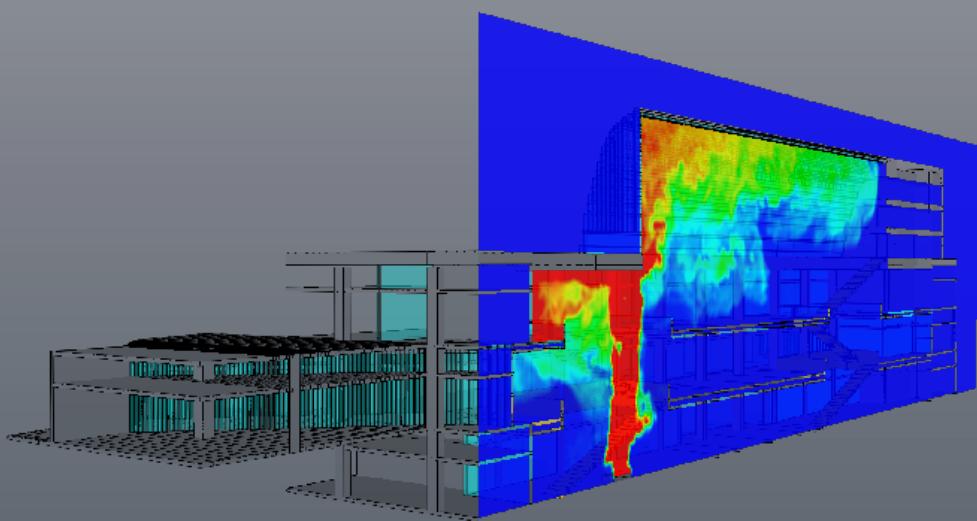


19. ANWENDERTREFFEN DER FDS USERGROUP

TAGUNGSBAND **ZUSAMMENSTELLUNG DER VORTRÄGE**

Datum:
9. - 10.10.2025

Ort:
Berlin + Microsoft-Teams
Konferenz



INHALT**Vorträge 9.10.2025**

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen - Potenziale vorhandener General-Purpose- und Domain-Specific AI-Tools Lilli Roth-Schuler	3
Vergleich von Pyrolysemodellen anhand von Realbrandversuchen Dr. Gerhard Murtinger	17
KI-basierte Ansätze für die Brandmodellierung Lukas Arnold	41
Modellierung der Brand- und Rauchausbreitung durch Türen Robert Westphal	60
Leistungsbezogene Nachweisführung - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade Nicolas Hauke	72

INHALT**Vorträge 10.10. 2025**

Investigating fire spread in large compartments with exposed wood surfaces using a scaling-based pyrolysis model in FDS Bjarne Husted	86
The Use of FDS in Spanish Fire Safety Engineering: Applications and Challenges Sergio Sanz	99
Quantifizierung der Ruß- und Schadstofffreisetzung bei Brandsimulationen - Entwurf eines geänderten Konzepts zur Ermittlung der Anhaltswerte der Rauchausbeuten Manuel Osburg	110
Ein kurzer Beitrag zur Arrheniusgleichung Dr. Gerhard Murtinger	137
Tunnel-Entrauchung: Einfluss der natürlichen Längsströmung auf die Entrauchungsstrategie Frederik Buhk	155
Werkzeuge zur Datenauswertung - der fdsreader Tristan Hehnen	164
Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells Felix Armbrust	165

Lilli Roth-Schuler**Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen – Potenziale vorhandener General-Purpose- und Domain-Specific AI-Tools****Abstract:**

Der Vortrag beleuchtet den aktuellen praktischen Nutzen von K Systemen im Alltag des Brandschutzingenieurwesens. Im Fokus stehen dabei nicht zukünftige Speziallösungen oder kostspielige, unternehmensspezifisch trainierte Modelle, sondern bereits heute frei oder kostengünstig verfügbaren Werkzeuge aus den Bereichen der Generol-Purpose- und Domoin-Specific AI-Tools.

Durch Large Language Models (LLMs) wie ChatGPT oder domänenspezifische Systeme wie NotebookLM lassen sich reproduzierbare, qualitativ hochwertige Ergebnisse erzeugen - vorausgesetzt, die Tools werden richtig eingesetzt.

Ziel des Vortrags ist es, anhand konkreter Anwendungsbeispiele aus dem Arbeitsalltag aufzuzeigen, wie mit minimalem Aufwand und ohne Programmierkenntnisse produktive Mehrwerte entstehen können. Exemplarisch vorgestellt werden unter anderem:

- die automatisierte Nachbearbeitung und Umstrukturierung von FDS-Slices mittels ChatGPT
- die gezielte Auswertung von Fachliteratur am Beispiel der FDS-Usergroup-Tagungsbönden mit NotebookLM zur quellenbasierten Recherche
- KI-gestützte Literaturrecherche zu komplexen Fragestellungen mit Elicit
- Programmierung von Pythonskripten für das Pre- und Post-Prozessing, z. B.: die Automatisierung der Erstellung von DEVC und Datenauswertung mit chatGPT

Abschließend werden mit Fokus auf Datenverantwortung und Promptgestaltung praxisnahe Dos & Don'ts zur Nutzung von KI im ingenieurtechnischen Kontext thematisiert. Dabei werden Empfehlungen zur Verwendung KI-generierter Inhalte gegeben, wobei auch typische Fallstricke wie etwa die inkonsistente Verwendung genormter Begriffe berücksichtigt werden.



Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Einleitung

- Wo ist der Einsatz von einfachen KI-Tools im Arbeitsalltag sinnvoll?
- Wo ist der Einsatz nicht sinnvoll?
- Was sollte man dabei beachten?



- ✓ Routineaufgaben beschleunigen
- ✓ Quellenarbeit
- ✓ Literatur finden
- ✓ Unterstützung Python-Auswerteskripte zu erstellen



>NotebookLM





09.10.2025

3

Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzgenieurwesen



09.10.2025

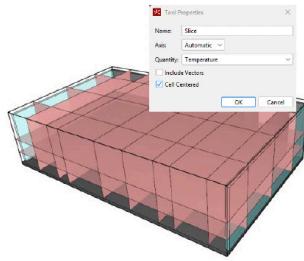
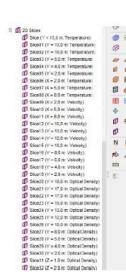
4

Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzgenieurwesen

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele - Nomenklatur von Slices mit ChatGPT

1. Slices in PyroSim erstellen



2. ChatGPT beauftragen eine ID zu vergeben



3. Ergebnis in PyroSim kopieren

Name	X/Z Plane	Plane Value	Geo Plane Quantity
TM_C_0.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_1.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_1.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_2.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_2.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_3.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_3.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_4.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_4.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_5.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_5.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_6.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_6.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_7.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_7.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_8.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_8.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_9.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_9.5m	V	10.0m Temperature	
TM_C_10.0m	V	10.0m Temperature	
TM_C_10.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_11.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_11.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_12.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_12.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_13.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_13.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_14.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_14.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_15.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_15.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_16.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_16.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_17.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_17.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_18.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_18.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_19.0m	V	10.0m Velocity	
TM_C_19.5m	V	10.0m Velocity	
TM_C_20.0m	V	10.0m Velocity	

09.10.2025

5

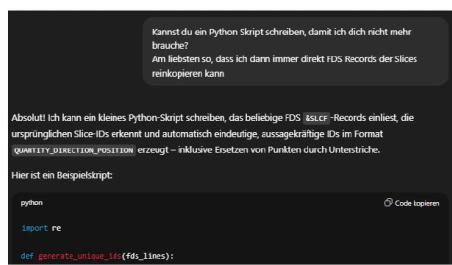
Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele - Nomenklatur von Slices mit ChatGPT

5. Python Skript erstellen lassen



6. Nicht mehr auf ChatGPT angewiesen sein

```

if __name__ == "__main__":
    input_text = """
BSLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', CELL_CENTERED=True., ID='Slice', PBV=9.1/
BSLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=True., CELL_CENTERED=True., ID='Slice01', PBV=6.1/
BSLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL_CENTERED=True., ID='Slice02', PBV=2.5/
"""

    lines = input_text.splitlines()
    updated_lines = generate_unique_ids(lines)
    for l in updated_lines:
        print(l)

BSLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', CELL_CENTERED=True., ID='OD_Y_9.1_m', PBV=9.1/
BSLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=True., CELL_CENTERED=True., ID='VE_Y_6.1_m', PBV=6.1/
BSLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL_CENTERED=True., ID='TE_Y_2.5_m', PBV=2.5/

```

09.10.2025

6

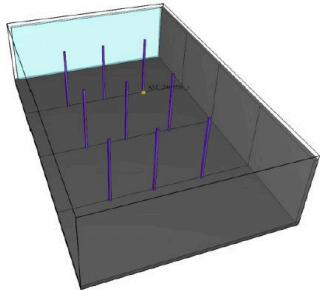
Both-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele – Erstellen von DEVC mit ChatGPT

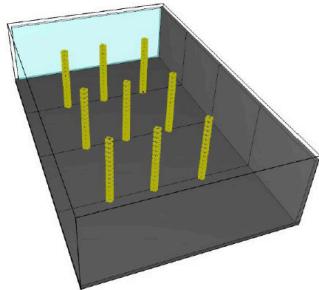
1. Beispiel Messpunkt in PyroSim erstellen



2. ChatGPT beauftragen Messpunkte nach gewünschter Logik zu erstellen

```
Nachgedacht für 1m 6s
DEVC
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_3_75 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,3,75, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_3_58 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,3,58, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_3_25 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,3,25, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_1_58 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,1,58, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_2_75 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,2,75, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_2_58 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,2,58, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_2_25 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,2,25, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_1_50 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,1,50, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_1_25 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,1,25, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_1_08 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,1,08, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_0_58 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,0,58, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_R_0_25 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,15,0,25, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_E_1_75 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,40,1,75, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_E_1_58 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,40,1,58, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_E_1_25 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,40,1,25, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_E_1_08 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,40,1,08, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_E_0_75 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,40,0,75, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_E_0_58 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,40,0,58, II
DEVC ID=AST_Schaeze_81_E_0_25 , QANTITY="ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE", XYZ=2,85,8,40,0,25, II
```

3. Messpunkte (540 Stück) in PyroSim kopieren



09.10.2025

7

Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



Quellenarbeit - NotebookLM

09.10.2025 8 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

NotebookLM

- KI-Tool von Google zur Analyse von Dokumenten
- Arbeitet mit hochgeladenen Quellen → wenig Halluzinationen
- Zusammenfassen, vergleichen und erklären von Inhalten
- Antworten mit Quellennachweis und Verknüpfung zur Textstelle

The screenshot shows the NotebookLM application interface. At the top, there are tabs for 'Alle', 'Meine Notebooks' (which is selected), and 'Empfohlene Notebooks'. Below this is a toolbar with icons for search, filter, and settings ('Einstellungen'), and buttons for 'Neueste Projekte' and '+ Neu erstellen'. The main area is titled 'Meine Notebooks' and displays five cards representing different notebooks:

- Neues Notebook erstellen**: A card with a '+' icon.
- FDS/Smokeview User Guide +**: Card with a flame icon, created on 11.08.2025 with 7 sources.
- Wind Impacts on Urban Building Fire...**: Card with a building icon, created on 24.01.2026 with 18 sources.
- FDS Usergroup**: Card with a yellow heart icon, created on 29.04.2026 with 16 sources.
- Waiting Zones in Pedestrian Dynamic...**: Card with a person walking icon, created on 22.11.2024 with 5 sources.

At the bottom left of the interface, it says '09.10.2025' and '9 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen'. On the right side, there is a logo for 'brandwerk fse' featuring a stylized flame icon.

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele - Quellenarbeit

- Bei dem Erstellen von einer Simulation in FDS. Gibt es eine Regel, die ich an einer Meshgrenze bei dem Verhältnis der Zellgröße beachten muss?



The screenshot shows the same 'FDS/Smokeview User Guide +' notebook card as above, but with additional context. At the bottom left, it says '09.10.2025' and '10 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen'. On the right side, there is a logo for 'brandwerk fse' featuring a stylized flame icon.

FDS/Smokeview User Guide +

Quellen

- + Hinzufügen
- Entdecken
- All Quellen auswählen
- FDS_Technical_Reference_Guide.pdf
- FDS_User_Guide.pdf
- FDS_Validation_Guide.pdf
- FDS_Verification_Guide.pdf
- SMV_Technical_Reference_Guide.pdf
- SMV_User_Guide.pdf
- SMV_Verification_Guide.pdf

Chat

FDS/Smokeview User Guide +

7 Quellen

Die vorliegenden Dokumente sind technische und benutzerorientierte Handbücher für die gekoppelten Softwareprogramme Fire Dynamics Simulator (FDS) und Smokeview. Das FDS Technical Reference Guide beschreibt die mathematischen Modelle und numerischen Verfahren zur Simulation von brandfördernden Fluidströmungen, einschließlich Gleichungen für den Impulstransport, Turbulenzmodelle wie das Diorndorf-Modell, die Lösung der Poisson-Gleichung für den Druck und die Behandlung von Chemie, Partikeln und Vegetation. Die Benutzerhandbücher enthalten Informationen zur Verwendung der Software, den Entwicklern von NIST und UL Research Institutes sowie eine Haftungsausschlussklausel für die kompetente Nutzung. Insbesondere bietet Smokeview Funktionen zur Visualisierung der FDS-Ergebnisse, etwa durch 2D-Konturen, Vektor-Slices und die dreidimensionale Darstellung von Rauch und Feuer unter Verwendung der Strömungstransportgleichung. Die Verification and Validation Guides zeigen schließlich Testergebnisse und Vergleiche der FDS-Modelle mit analytischen Lösungen und realen Brandversuchen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Simulators zu belegen.

In Netz speichern

Video-Zusammenfassung Audio-Zusammenfassung Mindmap

Text eingeben... 7 Quellen Weitere primäre >

NotebookLM kann Fehler machen, überprüfen Sie daher die Antworten.

Studio

Freigeben Einstellungen

Audio-Zusammenfassung Videoübersicht

Mindmap Berichte

Karteikarten Quiz

FDS und Smokeview: Branddynamik-Simulation un... Überblick - 7 Quellen - Vor 56 Tagen

Notiz hinzufügen

09.10.2025 11 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

brandwerk fse

FDS/Smokeview User Guide +

Quellen

- + Hinzufügen
- Entdecken
- All Quellen auswählen
- FDS_Technical_Reference_Guide.pdf
- FDS_User_Guide.pdf
- FDS_Validation_Guide.pdf
- FDS_Verification_Guide.pdf
- SMV_Technical_Reference_Guide.pdf
- SMV_User_Guide.pdf
- SMV_Verification_Guide.pdf

Chat

Bei dem Erstellen von einer Simulation in FDS, gibt es eine Regel, die ich an einer Meshgrenze bei dem Verhältnis der Zellgröße beachten muss?

Bei der Erstellung einer Simulation in FDS, insbesondere beim Übergang zwischen verschiedenen numerischen Gittern (Meshes), müssen Sie bestimmte Regeln bezüglich des Verhältnisses der Zellgröße beachten.

Die Quellen weisen auf kritische Schwellenwerte für das Verhältnis der Zellgrößen an Meshgrenzen hin:

- Empfohlenes Maximalverhältnis (Vermeidung von Informationsverlust):**
 - Mesh-Verfeinerungsverhältnisse von mehr als 4:1 sollten nach Möglichkeit vermieden werden [1](#).
 - Eine Änderung der Gittersauflösung von mehr als **dem Faktor 2 an einer Meshgrenze** wird als ein Faktor genannt, der zu Problemen oder numerischen Schwierigkeiten führen kann [2](#).
- Anforderung an die Ausrichtung (Integral Ratios):**
 - Die wichtigste Regel für die Mesh-Ausrichtung ist, dass **oder ganzzahlige Verhältnisse** (**Integral ratios**) aufwirken.
 - Dies bedeutet, dass Meshes so ausgerichtet sein müssen, dass feiner Zellen auf dem angrenzenden Mesh bedacht ist. Eine benachbarten Mesh sehen [4](#).
- Numerische Konsequenzen bei Verfeinerung:**
 - Wenn die Zellgrößen an der Meshgrenze nicht identisch dargestellt ($\delta \neq \epsilon$), muss der Informationsaustausch zwischen den Gittern korrigiert werden. An verfeinerten Meshgrenzen wird **First-order Upwind** benutzt.
 - Ein verfeinertes Mesh kann zu **unphysikalischen Fluktuationen** führen.

Text eingeben...

Wie beeinflussen turbulente Modelle und numerische S...

