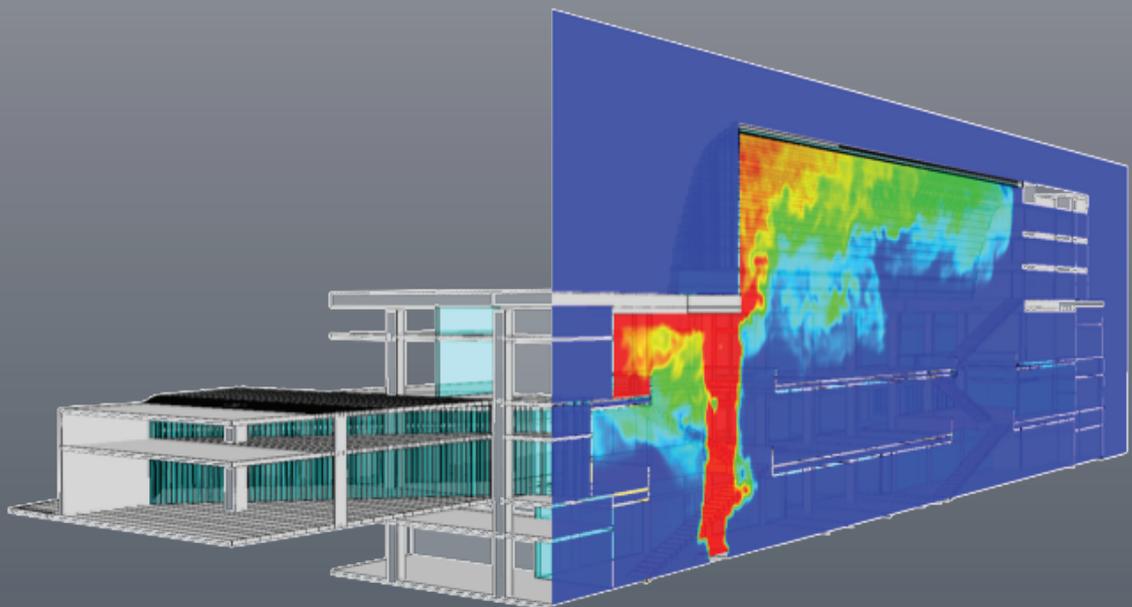


## 12. ANWENDERTREFFEN DER FDS USERGROUP

### **TAGUNGSBAND** ZUSAMMENSTELLUNG DER VORTRÄGE

Datum:  
8. - 9.11.2018  
Ort:  
hhpberlin  
Rotherstraße 19  
10245 Berlin



## INHALT

## Vorträge 8.11.2018

Ermittlung von Naturbrandeinwirkungen mit FDS - Anwendungshinweise bei der Temperaturberechnung Manuel Osburg	4
Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers in drei Dimensionen Max Böhler	21
Rauchausbreitung bei tiefen Temperaturen Jürgen Will	35
Anwendung von Entrauchungssimulationen innerhalb schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte bzw. im Kontext von Abweichungsbegründungen Andreas Dahlitz	53
Überprüfung einer RDA-Planung mit FDS-HVAC Benjamin Schröder	73
Schutzzielorientierte Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen für eine bestehende Verkaufsstätte - Herausforderungen und Lösungsansätze Simon Wollny	95
News rund um ScaRC und das NIST Susanne Kilian	111

## INHALT

## Vorträge 9.11.2018

Theoretische Untersuchungen des FDS-Pyrolysemodells im Hinblick auf die Anwendbarkeit bei nachwachsenden Rohstoffen Jens Spille	133
PROPTI - Framework zur Abschätzung der materialspezifischen Parameter zur Pyrolysemodellierung Patrick Lauer	151
The use of FDS for fire investigation Bjarne Husted	167
Visualisierung von Brand- und Personenstromsimulationen Generierung von ASET-, RSET- und Differenzkarten Robert Weiße	189
Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken Claudia Book	205
Einführung „Wassernebel mit FDS“ Stephan Klüh	223

**Manuel Osburg:**

**Ermittlung von Naturbrandeinwirkungen mit FDS -  
Anwendungshinweise bei der Temperaturberechnung**

**Abstract:**

Durch die bauaufsichtliche Einführung der Eurocodes wird die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken auf Grundlage von Naturbrandbeanspruchungen ermöglicht. Im Gegensatz zur herkömmlichen Bemessung nach Einheits-Temperaturzeitkurve kann dadurch eine realistische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken erfolgen.

Bei der Anwendung von Naturbrandmodellen nach Eurocode 1 Teil 1-2 wird zwischen vereinfachten Brandmodellen und allgemeinen Brandmodellen unterschieden.

Als Vertreter allgemeiner Brandmodelle hat sich das Feldmodell Fire Dynamics Simulator (FDS) etabliert. Im Ergebnis der Anwendung dieses Feldmodells kann die sogenannte adiabate Oberflächentemperatur in der Umgebung des Bauteils berechnet werden. Die adiabate Oberflächentemperatur beinhaltet die thermischen Einwirkungen aus Konvektion und Strahlung und ersetzt die differenzierte Angabe der Gas- und Strahlungstemperatur.

Neben der adiabaten Oberflächentemperaturen können aber auch noch eine Reihe anderer Temperaturklassen berechnet werden. Dabei kann die unbedachte Verwendung des Parameters „Temperatur“ zu Fehlanwendungen führen.

Bei der Anwendung des Feldmodells FDS zur Ermittlung von Naturbrandeinwirkungen ergeben sich regelmäßig wichtige Erkenntnisse, welche mit den Teilnehmern der FDS Usergroup geteilt werden sollen. Darüber hinaus soll zum gegenseitigen Erfahrungsaustausch angeregt werden.



**Ermittlung von Naturbrandeinwirkungen mit FDS –  
Anwendungshinweise bei der Temperaturberechnung**

„Warum Temperatur nicht gleich Temperatur ist“

**Manuel Osburg, M.Sc.**

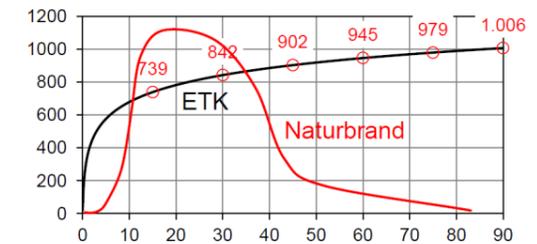
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
08.11.-09.11.2018 in Berlin

**Eurocode-Brandschutznachweis**



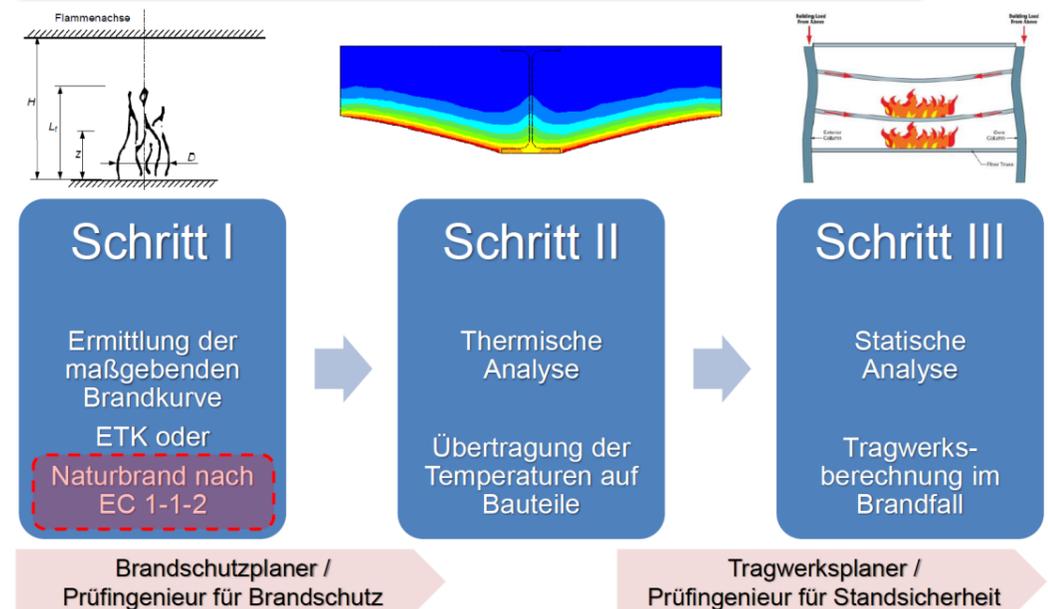
- Anwendung des Eurocode-Nachweisverfahrens ermöglicht die Bemessung von Bauteilen und Tragwerken auf der Grundlage von **Naturbrandbeanspruchungen** in Abhängigkeit der Art und Nutzung des Gebäudes sowie der brandschutztechnischen Infrastruktur

- Realistischere Bemessung im Gegensatz zur üblichen Bemessung nach ETK  
→ Ursprung: ASTM E119 (1918 erstveröffentlicht)



- Ergebnis der Bemessung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen auf der Grundlage von Naturbrandmodellen bedarf einer **Abweichung** nach § 67 Abs. 1 MBO bzw. einer **Erleichterung** nach § 51 MBO (Feuerwiderstandsklasse ist an Einheits-Temperaturzeitkurve gekoppelt!)

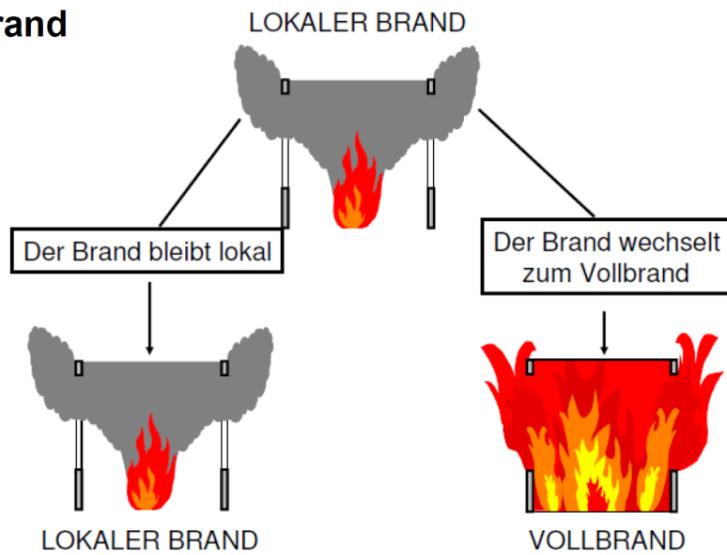
**Eurocode-Brandschutznachweis**



Eurocode-Brandschutznachweis



Naturbrand



Eurocode-Brandschutznachweis



Naturbrandmodelle nach EC 1-1-2

a) Vereinfachte Brandmodelle

- für Vollbrände
  - Parametrische Temperaturzeitkurven (EC 1-1-2/NA Anhang AA)
  - Einwirkungen auf außenliegende Bauteile (EC 1-1-2 Anhang B)
- für lokale Brände
  - Beschreibung mit Hilfe von Plume-Modellen (EC 1-1-2 Anhang C)

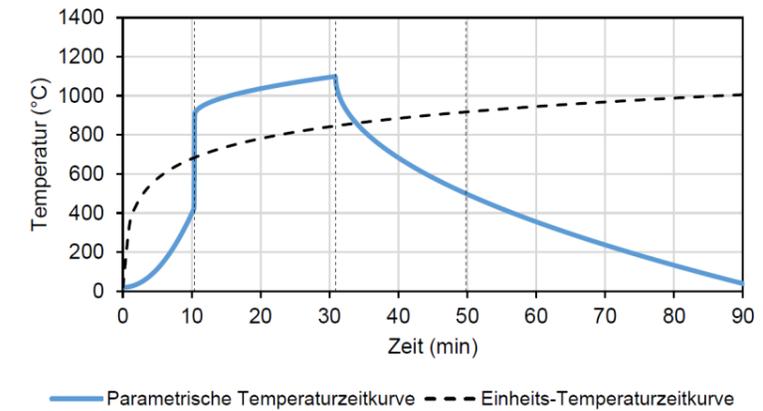
b) Allgemeine Brandmodelle (EC 1-1-2 Anhang D)

- Ein-Zonen-Modelle
- Zwei-Zonen-Modelle
- Feldmodelle

Anwendung und Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2/NA Anhang AA



Ermittlung individueller Temperaturzeitkurven für kleine bis mittelgroße Räume ( $A < 400 \text{ m}^2$ ) durch Anwendung des vereinfachten Naturbrandmodells „Parametrischer Temperaturzeitkurven“ nach EC 1-1-2/NA:

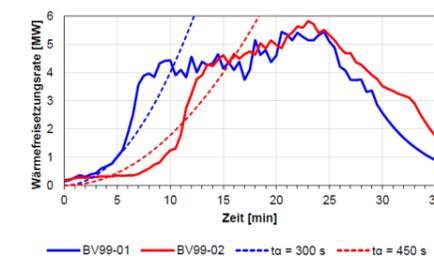


Anwendung und Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2/NA Anhang AA



Stichprobenartige Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2/NA Anhang AA für zwei Brandversuche:

Versuch	BV99-01	BV99-02
Nutzungsszenario	Wohnraum (identische Möblierung)	
Zündszenario	400 ml Isopropanol auf Polstermöbel	100 g Papierkissen auf Polstermöbel



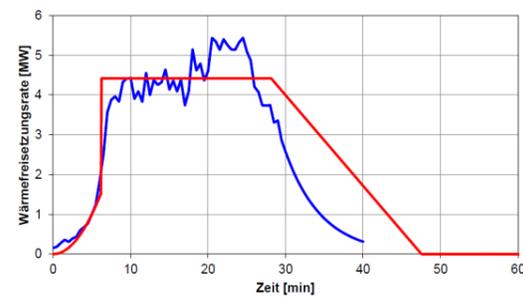
Anwendung und Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2/NA Anhang AA



BV99-01

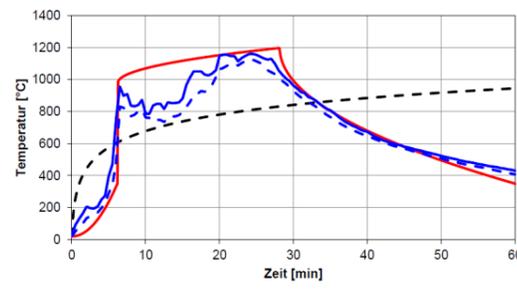
Wärmefreisetzungsrate

EC 1-1-2/NA Anhang BB



Temperaturzeitkurve

Naturbrandmodell nach EC 1-1-2/NA Anhang AA



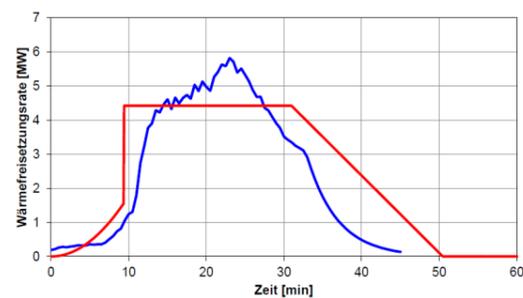
Anwendung und Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2/NA Anhang AA



BV99-02

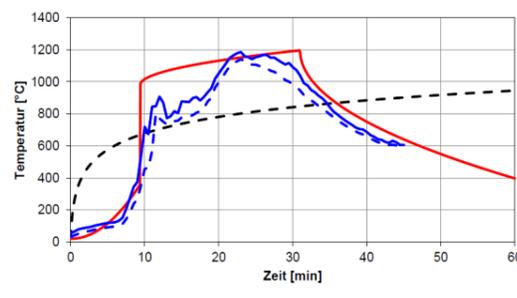
Wärmefreisetzungsrate

EC 1-1-2/NA Anhang BB



Temperaturzeitkurve

Naturbrandmodell nach EC 1-1-2/NA Anhang AA



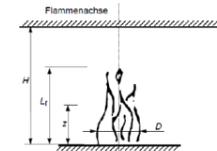
Anwendung und Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2 Anhang C



- Zehfuß: Naturbrandbeanspruchungen für große Räume ( $A > 400 \text{ m}^2$ ), hohe Räume ( $H > 6 \text{ m}$ ) und Freibrände können durch Anwendung des o. g. Naturbrandmodells für „Lokale Brände“ berechnet werden.

- Die Temperatur  $\theta_{(z)}$  entlang der vertikalen Symmetrieachse der Flamme wird berechnet mit:

$$\theta_{(z)} = 20 + 0,25 \cdot \dot{Q}_c^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \leq 900$$



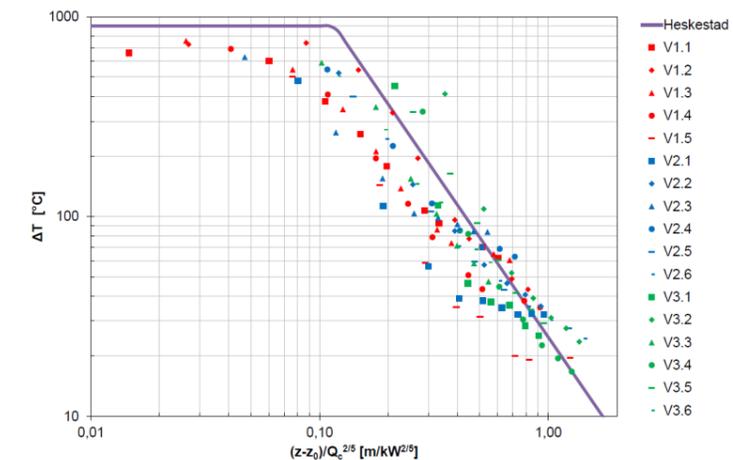
- EC 1-1-2/NA verweist für Hintergrundinformationen zum Anwendungsbereich und den Anwendungsgrenzen auf den Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes:

„Die wesentlichste Einschränkung ... stellt die Überlagerung von Plume- und Rauchgasschicht dar. Mit zunehmender Branddauer bildet sich eine Rauchgasschicht aus, wodurch der Plume ab dem Eindringen in diese Schicht keine kühle Umgebungsluft mehr einmischt, sondern Rauchgase mit erhöhter Temperatur. Aufgrund dieser Zusammenhänge gelten die o. g. Formeln nur im Freien oder in der Anfangsphase eines Brandes.“

Anwendung und Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2 Anhang C



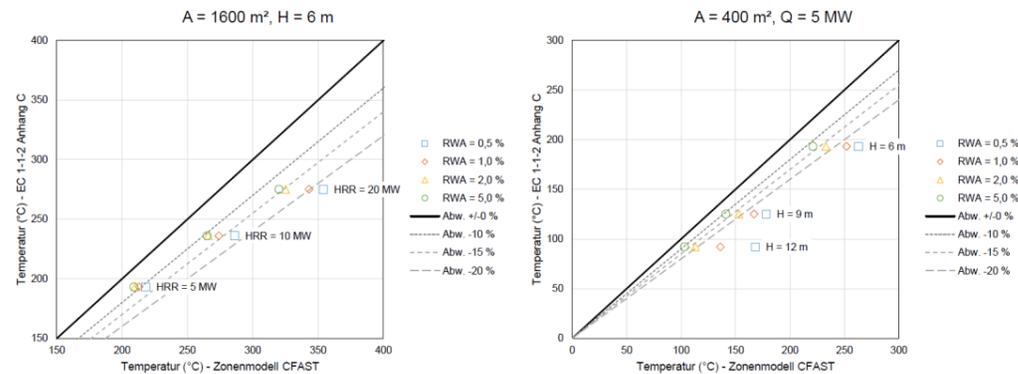
Überprüfung des Naturbrandmodells für lokale Brände durch Vergleich mit Ergebnissen aus Brandversuchen:



## Anwendung und Überprüfung des vereinfachten Naturbrandmodells nach EC 1-1-2 Anhang C



Vergleichende Anwendung des Naturbrandmodells „Lokale Brände“ sowie des Zonenmodells CFAST (→ berücksichtigt Einfluss der Rauchgasschicht) für große Räume ( $A > 400 \text{ m}^2$ ) und hohe Räume ( $H > 6 \text{ m}$ ) mit Variation der RWA-Fläche.



## Auswahl eines geeigneten Naturbrandmodells



Durch stichprobenartige Überprüfung anhand von Brandversuchen konnte die grundsätzliche Eignung der Naturbrandmodelle

- **Parametrische Temperaturzeitkurven** nach EC 1-1-2/NA Anhang AA
- **Lokale Brände** nach EC 1-1-2 Anhang C

für die Ermittlung von Temperaturzeitkurven nachgewiesen werden.

Brandszenario / Fragestellung	Vereinfachtes Naturbrandmodell	Allgemeines Naturbrandmodell
Kleine bis mittelgroße Räume ( $A < 400 \text{ m}^2$ )	Vollbrand EC 1-1-2/NA Anhang AA	Zonenmodell
Große Räume ( $A > 400 \text{ m}^2$ )	Lokale Brände* EC 1-1-2 Anhang C	Zonenmodell Feldmodell
Hohe Räume ( $H > 6 \text{ m}$ ), z. B. Atrien	Lokale Brände* EC 1-1-2 Anhang C	Feldmodell
Freibrände	Lokale Brände EC 1-1-2 Anhang C	Feldmodell

\*) Die Anwendung des Naturbrandmodells für **Lokale Brände** nach EC 1-1-2 Anhang C für geschlossene Räume setzt das Vorhandensein einer ausreichend großen RWA-Fläche voraus.

## Grundlagen Wärmeübertragung



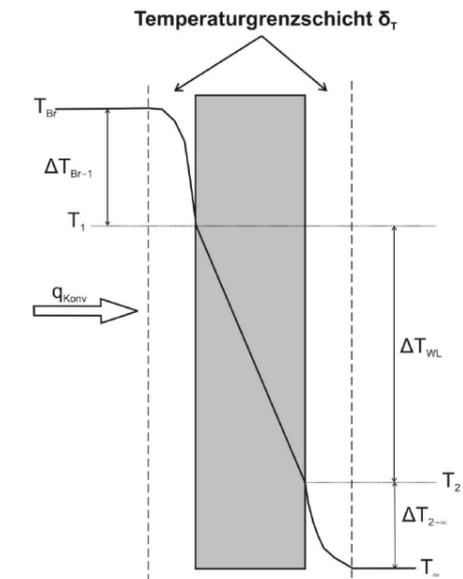
Einfachster Fall:

- Stationarität
- nur Konvektion

$$\Delta T_{Br \rightarrow 1} = f(\alpha)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{fl}}{l_{ch}}$$

$$Nu = \begin{cases} Nu_{fr} = f(Gr, Pr) \\ Nu_{erzw} = f(Re, Pr) \end{cases}$$



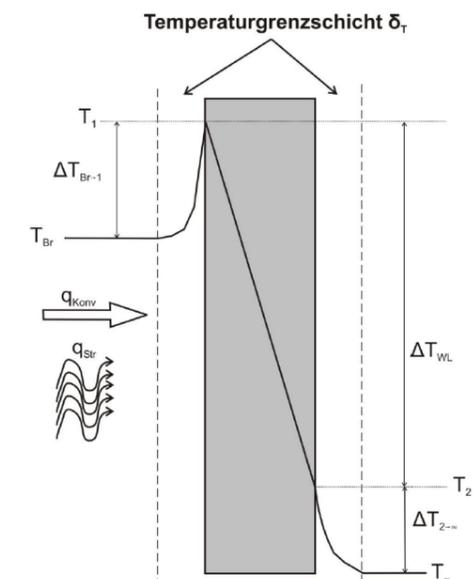
## Grundlagen Wärmeübertragung



Etwas komplexer:

- Stationarität
- Konvektion und Strahlung

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}$$



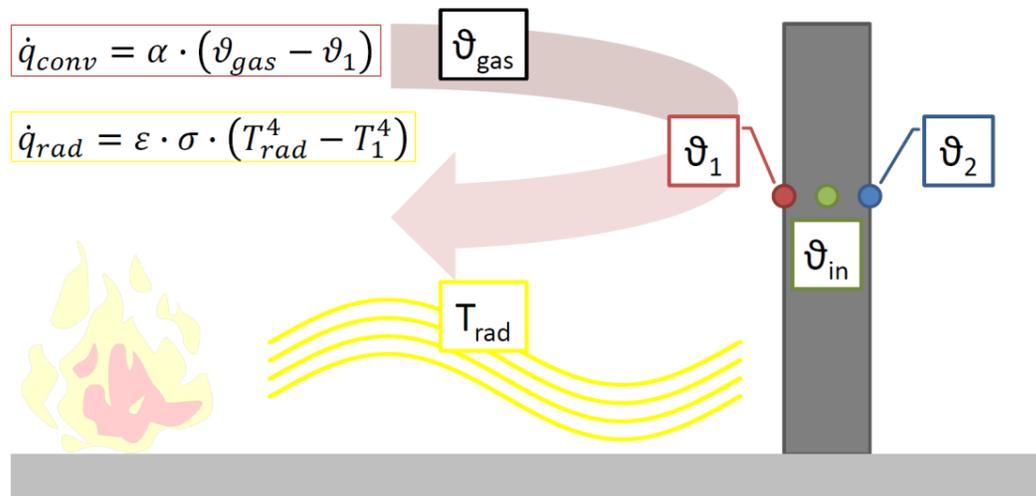
## Temperaturen unter Brandbedingungen



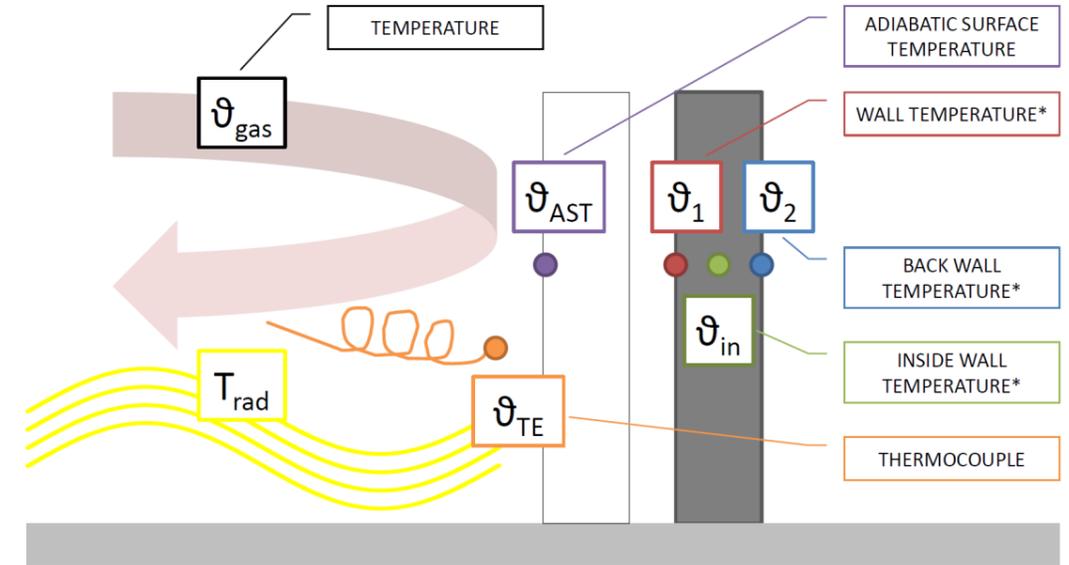
$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}$$

$$\dot{q}_{conv} = \alpha \cdot (\vartheta_{gas} - \vartheta_1)$$

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{rad}^4 - T_1^4)$$



## „Temperaturmessung“ mit FDS



\* aktuell nur für eindimensionale Wärmeleitung durch Platten geeignet

## Konzept der adiabaten Oberflächentemperatur (AST)

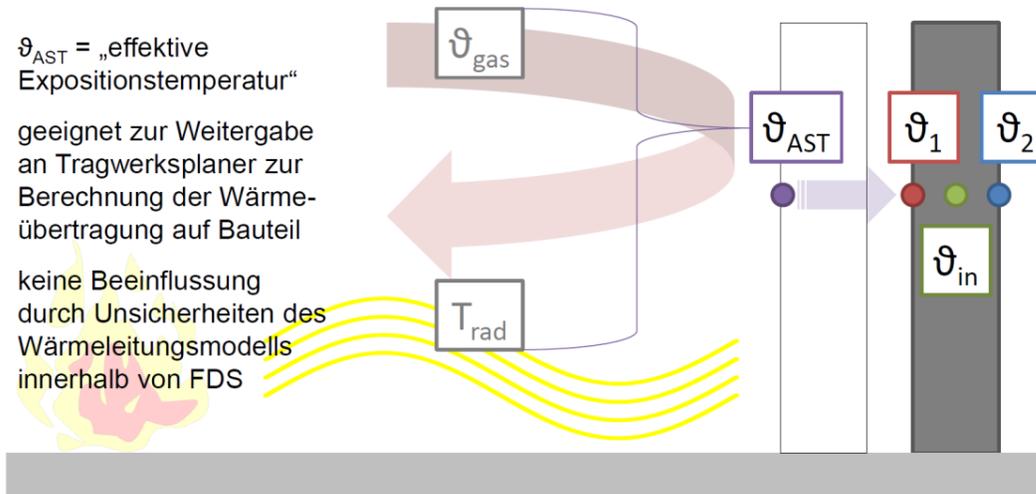


$$\dot{q}_{net} = 0 = \alpha \cdot (\vartheta_{gas} - \vartheta_{AST}) + \varepsilon \cdot (\dot{q}_{rad} - \sigma \cdot T_{AST}^4)$$

$\vartheta_{AST}$  = „effektive Expositionstemperatur“

geeignet zur Weitergabe an Tragwerksplaner zur Berechnung der Wärmeübertragung auf Bauteil

keine Beeinflussung durch Unsicherheiten des Wärmeleitungsmodells innerhalb von FDS



## FDS-Example „adiabatic\_surface\_temperature“

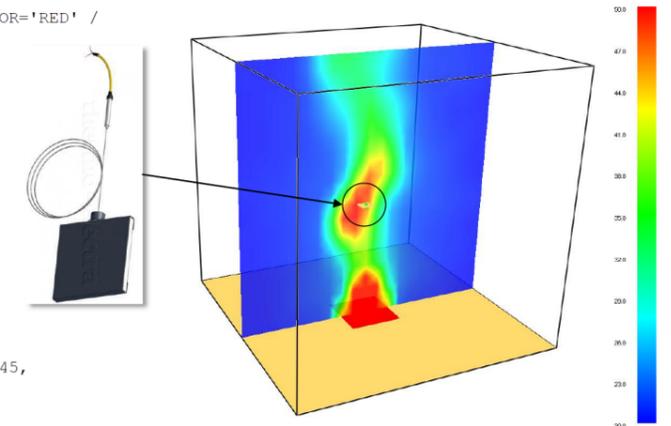


```
&SURF ID='HOT', TMP_FRONT=1000., COLOR='RED' /

&SURF ID='plate'
  MATL_ID='STEEL'
  HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT=10.
  THICKNESS = 0.0001
  BACKING = 'INSULATED'
  EMISSIVITY = 0.9 /

&MATL ID='STEEL'
  CONDUCTIVITY=50.
  SPECIFIC_HEAT=0.5
  DENSITY=6000. /

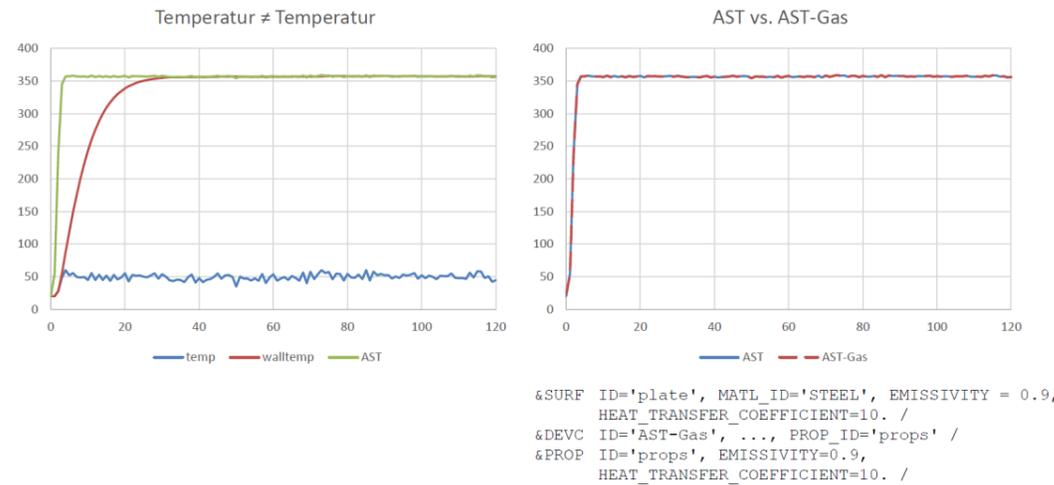
&OBST XB=0.50,0.55,0.50,0.55,0.45,0.45,
  SURF_ID='plate' /
```



```
&DEVC ID='temp', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.52,0.52,0.45 /
&DEVC ID='walltemp', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.52,0.52,0.45, IOR=-3 /
&DEVC ID='AST', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.52,0.52,0.45, IOR=-3 /
&DEVC ID='AST-Gas', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS', XYZ=0.52,0.52,0.44,
  ORIENTATION=0,0,-1, PROP_ID='props' /

&PROP ID='props', EMISSIVITY=0.9, HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT=10. /
```

## FDS-Example „adiabatic\_surface\_temperature“



## Wärmeübergangskoeffizient



### Default Convective Heat Transfer Model

In an LES calculation, the convective heat transfer coefficient,  $h$ , is based on a combination of natural and forced convection correlations:

$$q_c'' = h(T_g - T_w) \quad \text{W/m}^2 \quad ; \quad h = \max \left[ C|T_g - T_w|^{1/3}, \frac{k}{L} \text{Nu}, \frac{k}{\delta n/2} \right] \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (11.1)$$

where  $C$  is an empirical coefficient for natural convection (1.52 for a horizontal plate and 1.31 for a vertical plane or cylinder) [22],  $L$  is a characteristic length related to the size of the physical obstruction,  $k$  is the thermal conductivity of the gas, and  $\delta n$  is the gas phase cell size. The Nusselt number (Nu) depends on the geometric and flow characteristics. For many flow regimes, it has the form:

$$\text{Nu} = C_1 + C_2 \text{Re}^n \text{Pr}^m \quad ; \quad \text{Re} = \frac{\rho |u| L}{\mu} \quad ; \quad \text{Pr} = 0.7 \quad (11.2)$$

For planar surfaces, the default values are  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = 0.037$ ,  $n = 0.8$ ,  $m = 0.33$ , and  $L = 1$  m. For cylindrical surfaces, the default values are  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = 0.683$ ,  $n = 0.466$ ,  $m = 0.33$ , and  $L = D$ , the diameter of the cylinder. For spherical surfaces, the default values are  $C_1 = 2$ ,  $C_2 = 0.6$ ,  $n = 0.5$ ,  $m = 0.33$ , and  $L = D$ , the diameter of the sphere. Note that for a sphere, the coefficient for natural convection,  $C$ , is assumed to be zero. It is possible to change these values for a particular application, but it is not possible to find a set of parameters that is appropriate for the wide variety of scenarios considered. Various correlations for planes, cylinders, and spheres can be found in Refs. [22, 23].

## Wärmeübergangskoeffizient



### Specified Convective Heat Transfer Coefficient

If you want to specify the convective heat transfer coefficient, you can set it to a constant using HEAT\_TRANSFER\_COEFFICIENT on the SURF line in units of  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . If the back side of the solid obstruction faces the exterior of the computational domain and the solid conducts heat, you can specify the heat transfer coefficient of the back side using HEAT\_TRANSFER\_COEFFICIENT\_BACK. This back side condition is appropriate for a SURF line with BACKING='VOID' or BACKING='EXPOSED'.

### DIN EN 1991-1-2

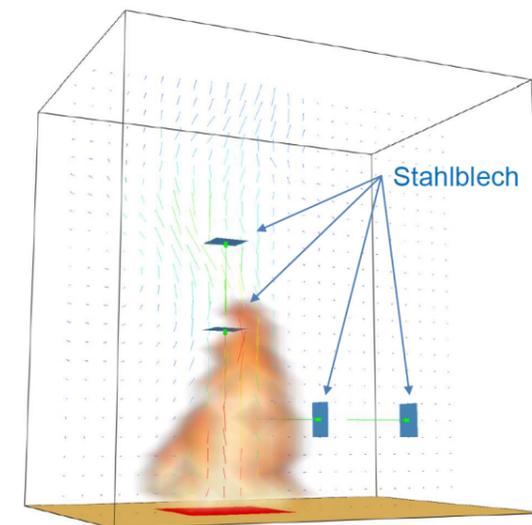
#### 3 Thermische Einwirkungen für die Temperaturberechnung

#### 3.3 Naturbrandmodelle

#### 3.3.2 Allgemeine Brandmodelle

(3) Wenn nicht genauere Informationen zur Verfügung stehen, sollte der Wärmeübergangskoeffizient für den konvektiven Wärmeübergang  $\alpha_c = 35 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  verwendet werden.

## Erweiterung des Beispiels...



### „Temperaturmessung“ mit FDS:

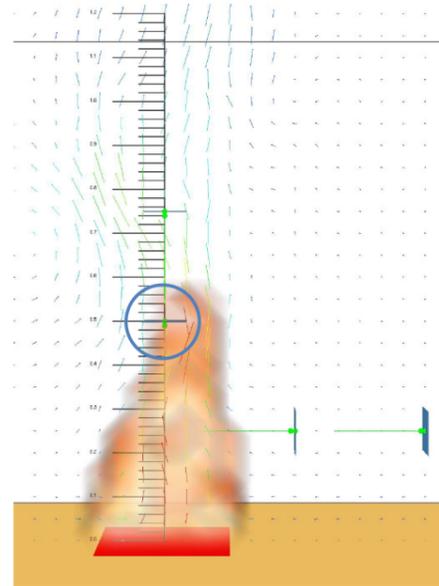
Gastemperatur:  
„TEMPERATURE“

Oberflächentemperatur:  
„WALL TEMPERATURE“

Adiabate Oberflächentemperatur  
(mit Oberfläche des Stahlblechs verknüpft,  
IOR = +/- 1/2/3):  
„ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE“

Adiabate Oberflächentemperatur „Gas“  
(Initialisierung eines Partikels, erfordert keine Oberfläche,  
ORIENTATION = +/- X, +/- Y, +/- Z, PROP\_ID):  
„ADIABATIC SURFACE TEMP. GAS“

### Erweiterung des Beispiels...



```
&DEVC ID='temp', QUANTITY='TEMPERATURE',
XYZ=0.0,0.0,0.49 /

&DEVC ID='wtemp',
QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.0,0.0,0.5, IOR=-3 /

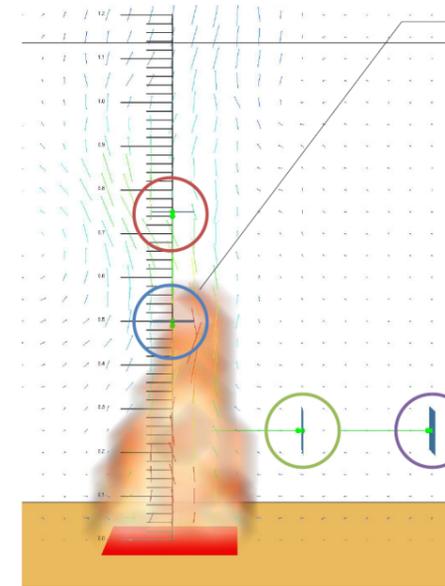
&DEVC ID='AST',
QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE',
XYZ=0.0,0.0,0.5, IOR=-3 /

&DEVC ID='ASTG',
QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
XYZ=0.0,0.0,0.49, ORIENTATION=0,0,-1,
PROP_ID='prop' /

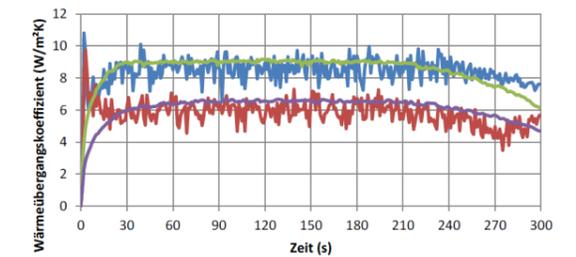
&PROP ID='prop', EMISSIVITY=0.7,
HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT=35 /
```

Vorgabe EC1-1-2

### Erweiterung des Beispiels...

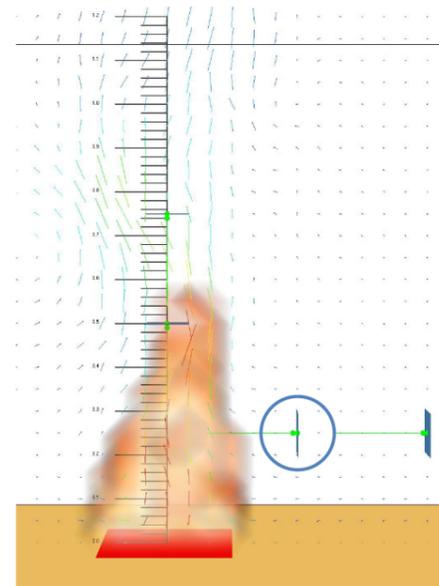


```
&DEVC ID='Z0.50_HTC', QUANTITY='HEAT TRANSFER
COEFFICIENT', XYZ=0.0,0.0,0.5, IOR=-3 /
```



$$h = \max \left[ C |T_g - T_w|^{\frac{1}{3}}, \frac{k}{L} Nu, \frac{k}{\delta n/2} \right] \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

### Erweiterung des Beispiels...



```
&DEVC ID='temp', QUANTITY='TEMPERATURE',
XYZ=0.29,0.0,0.25 /

&DEVC ID='wtemp',
QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.3,0.0,0.25, IOR=-1 /

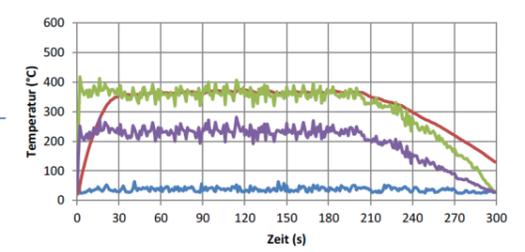
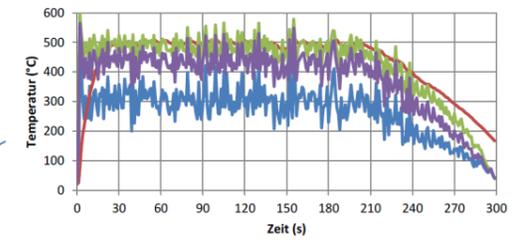
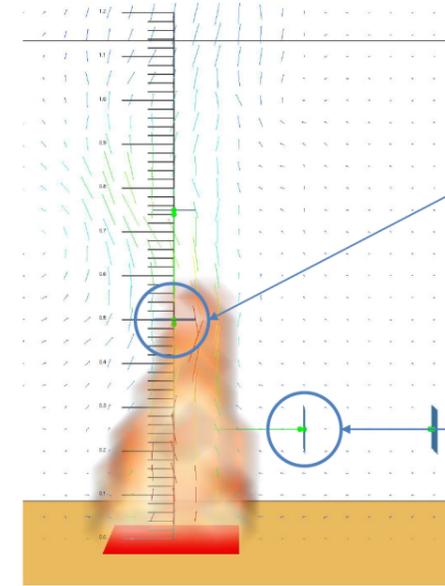
&DEVC ID='AST',
QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE',
XYZ=0.3,0.0,0.25, IOR=-1 /

&DEVC ID='ASTG',
QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
XYZ=0.29,0.0,0.25, ORIENTATION=-1,0,0,
PROP_ID='prop' /

&PROP ID='prop', EMISSIVITY=0.7,
HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT=35 /
```

Vorgabe EC1-1-2

### Erweiterung des Beispiels...



## Zusammenfassung



- Die vereinfachten Naturbrandmodelle sind im Rahmen ihrer Anwendungsgrenzen durchaus zur Ermittlung von Brandeinwirkungen geeignet.
- Bei der Anwendung des allgemeinen Naturbrandmodells FDS sind u. a. folgende Anwendungshinweise zu beachten:
  - Temperatur ≠ Temperatur!
  - Als Schnittstelle zwischen Brandschutzplaner und Tragwerksplaner eignet sich die Bereitstellung der adiabaten Oberflächentemperatur (AST), welche die Brandeinwirkungen aus Konvektion und Strahlung beinhaltet.
  - Dabei sollte die Auswertegröße AST ohne Vorgabe eines konstanten HTC bevorzugt werden. Die Auswertegröße AST-G eignet sich somit nur bedingt.

(3) Wenn nicht genauere Informationen zur Verfügung stehen, sollte der Wärmeübergangskoeffizient für den konvektiven Wärmeübergang  $\alpha_c = 35 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  verwendet werden.
- Darüber hinaus sind die tlw. temperaturabhängigen Materialeigenschaften gemäß den baustoffbezogenen Eurocode-Teilen ECX-1-2 zu verwenden.

## Auswahl eines geeigneten Naturbrandmodells



Brandszenario / Fragestellung	Lokaler Brand	Vollbrand
Kleine bis mittelgroße Räume ( $A < 400 \text{ m}^2$ )	[Zonen- / Feldmodell]	EC 1-1-2/NAAnhang AA
Große Räume ( $A > 400 \text{ m}^2$ )	Zonen- / Feldmodell	Feldmodell (Traveling Fire)
Hohe Räume ( $H > 6 \text{ m}$ ), z. B. Atrien	Feldmodell	Feldmodell
Freibrände (Plume: z ↑)	EC 1-1-2 Anhang C	-
Freibrände (x/y/z ↔ ↓)	Feldmodell	-

**Max Böhrer:****Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers in drei Dimensionen -  
Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D des Fire Dynamics Simulators****Abstract:**

Seit der Version 6.5.3 ermöglicht FDS die Berechnung der dreidimensionalen Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers. Während Verifizierungsrechnungen bereits vorliegen, fehlt der Abgleich mit experimentellen Daten. Im Rahmen des Vortrages werden die Forschungsergebnisse zur Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D des Fire Dynamics Simulators (Version 6.6.0) vorgestellt. Der Vortrag gliedert sich in drei Teile. Der erste Abschnitt erläutert die Funktionsweise der HT3D Funktion sowie ihren Unterschied zur eindimensionalen Wärmeleitung. Der zweite Teil beschreibt den Versuchsaufbau und dessen Durchführung sowie die Erstellung der Simulation und ihre Herausforderungen. Im letzten Teil werden Simulationen und Experimente verglichen und diskutiert. Weiterhin wird ein Ausblick auf den aktuellen Entwicklungsstand bezüglich der HT3D Funktion gegeben.

*Zusammenfassung Thesis*

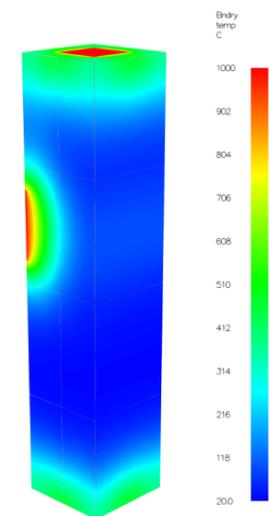
Im Rahmen der Validierung wird ein Kupferblock mit verschiedenen Materialschichten beaufschlagt und anschließend durch eine innenliegende Heizspirale erwärmt. Nach Erreichen des stationären Zustandes erfolgt die Temperaturmessung durch Thermoelemente an den Seiten der äußersten Schicht und mittels Infrarotmessung auf der Oberfläche. Nach der Berechnung der Validierungssimulation am Forschungszentrum Jülich, werden die Temperaturdaten visuell durch eine Wärmekarte dargestellt. Der darauf folgende Vergleich der Experimente mit den Simulationen zeigt, dass die physikalischen Vorgänge durch das HT3D-Modell plausibel wiedergegeben werden.

## Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers in drei Dimensionen

Validierung des Berechnungsmodells  
Solid Heat Transfer 3D des Fire Dynamics Simulators

**Inhalt**

- HT3D
  - Versionsverlauf
  - Unterschied zum Standardmodell
- Validierung
  - Experimente
  - FDS Simulationen
  - Auswertung
- Fazit



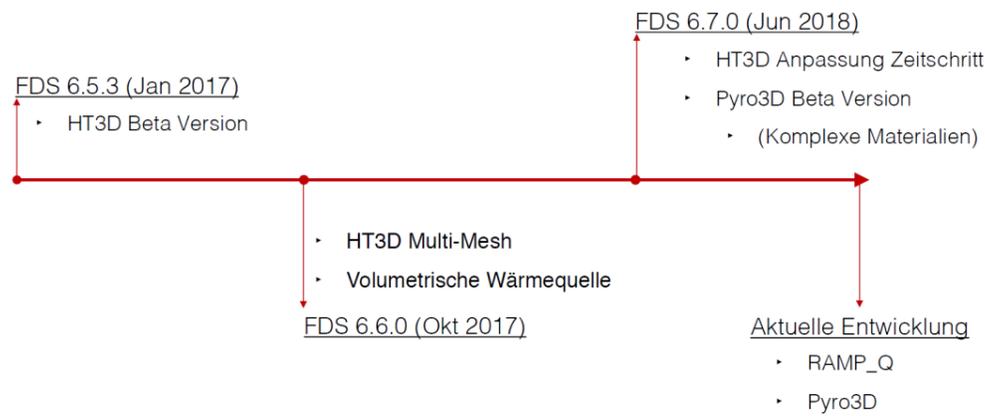
27.11.18

Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)

Seite 2

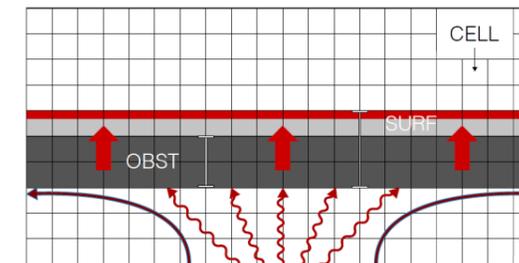
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Max Böhrer

HT3D  
Versionsverlauf



HT3D  
Unterschied zum Standardmodell

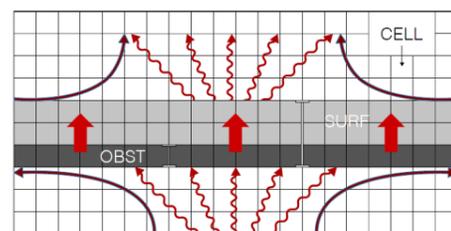
INSULATED



- OBST Dicke frei wählbar
- SURF Dicke frei wählbar
- Kein Wärmeaustausch zwischen Festkörper und Gasphase!

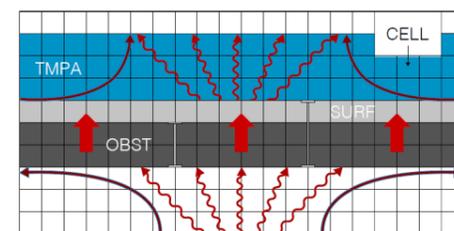
HT3D  
Unterschied zum Standardmodell

EXPOSED



- OBST Dicke  $\leq 1$  Zelle ( $\rightarrow$  ansonsten VOID)
- SURF Dicke frei wählbar
- Wärmeaustausch zwischen Festkörper und Gasphase!

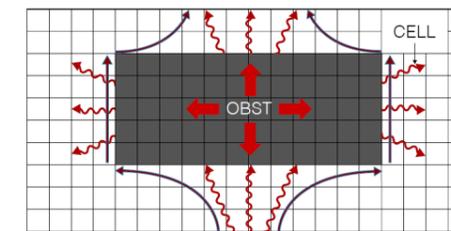
VOID



- OBST Dicke frei wählbar
- SURF Dicke frei wählbar
- Wärmeaustausch zwischen Festkörper und Gasphase mit Umgebungstemperatur (TMPA)

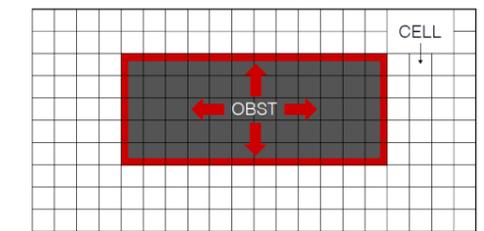
HT3D  
Unterschied zum Standardmodell

&SURF HT3D= .TRUE. .



- OBST Dicke  $\geq 1$  Zelle für jedes Material
- Information über SURF Dicke wird nicht benötigt  $\rightarrow$  OBST Dicke
- Wärmeaustausch zwischen Festkörper und Gasphase!

&SURF HT3D= .FALSE. .



