver

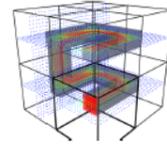
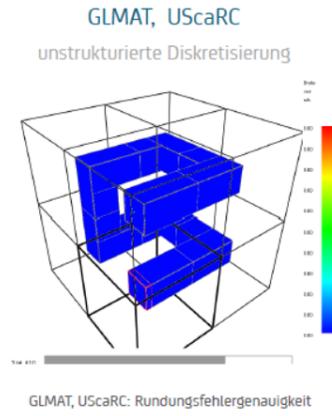
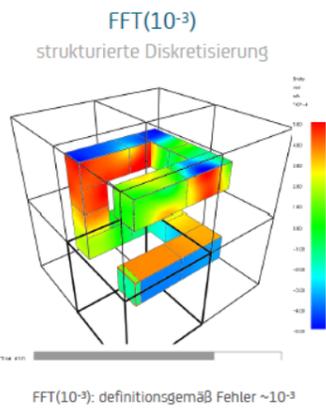


Obstructions mit
Null-Zellen-Dicke

- Einströmung mit VOLUME_FLOW = 1
- T_END = 10
- 32³ Gitterzellen gesamt
- innen liegender, verwinkelter Kanal



DUCT_FLOW: Velocity error entlang Kanal



Next Generation Fire Engineering



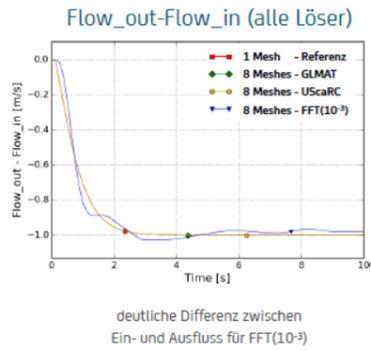
4
Fazit und Ausblick

Fazit

Next Generation Fire Engineering



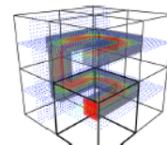
DUCT_FLOW: Verschiedene Vergleiche



Speicherbedarf GLMAT-Löser

#Zellen	A	L	Faktor
32 ³	125.605	4.513.040	x 36
64 ³	1.027.008	82.630.016	x 81
128 ³	8.300.736	1.693.459.406	x 204

extrem hoher Speicherbedarf für GLMAT im Fall feiner Gitterauflösungen



Next Generation Fire Engineering



Bisheriges Fazit

Löser	Diskretisierung		zusätzliche Geschwindigkeits-Korrektur nötig?	zusätzlicher Speicherbedarf	Laufzeit-Effizienz
	strukturiert	unstrukturiert			
FFT(tol)	ja	nein	ja	sehr gering	für Single-Mesh extrem hoch, aber schlechte Skalierbarkeit
GLMAT	ja	ja	nein	sehr hoch	teure Initialisierung, gute bis moderate Skalierbarkeit
ScaRC	ja	ja	nein	gering	moderate Skalierbarkeit, noch Optimierungspotential

Next Generation Fire Engineering

4
Fazit





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.

"Mir, als Mathematikerin mit dem Schwerpunkt Numerik geht es vor allem um die Optimierung des mathematischen Kerns. Das vorrangige Ziel besteht darin, durch das Design und die Implementierung eines optimierten Drucklösers die Qualität und Zuverlässigkeit der parallelen Programmversion erheblich zu verbessern, sodass mittelfristig der Übergang auf massiv parallele Anwendungen möglich ist. Langfristig möchte ich durch adaptive Gitterverfeinerungstechniken eine Verbesserung der Auflösungsgenauigkeit erreichen."

Dr. Susanne Kilian
Initiatorin der FDS Usergroup

hhpberlin 

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

ISSN 2191-463X
11. Tagungsband
FDS Usergroup
Jahrgang 2017