Studio

Freigeben Einstellungen

Audio-Zusammenfassung Videoübersicht

Mindmap Berichte

Karteikarten Quiz

FDS und Smokeview: Branddynamik-Simulation un... Überblick - 7 Quellen - Vor 56 Tagen

Notiz hinzufügen

09.10.2025 12 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

brandwerk fse

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele - Quellenarbeit

Welche Vorträge gibt es zu Realbrandversuchen und zugehörigen Simulationen von Bahnen. Nenne mir Autor + Jahr + Vortragstitel + kurze Zusammenfassung inkl. Wärmefreisetzungsrate



09.10.2025 13 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

brandwerk fse

Quellen

- FDS_UG_13Band.pdf
- FDS_UG_14Band (1).pdf
- FDS_UG_15Band (1).pdf
- FDS_UG_16Band (1).pdf
- FDS_UG_17Band.pdf
- FDS_UG_1Band.pdf
- FDS_UG_2Band.pdf
- FDS_UG_3Band.pdf
- FDS_UG_4Band.pdf
- FDS_UG_5Band.pdf
- FDS_UG_6Band.pdf
- FDS_UG_8Band.pdf
- FDS_UG_9Band.pdf

Chat

Aktualisieren

Welche Vorträge gibt es zu Realbrandversuchen und zugehörigen Simulationen von Bahnen. Nenne mir Autor + Jahr + Vortragstitel + kurze Zusammenfassung inkl. Wärmefreisetzungsrate

Studio

Audio-Zusammenfassung

Videoubersicht

Mindmap

Berichte

Karteikarten

Quiz

FDS in der Praxis: Einblicke in 15 Jahr... 16 Quellen - Vor 17 Std.

FDS Anwendertreffen:... 16 Quellen - Vor 17 Std.

FDS Usergroup 2008 Meeting... 16 Quellen - Vor 153 Tagen

Notiz hinzufügen

Text eingeben... 16 Quellen

NotebookLM kann Fehler machen, überprüfen Sie daher die Antworten.

09.10.2025 14 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

brandwerk fse

The screenshot shows a digital workspace interface. On the left, a 'Quellen' (Sources) panel lists 16 PDF files, each with a checkmark next to it. In the center, a 'Chat' section displays three messages from users Schröder, Fabian Bränström, and Patrick Lauer / Manuel, each with a timestamp and a short summary of their message. On the right, a 'Studio' area contains four cards: 'Audio-Zusammenfassung' (with a video camera icon), 'Videoubersicht' (with a video camera icon), 'Mindmap' (with a brain icon), 'Berichte' (with a document icon), 'Karteikarten' (with a card icon), and 'Quiz' (with a question mark icon). Below these cards are three preview cards for 'FDS in der Praxis: Einblicke in 15 Jahren...', 'FDS Anwendertreffen...', and 'FDS Usergroup 2008 Meeting...'. At the bottom of the central chat area, there is a text input field with placeholder text 'Was ist das Kernthema von FDS-EVAC?' and a blue 'Geschenken' button.

09.10.2025

15

Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



Literaturrecherche - Elicit

09.10.2025 16 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Elicit

- Literatur finden
- Texte zusammenfassen
- Inhalte vergleichen
- Überblick schaffen
- Starke Limitierung der Gratisversion

The screenshot shows the Elicit platform interface. At the top, there are tabs for 'Recent', 'Library', and 'Alerts'. Below the tabs is a search bar with placeholder text 'Ask a research question to generate a structured research report...'. Underneath the search bar are several buttons: 'QSR', 'Upload and extract', and 'Chat with papers'. At the bottom of the interface, there is a 'Recent' section.

The screenshot shows a presentation slide with the title 'Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen'. The slide includes the date '09.10.2025', page number '17', and the author 'Roth-Schuler'. In the top right corner, there is a logo for 'brandwerk fse' featuring a stylized flame icon.

The screenshot shows the Elicit platform interface with a search results table for 'Investigating Failure of Laminated Safety Glass in High Temperatures'. The table has columns for 'Sort: Most relevant' and 'Search table'. The results include several entries such as 'Response of Coated Laminated Glass Panels Subjected to Combined Blast and Temperature Loadings', 'Behaviour of Different Glass Elements subjected to Elevated Temperatures - State of the Art', 'Experimental and Numerical Studies on the Failure of Curtain Wall Double Glazed for Radiation Effect', 'Failure Strengths of Laminated Glass', and 'Behaviour of Monolithic and Layered Glass Elements Subjected to Elevated Temperatures - State of the Art'. On the right side of the interface, there is a sidebar titled 'Papers' with sections for 'Choose sources for screening' and 'Research question'. The 'Research question' section contains the text: 'I am looking for sources where the failure of multiple glazing such as laminated safety glass in the event of fire or other high temperatures has been investigated. I am interested in experimental data.' At the bottom right, there is a button 'Upgrade to Pro to edit this step'.

Experimental research comprising ten studies examined fire failure of various glazing systems including laminated safety glass and double glazing, providing detailed data on failure temperatures, timing, and heat flux thresholds under different fire test conditions.

ABSTRACT

Ten experimental studies addressed the fire-induced failure of multiple glazing systems, including laminated safety glass, double glazing, and tempered or toughened configurations.* In compartment fire pool fire, and radiant heat tests, critical failure temperatures ranged from approximately 550°C to 800°C.* For example, one study recorded breakage of toughened glass between 600°C and 800°C, while another found that laminated glass reached 617°C within 3 minutes. In double-pane assemblies, failure occurred 4–9.5 minutes after flashover, with plain glass failing at heat fluxes >20 kW/m² and tempered glass at >45 kW/m², corresponding to heat loads at failure of roughly 2.5–10 and 9–17.5 MJ/m², respectively.* Experiments using laminated glass with varied interlayers showed crack initiation between 30 and 108 seconds and ignition between 130 and 570 seconds, with one report noting a peak interlayer heat release rate of 313.5 kW/m² and marked differences in smoke production across interlayer types.* Several investigations noted that tempered and laminated configurations maintain structural integrity longer than annealed glass and that pane orientation influences performance.*

METHODS

We analyzed 10 sources from an initial pool of 50, using 7 screening criteria. Each paper was reviewed for 6 key aspects that mattered most to the research question. More on methods

RESULTS

Characteristics of Included Studies

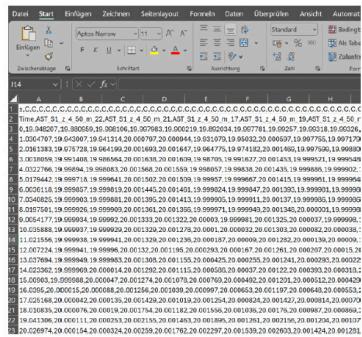
09.10.2025 19 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

brandwerk fse



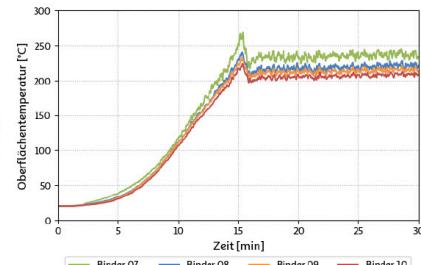
Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele - Auswerteskripte - Einstiegsbeispiele



 Claude

... erstelle mir eine Python Funktion, mit der ich die Messpunkte plotten kann ...

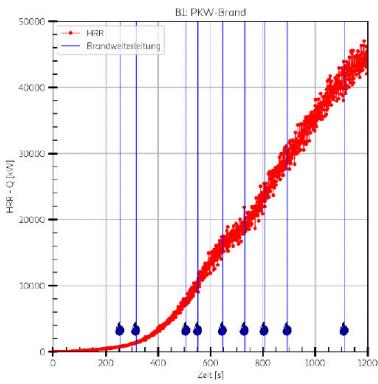


09.10.2025 21 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



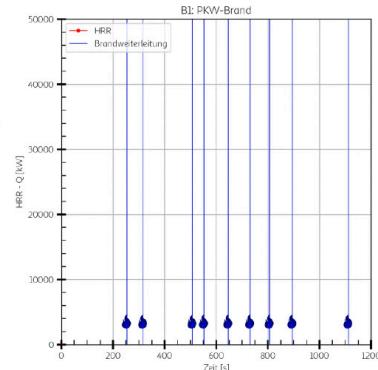
Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele - Auswerteskripte - Erweitern von Python-Skripten



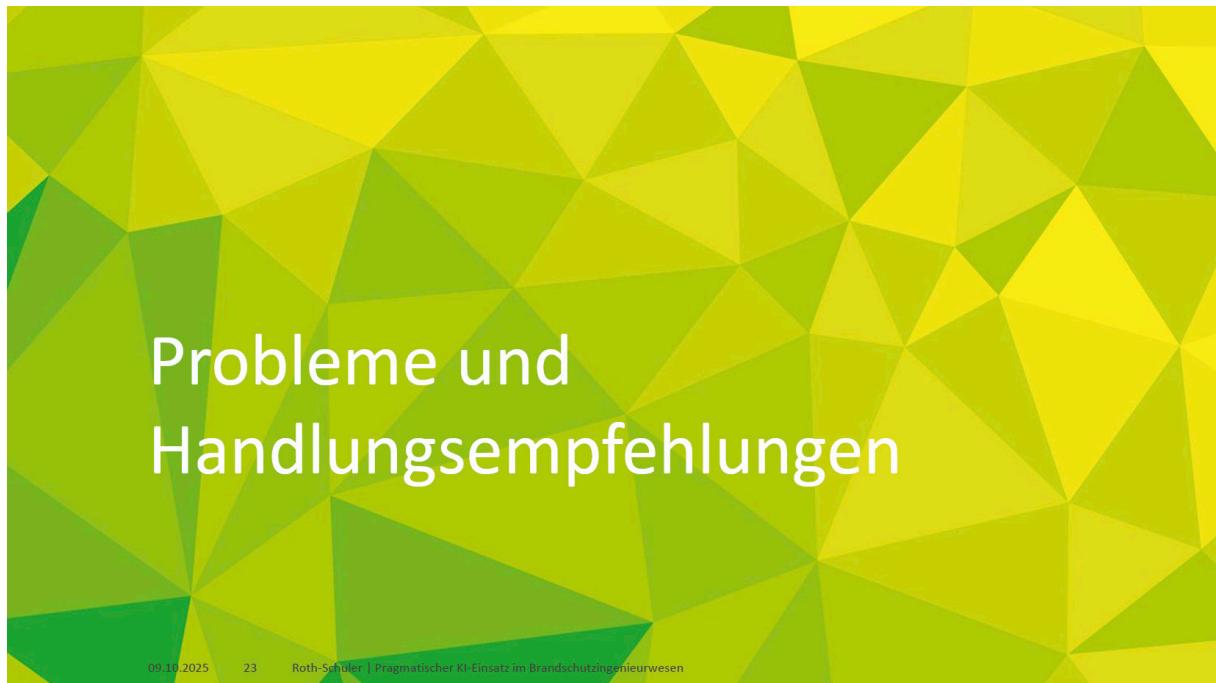
ChatGPT

Nehme meine Python Funktion, die ein Bild erzeugt, und erweitere den Code, sodass eine Animation erzeugt wird...



09.10.2025 22 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen





Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Probleme und Handlungsempfehlungen

- Datenschutz
 - Umweltbelastung durch KI
 - Cognitive Offloading und Verlust von Fähigkeiten vs. Perfomance Steigerung
 - Halluzinationen von KI
 - Prof. Friedrich Feuer hat 2025 den Nobelpreis für Physik gewonnen
 - Pseudo Erklärungen
 - „Mit mehr Öffnungen zur Rauchableitung steigt der Druck im Brandraum“
 - Falsche Begriffe:
 - Begriffe wie Evakuierung und Treppenhaus werden irrtümlich verwendet
- Grenzen von LLM kennen. Fakten statt komplexer Herleitungen eines unbekannten Problems erfragen
 - Prompt Gestaltung:
 - 1. Sei präzise und konkret
 - 2. Kontext liefern
 - 3. Format vorgeben
 - 4. Rolle oder Stil angeben
 - 5. Schrittweise Anweisung („Chain-of-Thought“)
 - 6. Quellen- oder Normenbezug
 - 7. Prüfen und Feedback einbauen
 - Mithilfe der eigenen fundierten Grundkenntnisse Ergebnisse kritisch prüfen



**brandwerk
fse**

Die Spezialisten

flexibler, fokussierter, besser

brandwerk fse

ein Geschäftsfeld der
brandwerk traffic GmbH
Veronikastraße 32
45131 Essen

0201 / 95 99 75 - 00
0201 / 95 99 75 - 11

mail@brandwerk.team
www.brandwerk.expert

09.10.2025

Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



Dr. Gerhard Murtinger**Vergleich von Pyrolysemodellen anhand von Realbrandversuchen****Abstract:**

Eine realitätsnahe Modellierung des Brandverhaltens der Materialien stellt eine große Herausforderung bei der Simulation einer Brandausbreitung (flame spread modeling) dar. Der entscheidende physikalische Prozess dabei ist die sogenannte Pyrolyse. Unter Pyrolyse versteht man bekanntlich das Ausgasen von der Oberfläche eines Festkörpers infolge starker thermischer Einwirkung, eine Vorstufe zur eigentlichen Verbrennung. Ein Brandereignis besteht aus einer Vielzahl von chemischen und physikalischen Prozessen, von der turbulenten Strömung der heißen Gase über die verschiedenen Formen der Wärmeübertragung bis zu Pyrolyse und Verbrennung. Was die mathematische Modellierung betrifft, so ist die Pyrolyse wahrscheinlich der am schlechtesten verstandene dieser Prozesse. In der Literatur sind zwei Pyrolysemodelle bekannt: Simple und komplexe Pyrolyse. Beide Modelle sind in FDS implementiert. Während die komplexe Pyrolyse in der Praxis kaum angewendet wird, weil sie zu wenig validiert ist, kann die simple Pyrolyse gegenwärtig als die im Brandingenieurwesen gängige Pyrolyse-modellierung angesehen werden. Im Vortrag soll eine stark vereinfachte Form der komplexen Pyrolyse, die bei Siemens Mobility entwickelt wurde, vorgestellt und auf eine Reihe von ausgewählten Materialien des Schienenfahrzeugbaus angewendet werden. Darüber hinaus wird die Güte dieser komplexen Pyrolysemodellierung anhand von Realbrandversuchen überprüft und mit der simplen Pyrolysemodellierung verglichen.

$$\frac{\partial Y(x,t)}{\partial t} = -AY(x,t)e^{-\frac{E}{RT(x,y)}}$$



FDS | USERGROUP

19. Anwendertreffen, 9. – 10. Oktober 2025

Vergleich von Pyrolysemodellen anhand von Realbrandversuchen

Dr. Murtinger, SIEMENS Mobility Austria

SIEMENS

Intern

Bemessungsbrand Schienenfahrzeug

Simulation einer Brandausbreitung im Fahrgastraum und Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Wärmefreisetzungsraten des Brandes.

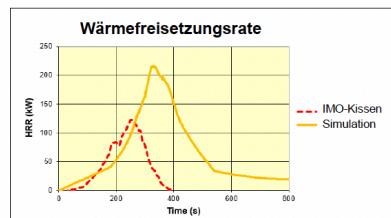
U-Bahn Wien, Lastenheft

Probleme:

- Nicht normiert, lediglich individuelle Kundenforderungen.
- Kundenforderungen oft unklar.
- Grenze für die maximale HRR ohne weitere Spezifikation.
- Vollbrand versus lokaler Brand.

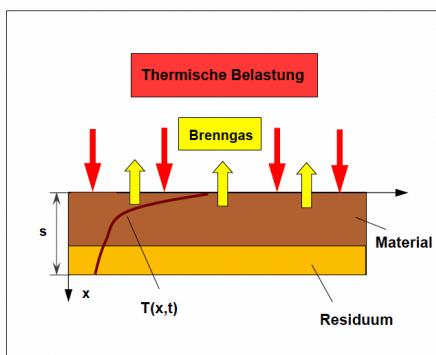
Der durch das Fahrzeug initiierte Bemessungsbrand darf einen Höchstwert von 350 kW bei einer auf das Brandrisiko bezogen konservativ gewählten Zündinitialpositionierung im Fahrzeug nicht überschreiten. Die Nachweisführung muss durch Simulation des initierenden Ereignisses durch IMO-Schaumstoffkissen erfolgen.

Projekt	Kriterium	Zündquelle
Metro Riyadh, 2013.	HRR < 30 MW (Vollbrand)	Nicht definiert
Metro Nürnberg, 2015	HRR < 250 kW (lokaler Brand)	TRStrab
U-Bahn Wien, 2019	HRR < 350 kW (lokaler Brand)	IMO-Kissen
HFX, 2019	HRR < 300 kW (lokaler Brand)	TRStab
Metro Ontario, 2021	HRR < 12 MW (Vollbrand)	Nicht definiert
Metro Sydney ¹ , 2022	HRR < 10 MW (Vollbrand)	Nicht definiert



¹ Nur Abschätzung nach Gary Duggan.

Pyrolysemodellierung



Pyrolysemodell schematisch

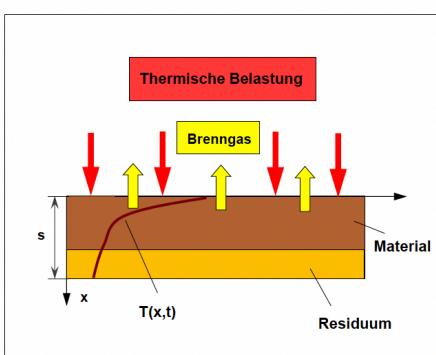
Herausforderung: Die Modellierung des Brandverhaltens der Materialien.

Entscheidender physikalischer Prozess : Pyrolyse.

- Pyrolyse: Zersetzungsvorgang der Materialien und „Ausgasen“ zufolge thermischer Belastung, die Vorstufe zur Verbrennung.
- Komplexes (mathematisches) Pyrolysemodell¹, aber nicht ausreichend validiert → zentrales Thema des F&E bei SMO.

¹Implementiert in FDS.