- OBST Dicke  $\geq 1$  Zelle für jedes Material
- Information über SURF Dicke wird nicht benötigt  $\rightarrow$  OBST Dicke
- Kein Wärmeaustausch zwischen Festkörper und Gasphase

Validierung  
Versuchsaufbau

Kupfer  
Wärmedämmung  
Edelstahlplatte

720mm  
720mm

40mm  
20mm

27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 7 Max Böhrer

JÜLICH Forschungszentrum  
Technology Arts Sciences TH Köln  
bft COGNOS

Validierung  
Versuchsdurchführung

		Versuch					
		1	2	3	4	5	6
Spannung	[V]	80	<b>120</b>	70	<b>120</b>	40	<b>70</b>
Stromstärke	[A]	0.35	<b>0.53</b>	0.3	<b>0.58</b>	0.16	<b>0.3</b>
Leistung	[W]	28	<b>63.6</b>	21	<b>75.4</b>	6.4	<b>21</b>

		7	8	9	10	11	12
Spannung	[V]	90	<b>20</b>	40	<b>50</b>	60	110
Stromstärke	[A]	0.39	<b>0.07</b>	0.16	<b>0.2</b>	0.25	0.48
Leistung	[W]	35.1	<b>1.4</b>	6.4	<b>10</b>	15	52.8

27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 9 Max Böhrer

Validierung  
Messpositionen

Seitenansicht  
320mm  
156mm  
10mm  
10mm  
50mm  
40mm  
20mm

Schnitt B-B  
40mm  
20mm

Draufsicht  
120mm  
100mm  
60mm  
300mm  
300mm

Untersicht  
156mm

- Thermoelemente CO3-K (M)
  - ± 0.75 %
  - ± 2.20 °C
- Infrarotpistole Testo (IR)
  - ± 0.75 %
  - ± 0.75 °C

27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 8 Max Böhrer

Validierung  
FDS Geometrie

Kupferblock  
Promaldämmung  
Holzumschalung  
Edelstahl  
Berechnungsgebiet  
adiabate Randbedingung  
Holzumschalung  
Holzhalterung

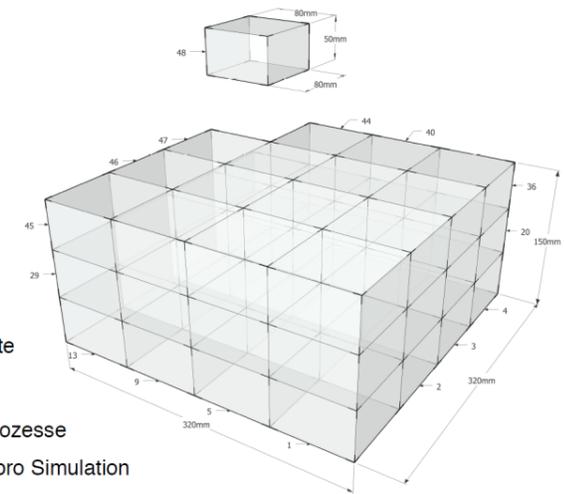
27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 10 Max Böhrer

Validierung  
FDS Materialkennwerte

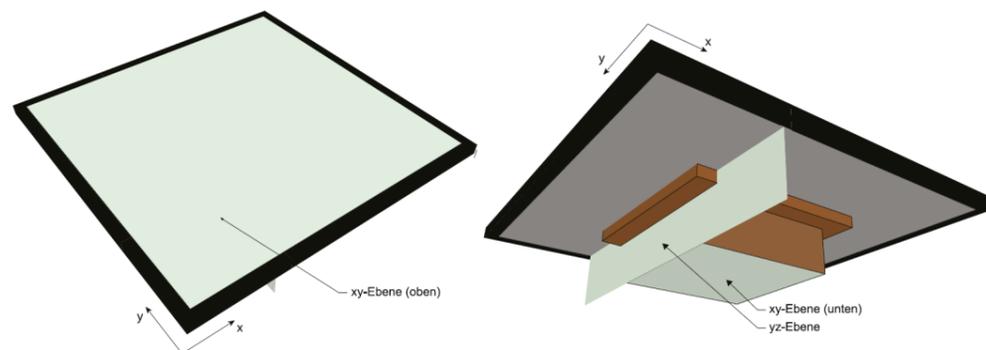
<pre>&amp;MATL ID      = 'Kupfer_prop' SPECIFIC_HEAT = 0.385 CONDUCTIVITY  = 400 DENSITY       = 8920/</pre>	<pre>&amp;MATL ID      = 'Promat_prop' SPECIFIC_HEAT = 0.95 CONDUCTIVITY  = 0.083 DENSITY       = 450/</pre>
<pre>&amp;MATL ID      = 'Holz_prop' SPECIFIC_HEAT = 1.7 CONDUCTIVITY  = 0.3 DENSITY       = 1350/</pre>	<pre>&amp;MATL ID      = 'Edelstahl_prop' SPECIFIC_HEAT = 0.5 CONDUCTIVITY  = 15 DENSITY       = 8000/</pre>

Validierung  
FDS Simulation

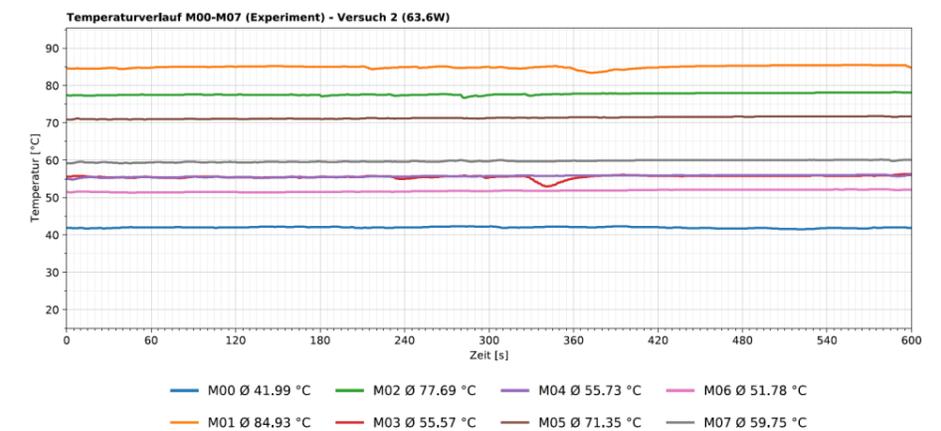
- Supercomputer JURECA am Forschungszentrum Jülich
- Zellengröße  $dx=dy=dz=0.002$  m
- 1.920.000 Zellen pro Simulation
- Hybrid-Parallelisierung mittels OpenMP / MPI
- Aufteilung in 48 Berechnungsgebiete  
→ 40.000 Zellen pro Gitter
- Jedem Gitter werden 4 OpenMP Prozesse zugeordnet = 192 Prozessorkerne pro Simulation



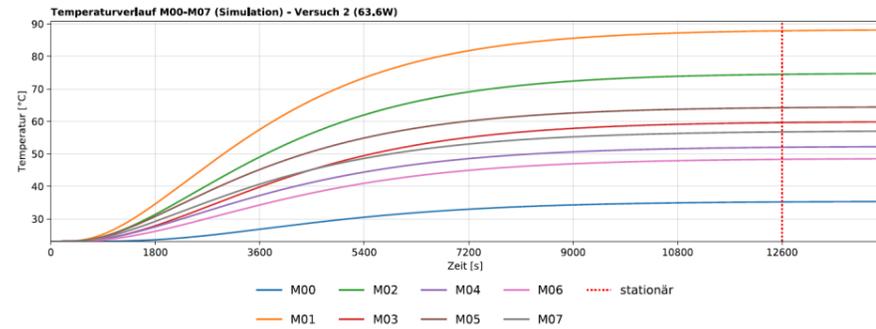
Validierung  
FDS Messflächen



Validierung  
Auswertung Experimente

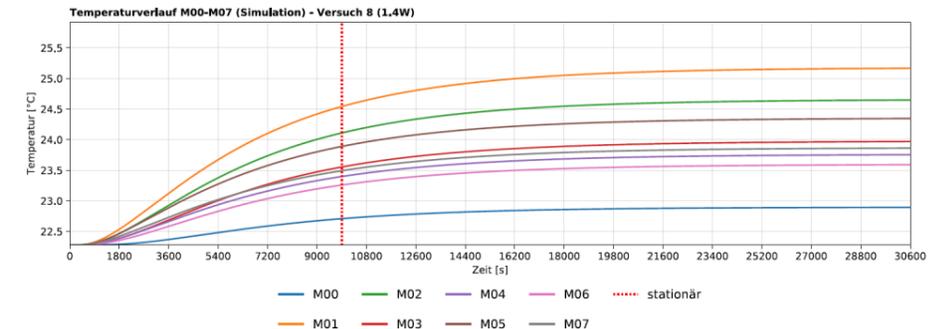


Validierung  
Auswertung Simulationen



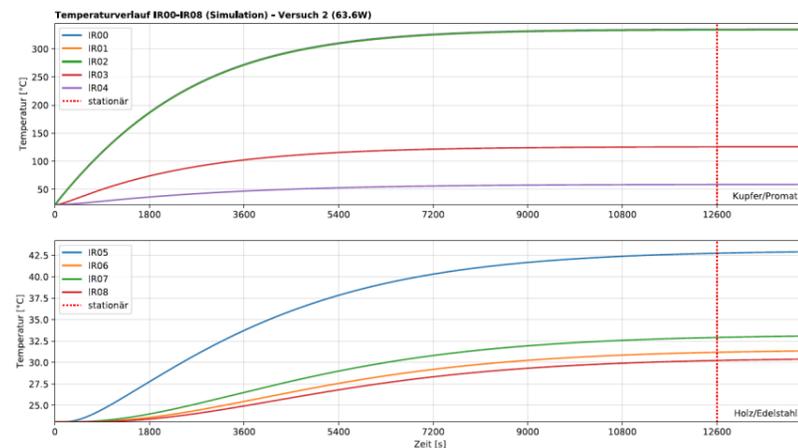
Stationärer Zustand:  $0.5 > \frac{T_{i+600} - T_i}{T_i} \cdot 100$

Validierung  
Auswertung Simulationen

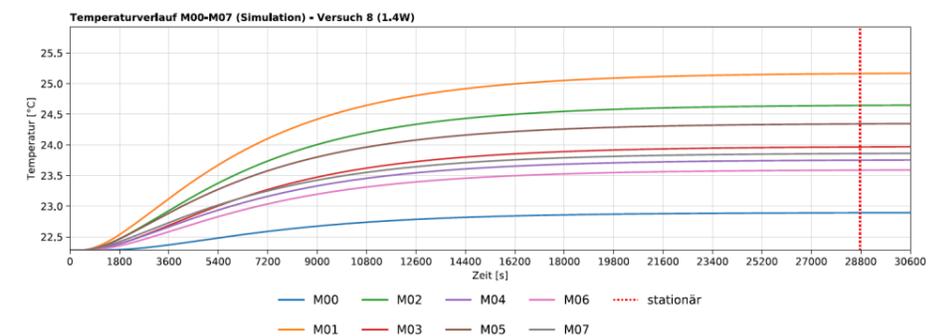


Stationärer Zustand:  $0.5 > \frac{T_{i+600} - T_i}{T_i} \cdot 100$

Validierung  
Auswertung Simulationen

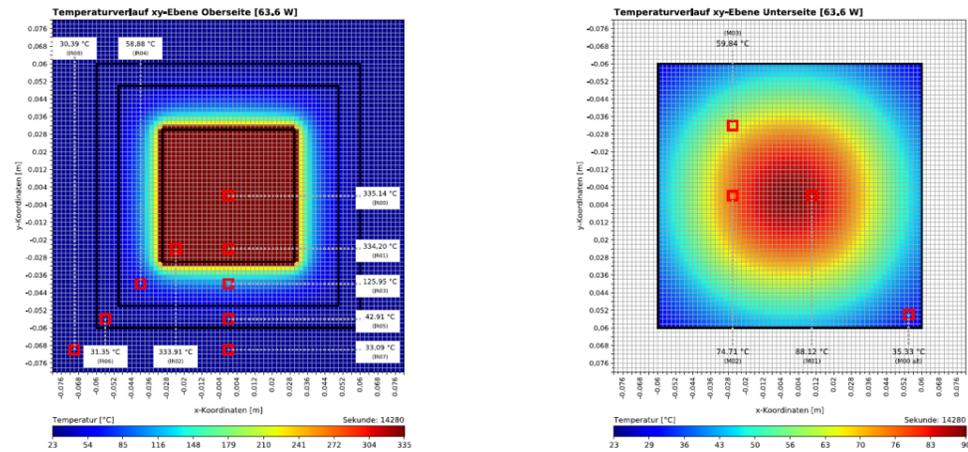


Validierung  
Auswertung Simulationen



Stationärer Zustand:  $f(T)_{\text{krit}} = (T_{i+1} - T_i)_{\text{max}} \cdot 0.005$   
 $f(T)_{\text{krit}} > (T_{i+1} - T_i)$

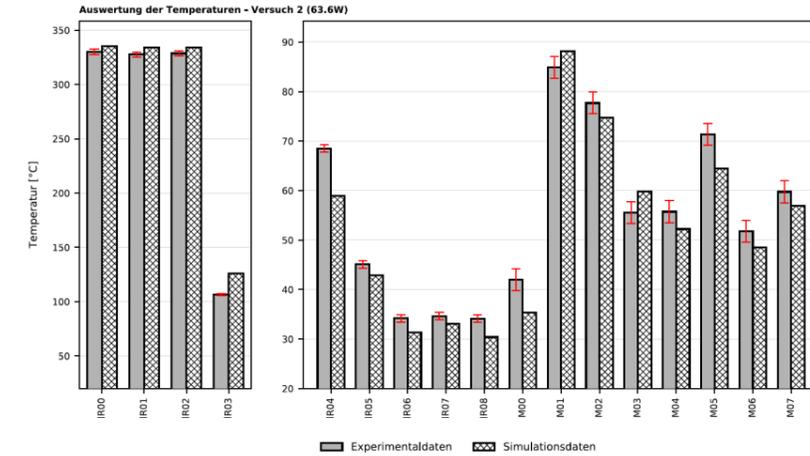
Validierung  
Auswertung Simulationen - Heatmap



27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 19 Max Böhrer



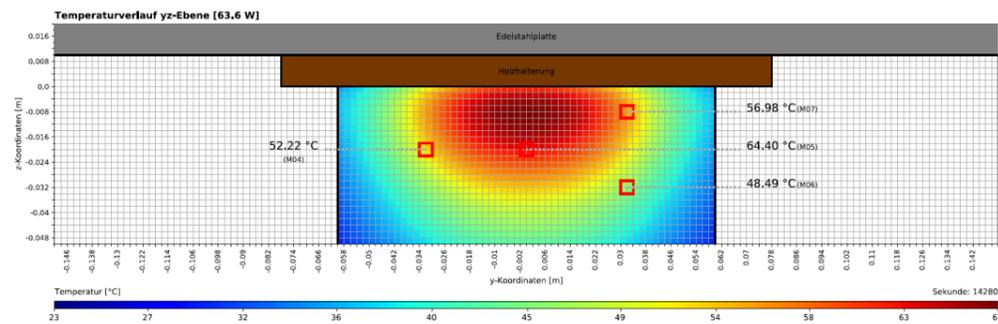
Validierung  
Vergleich Experimente und Simulationen



27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 21 Max Böhrer



Validierung  
Auswertung Simulationen - Heatmap



27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 20 Max Böhrer



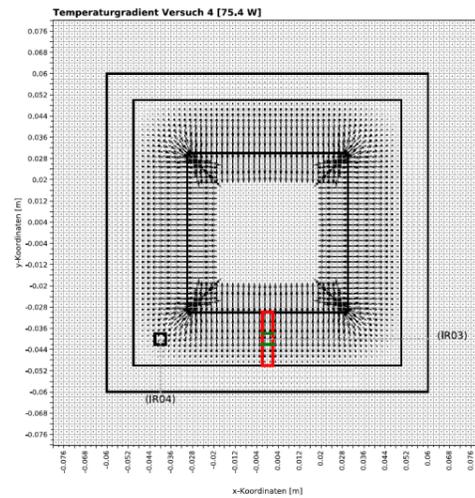
Validierung  
Vergleich Experimente und Simulationen

Versuch 2 - 63.6 W					
Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation					
	$\Delta T_{abs}$ [°C]	$\Delta T_{rel}$ [%]		$\Delta T_{abs}$ [°C]	$\Delta T_{rel}$ [%]
IR00	-5.14 (2.66)	-1.53 (0.79)	IR01	-6.60 (4.14)	-1.97 (1.24)
IR02	-5.21 (2.75)	-1.56 (0.82)	IR03	-19.55 (18.76)	-15.52 (14.89)
IR04	9.62 (8.87)	16.34 (15.06)	IR05	2.19 (1.44)	5.11 (3.36)
IR06	2.85 (2.10)	9.10 (6.71)	IR07	1.51 (0.76)	4.58 (2.31)
IR08	3.71 (2.96)	12.21 (9.74)			
M00	6.66 (4.46)	18.86 (12.63)	M01	-3.19 (0.99)	-3.62 (1.12)
M02	2.98 (0.78)	3.99 (1.04)	M03	-4.27 (2.07)	-7.13 (3.46)
M04	3.51 (1.31)	6.73 (2.51)	M05	6.95 (4.75)	10.79 (7.37)
M06	3.29 (1.09)	6.79 (2.25)	M07	2.77 (0.57)	4.87 (1.01)
Ø	<b>5.29 (3.56)</b>	<b>7.69 (5.08)</b>			

27.11.18 Validierung des Berechnungsmodells Solid Heat Transfer 3D (HT3D)  
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
Seite 22 Max Böhrer



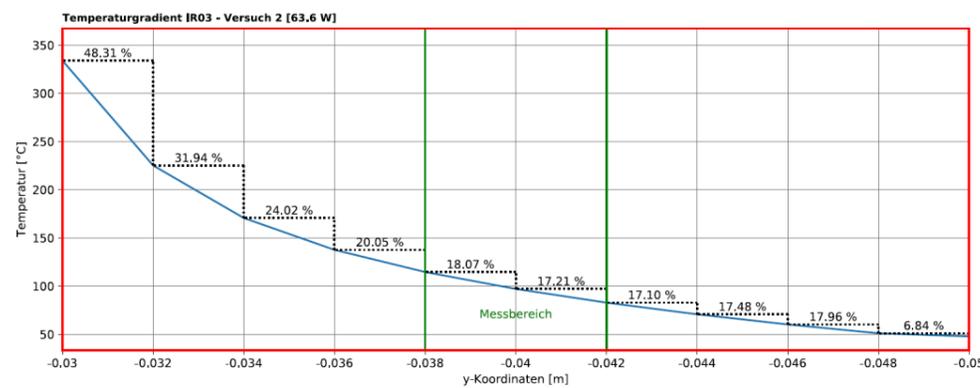
Validierung  
Gradient



Fazit

- Gute Übereinstimmung der Temperaturwerte
- Mittlere Abweichung < 10 %
- Messunsicherheiten im Bereich hoher Temperaturgradienten aufgrund von Handmessungen
- Ausblick:
  - Zukünftige Messungen: Vergleich des Temperaturverlaufs über die Zeit
  - Erneute Berechnung mit aktueller Version

Validierung  
Gradient



Vielen Dank!

**Jürgen Will:**

**Rauchausbreitung bei tiefen Temperaturen**

**Abstract:**

Auf Basis eines Falles aus der Praxis werden die Rauch- und Wärmeausbreitung in einer Tiefkühlhalle, bei der im Inneren der Halle eine Temperatur deutlich unter dem Gefrierpunkt herrscht, betrachtet. Hierbei werden verschiedene Maßnahmen zur Rauchableitung (Rauchabzugsöffnungen im Dach, Wandöffnungen, maschineller Rauchabzug) und zur Nachführung von Zuluft (Tore, Lüfter zur Unterstützung, maschinelle Zuluft) in den möglichen Kombinationen vorgegeben. Zum Vergleich werden für drei Kombinationen die Rauch- und Wärmeausbreitung ohne Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen berechnet. Die Rauch- und Wärmeausbreitung für die untersuchten Fälle wird in Form der Verteilung der Rußkonzentration vergleichend dargestellt. Als Ergebnis des Vergleichs wird die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen zur Rauchableitung qualitativ bewertet.



Sachverständige

**Rauchausbreitung bei tiefen Temperaturen**

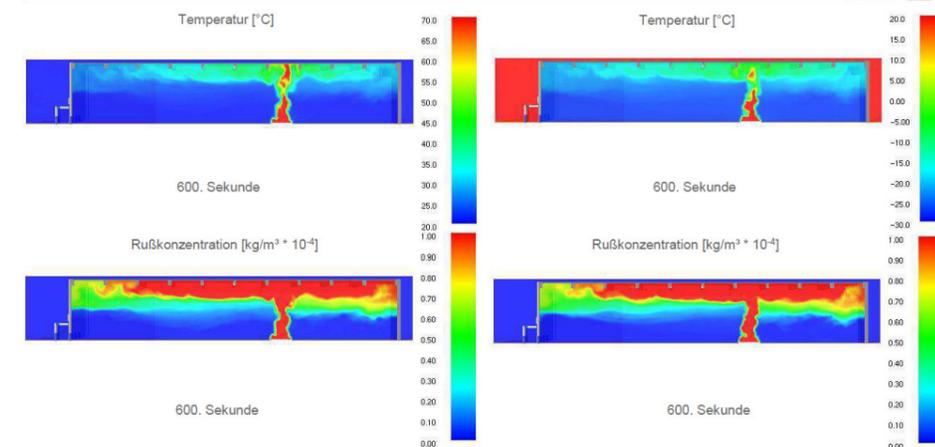
**12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup**

8. und 9. November 2018

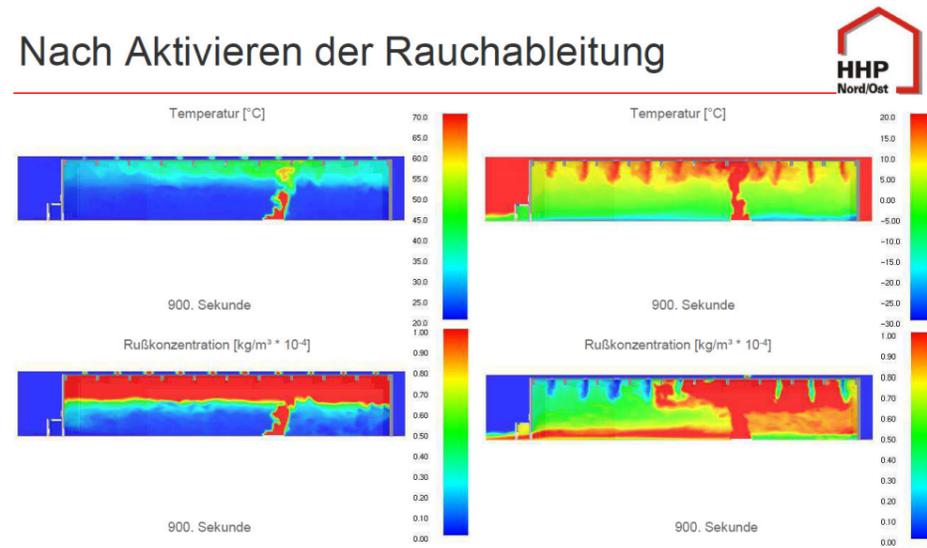
HHP Nord/Ost Beratende Ingenieure GmbH, Braunschweig  
Jürgen Will

Folie 1

**Vor Aktivieren der Rauchableitung**



## Nach Aktivieren der Rauchableitung



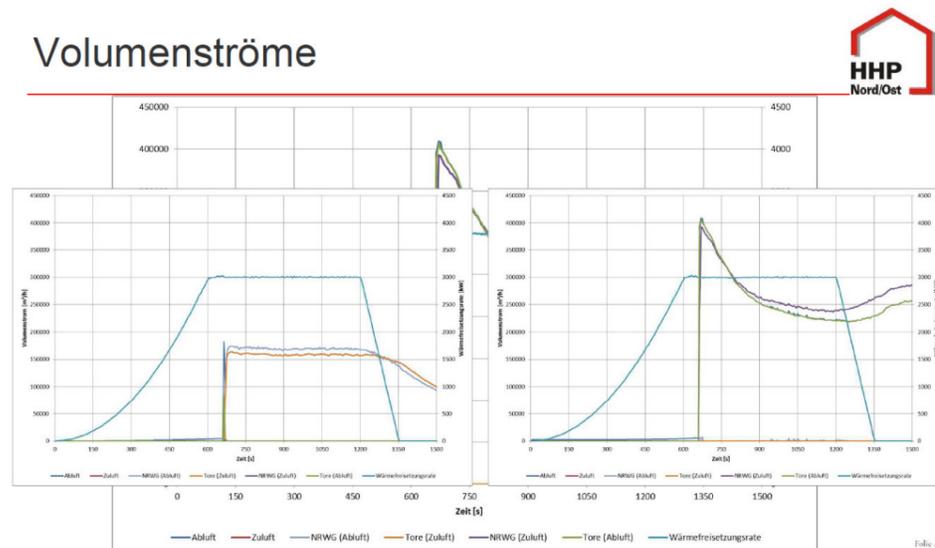
Folie 5

## Inhalt

- Fragestellung
- Vorstellung der Randbedingungen
- Konzepte zur Rauchableitung (Parametervariation)
- Ergebnisse / Vergleich
- Fazit / Diskussion



## Volumenströme



Folie 4

## Fragestellung

- Tiefkühlager
  - Betriebstemperatur / Lagerguttemperatur: -28 bis +8 °C
  - Brandmeldeanlage
  - keine automatische Löschanlage
- Rauchableitung zur Unterstützung der Löscharbeiten
  - raucharme Schicht ?

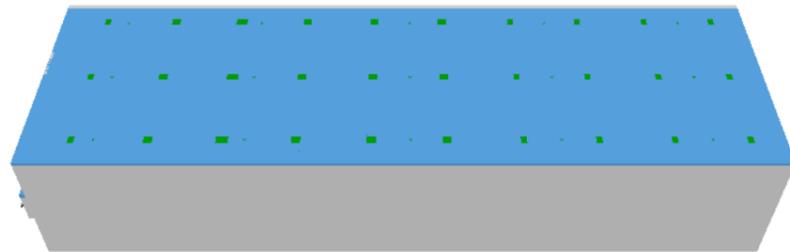


Folie 6

## Berechnungsgebiet

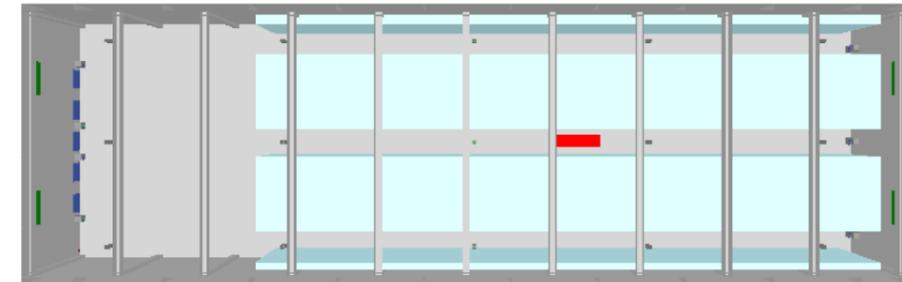


Halle: ca. 100 m × 30 m × 19 m mit 5 Cooldocks  
 12 Mesh's je 10 m × 32 m × 20 m  
 1.440.000 Zellen je 0,4 m × 0,4 m × 0,333 m



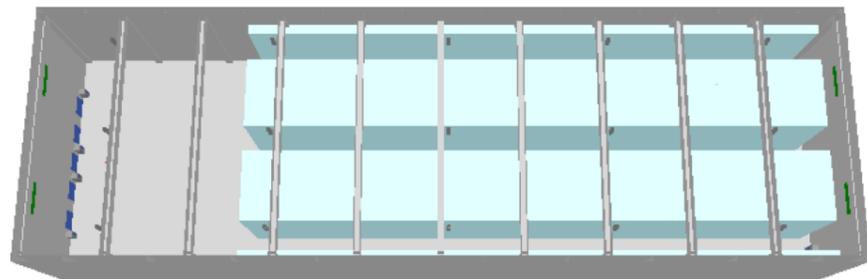
Folie 7

## Gebäudemodell



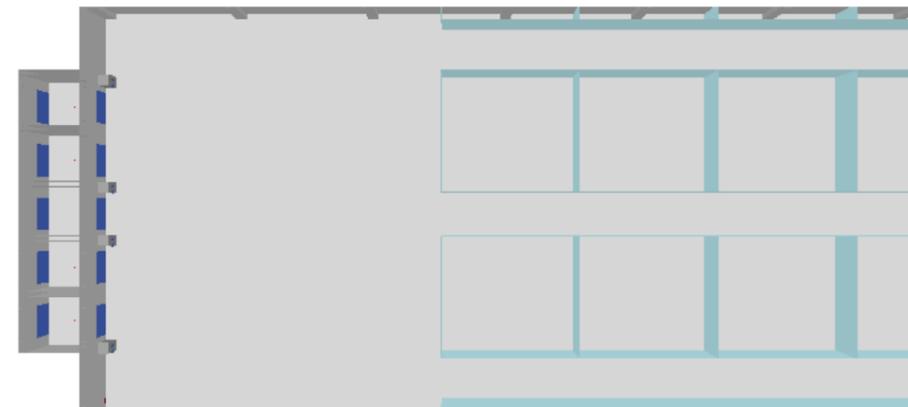
Folie 9

## Gebäudemodell



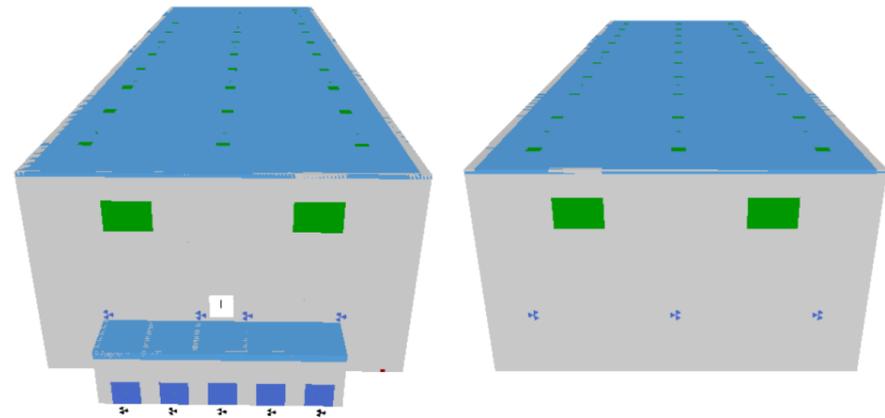
Folie 8

## Gebäudemodell



Folie 10

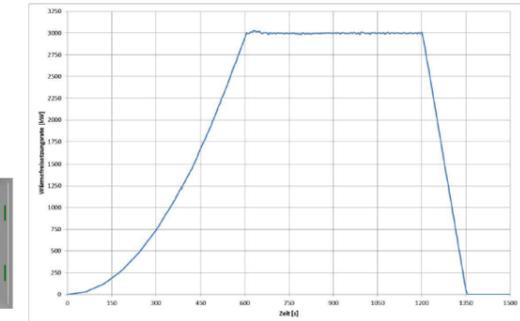
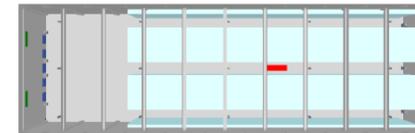
## Gebäudemodell



Folie 11

## Brandszenarium

- Brandverlauf gemäß DIN 18232-2
  - automatische Brandmeldeanlage mit Rauchmeldern
  - besonders langsame Brandentwicklung
  - öffentliche Feuerwehr
  - ⇒ BMG 2, 3 MW innerhalb 600 s
- Brandort



Folie 13

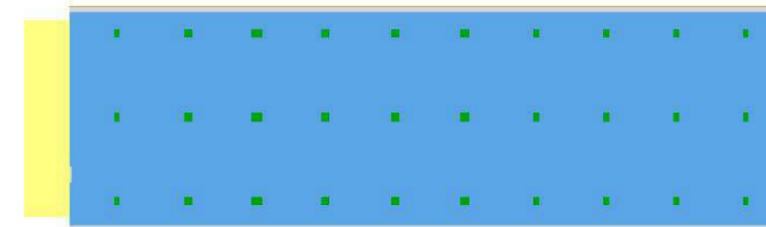
## Temperaturen

- Tiefe Temperatur (- 28 °C)
  - Luft in der Halle
  - Regalblöcke mit Lagergut
  - Innenflächen (Halle) der Wände, des Bodens und des Daches einschließlich Klappen
  - Unterzüge Unterseite und Seitenflächen
  - Stützen
  - Innenseite (Halle) der inneren Cooldock-Tore
  - Seitenflächen und Unterseite des Brandherds
- Umgebungstemperatur (+ 20 °C)
  - Luft außerhalb und in den Cooldocks
  - Wände, Boden und Dach (Halle) fünfseitig einschließlich Klappen
  - Unterzüge Oberseite und Stirnflächen
  - Wände, Boden und Dach der Cooldocks
  - innere Cooldock-Tore fünfseitig
  - äußere Cooldock-Tore

Folie 12

## NRWG im Dach

- natürlicher Rauchabzug (R1)
  - 3 × 10 NRWG je  $A_w = 1,0 \text{ m}^2$ ,  
insgesamt  $A_w = 30 \text{ m}^2$

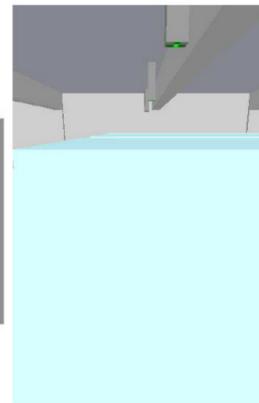
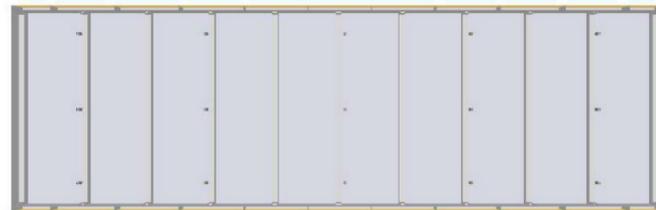


Folie 14

## MRA unter dem Dach



- maschineller Rauchabzug (R2)
  - 3 × 5 Ansaugstellen je 3,333 m<sup>3</sup>/s (12 000 m<sup>3</sup>/h), insgesamt 180 000 m<sup>3</sup>/h

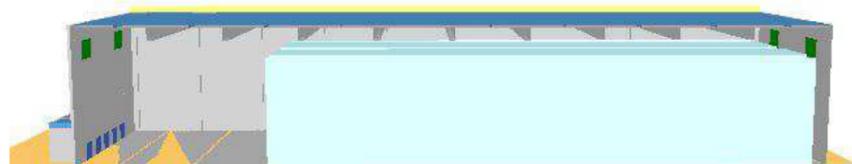


Folie 15

## Außenwandöffnungen



- natürlicher Rauchabzug (R3)
  - 2 × 2 auslösbare Wandöffnungen je 4 m breit, 2,7 m hoch, A<sub>geo</sub> = 10,8 m<sup>2</sup>, insgesamt A<sub>geo</sub> = 43,2 m<sup>2</sup>

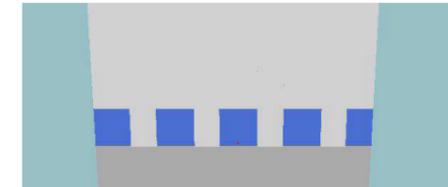
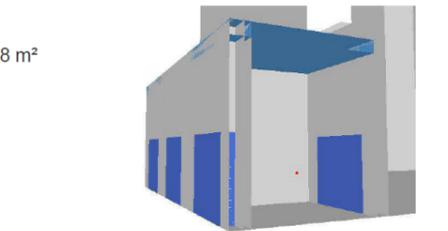
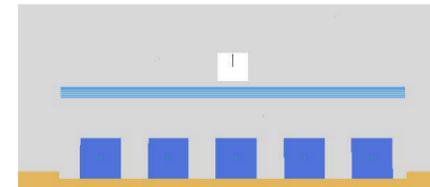


Folie 16

## Zuluft über Cooldock-Tore



- natürliche Zuluft (Z1)
  - 5 Tore je 2,4 m × 2,4 m = 5,76 m<sup>2</sup>, insgesamt 28,8 m<sup>2</sup>

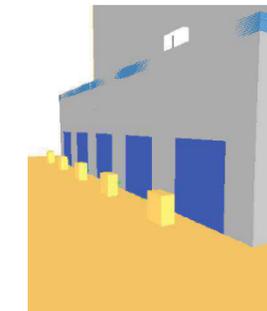
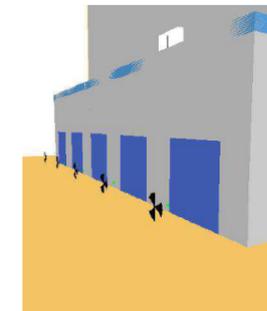


Folie 17

## Zuluft über Cooldock-Tore mit Lüftern



- natürliche Zuluft mit Unterstützung (Z11)
  - 5 Tore je 2,4 m × 2,4 m = 5,76 m<sup>2</sup>, insgesamt 28,8 m<sup>2</sup>
  - 5 Lüfter je 10 m<sup>3</sup>/s = 36 000 m<sup>3</sup>/h, insgesamt 180 000 m<sup>3</sup>/h

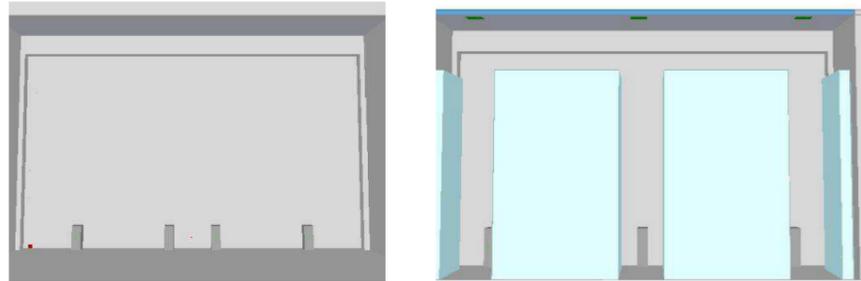


Folie 18

## Maschinelle Zuluft



- maschinelle Zuluft (Z2)
  - 4 Auslässe (2 m<sup>2</sup>) je 5,88 m<sup>3</sup>/s (21 168 m<sup>3</sup>/h),
  - 3 Auslässe (3 m<sup>2</sup>) je 8,82 m<sup>3</sup>/s (31 752 m<sup>3</sup>/h),
  - insgesamt 180 000 m<sup>3</sup>/h



Folie 19

## Definition MRA, maschinelle Zuluft oder Lüfter



```
&OBST XB= ..., SURF_ID= 'Koerper' /
&VENT XB= ..., SURF_ID= 'HVAC', ID='Rein', COLOR= 'INVISIBLE' /
&VENT XB= ..., SURF_ID= 'HVAC', ID='Raus', COLOR= 'INVISIBLE' /
&DEVC XB= ..., QUANTITY= 'VOLUME FLOW', ID= , 'Bsp' /
```

```
&HVAC ID='Rein', TYPE_ID='NODE', DUCT_ID='Bsp', VENT_ID='Rein' /
&HVAC ID='Raus', TYPE_ID='NODE', DUCT_ID='Bsp', VENT_ID='Raus' /
&HVAC ID='Bsp', TYPE_ID='DUCT', NODE_ID='Rein','Raus',
VOLUME_FLOW= ..., AREA= ..., RAMP_ID= '...' /
```

Folie 21

## Zeitliche Steuerung

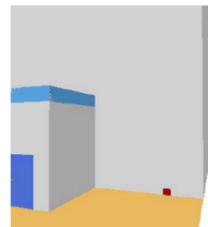


Auslösen der Rauchableitungsmaßnahmen in der 600. Sekunde

- NRWG (R1), Wandöffnungen (R3), Cooldock-Tore (Z1, Z11)
  - öffnen innerhalb von 60 Sekunden nach Auslösung
    - ▲ &DEVC ..., QUANTITY= 'TIME', SETPOINT= 660. , INITIAL\_STATE= .TRUE. /
- MRA (R2), maschinelle Zuluft (Z2), Lüfter (Z11)
  - Erreichen innerhalb von 60 Sekunden nach Auslösung den Vorgabewert
    - ▲ &RAMP ..., T= 600. , F= 0. /
    - &RAMP ..., T= 660. , F= 1. /

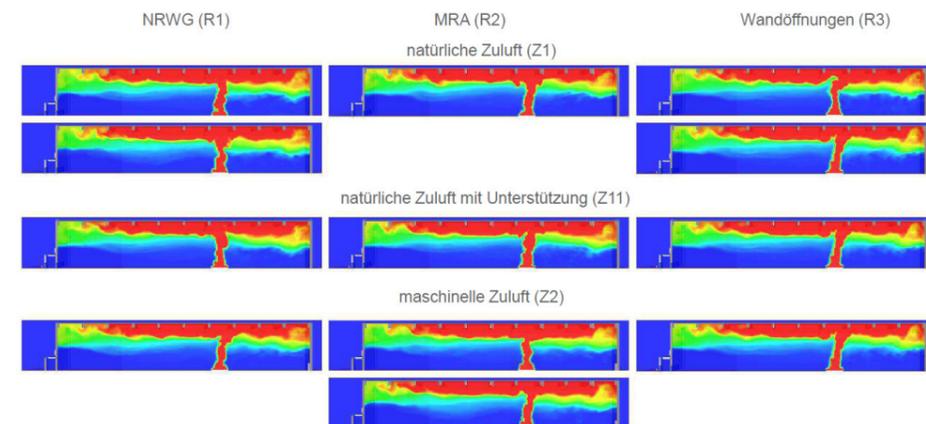
„Druckausgleich“ (0,4 m × 0,4 m Öffnung in der Stirnwand)

- anfangs offen und schließt, wenn andere Öffnungen aktiviert werden
  - ▲ &DEVC ..., QUANTITY= 'TIME', SETPOINT= ... , INITIAL\_STATE= .FALSE. /
    - für alle Kombinationen außer MRA + maschinelle Zuluft (R2-Z2): SETPOINT= 660.
    - für Kombination MRA + maschinelle Zuluft (R2-Z2): SETPOINT= 3601.



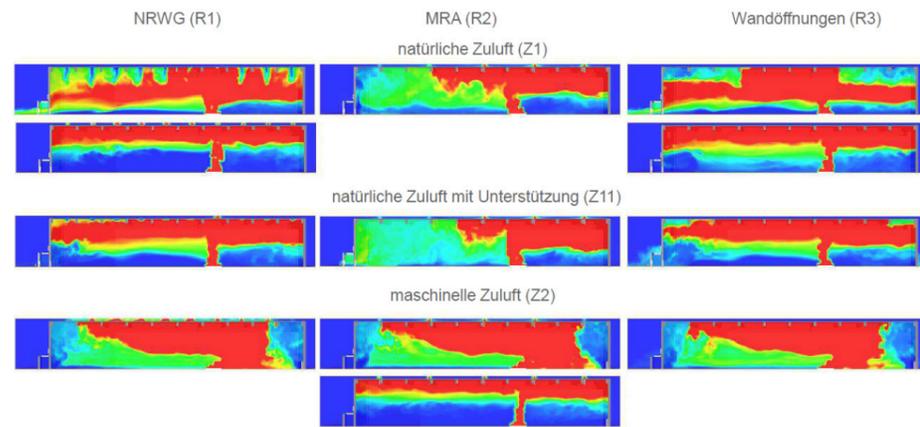
Folie 20

## Rußkonzentration 600. Sekunde



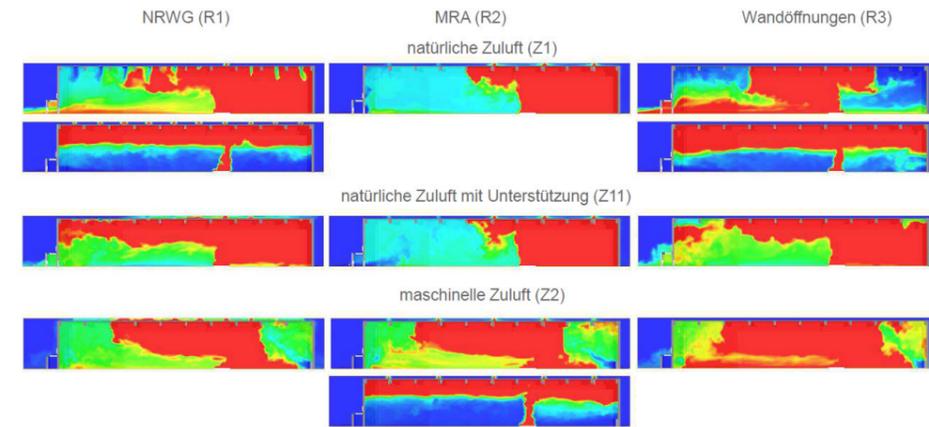
Folie 22

### Rußkonzentration 750. Sekunde



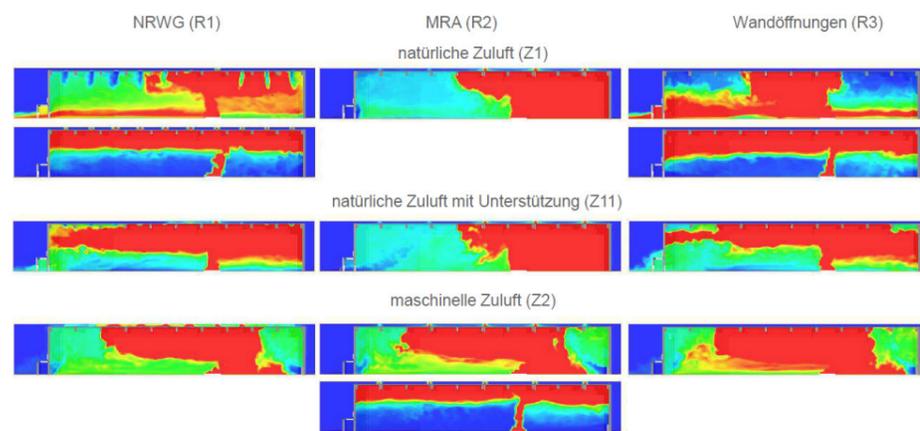
Folie 23

### Rußkonzentration 1050. Sekunde



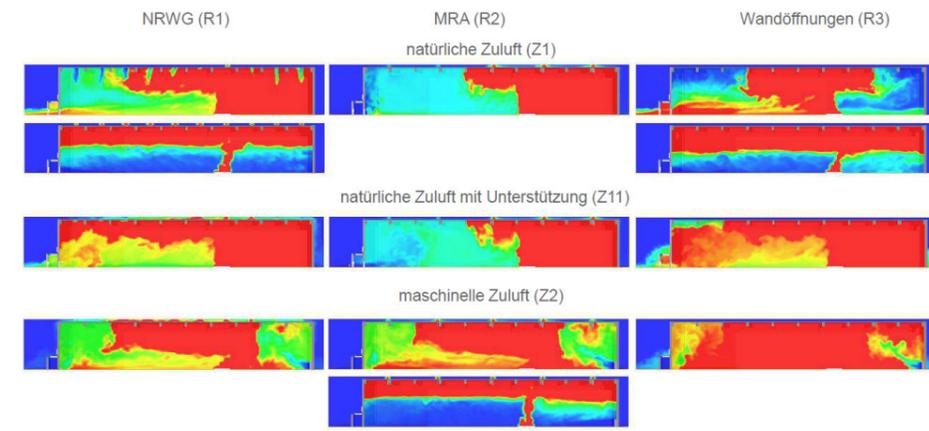
Folie 25

### Rußkonzentration 900. Sekunde



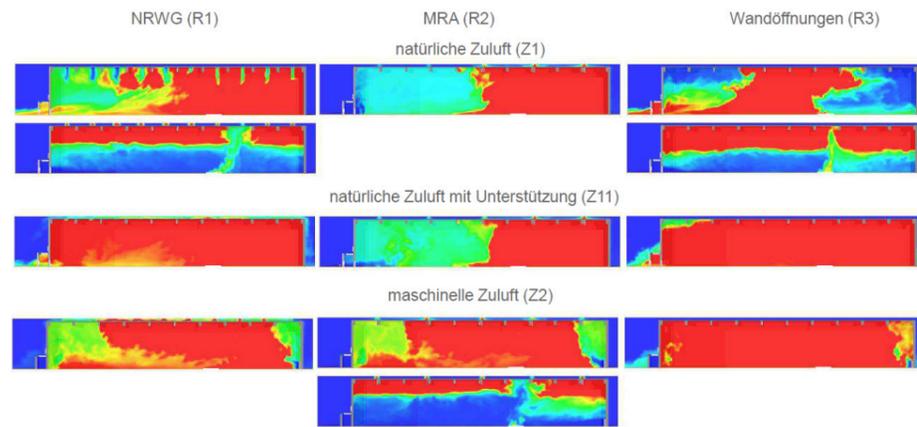
Folie 24

### Rußkonzentration 1200. Sekunde



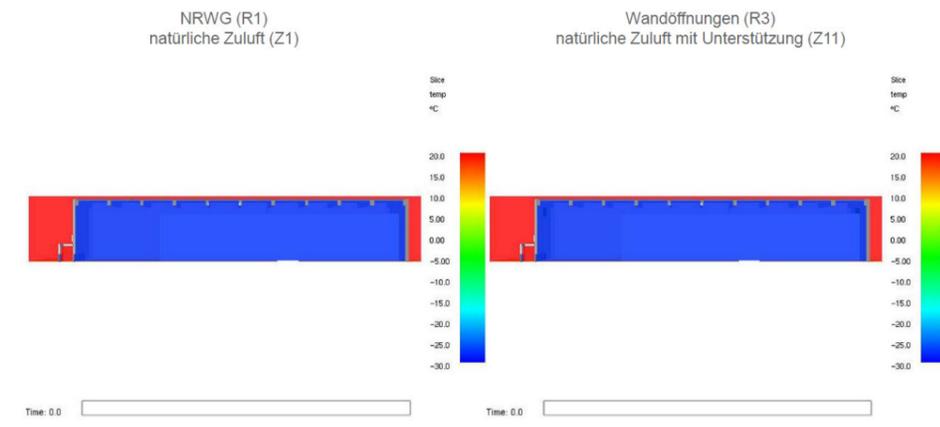
Folie 26

## Rußkonzentration 1350. Sekunde



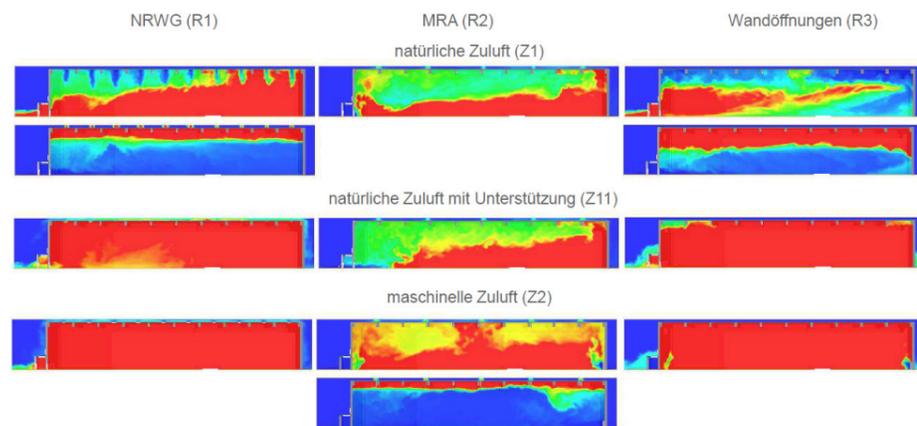
Folie 27

## Temperaturverteilung



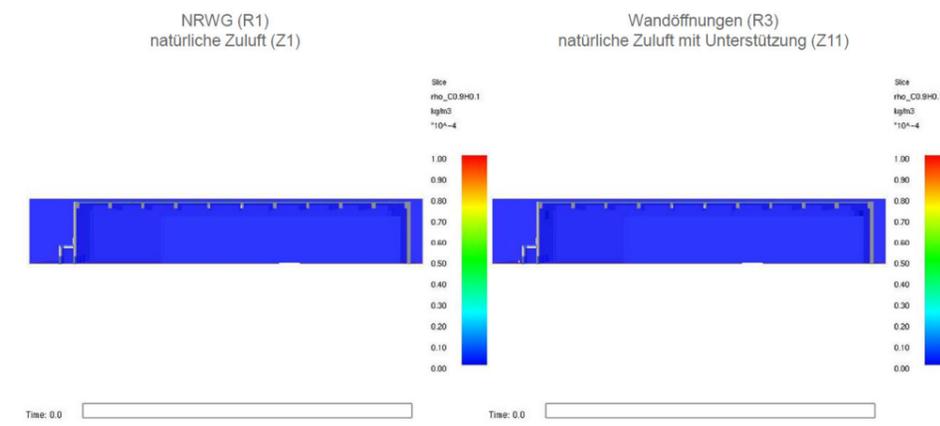
Folie 29

## Rußkonzentration 1500. Sekunde



Folie 28

## Rauchausbreitung



Folie 30

## Fazit



- Problem
  - Außen wärmer als Heißgasschicht
  - Zuluft wärmer als Heißgasschicht
  - mit Aktivieren der Rauchableitung sinkt Rauchgas nach unten
  - Vermischung von Rauchgas und raucharmer Luft
  - die Schichtung wird „zerstört“
  - „klassische“ Rauchableitung funktioniert nicht
  - begrenzte Rauchfreihaltung durch
    - Verdrängung (Unterstützung durch Lüfter)
    - maschinellen Rauchabzug

Folie 31



Sachverständige

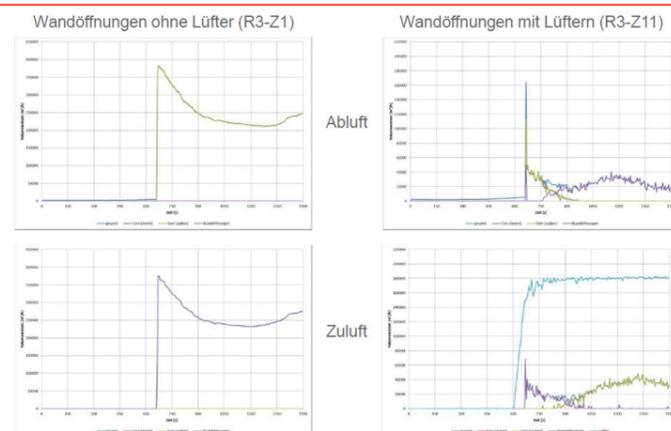
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen oder Anmerkungen?

HHP Nord/Ost Beratende Ingenieure GmbH, Braunschweig  
Jürgen Will

Folie 33

## Einfluss der Lüfter



Folie 32

**Andreas Dahlitz:****Anwendung von Entrauchungssimulationen innerhalb schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte bzw. im Kontext von Abweichungsbegründungen****Abstract:**

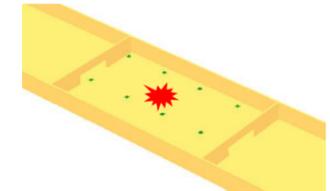
Der Vortrag ist als Impulsvortrag aufgebaut und soll mit seinen Ergebnissen zur Diskussion anregen. Es sollen keine fertigen Lösungen präsentiert werden, da unterschiedliche Fachansichten und unterschiedliche Praxisfälle keine allgemeingültigen Lösungen zulassen, jedoch werden Lösungsstrategien vorgestellt.

Nach wie vor haben Entrauchungssimulationen mit dem Schutzziel „Sicherstellung einer atmefähigen Atmosphäre für die fliehenden Personen über einen definierten Fluchtzeitraum“ im Rahmen schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte eine hohe Bedeutung. Gleichmaßen finden diese auch im Rahmen von Abweichungsbegründungen Anwendung.

Auf den Brandschutzkonzeptersteller sowie auch auf den Prüfenieur für Brandschutz kommt unweigerlich die Frage zu, mit welchen Eingangsbedingungen sollen die Entrauchungssimulationen gestartet werden. Eine der wichtigsten Fragen ist die Wahl der Brandherdlage im Modellraum. Zumeist wird dieser am Anfang des Prozesses vom Brandschutzkonzeptersteller frei gewählt bzw. festgelegt. Häufig entstehen dann aber im Erstell- und Prüfprozess die Fragen:

1. Genügt für den Nachweis eine Simulation mit einer vorher definierten und abgestimmten Brandherdlage?
2. Genügt es, wenn diese mittig bzw. zentral angeordnet wird?
3. Müssen weitere Brandherdlagen (außermittige Lagen) untersucht werden?
4. Genügt dann eine weitere außermittige Lage und ist diese ausreichend „ungünstig“?

In einem Impulsvortrag soll diesen Fragen nachgegangen werden und Strategien der Lösungsfindung vorgestellt werden, wobei der Vortrag keine schlussendlichen allgemeingültigen Lösungen vorgibt. Er soll zur Diskussion anregen soll und den Weg in zu vertiefende Untersuchungen aufzeigen.

**Fortsetzung 2018**

„Denken wir in der richtigen Reihenfolge?“

**Ein Impulsvortrag zum Werkzeug**

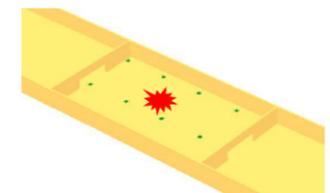
„Entrauchungssimulation“ !

Andreas Dahlitz und Florian Weber

08.11.2018

Next Generation Fire Engineering

hnpberlin 

**ODER**

„Anwendung von Entrauchungssimulationen innerhalb schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte bzw. im Kontext von Abweichungsbegründungen“

Next Generation Fire Engineering

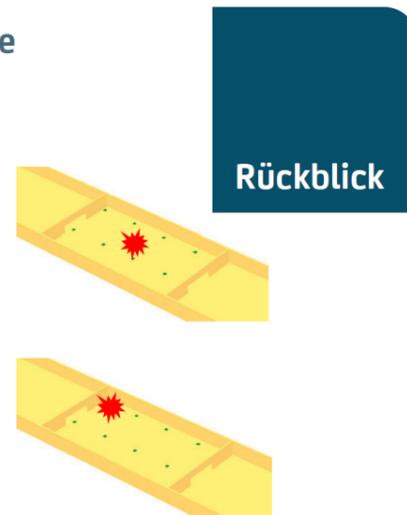
hnpberlin 

### These aus 2017 oder 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!

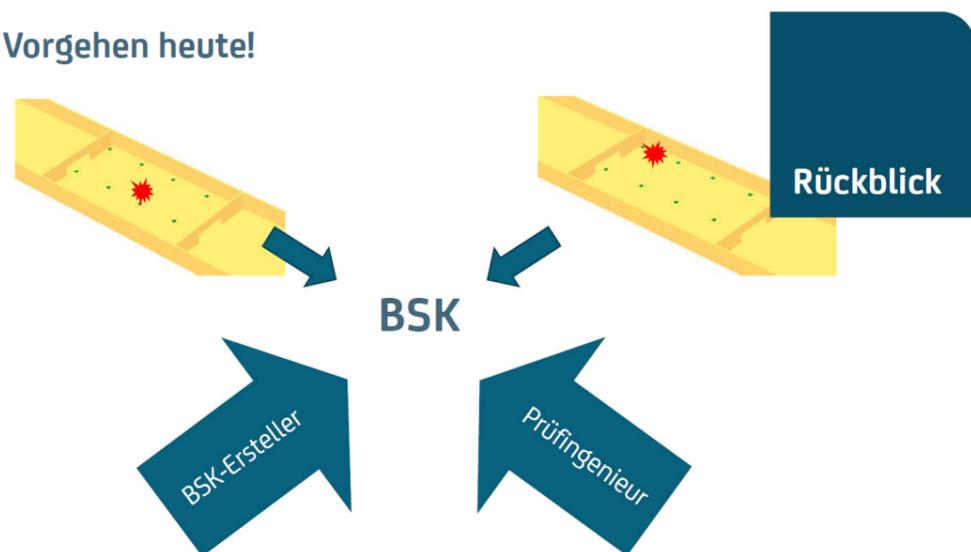


behauptet, dass die gewählten zwei BHLs mit hoher Wahrscheinlichkeit alle möglichen Brandorte abdecken

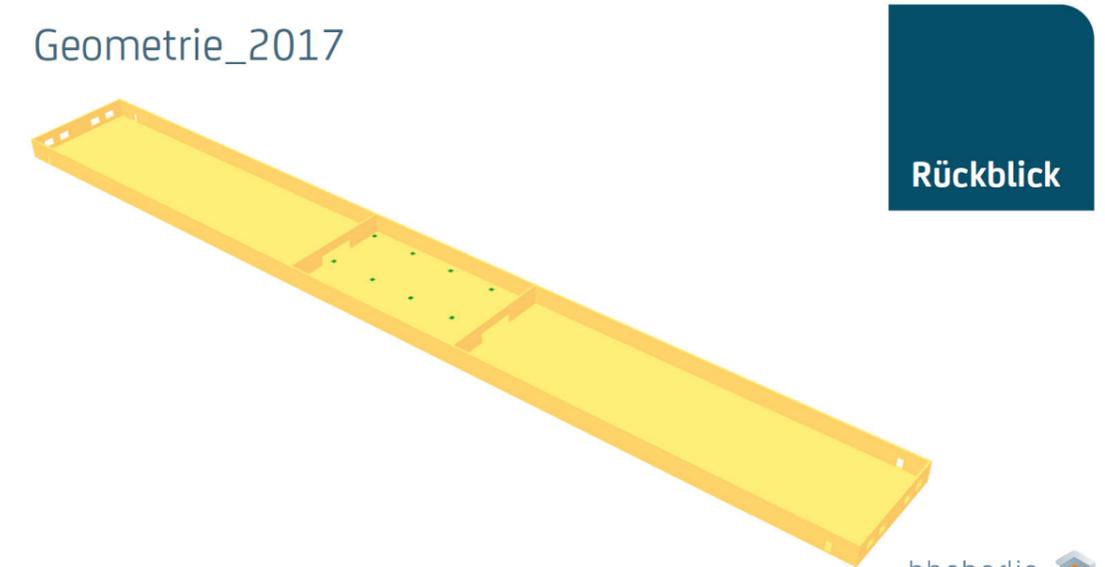
folgt der Behauptung, dann alles ok

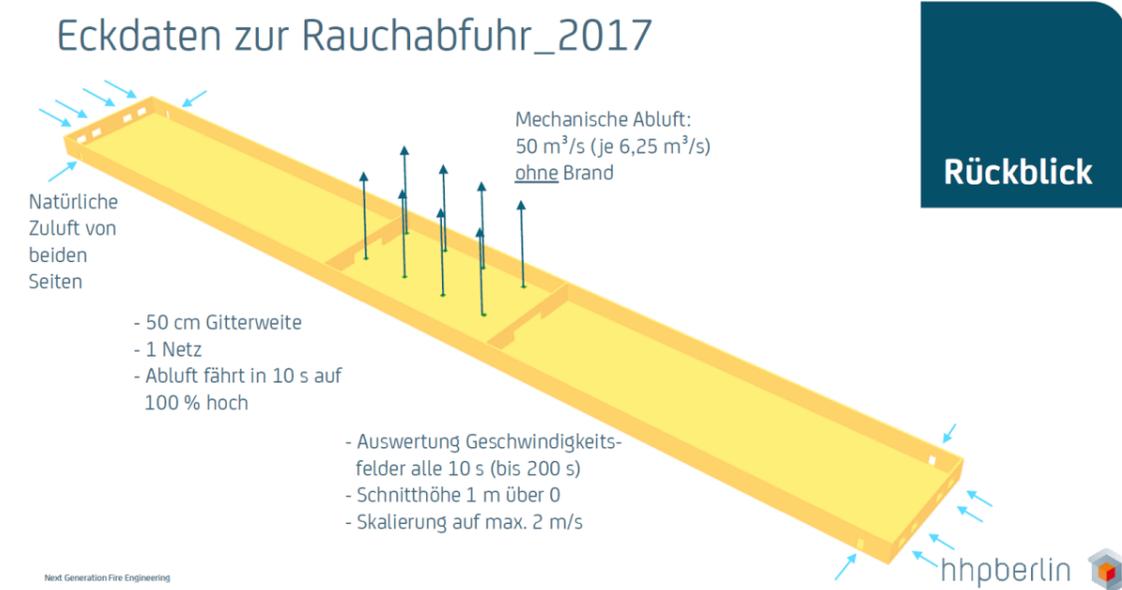
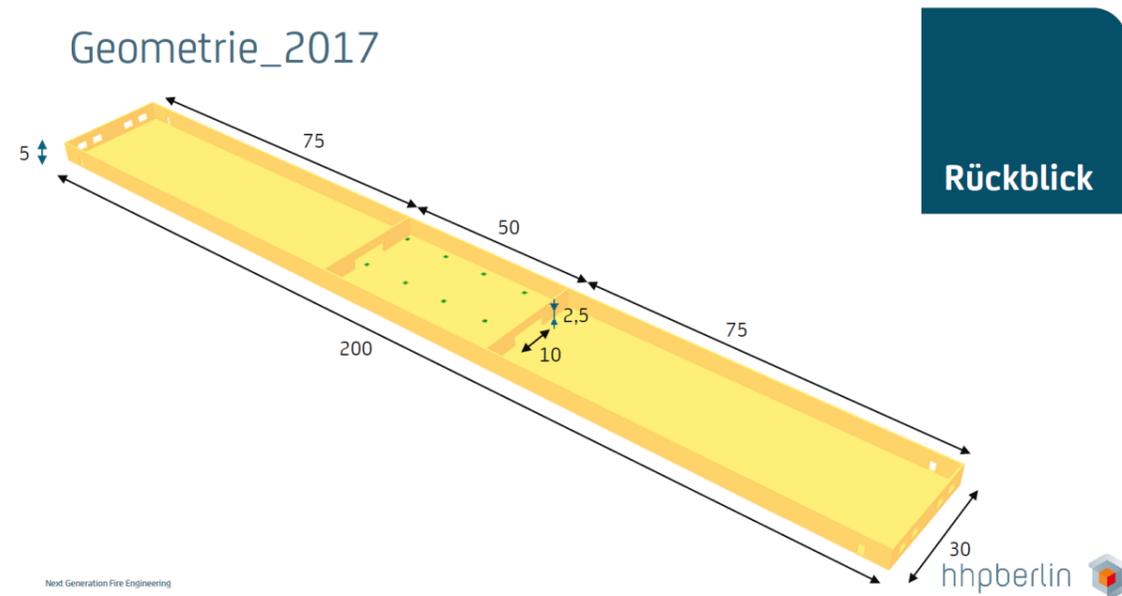
folgt dieser nicht, was dann?

### Unser Vorgehen heute!

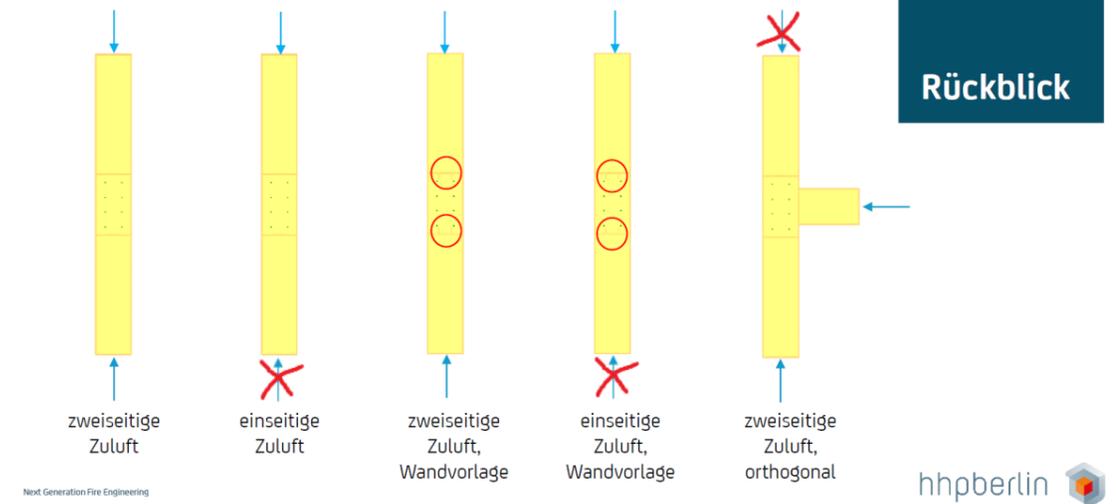


### Geometrie\_2017





Hierzu ein Testlauf mit 5 Varianten



Impuls → These aus 2017

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 → These aus 2017

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)

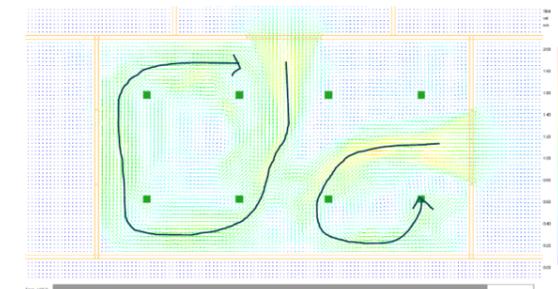
Rückblick

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

### damaliges Fazit aus 2017

- gleiches gilt auch für orthogonal aufeinander zuströmende Strömungsfelder,



Variante 5 mit orthogonaler Zuluft(180 s)

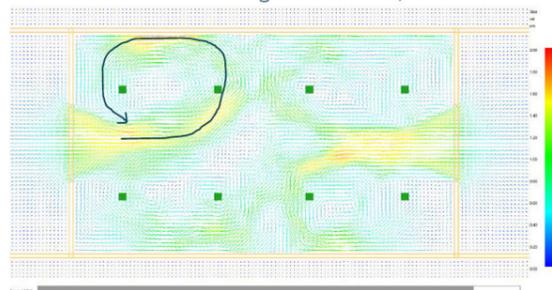
Next Generation Fire Engineering

Rückblick

hhpberlin

### damaliges Fazit aus 2017

- für erzwungene Strömungen (maschinelle Entrauchungen) könnte es ein Werkzeug sein, es zeigte sich, dass
  - frontal aufeinander zuströmende Strömungsfelder einander ausweichen und wandnahe Rückströmungen ausbilden,



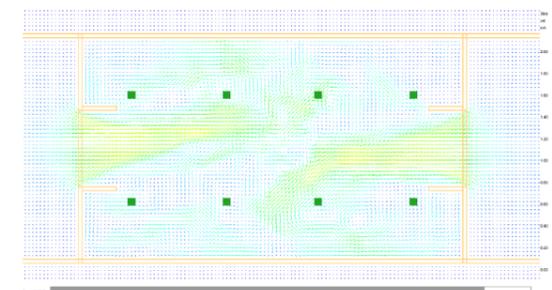
Variante 1 mit beidseitiger Zuluft (180 s)

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

### damaliges Fazit aus 2017

- abblendende Scheiben (Wandvorlagen), die ein Wiedereinströmen vermeiden, können positiv wirken



Variante 3 mit beidseitiger Zuluft und Wandvorlagen (180 s)

Next Generation Fire Engineering

Rückblick

hhpberlin

## damaliges Fazit aus 2017

aber auch Fazit aus der Diskussion:

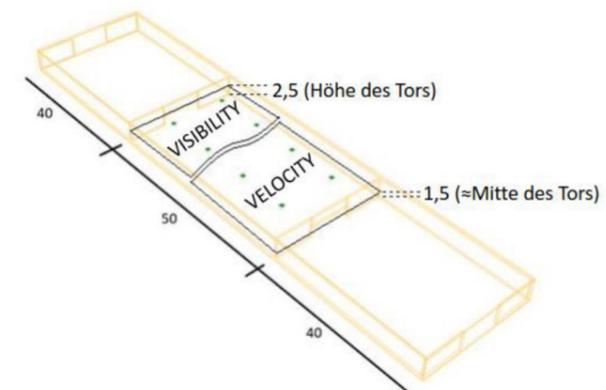
Der Einfluss des Brandes (der Stofftransport und damit einhergehend die Strömung) ist in weiteren Studien zu untersuchen.

### Rückblick

Next Generation Fire Engineering



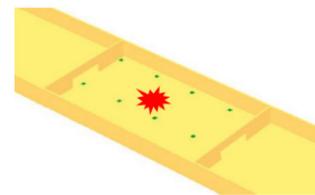
## Eckdaten\_2018



- 2 seitige Zuluft
- 3 Meshes
- 25 cm Gitterweite
- 50 m<sup>3</sup>/s Absaugvolumen
- VISIBILITY- Slices je bei 2,5 m ausgewertet
- VELOCITY- Slices je bei 1,5 m ausgewertet

### Eckdaten

Next Generation Fire Engineering

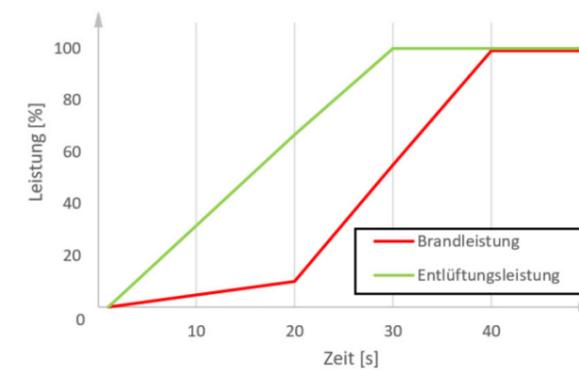


## Fortsetzung 2018

Next Generation Fire Engineering



## Eckdaten\_2018



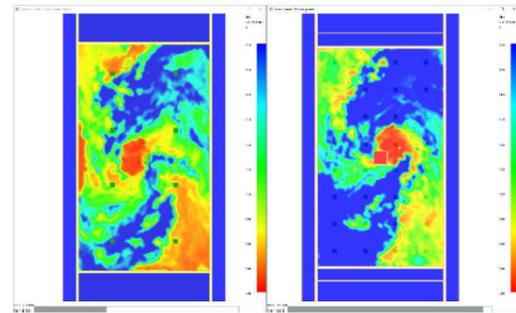
- Anstieg Entrauchungsvolumenstrom auf 50 m<sup>3</sup>/s (je 1,25 m<sup>3</sup>/s)
- Anstieg Brandleistung schnell auf 4 MW und dann konstant

### Eckdaten

Next Generation Fire Engineering



## Eckdaten\_2018



8 Absaugstellen und 2 MW  
(quadratisch ansteigend  
max. 2 MW nach 424 s)

40 Absaugstellen und 4 MW  
(konstant 4 MW)

### Eckdaten

wie erwartet bzw. wie bekannt:

mit mehr Absaugstellen (bei geometrisch gleichmäßiger Verteilung) verbessert sich das Ergebnis deutlich, bei gleicher Gesamtleistung.

Im selben Kontext:

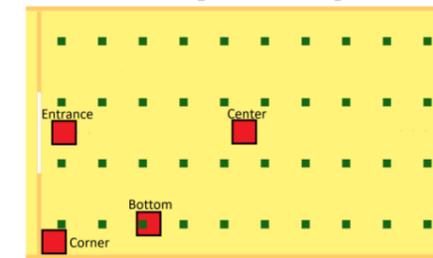
Umso höher die Absaugstellen im Raum liegen, umso früher wird die RA-Anlage anläuft, umso früher wird Rauch abtransportiert und umso effizienter die Entrauchung.

Next Generation Fire Engineering



## Eckdaten\_ 2018

- hier die vier BHL

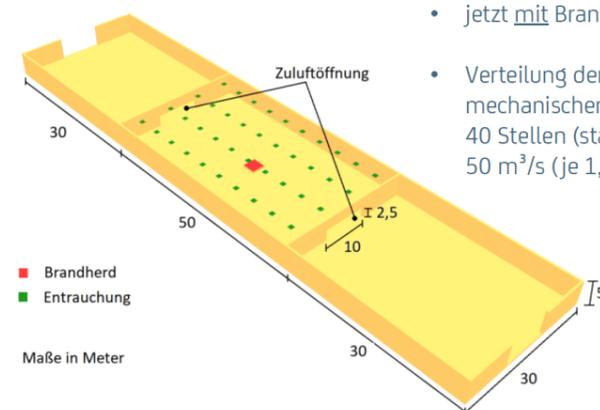


### Eckdaten

Next Generation Fire Engineering



## Eckdaten\_ 2018



- jetzt mit Brand
- Verteilung der mechanischen Abluft auf 40 Stellen (statt 8):  
50 m<sup>3</sup>/s (je 1,25 m<sup>3</sup>/s)

### Eckdaten

Next Generation Fire Engineering



## Eckdaten\_ 2018

- mit Brand ergeben sich zwei Antriebsmotoren im Modellraum, die durch die Entrauchungsanlage induzierte Strömung und durch den Brand induzierte Strömung
  - in unserem vorliegenden Fall fördern wir 50 m<sup>3</sup>/s mittels der Entrauchung ab
  - der Brand mit einer angenommen Brandleistung von konstant 4 MW erzeugt ähnlich gleich große Transporte → hierzu eine Modellrechnung

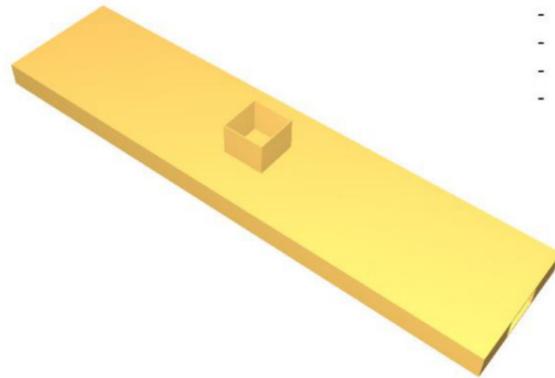
### Eckdaten

Next Generation Fire Engineering



## Eckdaten\_2018

Geometrie zur Bestimmung des brandinduzierten Volumenstroms



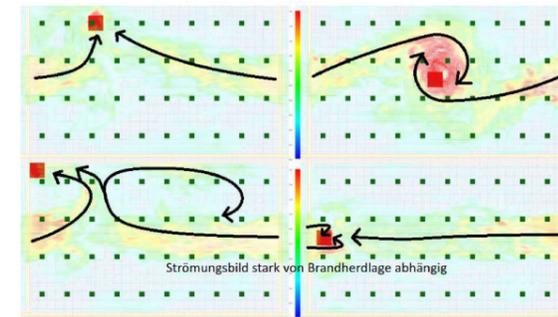
- Keine maschinelle Abluft
- Schornstein mit 10x10 m
- Zuluft wie bisher
- Brandherd zentral

Eckdaten

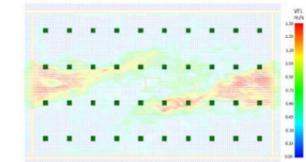
Next Generation Fire Engineering



## Zwischenfazit



Velo mit allen vier Brandherdlagen (T=500 s)



Velo ohne Brandherd (T=800 s)

Strömungsbild wird von der BHL stark beeinflusst

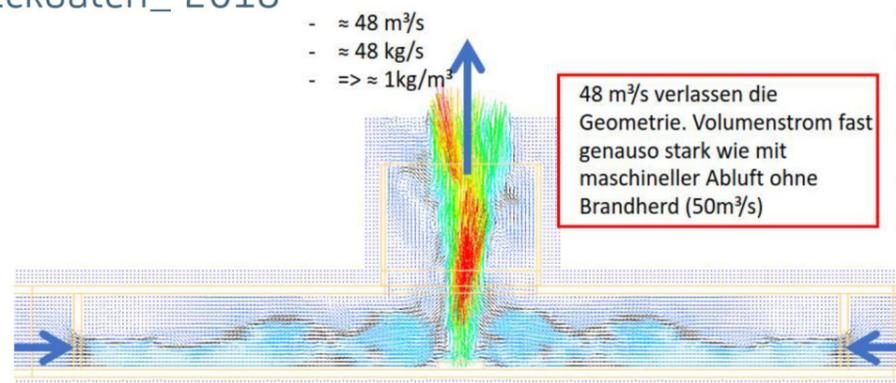
Zwischenfazit

Next Generation Fire Engineering



## Eckdaten\_2018

- $\approx 48 \text{ m}^3/\text{s}$
- $\approx 48 \text{ kg/s}$
- $\Rightarrow \approx 1 \text{ kg/m}^3$



Nachströmung:

- Je  $\approx 24 \text{ kg/s}$
- Je  $\approx 20 \text{ m}^3/\text{s}$
- $\Rightarrow \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$



Next Generation Fire Engineering

## Modellvergleich Velo vs. Visi

Welche weiteren Erkenntnisse können geschöpft werden?

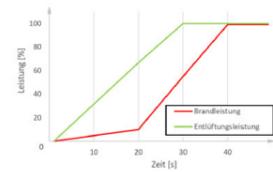
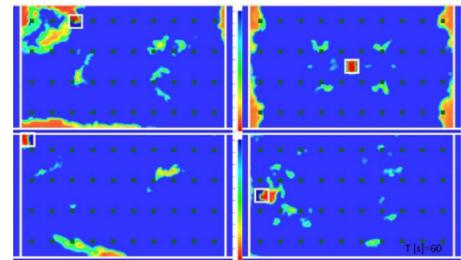
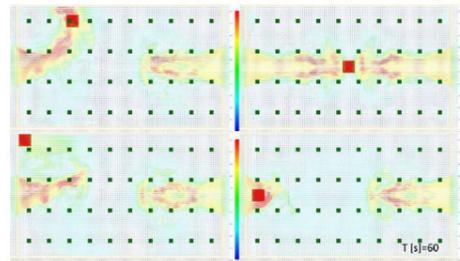
Hierzu der Modellvergleich der Strömungsbilder (in 1,50 m Höhe geschnitten) gegenüber der Sichtbarkeit als Maß der Verrauchung bzw. der Atemfähigkeit der Umgebung (in 2,50 m Höhe geschnitten) in 60 s-Schritten

Vergleich Velo vs. Visi

Next Generation Fire Engineering



### Modellvergleich Velo vs. Visi 60 s

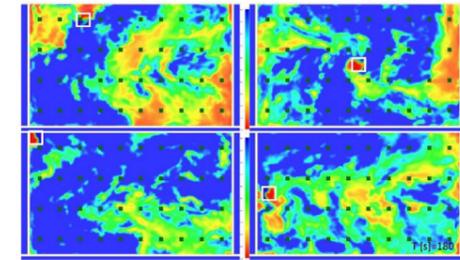
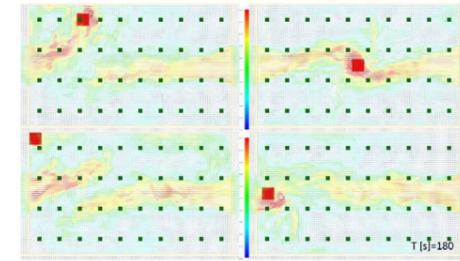


Vergleich  
Velo vs. Visi

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

### Modellvergleich Velo vs. Visi 180 s

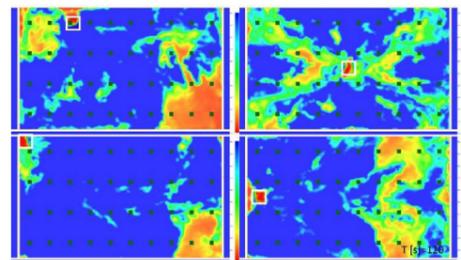
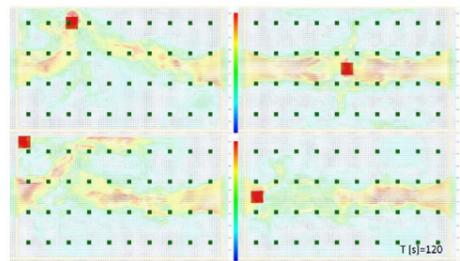


Vergleich  
Velo vs. Visi

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

### Modellvergleich Velo vs. Visi 120 s

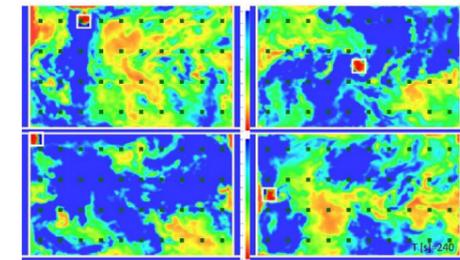
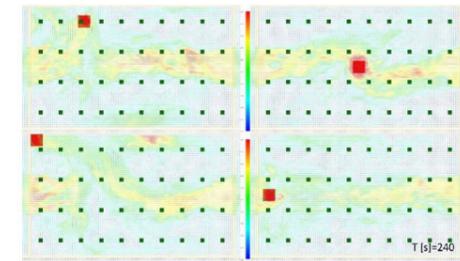


Vergleich  
Velo vs. Visi

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

### Modellvergleich Velo vs. Visi 240 s

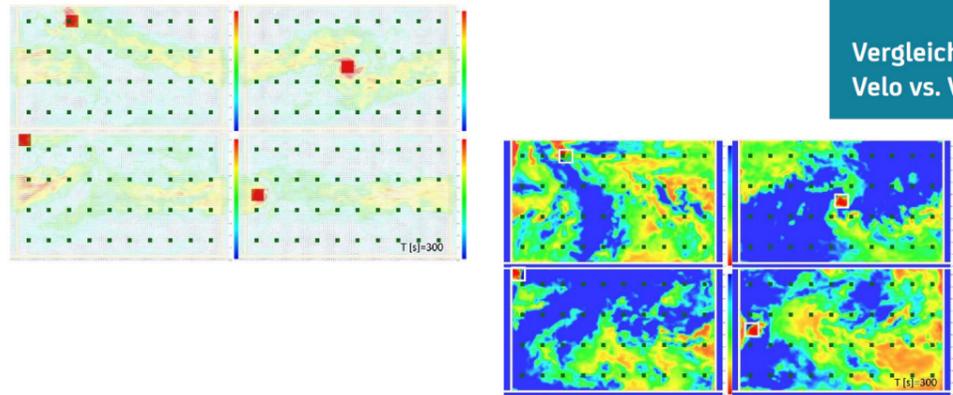


Vergleich  
Velo vs. Visi

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

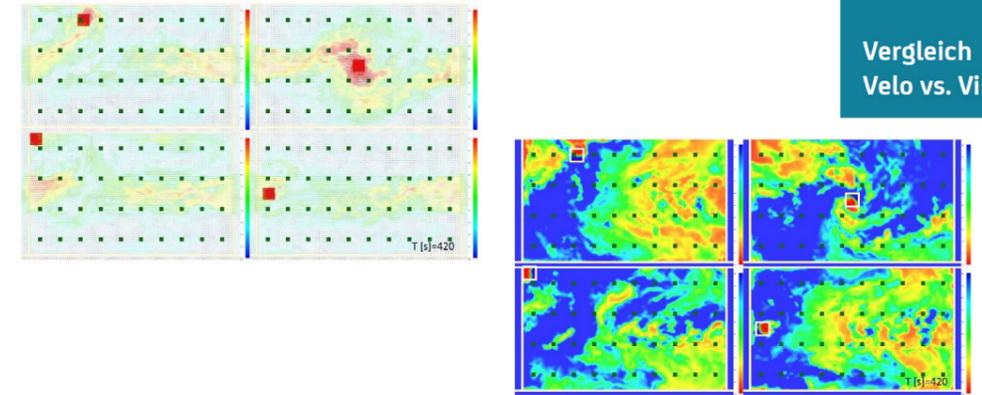
Modellvergleich Velo vs. Visi 300 s



Next Generation Fire Engineering

hpbberlin

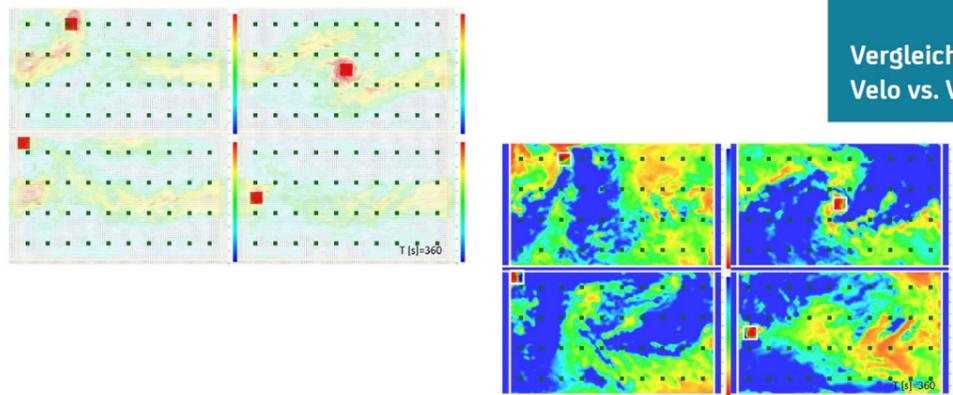
Modellvergleich Velo vs. Visi 420 s



Next Generation Fire Engineering

hpbberlin

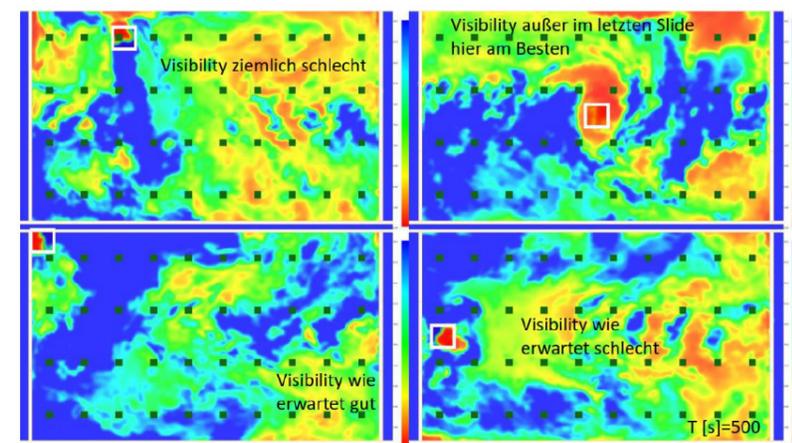
Modellvergleich Velo vs. Visi 360 s



Next Generation Fire Engineering

hpbberlin

Modellvergleich nur Visi 500 s



Next Generation Fire Engineering

hpbberlin

## Fazit aus Modellvergleich

1. eine Bewertung der Strömungsfelder in Nachströmhöhe nur horizontal in 1,5 m über Fußbodenhöhe und ohne den Brandeinfluss ist nicht ausreichend, die brandinduzierte Strömung ist zu dominant
2. ausgenommen davon, könnte die Bewertung von niedrigerenergetischen Bränden (z. B. ortsfeste Einzelobjekte, wie Getränkeautomaten etc.) oder Phasen der Brandentstehung bei komplexen Geometrien hilfreich sein

Fazit

Next Generation Fire Engineering

hpbberlin 

## Fazit aus Modellvergleich

3. Vergleiche der Farbflächenanteile in den Zeiträumen von ca. 240 s – 360 s zeigen für den Modellraum:
  - „BHL Wand“ ist der ungünstigste Fall
  - sie zeigt die ungünstige Rauchgasverteilungen im Raum
  - die BHL direkt im Zuströmweg zeigt ebenfalls eine relativ zügige Verrauchung auf der gegenüberliegenden Raumseite und ist gleichfalls ungünstiger als die zentrale BHL

Fazit

Next Generation Fire Engineering

hpbberlin 

## Fazit aus Modellvergleich

4. allein die Wahl einer zentralen BHL ist nicht repräsentativ, die Wahl bzw. die Forderung nach einer dezentralen BHL je Modellraum ist gerechtfertigt

welche dezentrale BHL entscheidend ist, muss mit dem Nutzungskonzept abgestimmt sein (Übereinstimmung mit ortsfesten relevanten Brandlasten und definierten Verkehrswegen → Achtung! stellt zugleich eine Nutzungsbeschränkung dar)

Fazit

Next Generation Fire Engineering

hpbberlin 

## Hinweis auf DIN 18009-1

**DIN 18009-1:2016-09; Anhang D (informativ)  
Erläuterungen zu 7.2.2: Systematik zur Auswahl von  
Bemessungsbrandszenarien**

führt hierzu aus, dass das maßgebliche Brandszenario zu wählen ist und die möglichen Orte für die Brandentstehung zu betrachten und zu bewerten sind. Daraus ist das Brandszenario mit den für das jeweilige Schutzziel schlimmsten Folgen auszuwählen.

Als mögliches typisches Beispiel für kritischen Brandentstehungsorte werden u. a. auch „Brände, die in Raumecken entstehen;“ genannt

Hinweis

Danke für die Aufmerksamkeit

Next Generation Fire Engineering

hpbberlin 

**Benjamin Schröder:**

### Überprüfung einer RDA-Planung mit FDS-HVAC

#### Abstract:

In Hochhäusern oder anderen Gebäuden, bei denen ein zweiter Rettungsweg nicht über Rettungsgeräte der Feuerwehr sichergestellt werden kann, kommen regelmäßig Sicherheitstreppe nräume zur Ausführung. Solche Treppenträume werden in der Regel durch sog. Rauchschutzdruckanlagen (RDA) in Verbindung mit einer Sicherheitskaskade geschützt, um ein Eindringen von Feuer und Rauch im Brandfall zu verhindern.

Die funktionalen Anforderungen an die RDA und die zugehörigen Leistungskriterien werden durch die Fachplanung Brandschutz im Brandschutzkonzept bzw. Brandschutznachweis festgelegt. Die eigentliche Anlagenplanung erfolgt durch die Fachplanung Haustechnik - oftmals in Zusammenarbeit mit einem Lieferanten. Eine fachplanungsübergreifende Zusammenarbeit vom ersten Entwurf bis hin zur Inbetriebnahme ist somit unerlässlich.

Die Konzeption und Dimensionierung einer RDA umfasst u.a. die Zu- und Abluftführung in Verbindung mit den Druckverlusten und Leckagen entlang des gesamten Lüftungssystems. Während die Einflüsse von Standardbauteilen wie Kanälen, Gittern oder Klappen in gewissen Maßen abgeschätzt werden können, bleiben die Druckverluste der geplanten Sicherheitskaskade und deren damit einhergehende, tatsächliche Durchströmung oftmals eine große Unbekannte. Gleiches gilt für den Einfluss weiterer Randbedingungen wie z.B. dem Öffnungszustand der Außentür des Treppenraumes.

Der Beitrag zeigt, wie FDS genutzt wurde, um eine RDA-Planung mittels des HVAC Submodells abzubilden und diese auf die Erfüllung der relevanten Leistungskriterien zu untersuchen. Es werden unterschiedliche Überlegungen und Varianten zur Modellierung von Lüftungssystemen in FDS vorgestellt. Der Beitrag gibt ebenso einen Einblick in die Aufbereitung und Analyse der berechneten Leistungskriterien sowie deren Interpretation in Kontext der eingangs festgelegten, funktionalen Anforderungen.



## ÜBERPRÜFUNG EINER RDA-PLANUNG MIT FDS-HVAC

FDS Usergroup 2018 | 08.11.2018 | Benjamin Schröder

**görtzen**  
Ingenieure

## Inhalt

-  Das Objekt
-  Baurechtliche Anforderungen
-  Anlass & Methodik
-  FDS und HVAC
-  Analyse
-  Fazit & Diskussion

## Das Objekt

- Wohnen im Düsseldorfer Medienhafen
- 2 Hochhäuser (Turm)
- 1 Gebäude mittlerer Höhe/GK 5 (Loft)
- Unterirdische Großgarage



3

görtzen  
Ingenieure

## Baurechtliche Anforderungen

§ 105 SBauVO NRW

„Hochhäuser müssen getrennte Lüftungstechnische Anlagen [...] (Druckbelüftungsanlagen) für

1. innenliegende **Sicherheitstreppe**nräume und deren **Vorräume** sowie
2. **Feuerwehraufzugsschächte** und deren **Vorräume**

haben, damit Feuer und Rauch nicht eindringen können.“

5

görtzen  
Ingenieure

## Baurechtliche Anforderungen

§ 17 (3) BauO NRW

„Ein zweiter Rettungsweg ist nicht erforderlich, wenn die Rettung über einen sicher erreichbaren Treppenraum möglich ist, in den Feuer und Rauch nicht eindringen können (**Sicherheitstreppe**nraum)“

4

görtzen  
Ingenieure

## Baurechtliche Anforderungen

§ 105 SBauVO NRW

„Im Brandfall muss ein Durchspülen dieser Räume so erfolgen, dass

1. die Luft auch bei geöffneten Türen zu dem vom Brand betroffenen Geschoss [...] **entgegen der Fluchrichtung** strömt,“

6

görtzen  
Ingenieure

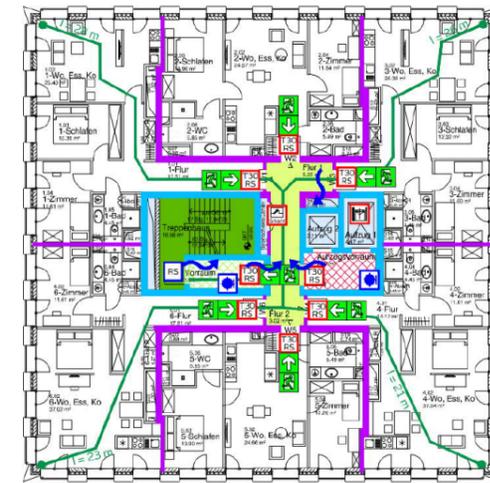
# Baurechtliche Anforderungen

§ 105 SBauVO NRW

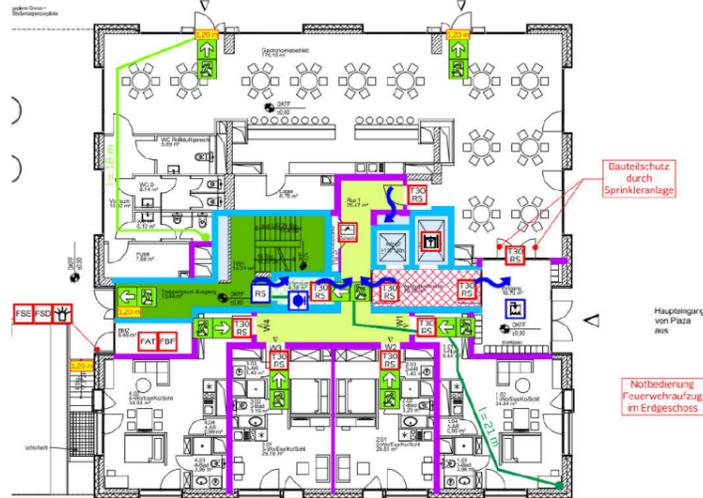
„Im Brandfall muss ein Durchspülen dieser Räume so erfolgen, dass

- 2. die mittlere Luftgeschwindigkeit durch die geöffneten Türen der Treppenträume und deren Vorräume mindestens **2,0 m/s** und durch geöffnete Türen des Vorräumens eines Feuerwehraufzugs mindestens **0,75 m/s** beträgt.

# Turm | 19. OG

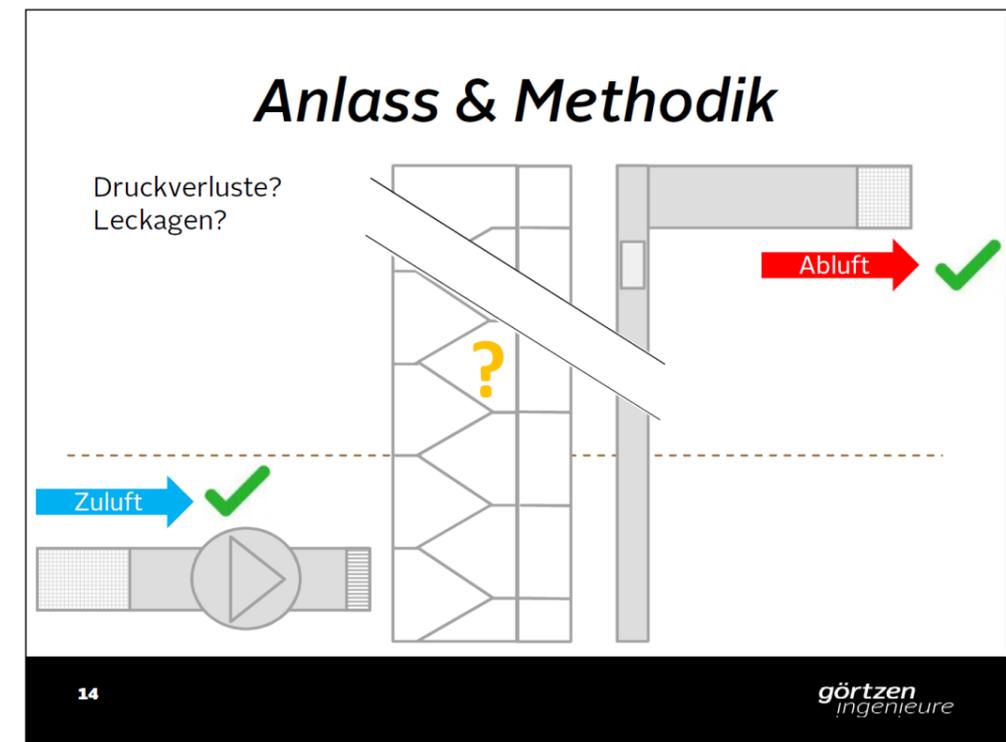
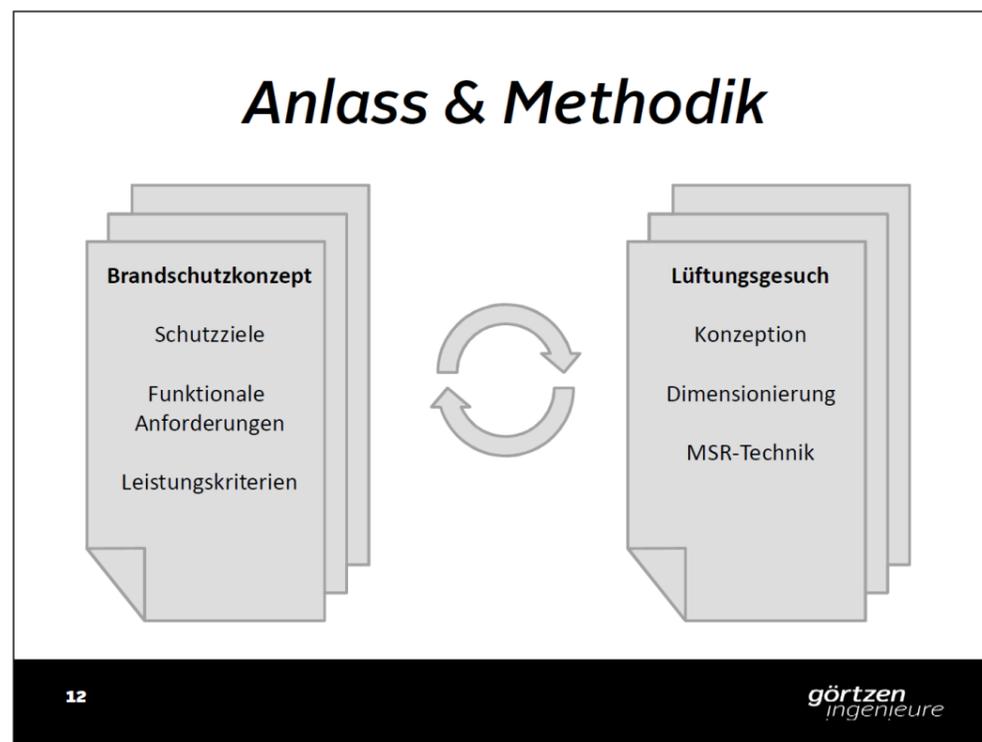
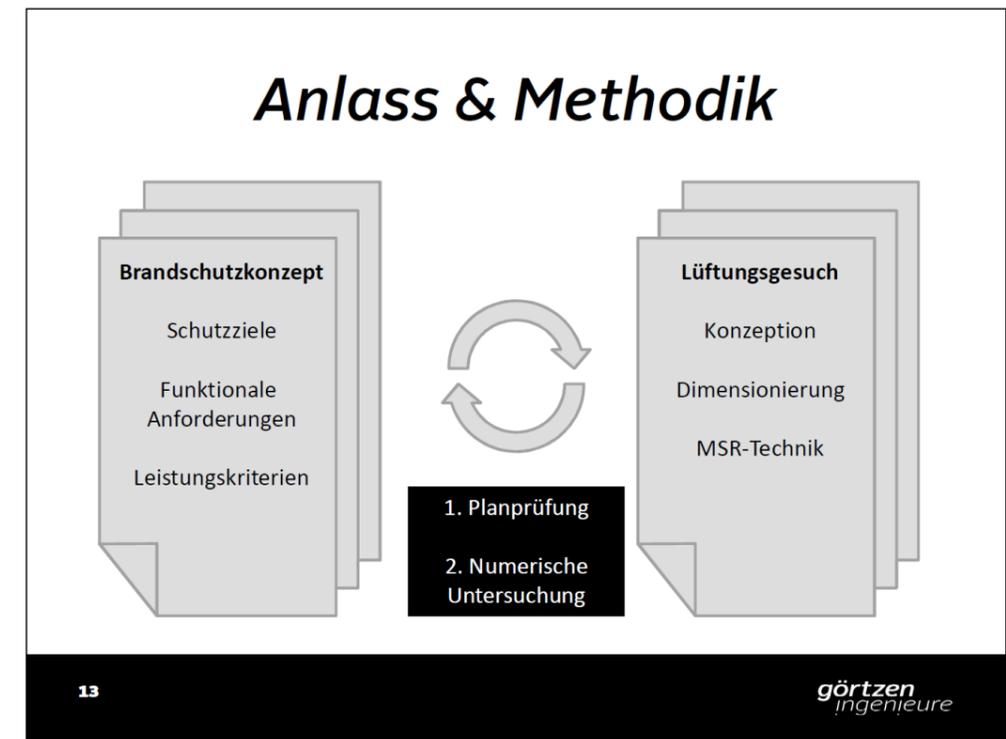
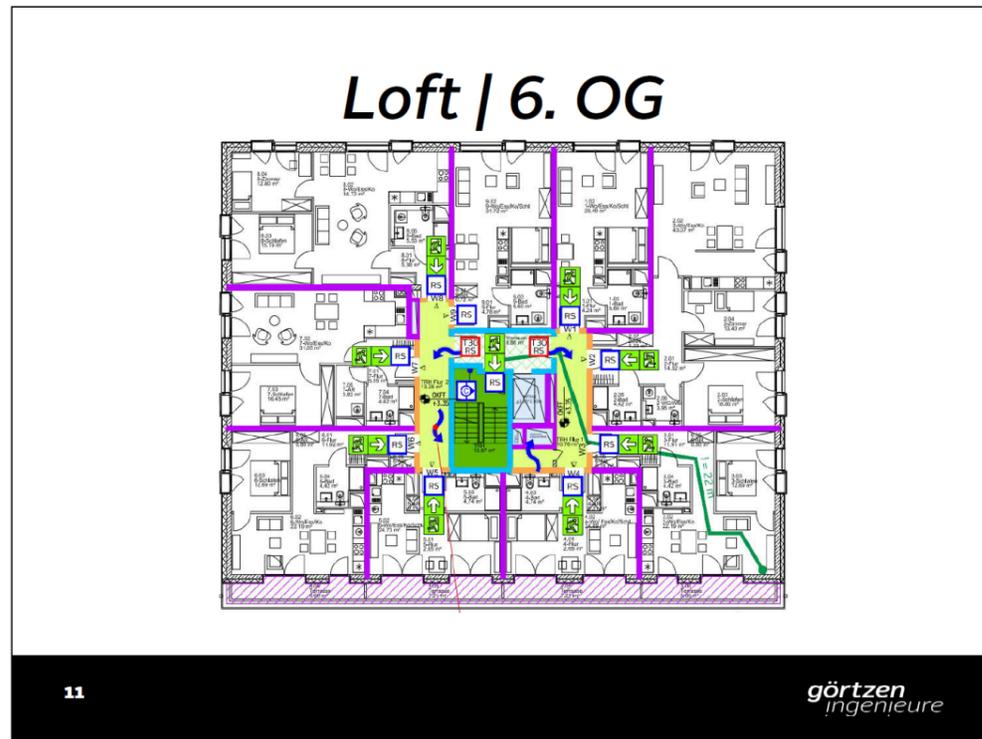


# Turm | EG



# Loft | EG





## Anlass & Methodik

Druckverluste?  
Leckagen?