Pyrolysemodellierung



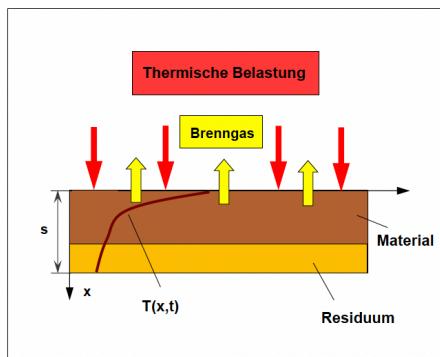
Pyrolysemodell schematisch

Herausforderung: Die Modellierung des Brandverhaltens der Materialien.

Entscheidender physikalischer Prozess : Pyrolyse.

- Pyrolyse: Zersetzungsvorgang der Materialien und „Ausgasen“ zufolge thermischer Belastung, die Vorstufe zur Verbrennung.
- Komplexes (mathematisches) Pyrolysemodell, aber nicht ausreichend validiert → zentrales Thema des F&E bei SMO.
- Zwei Fragen: 1. Komplexe Pyrolyse, wie geht das?
2. Komplexe Pyrolyse, genügt das?

Pyrolysemodellierung



Pyrolysemodell schematisch

Herausforderung: Die Modellierung des Brandverhaltens der Materialien.

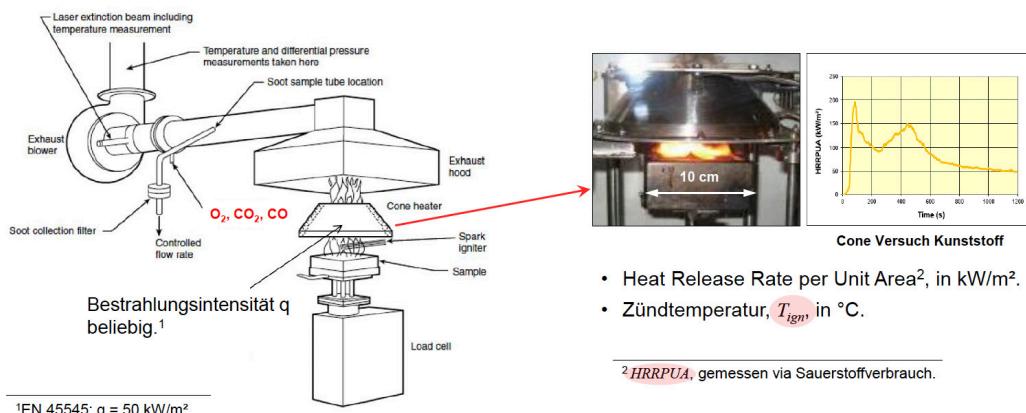
Entscheidender physikalischer Prozess : Pyrolyse.

- Pyrolyse: Zersetzungsprozess der Materialien und „Ausgasen“ zufolge thermischer Belastung, die Vorstufe zur Verbrennung.
- Komplexes (mathematisches) Pyrolysemodell, aber nicht ausreichend validiert → zentrales Thema des F&E bei SMO.
- Alternative: *Simple Pyrolyse*¹.
- Gängige Praxis für viele Brandschutzingenieure.
- Gängige Praxis in der Schienenfahrzeugindustrie und bei SMO.

¹Implementiert in FDS.

Brandversuche I, Kleinbrandversuche

Cone-Calorimeter Versuch, ISO 5660

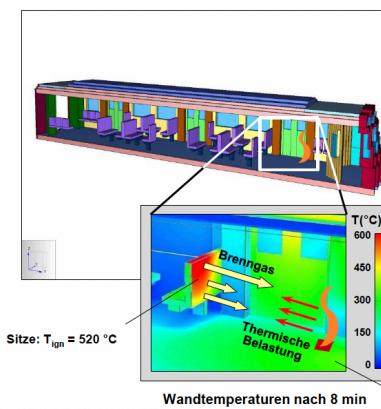


- Heat Release Rate per Unit Area², in kW/m^2 .
- Zündtemperatur, T_{ign} , in °C.

² HRRPUA, gemessen via Sauerstoffverbrauch.

Pyrolysemodellierung

Simple Pyrolyse

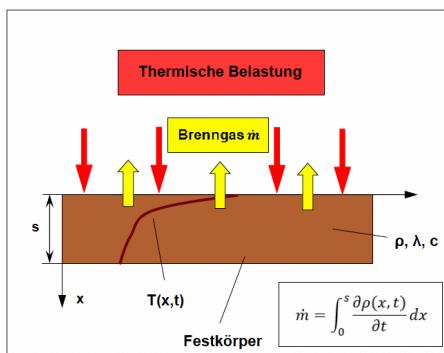


- Definiere die Heat of Combustion (HoC) des Brenngases.
- Für jedes Material: Definiere die $HRRPUA$ gemessen im Cone Versuch und definiere T_{ign} .
- Für jedes Material: Der freizusetzende Massenstrom \dot{m} an Brenngas in kg/m²s ist gegeben durch $\dot{m} = HRRPUA / HoC$.
- Für jedes Material: Wenn $T_{wand} = T_{ign}$ dann wird \dot{m} in den Luftraum freigesetzt und die Mischung von Brenngas mit Sauerstoff berechnet.
- Verbrennung: Simulation nach dem Prinzip „Gemischt ist verbrannt“¹.

¹ Annahme: Unendlich schnelle Chemie.

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse



Pyrolysemodell schematisch

Einfaches Material: Eine Reaktion, kein Rückstand

Wärmeleitgleichung

$$\rho(x,t)c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + q(x,t) \text{ und } R.B.$$

Arrheniusgleichung

$$\frac{\partial Y(x,t)}{\partial t} = -AY(x,t)e^{-E/RT(x,t)} = -r(x,t)$$

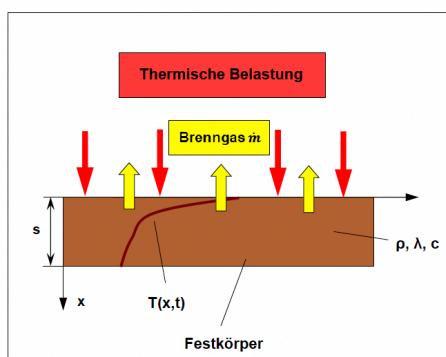
$$Y(x,t) = \rho(x,t)/\rho_0 \dots \text{normierte Dichte}, Y(x,0) = 1$$

$$R = 8.314 \text{ J/Kmol} \dots \text{Gaskonstante}$$

$$q(x,t) = -\rho_0 r(x,t) h_r \dots h_r \text{ Reaktionswärme}$$

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse



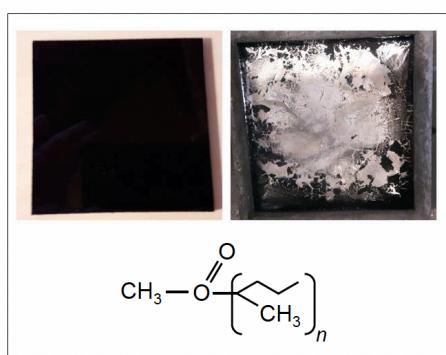
Einfaches Material: Eine Reaktion, kein Rückstand

6 Parameter zu bestimmen:

- | | |
|------------------------------------|--|
| ρ_0 Ausgangsdichte | Thermophysikalische Parameter,
Bestimmung aus Datenblatt bzw.
Wiegen einer Probe |
| λ Wärmeleitfähigkeit | |
| c Wärmekapazität | Reaktionsparameter,
Bestimmung aus TGA-Versuch |
| A Exponentiafaktor | |
| E Aktivierungsenergie | |
| h_r Reaktionswärme | Bestimmung aus Cone-Versuch |

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse



Einfaches Material: Eine Reaktion, kein Rückstand

6 Parameter zu bestimmen:

- | | |
|------------------------------------|--|
| ρ_0 Ausgangsdichte | Thermophysikalische Parameter,
Bestimmung aus Datenblatt bzw.
Wiegen einer Probe |
| λ Wärmeleitfähigkeit | |
| c Wärmekapazität | Reaktionsparameter,
Bestimmung aus TGA-Versuch |
| A Exponentiafaktor | |
| E Aktivierungsenergie | |
| h_r Reaktionswärme | Bestimmung aus Cone-Versuch |

Brandversuche I, Kleinbrandversuche

Komplexe Pyrolyse



TGA-Versuch

Einfaches Material: Eine Reaktion, *kein* Rückstand

Bestimmung von A und E :

- TGA-Versuch:**
- Sehr geringe Probengröße, ca. 1 mm³.
 - Wärmeleitung vernachlässigbar, daher $T = T(t)$.
 - Lineare Aufheizrate, daher $\dot{T} = \text{const.}$
 - Messgröße: Normierte Masse $Y(t)$.

Vereinfachte Arrheniusgleichung¹:

$$\frac{\partial Y(t)}{\partial t} = -AY(t)e^{-E/RT} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{Bestimmung von } A \text{ und } E \text{ analytisch}$$

$$Y(0) = 1$$

¹ Analytisch lösbar bis auf „Quadratur“.

Brandversuche I, Kleinbrandversuche

Komplexe Pyrolyse

Einfaches Material: Eine Reaktion, *kein* Rückstand

Typischer TGA-Versuch:

- Genau ein Wendepunkt
- $Y(t) \rightarrow 0$, für $t \rightarrow \infty$

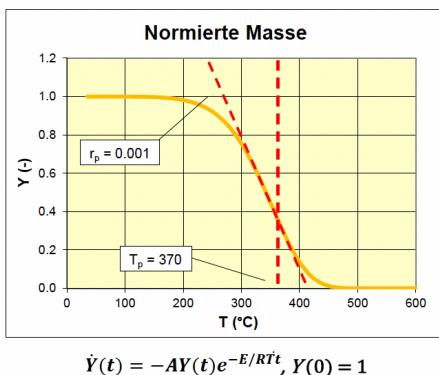
Formeln für A und E ¹:

$$E = er_p \frac{RT_p^2}{\dot{T}}, \quad A = er_p e^{E/RT_p}$$

T_p , Referenztemperatur

r_p , Referenzrate

\dot{T} , Aufheizrate

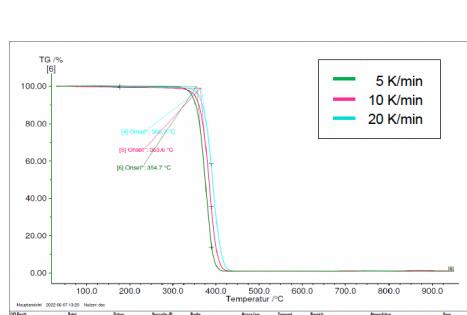


¹ Siehe FDS User Guide.

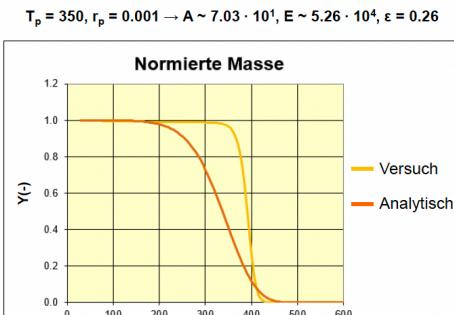
Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Bestimmung von A und E : Arrheniusgleichung in Excel integrieren, T_p und r_p variieren bis Fehler klein genug.



TGA-Versuche mit PMMA (TGM 2022).

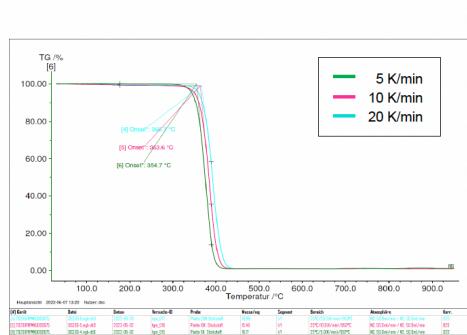


TGA-Versuch mit PMMA, $\dot{T} = 10$ K/min.

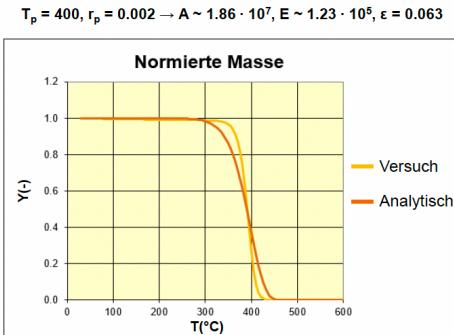
Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Bestimmung von A und E : Arrheniusgleichung in Excel integrieren, T_p und r_p variieren bis Fehler klein genug.



TGA-Versuche mit PMMA (TGM 2022).

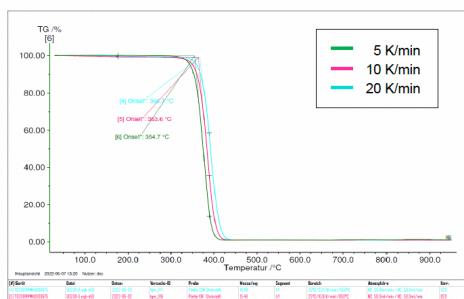


TGA-Versuch mit PMMA, $\dot{T} = 10$ K/min.

Pyrolysemodellierung

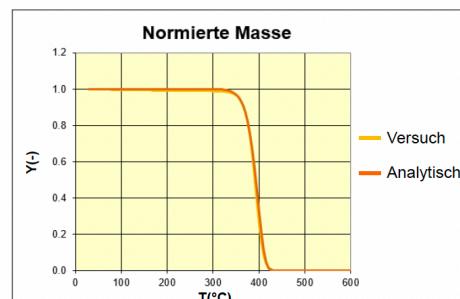
Komplexe Pyrolyse

Bestimmung von A und E : Arrheniusgleichung in Excel integrieren, T_p und r_p variieren bis Fehler klein genug.



TGA-Versuche mit PMMA (TGM 2022).

$$T_p = 400, r_p = 0.004 \rightarrow A \sim 1.27 \cdot 10^{17}, E \sim 2.46 \cdot 10^5, \epsilon = 0.017$$



TGA-Versuch mit PMMA, $\dot{T} = 10$ K/min.

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Thermophysikalische Parameter:

$$\rho_0 = 1318 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Wegen der Probe}$$

$$\lambda = 0.19 \text{ W/Km} \quad \left. \right\} \text{Aus Datenblatt}$$

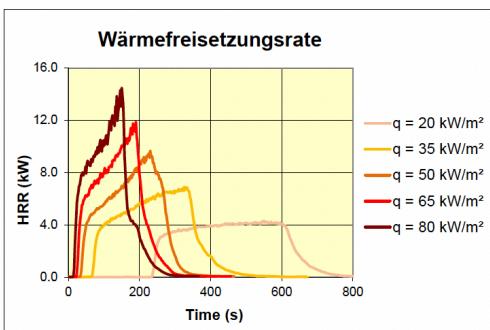
$$c = 1.5 \text{ kJ/kgK} \quad \left. \right\} \text{Aus Datenblatt}$$

Reaktionsparameter:

$$A = 1.3 \cdot 10^{17} \quad \left. \right\} \text{Aus TGA-Versuch}$$

$$E = 2.46 \cdot 10^5 \quad \left. \right\} \text{Aus TGA-Versuch}$$

Reaktionswärme h_r \rightarrow Aus Cone-Versuch



Cone-Versuche mit PMMA (TGM 2022).

Zusammenfassung

Zusammenfassung:

Aktueller Stand:

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

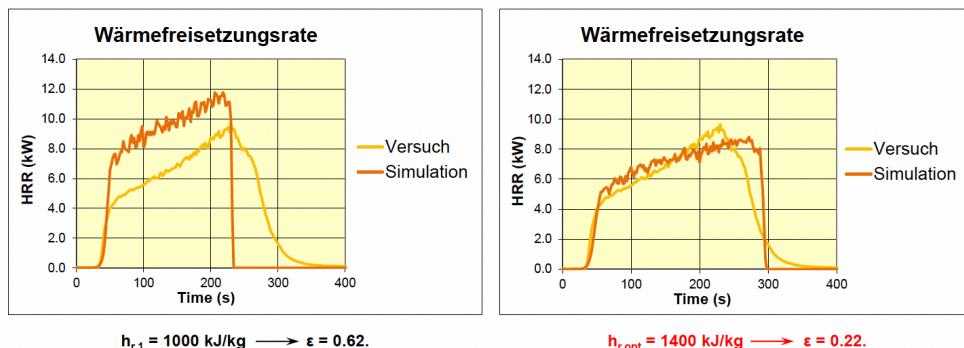
Ausblick:

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

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Bestimmung von h_r : Simulation des Cone-Versuches mit $q = 50 \text{ kW/m}^2$ und h_r variiert bis Fehler minimal.



Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

PMMA, einfaches Material: Eine Reaktion, kein Rückstand; 6 Parameter eindeutig bestimmt.