Zuluft

Abluft

15 görtzen  
Ingenieure

## Anlass & Methodik

Systemabgrenzung

- Räumlich: Gebäudekerne und anschließende Sicherheitskaskade über alle Geschosse
- Zeitlich: Durchströmungsbetrieb über einen Zeitraum von 30 Sekunden; kein Druckregelbetrieb

17 görtzen  
Ingenieure

## Anlass & Methodik

- Leistungsorientierte Nachweisführung
  - Schutzziele
  - Funktionale Anforderungen
  - Leistungskriterien
- Numerische Untersuchung mit einem Feldmodell

16 görtzen  
Ingenieure

## FDS und HVAC

- FDS 6.5.3
- Äquidistante Gitterauflösung: 0.1 m
- Loft: 2 MESHs mit 4.7 Mio. Zellen
- Turm: 5 MESHs mit 12.2 Mio. Zellen

18 görtzen  
Ingenieure

## FDS und HVAC

- Treppenträume und Fahrschächte als separate Pressure Zones
- Modellierung Leckagen i.W. über Pfade zwischen Pressure ZONES und z.T. über HVAC LEAKs
- Direkte Modellierung der Lüftungstechnischen Anlagen mit HVAC

19

görtzen  
Ingenieure

## FDS und HVAC

### DUCTs

- Kanäle, Schächte etc.
- AREA, ROUGHNESS, PERIMETER, LENGTH, (LOSS)

### NODEs

- Verbindungspunkte, Gitter etc.
- AMBIENT, VENT\_ID, LOSS

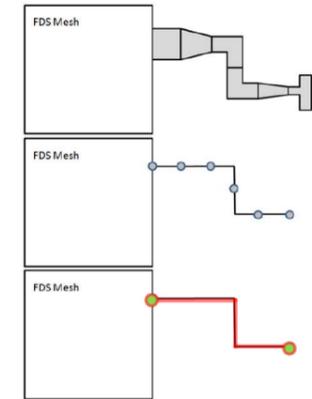


Bild: FDS User's Guide

21

görtzen  
Ingenieure

## FDS und HVAC

### HVAC

- Gekoppelter Netzwerk-Strömungslöser
- DUCTs
- NODEs
- FANs
- DAMPERs
- Ankopplung an die FDS Domäne über VENTs

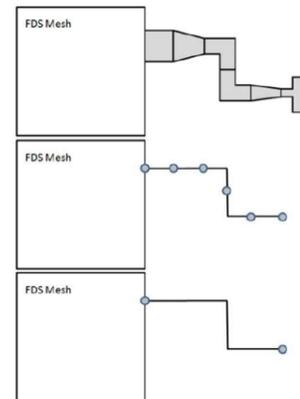


Bild: FDS User's Guide

20

görtzen  
Ingenieure

## FDS und HVAC

### FANs

- VOLUME\_FLOW=1.0
- MAX\_FLOW=1.0, MAX\_PRESSURE=1000
- RAMP\_ID='fan curve',

### LEAKs

- TYPE\_ID='LEAK', VENT\_ID='VENT 1', VENT2\_ID='VENT 2', AREA=0.001/

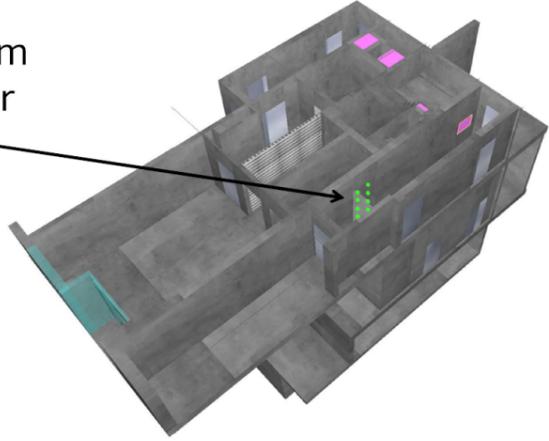
Hinweis: Exemplarische Werte aus dem FDS User's Guide

22

görtzen  
Ingenieure

## Analyse

8 Messstellen im Querschnitt der Vorraumtür



görtzen  
Ingenieure

## 1. Analyse

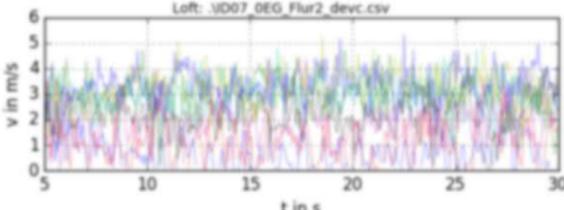
Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in den Vorraumtüren

	Soll: 2 m/s			Soll: 0,75 m/s
	TR Loft Flur 1	TR Loft Flur 2	TR Turm	FwA Turm
EG	2,0 ✓	1,2 ✗	2,4 ✓	offen
6. OG	2,3 ✓	1,8 ⚠	-	-
19. OG	-	-	2,7 ✓	offen
3.UG	3,2 ✓	-	2,0 ✓	Offen

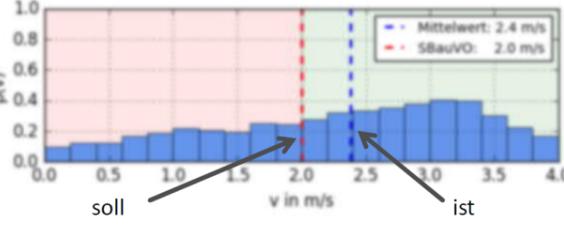
görtzen  
Ingenieure

## Analyse

Zeitlicher Strömungsverlauf entlang der 8 Messstellen



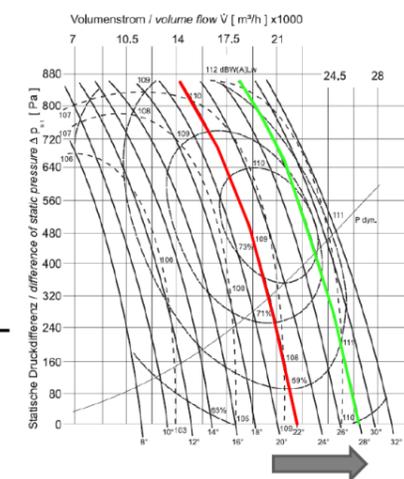
Histogramm der Strömungsgeschwindigkeiten entgegen der Fluchrichtung inkl. Mittelwert



görtzen  
Ingenieure

## Anpassung der Planung

- Anpassung Zuluftführung
- Änderung der Ventilator Kennlinie Abströmventilator
- Abgleich Druckverlustbeiwerte



## 2. Analyse

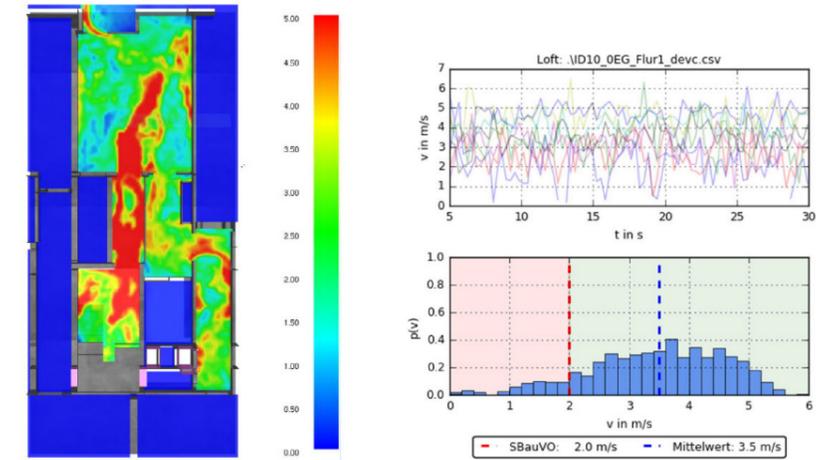
Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in den Vorraumtüren

	Soll: 2 m/s			Soll: 0,75 m/s
	TR Loft Flur 1	TR Loft Flur 2	TR Turm	FwA Turm
EG	3,5 ✓	2,5 ✓	4,2 ✓	3,6 ✓
6. OG	3,6 ✓	2,7 ✓	-	-
19. OG	-	-	4,0 ✓	3,2 ✓
3.UG	3,4 ✓	-	1,7* ✓	3,3 ✓

27

görtzen  
Ingenieure

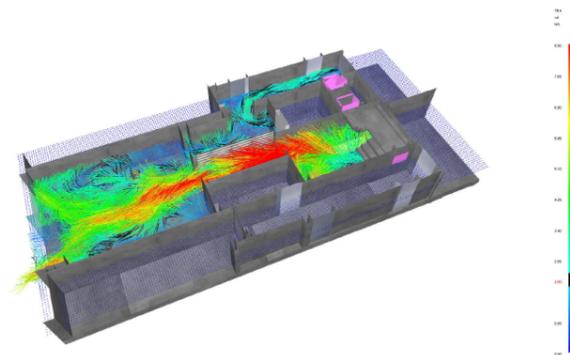
## Loft EG Flur 1



29

görtzen  
Ingenieure

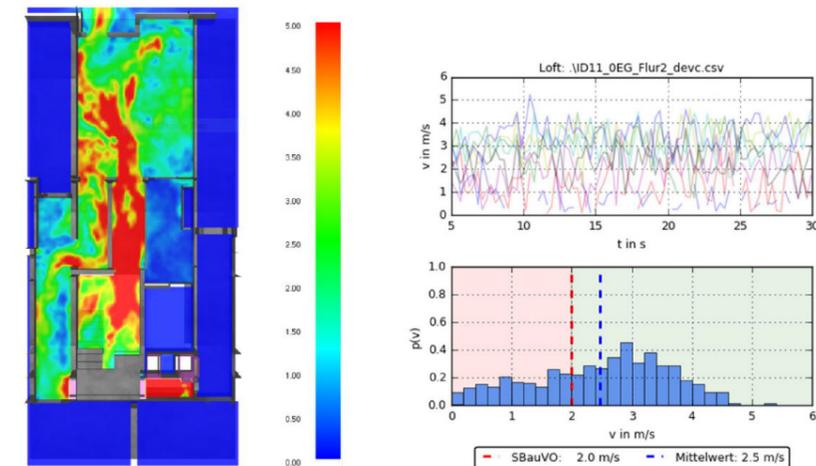
Analyse  
**LOFT**



28

görtzen  
Ingenieure

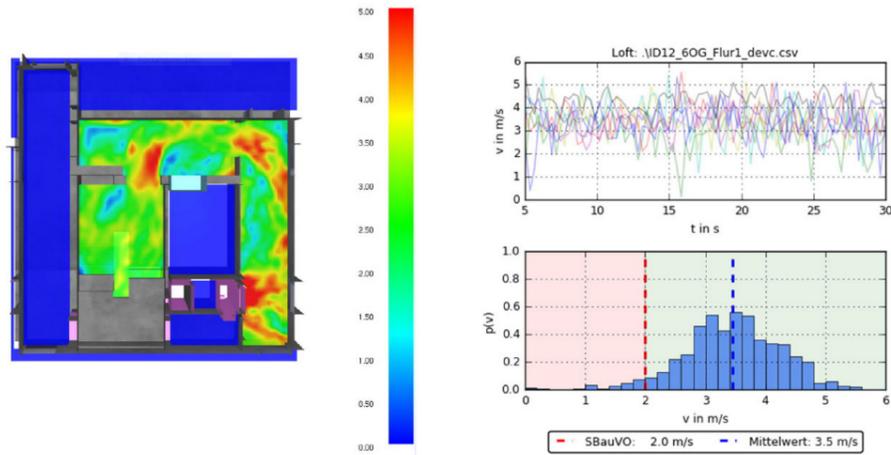
## Loft EG Flur 2



30

görtzen  
Ingenieure

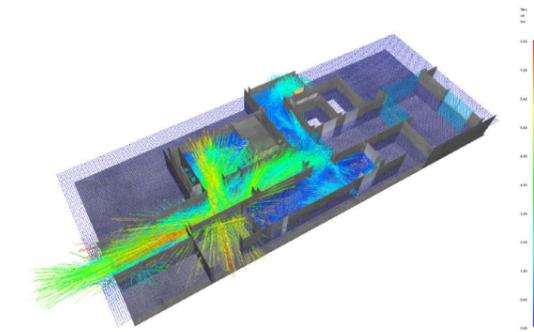
# Loft 6. OG Flur 1



31

görtzen  
ingenieure

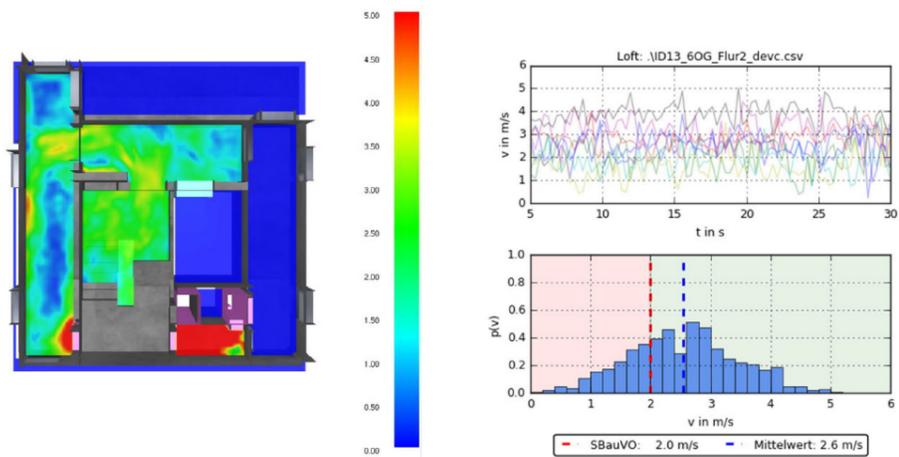
# Analyse TURM



33

görtzen  
ingenieure

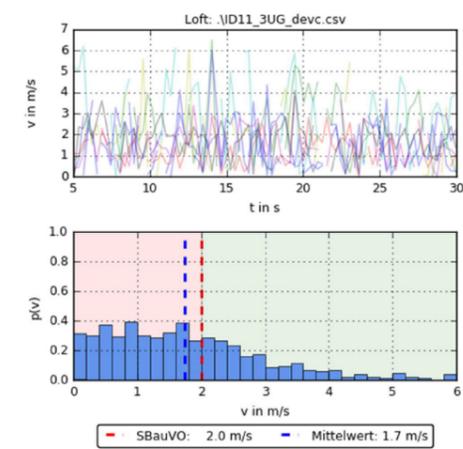
# Loft 6. OG Flur 2



32

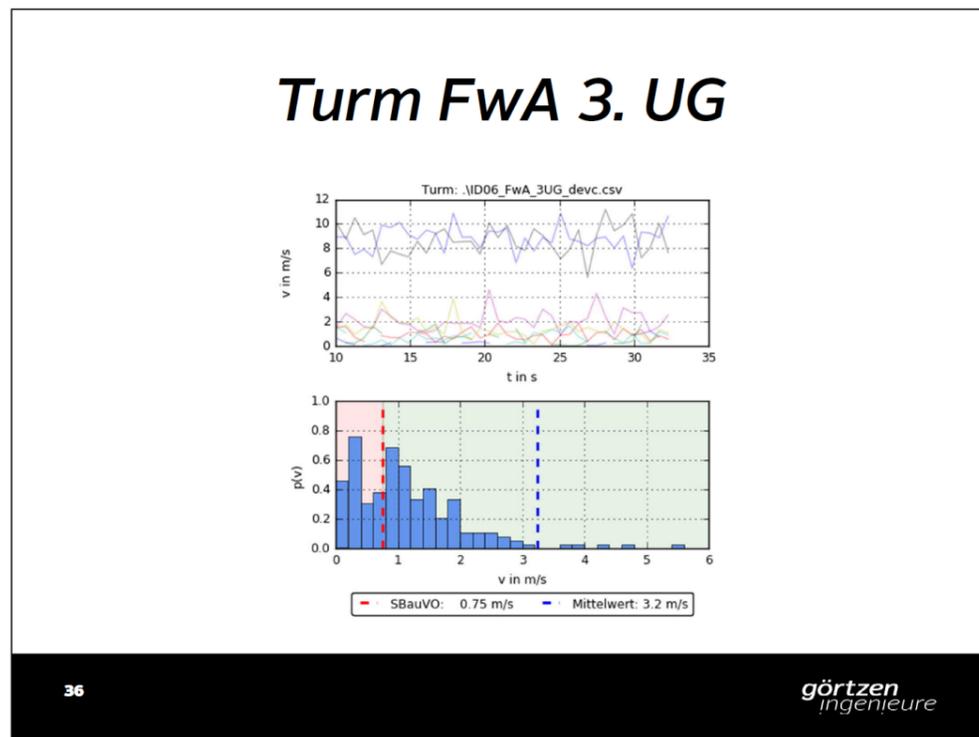
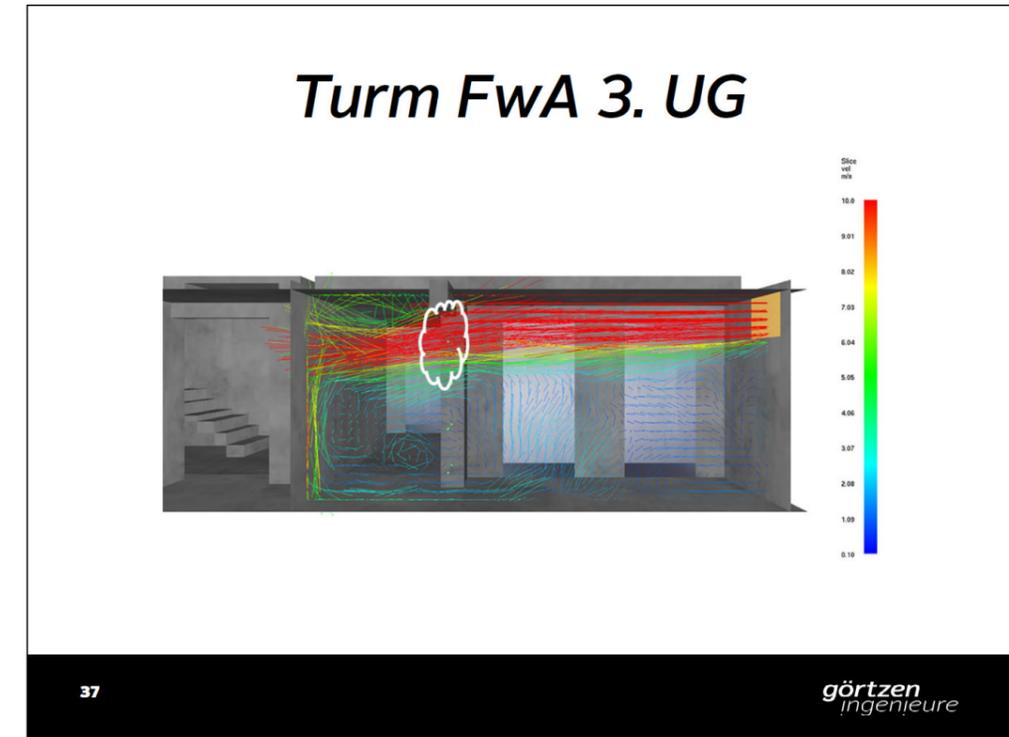
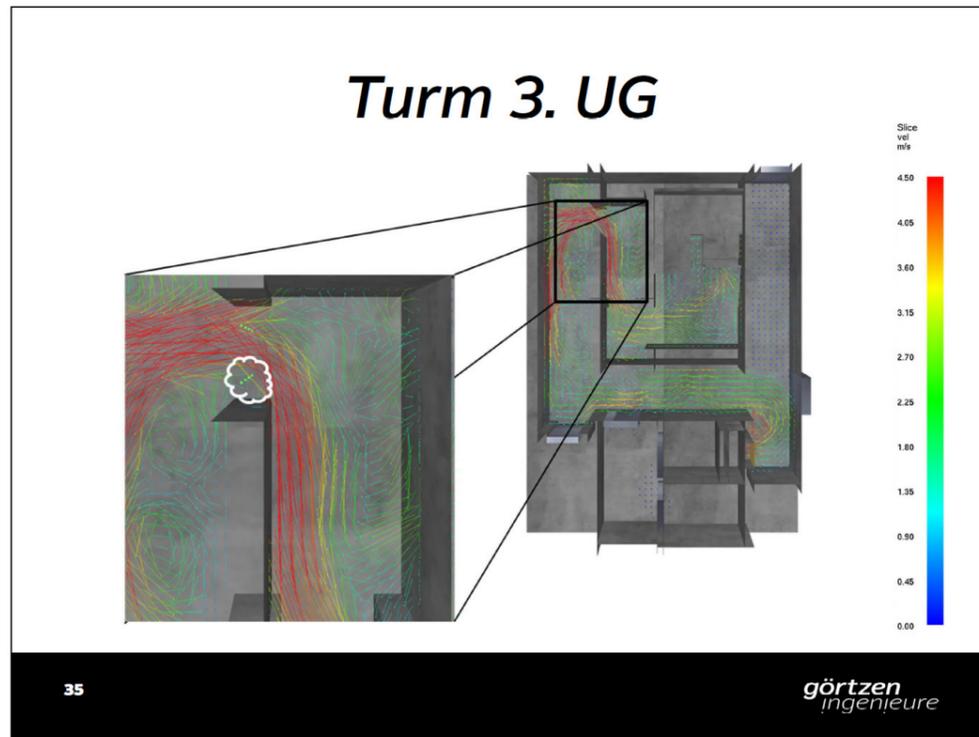
görtzen  
ingenieure

# Turm 3. UG



34

görtzen  
ingenieure



### Fazit & Diskussion

- Unter Berücksichtigung der erfolgten Planungsanpassungen kann die RDA Planung bestätigt werden.
- Zum Teil sind erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 4 m/s zu erwarten. → MSR

38

görtzen  
Ingenieure

## ***Fazit & Diskussion***

- Strömungssimulation – ein wirksames Werkzeug zur detaillierten Untersuchung und Plausibilisierung einer konkreten RDA-Planung
- HVAC – ein umfangreiches Submodell zur Betrachtung Lüftungstechnischer Anlagen (mit Schattendasein?)
- Numerische Limitationen?
- Klimatische Effekte?

39

görtzen  
ingenieure

## ***HERZLICHEN DANK!***

40

görtzen  
ingenieure

**Simon Wollny:****Schutzzielorientierte Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen für eine bestehende Verkaufsstätte - Herausforderungen und Lösungsansätze**

Gemäß dem Grundsatzpapier zur Rettung von Personen und wirksamen Löscharbeiten der ARGEBAU ist „eine Rauchableitung nur zur Unterstützung der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr vorgesehen“. Die MBO sieht für die Personenrettung keine Maßnahmen zur Rauchableitung vor. Auch die in den aktuellen Fassungen der MIndBauRL, MVStättVO und MVKVO (Stand 2014) enthaltenen vereinfachten Regelungen zur Rauchableitung, welche auf die Unterstützung der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr abzielen, beziehen sich auf Gebäude die die bauordnungsrechtlichen Anforderungen einhalten und keine Abweichungen in Anspruch nehmen<sup>[1]</sup>.

Im Einzelfall können jedoch besondere Maßnahmen der Rauchableitung, welche über die Grundanforderungen des Bauordnungsrechts hinausgehen, zur Kompensation für eine Abweichung von o. g. Anforderungen in Betracht kommen. Dies setzt jedoch die rechtzeitige und sichere Funktion der Rauchabzugsanlagen für die Benutzbarkeit der Rettungswege voraus<sup>[1]</sup>.

In diesem Beitrag soll die schutzzielorientierte Bemessung geeigneter Rauchschutzmaßnahmen durch Anwendung von Methoden des Brandschutzingenieurwesens anhand des nachfolgenden Anwendungsbeispiels erläutert werden.

Zur Steigerung der Attraktivität soll das Einkaufszentrum „Galerie Neustädter Tor“ in Gießen großzügig umgebaut werden. Unter anderem sollen ein neuer Verpflegungsbereich (Food-Court) entstehen, Deckenöffnungen geschlossen und Verkaufsstätten umgebaut werden. Aufgrund dieser Umbaumaßnahmen musste das bestehende Rauchschutzkonzept angepasst werden, sodass der Nachweis des Rauchschutzes / der Personensicherheit für die Ladenstraße durch die Anwendung von Brandsimulationen mit FDS in Kombination mit Personenstromsimulationen sichergestellt wurde.

Für den erfolgreichen schutzzielorientierten Rauchschutznachweis musste das Rauchschutzkonzept in mehreren Bereichen optimiert werden. Dies betrifft insbesondere die Berücksichtigung der bestehenden und geplanten Rauchabzugsanlagen in Abhängigkeit der Brandstelle sowie die Anordnung und Anpassung natürlicher Rauch- und Wärmeabzugsgeräte.

[1] Famers, G.; Messerer, J.: „Rettung von Personen“ und „wirksame Löscharbeiten“ -Bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung - Ein Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht, 2008

**Brandschutz Consult**  
 Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

**Schutzzielorientierte Bemessung der Rauchableitung  
für eine bestehende Verkaufsstätte**
**Herausforderungen und Lösungsansätze**
**Simon Wollny, M.Sc.**

 12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
 08.11.-09.11.2018 in Berlin

 Torgauer Platz 3 · 04315 Leipzig · E-Mail: [info@bcl-leipzig.de](mailto:info@bcl-leipzig.de) · [www.bcl-leipzig.de](http://www.bcl-leipzig.de)
**Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen**

**MIndBauRL (Fassung März 2000) / MVStättVO (Fassung Juni 2005):**

- „Rauchabzugsanlagen müssen so bemessen sein, dass sie eine raucharme Schicht von mindestens 2,50 m ermöglichen.“
- regelmäßige Anwendung von Ingenieurmethoden des Brandschutzes

**Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht zur „Rettung von Personen“ und „wirksamen Löscharbeiten“ (Oktober 2008):**

- „Rauchableitung ist nur zur Unterstützung der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr vorgesehen“ und die MBO „sieht für die Personenrettung keine Maßnahmen zur Rauchableitung vor“.

**Anpassung der Regelungen für die Rauchableitung (Juli 2014):**

- Neufassung der MIndBauRL, MVStättVO und MVKVO im Juli 2014
- vereinfachte Regelungen, i. d. R. keine ingenieurmäßige Bemessung

## Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen



### MVKVO

#### § 16 Rauchableitung

(1) In Verkaufsstätten müssen Verkaufsräume und sonstige Aufenthaltsräume mit jeweils mehr als 50 m<sup>2</sup> Grundfläche, Lagerräume mit mehr als 200 m<sup>2</sup> Grundfläche, Ladenstraßen sowie notwendige Treppenträume zur Unterstützung der Brandbekämpfung entraucht werden können.

→ Schutzziel

(2) Die Anforderung des Absatzes 1 ist insbesondere erfüllt bei

1. Verkaufsräumen und sonstigen Aufenthaltsräumen bis 200 m<sup>2</sup> Grundfläche, wenn diese Räume Fenster nach § 47 Abs. 2 MBO (2012) haben,

2. Verkaufsräumen, sonstigen Aufenthaltsräumen und Lagerräumen mit nicht mehr als 1 000 m<sup>2</sup> Grundfläche, wenn diese Räume entweder an der obersten Stelle Öffnungen zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von insgesamt 1 v. H. der Grundfläche oder im oberen Drittel der Außenwände angeordnete Öffnungen, Türen oder Fenster mit einem freien Querschnitt von insgesamt 2 v. H. der Grundfläche haben und Zuluftflächen in insgesamt gleicher Größe, jedoch mit nicht mehr als 12 m<sup>2</sup> freiem Querschnitt, vorhanden sind, die im unteren Raumdrittel angeordnet werden sollen,

3. Verkaufsräumen, sonstigen Aufenthaltsräumen und Lagerräumen mit mehr als 1 000 m<sup>2</sup> Grundfläche, wenn diese Räume Rauchabzugsanlagen haben, bei denen je höchstens 400 m<sup>2</sup> der Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät mit mindestens 1,5 m<sup>2</sup> aerodynamisch wirksamer Fläche im oberen Raumdrittel angeordnet wird, je höchstens 1900 m<sup>2</sup> Grundfläche mindestens eine Auslösegruppe für die Rauchabzugsgeräte gebildet wird und Zuluftflächen im unteren Raumdrittel von insgesamt mindestens 12 m<sup>2</sup> freiem Querschnitt vorhanden sind,

4. Ladenstraßen mit nur auf einer Ebene liegenden Verkehrsflächen, wenn diese Ladenstraßen Rauchabzugsanlagen haben, bei denen je höchstens 20 m Länge der Ladenstraße mindestens ein Rauchabzugsgerät mit mindestens 1,5 m<sup>2</sup> aerodynamisch wirksamer Fläche im oberen Raumdrittel angeordnet wird, je 80 m Länge der Ladenstraße mindestens eine Auslösegruppe für die Rauchabzugsgeräte gebildet wird und Zuluftflächen im unteren Raumdrittel von insgesamt mindestens 12 m<sup>2</sup> freiem Querschnitt vorhanden sind; bei sonstigen Ladenstraßen, wenn die Ladenstraßen Rauchabzugsanlagen haben, bei denen die Größe und Anordnung der Rauchabzugsgeräte und der notwendigen Zuluftflächen hinsichtlich des Schutzziels des Absatzes 1 ausreichend bemessen sind.

„Regel-  
Beispiel-  
Katalog“

## Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen



Die Vorgaben zur Rauchableitung sind als „**Regel-Beispiel-Katalog**“ gestaltet und lassen alternative Lösungen zur Erreichung des benannten Schutzziels zu.

Dabei wird vorausgesetzt, dass keine Abweichungen vorliegen, d. h. die grundlegenden bauordnungsrechtlichen Anforderungen sind erfüllt:

- Standsicherheit im Brandfall,
- Raumtrennung und Abschnittsbildung,
- Bemessung, Anordnung und Ausbildung der Rettungswege,
- betrieblich/organisatorische Vorkehrungen und
- anlagentechnische Maßnahmen einschließlich Alarmierung.



Besondere Maßnahmen der Rauchableitung können zur Kompensation für Abweichungen von o. g. Anforderungen in Betracht kommen.

## Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen



### § 16 Rauchableitung

(1) In Verkaufsstätten müssen Verkaufsräume und sonstige Aufenthaltsräume mit jeweils mehr als 50 m<sup>2</sup> Grundfläche, Lagerräume mit mehr als 200 m<sup>2</sup> Grundfläche, Ladenstraßen sowie notwendige Treppenträume zur Unterstützung der Brandbekämpfung entraucht werden können.

(2) Die Anforderung des Absatzes 1 ist insbesondere erfüllt bei (...)

**sonstigen Ladenstraßen** (d. h. bei Ladenstraßen mit mehreren Ebenen), wenn die Ladenstraßen Rauchabzugsanlagen haben, bei denen die Größe und Anordnung der Rauchabzugsgeräte und der notwendigen Zuluftflächen hinsichtlich des Schutzziels des Absatzes 1 ausreichend bemessen sind.

Bei Ladenstraßen mit mehreren Ebenen wird die Anwendung von Ingenieurmethoden zur Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen „von der Kür zur Pflicht“.



## Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen



### Zugrundeliegendes Brandmodell:

Unter Beachtung sowohl physikalischer Modelle (Energie- und Massebilanzmodell) als auch physikalisch-strömungsmechanischer Modelle – wie sie beispielsweise auch der Normenreihe DIN 18232 zu Grunde liegen, hier wegen des geforderten Schutzziels jedoch mit modifizierten Randbedingungen – wäre z. B. bei einer natürlich wirkenden Rauchableitung rechnerisch eine aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche  $A_W$  von 4 bis 5 m<sup>2</sup> in Zuordnung zu der Fläche des Raumes von  $A = 1\,600$  m<sup>2</sup> ausreichend.

**Dabei wird ein Brandverlauf bis zum Ende der Entstehungsphase als Bemessungsszenario mit einer Brandleistung von 2 MW** [übliche Brandleistung eines in der Entstehungs- und Entwicklungsphase brandlastgesteuerten Brandes und zugleich gerundeter Maximalwert des in Abstimmung auf 1,5 m<sup>2</sup> wirksamer Rauchabzugsfläche  $A_W$  sich einstellenden ventilationsgesteuerten Brandes; siehe hierzu vergleichsweise auch die Gleichung (AA.1) und (BB.6) in DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12] **über einen Zeitraum von einer Stunde betrachtet.**

Der Feuerwehr wird zudem eine gewisse Verrauchung des Raumes, z.B. durch örtliche Verwirbelung, zugemutet.

## Anlass und Aufgabenstellung



Umbau des Einkaufszentrums „Galerie Neustädter Tor“ in Gießen

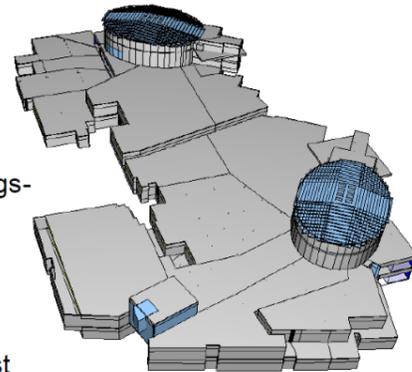
- Eingriff in das bestehende Rauchschutzkonzept
- Neubewertung und Nachweis des Rauchschutzes für die Ladenstraße durch Anwendung von Brandsimulationen (Feldmodell FDS)

Objektspezifische Bemessung der Entrauchung mit dem Ziel der Gewährleistung des bauordnungsrechtlichen Schutzziels

- Unterstützung der Brandbekämpfung

Brandschutztechnische Ausgangsbedingungen:

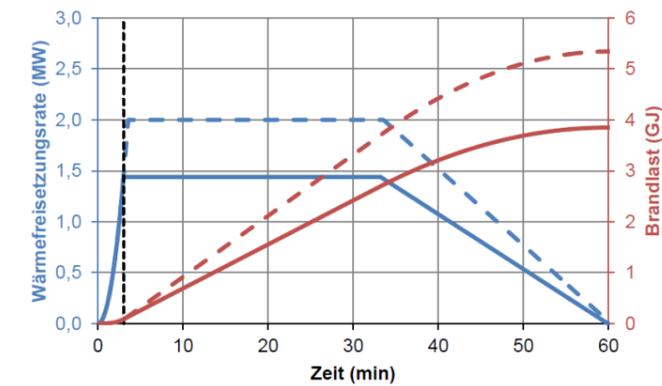
- Brandabschnittstrennung: West, Mitte, Ost
- Brandmeldeanlage mit nichtautomatischen Meldern
- Sprinkleranlage nach VdS/CEA-Standard (OH 3)



## Bemessungsbrandszenarien



- Ansatz eines idealisierten Bemessungsbrandszenarios, bezogen auf die Nutzung „Verkaufsstätte, Einkaufszentrum“ (schnelle Brandentwicklung), und Berücksichtigung der Sprinkleranlage (Ansatz des Auslösezeitpunktes mit 3 min)
- Heranziehung des Regel-Bemessungsbrandszenarios nach MVKVO



## Brandszenarien



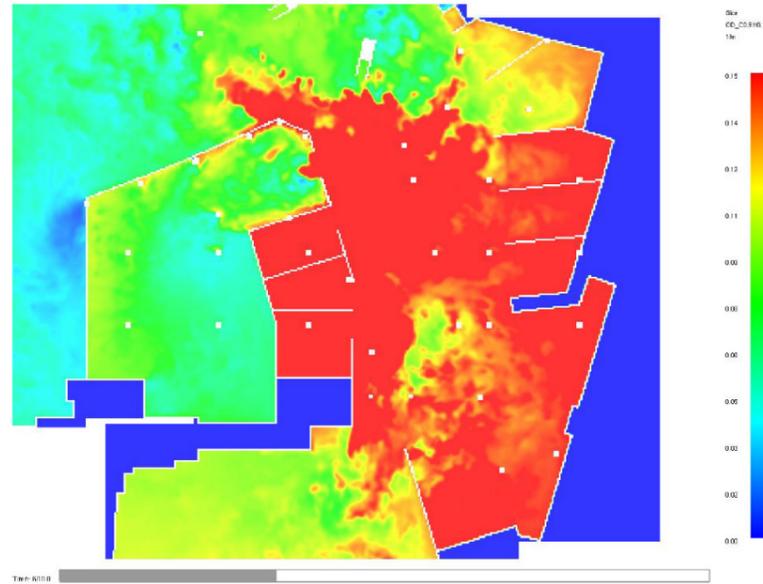
- Auswahl geeigneter maßgeblicher Brandszenarien für die Ladenstraße  
→ Aktions- bzw. Gastronomiefläche im EG und 1. OG
- Brandszenarien in Verkaufsräumen wurden nicht betrachtet



## Brandsimulationen mit FDS



## Differenzierte Ergebnisauswertung



## Brandszenario Aktionsfläche EG Mitte

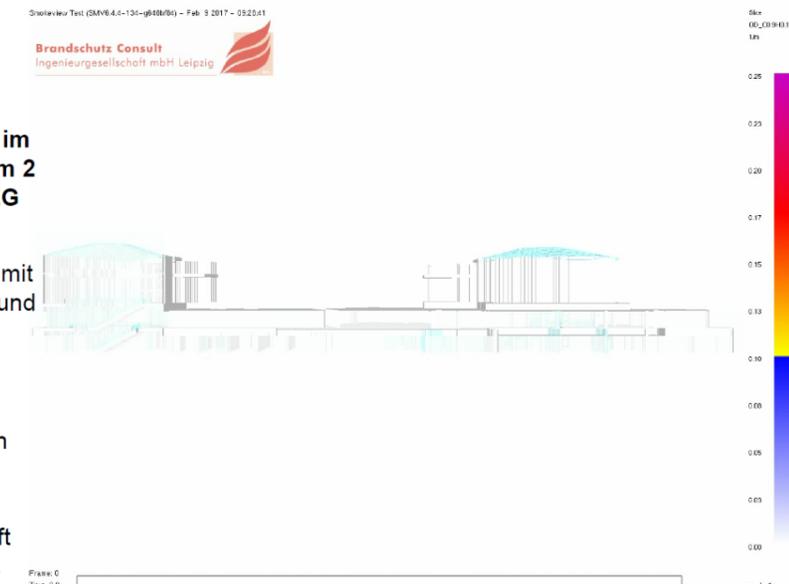


### Visualisierung der Rauchausbreitung im Längsschnitt Forum 2 und Ladenstraße EG

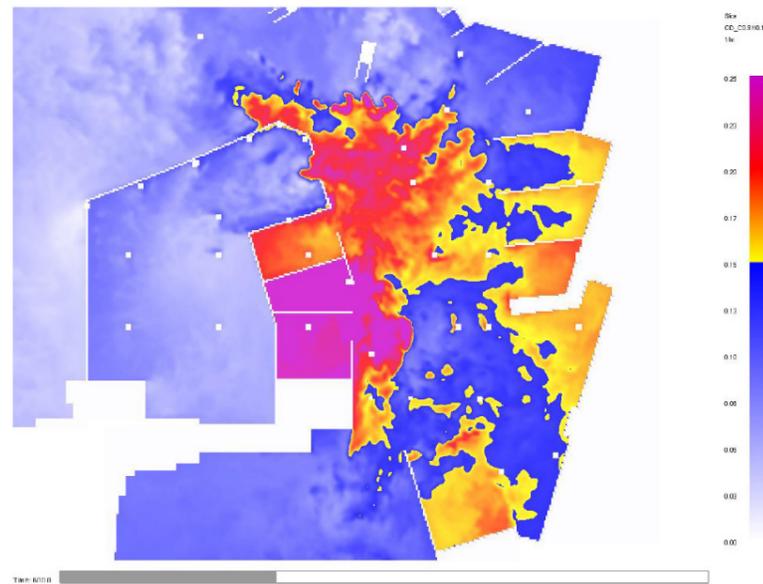
Schutzzielkriterium:  
Raucharme Schicht mit  
Mindesthöhe 2,5 m und  
 $D_L \leq 0,10 \text{ m}^{-1}$

Rauchschutz-  
maßnahmen:

- NRA in den Foren
- Natürliche Zuluft  
Haupteingänge
- Maschinelle Zuluft  
BA West und Ost



## Differenzierte Ergebnisauswertung



## Brandszenario Aktionsfläche EG Mitte

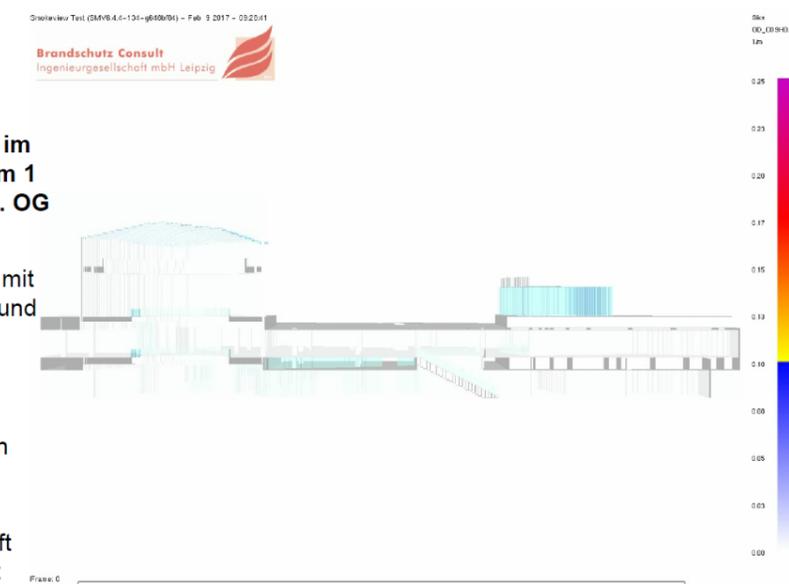


### Visualisierung der Rauchausbreitung im Längsschnitt Forum 1 und Ladenstraße 1. OG

Schutzzielkriterium:  
Raucharme Schicht mit  
Mindesthöhe 2,5 m und  
 $D_L \leq 0,10 \text{ m}^{-1}$

Rauchschutz-  
maßnahmen:

- NRA in den Foren
- Natürliche Zuluft  
Haupteingänge
- Maschinelle Zuluft  
BA West und Ost



## Brandszenario Aktionsfläche EG Mitte

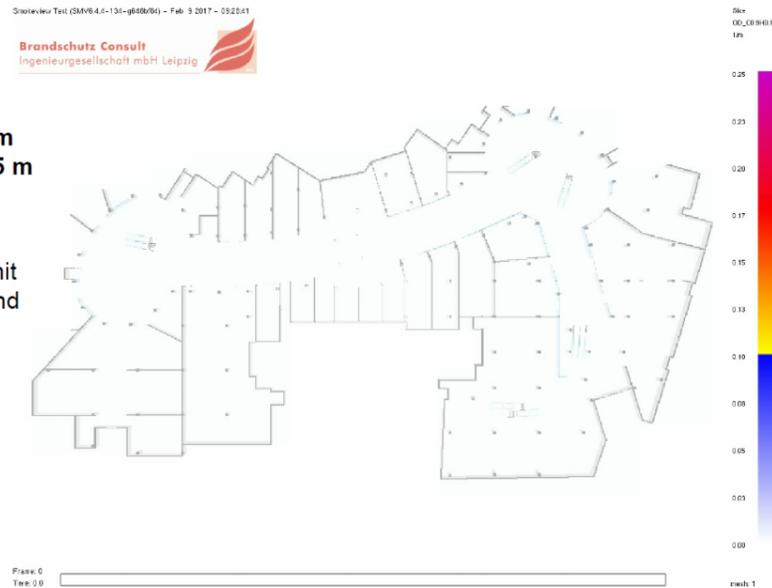


### Visualisierung der Rauchausbreitung im Horizontalschnitt 2,5 m oberhalb OKFF EG

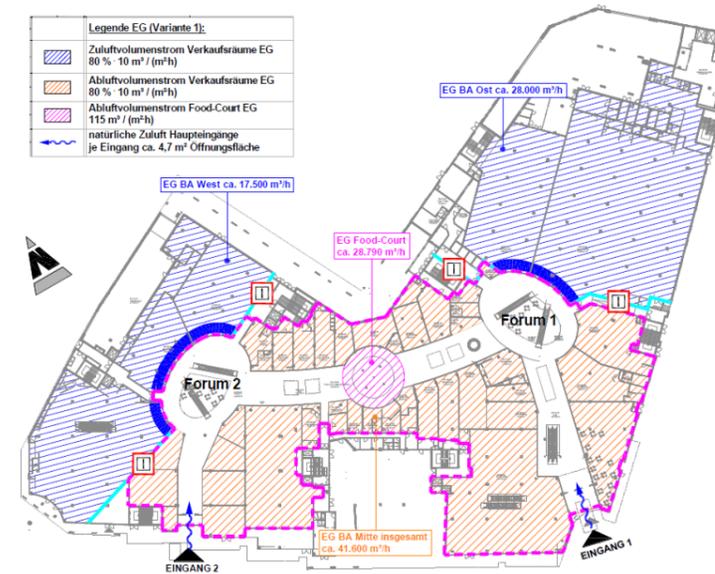
Schutzzielkriterium:  
Raucharme Schicht mit Mindesthöhe 2,5 m und  $D_L \leq 0,10 \text{ m}^{-1}$

Rauchschutzmaßnahmen:

- NRA in den Foren
- Natürliche Zuluft Haupteingänge
- Maschinelle Zuluft BA West und Ost



## Optimiertes Rauchschutzkonzept EG



## Brandszenario Aktionsfläche EG Mitte

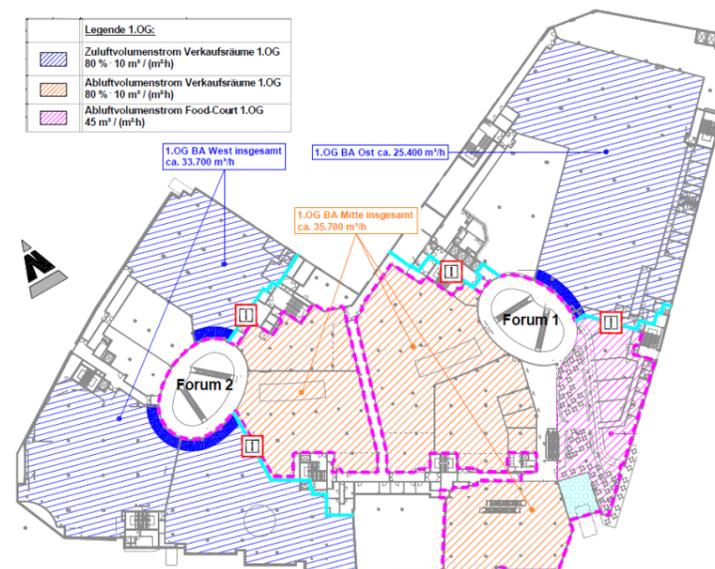


### Zwischenfazit

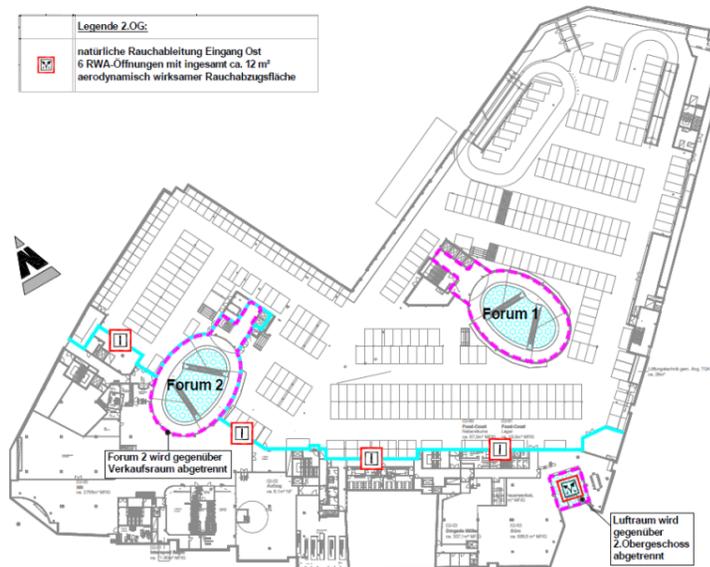
- Vollständige Verrauchung mit deutlicher Überschreitung des Grenzwerts der optischen Dichte im BA Mitte im Erdgeschoss, da Rauchableitung nur über die Foren erfolgt.
- Vollständige Verrauchung mit deutlicher Überschreitung des Grenzwerts der optischen Dichte ab 2. OG in den Foren 1 und 2.
- Mäßiger Raucheintrag bzw. Grenzwertüberschreitung in die Ladenstraße bzw. in die Verkaufsräume im 1. OG.

➤ **Schutzzielkriterien können für die Ladenstraße überwiegend nicht nachgewiesen werden.**

## Optimiertes Rauchschutzkonzept 1. OG



## Optimiertes Rauchschutzkonzept 2. OG



## Schutzzieldefinition

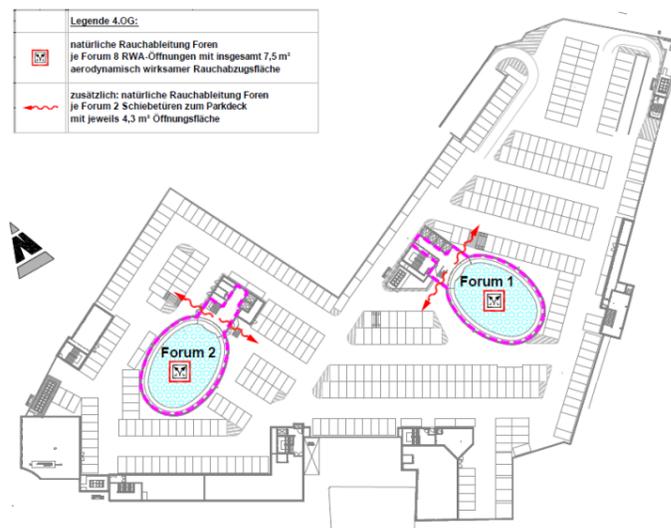


### Detaillierung der Schutzziele in Abstimmung mit der Feuerwehr



DIN 18009-1:2016-09 - Brandschutzingenieurwesen - Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung

## Optimiertes Rauchschutzkonzept 4. OG



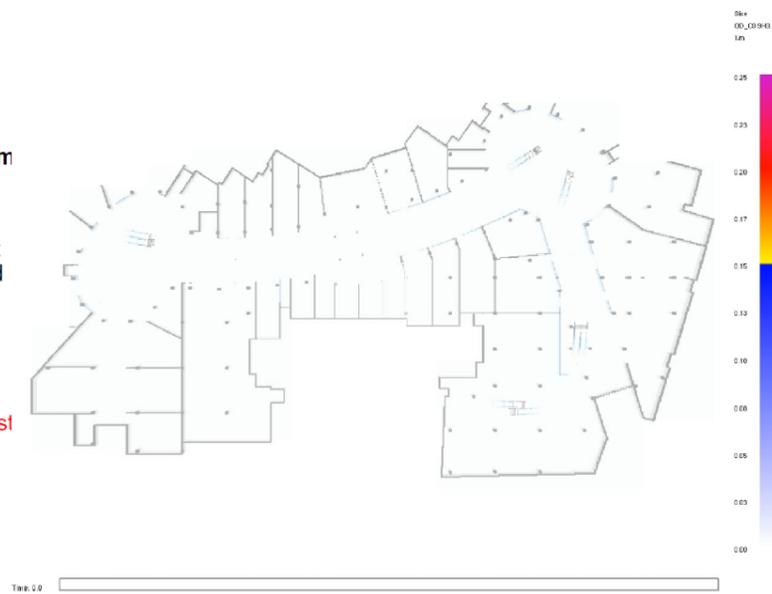
## Brandszenario Aktionsfläche EG Mitte



### Visualisierung der Rauchausbreitung im Horizontalschnitt 2,0 m oberhalb OKFF EG

Schutzzielkriterium: Raucharme Schicht mit Mindesthöhe 2,0 m und  $D_L \leq 0,15 \text{ m}^{-1}$

- Rauchschutzmaßnahmen:
- NRA in den Foren
  - **NRA am Eingang Ost**
  - **Maschinelle Abluft BA Mitte**
  - Natürliche Zuluft Haupteingänge
  - Maschinelle Zuluft BA West und Ost



## Brandszenario Aktionsfläche EG Mitte

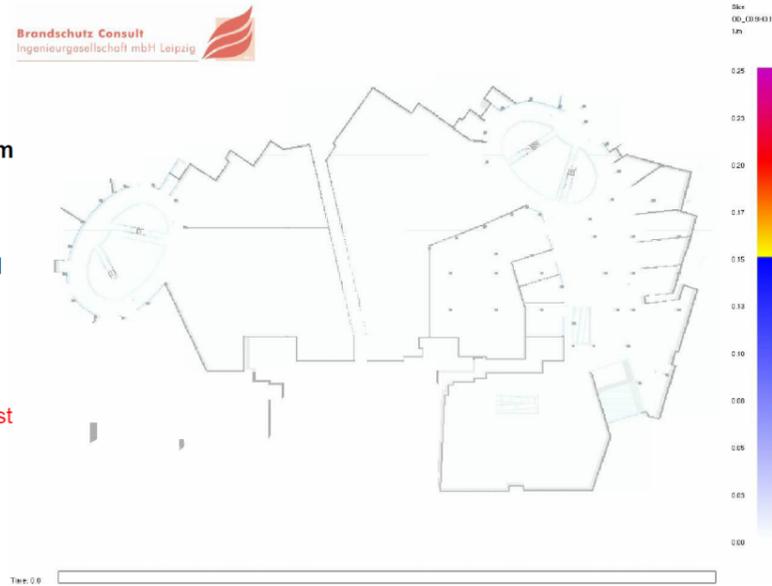


### Visualisierung der Rauchausbreitung im Horizontalschnitt 2,0 m oberhalb OKFF 1. OG

Schutzzielkriterium:  
Raucharme Schicht mit Mindesthöhe 2,0 m und  $D_L \leq 0,15 \text{ m}^{-1}$

Rauchschutzmaßnahmen:

- NRA in den Foren
- **NRA am Eingang Ost**
- **Maschinelle Abluft BA Mitte**
- Natürliche Zuluft Haupteingänge
- Maschinelle Zuluft BA West und Ost



## Brandszenario Aktionsfläche EG Mitte

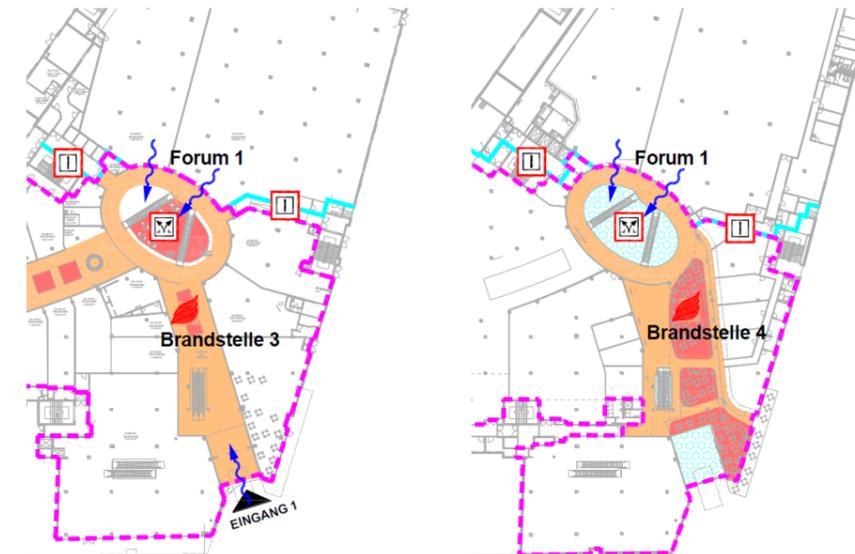


### Fazit

- Unter Zugrundelegung der optimierten Rauchschutzmaßnahmen und Schutzzielkriterien erfolgt zwar eine mäßige Verrauchung im BA Mitte; der Grenzwert der optischen Dichte wird jedoch für die raucharme Schicht bis zu einer Höhe von 2,0 m weitgehend eingehalten.

➤ **Optimierte Schutzzielkriterien können für die Ladenstraße nachgewiesen werden.**

## Weitere Brandszenarien



## Brandszenario Aktionsfläche EG Ost

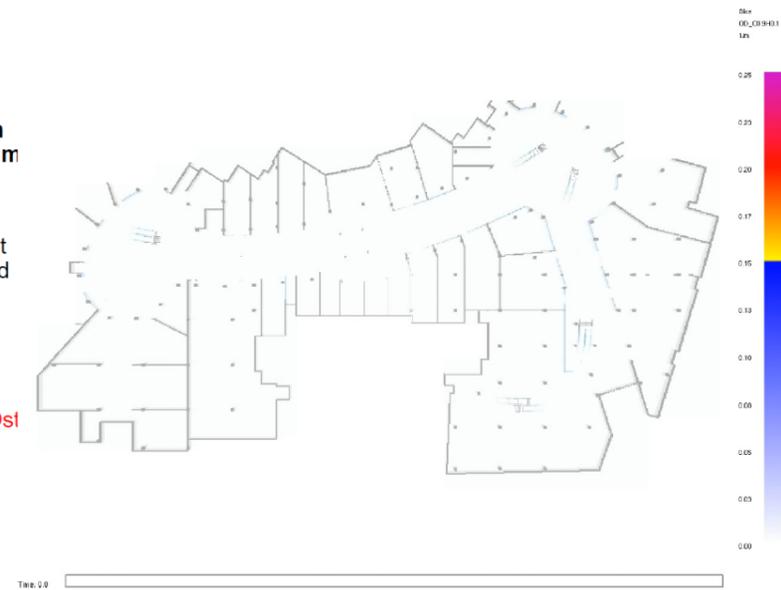


### Visualisierung der Rauchausbreitung im Horizontalschnitt 2,0 m oberhalb OKFF EG

Schutzzielkriterium:  
Raucharme Schicht mit Mindesthöhe 2,0 m und  $D_L \leq 0,15 \text{ m}^{-1}$

Rauchschutzmaßnahmen:

- NRA in den Foren
- **NRA am Eingang Ost**
- **Maschinelle Abluft BA Mitte**
- Natürliche Zuluft Haupteingänge
- Maschinelle Zuluft BA West und Ost



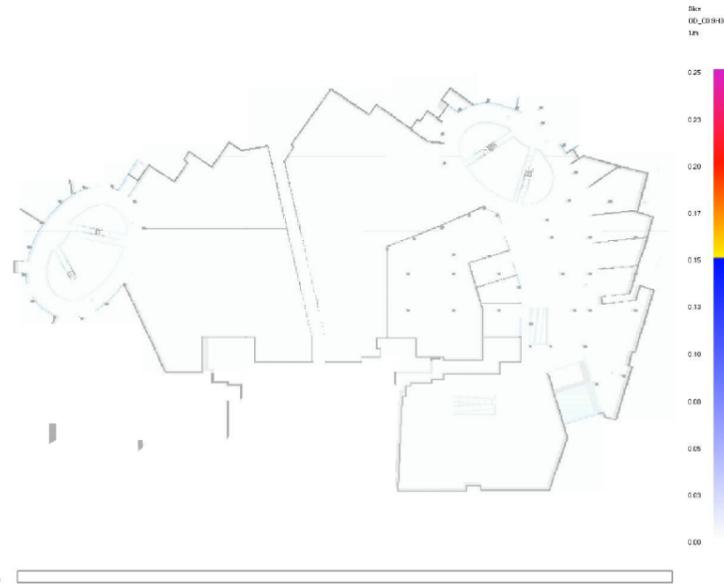
## Brandszenario Aktionsfläche EG Ost


**Visualisierung der  
Rauchausbreitung im  
Horizontalschnitt 2,0 m  
oberhalb OKFF 1. OG**

Schutzzielkriterium:  
Raucharme Schicht mit  
Mindesthöhe 2,0 m und  
 $D_L \leq 0,15 \text{ m}^{-1}$

Rauchschutz-  
maßnahmen:

- NRA in den Foren
- **NRA am Eingang Ost**
- **Maschinelle Abluft  
BA Mitte**
- Natürliche Zuluft  
Haupteingänge
- Maschinelle Zuluft  
BA West und Ost



## Brandszenario Aktionsfläche EG Ost

**Fazit**

- Mäßige Verrauchung des betroffenen Teils der Ladenstraße im EG, jedoch ohne signifikante Grenzwertüberschreitung. Keine Rauchausbreitung in den mittleren Teil der Ladenstraße im EG.
- Mäßige Verrauchung mit lokaler Überschreitung des Grenzwerts der optischen Dichte im 1. OG:

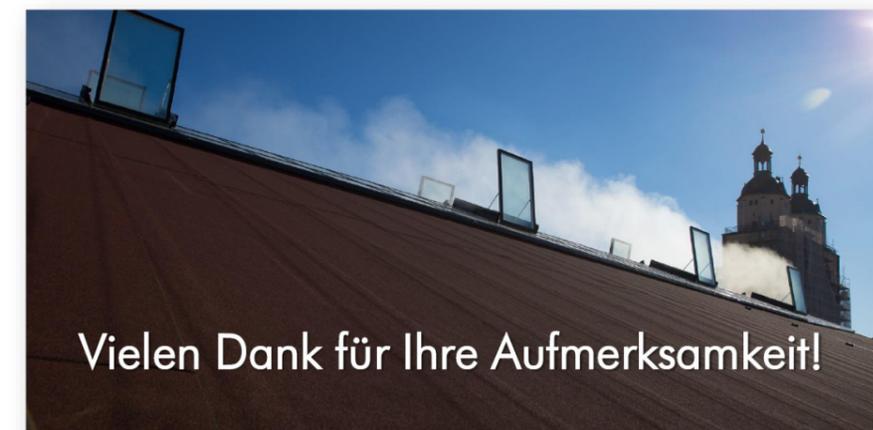
➤ Das Schutzziel „Unterstützung der Brandbekämpfung“ kann bei Zumutung „örtlicher Verwirbelung“ (vgl. MVKVO) erbracht werden.

## Zusammenfassung



- Neubewertung und Nachweis des Rauchschutzes für die Ladenstraße durch Anwendung von Brandsimulationen (Feldmodell FDS).
- Zugrundelegung des bauordnungsrechtlichen Schutzziels „Unterstützung der Brandbekämpfung“.
- Berücksichtigung der Löschwirkung der Sprinkleranlage bei der Herleitung der Bemessungsbrände.
- Brandortabhängige Steuerung der Zu- und Abluftvolumenströme.

➤ **Erfolgreicher Nachweis des Schutzziels „Unterstützung der Brandbekämpfung“**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Susanne Kilian:****News rund um ScaRC und das NIST**

Der Vortrag bietet einen Überblick über die aktuellen Techniken bzw. die möglichen Schwierigkeiten bei der Lösung der Druckgleichung in FDS. Es werden insbesondere die Grundprinzipien des alternativen Drucklösers ScaRC sowie die zukünftig geplanten weiteren Entwicklungsschritte aufgezeigt. Außerdem wird ein kleiner Überblick über die Vorträge der Hauptentwickler auf der FEMTC2018 gegeben.

## News rund um ScaRC und das NIST

Drucklösung in FDS und vieles mehr

Dr. Susanne Kilian  
hhpberlin - Ingenieure für Brandschutz  
10245 Berlin

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

### Agenda

- 1**  
Überblick  
Drucklöser
- 2**  
ScaRC News
- 3**  
NIST News

Next Generation Fire Engineering

hhpberlin 

## Drucklöser in FDS

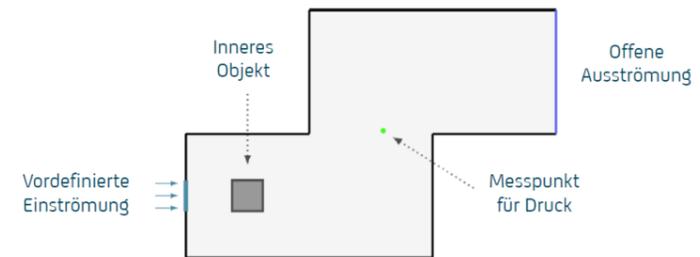
Überblick über die vorhandenen Techniken

Next Generation Fire Engineering



## Erläuterung an Demo-Geometrie

2D-Pipe mit Obstruction ,poisson2D'

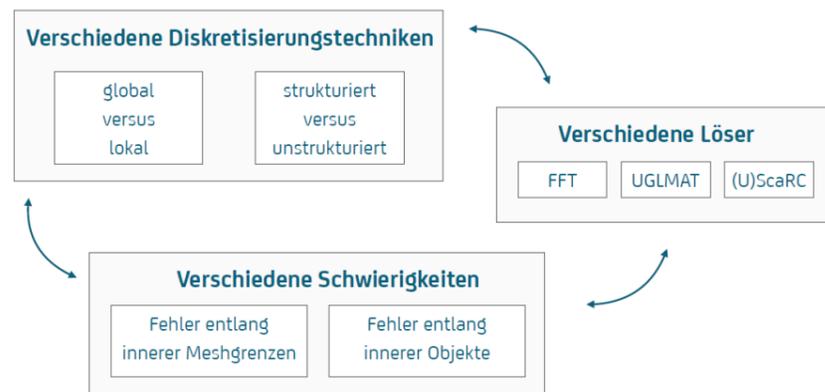


Next Generation Fire Engineering

1  
Überblick  
Drucklöser



## Diskretisierung der Druckgleichung

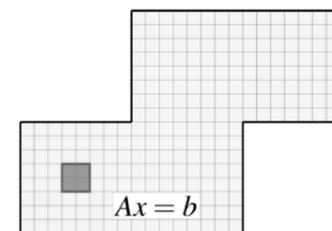


Next Generation Fire Engineering



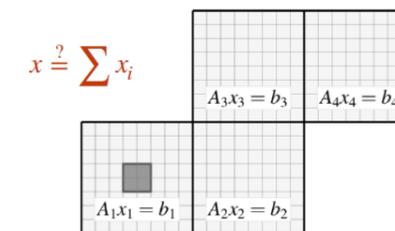
## Verschiedene Diskretisierungen: Global versus lokal

Globale Druckmatrix



Globales, gekoppeltes Gleichungssystem

Lokale Druckmatrizen



Kollektion lokaler, separater Gleichungssysteme

Next Generation Fire Engineering

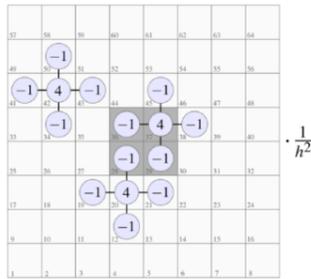
1  
Überblick  
Drucklöser



## Verschiedene Diskretisierungen: Strukturiert versus unstrukturiert

### Strukturierte Druckmatrix

Zellen innerer Objekte enthalten

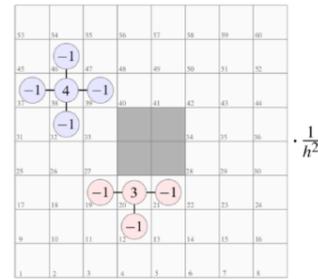


optimierte Löser für reguläre Gitter anwendbar

Next Generation Fire Engineering

### Unstrukturierte Druckmatrix

Zellen innerer Objekte **nicht** enthalten



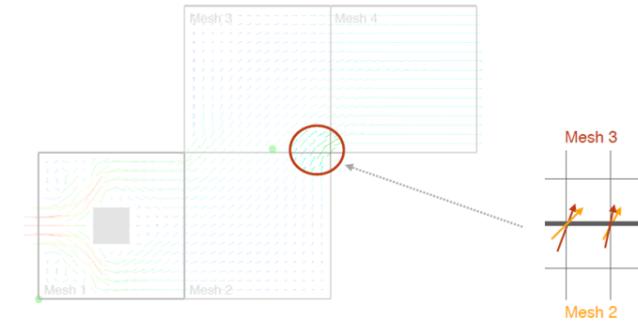
robustere Löser nötig (langsamer)

hhpberlin

**1**  
Überblick  
Drucklöser

## Schwierigkeit bei lokaler Diskretisierung

Unterschiedliche Geschwindigkeitskomponenten entlang Meshgrenzen möglich



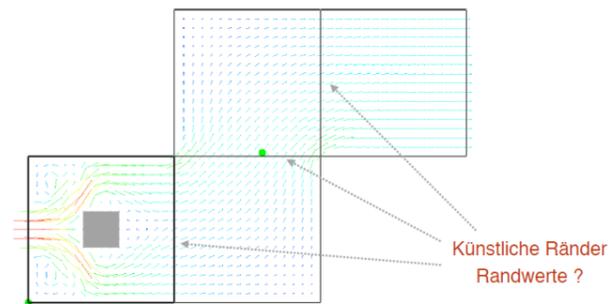
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

**1**  
Überblick  
Drucklöser

## Schwierigkeit bei lokaler Diskretisierung

**Frage:** Genauigkeit des Geschwindigkeitsfeld entlang innerer Meshgrenzen?



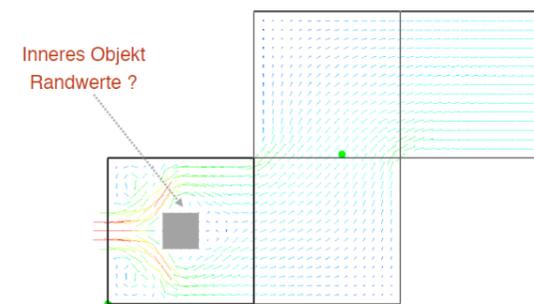
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

**1**  
Überblick  
Drucklöser

## Schwierigkeit bei strukturierter Diskretisierung

**Frage:** Genauigkeit des Geschwindigkeitsfeld entlang innerer Objekte?



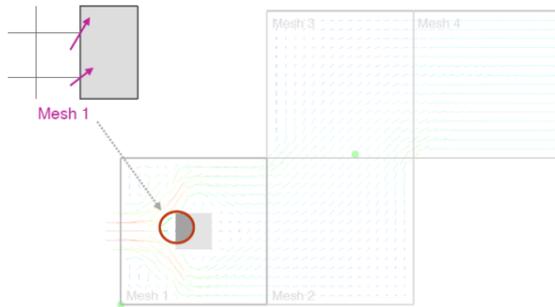
Next Generation Fire Engineering

hhpberlin

**1**  
Überblick  
Drucklöser

## Schwierigkeit bei strukturierter Diskretisierung

Penetration der Geschwindigkeitskomponenten in innere Objekte möglich



Next Generation Fire Engineering

1

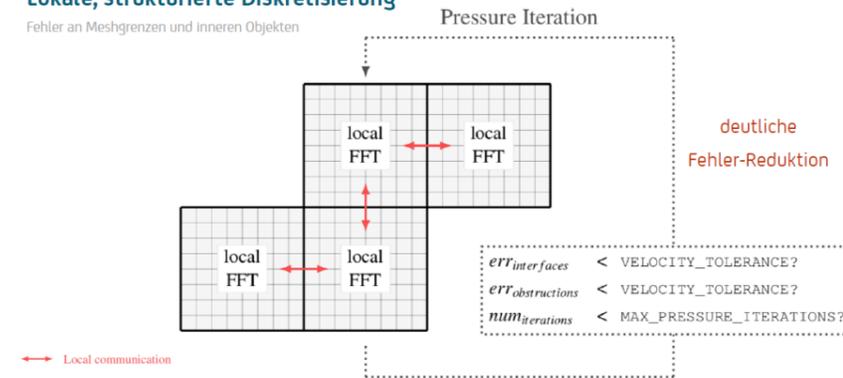
Überblick  
Drucklöser



## Paralleler FFT-Löser mit ‚Pressure Iteration‘

### Lokale, strukturierte Diskretisierung

Fehler an Meshgrenzen und inneren Objekten



Next Generation Fire Engineering

1

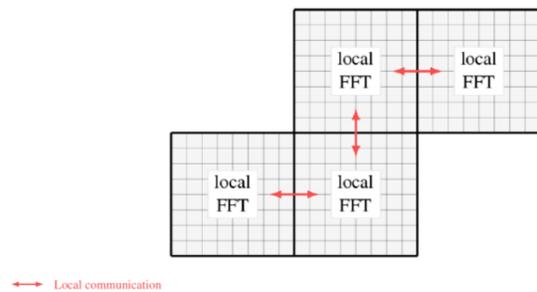
Überblick  
Drucklöser



## Paralleler FFT-Löser

### Lokale, strukturierte Diskretisierung

Fehler an Meshgrenzen und Inneren Objekten



Next Generation Fire Engineering

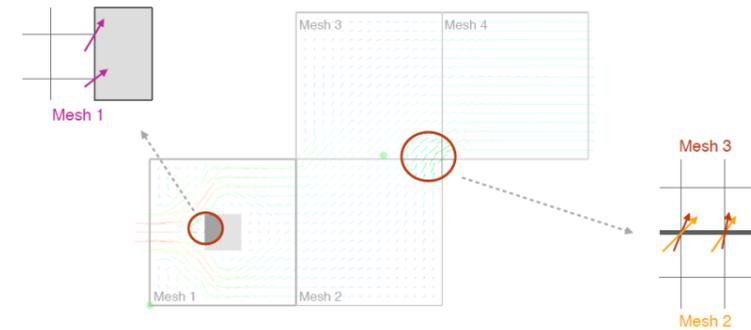
1

Überblick  
Drucklöser



## Paralleler FFT-solver mit ‚Pressure Iteration‘

### Erste Iteration: Anfängliche Fehler im Geschwindigkeitsfeld



Next Generation Fire Engineering

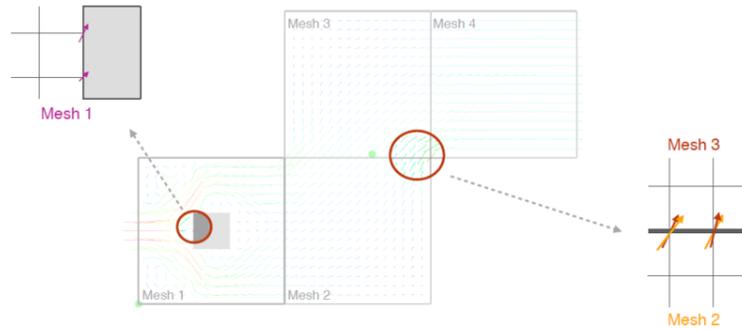
1

Überblick  
Drucklöser



## Paralleler FFT-solver mit ‚Pressure Iteration‘

**Zwischen-Iteration:** Fehler werden mehr und mehr reduziert



Next Generation Fire Engineering

1

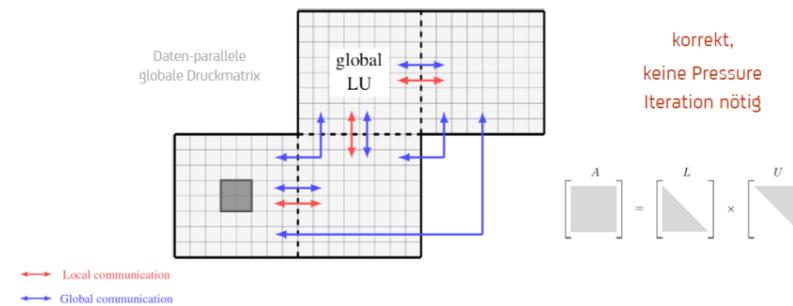
Überblick  
Drucklöser



## UGLMAT: Globale LU-Zerlegung aus Intel MKL

**Globale unstrukturierte Diskretisierung**

Keine Fehler an Meshgrenzen und inneren Objekten



Next Generation Fire Engineering

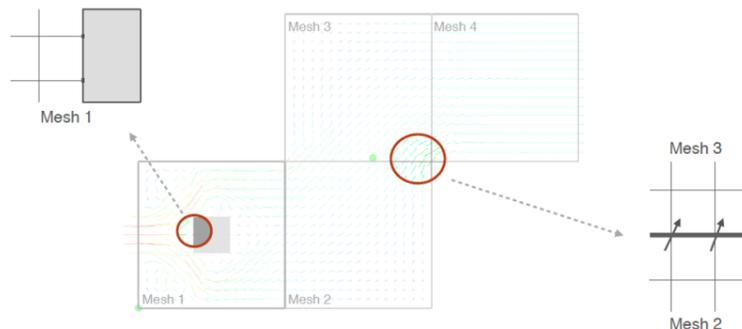
1

Überblick  
Drucklöser



## Paralleler FFT-solver mit ‚Pressure Iteration‘

**Letzte Iteration:** Fehler sind unterhalb der spezifizierten Toleranz



Next Generation Fire Engineering

1

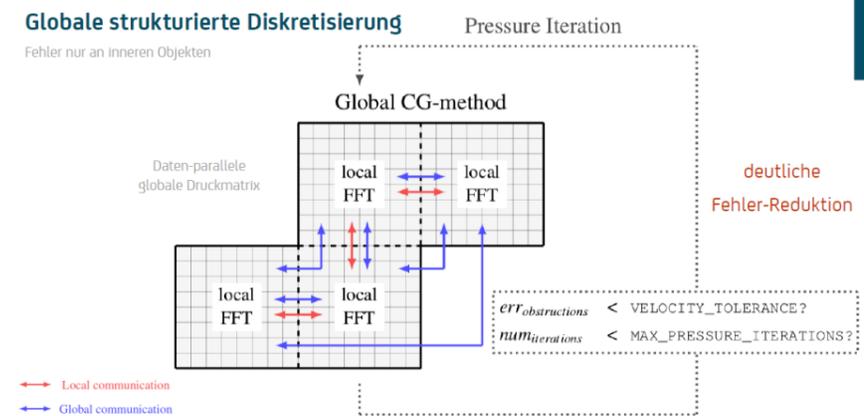
Überblick  
Drucklöser



## ScaRC-CG: Default für strukturierte Gitter

**Globale strukturierte Diskretisierung**

Fehler nur an inneren Objekten



Next Generation Fire Engineering

1

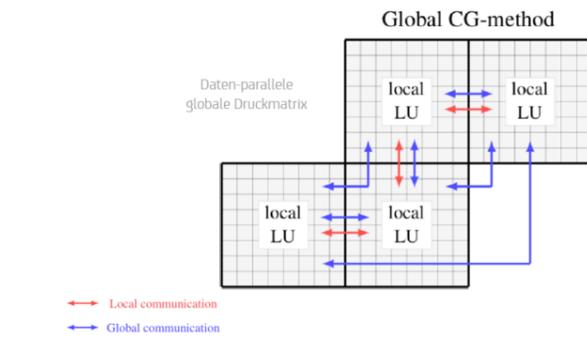
Überblick  
Drucklöser



## UScaRC-CG: Default für unstrukturierte Gitter

### Globale unstrukturierte Diskretisierung

Keine Fehler an Meshgrenzen und inneren Objekten



korrekt,  
keine Pressure  
Iteration nötig

1

Überblick Drucklöser



## Zusammenfassung

Diskretisierung innere Objekte	Diskretisierung Gebiet	Drucklöser	Pressure Iteration nötig?		Zusätzlicher Speicherbedarf
			Innere Objekte	Innere Meshgrenzen	
Strukturiert	lokal	FFT	✓	✓	sehr niedrig
	global	ScaRC	✓	—	niedrig
Unstrukturiert	global	UGLMAT	—	—	sehr hoch
	global	UScaRC	—	—	niedrig

1

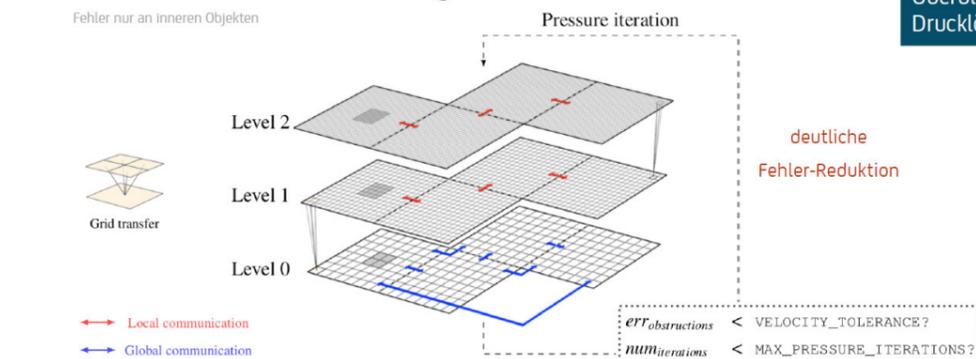
Überblick Drucklöser



## ScaRC-MG: Alternative für strukturierte Gitter

### Globale strukturierte Diskretisierung

Fehler nur an inneren Objekten



1

Überblick Drucklöser



ScaRC News

Aktueller Stand und geplante Schritte



## Aktuelle ScaRC-Entwicklung

### Dokumentation

- vorläufige ScaRC-Dokumentation inklusive Beschreibung der Drucklöser
- Tagungsband und Vortrag von der FEMTC2018
- Google Drive Link wird per Newsletter in FDS Usergroup verschickt

### Erzeugung ScaRC-Repository

- Sammlung aller aktuellen ScaRC-Testfälle
- aktuelle Dokumentation
- Schnittstelle zur Zusammenarbeit mit den Hauptentwicklern

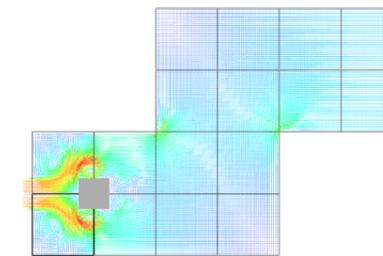
Next Generation Fire Engineering



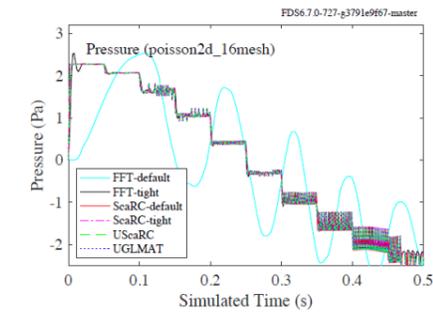
## 16-mesh Zerlegung für poisson2D



Strömungsfeld



Vergleich Drucklöser



Next Generation Fire Engineering



## Zukünftige Entwicklungsschritte für ScaRC

### Algorithmische Verbesserungen

- Erweiterung auf unterschiedliche Verfeinerungsstufen für die einzelnen Meshes
- Berücksichtigung des baroklinen Terms in der globalen CG- und MG-Iteration

### Laufzeit Verbesserungen

- Beschleunigung einzelner Verfahrenskomponenten
- Entwicklung von Alternativen zu den lokalen LU-Zerlegungen
- mögliche Berücksichtigung von GPU-Beschleunigung (Kooperation mit Prof. Göttsche, Stuttgart)

### Durchführung der Validierungstests

- Praxistests an realistischen Geometrien

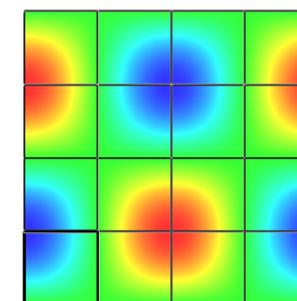
Next Generation Fire Engineering



## Rein periodische Randbedingungen

NS\_Analytical\_Solution/ns2d

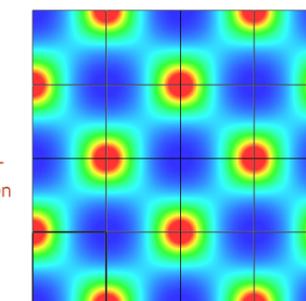
u - Geschwindigkeitskomponente



rundum periodisch

Scalar\_Analytical\_Solution/shunn3

Mischungsbruch Z



rundum periodisch

16-Mesh  
ScaRC  
Konvergenz-  
eigenschaften  
bleiben  
erhalten

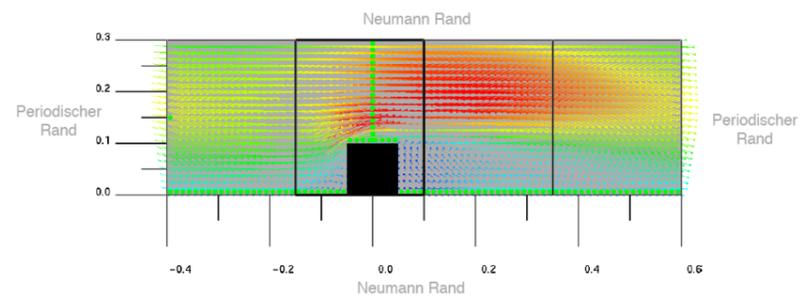
Next Generation Fire Engineering



## Gemischt periodische Randbedingungen

### Turbulence/ribbed\_channel

4-mesh UScaRC - Gemitteltes Geschwindigkeitsfeld



Next Generation Fire Engineering



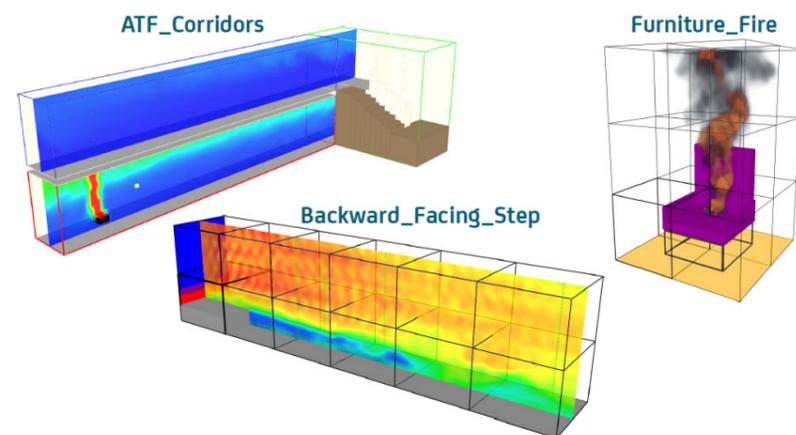
## NIST News

### Eindrücke von der FEMTC2018

Next Generation Fire Engineering



## Verschiedene ScaRC-Validierungsrechnungen



Next Generation Fire Engineering



## Bereitstellung FEMTC 2018 Beiträge

### Kevin McGrattan:

A simple two-step reaction scheme for soot and CO prediction in FDS

### Randy McDermott:

Development of 3D Heat transfer and Pyrolysis in FDS

### Marcos Vanella

Simulation of complex geometry in FDS

### Glenn Forney

Visualizing Smoke and Fire

### Jensen Hughes

How to model complex behavior using simple control functions

→ Google Drive Link wird per Newsletter in FDS Usergroup verschickt

Next Generation Fire Engineering



## Randy McDermott: 3D-Wärmeleitung

### Erwähnung diverser Vorarbeiten von

- Andreas Vischer
- Volker Hohm
- Matthias Siemon

### Entscheidung für die Entwicklung eines eigenen Modells

- Integration in existierende Parallelisierungsstrategien
- Integration in existierende DEVC-, BDNF- und SLCF-Strukturen
- Konsistente Behandlung der Wärmeleitung, Pyrolyse und Materialdeformation

Next Generation Fire Engineering



## Marcos Vanella: Komplexe Geometrien

### Einbindung komplexer Objekte in das reguläre ,Lego'-Gitter

- neue CATF Namelist

### Übertragung der verschiedenen Komponenten auf die Cut-Zellen

- skalarer Transport
- Verbrennung und Wärmestrahlung
- Masse- und Wärmestrom, etc.

### Sehr aktive Entwicklung

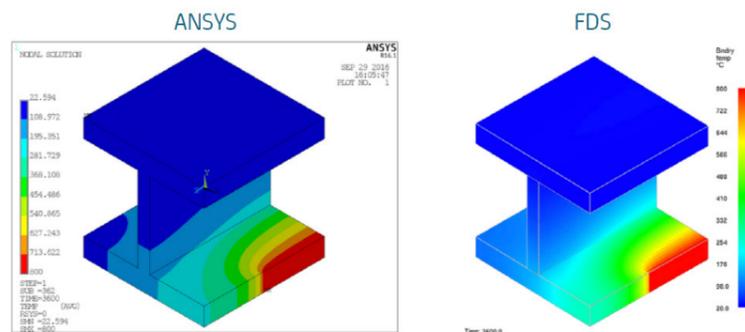
- Erarbeitung entsprechender Verifikations- und Validierungsfälle
- geplant für FDS7-Beta

Next Generation Fire Engineering



## Randy McDermott: 3D-Wärmeleitung

### Vergleich der Oberflächentemperaturen in einem Stahlträger



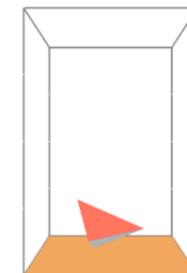
Next Generation Fire Engineering



## Marcos Vanella: Komplexe Geometrien

```

&HEAD CHID='tetra_demo', TITLE='Complex Geometry: Test tetrahedron burner.' /
# 1 MESH:
&MESH IJK=30,30,60, XB=-2.5,4.0,-2.5,4.0,0.0,10.0, /
# Time and Misc:
&TIME T_END=15. /
&MISC SIMULATION_MODE='LES', CONSTANT_SPECIFIC_HEAT_RATIO=T /
# Reaction:
&REAC FUEL='PROPANE', SOOT_YIELD=0.02 /
# BCs:
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='FLOOR' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&SURF ID='FLOOR', COLOR='ORANGE', ADIABATIC=T, DEFAULT=T /
# Tetra GEOM:
&SURF ID='BURNER', HRRPUA=300., COLOR='RED' /
&SURF ID='WALLS TETRA', COLOR='GRAY 60', ADIABATIC=T, DEFAULT=T /
&CATF OTHER_FILES='tetra.geom' /
&TAIL /
    
```



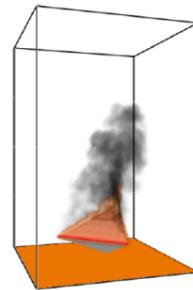
Next Generation Fire Engineering



### Marcos Vanella: Komplexe Geometrien

```

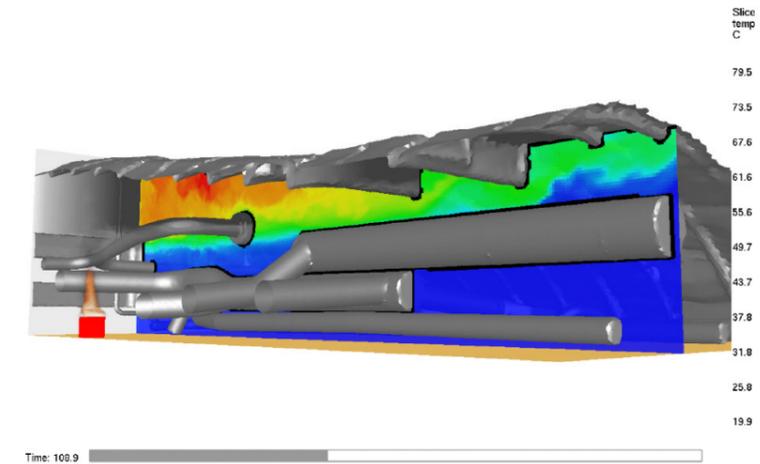
&HEAD GHID='tetra_demo', TITLE='Complex Geometry: Test tetrahedron burner.' /
# 1 MESH:
&MESH IJK=30,30,60, XB=-2.5,4.0,-2.5,4.0,0.0,10.0, /
# Time and Misc:
&TIME T_END=15. /
&MISC SIMULATION_MODE='LES', CONSTANT_SPECIFIC_HEAT_RATIO=T /
# Reaction:
&REAC FUEL='PROPANE', SOOT_YIELD=0.02 /
# BCs:
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='FLOOR' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&SURF ID='FLOOR', COLOR='ORANGE', ADIABATIC=T /
# Geometries:
&GEOM ID='TETRA'
SURF_ID='WALLS TETRA','BURNER'
VERTS=0.0, 0.0, 0.0,
1.0, 0.0, 0.0,
0.0, 1.0, 0.0,
0.0, 0.0, 1.0,
FACES=1, 2, 4, 1,
1, 3, 2, 1,
1, 4, 3, 1,
2, 3, 4, 2,
&AXIS=-1.,1.,0.
&GROTATE=30.
&SCALE=2.5,2.5,2.5
&TAIL /
    
```



3  
NIST  
News



### Marcos Vanella: Komplexe Geometrie

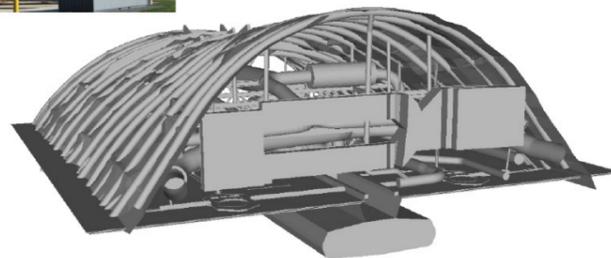


3  
NIST  
News



### Marcos Vanella: Komplexe Geometrie

Feuer im Overhead-Laderaum einer B747



3  
NIST  
News



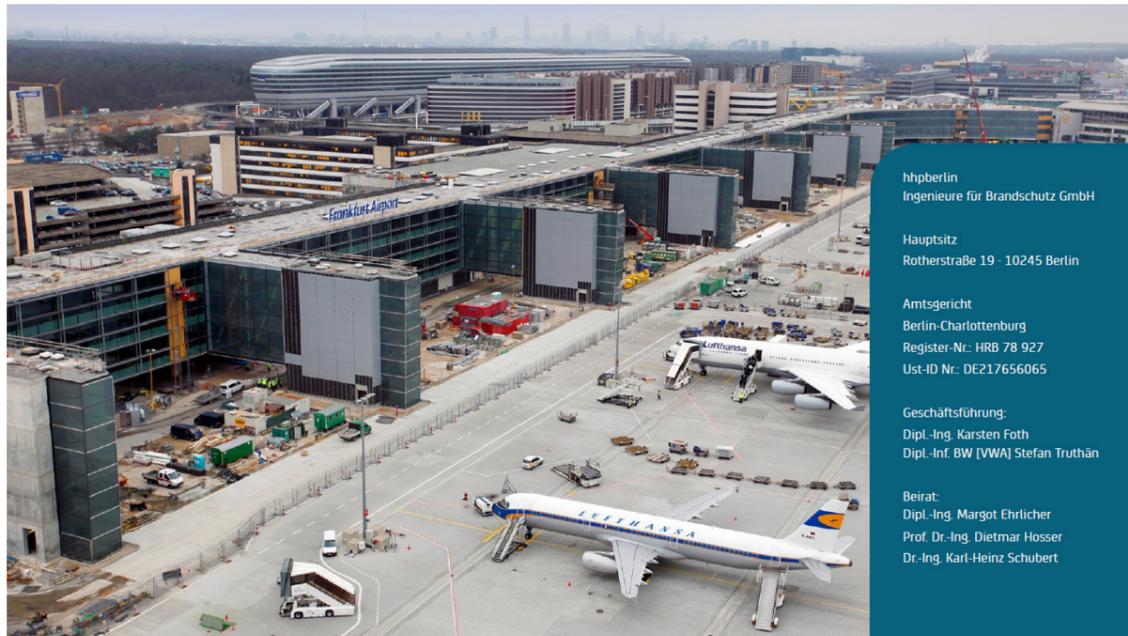
### Eindrücke aus dem NIST-Brandforschungslabor

3000 m<sup>2</sup> Fläche, 4 Absaug-Vorrichtungen (bis 20 MW)



3  
NIST  
News





**Jens Spille:****Theoretische Untersuchungen des FDS-Pyrolysemodells im Hinblick auf die Anwendbarkeit bei nachwachsenden Rohstoffen****Abstract:**

Die gesellschaftliche Herausforderung den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen im Bauwesen deutlich zu erhöhen, stellt den Anwender von numerischen Brandsimulationsmodellen vor die Frage, wie das Brandverhalten von Holz und Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bei der Bauteilbemessung und der Bemessung von Entrauchungsmaßnahmen bei Naturbränden berücksichtigt werden kann.

Die Version 6.7 des Fire Dynamics Simulators beinhaltet erstmals ein Pyrolysemodell, gekoppelt an ein dreidimensionales Wärmeleitungsmodell, welches es grundsätzlich ermöglicht die thermische Zersetzung von brennbaren Materialien bei mehrseitiger Brandbeanspruchung zu berücksichtigen.

In diesem Vortrag werden die notwendigen Parameter zur Modellierung des Brandverhaltens nachwachsender Rohstoffe dargelegt. Anhand der sich hieraus ergeben Schwierigkeiten wird darüber hinaus ein Ausblick auf die notwendige weitere Entwicklungsarbeit gegeben.



The slide cover features a background image of flames. In the top left corner is the logo of Technische Universität Braunschweig. In the top right corner is the logo of iBMB MPA TU BRAUNSCHWEIG. The title is centered in a white box. Below the title, the authors and their affiliations are listed in a white box. At the bottom, the event name and dates are listed in a white box.

**Technische Universität Braunschweig**

**iBMB MPA TU BRAUNSCHWEIG**

**Theoretische Untersuchungen des FDS-Pyrolysemodells im Hinblick auf die Anwendbarkeit bei nachwachsenden Rohstoffen**

▪ Jens Spille, M. Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß, Dr.-Ing. Olaf Riese  
 ▪ Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Technische Universität Braunschweig

▪ 12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup 08. – 09.11.2018

**Inhalt**

- Motivation
- Modellgrundlagen
- Koppelung Wärmeleitung-Pyrolyse
  - Modellierung d. Wärmeleitung 3D
  - Modellierung der Wärmeleitfähigkeit
- Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe
  - Einfluss von Holzfeuchte/Flammschutzmitteln
  - Bekleidete Holzkonstruktionen
  - Glimm-/Schwelverhalten
  - Modellierung glühender Brennstoffe
- Fazit

### Motivation

- Politischer / gesellschaftlicher Wille zum vermehrten Einsatz von Holz/nachwachsenden Rohstoffen im Bauwesen:
  - Änderung LBO HH/B-W/B: Einsatz von brennbaren Baustoffen in Konstruktionen der GK 5 (bis 22 m Höhe FFB)
  - Überarbeitung IndBauRL: Holzkonstruktionen ohne brandschutztechnische Bekleidung im eingeschossigen Industriebau bis 10.000 m<sup>2</sup>
  - Entwicklung von WDVS mit Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen
  
- Vorbild HoHo Wien:
  - Geschoße: 24
  - Höhe: 84 Meter
  - Hybridkonstruktion:
    - Treppenhauskern Stahlbeton
    - Übrige Wand/Decken-Konstruktion aus Holz
  - Geplante Fertigstellung: Anfang 2019



### Motivation

- Nachwachsende Rohstoffe sind als Biopolymere im Allgemeinen brennbar:
  - Baustoffklasse B (DIN 4102) bzw. B, C, D, E und F (DIN EN 13501)
- Thermische Zersetzung der Biopolymere unter Abspaltung brennbarer Gase
  - Beispiel 1:
    - Köhlerei
    - Herstellung von Holzkohle durch Verschwelung von Holz
    - Immaterielles Kulturerbe in Deutschland
  - Beispiel 2:
    - Moorbrand auf dem Gelände der WTD 91 in Meppen

### Motivation

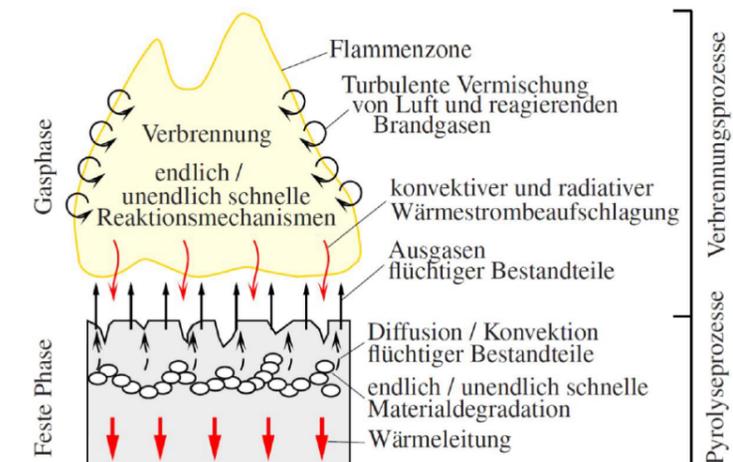
- FDS stellt in der Version 6.7 (VÖ 28.06.2018) ein dreidimensionales Wärmeleitungs-Pyrolysemodell zur Verfügung
- Dreidimensionales Pyrolysemodell Voraussetzung für die Modellierung unter Naturbrandbeanspruchung
  - ETK bzw. Cone-Calorimeter: Abbrand konstant, symmetrische Ausbreitung der Pyrolysefront



- Lässt sich das Abbrandverhalten von Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen mit FDS modellieren?

### Modellgrundlagen

- Pyrolyse von Feststoffen



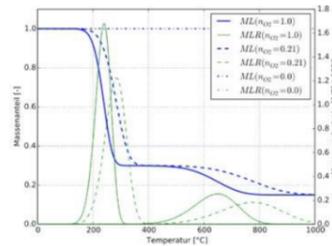
### Modellgrundlagen

- 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:

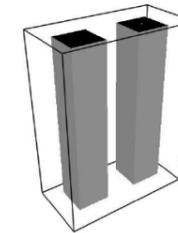
$$\dot{m}_{\text{reac}}''' = \sum_i \sum_j A_{j,i} \rho_j \exp\left(\frac{-E_{j,i}}{R_m T}\right) w_{j,i}^N n_{O_2}^{N_{O_2}}$$



### Koppelung Wärmeleitung - Pyrolyse

- 3D- Wärmeleitung:

- Diskretisierung 3D-Wärmeleitung analog zur Diskretisierung der Gasphase
- Beispiel:
  - 1 cm Polymer mit direkter Wärmebeaufschlagung von 50 kW / m<sup>2</sup>



### Modellgrundlagen

- Aktivierungsenergien und präexponentielle Exponenten können einer Vielzahl von Veröffentlichungen entnommen werden

Rohstoff	Aktivierungsenergie [kJ/mol]	Quelle
Laubholz	156,0	[1]
Nadelholz	161,5	[1]
Hanf	180,9	[1]
Jute	183,1	[1]
Baumwolle (Halm)	165,3	[1]
Cellulose:		
- Faserig	179,2	
- Verpackungsmaterial	154,5	[2]
- Zeitungspapier	178,8	

[1] Wu et. al.: Thermal decomposition kinetics of natural fibers: activation energy with dynamic thermogravimetric analysis, Polymer Degradation and Stability 93 (2008), 90-98  
 [2] Reynolds et. al.: Pyrolysis Decomposition Kinetics of Cellulose-Based Materials by Constant Heating Rate Micropyrolysis, energy & Fuels 1997, 11, 88-97

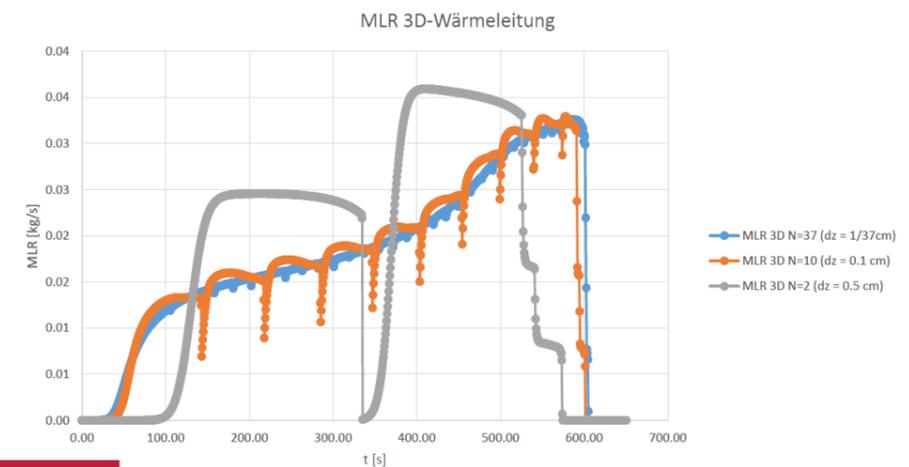
- Unterschiedliche Bestimmungsverfahren zur Berechnung der Aktivierungsenergien aus TGA-Ergebnissen



### Koppelung Wärmeleitung - Pyrolyse

- 3D – Wärmeleitung

- Auswirkung der Diskretisierung (N: Anzahl der Zellen in z-Richtung)



### Kopplung Wärmeleitung- Pyrolyse

□ 3D-Wärmeleitung:

- Vergleich Berechnungsdauer:
  - System: Xeon E3-1225 3.30 GHz, 16 GB RAM, Win10
  - OpenMP-Threads: 4
  - Simulationszeit: 650 s

Zellen_gesamt	3-D	
	[s]	Elemente [z-Achse]
8x4x37=1184	149,183	37
8x4x20 = 640	74,854	10
8x4x4 =128	40,214	2

### Koppelung Wärmeleitfähigkeit - Pyrolyse

□ Modellierung der Wärmeleitfähigkeit:

- Unabhängig von der Art der Wärmeleitung (3D / 1D) berechnet FDS die Wärmeleitungs-DGL mit einer pro Kontrollvolumen konstanten Wärmeleitfähigkeit:

$$k_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} X_{\alpha} k_{s,\alpha}$$

Mit  $X_{\alpha}$ : Volumenanteil d. Material  $\alpha$

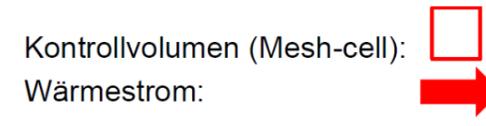
$k_{s,\alpha}$ : Wärmeleitfähigkeit d. Material  $\alpha$

- Die einzelnen Wärmeleitfähigkeiten können in Abhängigkeit von der Temperatur gesetzt werden

### Koppelung Wärmeleitfähigkeit - Pyrolyse

□ Modellierung der Wärmeleitfähigkeit:

- Der Ansatz einer gemittelten Wärmeleitfähigkeit gilt physikalisch nur für einen eindimensionalen Wärmestrom und geschichteten Materialien



### Koppelung Wärmeleitfähigkeit - Pyrolyse

□ Zwischenfazit:

- Zur Modellierung der gekoppelten Wärmeleitung-Pyrolyse ist eine feine geometrische Diskretisierung notwendig
- Da Wärmeleitung und Pyrolyse materialabhängig sind, gibt es keine materialunabhängige Empfehlung für eine geeignete Zellgröße
- Über die einwirkende Verbrennung in der Gasphase ist das zeitliche Fortschreiten der Pyrolysefront im Baustoffe darüber hinaus vom Brandgeschehen selbst abhängig

## Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

□ Einfluss von Holzfeuchte/Flammschutzmitteln:

- Nachwachsende Rohstoffe für den Einsatz im Bauwesen weisen einen Wassergehalt auf

Holzsorte	Normalfeuchte $u_{65}$ [%]
Fichte	11,9
Tanne	12,4
Eiche	13,0

- Bei Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen kommen Flammschutzmittel (u.a. Soda  $Na_2[CO_3] \cdot 10H_2O$ ) zum Einsatz, um die Normbrandprüfungen zu bestehen
- Um das Brandverhalten von nachwachsenden Rohstoffen modellieren zu können, müssen Pyrolyse- und Verbrennungsmodell die Einflüsse des chemisch- und physikalisch-gebundenen Wassers abbilden können



## Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

□ Einfluss von Holzfeuchte/Flammschutzmittel:

- Kühlung der Gasphase:
  - FDS berechnet die Temperatur einer Zelle der Gasphase über die thermische Zustandsgleichung idealer Gase
  - Der Kühleffekt von Wasser kann nicht berücksichtigt werden (dies gilt nicht für Lagrange Partikel, da diese mit der Gasphase interagieren können)
  - Die zusätzlich in die Gasphase eingebrachten Moleküle ( $H_2O$ ) führen zu einer Erhöhung der Temperatur



## Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

□ Einfluss von Holzfeuchte/Flammschutzmittel:

- Positive Auswirkung von Wasser auf das Brandverhalten:

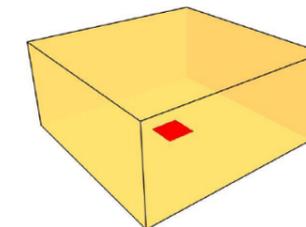
	Submodelle	Berücksichtigung möglich
Kühlung des Festkörpers: Verdampfen bzw. Abspaltung des Wassers in der Festphase	Pyrolyse	Ja
Vermischen: Störung des Mischungsverhältnis zwischen Brennstoff und Luft	Turbulenz	Ja
Kühlung der Gasphase: Wärmeentzug durch Erhöhung der im Wasser gespeicherten Wärme	Verbrennung	Nein



## Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

□ Einfluss von Holzfeuchte/Flammschutzmittel

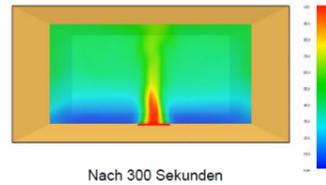
- Erhöhung der Temperatur in der Gasphase
  - Raum: 6,40 x 6,40 x 3,00 m<sup>3</sup>
  - Keine Verbrennungsmodellierung
  - Einströmen von 5 kg zusätzlich Stoff innerhalb von 5 Minuten



### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

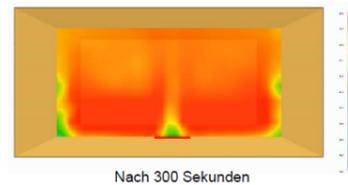
- Einfluss von Holzfeuchte/Flammschutzmittel
  - Erhöhung der Temperatur in der Gasphase

H<sub>2</sub>O-Konzentration



Nach 300 Sekunden

Temperaturanstieg

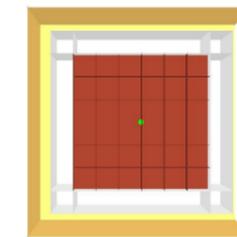


Nach 300 Sekunden

Stoff	Molares Gewicht [g/mol]	Max. Temperaturerhöhung [K]
Wasser	18,01528	3

### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

- Bekleidete Holzkonstruktion:
  - Stofftransport durch Diffusion:
    - Schaumstoffwürfel: 0,4 x 0,4 x 0,4 m<sup>3</sup>
    - Gipsbekleidung: 0,10 m
    - Außenflächen mit T=2.500°C (Strahlungsmodell, keine Verbrennung)
    - Schaumstoff zersetzt sich zu Methan
    - Simulationsabbruch aufgrund num. Instabilität

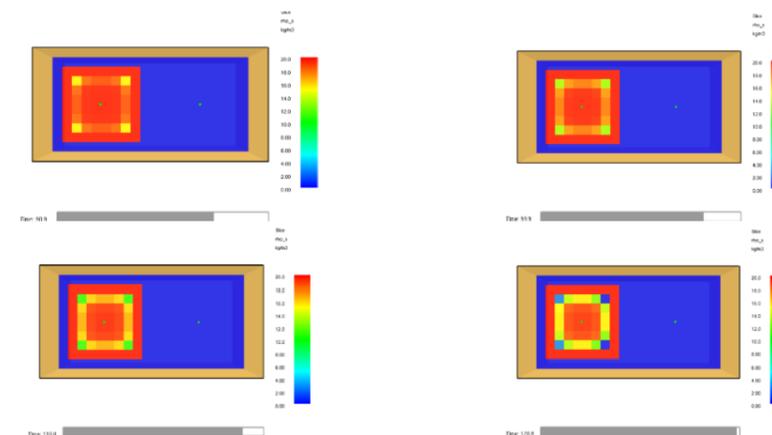


### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

- Bekleidete Holzkonstruktionen:
  - Zum Schutz vor direkter Entzündung werden Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen i.A. mit Gipskartonplatten versehen
  - Bei anhaltendem Wärmestrom kann eine thermische Zersetzung auch hinter der Brandschutzbekleidung einsetzen
  - Wie kann der Stofftransport der entstehenden Pyrolysegase in geschlossenen Systemen modelliert werden?
  - Stofftransport von Pyrolysegasen in der festen Phase:
    - Transportmechanismen
      - Transport durch Konvektion (Undichtigkeiten, Hohlräume)
      - Transport durch diffusionsoffene Medien (CO durch Gipskarton/Beton)
    - Stofftransport durch Konvektion in der Gasphase möglich
    - Stofftransport durch Diffusion kann im FDS-Pyrolysemodell über die Angabe eines Diffusionskoeffizienten berücksichtigt werden

### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

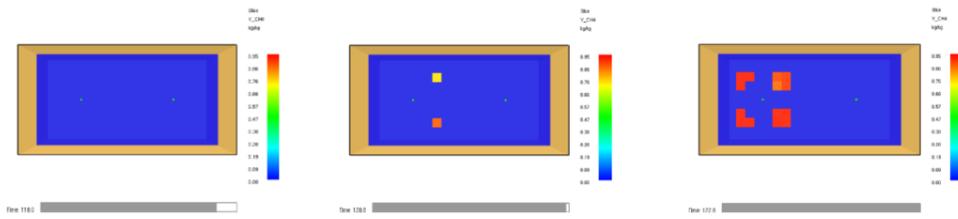
- Bekleidete Holzkonstruktion
  - Rohdichte:
    - Dichte des Schaumstoffwürfel nimmt durch therm. Zersetzung ab



### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

#### □ Bekleidete Holzkonstruktion

- Methankonzentration:
  - Nach Wegschalten (BURN\_AWAY) der ersten Zellen, dort sprunghafter Anstieg der Methankonzentration → Abbruch der Simulation



### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

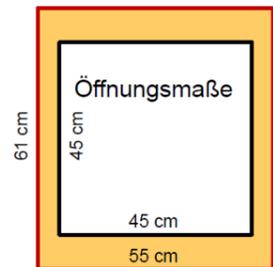
#### □ Glimmen/Schwelen

- Nachwachsende Rohstoffe neigen zum eigenständigen Glimmen und Schwelen:
  - Exotherme Reaktion ohne Flammenbildung bei geringer Sauerstoffsättigung der Verbrennungsluft
  - **Schwelen:** thermische Zersetzung und oxidative Reaktion, keine sichtbare Lichtemission
  - **Glimmen:** thermische Zersetzung und oxidative Reaktion, sichtbare Lichtemission (Glut)
  - Übergang vom Schwelen über das Glimmen zur Flammenbildung unter Anstieg der freigesetzten Pyrolysegase und des Sauerstoffverbrauchs (höhere Energiefreisetzung)

### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

#### □ Glimmen/Schwelen

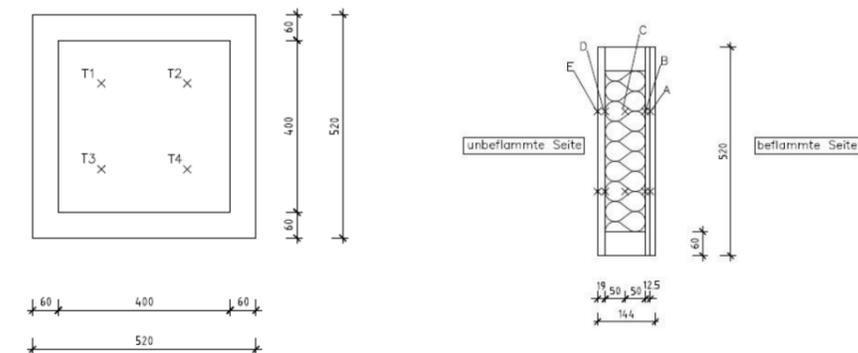
- Forschungsvorhaben „Mehr als Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen“
  - Untersuchungen zum Glimm-/Schwelenverhalten von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen:
    - Holzfaser, Hanf, Jute, Seegras, Wolle
  - Versuchsaufbau (Kleinprüfstand DIN 4102-8)
    - beflammete Probekörperfläche 450x450 mm<sup>2</sup>
    - Versuch mit zwei Proben gleichzeitig
    - Ofentemperatur gemäß ETK mittels Ölbrenner
    - Beendigung der Beflammung
      - 350 °C in Dämmstoffebene



### Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

#### □ Glimmen/Schwelen

- Probekörperaufbau



Unbeflammte Seite → beflammte Seite		
Spannplatte 19 mm	Holzfaser -Dämmstoff 100 mm	Stahlblech 1 mm

## Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

### □ Glimmen/Schwelen

- Beflammung: ETK bis Erreichen von 350 °C in Dämmstoffmitte (ca. 15 Minuten), danach keine weitere Beflammung

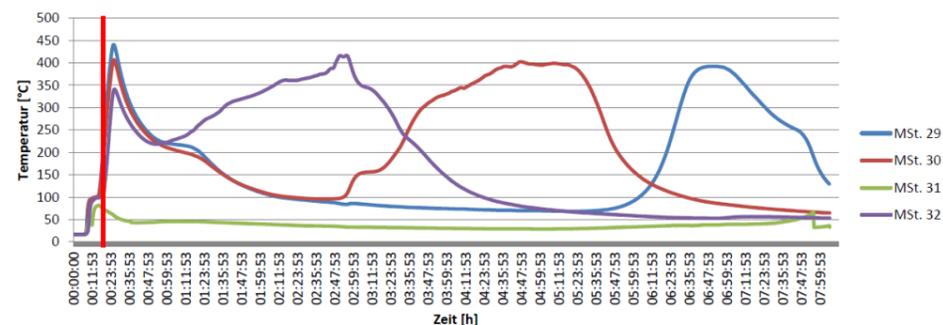


Holzfaser  
07:51:00 nach Ende der Beflammung

## Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

### □ Glimmen/Schwelen

- Nach Beendigung der Beflammung kein Ausbilden einer gleichmäßigen Glimmfront



- Modellierung von Glimm-/Schwelprozess erfordert Auflösung des lokalen Strömungsfeldes im Probekörper, mit FDS derzeit nicht möglich

## Pyrolysemodellierung nachwachsender Rohstoffe

### □ Glühende Brennstoffe:

- Nach der thermischen Zersetzung von Holz durch Ausgasen bleibt hochreaktive Holzkohle zurück
- Diese reagiert mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft unter Abgabe von Strahlung (Glut)
- Die entstehende Wärmestrahlung kann mit FDS nicht modelliert werden

## Fazit

- Modellierung von Pyrolyseprozessen erfordert feine Diskretisierung → höhere Rechenzeiten als Ansatz eines Bemessungsbrandes
- Brandverhalten von nachwachsenden Rohstoffen ist ein multi-physikalisches Problem, welches nicht allein durch Pyrolyse beschrieben wird
- Weitere Forschung notwendig hinsichtlich,
  - Effektivere Berechnung,
  - Verbrennungsmodellierung und
  - Validierung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Patrick Lauer, Lukas Arnold, Tristan Hehnen, Corinna Trettin, Ashish Vinaiyak:**

**PROPTI - Framework zur Abschätzung der materialspezifischen Parameter zur Pyrolysemodellierung**

**Abstract:**

Pyrolyse, die thermochemische Dekomposition von Feststoffen und der Phasenwechsel von der Fest- in die Gasphase, muss modelliert werden um komplexe Brände mit Brandausbreitung simulieren zu können. Die Modellierung der Pyrolyse basiert maßgeblich auf den thermophysikalischen und reaktionskinetischen Eigenschaften eines Materials und seiner Produkte.

Inverse Modellierung stellt eine Möglichkeit dar, diese Werte aus experimentellen Daten abzuleiten. Eine Herausforderung bei diesem Ansatz ist das Verknüpfen eines (Pyrolyse-)Simulationsmodells mit einem Optimierungsalgorithmus und die Verarbeitung der resultierenden Daten. Diese Verknüpfung ist sehr aufwendig und bietet viele Fehlereinflussmöglichkeiten.

Für diesen Einsatz wird das Inverse-Modelling-Framework PROPTI vorgestellt. Unter Open-Source-Lizenz veröffentlicht, dient Python als Schnittstelle zwischen Simulationsmodell und Optimierungsalgorithmus und sorgt so für eine bessere Reproduzier- und Vergleichbarkeit und geringere Fehlereinflussmöglichkeiten.

# PROPTI

## Framework zur Abschätzung der materialspezifischen Parameter zur Pyrolysemodellierung

Lauer<sup>1</sup>, Arnold<sup>2</sup>, Hehnen<sup>2</sup>, Trettin<sup>1</sup>, Vinayak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bergische Universität Wuppertal - <sup>2</sup>FZ Jülich

[lauer@uni-wuppertal.de](mailto:lauer@uni-wuppertal.de)

## Inhalt

1. Inhalt
2. Einleitung
3. Inverse Modellierung
4. PROPTI
5. Diskussion
6. Software

# 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:

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

## Modellierung von Pyrolyse in FDS

Modellierungsansatz:

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

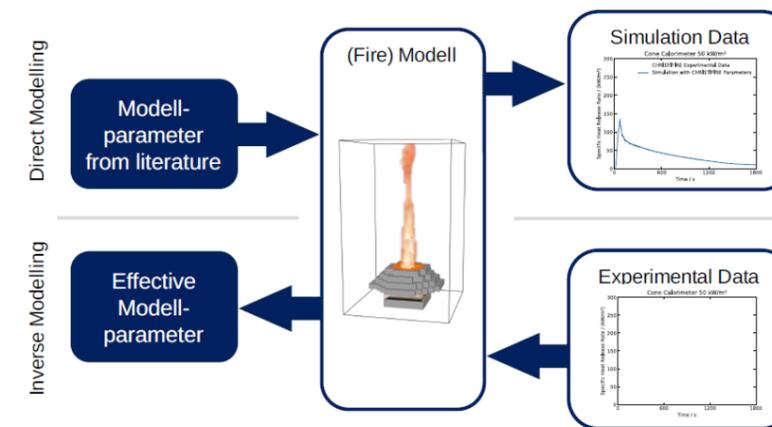
Laborversuche:

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

# Wichtige Parameter

Parameter	Formelzeichen
Aktivierungsenergie	$E_a$
präexponentieller Faktor	$A$
Reaktionsordnung	$n$
Dichte	$\rho$
Wärmeleitfähigkeit	$k$
Spezifische Wärmekapazität	$c$

# Inverse Modellierung

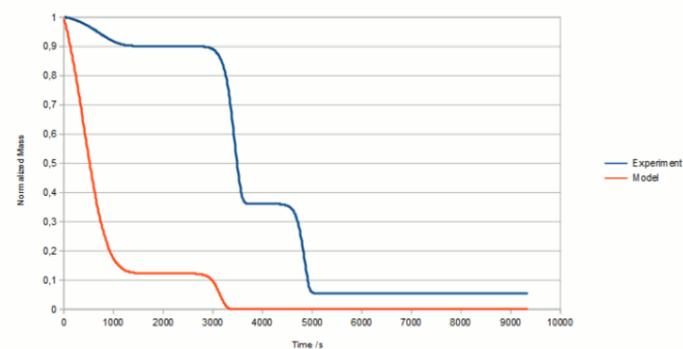


## Lösungsansätze

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

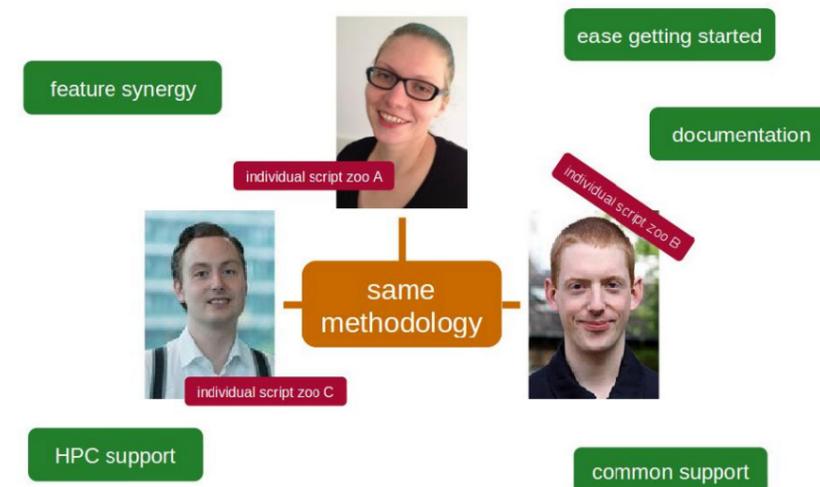
Durch "Probieren" wird eine Lösung gefunden. Metaheuristische Optimierungsalgorithmen "probieren" Lösungen "clever" und suchen neue Lösungen durch vorherige "Erfahrung".

## Curve Fitting



## PROPTI

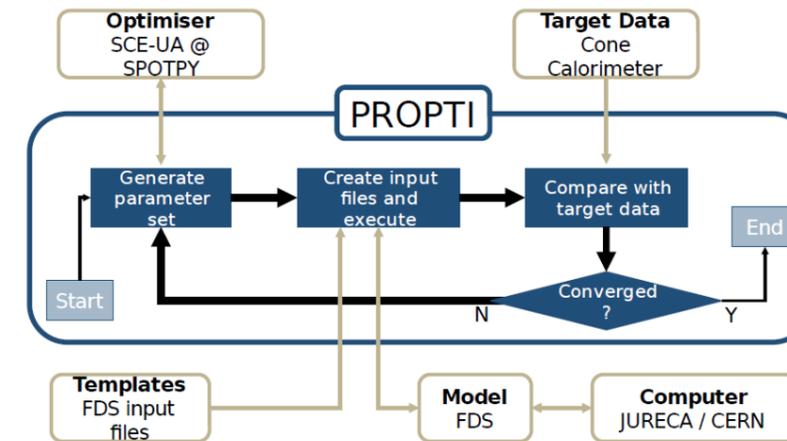
### Idee



## Was ist PROPTI?

- Framework, dass die Kommunikation zwischen Simulationsmodell und Optimierungsalgorithmus steuert
- nutzt das Simulationsmodell wie zur Verfügung gestellt - mit allen Funktionen
- inverse Pyrolysemodellierung ist nur ein Anwendungsfeld
- umgesetzt in Python 3
- Open Source
- gute Dokumentation
- kann adaptiert werden, um jegliches Modell und jeglichen Optimierungsalgorithmus zu verwenden
- Zielfunktion kann mehrere Experimenttypen und Wiederholungen abdecken

## Workflow



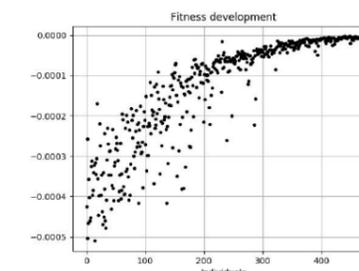
## Einschränkungen

- kein eigenes Pyrolysemodell
- kein GPYRO-Derivat
- Fokus auf Anwendungen der Autoren
  - Hauptmodell: FDS
  - Work in Progress: OpenFOAM
  - Optimierungsalgorithmen stammen aus SPOTPY - A Statistical Parameter Optimization Tool for Python
- bisherige Anwendung für TGA- und Cone Calorimeter-Setups
- fortgeschrittene Anwendung in der Brandausbreitung bei Kabelbränden

## Interface zu SPOTPY

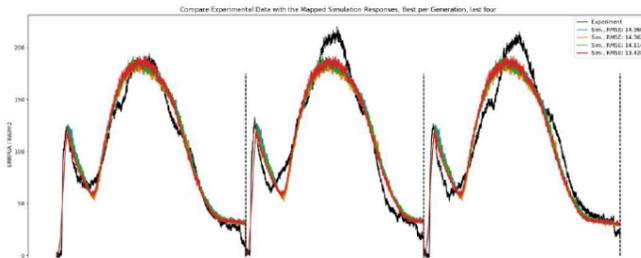
### SPOTPY

- A Statistical Parameter Optimization Tool for Python
- wird als Bibliothek für die Optimierungsalgorithmen genutzt
- ermöglicht die Nutzung diverser Algorithmen
  - Monte Carlo
  - Latin Hypercube
  - Shuffled Complex Evolution
  - Fitness Scaled Chaotic Artificial Bee Colony
- Nutzung paralleler Rechenstrukturen (MPI)



## Zieldaten - Experimentaldaten

- üblicherweise eine Datei mit Experimentaldaten
- Zieldaten können bestehen aus:
  - verschiedenen Experimenttypen (z.B. unterschiedliche Bestrahlungstärken)
  - Experimentwiederholungen
- die Beziehung der einzelnen Simulationen und den korrespondierenden Experimentaldaten wird definiert
- RMSE wird standardmäßig als Fitnessfunktion verwendet



## Templates als Input Files

- Input File ist simple Textdatei mit Platzhaltern
- momentan Fokus auf FDS
- verschiedene Simulationssetups in einem inversen Modellierungsprozess möglich
- Platzhalter werden durch ermittelte Werte ersetzt
- kann mit beliebigem/r Modell/Software genutzt werden, solange das Input File eine Textdatei ist

```

&MATL ID = 'component 1'
EMISSIVITY = 1.0
DENSITY = 500.
CONDUCTIVITY = 0.20
SPECIFIC_HEAT = 1.0
N_REACTIONS = 1
REFERENCE_TEMPERATURE = #rtc01#
REFERENCE_RATE = #rrc01#
HEATING_RATE = #hr#
NU_SPEC = 0.60
SPEC_ID = 'CELLULOSE'
NU_MATL = 0.40
MATL_ID = 'component 2'
HEAT_OF_REACTION = 1000. /
    
```

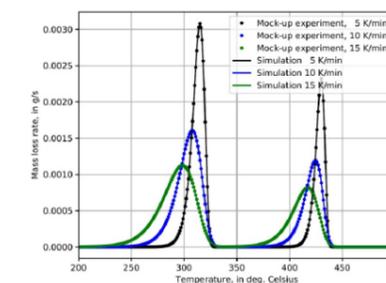
## Berechnung

- serielle Berechnung
- parallele Berechnung (z.B. in HPC oder Cloud-Strukutren)
  - Subprozesse
    - mehrere Simulationen pro Durchgang
    - z.B. parallel verschiedene Heat Flux Simulationen
  - MPI (durch SPOTPY)
    - Parallelisierung des Optimierungsprozesses
    - z.B. zeitgleiche Berechnung verschiedener SCE-UA-Subkomplexe
- ~~Achtung: serielle FDS-Version notwendig, sonst Konflikte durch mehrere MPI-Umgebungen~~

## Beispiel TGA

Zieldaten:

- Modelldaten (FDS)
- TGA-Experiment mit zwei Reaktionen
- drei verschiedene Heizraten



Materialdaten:

```

&MATL ID = 'component 1'
EMISSIVITY = 1.0
DENSITY = 500.
CONDUCTIVITY = 0.20
SPECIFIC_HEAT = 1.0
N_REACTIONS = 1
REFERENCE_TEMPERATURE = #rtc01#
REFERENCE_RATE = #rrc01#
HEATING_RATE = #hr#
NU_SPEC = 0.60
SPEC_ID = 'CELLULOSE'
NU_MATL = 0.40
MATL_ID = 'component 2'
HEAT_OF_REACTION = 1000. /

&MATL ID = 'component 2'
EMISSIVITY = 1.0
DENSITY = 500.
CONDUCTIVITY = 0.20
SPECIFIC_HEAT = 1.0
N_REACTIONS = 1
REFERENCE_TEMPERATURE = #rtc02#
REFERENCE_RATE = #rrc02#
HEATING_RATE = #hr#
NU_SPEC = 0.85
    
```

## Beispiel TGA Input File (I)

```
# Define the optimisation parameters.
op1 = pr.Parameter(name='ref_temp_comp_01',
                  place_holder='rtc01',
                  min_value=200, max_value=400)
op2 = pr.Parameter(name='ref_rate_comp_01',
                  place_holder='rrc01',
                  min_value=0.001, max_value=0.01)
op3 = pr.Parameter(name='ref_temp_comp_02',
                  place_holder='rtc02',
                  min_value=300, max_value=600)
op4 = pr.Parameter(name='ref_rate_comp_02',
                  place_holder='rrc02',
                  min_value=0.001, max_value=0.01)

# Create simulation setup object
s = pr.SimulationSetup(name='tga_analysis_01',
                      work_dir='tga_analysis_run_01',
                      model_template=template_file,
                      model_parameter=mps0,
                      model_executable='fds',
                      relations=r)
```

0

## Beispiel TGA Input File (II)

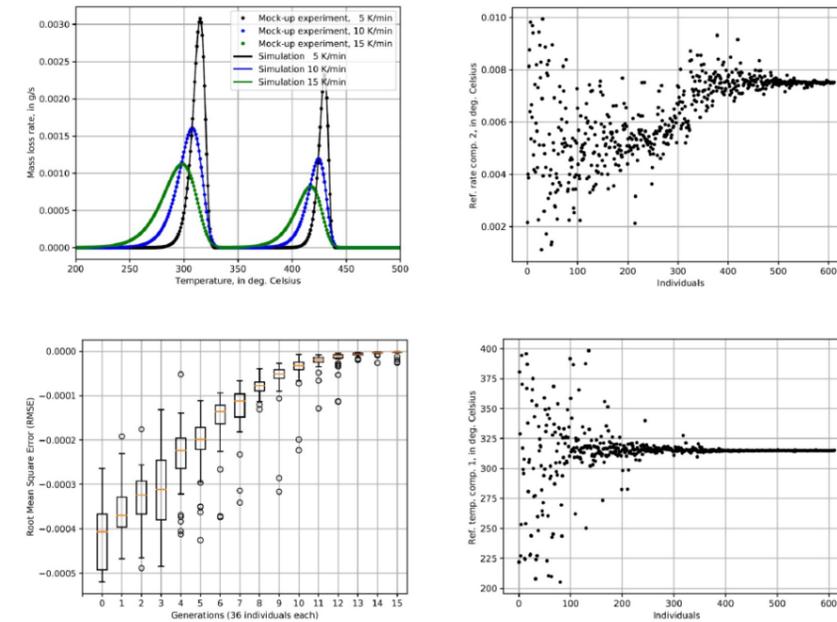
```
# Define model-experiment data relation
r = pr.Relation()
r.model.file_name = "{}_tga.csv".format(CHID)
r.model.label_x = 'Time'
r.model.label_y = 'MLR'
r.model.header_line = 1
r.experiment.file_name = exp_data_file
r.experiment.label_x = 'Time'
r.experiment.label_y = 'MassLossRate'
r.experiment.header_line = 0

# Define definition range for data comparison
r.x_def = np.arange(0., TEND, 12)

# Provide parameter values for the optimiser, some of the default values are
# highlighted here.
optimiser = pr.OptimiserProperties(algorithm='scea',
                                  repetitions=1000,
                                  ngs=len(set_of_parameters),
                                  backup_every=100,
                                  db_name='propti_db',
                                  db_type='csv',
                                  db_precision=np.float64,
                                  mpi=False)
```

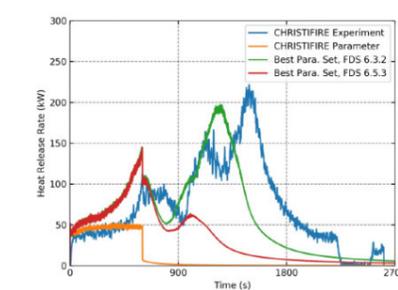
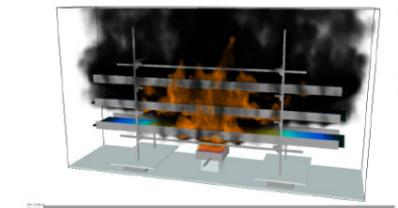
0

## Beispiel TGA Ergebnis



0

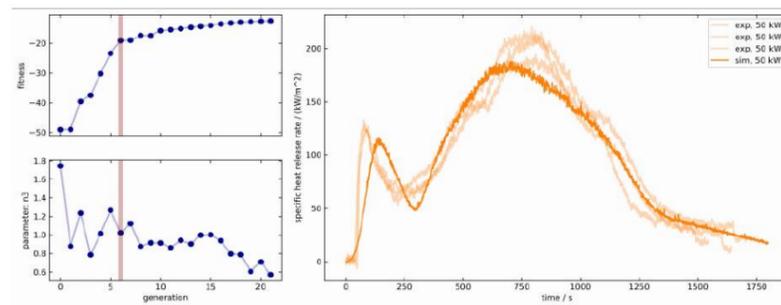
## Anwendungsszenarien



0

## Beispiel - Kabel im Cone Calorimeter

- Cone Calorimeter Experimente
- 36 Parameter - 3 Datenserien



## Nutzen

- schnellere Entwicklung des Frameworks durch Arbeitsteilung
- alle profitieren von Verbesserungen
- Etablierung eines Standards
- effizientere Ressourcennutzung
- bietet Dokumentation und Beispiel
- ermöglichen der Anwendung einer komplexen Methode für weniger versierte Nutzer
- frei verfügbar und Open Source

## Motivation

Warum haben wir dieses Framework erstellt?

- Arbeit an ähnlichen Themen
- Code teilen war problematisch, da jeder seinen eigenen Datenverarbeitungsansatz verfolgte
- Handhabung der Kommunikation zwischen Simulationsmodell und Optimierungsalgorithmus war schwierig
- Fähigkeit zur parallelen Simulation auf HPC-Systemen fehlte
- Datensicherheit war nicht gegeben

## Zusammenfassung

- generisches Tool für inverse Modellierung
  - nicht beschränkt auf FDS und Pyrolyse
  - Open Source
- Features
  - Multi Objective Tasks
  - Vielzahl von Optimierungsalgorithmen nutzbar
  - HPC nutzbar
  - gute Dokumentation

## Diskussion

Fragen?  
Erfahrungen?  
Anmerkungen?

o

## Software

- PROPTI: <https://github.com/FireDynamics/propti>
- SPOTPY: <https://github.com/thouska/spotpy/>



o

**Bjarne Husted:****The use of FDS for fire investigation****Abstract:**

The majority of FDS's users use FDS for performance based design. This is the case in the Nordic countries, but also in the rest of the world. This statement is supported by analysing the type of question in the FDS and Smokeview Discussion group on Google. Many of the questions there is of the type, "How can I pressurise the stairwell" or "How can I control this device". FDS can also be used in fire investigation as demonstrated by McGrattan et al. in their fire simulation for the World Trade Center Towers. (Computer Simulation of the Fires in the World Trade Center Towers, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster (NCSTAR 1-5F), December 2005) This talk present the challenges and possibilities to use FDS to simulate an actual fire. It will compare performance based design with fire simulation of an actual fire. Further it will outline a method for using FDS for fire investigation.

# Use of fire simulation to investigate fires

Bjarne P. Husted  
Division of Fire Safety Engineering  
Lund University



LUND UNIVERSITY

## My involvement in simulation of fires of actual incidents

- Number of legal case in Denmark
  - 1 case
- Number of legal case in Norway
  - 1 case
- Other cases
  - Kaprun tunnel (155 people died), November 2000  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Brandkatastrophe\\_der\\_Gletscherbahn\\_Kaprun\\_2](https://de.wikipedia.org/wiki/Brandkatastrophe_der_Gletscherbahn_Kaprun_2)
  - Gothenburg discothèque fire, Sweden (63 people died), Oct 1998  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Gothenburg\\_discoth%C3%A8que\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Gothenburg_discoth%C3%A8que_fire)
  - World Trade Center , New York, 2001
  - ResQ, B.Sc. Thesis in Norway, 2009



LUND UNIVERSITY

## Tools

- Zone models
  - CFAST
  - Argos
  - Branzfire
- CFD models
  - PHOENICS
  - CFX
  - FDS (since 2002)
- Machine learning

**In Memoriam: Dudley Brian Spalding**  
Feb 15, 2017

Professor Dudley Brian Spalding, the former head of the Computational Fluid Dynamics (CFD) Unit at Imperial College London, United Kingdom, passed away on 27 November 2016. A longtime member of The Combustion Institute, Spalding's work in fluid flow, combustion, and heat and mass transfer deeply influenced the research of CI's international society of combustion scientists and practitioners.

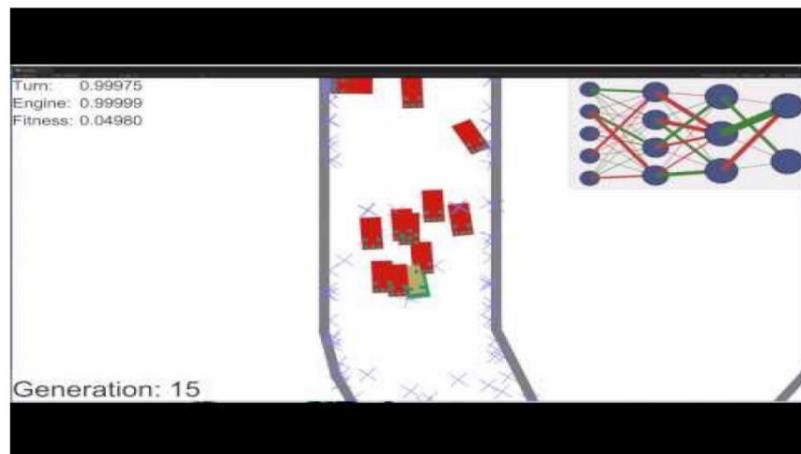


<https://www.combustioninstitute.org/news/ci-news-and-announcements/in-memoriam-dudley-brian-spalding/>



LUND UNIVERSITY

## Machine learning



- <https://www.youtube.com/watch?v=pgaEE27nsQw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=qv6UVOQ0F44&t=121s>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Aut32pR5PQA>
- <https://www.youtube.com/watch?v=rvnHikUJ9T0>



LUND UNIVERSITY

## CFD and fire investigation

- Fire at King Cross underground station in
  - [18 November 1987](#), 31 fatalities
  - First time a major fire was investigated with the help of (CFX)
  - Discovered a new phenomena "[trench effect](#)", verified by experiments afterwards



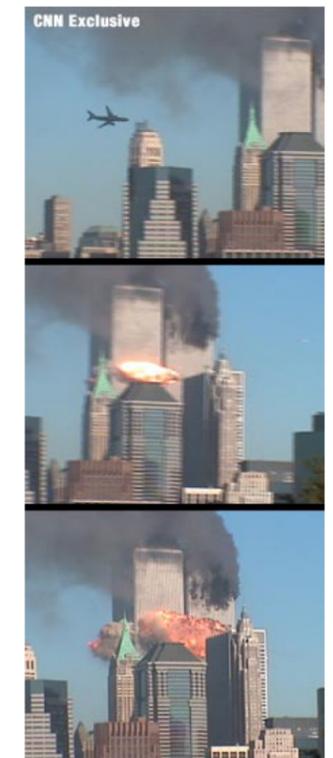
<https://youtu.be/OiwbWtYLEc>



LUND UNIVERSITY

## World Trade Center, 2001

- Fire simulated with FDS 4 by McGrattan et al.
- Developed parallel version of FDS for this case
- 1 computer to every floor (9)
- Cells had a length of one side of 1 m!



LUND UNIVERSITY

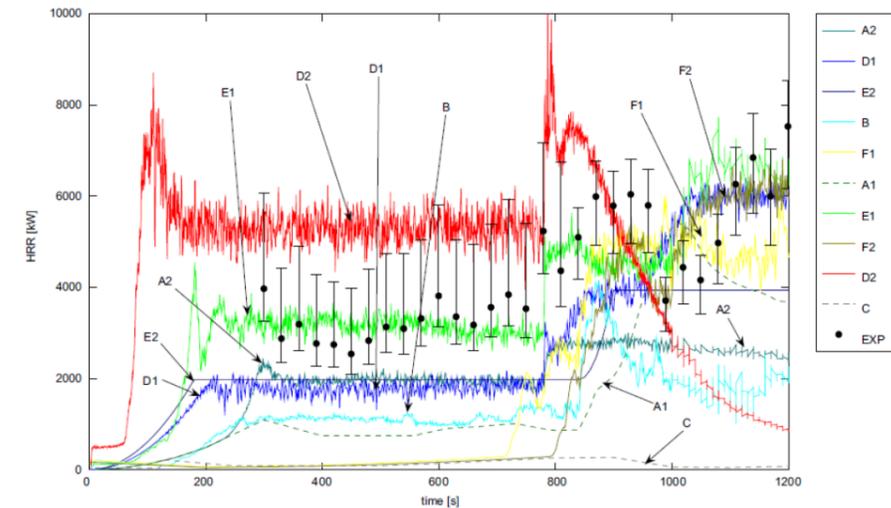
# Dalmarnock fire test

- Documentation can be found at <https://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/2037>
- **Fire Safety Journal:**  
Rein G, Torero JL, Jahn W, Stern-Gottfried J, Ryder NL, Desanghere S, et al. Round-robin study of a priori modelling predictions of the Dalmarnock Fire Test One. Fire Safety Journal. 2009;44(4):590-602.



LUND UNIVERSITY

# Heat release rate



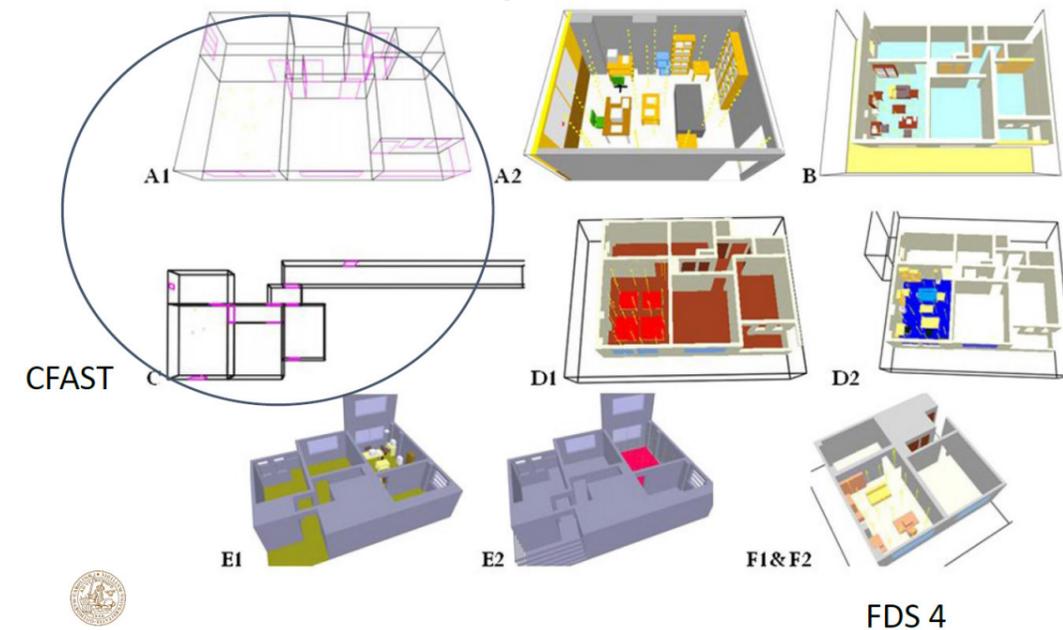
LUND UNIVERSITY

# A priori

Sir Winston Churchill(circa 1945):

“I always avoid prophesying beforehand because it is much better to prophesy after the event has already taken place”

# Simulation setup

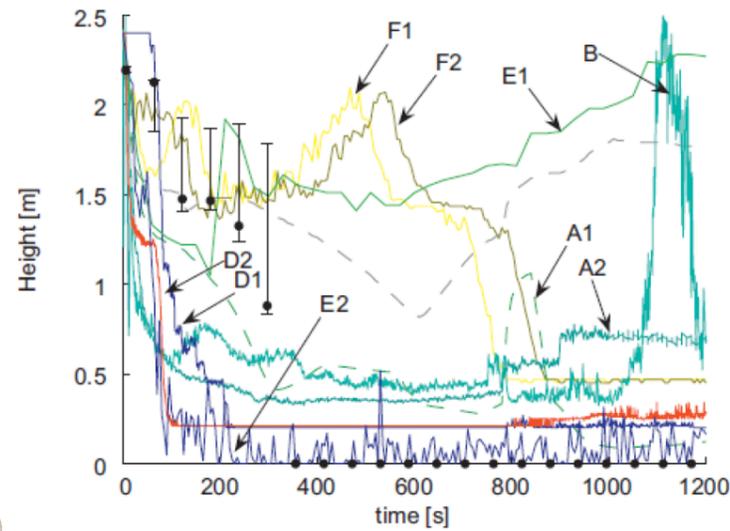


LUND UNIVERSITY



LUND UNIVERSITY

## Results, smoke layer height



## Conclusion from Dalmarnock

“The results presented here show that current modelling cannot provide good predictions of HRR evolution (i.e. firegrowth) in realistic complex scenarios like Dalmarnock. Fire modelling is not yet able to predict the HRR and more research efforts need to be tailored towards this issue.

**However**, fire environments away from the flames could be calculated if an accurate HRR is part of the input data to the modelling process”

**From conclusion of Paper**



## ResQ test in Haugesund, Spring 2009



Karolaskerne følger med på brannforsøket i det gamle undervisningsbygget ved sikkerhetsanlegget RESQ i Haugesund. Foto: If forsikring

### Brannetterforskning - åstedsgransking og datasimulering

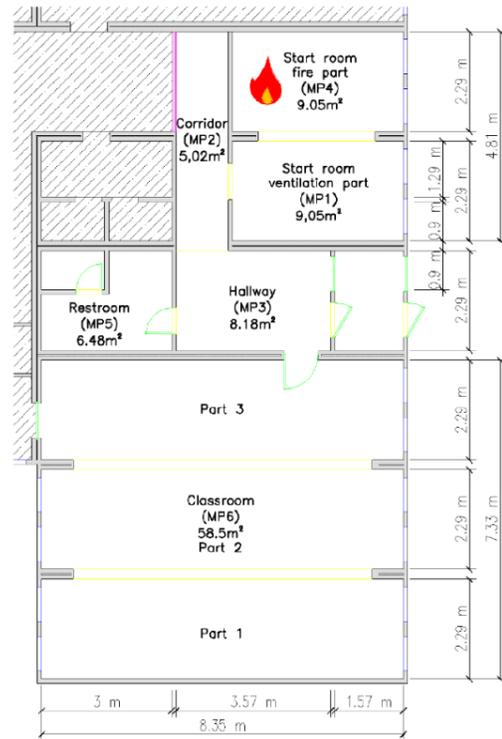
av Reidar Skrunes, If forsikring



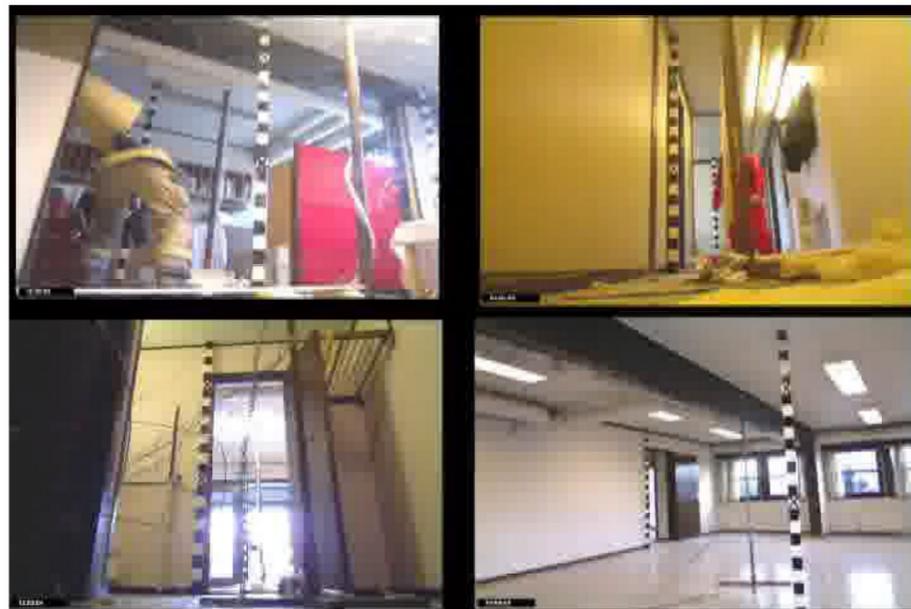
## Example of CFD calculation Fire experiments and simulation at RESQ (NO)



Layout of building



Video



Fire started in chair



Typical calculations time

Barbro Storm og Märten Pantesjö,  
The use of simulation in fire investigation, B.Sc. Thesis, HSH 2009

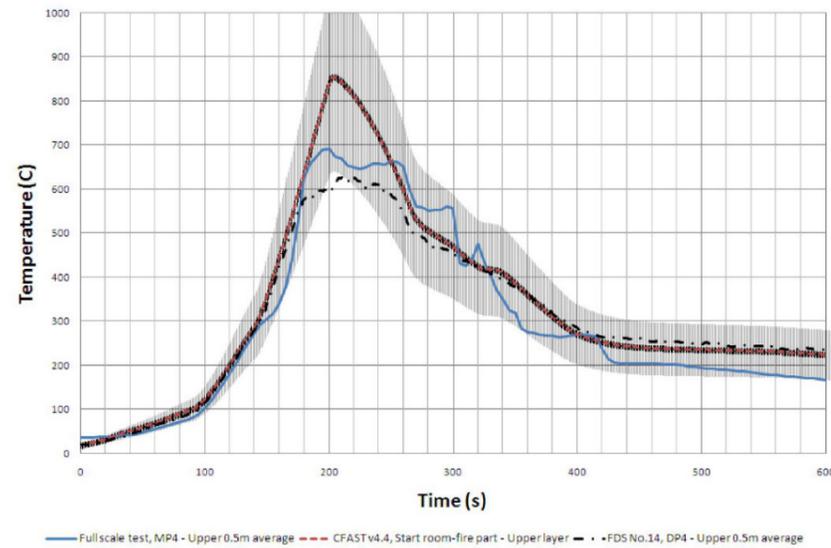
$$\frac{D^*}{d} = \frac{1.2 \text{ m}}{x} \quad \frac{9}{x} \quad d = 1 \quad \alpha \quad \theta_m \quad \frac{D^*}{d} = 1.9$$

No.	Mesh size Combustion part	Mesh size Smoke spread part	Name	$D^*/dx$ ratio	Simulation runtime
10	40x40x40 cm	40x40x40 cm	40_40	3,225	Approx. 10 minutes
11	20x20x20 cm	40x40x40 cm	20_40	6,45	Approx. 45min.
12	20x20x20 cm	20x20x20 cm	20_20	6,45	Approx. 2h.
13	10x10x10 cm	20x20x20 cm	10_20	12,9	Approx. 14.5h.
14	10x10x10 cm	10x10x10 cm	10_10	12,9	Approx. 24.5h.
15	5x5x5 cm	10x10x10 cm	5_10	25,8	Approx. 130h.
16	5x5x5 cm	5x5x5 cm	5_5	25,8	Approx. 360h. (runtime 196h for 358s)

TABLE 5: OVERVIEW OF MESH SIZES AND  $D^*/DX$  RATIO IN THE SENSITIVITY ANALYSIS. OBSERVE THAT THE  $D^*/dx$  RATIO ONLY IS BASED ON THE MESH IN THE COMBUSTION PART (MESH 1: FIRE AND VENTILATION PART OF THE START ROOM, CORRIDOR, AND EXTENT FROM WINDOW)

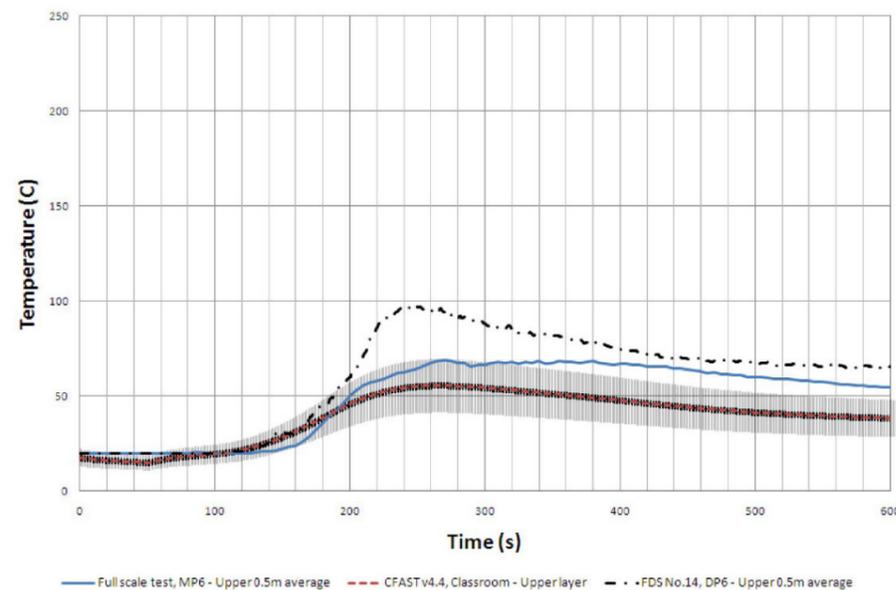


## Temperature in fire room



LUND UNIVERSITY

## Temperature in classroom



LUND UNIVERSITY

## Their conclusion

” -Obtaining correct HRR-data is crucial “

Reference:

Storm, Barbro Maria; Pantesjö, Mårten Rolf

The use of simulation in fire investigation

B.Sc. Thesis, HSH, Norway 2009

[https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/151874/The\\_use\\_of\\_simulation\\_in\\_fire\\_investigation-Pantesj%C3%B6-Storm.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/151874/The_use_of_simulation_in_fire_investigation-Pantesj%C3%B6-Storm.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



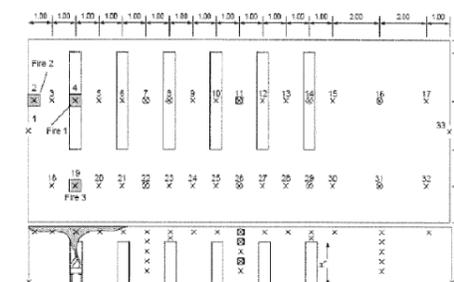
LUND UNIVERSITY

## Case study 1 – SP Retail Store

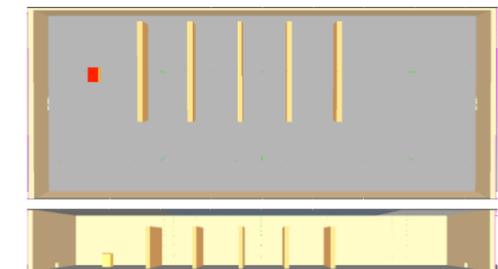
Length 18 m  
Width: 7.5 m  
Height: 2.4 m

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

## Conclusion, case study 1

- 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
- Even if the heat release rate is known,- it is hard to predict the outcome



LUND UNIVERSITY

## Case study 2

- Using Computational Fluid Dynamics in the forensic analysis of a prison fire
  - Fire in a prison in Chile (San Miguel Prison in Santiago de Chile, the capital with 5.5 million inhabitants)
  - 81 fatalities
- Reference:  
Jahn W, Gonzalez O, de Dios Rivera J, Torero JL. Using Computational Fluid Dynamics in the forensic analysis of a prison fire. Forensic Science International. 2015;253:e33-e42.



LUND UNIVERSITY

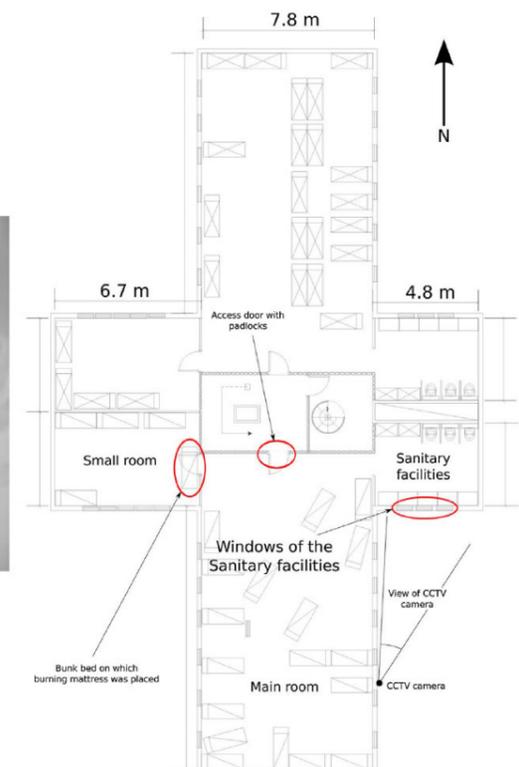
## Fire fatalities in Latin American Prisons

- San Pedro Sula prison, early 2004
  - 101 people died
- Higey prison, Dominican Republic, 2005
  - 136 people died
- San Miguel Prison, Santiago, late 2010
  - 81 people
- Honduran Comayagua prison in February of 2012
  - 361 people died



LUND UNIVERSITY

## Layout



LUND UNIVERSITY

## Internal view of a typical cell at San Miguel's prison.



(a) Bunk beds with hanging sheets and blankets.

(b) Over-head compartments.



LUND UNIVERSITY

## Time of event (started with a fight)

“Later, the occupants of the main cell used a **handmade gas torch** (connected to a LPG cylinder) to ignite a polyurethane foam mattress, which they threw onto the lower level of the bunk bed blocking the access of the little cell.

In order to prevent their locked-in opponents from extinguishing the fire, they kept them at a distance using long wooden sticks with sharp tips (presumably made from knives and other metallic objects).

The fire spread across the burning mattress and ignited other combustible objects, such as sheets, blankets and combustible items in the over-head compartments, resulting in **an uncontrollable fire in a relatively short time.**”



LUND UNIVERSITY

## After the fire



- Post-fire internal view of the small room where the fire started



LUND UNIVERSITY

## Method

- Establish heat release rate
  - Performing experiments with mattresses to measure heat release rate using Oxygen Consumption Method



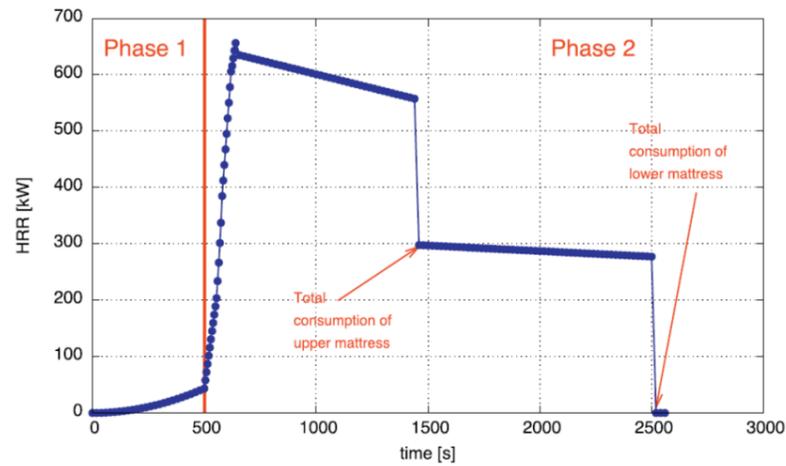
(a) Flame spread during phase A.

(b) Flame spread during phase D.



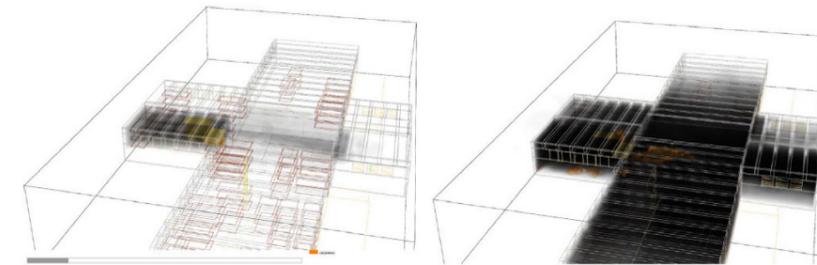
LUND UNIVERSITY

## HRR for mattress



## After flashover

- Simple ventilation controlled fire
  - heat release rate is constant at 2.4 MW



(a) Simulated smoke distribution 90 seconds after ignition. (b) Simulated smoke distribution 330 seconds after ignition.