Probe nach Cone-Versuch

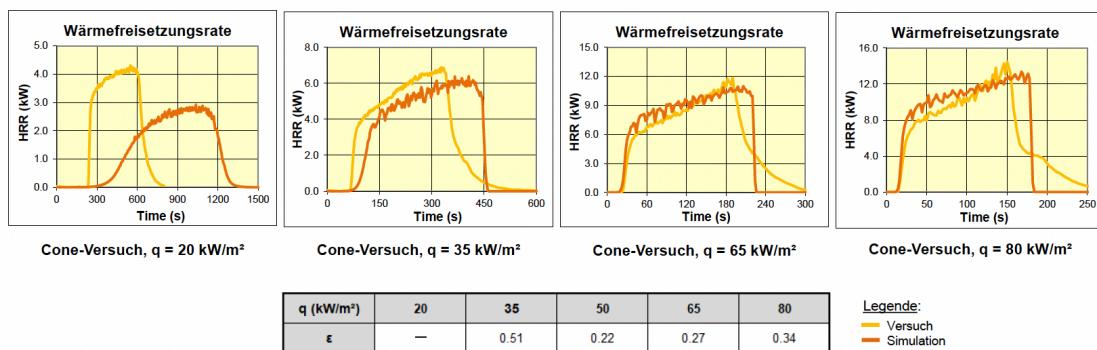
Parameter	Wert	Einheit	Beschreibung
ρ	1318	kg/m ³	Dichte
λ	0.19	W/Km	Wärmeleitfähigkeit
c	1.5	kJ/kgK	Wärmekapazität
A	$1.27 \cdot 10^{17}$	1/s	Reaktionsparameter
E	$2.46 \cdot 10^5$	J/mol	
H _r	1400	kJ/kg	Reaktionswärme
s	0.005	m	Dicke

Pyrolyseparameter für PMMA.

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

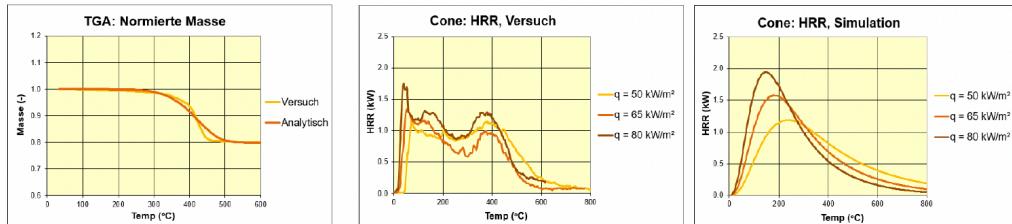
Simulation der Cone-Versuche für die restlichen Bestrahlungsstärken, $q = 20, 35, 65, 80 \text{ kW/m}^2$.



Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Halbeinfaches Material: Eine Reaktion, ein nicht reagierender Rückstand, z.B. GFK.



$$\begin{aligned} T_p &= 420, r_p = 0.0002 \\ A &= 2.2 \cdot 10^2, E = 6.51 \cdot 10^4, \varepsilon = 0.011 \\ NU_MATL &= 0.8 \end{aligned}$$

q (kW/m²)	50	65	80
ε	0.31	0.53	0.50

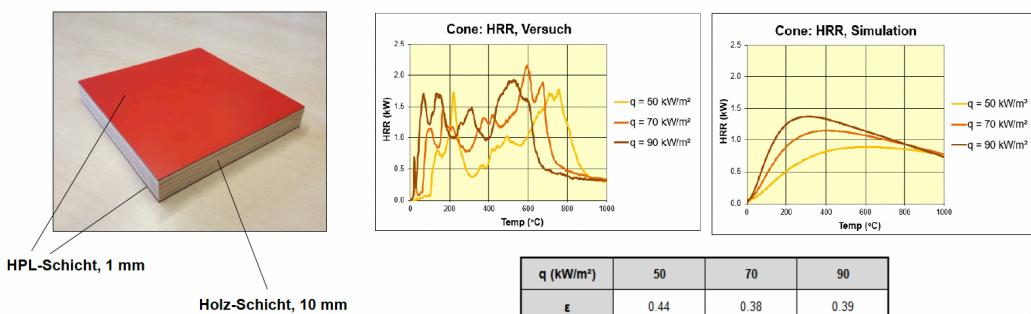
Cone-Versuche mit GFK, Fehler für die HRR

16 Parameter manuell bestimmt, i.A. **nicht eindeutig**.

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Komplexes Verbundmaterial: Schichten aus *halbeinfachen* Materialien, z.B. Holzsitz.



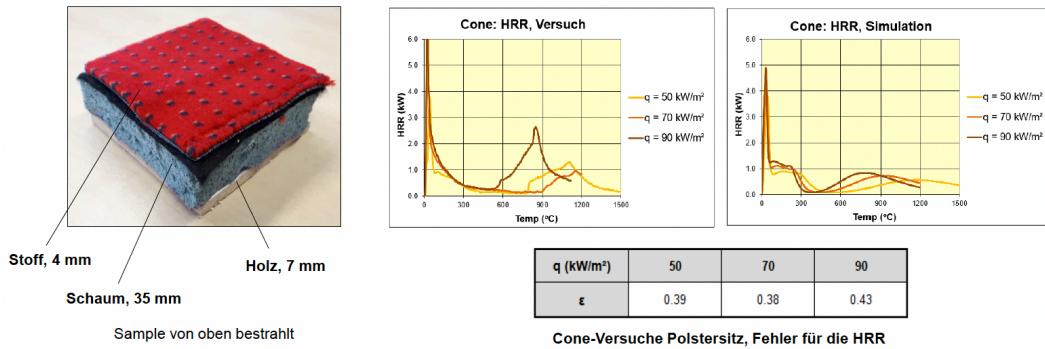
Cone-Versuche mit Holzsitz, Fehler für die HRR

22 Parameter manuell bestimmt, nicht eindeutig.

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

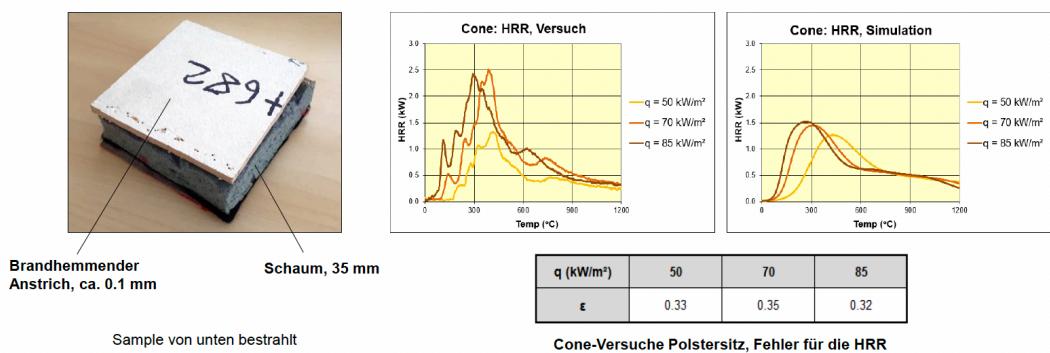
Komplexes Verbundmaterial: Schichten aus *halbeinfachen* Materialien, z.B. Polstersitz.



Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Komplexes Verbundmaterial: Schichten aus *halbeinfachen* Materialien, z.B. Polstersitz.



44 Parameter mit Optimierungssoftware bestimmt, nicht eindeutig.

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

Brandversuche mit Komponenten im genormten Brandraum (DIN EN 13823)

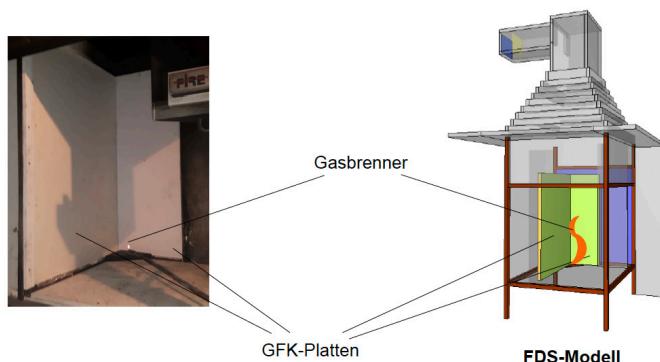


HRR via Sauerstoffverbrauch

Grenzwert für HRR: $HRR_{max} < 400 \text{ kW}$

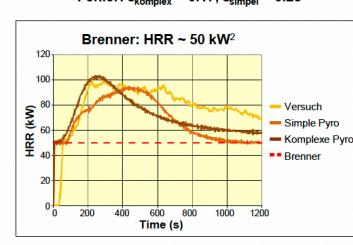
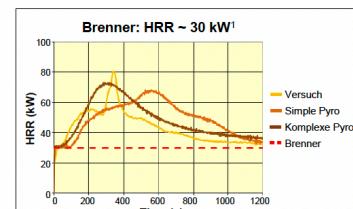
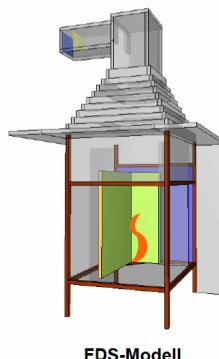
Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuche nach DIN EN 13823 mit zwei GFK-Platten



Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuche nach DIN EN 13823 mit zwei GFK-Platten

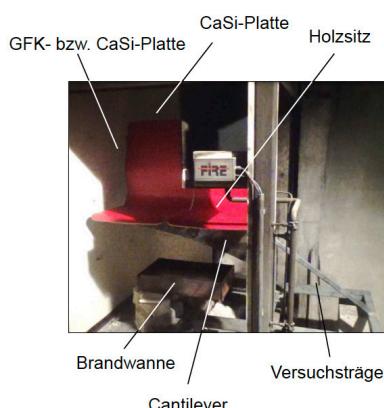


¹Ein Versuch, Daten des zweiten Versuches korrupt.

²Mittel aus zwei Versuchen.

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuche mit Doppelholzsitz, GFK-Platte, CaSi-Platten und Brandwanne



Zwei Varianten:

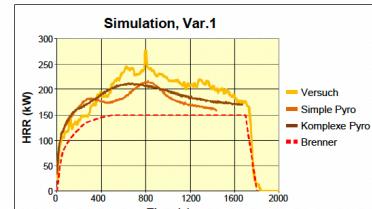
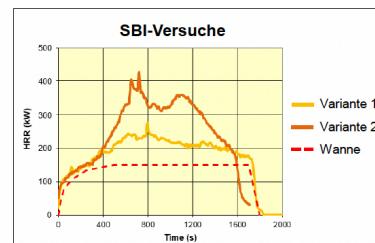
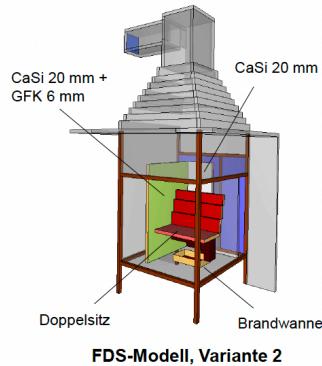
1. Nur CaSi-Platten 20 mm, keine GFK-Platte.
 2. GFK-Platte 6 mm mit CaSi-Platte verschraubt.
- Brandwanne¹: 30 cm x 50 cm, HRR $\sim 150 \text{ kW}$.



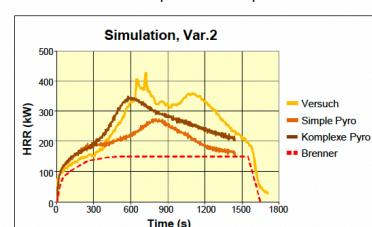
¹Gefüllt mit ca. 10 l Isopropanol

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuche mit Doppelholzsitz, GFK-Platte, CaSi-Platten und Brandwanne



Fehler: $\epsilon_{komplex} \sim 0.13$, $\epsilon_{simpel} \sim 0.17$

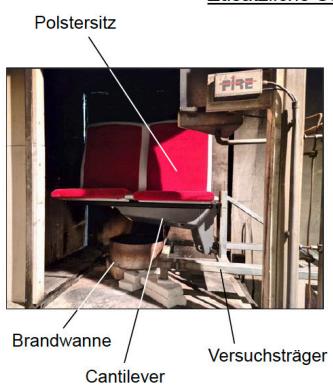


Fehler: $\epsilon_{komplex} \sim 0.19$, $\epsilon_{simpel} \sim 0.33$

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne¹

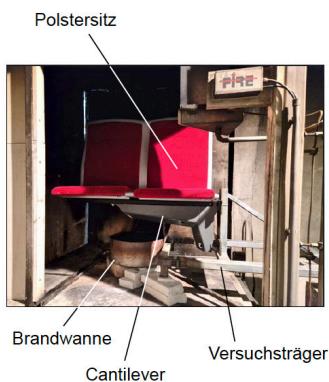
Zusätzliche Schwierigkeit: Abdeckung der Sitzlehnen aus 2 mm Aluminiumblech.
Brandverzögerung durch Abschmelzen des Aluminums.



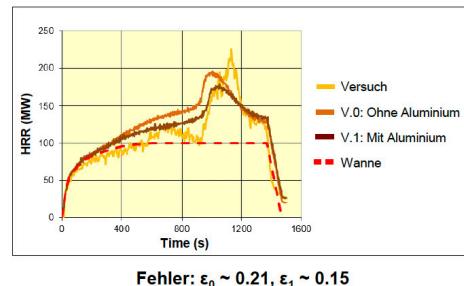
¹Wanne: Ø ~ 35 cm, gefüllt mit ca. 5 l Isopropanol, HRR ~ 100 kW.

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne

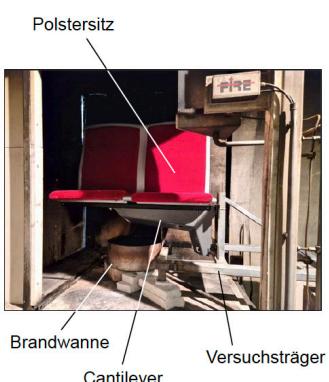


Simulation ohne Aluminium (V.0) und mit Aluminium (V.1).
Der Unterschied fällt nicht sehr ins Gewicht.



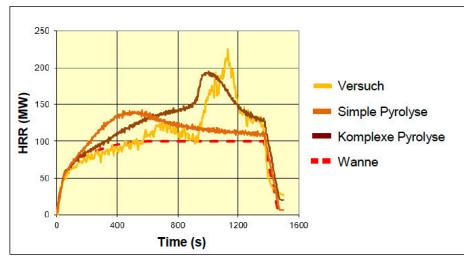
Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne



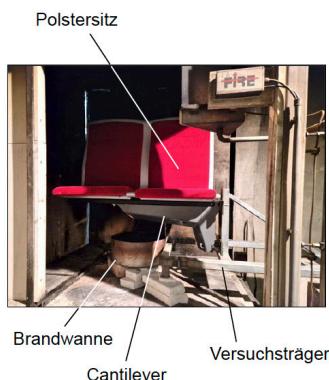
Simple versus komplexe Pyrolyse

Variante 1: Simulationen ohne Aluminium.



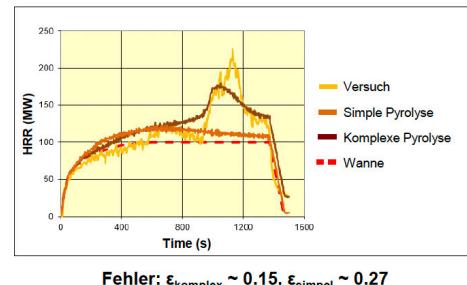
Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne



Simple versus komplexe Pyrolyse

Variante 2: Simulationen mit Aluminium.



Fehler: $\epsilon_{komplex} \sim 0.15, \epsilon_{simpel} \sim 0.27$

Brandversuche III, Großbrandversuche

Großbrandversuche bei MPA Dresden, 12. Oktober - 9. November 2021

Messinstitut: IFAB, Berlin



Versuchswagen, Werk Wien



Tunnel und Ventilator, MPA



Brandversuch

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$

- Brandwanne¹ platziert am Boden unter den Sitzen.
- Tunnel zur Sammlung der Rauchgase.



Tunnel mit großem Ventilator

¹Gefüllt mit ca. 40 l Isopropanol.

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$

- Türen auf einer Wagenseite offen.
- Brandausbreitung im gesamten Wagen.



Wagen, Ansicht von hinten



Wagen, Ansicht von vorne



Tunnel mit großem Ventilator

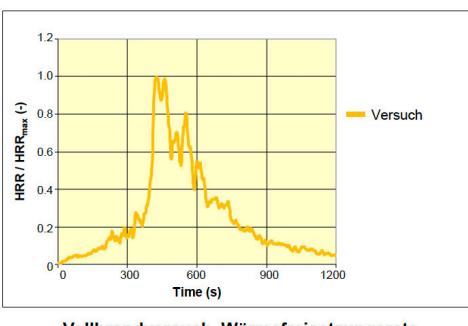
Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$ 

Wagen, Ansicht von hinten

- Türen auf einer Wagenseite offen.
- Brandausbreitung im gesamten Wagen.
- HRR_{\max} ein zweistelliger Megawattbetrag¹.



Wagen, Ansicht von vorne



Tunnel mit großem Ventilator

¹Ermittelt nach der Sauerstoffverbrauchsmethode.

Brandversuche III, Großbrandversuche

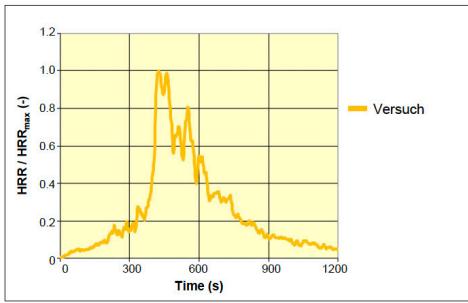
Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$ 

Wagen, Ansicht von hinten

Probleme bei der Simulation:

- Leuchtenabdeckung (Polykarbonat) abtropfend.
- Versagen der Fenster bei welcher Temperatur?
- Abdeckungen der Sitzlehnen (Aluminium) → Brandverzögerung¹.



Wagen, Ansicht von vorne



Tunnel mit großem Ventilator

¹Im Folgenden generell vernachlässigt, d.h. keine Brandverzögerung bei den Sitzlehnen.

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

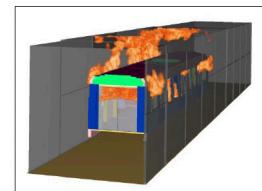
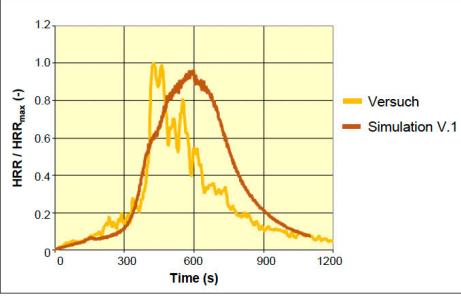
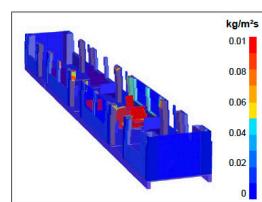
Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$ 

Wagen, Ansicht von hinten

A. Komplexe Pyrolyse.

Variante 1:

- Leuchtenabdeckung brennt voll mit.
- Versagen der Fenster (stückweise) bei 100°C .

Simulation, $t = 500 \text{ s}$. HRR (kW/m^3)Simulation, $t = 500 \text{ s}$. \dot{m} ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

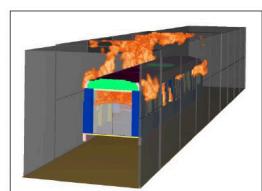
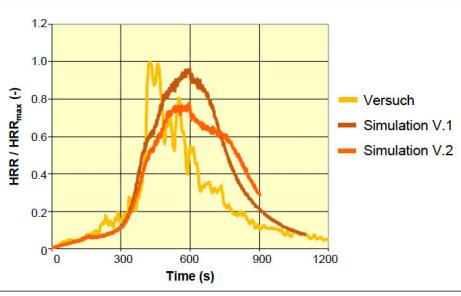
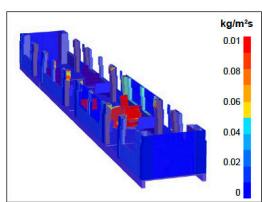
Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$ 

Wagen, Ansicht von hinten

A. Komplexe Pyrolyse.

Variante 2:

- Leuchtenabdeckung brennt gar nicht.
- Versagen der Fenster (stückweise) bei 100°C .

Simulation, $t = 500 \text{ s}$. HRR (kW/m^3)Simulation, $t = 500 \text{ s}$. \dot{m} ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

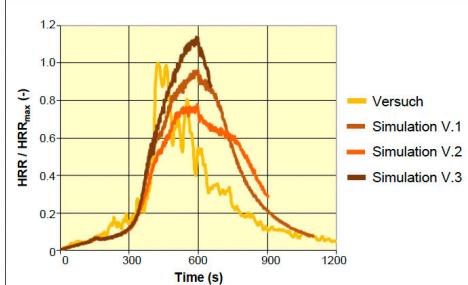
Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$ 

Wagen, Ansicht von hinten

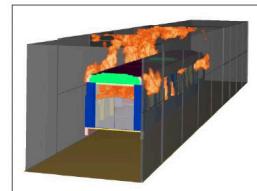
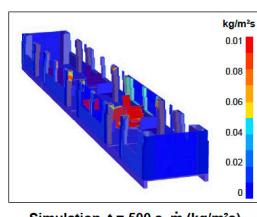
A. Komplexe Pyrolyse.

Varianten 3:

- Leuchtenabdeckung brennt voll mit.
- Versagen der Fenster (stückweise) bei 150°C .



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsraten

Simulation, $t = 500 \text{ s}$. HRR (kW/m^3)Simulation, $t = 500 \text{ s}$. \dot{m} ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

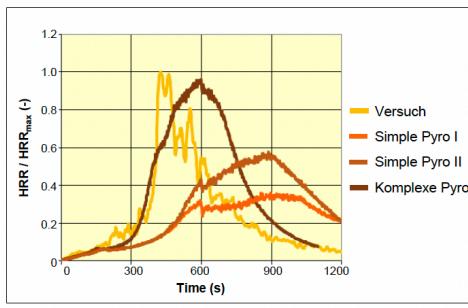
Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$ 

Wagen, Ansicht von hinten

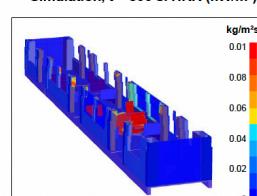
B. Simple versus komplexe Pyrolyse¹.

Varianten 1: Alle Materialien simpel

- Simple Pyrolyse I: Fensterversagen bei 100°C .
- Simple Pyrolyse II: Fensterversagen bei 300°C .



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsraten

Simulation, $t = 500 \text{ s}$. HRR (kW/m^3)Simulation, $t = 500 \text{ s}$. \dot{m} ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

¹Leuchtenabdeckung brennt immer voll mit.
Komplexe Pyrolyse: Fensterversagen bei 100°C .

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne

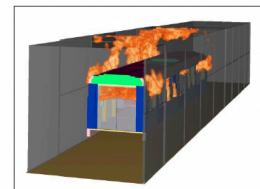
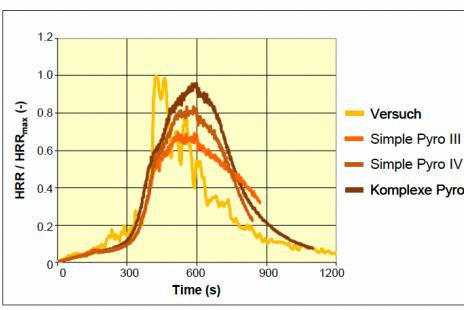


Wagen, Ansicht von hinten

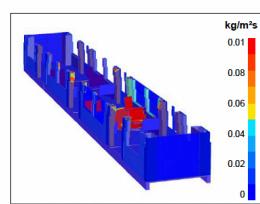
B. Simple versus komplexe Pyrolyse¹.

Variante 2: Nur ein Material simpel

- Simple Pyrolyse III: Nur SW-Verkleidung simpel.
- Simple Pyrolyse IV: Nur Bodenbelag simpel.



Simulation, t = 500 s. HRR (kW/m³)



Simulation, t = 500 s. ḡ (kg/m²s)

¹Für alle Szenarien: Leuchtenabdeckung brennt immer voll mit und Fensterversagen bei 100 °C.

Zusammenfassung



SW-Verkleidung (GFK)



Holzsitz (2 Materialien)



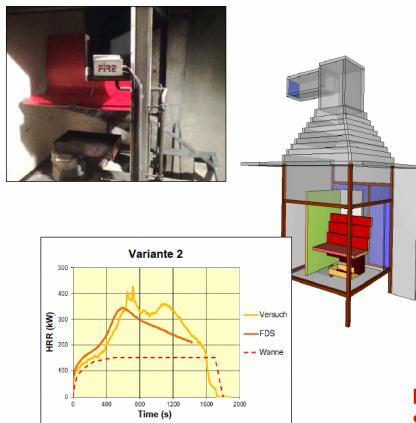
Polstersitz (4 Materialien)

Herausforderung: Die Modellierung des Brandverhaltens der Materialien.

Entscheidender physikalischer Prozess : Pyrolyse.

- Eine mögliche Vorgangsweise der komplexen Pyrolysemodellierung wurde erarbeitet.
- Komplexe Pyrolysemodelle für verschiedene Materialien des SFZ-Baus wurden entwickelt.

Zusammenfassung

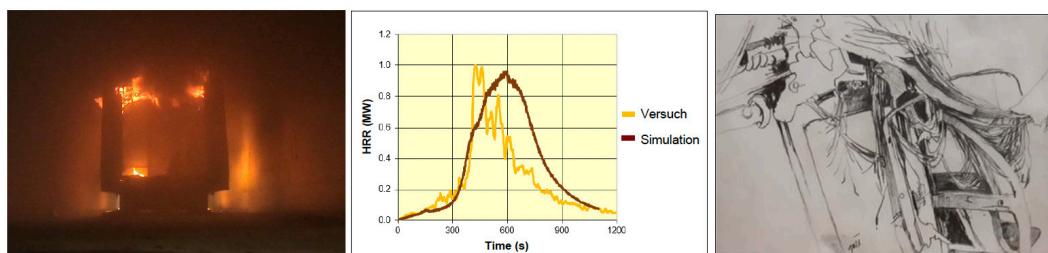


Herausforderung: Die Modellierung des Brandverhaltens der Materialien.

Entscheidender physikalischer Prozess : Pyrolyse.

- Eine mögliche Vorgangsweise der komplexen Pyrolysemodellierung wurde erarbeitet.
- Komplexe Pyrolysemodelle für verschiedene Materialien des SFZ-Baus wurden entwickelt.
- Ausgewählte Brandversuche mit Komponenten des SFZ-Baus wurden durchgeführt und mit entsprechenden Simulationen verglichen → überwiegend gute Übereinstimmung.

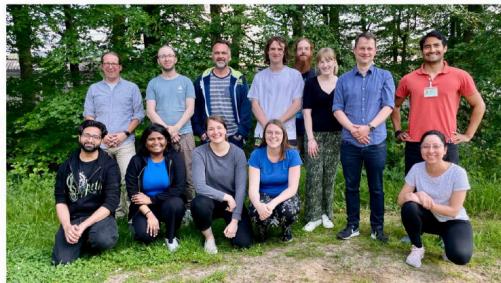
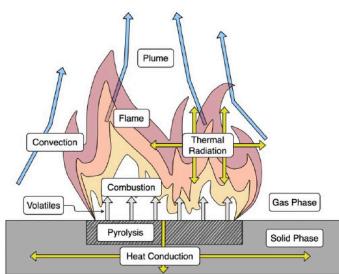
Eine realitätsnahe Pyrolysemodellierung ist ein wesentlicher Schlüssel für eine zuverlässige Brandsimulation.



Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Lukas Arnold**KI-basierte Ansätze für die Brandmodellierung****Abstract:**

In diesem Vortrag werden die neuesten Fortschritte bei der Anwendung von KI in zwei Bereichen der Brandschutzwissenschaft vorgestellt: Branddynamik in Räumen und Pyrolyse-Modellierung. Nach einer kurzen Einführung in die Grundkonzepte von KI-basierten verfahren, werden verschiedene Methoden zur Nutzung von KI erläutert. Insbesondere wird die Vorhersage von CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) betrachtet, um die Rechenkosten zu senken, ohne die wichtigsten Vorhersagefähigkeiten zu beeinträchtigen. Im Zusammenhang mit der Modellierung der Flammenausbreitung wird besonderes Augenmerk auf die Herausforderung der Materialparameter-Schätzung gelegt. Hierzu wird ein neuer Ansatz für die inverse Modellierung mit KI-Unterstützung vorgestellt. Dieser baut auf den Daten aus Cone Calorimeter Messungen und ermöglicht aus experimentellen Daten pyrolysebezogene Parameter abzuleiten. Diese Bemühungen zeigen das Potenzial von KI zur Unterstützung und Erweiterung traditioneller Modellierungsabläufe in der Brandschutzwissenschaft und bieten einen Weg zu effizienteren Werkzeugen in der Praxis.



AI in Fire Dynamics

Two Application Examples of AI in Fire Dynamics: Predictions of Fluid Dynamics and Material Parameters

09. October 2025 | Lukas Arnold



Computational
Civil Engineering



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL



JÜLICH
Forschungszentrum

FZJ + BUW



- Forschungszentrum Jülich (FZJ)
- Institute for Advanced Simulation
- Pedestrian and Fire Dynamics

- Bergische Universität Wuppertal (BUW)
- Chair for Computational Civil Engineering
- Teaching: Computer Science, Data Analysis, Fire Simulations



Computational
Civil Engineering



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL



JÜLICH
Forschungszentrum

Lukas Arnold



- 2001 – 2005: Physics Diploma, Uni Bochum
- 2005 – 2008: PhD theoretical Physics, Uni Bochum
- 2008 – 2012: Head of SimLab Plasma Physics, FZJ
- 2012 – 2018: Team Leader Fire Dynamics, FZJ
- Since 2018: Division Head Fire Dynamics, FZJ
- Since 2019: Professor for ,Computational Civil Engineering‘, BUW



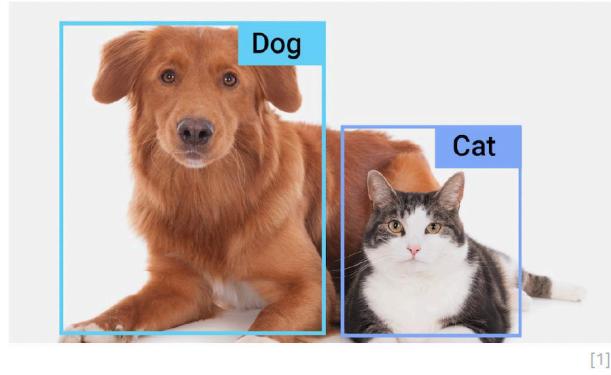
Research Topics



AI Fundamentals

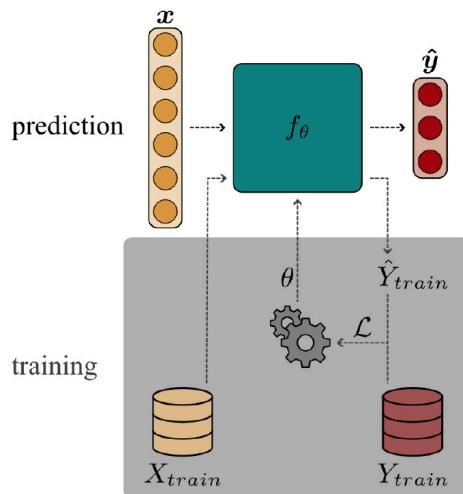
In general:

- Useful for problems without a mathematical formulation
 - E.g. no ‘dog vs. cat equation’
 - E.g. human languages
- Useful when a solution approach is not accessible
- Useful to approximate known solutions

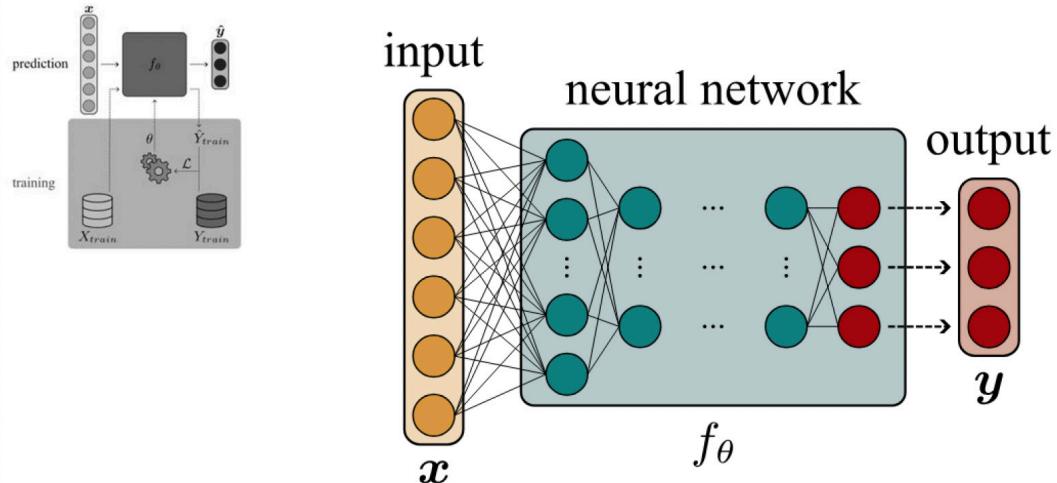


[1]

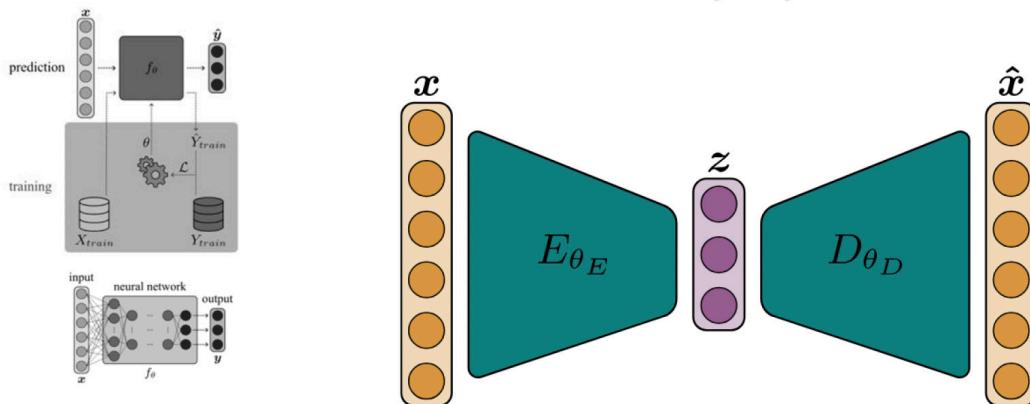
Basics on Neuronal Networks (Basics)