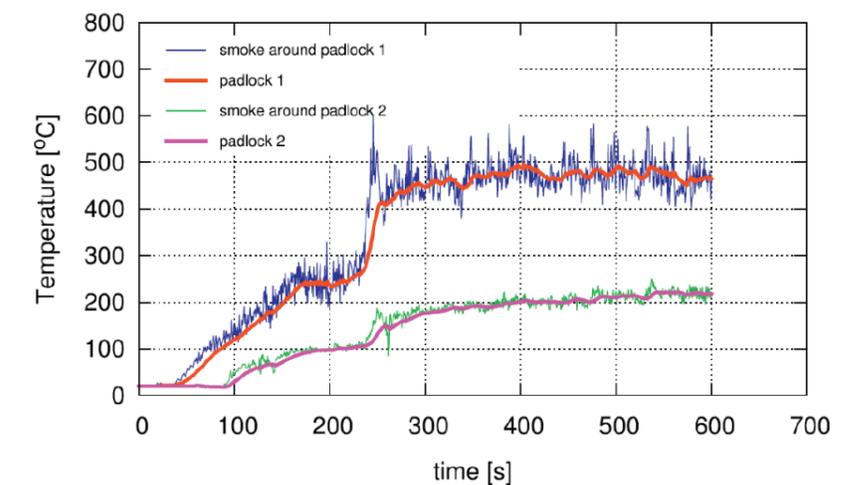


## Time to flash-over

- Using zone model it was established that flashover occurred after 170 seconds
- CFD simulation,
  - A possible criterion for flashover
    - oxygen concentration at the height of the initially burning object descends significantly (from an average of 13.5% in the pre-flashover stage to about 8.5% during postflashover)
  - Depending on ventilation conditions and openings,
    - Parameter study, sensitivity
    - FDS flashover between 190 s and 320 s



## Results, Padlock temperature



Padlock 1: 2.5 m above floor,  
Padlock 2: 0.5 m about floor



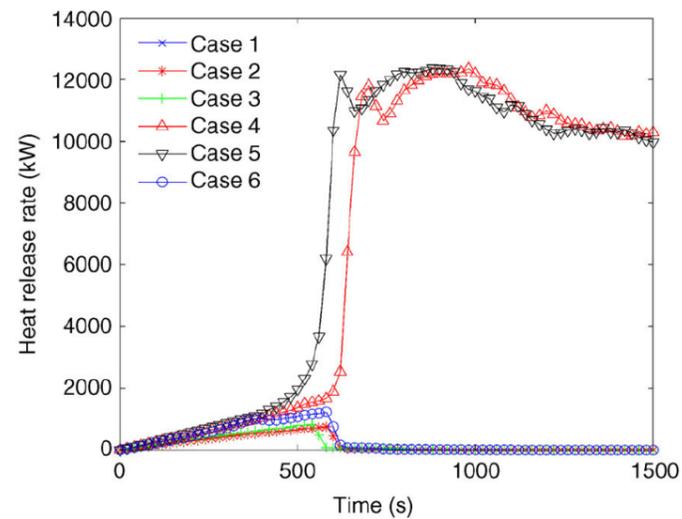
## Case Study 3, Fire in aged-care facility

- Yuen ACY, Yeoh GH, Alexander B, Cook M. Fire scene investigation of an arson fire incident using computational fluid dynamics based fire simulation. *Building Simulation*. 2014;7(5):477-87.
- According to the simulation results, the window breaking played an important role to the occurrence of flashover.



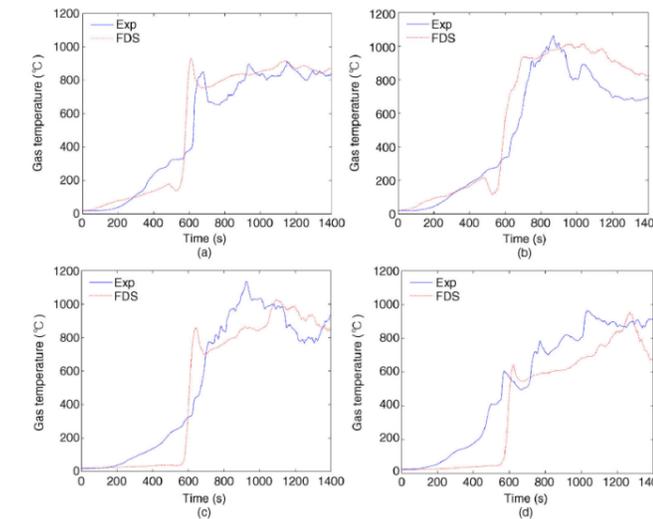
LUND UNIVERSITY

## Case study 3, HRR



LUND UNIVERSITY

## Results, (Window breakage controls temperature increase) Ventilation controlled



LUND UNIVERSITY

## Challenges for CFD simulations

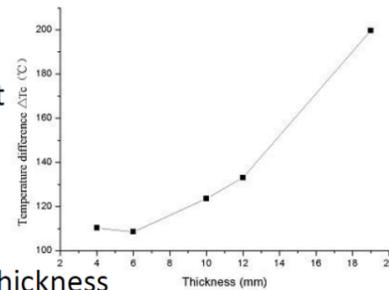
- Establishment of heat release rate
- Flame spread
  - Pyrolysis models
  - Radiation
  - Current research
- Prediction of combustion products
  - Yuen, A.C.Y., et al., Importance of detailed chemical kinetics on combustion and soot modelling of ventilated and under-ventilated fires in compartment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016. 96: p. 171-188.
- Ventilations
  - Glass breakage models (Pagni, 1994) (see also next slide)
    - Joshi AA, Pagni PJ. Fire-induced thermal fields in window glass. I—theory. *Fire Safety Journal*. 1994;22(1):25-43.
    - Xie Q, Zhang H, Wan Y, Zhang Q, Cheng X. Full-scale experimental study on crack and fallout of toughened glass with different thicknesses. *Fire and Materials*. 2008;32(5):293-306.
    - Zhang Y, Wang Q-s, Zhu X-b, Huang X-j, Sun J-h. Experimental Study on Crack of Float Glass with Different Thicknesses Exposed to Radiant Heating. *Procedia Engineering*. 2011;11:710-8.
    - Yuen ACY, Yeoh GH, Alexander B, Cook M. Fire scene investigation of an arson fire incident using computational fluid dynamics based fire simulation. *Building Simulation*. 2014;7(5):477-87.



LUND UNIVERSITY

## Glass breakage

- Yuen et al, 2014
  - The average glass cracking temperature under various fire tests was found to be  $(197 \pm 15) \text{ }^\circ\text{C}$
- Zhang et al, 2011
  - Float glass, Temperature difference between ambient and centre of glass
    - 110-200  $^\circ\text{C}$
- Xie et al, 2011
  - Toughened glass, different thickness
    - 6-mm about 330–380  $^\circ\text{C}$
    - 10-mm approximately 470–590  $^\circ\text{C}$ .
- Unofficial Swedish guide for toughened glass, 300 $^\circ\text{C}$  in 30 minutes



LUND UNIVERSITY

## What can fire simulation be used for

- Create an envelope around the incident
  - What is plausible
  - What is less plausible
- Drawback
  - Expensive, - many scenarios needs to be investigated



LUND UNIVERSITY

## Requirements when using CFD for fire investigation

- Establish heat release rate
  - Check with findings at the site
    - Melting of materials
    - Burn-in of wood
    - Calcination of Gypsum Plasterboard
- Determine ventilation conditions
- Predictions of combustion products
  - The fuel load is unknown

Material	Melting temperature
Thermoplastics (E.g. Lego Bricks)	90-160 $^\circ\text{C}$
Paraffin wax	50-60 $^\circ\text{C}$
Stearin ( $\alpha$ -form)	54 $^\circ\text{C}$
Stearin ( $\beta$ -form)	72 $^\circ\text{C}$
Glass	593-1427 $^\circ\text{C}$
Aluminium	660 $^\circ\text{C}$
Tin	232 $^\circ\text{C}$
Iron	1540 $^\circ\text{C}$



LUND UNIVERSITY

**Robert Weiße:****Visualisierung von Brand- und Personenstromsimulationen Generierung von ASET-, RSET- und Differenzkarten****Abstract:**

Brand- und Personenstromsimulationen sind heutzutage als ein wichtiger Bestandteil des vorbeugenden Brandschutzes zu betrachten. Durch sie kann der Nachweis erbracht werden, dass gegebene Anforderungen an ein Gebäude zum Schutz von Personen eingehalten werden. Brandsimulation erlauben die Identifizierung der verfügbaren Räumungszeit (ASET) und Personenstromsimulationen die Ermittlung der erforderlichen Räumungszeit (RSET). Über den Vergleich beider Zeiten, welcher allgemein als ASET/RSET-Methode bezeichnet wird, kann eine Aussage zur Personensicherheit im Gebäude abgeleitet werden<sup>[1]</sup>.

Die Anwendung der ASET/RSET-Methode auf Ergebnisse von Brand- und Personenstromsimulationen, denen dreidimensionale Gebäudemodelle zugrunde liegen, ist zurzeit als erschwert zu betrachten. Dies liegt darin begründet, dass entsprechende Ergebnisdatensätze räumlich und zeitlich diskrete Werte liefern und somit die Kennzahlen ASET und RSET mehrfach für einzelne Gebäudebereiche zu identifizieren und abzugleichen sind. Zur Lösung dieses Problems kann das durch Schröder<sup>[2]</sup> vorgestellte und auf Schnittbildgrafiken basierende Verfahren zur Erzeugung von ASET-, RSET- und Differenzkarten angewendet werden. Diesbezüglich werden ASET- und RSET-Werte für alle Positionen im Gebäude innerhalb von Gebäudekarten ausgegeben. Durch deren Verrechnung können Differenzkarten gebildet werden, die eine ortsgenaue und detaillierte Auskunft über Gefahrenbereiche ermöglichen. Die Kartengenerierung stellt somit eine Erweiterung der etablierten ASET/RSET-Methode dar.

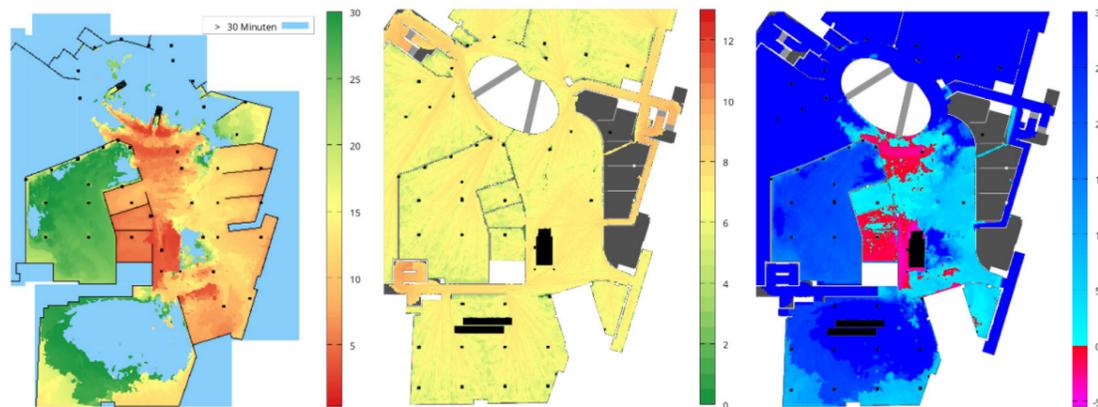


Abbildung 1: Beispiel einer ASET- (links), RSET- (rechts) und Differenzkarte

Mit der Generierung von Räumungszeitkarten gehen neue Problemstellungen einher. So müssen Schnittbilder von Brandsimulationen, deren Meshes auf unterschiedlichen Zell-abmessungen beruhen, für die Kartendarstellung in eine gemeinsame Matrix überführt und Zellwerte interpoliert werden. Ergebnisse mehrerer Durchläufe einer Personenstromsimulation sind durch Perzentilbildung miteinander zu verrechnen. Differenzkarten sollen aus ASET- und RSET-Datensätzen trotz verschiedener Zellgrößen gebildet werden können. Weiterhin werden ausgegebene Differenzkarten durch festgelegte Eingabeparameter beeinflusst.

Der Beitrag widmet sich den genannten Problemstellungen und stellt Lösungsmöglichkeiten vor, die in einer Masterarbeit<sup>[3]</sup> erarbeitet wurden.

Die Masterarbeit wurde durch die Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH initiiert und im Studiengang „Medieninformatik“ an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig erarbeitet.

**Literatur:**

[1] Technischer Bericht vfdb TB 04/01 „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“, 3. Auflage November 2013

[2] Schröder, B.: Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire, Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2016

[3] Weiße, R.: Visualisierung von Brand- und Personenstromsimulationen, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Masterarbeit, 2018

**Brandschutz Consult**  
Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig



**Visualisierung von Brand- und  
Personenstromsimulationen**  
Generierung von ASET-, RSET- und Differenzkarten

**Robert Weiße, M.Sc.**

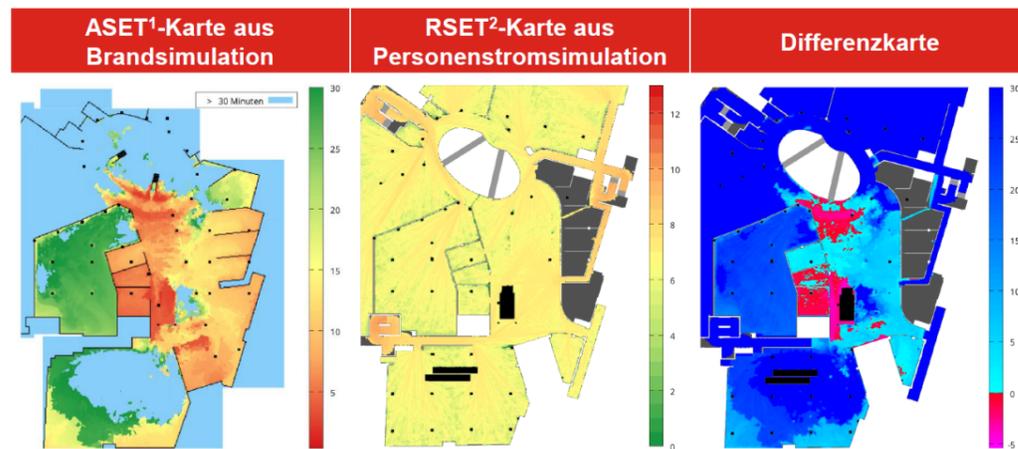
12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup  
08.11.-09.11.2018 in Berlin

Torgauer Platz 3 · 04315 Leipzig · E-Mail: info@bcl-leipzig.de · www.bcl-leipzig.de

Umsetzung neuer Visualisierungsmethoden



...am Beispiel des Gießener Einkaufszentrums  
„Galerie Neustädter Tor“

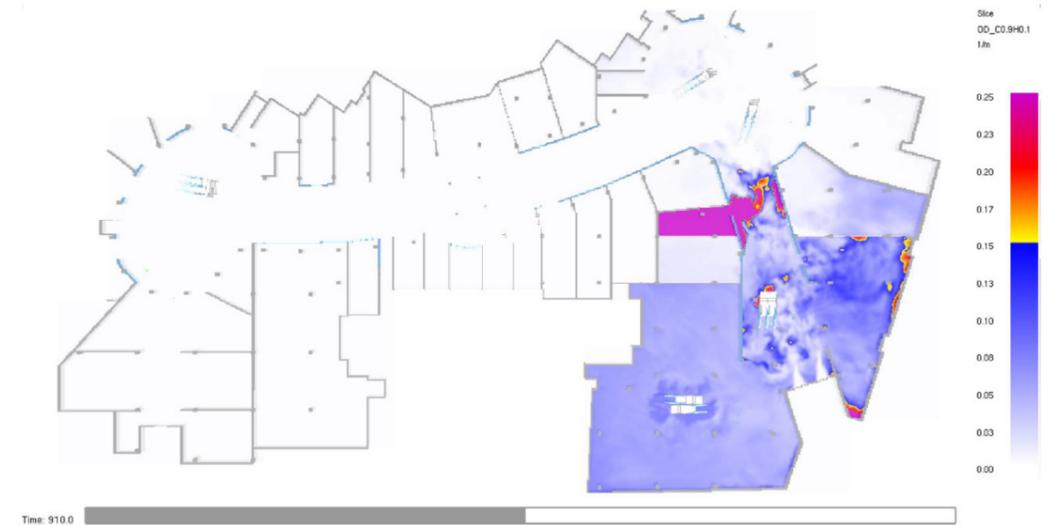


<sup>1</sup>ASET: Available Safe Egress Time (verfügbare Räumungszeit)  
<sup>2</sup>RSET: Required Safe Egress Time (erforderliche Räumungszeit)

<sup>1,2</sup>ASET/RSET-Karten in Orientierung an [Sch16]

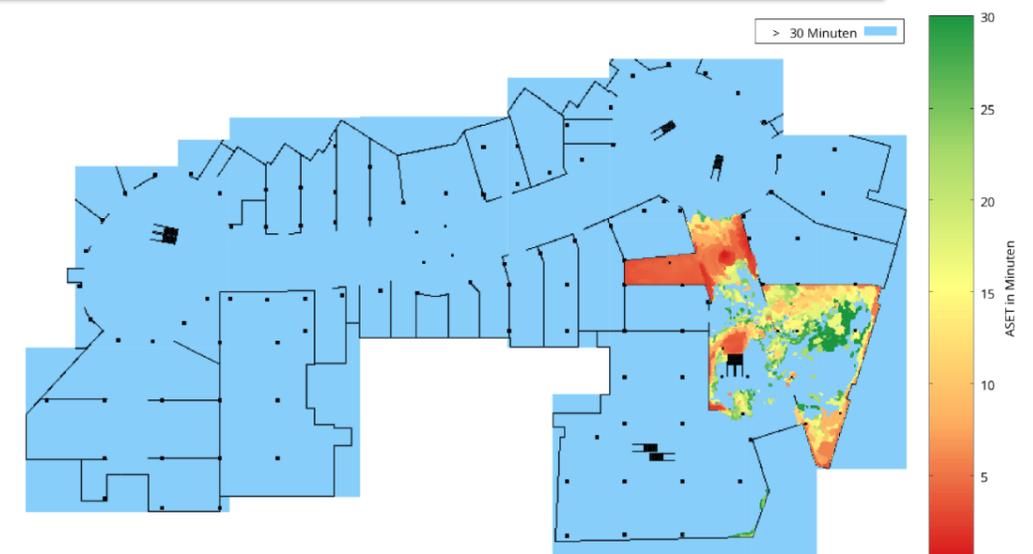
www.bcl-leipzig.de 12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | 08.11.-09.11.2018 2

ASET-Analyse mit FDS



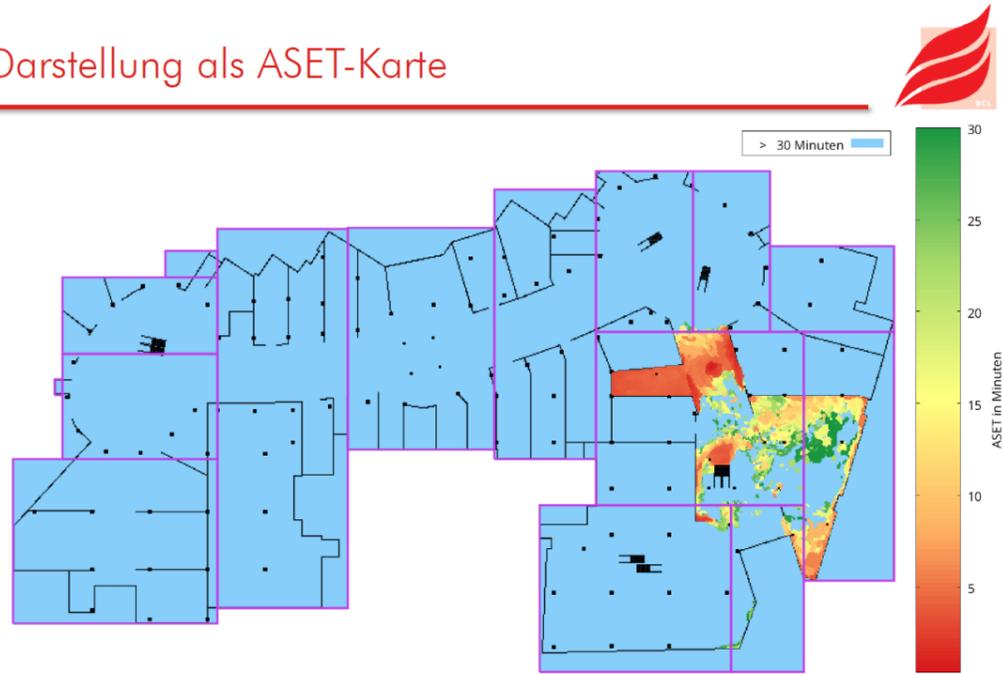
www.bcl-leipzig.de 12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | 08.11.-09.11.2018 3

Darstellung als ASET-Karte

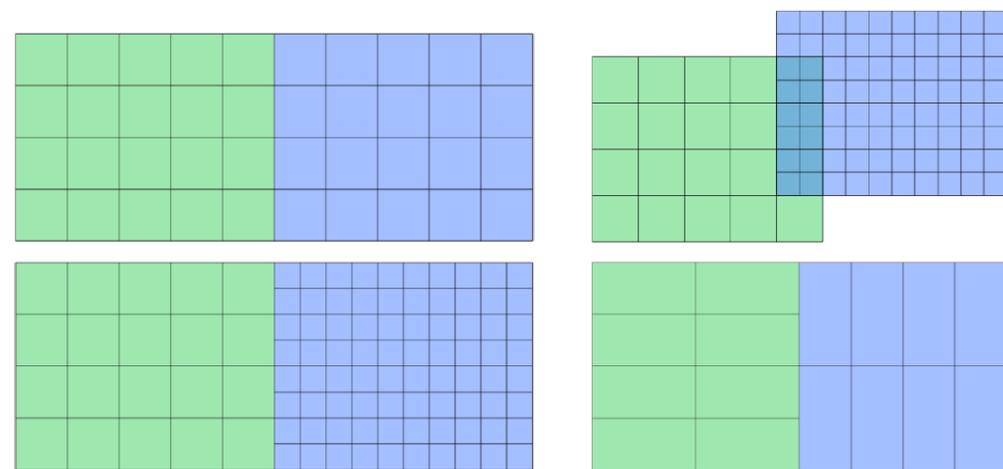


www.bcl-leipzig.de 12. Anwender-Treffen der FDS Usergroup | 08.11.-09.11.2018 4

## Darstellung als ASET-Karte

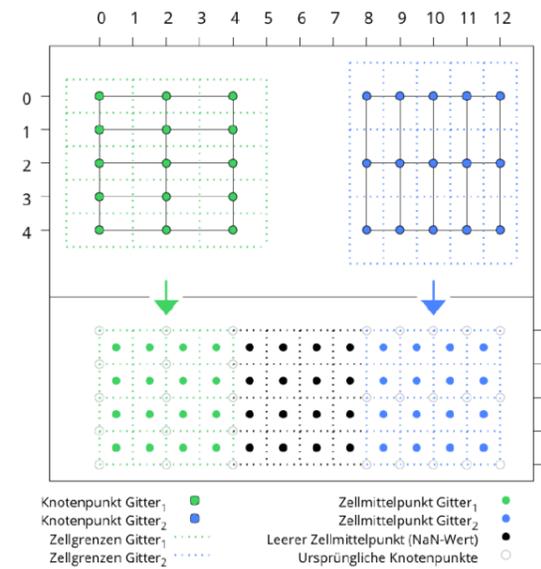


## Zulässige Kombinationen von Gittern einer Ebene



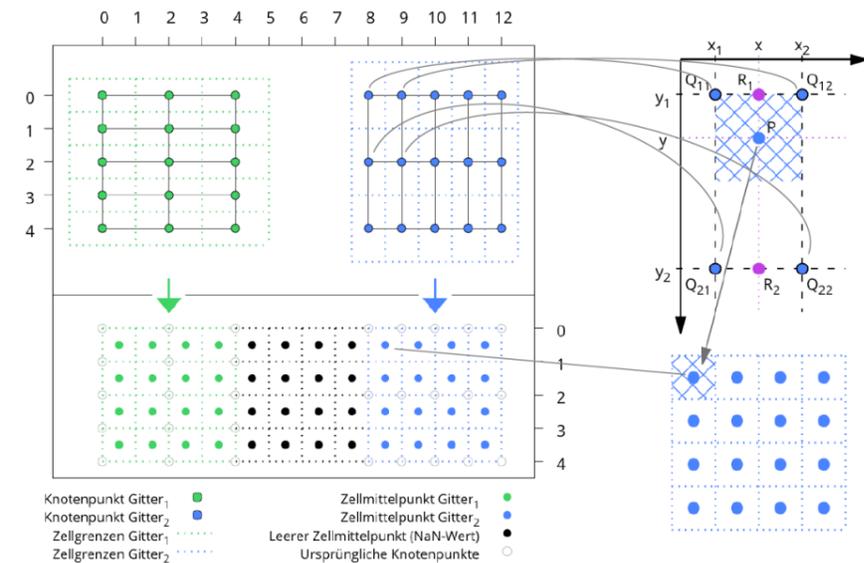
In Orientierung an [McG+18]

## Bilineare Interpolation



- Meshes einer horizontalen Ebene mit verschiedenen Gitterstrukturen
- Knotenpunkte beinhalten Werte und werden als rechteckige Pixel geplottet
- Problem: Ungenau und nicht geeignet für Differenzkartenbildung
- Überführung in neue globale Matrixstruktur mit echten Zellen durch Identifizierung kleinster Kantenbreiten und Kantenhöhen zwischen Knotenpunkten
- Anschließend bil. Interpolation
- Leere Zwischenräume werden durch leere Zellen aufgefüllt (NaN-Werte)

## Bilineare Interpolation



## Bilineare Interpolation



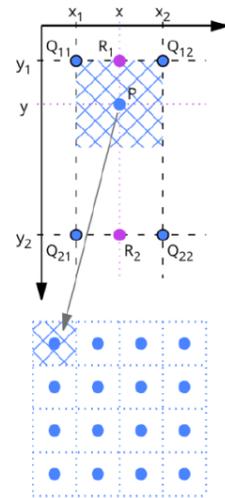
1. Schritt

$$f(R_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} * f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} * f(Q_{12})$$

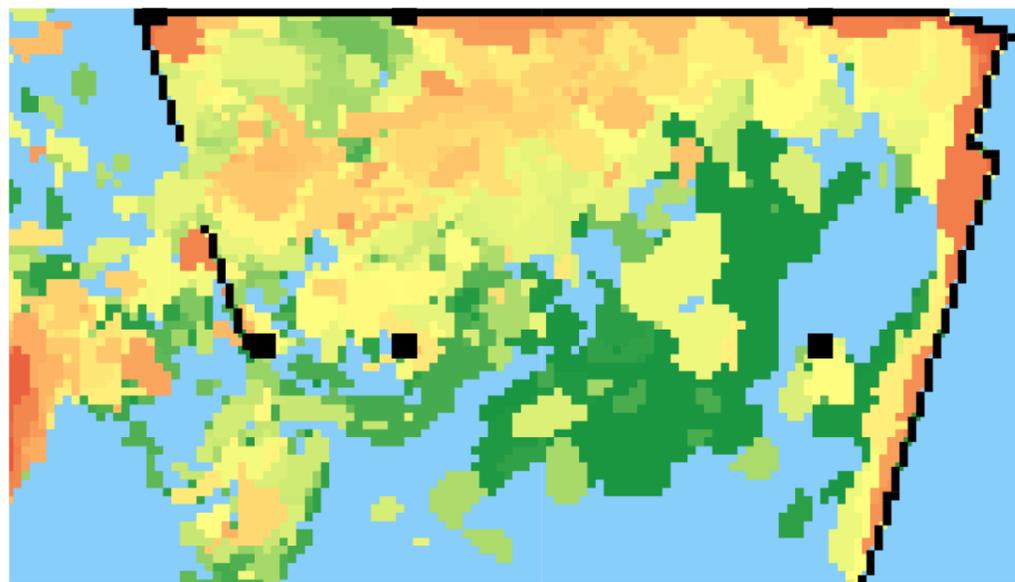
$$f(R_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} * f(Q_{21}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} * f(Q_{22})$$

2. Schritt

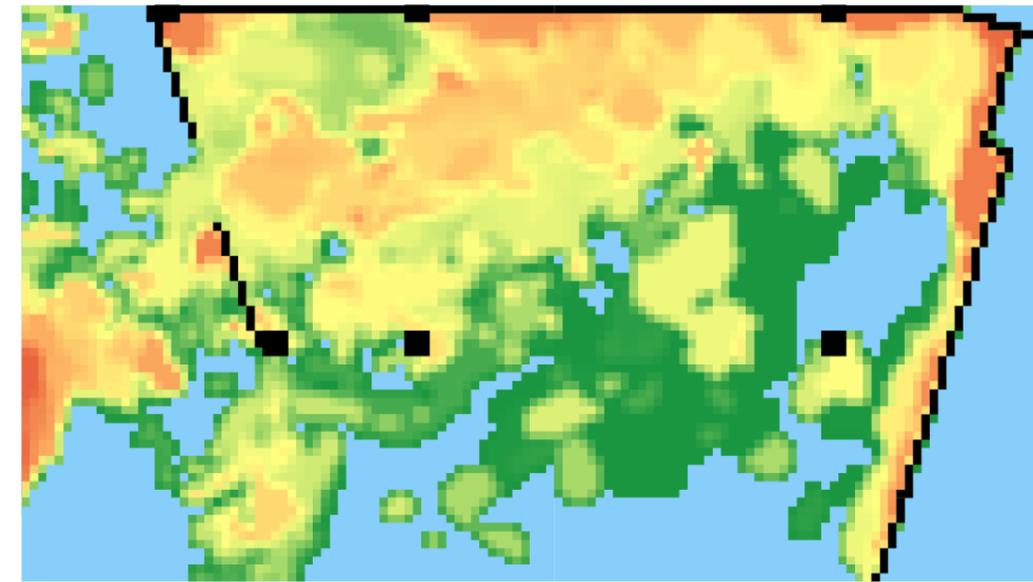
$$f(P) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} * f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} * f(R_2)$$



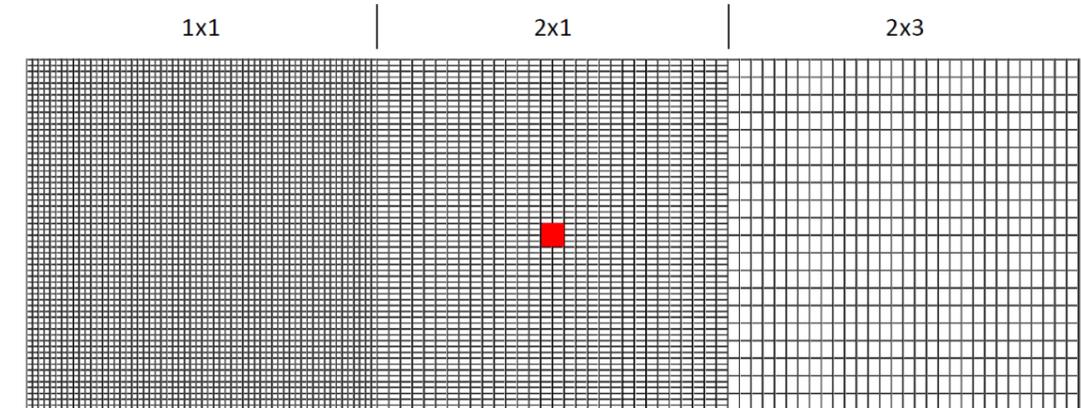
## ASET-Karte vor der bilinearen Interpolation...



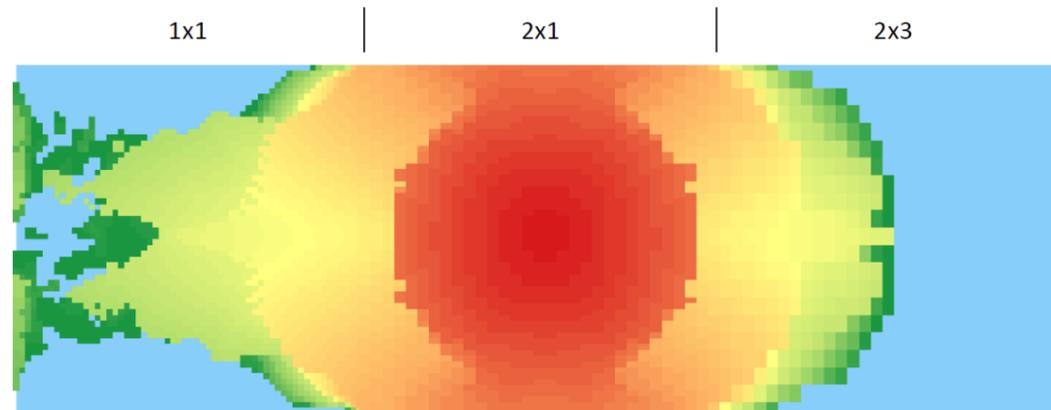
## ASET-Karte nach der bilinearen Interpolation...



## Beispiel: Interpolation verschiedener Gitterstrukturen



Beispiel: Interpolation verschiedener Gitterstrukturen



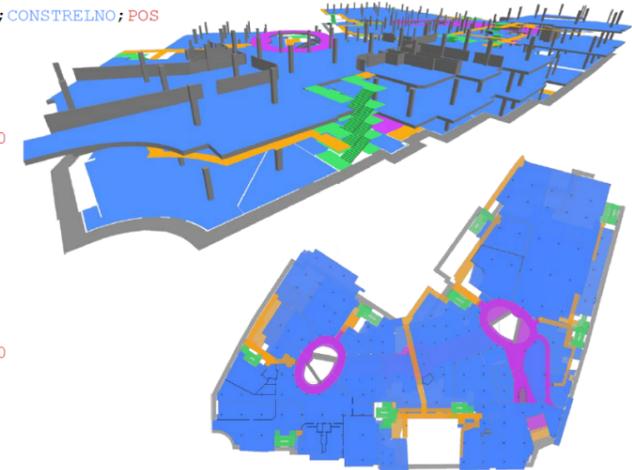
Personenstromsimulation (kontinuierliches Modell)



Ergebnisdatensatz: 1. von 10 Simulationsdurchläufen, 8563 Fußgänger

```

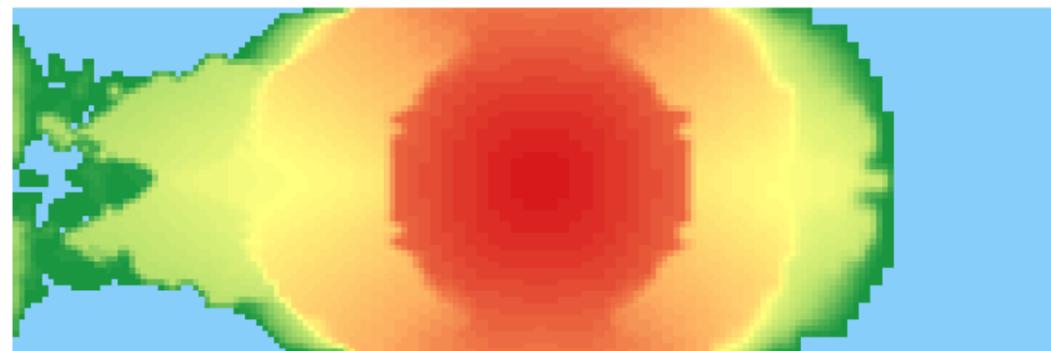
$PEDESTRIAN:SIMSEC;NO;CONSTRELTYP;CONSTRELTNO;POS
0.10;1;Area;202;7.028 79.770 0.000
0.10;2;Area;202;0.694 78.917 0.000
0.10;3;Area;311;6.377 65.422 0.000
0.10;4;Area;203;12.641 77.597 0.000
0.10;5;Area;202;2.048 79.139 0.000
0.10;6;Area;311;7.002 60.633 0.000
[...]
0.20;1;Area;202;7.031 79.791 0.000
0.20;2;Area;202;0.703 78.921 0.000
0.20;3;Area;311;6.429 65.439 0.000
0.20;4;Area;203;12.665 77.647 0.000
0.20;5;Area;202;1.993 79.107 0.000
0.20;6;Area;311;6.995 60.667 0.000
[...]
    
```



Beispiel: Interpolation verschiedener Gitterstrukturen



Interpolierte Darstellung: 1x1



Generation einer RSET-Karte (1. Simulationsdurchlauf)



## RSET-Karte aus Perzentil 95%



## Herleitung der Differenzmatrix und Differenzbildung



1. Kleinste Kantenbreite und Kantenhöhe von ASET- und RSET-Kartenzellen für neue Zellstruktur der Differenzmatrix auswählen.
2. Positionen der Zellmittelpunkte der Differenzmatrix weisen auf zu verrechnende Zellen der ASET- und RSET-Karte.
3. Falls Zellmittelpunkt auf zwischen Zellgrenzen liegt wird die Zelle gewählt, deren Verrechnung in einem konservativem Ergebnis resultiert.

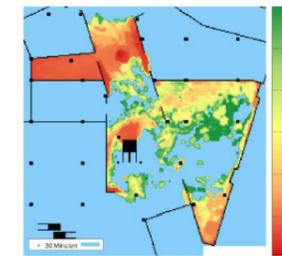


Abb. 21: Interpolierte ASET-Karte in 2 Metern Höhe (Erdgeschoss)

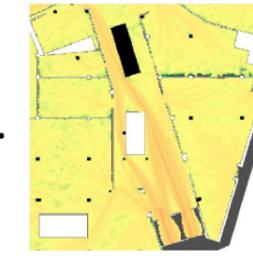


Abb. 22: RSET-Karte in 0 Metern Höhe (Erdgeschoss)

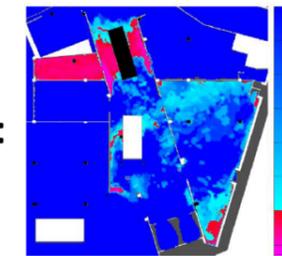
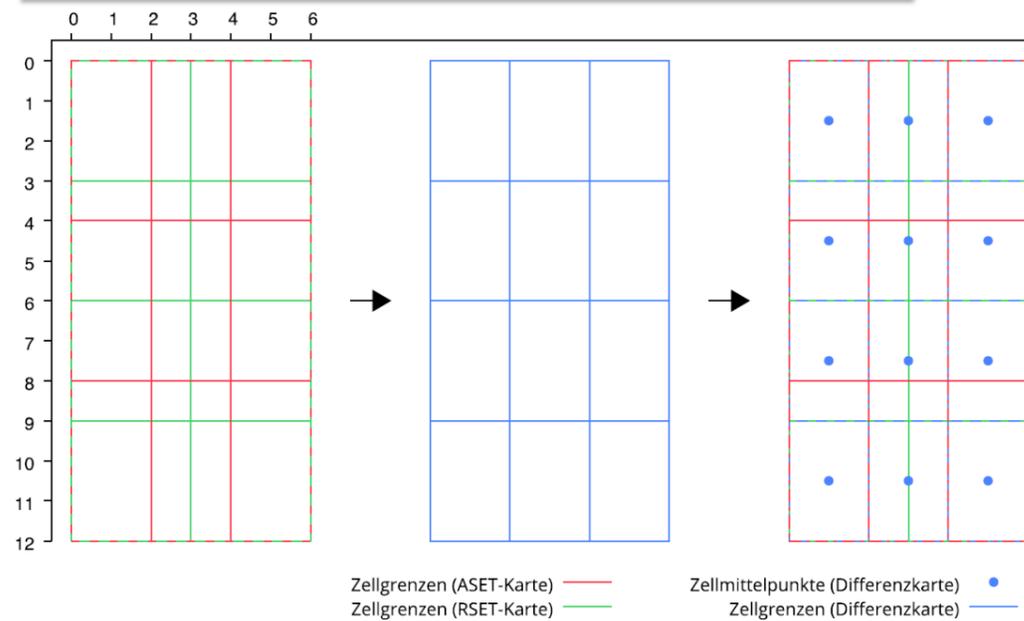
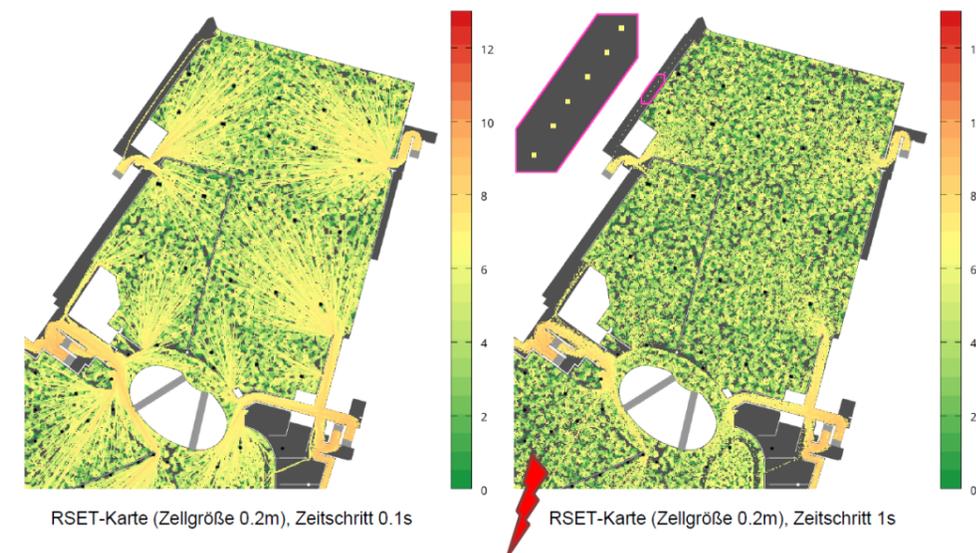


Abb. 23: Differenzkarte (Erdgeschoss)

## Herleitung der Differenzmatrix



## Wahl der Zellgröße



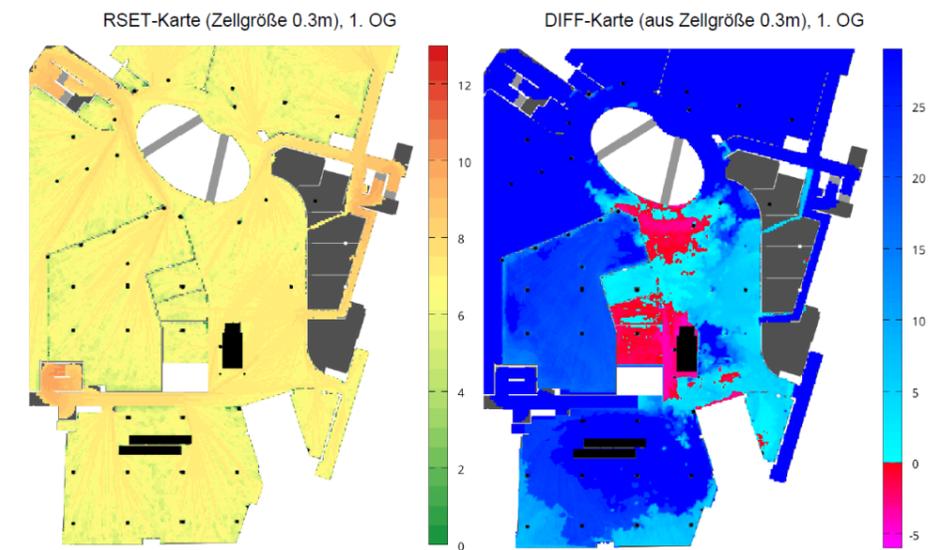
## Wahl der Zellgröße



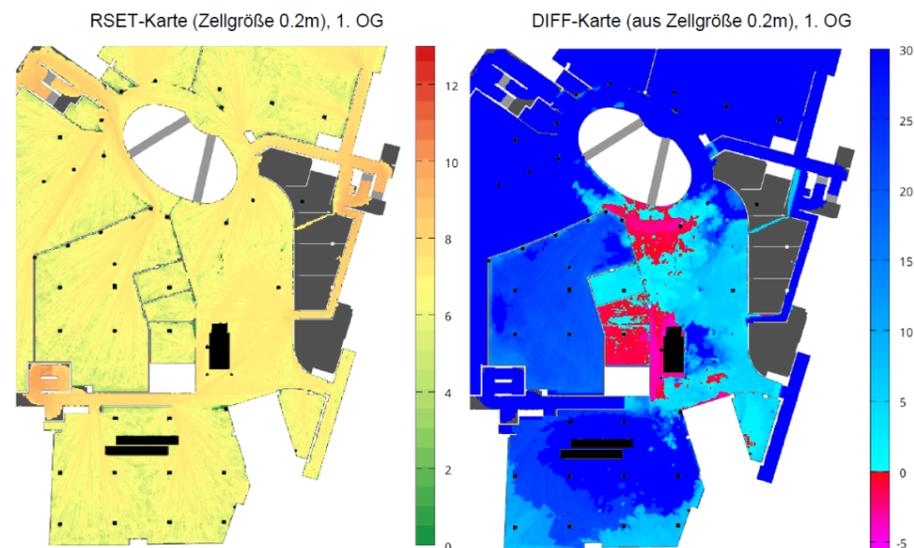
- Mittlere freie Gehgeschwindigkeit, Frauen: 1.27 m/s [RiM16]
- Mittlere freie Gehgeschwindigkeit, Männer: 1.41 m/s [RiM16]
- Durchschnittliche freie Gehgeschwindigkeit: 1.34 m/s
  - Die Zellgröße muss aus den vorliegenden Zeitschritten der Fußgängerprotokolle abgeleitet werden, um zusammenhängende Fußwege in RSET-Karten zu erhalten:

Zeitschritt (s)	m/Zeitschritt	Zellbreite/-höhe (m)
0.1	0.134	0.2
0.2	0.268	0.3
0.4	0.536	0.6
0.5	0.670	0.7
1.0	1.340	1.4

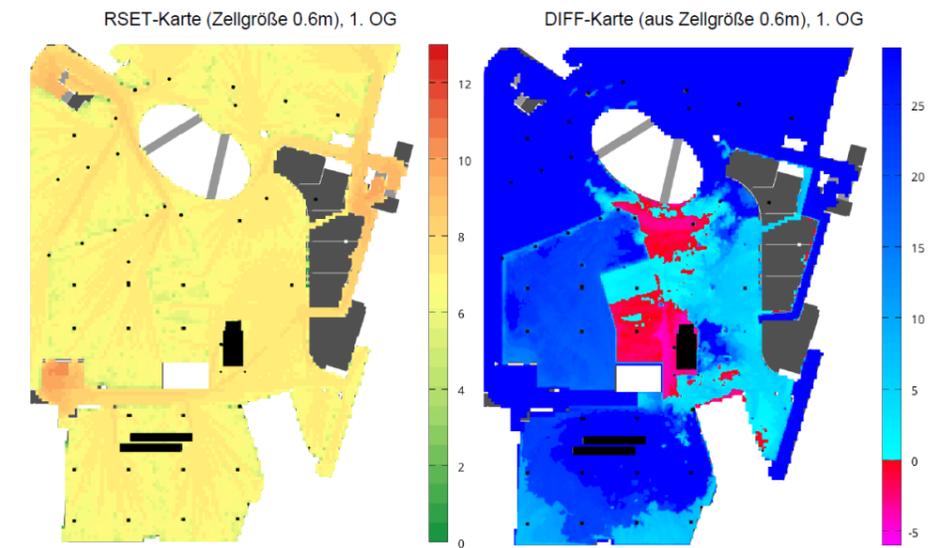
## Zellgröße vs. Zellgröße



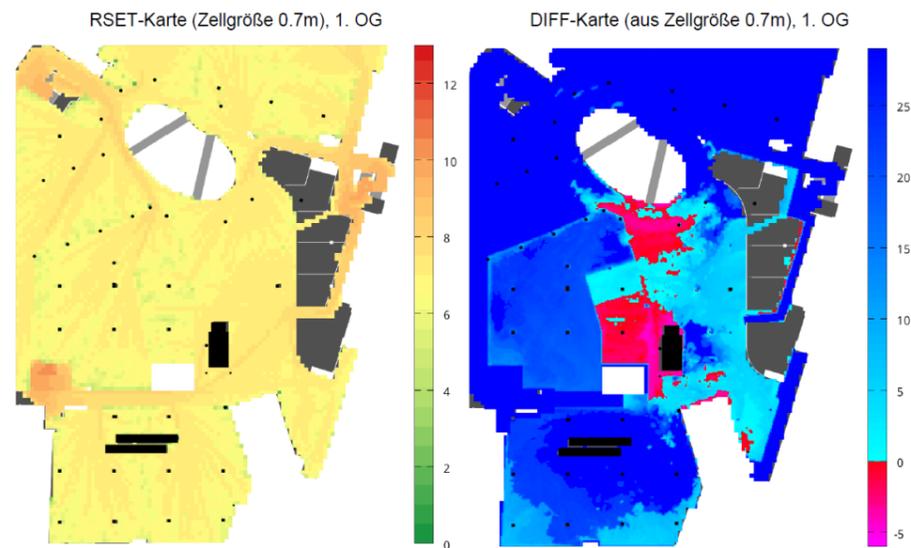
## Zellgröße vs. Zellgröße



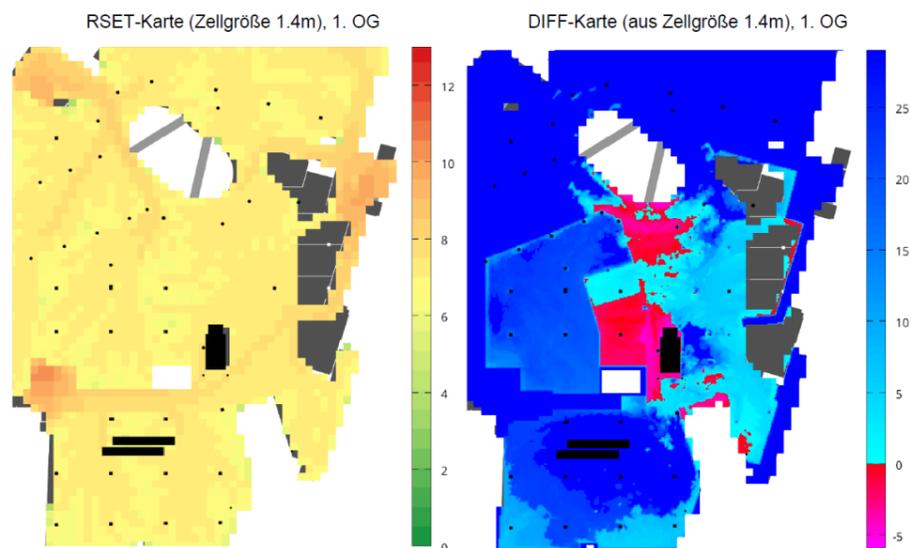
## Zellgröße vs. Zellgröße



## Zellgröße vs. Zellgröße



## Zellgröße vs. Zellgröße



## Auswertung der Ergebnisse



- Die minimale Zellgröße von RSET-Karten ist von den gewählten Zeitschritten des Fußgängerprotokolls abhängig.
- **Bestätigung** der These: Eine geringere Auflösung der RSET-Karte, im Vergleich zur Auflösung der ASET-Karte, wirkt sich nur gering auf die ausgegebene Differenzkarte aus.
- Eine verringerte Auflösung von RSET-Karten resultiert in konservativen Differenzkarten.
- Minimale Breite einer Tür- bzw. Wandöffnung beträgt ~ 0.6m [DIN14]
  - Zeitschritt < 0.5s wählen

Zeitschritt (s)	m/Zeitschritt	Zellbreite/-höhe (m)
0.1	0.134	0.2
0.2	0.268	0.3
0.4	0.536	0.6

## Literatur

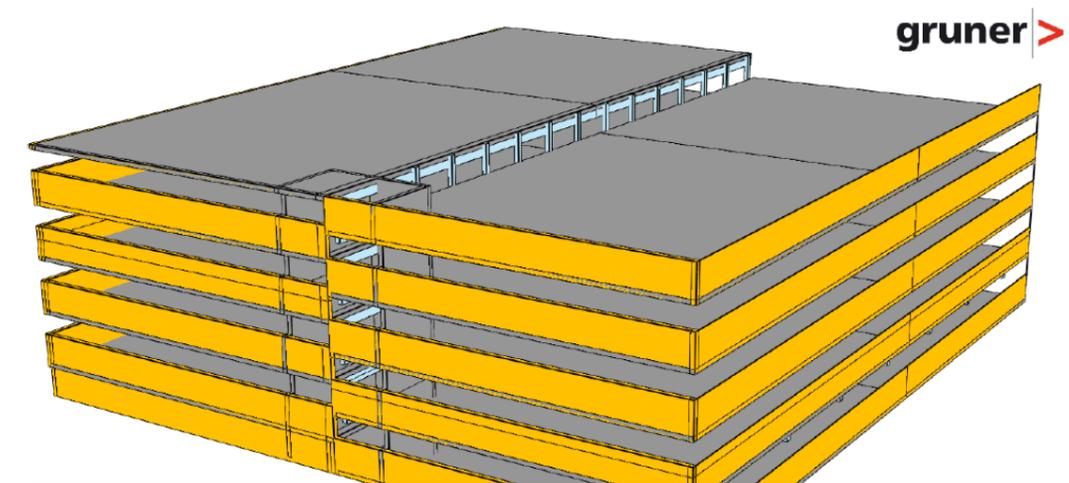


- [DIN14] DIN 18101. Türen - Türen für den Wohnungsbau - Türblattgrößen, Bandsitz und Schlosssitz - Gegenseitige Abhängigkeit der Maße. DIN 18101:2014-08. Deutsches Institut für Normung e. V.
- [McG+18] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd und Marcos Vanella. Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6. Aufl. NIST Special Publication 1019. National Institute of Standards und Technology (NIST), 26. Juni 2018.
- [RiM16] RiMEA. Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. Version 3. RiMEA e.V. 10. März 2016.
- [Sch16] Benjamin Schröder. „Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire“. Forschungszentrum Jülich GmbH. Dissertation. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, 2016.
- [Wei18] Robert Weiße. „Visualisierung von Brand- und Personenstromsimulationen - Generierung von ASET-, RSET- und Differenzkarten“, Masterarbeit. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK), 2018.