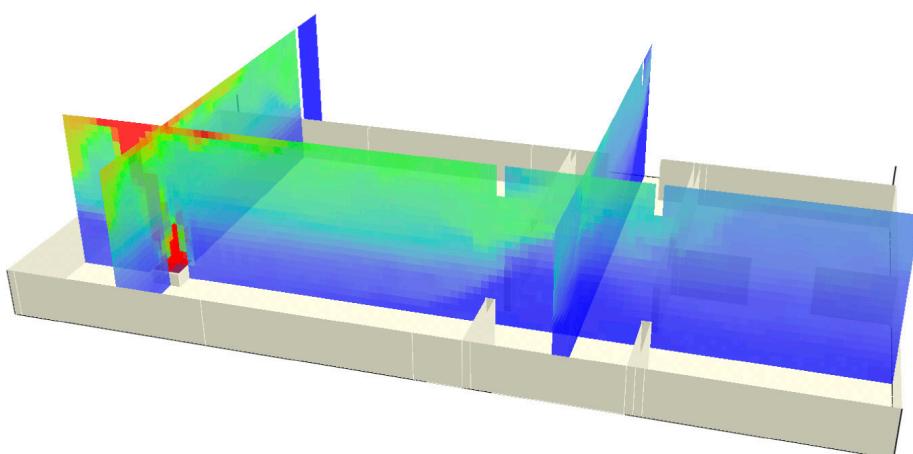
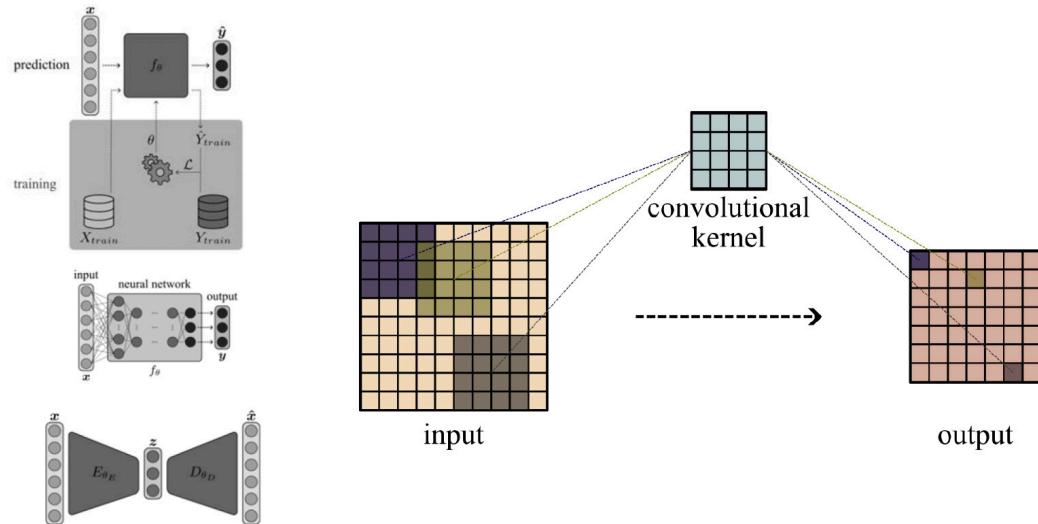
Basics on Neuronal Networks (ANN)



Basics on Neuronal Networks (AE)



Basics on Neuronal Networks (CNN)



Fires – Fluid Dynamics



Predicting Fluid Dynamics

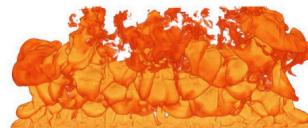
- Known mathematical representation (since nearly 200 years)

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] \right\} + \nabla [\zeta (\nabla \cdot \mathbf{u})] + \rho \mathbf{a}$$

- Known approaches to solve them (Computational Fluid Dynamics)

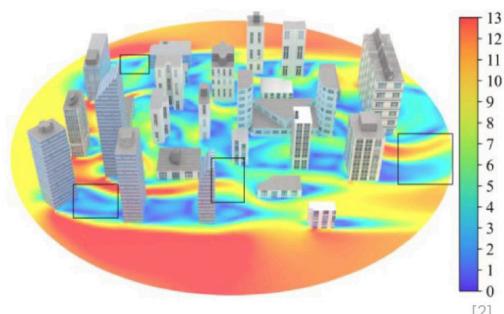
$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{k} = \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{h^2}$$

- Have computing resources and tools to apply the methods

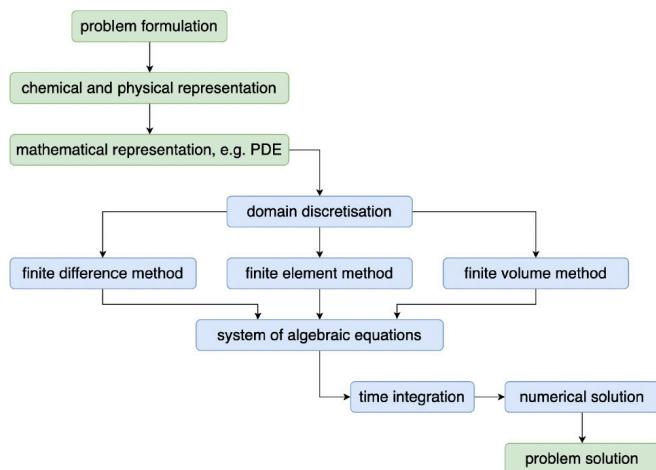


Application Options for AI in Fluid Dynamics

- Surrogate Models
 - (Significantly) Speed-up computations
 - Use in e.g. risk analysis
- Turbulence Modelling
- Flow Field Reconstruction
- Optimisation and Inverse Modelling
 - Determination of optimal values
 - Use in e.g. pyrolysis modelling
- Mesh Generation and Adaption

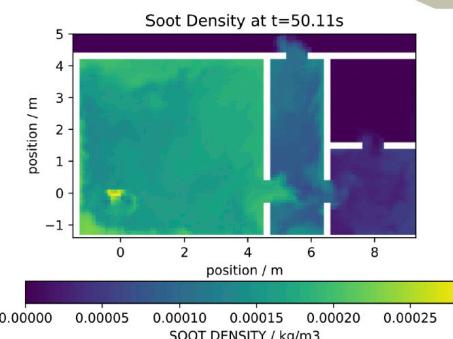
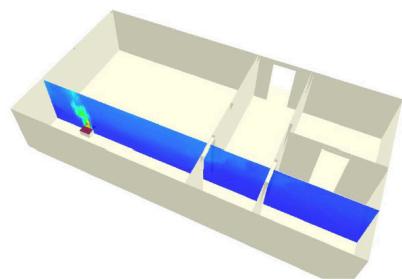
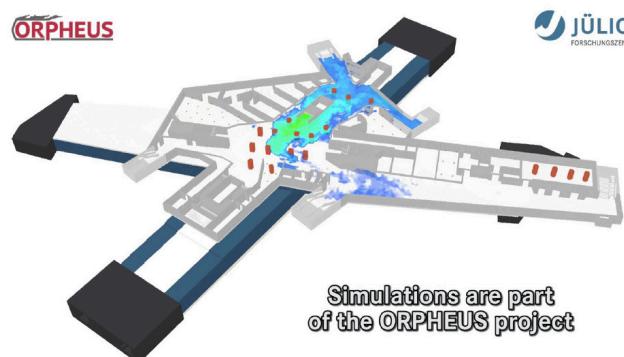


CFD – Computational Fluid Dynamics

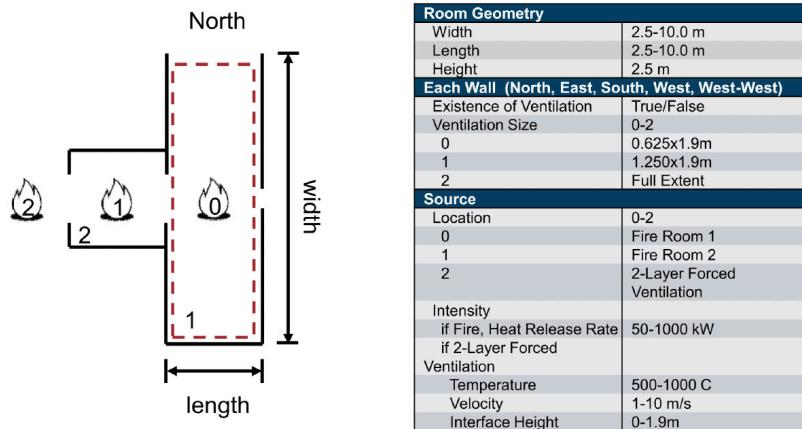


- Given boundary conditions
- Given initial conditions
- Predict, e.g.
 - $T(x, y, z, t)$
 - $v(x, y, z, t)$
 - soot concentration
- Analysis based on, e.g.
 - point measurements $\phi(t)$
 - slices $\phi(x, y, t)$

CFD – Colorful Fluid Dynamics

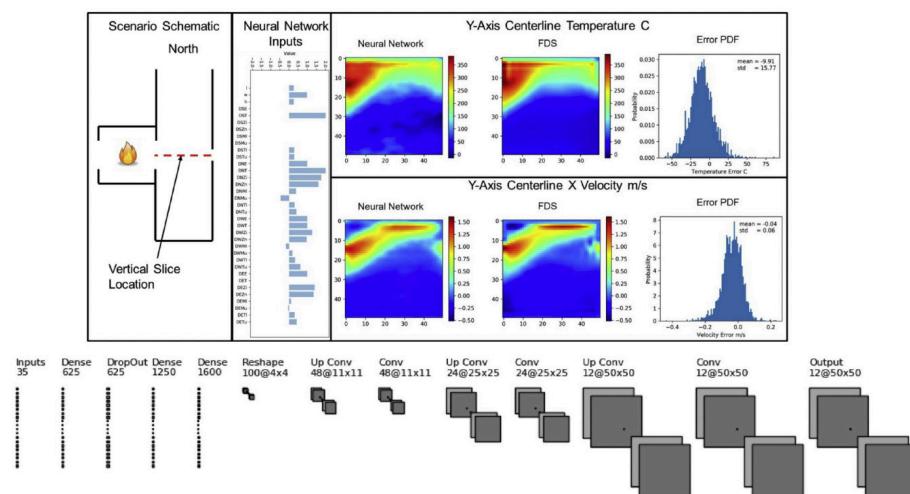


Prediction Based on Geometrical Parameters



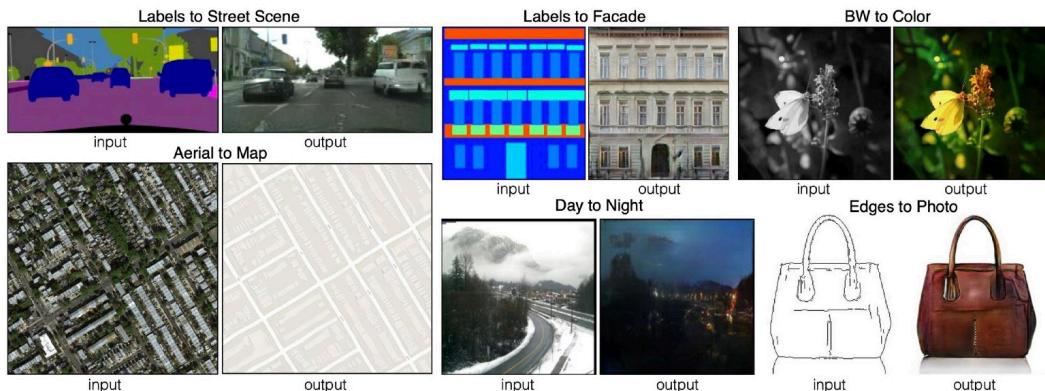
[3]

Up-convolutional ANN



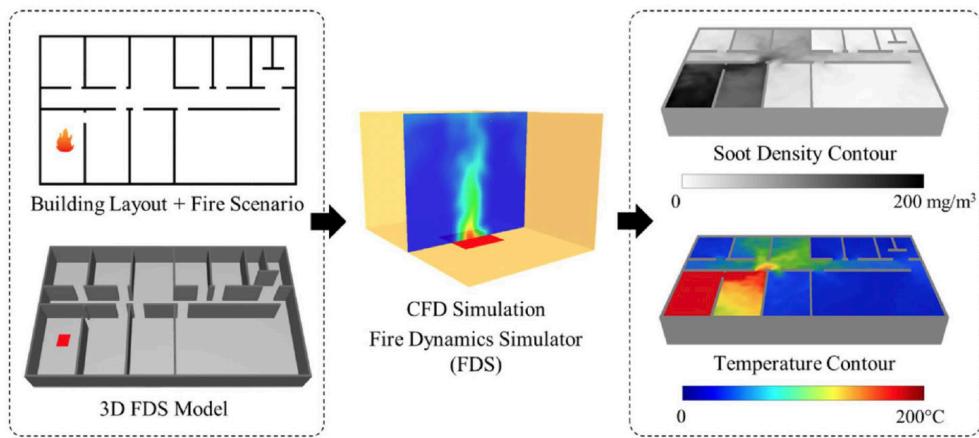
[3]

Image-to-Image Translation (pix2pix)



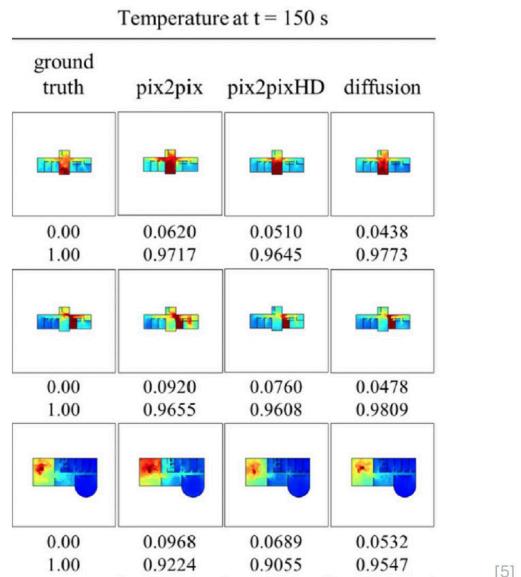
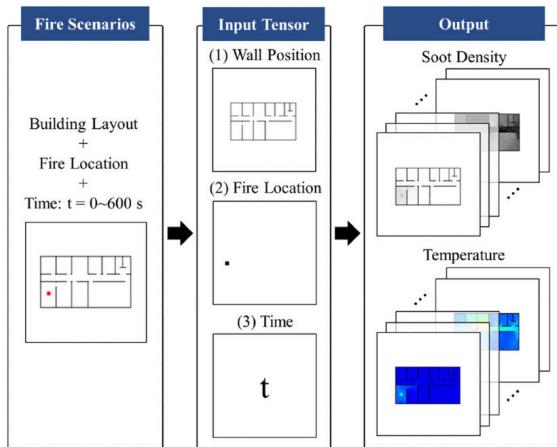
[4]

Representation Based on Images



[5]

Predictions



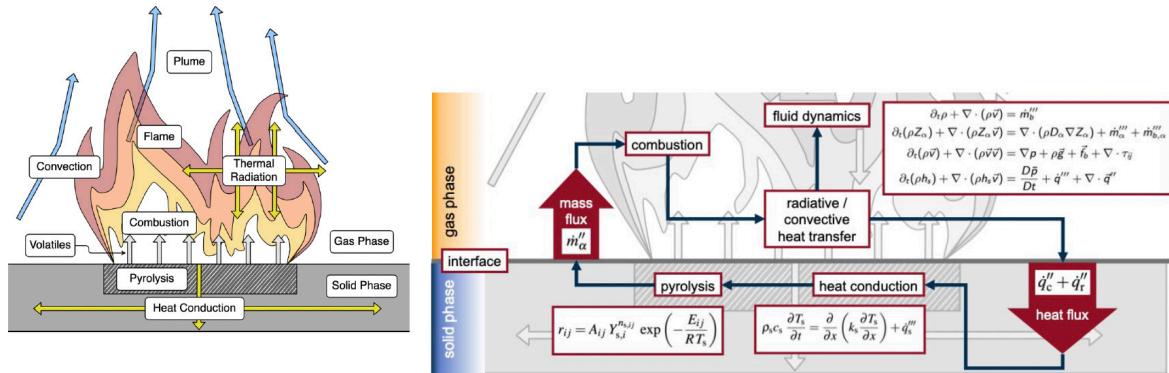
[5]



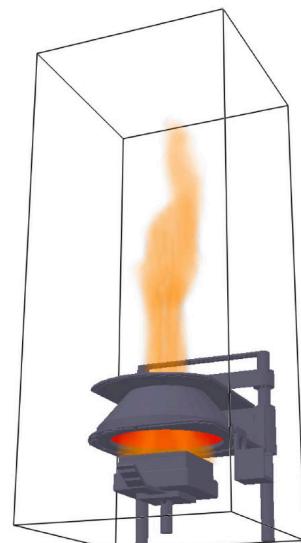
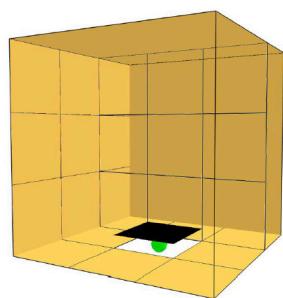
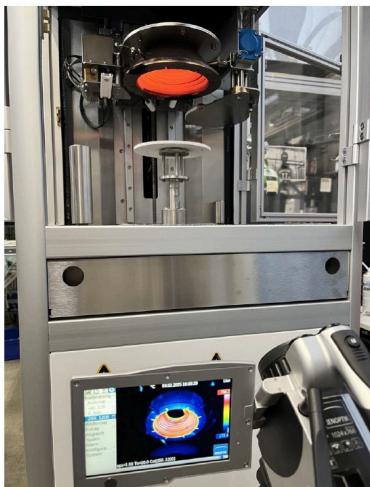
Fires – Pyrolysis



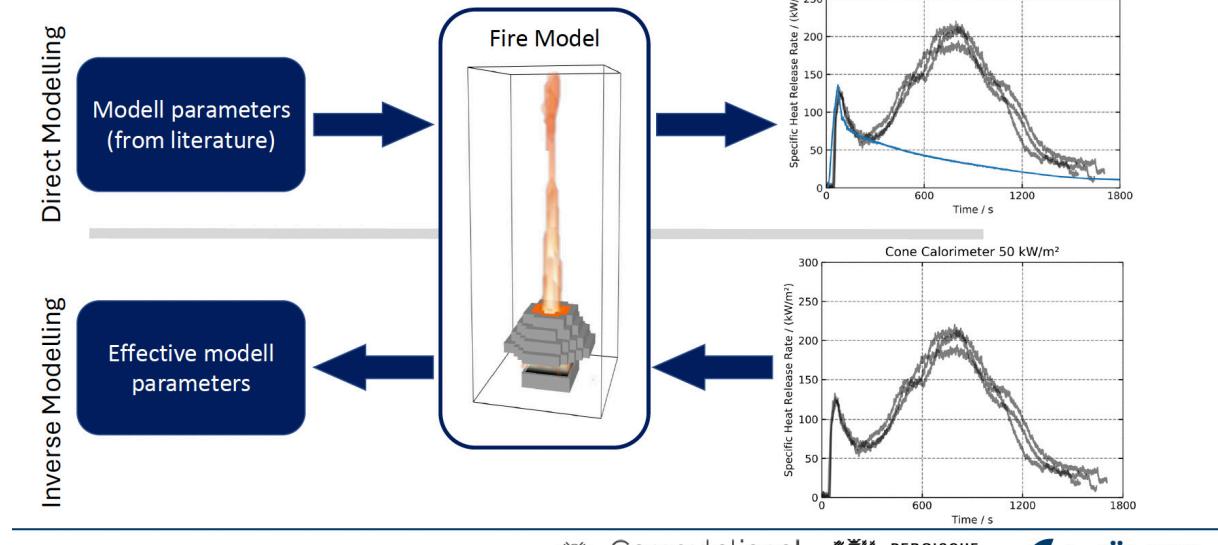
Pyrolysis Modelling



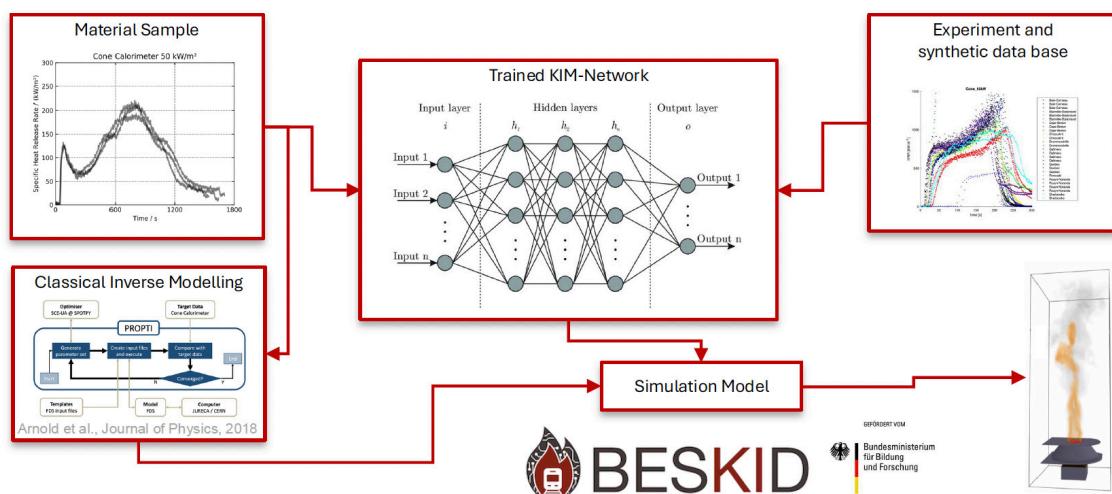
Cone Calorimeter



Inverse Modelling



KIM – KI-basierte Materialparameterbestimmung

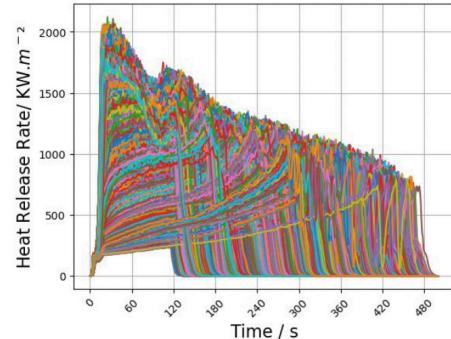


Training Data Set

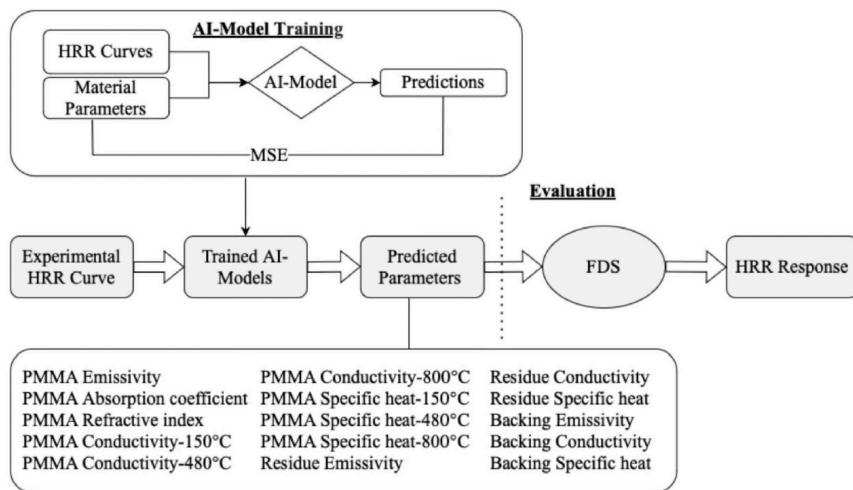
- Simple cone simulations, focus on HRR curves
- Number of simulations: 131072
- Material parameters:

PMMA Emissivity	Conductivity at 800 °C	Residue Conductivity
PMMA Absorption coefficient	Specific heat at 150 °C	Residue Specific heat
Refractive index	Specific heat at 480 °C	Backing Emissivity
Conductivity at 150 °C	Specific heat at 800 °C	Backing Conductivity
Conductivity at 480 °C	Residue Emissivity	Backing Specific heat

HRR curves:



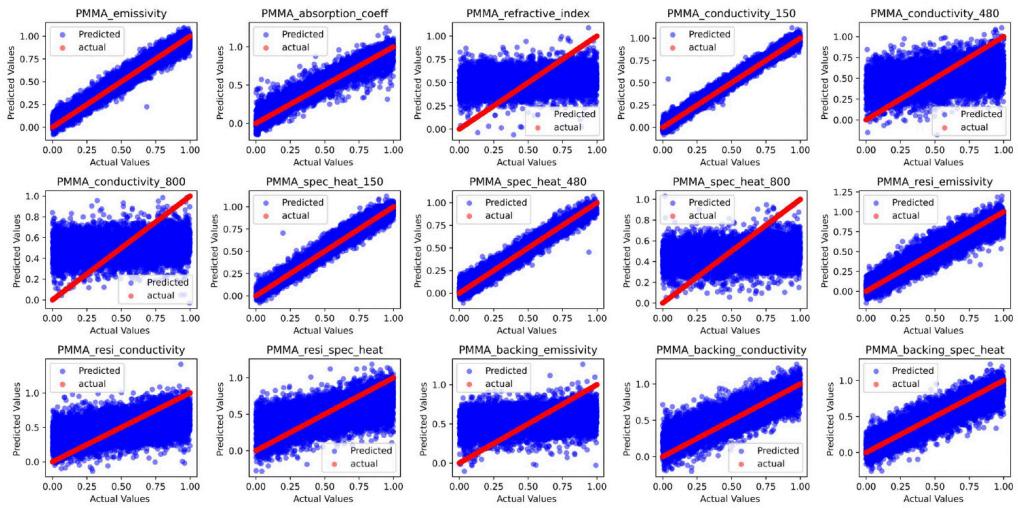
Training Approach



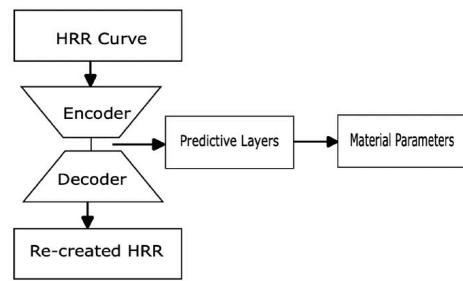
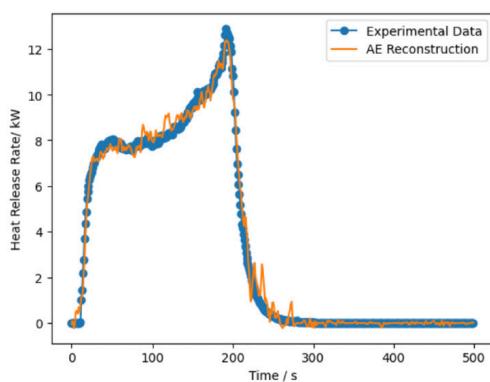
[6]



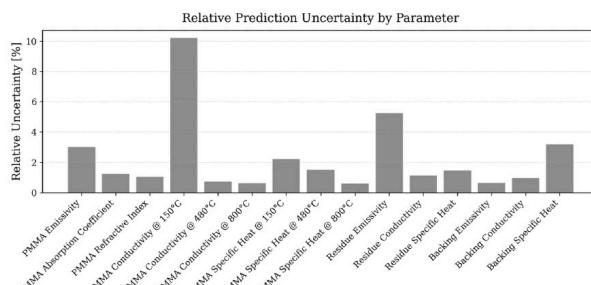
Parameter Sensitivity



Auto-Encoders



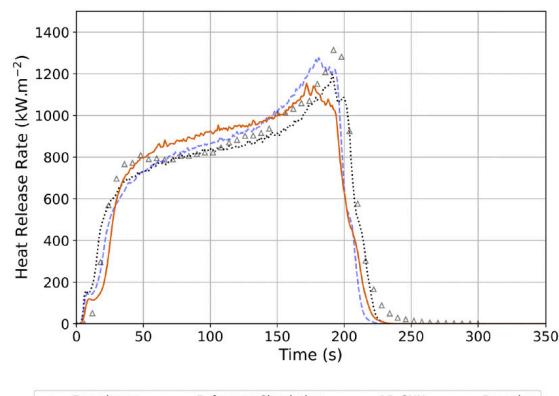
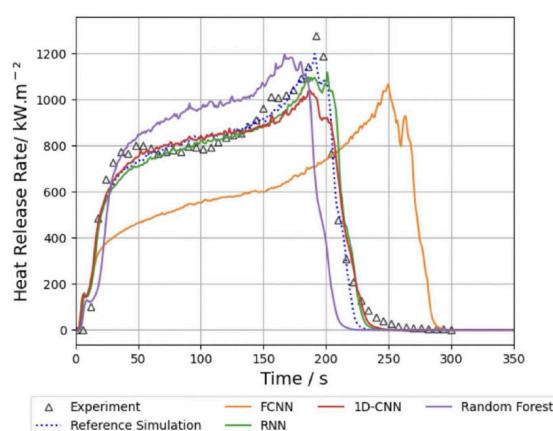
BNN



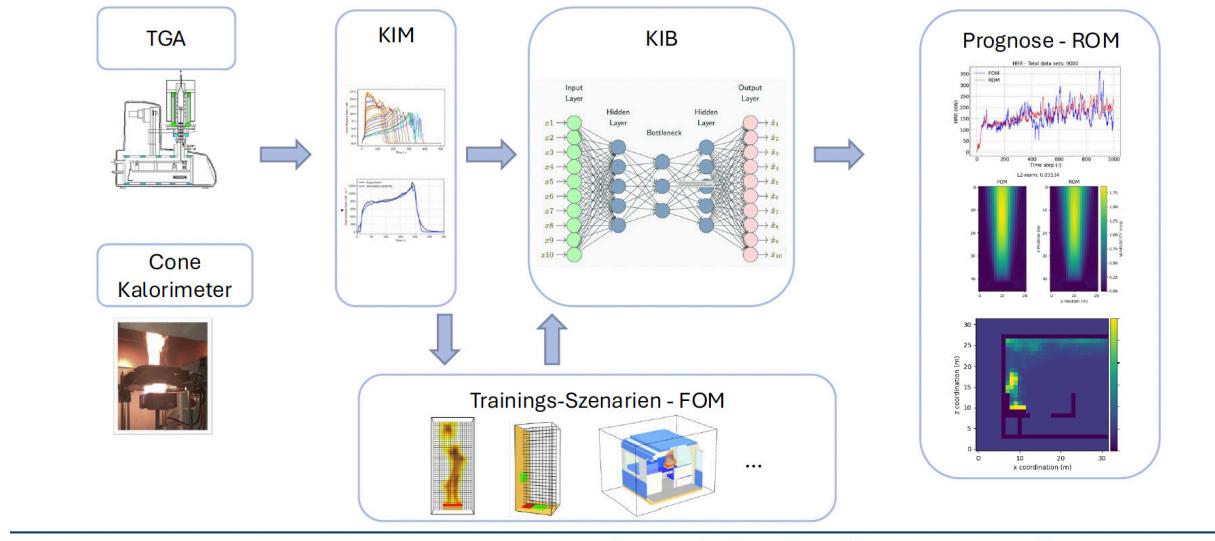
Parameter	Prediction ± CI	Rel. Uncertainty	Confidence
PMMA Emissivity	0.763 ± 0.045	3.0%	High
PMMA Absorption Coefficient	7912.028 ± 194.286	1.3%	High
PMMA Refractive Index	2.815 ± 0.058	1.0%	High
PMMA Conductivity @ 150°C	0.382 ± 0.076	10.2%	Low
PMMA Conductivity @ 400°C	0.024 ± 0.000	0.7%	High
PMMA Conductivity @ 800°C	4.355 ± 0.053	0.6%	High
PMMA Specific Heat @ 150°C	0.899 ± 0.039	2.2%	High
PMMA Specific Heat @ 400°C	4.171 ± 0.124	1.5%	High
PMMA Specific Heat @ 800°C	7.323 ± 0.086	0.6%	High
Residue Emissivity	0.576 ± 0.059	5.2%	Moderate
Residue Conductivity	4.429 ± 0.098	1.1%	High
Residue Specific Heat	5.786 ± 0.166	1.5%	High
Backing Specific Heat	0.445 ± 0.006	0.6%	High
Backing Conductivity	2.478 ± 0.047	1.0%	High
Backing Specific Heat	4.601 ± 0.288	3.2%	High



Validation with Experimental Data

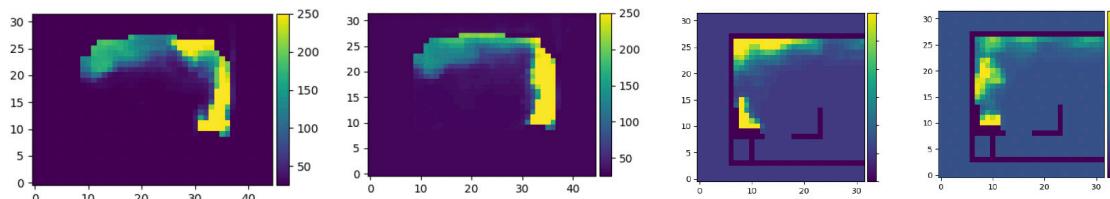
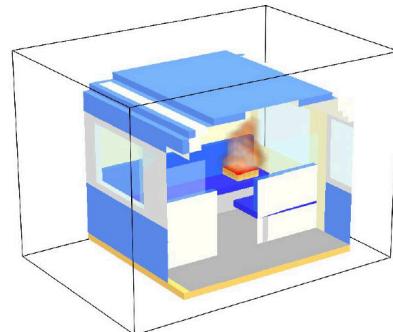


KIB – KI-basierte Brandsimulation (Prof. Brännström)



KIB – Zugabschnitt

- Trainingsszenario
 - Mit und Ohne Brandausbreitung
 - Aktuell: 4 Eingangsparameter
- Ziel
 - Ermittlung Bemessungsbrand auf „Knopfdruck“ mit KI-ROM Modell



So what? (W.r.t. Fire Science)

- AI is “a tool as all the others” (. / ! / ?)
 - AI is ”not an all-mighty too for everything (yet)”
-
- AI will get better – not limited by biological brain
 - AI will become a major part of our jobs – we have to adopt



Move forward? How?

- Are AI methods, e.g. prediction of smoke, of interest in practical applications?
- What application rage would be of interest?
- Which practical / regulatory challenges would we face?