**Claudia Book:****Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken****Abstract:**

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit dem Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in oberirdischen Garagen. Elektrifizierte Fahrzeuge weisen als Antriebsquelle fast ausschließlich Lithium-Ionen Batterien auf. Dies ist auf die hohe Speicherkapazität bei vergleichsweise geringem Gewicht der Batterien zurückzuführen. Um das Gefahrenpotential dieser Antriebsquelle beurteilen zu können, wird unter Beachtung ihrer Funktionsweise die Gefahr eines thermischen Durchgehens der Lithium-Ionen Batterie beschrieben. Daran anschließend wird das Brandrisiko von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bewertet. Die Verfasserin kommt zu dem Schluss, dass durch Elektrofahrzeuge kein erhöhtes Brandrisiko für Garagenbauwerke besteht.

Auf Grundlage dieses Ergebnisses wird unter Beachtung der aktuell zugelassenen Kraftfahrzeuge in Deutschland ein Bemessungsbrand für Garagenbauwerke erarbeitet. Dieser Bemessungsbrand ist sowohl für Elektro- als auch für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor gültig. Anhand dessen werden Brandsimulationen mittels des CFD-Programms FDS (Fire Dynamics Simulator) durchgeführt, um die thermische Belastung der Tragstruktur des Parkhauses zu ermitteln. Untersucht wird der Einfluss auf die thermische Belastung sowohl von an das Parkhaus angrenzenden Bauwerken als auch von verschiedenen großen Öffnungsflächen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Temperaturentwicklung in oberirdischen Garagenbauwerken von den zur Verfügung stehenden Öffnungsflächen relativ unabhängig ist.

**Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken**

Claudia Book, 09.11.2018

**Gliederung**

1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an oberirdische Großgaragen
2. Lithium-Ionen Batterien
3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks
4. Fazit

**gruner** >

## Gliederung

1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an oberirdische Großgaragen
2. Lithium-Ionen Batterien
3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks
4. Fazit

9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 3

**gruner** >

## 1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an oberirdische Großgaragen

Auszug der unterschiedlichen brandschutztechnischen Anforderungen an offene und geschlossene Großgaragen gemäß Garagenverordnung des Landes Baden-Württemberg (GaVO)

	Offene oberirdische Großgarage	Geschlossene oberirdische Großgarage
Umfassungswände	≥ 1/3 unverschießbare, unmittelbar ins Freie führende Öffnungsflächen, Entfernung voneinander ≤ 70 m (§ 1 Abs. 1 GaVO)	< 1/3 unverschießbare, unmittelbar ins Freie führende Öffnungsflächen (§ 1 Abs. 2 GaVO)
Tragende Wände, Decken und Stützen	ohne Feuerwiderstand aus nichtbrennbaren Baustoffen (§ 6 Abs. 2 GaVO)	feuerhemmend aus nichtbrennbaren Baustoffen (§ 6 Abs. 3 GaVO)
Rauchabschnitte	Keine Beschränkung	Max. zulässige Größe 5.000 m <sup>2</sup> (bzw. 10.000 m <sup>2</sup> ) (§ 7 Abs. 1 und Abs. 2 GaVO)
Zulässige Rettungsweglänge	50 m (§ 9 Abs. 2 GaVO)	30 m (§ 9 Abs. 2 GaVO)

9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 4

**gruner** >

## Gliederung

1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an oberirdische Großgaragen
2. Lithium-Ionen Batterien
3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks
4. Fazit

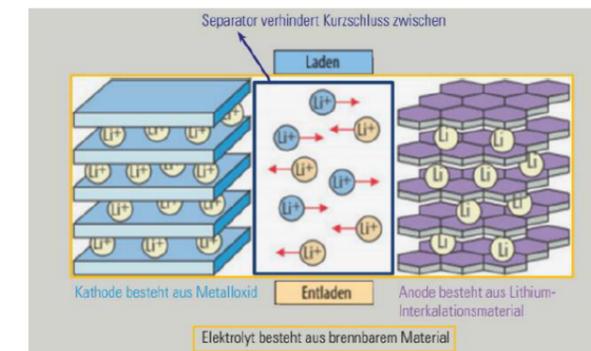
9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 5

**gruner** >

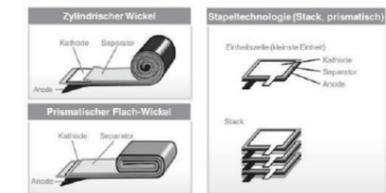
## 2. Lithium-Ionen Batterien

Lithium (Li)

- Leichtestes Metall des Periodensystems
- Sehr hohes Redox-Potential  
→ leichte Batterie mit hoher Speicherkapazität



Schema einer Lithium-Ionen Batterie [15]



Aufbauformen von Lithium-Ionen Batterien [19]

9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 6

**2. Lithium-Ionen Batterien**  
**2.1 Gefahrenpotential**



Li-Ionen Batterien aus zwei Gründen kritischer als andere Energiespeicher:

1. höhere Energiedichte → mehr Energie in Form von Wärme
2. Verwendung brennbarer Elektrolyte, die zur Wärmefreisetzung beitragen

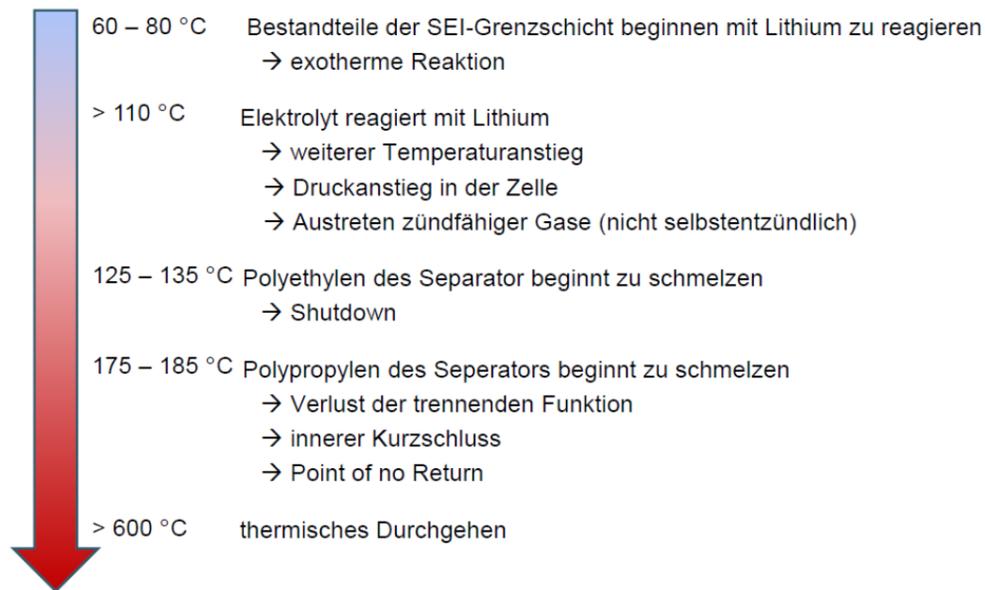
Li-Ionen Batterien bergen folgende Gefahrenpotentiale:

- Gefahr aus Elektrizität
- Gefahr durch austretende chemische Stoffe
- Gefahr durch exotherme Reaktionen

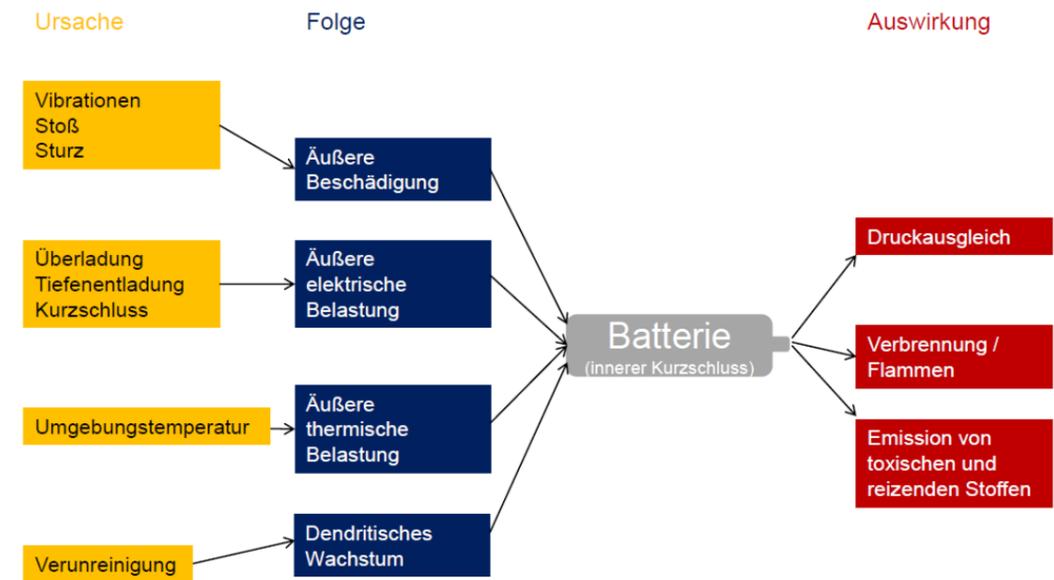
Thermisches Durchgehen (Thermal Runaway)

- Sich selbst verstärkender, exothermer Prozess
- Kann von außen nicht mehr gestoppt werden
- Führt zur vollständigen Zerstörung der Zelle

**2. Lithium-Ionen Batterien**  
**2.2 Thermisches Durchgehen**



**2. Lithium-Ionen Batterien**  
**2.2 Thermisches Durchgehen**



**2. Lithium-Ionen Batterien**  
**2.3 Brandrisiko Fahrzeugbatterien**



Verschiedene Arten von elektrifizierten Fahrzeugen

- Hybrid Electric Vehicle (HEV)
- Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) → Speicherkapazität ~ 10 kWh
- Electric Vehicle (EV) → Speicherkapazität derzeit bis 100 kWh

**Risiko = Auftretenswahrscheinlichkeit x Schadenmaß**

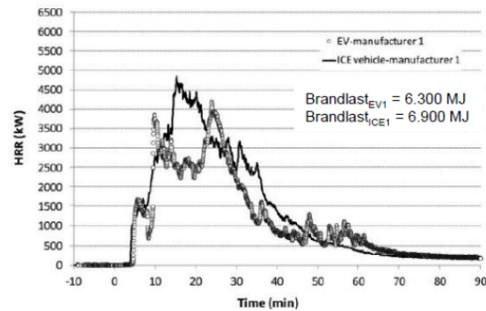
Auftretenswahrscheinlichkeit eines Li-Ionen Batterie Brandes:

- Keine quantifizierte Aussagen

Schadenmaß

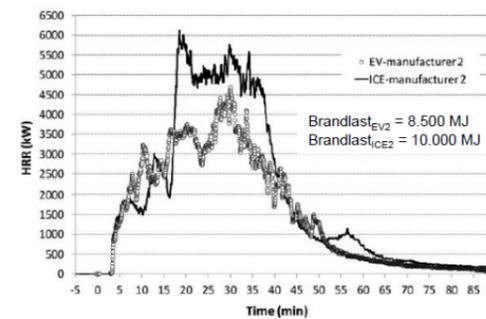
- Freisetzung 10- bis 20-fache der Speicherkapazität in Form von Wärme [24] [40]
- Brandlast 100 l Sprittank ≈ Brandlast 45 kWh Lithium-Ionen Batterie

2. Lithium-Ionen Batterien  
2.3 Brandrisiko Fahrzeugbatterien



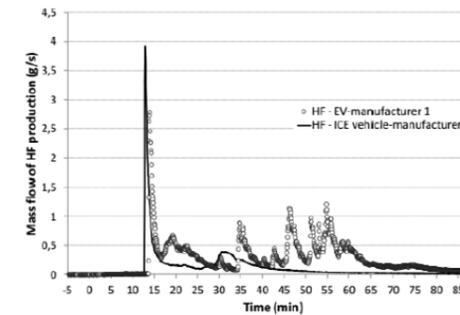
Brandursprung:  
Beflammung des Fahrersitzes

Verlauf der Wärmefreisetzungsrate der Brandversuche für die Fahrzeuge des Herstellers 1 [43]



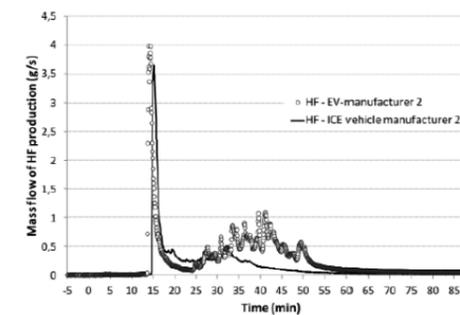
Verlauf der Wärmefreisetzungsrate der Brandversuche für die Fahrzeuge des Herstellers 2 [43]

2. Lithium-Ionen Batterien  
2.3 Brandrisiko Fahrzeugbatterien



HF = Fluorwasserstoff  
In Verbindung mit Wasser reagiert es zu Fluorwasserstoffsäure, die stark ätzend ist

Verlauf der HF-Freisetzungsrate der Brandversuche für die Fahrzeuge des Herstellers 1 [43]



Verlauf der HF-Freisetzungsrate der Brandversuche für die Fahrzeuge des Herstellers 2 [43]

2. Lithium-Ionen Batterien  
2.3 Brandrisiko Fahrzeugbatterien



Tested element	EV manufacturer 1	ICE vehicle manufacturer 1	EV manufacturer 2	ICE vehicle manufacturer 2
<b>Test</b>				
Nominal Voltage (V)	330 V*	-	355 V*	-
Capacity (Ah)	50 Ah*	-	66,6 Ah*	-
Energy (kWh)	16,5 kWh*	-	23,5 kWh*	-
Mass (kg)	1 122 kg	1 128 kg	1 501 kg	1 404 kg
Lost mass (kg)	212 kg	192 kg	278,5 kg	275 kg
Lost mass (%)	19%	17%	18,6%	19,6%
<b>Online gas analysis – total quantity of emitted gases (FTIR and online analyzers)</b>				
CO <sub>2</sub> (g)	460 400	508 000	618 490	722 640
CO <sub>2</sub> (mg/lost g)	2 172	2 616	2 220,8	2 637,8
CO (g)	10 490	12 040	11 700	15 730
CO (mg/lost g)	49	63	42	57,2
THC (g)	2 430	2 380	2 860	2 730
THC (mg/lost g)	11,5	12,4	19,3	9,9
NO (g)	500	679	770	740
NO (mg/lost g)	2,4	3,5	2,8	2,7
NO <sub>2</sub> (g)	198	307	349	410
NO <sub>2</sub> (mg/lost g)	0,9	1,6	1,3	1,5
HF (g)	1 540	621	1 470	813
HF (mg/lost g)	7,3	3,2	5,3	3
HCl (g)	2 060	1 990	1 930	2 140
HCl (mg/lost g)	10	10,4	6,9	7,8
HCN (g)	113	167	148	178
HCN (mg/lost g)	0,5	0,9	0,5	0,6
<b>Thermal effects</b>				
Maximal HRR (MW)	4,2 MW	4,8 MW	4,7 MW	6,1 MW
Heat of combustion (MJ)	6 314 MJ	6 890 MJ	8 540 MJ	10 000 MJ
Heat of combustion/unit mass loss (MJ/kg)	29,8 MJ/kg	35,9 MJ/kg	30,7 MJ/kg	36,4 MJ/kg

Zusammenfassende Ergebnistabelle der Brandversuche [43]

\* Characteristics of the battery pack of the EV.

2. Lithium-Ionen Batterien  
2.3 Brandrisiko Fahrzeugbatterien



Risiko = Auftretenswahrscheinlichkeit x Schadenmaß

Auftretenswahrscheinlichkeit eines Li-Ionen Batterie Brandes:

- Keine quantifizierte Aussagen

Schadenmaß

- Freisetzung 10- bis 20-fache der Speicherkapazität in Form von Wärme [24] [40]
- Brandlast 100 l Sprittank ≈ Brandlast 45 kWh Lithium-Ionen Batterie
- Wärmefreisetzungsrate EV ≈ Wärmefreisetzungsrate ICE
- Verbrennungsprodukte EV ≈ Verbrennungsprodukte ICE (mit Ausnahme von HF)

Risiko kann nicht abschließend beurteilt werden

Für diese Untersuchung (Temperaturermittlung) gilt daher: Brandrisiko EV = Brandrisiko ICE

"Nach derzeitigem Stand können [...] Elektrofahrzeuge [...] in üblichen Garagen ohne besondere Auflagen geduldet werden. Sie stellen nach bisherigen Erkenntnissen, im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen, kein wesentlich erhöhtes Gefahrenpotenzial dar."  
[Arbeitskreis Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz: Gefährdungsbeurteilung Brand von Fahrzeugen mit Elektroantrieb (2014-3)]

## Gliederung gruner >

1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an oberirdische Großgaragen
2. Lithium-Ionen Batterien
3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks
4. Fazit

## 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks gruner >

### 3.1 Fragestellung und Leistungskriterien

- Untersuchung des Einflusses unterschiedlich großer Öffnungen in den Umfassungswänden
- Thermische Belastung des Stahltragwerks in Anlehnung an  $\theta_{cr}$ -Verfahren [EC 3-1-2]  
Stabilitätsversagen und Einflüsse aus Verformung müssen ausgeschlossen werden  
Stark vereinfachte Annahme für diese Untersuchung  
 $\theta_{vorh} < \theta_{a,cr} = 540 \text{ °C}$
  - Angrenzende Fahrzeuge  
 $\theta_{Fahrzeug} \leq 300 \text{ °C}$  [48]

Annahmen im Rahmen des Nachweises:

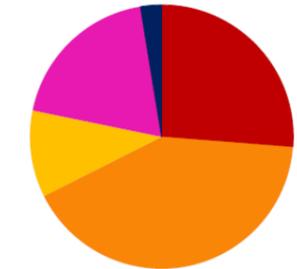
- Rettungswegsituation gemäß GaVO → keine Beurteilung der Personensicherheit
- Eingreifen der Feuerwehr bleibt unberücksichtigt
- Windeinfluss bleibt unberücksichtigt
- Umgebungstemperatur: 20 °C

## 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks gruner >

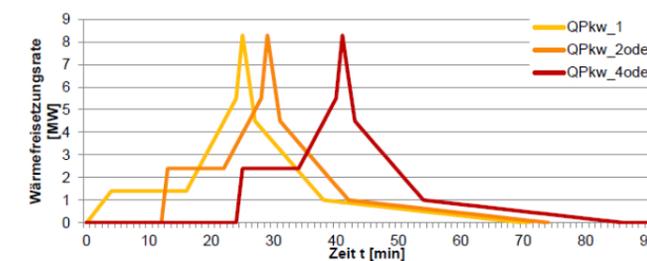
### 3.2 Bemessungsbrand

Kategorie	1	2	3	4	5
theoretische Brandlast [MJ]	6.000	7.500	9.500	12.000	12.000
Gewicht [kg]	850	1.000	1.250	1.400	1.400
Häufigkeit 1998 [%]	38	31	18	9	4
Beispiele	Fiat Punto	VW Golf	VW Passat	Opel Omega	VW Sharan

Anzahl der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge nach Fahrzeugkategorie, Stand 1. Januar 2017 [37]



Fahrzeugkategorien nach [46]



Verlauf der Wärmefreisetzungsrate von Kategorie 3 Pkw nach [46]

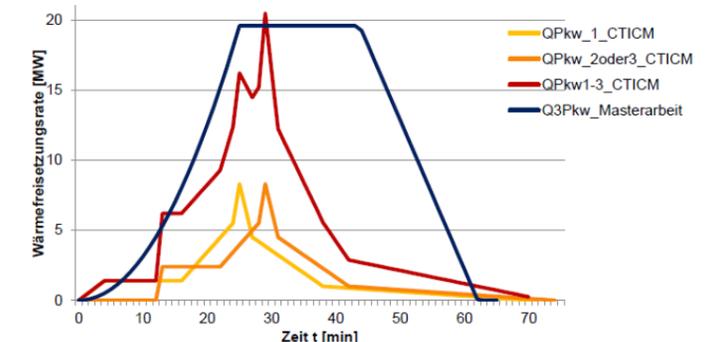
- Fahrzeugklasse 1-3 (12.026.063 Pkw, 26 %)
- Fahrzeugklasse 3-4 (18.927.703 Pkw, 41 %)
- Fahrzeugklasse 4-5 (4.871.001 Pkw, 11 %)
- Fahrzeugklasse 5 (8.799.630 Pkw, 19 %)
- sonstige (1.179.163 Pkw, 3 %)



## 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks gruner >

### 3.2 Bemessungsbrand

- Worst Crebile Case: Drei brennende Pkw der Kategorie 5
- Brandlastgesteuerter Brand
- $t^2$ -Modell mit langsamer Brandentwicklung
- $A_{Pkw} = 1,8 \text{ m} * 4,4 \text{ m} = 7,92 \text{ m}^2$
- $q = 824 \text{ kW/m}^2$
- $Q_{max} = 19,6 \text{ MW}$
- $Q_{fi} = 12.000 \text{ MJ}$
- Brandgut: Polyurethan



Verlauf verschiedener Wärmefreisetzungsraten

**gruner** >

## Gliederung

1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an oberirdische Großgaragen
2. Lithium-Ionen Batterien
3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks
4. Fazit

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks

#### 3.1 Fragestellung und Leistungskriterien **gruner** >

- Untersuchung des Einflusses unterschiedlich großer Öffnungen in den Umfassungswänden
- Thermische Belastung des Stahltragwerks in Anlehnung an  $\theta_{cr}$ -Verfahren [EC 3-1-2]  
Stabilitätsversagen und Einflüsse aus Verformung müssen ausgeschlossen werden  
Stark vereinfachte Annahme für diese Untersuchung  
 $\theta_{vorh} < \theta_{a,cr} = 540 \text{ °C}$
  - Angrenzende Fahrzeuge  
 $\theta_{Fahrzeug} \leq 300 \text{ °C}$  [48]

Annahmen im Rahmen des Nachweises:

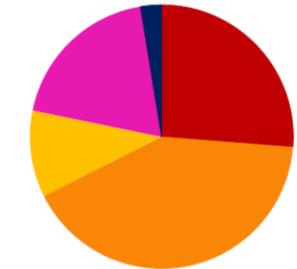
- Rettungswegsituation gemäß GaVO → keine Beurteilung der Personensicherheit
- Eingreifen der Feuerwehr bleibt unberücksichtigt
- Windeinfluss bleibt unberücksichtigt
- Umgebungstemperatur: 20 °C

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks

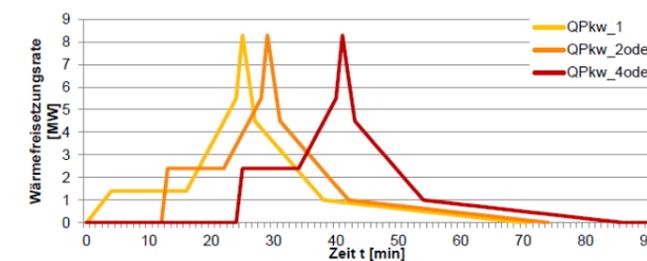
#### 3.2 Bemessungsbrand **gruner** >

Kategorie	1	2	3	4	5
theoretische Brandlast [MJ]	6.000	7.500	9.500	12.000	12.000
Gewicht [kg]	850	1.000	1.250	1.400	1.400
Häufigkeit 1998 [%]	38	31	18	9	4
Beispiele	Fiat Punto	VW Golf	VW Passat	Opel Omega	VW Sharan

Anzahl der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge nach Fahrzeugkategorie, Stand 1. Januar 2017 [37]



Fahrzeugkategorien nach [46]



Verlauf der Wärmefreisetzungsrate von Kategorie 3 Pkw nach [46]

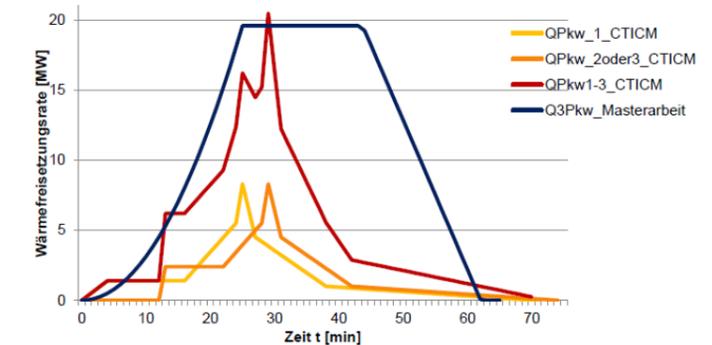
- Fahrzeugklasse 1-3 (12.026.063 Pkw, 26 %)
- Fahrzeugklasse 3-4 (18.927.703 Pkw, 41 %)
- Fahrzeugklasse 4-5 (4.871.001 Pkw, 11 %)
- Fahrzeugklasse 5 (8.799.630 Pkw, 19 %)
- sonstige (1.179.163 Pkw, 3 %)



### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks

#### 3.2 Bemessungsbrand **gruner** >

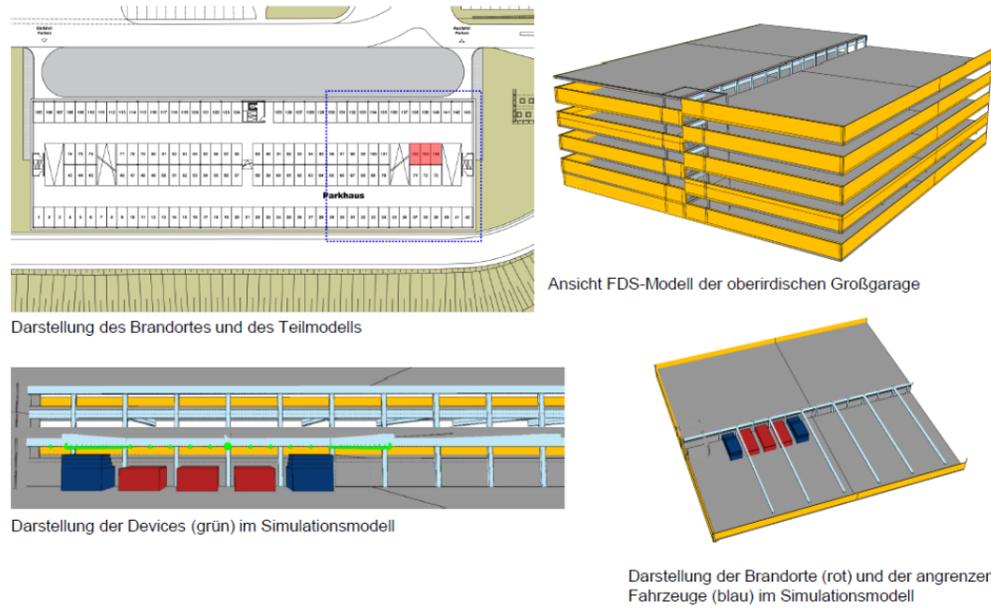
- Worst Crebile Case: Drei brennende Pkw der Kategorie 5
- Brandlastgesteuerter Brand
- $t^2$ -Modell mit langsamer Brandentwicklung
- $A_{Pkw} = 1,8 \text{ m} * 4,4 \text{ m} = 7,92 \text{ m}^2$
- $q = 824 \text{ kW/m}^2$
- $Q_{max} = 19,6 \text{ MW}$
- $Q_{fi} = 12.000 \text{ MJ}$
- Brandgut: Polyurethan



Verlauf verschiedener Wärmefreisetzungsraten

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks **gruner**

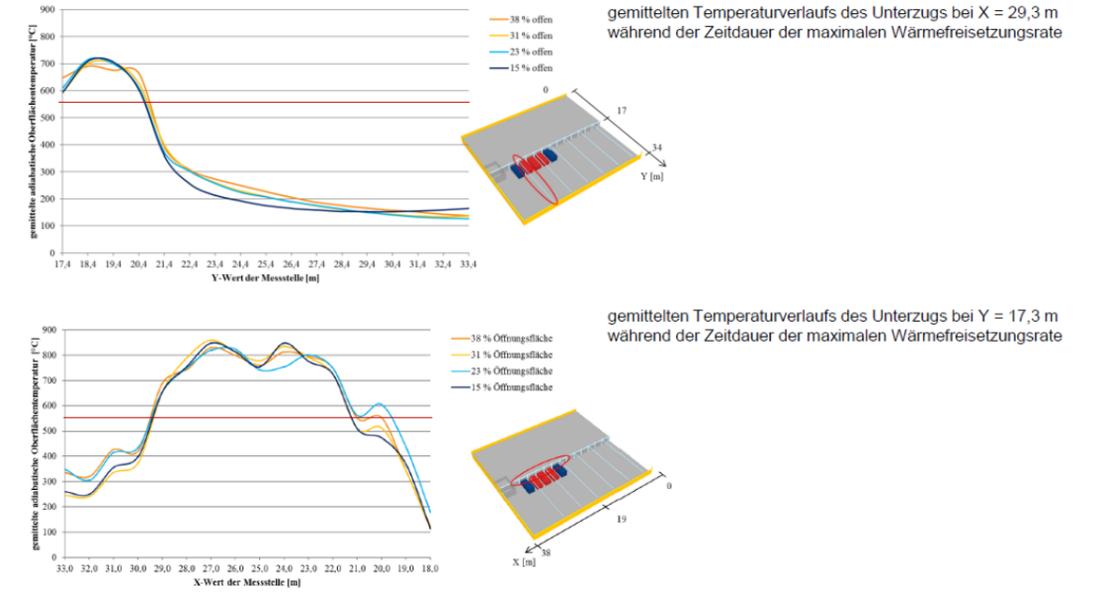
#### 3.3 Simulationsmodell



9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 19

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks **gruner**

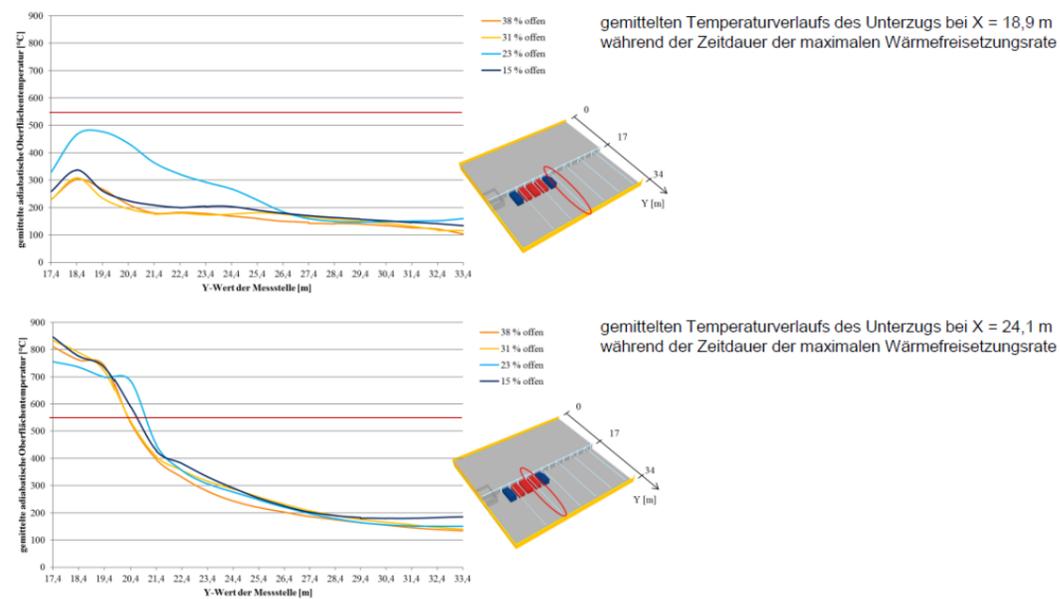
#### 3.4 Ergebnisse



9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 21

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks **gruner**

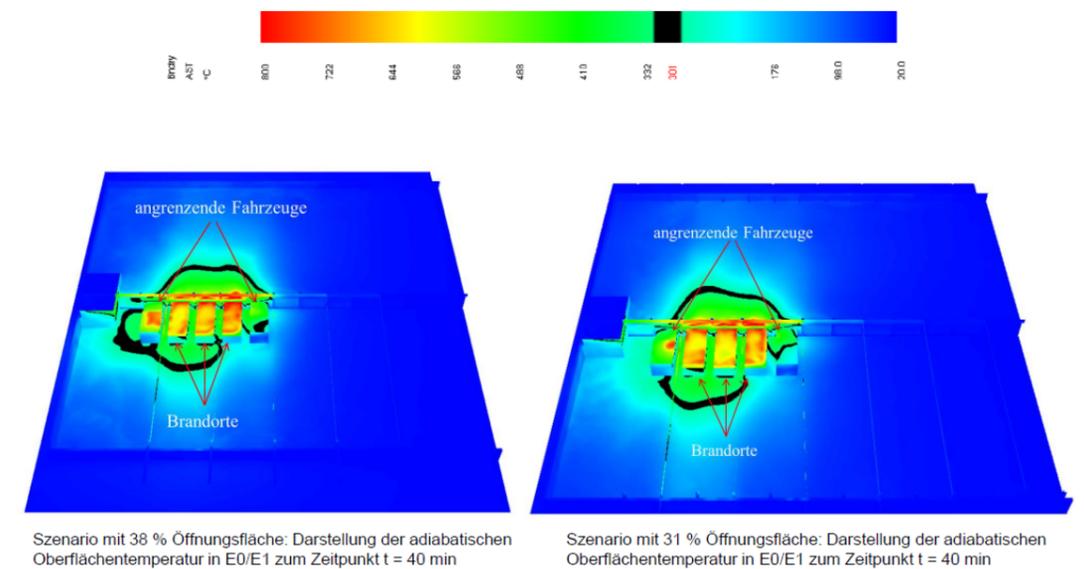
#### 3.4 Ergebnisse



9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 20

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks **gruner**

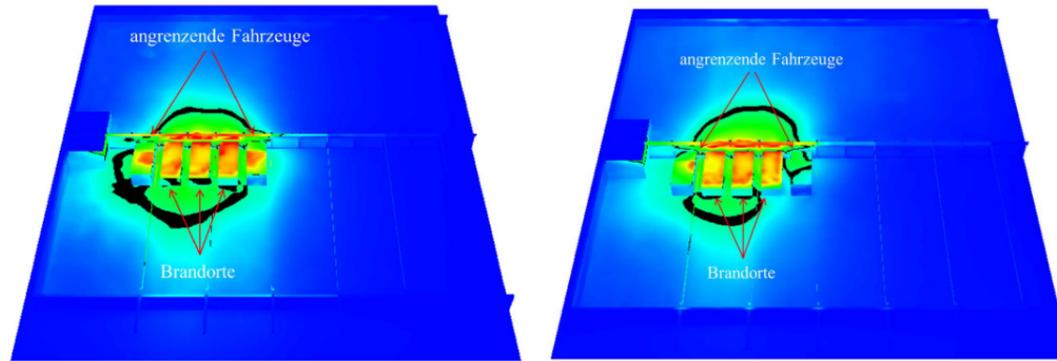
#### 3.4 Ergebnisse



9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 22

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks **gruner** >

#### 3.4 Ergebnisse



Szenario mit 23 % Öffnungsfläche: Darstellung der adiabatischen Oberflächentemperatur in E0/E1 zum Zeitpunkt t = 40 min

Szenario mit 15 % Öffnungsfläche: Darstellung der adiabatischen Oberflächentemperatur in E0/E1 zum Zeitpunkt t = 40 min

9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 23

### 3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks **gruner** >

#### 3.4 Ergebnisse

##### Bewertung

- Grenzwert der Stahltemperatur  $\theta_{a,cr} = 540 \text{ °C}$  wird etwa 13 min nach Brandentstehung überschritten
  - Teilversagen des Tragwerks nicht auszuschließen
  - Überprüfen, ob globales Tragwerksversagen auszuschließen ist
- Grenzwert des Brandüberschlags auf Fahrzeuge  $\theta_{\text{Fahrzeug}} = 300 \text{ °C}$  wird etwa 12 min nach Brandentstehung überschritten
  - Brandweiterleitung auf benachbarte Fahrzeuge nicht auszuschließen
  - Brandweiterleitung auf gegenüberliegendes Split-Level nicht auszuschließen
  - Fahrzeugbatterie meist im Fahrzeugboden verbaut
  - Thermisches Durchgehen angrenzender Elektro-Fahrzeuge nicht die zwingende Konsequenz

9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 24

## Gliederung

1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an oberirdische Großgaragen
2. Lithium-Ionen Batterien
3. Brandsimulationen eines Garagenbauwerks
4. Fazit

9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 25

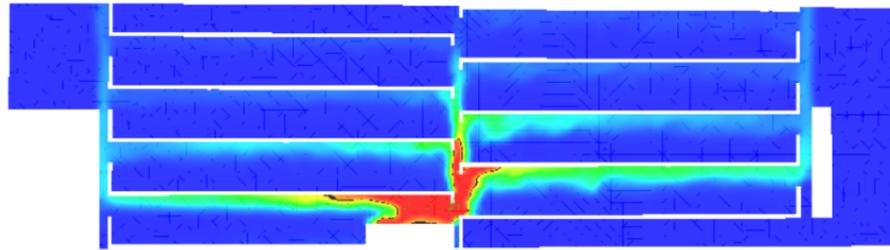
## 4 Fazit

- Großer Forschungsbedarf bzgl. Brandverhalten von Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien bzw. Elektrofahrzeuge
- Erste Untersuchungen zeigen, dass
  - Brandleistung nicht signifikant von der Art des Antriebs abhängig
  - Ausbeute der meisten Verbrennungsprodukte nicht signifikant von der Art des Antriebs abhängig
  - Ausbeute HF von der Art des Antriebs abhängig
  - Diese Erkenntnisse sind durch weitere Untersuchungen zu verifizieren/ falsifizieren
- Annahme Brandrisiko EV = Brandrisiko ICE für Fragestellungen nach entstehenden Temperatur i.O. → für Nachweis der Personensicherheit genauere Betrachtung notwendig
- Größe der Öffnungen spielen in dieser Betrachtung für die thermische Belastung der oberirdischen Garagen eine untergeordnete Rolle

9. November 2018 | Claudia Book | Zum Brandverhalten von Elektrofahrzeugen in Garagenbauwerken | Folie 26



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



**Stephan Klüh:**

Wassernerbel mit FDS

**Abstract:**

Die vorgestellten Arbeiten finden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts SUVEREN statt. In SUVEREN sollen die Auswirkungen, die von Fahrzeugen mit neuen Antriebstechnologien ausgehen, auf die Sicherheit in unterirdischen städtischen Anlagen untersucht werden. Die FOGTEC Brandschutz GmbH ist hieran beteiligt mit dem Schwerpunkt auf Brandbekämpfung sowie frühzeitige Branderkennung. Teil des Projekts sind sowohl Brandversuche, bei denen z. B. die Batterie eines Elektrofahrzeuges getestet wird als auch Simulationen im Versuchs- und Gebäudemaßstab.

Die Modellierung von Wassernerbel bzw. dessen Tropfen ist mit den in Brandsimulationen üblichen Gitterweiten nicht möglich und trotzdem ist ein Modul zur Brandbekämpfung mit Wasser seit einigen Jahren Bestandteil von FDS. Unser Ziel ist aus den FDS Simulationen samt Wassernerbel ein für uns aktives Werkzeug zu machen. Mögliche Anwendungen sehen wir in der Unterstützung von (Abnahme-)Versuchen sowie der Entwicklung neuer Düsenköpfe und Düsenanordnungen.

Die Eingabemöglichkeiten für Wasserdüsen in FDS orientieren sich stark an Bezeichnungen, die aus Versuchen bekannt sind und so kann das Setup eine Wassernerbel-Anlage „straight forward“ erscheinen. Inwiefern und wann die Ergebnisse der entsprechenden Simulation in der Praxis dann tatsächlich anwendbar sind, wollen wir innerhalb des Forschungsprojektes evaluieren. Erste Überlegungen legen dabei nahe, dass realistische Ergebnisse von FDS Simulationen nur durch eine geeignete Kombination der Modellierungen von Brandausbreitung und Wassernerbel erzielbar sind, da die entsprechenden Wechselwirkungen kaum zu vernachlässigen sein dürften.

Im Vortrag werden die Funktionsweise und Parameter des "Wassernerbel-Moduls" in FDS vorgestellt sowie die bisherigen Erfahrungen im Umgang damit erläutert. Die Untersuchungen stehen noch am Anfang und wir hoffen sehr schon im nächsten Jahr Ergebnisse und Validierungen vorstellen zu können.

Experten in Wassernerbel



## Wassernerbel in FDS

Stephan Klüh

*FDS Usergroup 2018, Freitag, 9. November 2018, Berlin*



The Smarter Way of Fire Fighting

1

Experten in Wassernerbel



### Hintergrund

#### FOGTEC Brandschutz GmbH

- **Mittelständisches Unternehmen mit Hauptsitz in Köln**
- **Entwicklung, Herstellung und Vertrieb von festinstallierten Brandmelde- und bekämpfungsanlagen**
- **Zulassung von Anlagen durch Brandversuche**
- **Seit Mitte 2017 Forschungsprojekt SUVEREN**
  - **Eigene Brandsimulationen (FDS)**

The Smarter Way of Fire Fighting

2

Experten in Wassernebel



## Wo & Warum Wassernebel



The Smarter Way of Fire Fighting

3

Experten in Wassernebel



## Forschungsprojekt SUVEREN



„Sicherheit in unterirdischen städtischen Verkehrsbereichen bei Einsatz neuer Energieträger“

- Laufzeit: 3 Jahre
- Programm „Zivile Sicherheit“ (BMBF)
- Beinhaltet sowohl Brandversuche als auch Simulationen



The Smarter Way of Fire Fighting

4

Experten in Wassernebel



## SUVEREN -- Neue Energieträger (NET)

- NET als Gegensatz zu mit Benzin / Diesel betriebenen Fahrzeugen
- Aktueller Schwerpunkt: Elektrofahrzeuge
- Gas-betriebene Fahrzeuge
  - Betrachtung von CNG, LNG, LPG („neu“)
  - Wasserstoff
- Fazit in Bezug auf HRR: Der Antrieb ist es nicht alleine. Das Fahrzeug hat unabhängig davon einen erheblichen Einfluss auf das Brandverhalten (vor allem im Anbetracht immer größerer PKW)

The Smarter Way of Fire Fighting

5

Experten in Wassernebel



## SUVEREN -- Unterirdische Verkehrsbereiche

Anwendungsbeispiele:

- Tief- / Parkgaragen
- Busbahnhöfe
- Kommerzielle Anlieferungszone
- Tunnel



The Smarter Way of Fire Fighting

6

Experten in Wassernebel



## SUVEREN -- Unterirdische Verkehrsbereiche

Anwendungsbeispiele:

- Tief- / Parkgaragen
- Busbahnhöfe
- Kommerzielle Anlieferungszone
- (Tunnel)



The Smarter Way of Fire Fighting

7

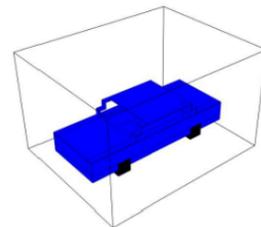
Experten in Wassernebel



## FDS in SUVEREN – Simulation & Brandversuche

Zwei Versuchsreihen -- jeweils inklusive Wiederholungsversuchen mit Wassernebel

- Energieträger „stand alone“
  - Li-Ion Batterie (Fahrzeugbereich)
  - Jet Feuer (kein Wasserstoff)
- Fahrzeugbrand (Mock-Up)



The Smarter Way of Fire Fighting

8

Experten in Wassernebel



## Modellierung von Wassernebel in FDS

Offensichtliche Probleme:

- Gitterweite vs Tröpfchengröße
- Zeitschritt vs Geschwindigkeit
- Ansatz in FDS : Lagrangian-Particles



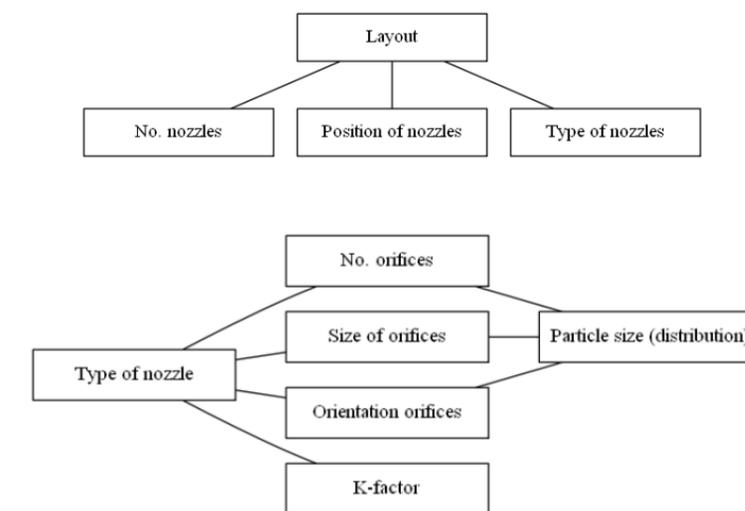
The Smarter Way of Fire Fighting

9

Experten in Wassernebel



## Wassernebel Anlage „from Scratch“



The Smarter Way of Fire Fighting

10



### Die Umsetzung im Code

- Düse(n)-Layout

```
&DEVC ID = 'noz1',
      XYZ = 0.5,0.5,2.7,
      PROP_ID = 'nozzle',
      INITIAL_STATE = .TRUE.,
      ORIENTATION = 0.0,0.0,-1.0/
```

- Düse

```
&PROP ID = 'nozzle',
      PART_ID = 'water_droplets',
      K_FACTOR = 5,
      OPERATING_PRESSURE = 100,
      SPRAY_ANGLE = 60,75,
      OFFSET = 0.3 /
```

- Löschmittel

```
&PART ID = 'water_droplets',
      SPEC_ID = 'WATER VAPOR',
      DIAMETER = 400.0 /
```



### Auswahl Betriebsparameter

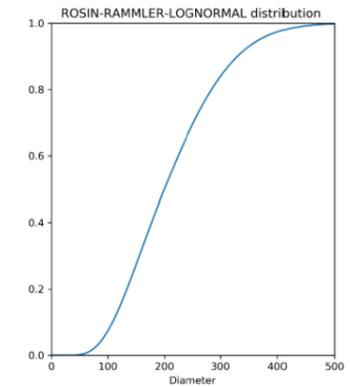
- Löschmittel: meistens Wasser (Zusatz von Additiven möglich), Aerosole
- Maximales Löschmittelreservoir
- Betriebsdruck: größer 35 bar (Hochdrucksysteme)
- Aktivierung
  - Automatisch (Glaßfass)
  - Detektion & Steuerung



### Beschreibung des Wassernebels

#### Tröpfchengröße:

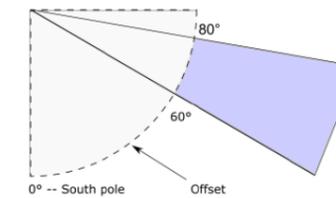
- Bestimmung z. B. mittels PDA oder Laser-Tomographie
- In FDS Verteilungsfunktion
  - Default: Kombination aus Log-Normal & Rosin-Rammler-Verteilung
  - Anpassen an experimentelle Werte möglich



### Modellierung der Düsen -- Spray angle



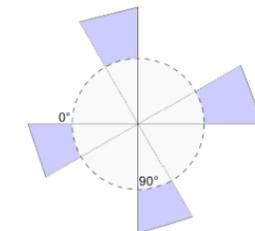
Latitude (60,80)



```
&PROP ID = 'nozzle',
      PART_ID = 'water_droplets',
      ...
      SPRAY_PATTERN_TABLE = 'TABLE1'/

&TABLE ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 0,30, 50,0.25/
&TABLE ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 90,120, 50,0.25/
&TABLE ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 180,210, 50,0.25/
&TABLE ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 270,300, 50,0.25/
```

Longitude (0,30), (90,120), (180,210),(270,300)



## Modellierung der Düsen -- Spray angle



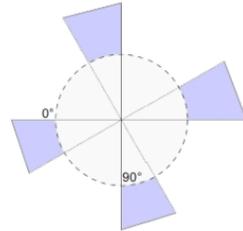
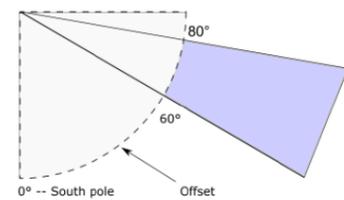
```

}PROP ID = 'nozzle',
PART_ID = 'water_droplets',
...
SPRAY_PATTERN_TABLE = 'TABLE1/'

&TBL ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 0,30, 50,0,25/
&TBL ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 90,120, 50,0,25/
&TBL ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 180,210, 50,0,25/
&TBL ID='TABLE1', TABLE_DATA = 60,80, 270,300, 50,0,25/

```

Latitude (60,80)

Longitude (0,30), (90,120),  
(180,210),(270,300)

The Smarter Way of Fire Fighting

14

## Weitere Einstellungsmöglichkeiten

- Viele Einstellungen in FDS haben analoge Entsprechungen
- Es gibt aber auch „rein numerische“ Parameter
- Visualisierung & Berechnungsdauer
  - PARTICLES\_PER\_SECOND
  - SAMPLING\_FACTOR
- Anpassung an („offensichtliche“) Probleme
  - OFFSET
  - VELOCITY\_COMPONENT
  - VELOCITY\_PATCH

The Smarter Way of Fire Fighting

15

## Wirkung auf der Oberfläche des Brennstoffs

- Wasser verteilt sich auf Oberflächen (wird in FDS modelliert)
- Wasser beeinflusst die Pyrolyserate von Brennstoffen
- Berücksichtigung in FDS durch E\_COEFFICIENT:
  - Reduziert die lokale HRR in Abhängigkeit der Wassermenge
  - Muss experimentell bestimmt werden (schwierig)

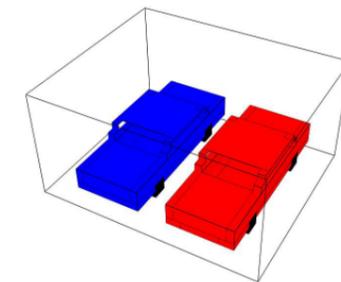


The Smarter Way of Fire Fighting

16

## Brandausbreitung

- Wasserdampf beeinflusst die Brandausbreitung
- Ist die Vorgabe einer zeitabhängigen HRR dann sinnvoll?
- Im FDS User Guide werden zwei Möglichkeiten:
  - Ignition Temperature
  - Arrhenius Ansatz / Gleichung



The Smarter Way of Fire Fighting

17

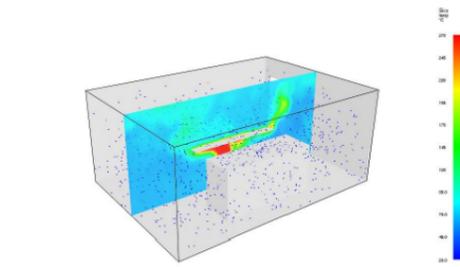


**Validierung**

FDS Validation Guide enthält „CG/HAI Water Mist Suppression Tests“

Versuche der US Küstenwache

- Mit mehreren Düsen
- Von unterschiedlichen Herstellern



FOGTEC-Düse 500 kW Brand nach FDS Validation Guide

Ziel: Validierung von aktuellen Düsen in den Brandversuche zu PKW-Bränden



**Da sind noch ein paar Fragen offen...**

Problem / Fragestellung	Überlegungen & Lösungsansätze
Hohe Geschwindigkeiten	CFL_Particle (aber kleiner Zeitschritt erforderlich)
Auswirkungen von Gitterweite und Parallelisierung	
Ausfall von verdunstetem Wasser	z. Z. nicht implementiert
Tröpfchenverteilung realistisch?	Anpassungen in der Modellierung der Düsen
Zusammenspiel mit mechanischer Ventilation	Untersuchungen von „Kalt“-Versuchen
Brandausbreitung & Eindämmung	Bestimmung E_COEFFICIENT Anwendung Arrhenius in Large Scale Geometriedifferenzen (gitterbedingt)
Gegenseitige Beeinflussung	
Einfluss auf Umgebungsgase	Auswaschen von Gasen
<b>Anwendungsbereiche</b>	<b>Reduzierung / Unterstützung von Brandversuchen</b>



**Vielen Dank!**

Als umfassende Kontakt- und Kooperationsplattform für alle deutschsprachigen Anwender des Fire Dynamics Simulators bietet die FDS Usergroup die Möglichkeit zum intensiven Austausch von Informationen, Anregungen und Hilfestellungen rund um das Programm FDS. Interessierte FDS-Nutzer können sich unverbindlich und kostenlos in der FDS Usergroup registrieren und von der Zusammenarbeit mit anderen Mitgliedern profitieren. Auf jährlich organisierten Workshops können persönliche Netzwerke gestärkt und Erfahrungen untereinander ausgetauscht werden.

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 User-group ist es, ein umfassendes Kontakt- und Kooperationsnetzwerk aufzubauen, das den Austausch von Informationen und Erfahrungen sowie Anregungen und Unterstützung rund um das Programm FDS ermöglicht. Das Online-Forum, das den registrierten Mitgliedern zur Verfügung steht, bietet zudem die Möglichkeit, konkrete Anwenderprobleme direkt und zeitnah zu diskutieren und gemeinsam zu lösen.

Dr. Susanne Kilian  
Initiatorin der FDS Usergroup

hhpberlin 

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

ISSN 2191-463X  
12. Tagungsband  
FDS Usergroup  
Jahrgang 2018