**Univ.-Prof. Dr. rer. nat.
Lukas Arnold**

@ Forschungszentrum Jülich

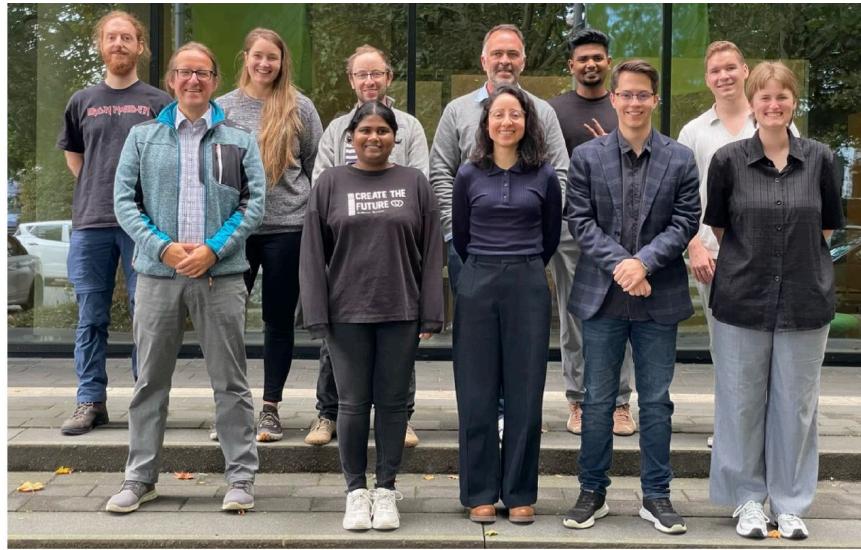
Email: l.arnold@fz-juelich.de
Phone: 0049 2461 61 2301

**@ Bergische Universität
Wuppertal**

Email: arnold@uni-wuppertal.de
Phone: 0049 202 439 4241

@ LinkedIn

Lukas Arnold



References

1. ai.google.com
2. PIGNN-CFD: A physics-informed graph neural network for rapid predicting urban wind field defined on unstructured mesh, Shao et al., Build and Environment, 2023
3. Using machine learning in physics-based simulation of fire, Lattimer et al., FISJ, 2020
4. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, Isola et al., arXiv, 2018
5. Generative artificial intelligence for fire scenario analysis in complex building design layouts, Rianto et al., FISJ, 2025
6. AI-Based Material Parameter Prediction from Cone Calorimeter Measurements, Valayanad and Arnold, JoP, 2024

Robert Westphal**Modellierung der Brand- und Rauchausbreitung durch Türen****Abstract:**

Aufgrund des akuten Bedarfs an kostengünstigem Wohnraum sind vor allem innerstädtische Ballungsräume auf Maßnahmen zur Nachverdichtung angewiesen. Neben der Schließung von Baulücken ist die Aufstockung von Bestandsbauten ein möglicher Ansatz. Die Umsetzung von Aufstockungen wird jedoch oft durch Schwierigkeiten bei der Lösung der Rettungswegssituation behindert. Die Belegung öffentlicher Straßen durch Kfz-Stellplätze, Baumbewuchs oder ÖPNV-Leitungen kann die Bedingungen für den zweiten Rettungsweg erheblich verschlechtern, sodass dieser nicht über Rettungsgerät der Feuerwehr gewährleistet werden kann. Das Verbundvorhaben ALREKO erforscht Lösungen, um den Treppenraum als einzigen Rettungsweg unterhalb der Hochhausgrenze zu ertüchtigen. Mithilfe einer quantitativen Risikoanalyse sollen Maßnahmen bewertet werden, mit denen der Treppenraum als einziger Rettungsweg ausreichend sicher ausgebildet werden kann. Ziel ist die Gewährleistung eines angemessenen Sicherheitsniveaus. Die Ermittlung des Sicherheitsniveaus erfolgt unter Zuhilfenahme von Methoden der Risikoanalyse in Verbindung mit Rechenmodellen zur Brandsimulation.

Im Rahmen der Brandsimulation muss auch das Brandverhalten der Türen möglichst realistisch abgebildet werden. Die innerhalb der Rettungswege angeordneten Türen leisten im geschlossenen Zustand einen wesentlichen Beitrag zur Begrenzung der Brand- und Rauchausbreitung. Aber auch eine geschlossene Tür weist je nach brandschutztechnischer Qualität eine gewisse Rauchleckage auf, welche für eine realistische Darstellung in der Simulation berücksichtigt werden muss. Zudem gilt es auch ein Versagen des Raumabschlusses in Abhängigkeit der Brandbeanspruchung zu modellieren. Dieser Vortrag stellt den dafür im Projekt ALREKO gewählten Ansatz vor.



Modellierung der Brand- und Rauchausbreitung durch Türen

Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben ALREKO

Robert Westphal
Jannik Rose



ALREKO - Projektvorstellung

Motivation:

- Wohnraumbedarf in hochverdichteten Quartieren
- Feuerwehr konkurriert mit Trends der Stadtentwicklung
- Vollwertige Sicherheitstreppenräume unterhalb der Hochhausgrenze unattraktiv

Verbundvorhaben:

- Entwicklung eines „**alternativen Rettungswegkonzeptes**“ für Gebäude und Aufstockungen in den GK 4 und 5
- Ertüchtigung des einzigen Treppenraums entsprechend des geforderten Sicherheitsniveaus für Wohngebäude GK 4 und 5
- Quantitative Risikoanalyse unter Verwendung von Brandsimulationen

Gefördert durch:



2

Brandverhalten von Wohnungseingangstüren

Rauchdichtheit

Prüfung von Rauchschutztüren:

- Prüfung nach DIN 18095-2 bzw. DIN EN 1634-3 bei Raumtemperatur und erhöhter Temperatur (Erwärmung innerhalb von 30 Minuten auf 200 °C)
- „Entstehungsbrand mit beginnender Verrauchung“ bzw. „Zustand, bei dem sich die Temperatur auf einen Wert erhöht hat, bei dem sich brennbare Werkstoffe noch nicht entzünden, aber Wärmeschäden durch Verformung oder Versagen der Dichtungen verursacht werden können“

Leckageraten:

- 20 m³/h bei 50 Pa bei einflügeligen Rauchschutztüren
- Bei dichtschließenden Türen starke Streuung, Bodendichtung wesentlicher Einfluss

3



Brandverhalten von Wohnungseingangstüren

Feuerwiderstand

Prüfung von Feuerschutzabschlüssen:

- DIN 4102-5 bzw. DIN EN 1634-1, Unterschiede bei der Bewertung des Raumabschlusses
- CE-Kennzeichnung bislang nur nach EAD

Versagenszeiten nichtklassifizierter Türen:

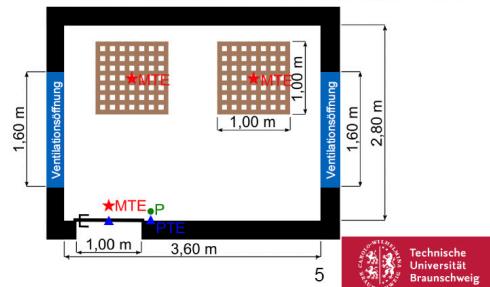
- Zimmertüren ca. 5 Minuten
- Wohnungseingangstüren 10 – 20 Minuten
- Aufbesserung historischer Türen durch Verstärkung von Schwachstellen und Einbau von Dichtungen

4



Versuchsstand und Messtechnik

- Bewertung von Brandverhalten und Leckage
- Brandraum $3,6 \times 2,8 \times 2,3 \text{ m}^3$ (B, T, H)
- Ventilationsöffnungen beidseitig $1,6 \times 1,0 \text{ m}^2$ (B, H)
- 4 Naturbrandversuche
 - Versuch 1: RS
 - Versuch 2: T30
 - Versuch 3: dichtschließend
 - Versuch 4: T30-RS
- Tür im Brandraum 6 Mantelthermoelemente (MTE)
- Tür brandabgewandte Seite 18 Thermoelemente (Glasseide)
- Über Holzkrippen 3 MTE (1,4 m, 1,8 m, 2,2 m)
- Adiabate Oberflächentemperatur und Wärmestromdichte mittels Plattenthermoelementen (PTE)
- Brandraumdruck (P)



Technische Universität Braunschweig

Gewähltes Brandszenario

- angestrebtes Szenario: Intensiver Raumbrand direkt hinter der Wohnungseingangstür
- Grenzbereich brandlast-/ventilationsgesteuert für maximale Brandraumtemperaturen
- Festlegung der Brandlast über Brandsimulation und Krippenformeln zu zwei Holzkrippen je 150 kg
- Wärmeleistung in Vollbrandphase ca. 2,5 MW



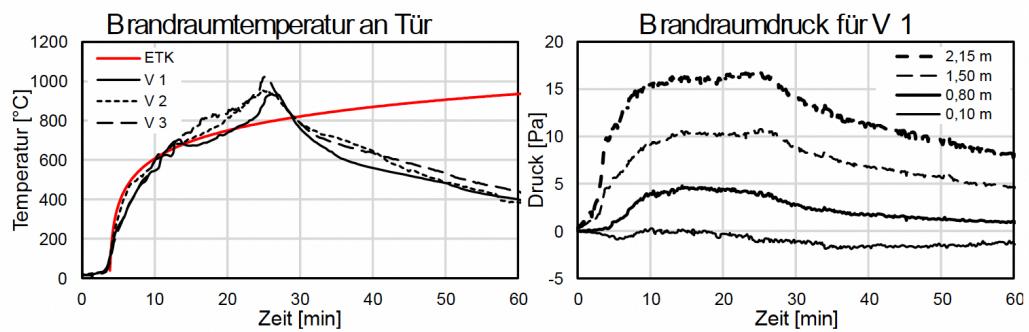
6 Technische Universität Braunschweig

Kamera 7 - 2024-11-12_11:18:54



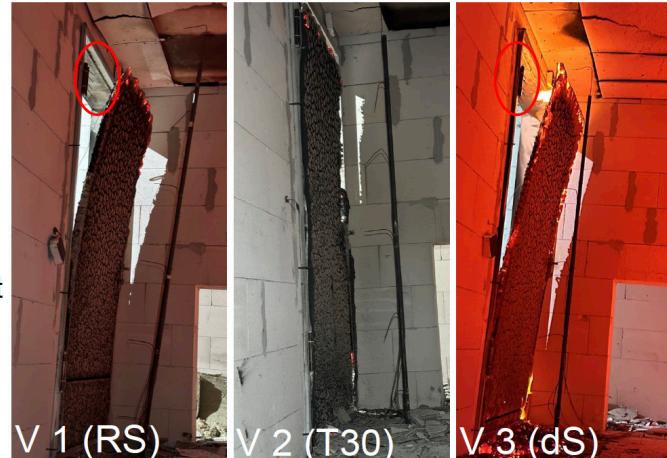
Brandraumtemperatur und -druck

- Auswertung der Brandraumtemperatur über Plattenthermoelemente an Tür, um Vergleichbarkeit zu Normprüfungsbefindungen zu gewährleisten
- Gute Vergleichbarkeit zwischen allen Versuchen
- Temperaturen übertreffen nach ca. 15 Minuten ETK



Versagensmechanismen

- Öffnung eines Spalts im oberen Türbereich mit folgendem Flammendurchschlag
- Durch Abbrand des Türblatts keine Verbindung zu Scharnier nach V1 und V3
- Intumeszierender Streifen hat Spalt verschlossen und Abbrand begrenzt



9



Messprinzip Türleckage

Volumenstrommessung unter Naturbrandbedingungen herausfordernd, da:

- Anspruchsvolle Messumgebung (Ruß und Temperatur)
- Bidirektionale Strömung über Türhöhe
- Erwarteter Volumenstrom gering (Messbereich)

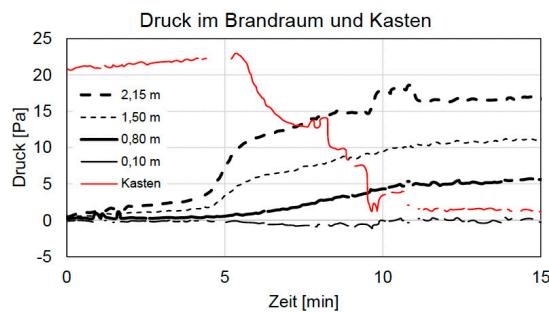


10



Messprinzip Türleckage

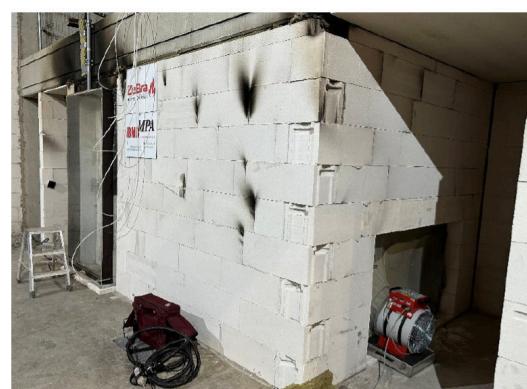
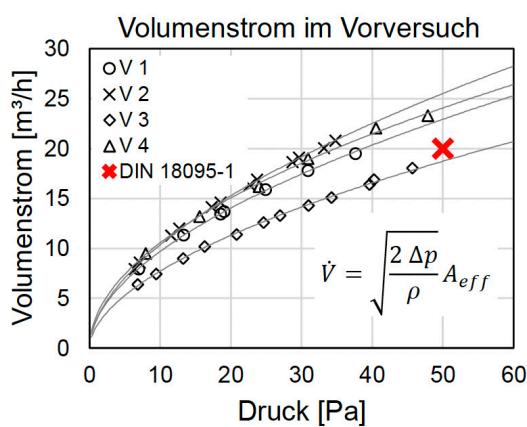
- Installation eines Überdruckkastens vor Tür
- Einblasen von SpülLuft im unteren Bereich
- Geschwindigkeitsmessung mit Hitzedrahtanemometer
- Implizite Messung der durch die Tür strömenden Frischluft ($\dot{V}_{Tür} = \dot{V}_{Rohr} + \dot{V}_{Leck,Kasten} - \dot{V}_{SpülLuft}$)



11

Türleckage im Kalten

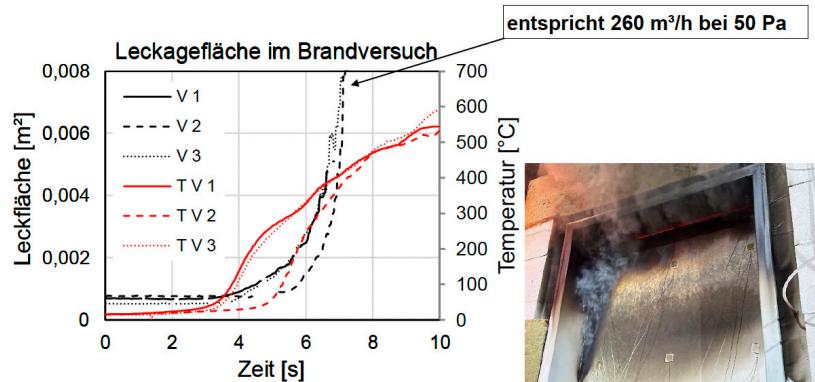
- Bestimmung der Leckage bei Über- und Unterdruck im Brandraum
- Keine Abhängigkeit des Volumenstroms von der Strömungsrichtung festgestellt



12

Türleckage im Brandversuch

- Abbruch der Messung noch vor Vollbrandphase
- Im weiteren Verlauf Spaltöffnung beginnend im oberen Bereich



13

Türleckage - Modellierungsansätze

Ansatz 1

- Direkte Auflösung des Türspalts

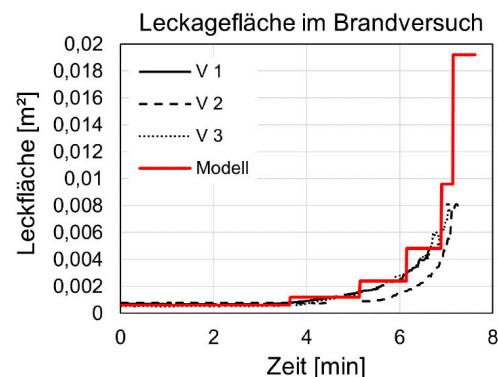
Ansatz 2

- HVAC-System
 - Heating, Ventilation, Air-Conditioning
 - Ein- und Ausgang in HVAC-System als Randbedingung innerhalb der Rechendomain
 - HVAC Network Solver zur Berechnung der Strömung zwischen den HVAC-Knoten

14

Dynamische Leckagefläche

- Probabilistische Betrachtung erfordert Modell zur dynamischen Anpassung
- Temperatur- und zeitabhängige Steuerung
- Verdoppelung der Leckagefläche ab 200 °C, ab 300 °C weitere zeitverzögerte Öffnung



15



Dynamische Leckagefläche

Variante 1

- HVAC mit mehreren Kanälen
- Öffnung der Kanäle temperatur- und zeitabhängig
- im vereinfachten Modell ok, Problem bei finaler Geometrie (6 Türen)

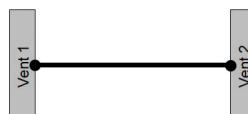
$$\dot{m} = \rho \cdot K_{Loss} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \cdot A_{Leck}$$



Variante 2

- HVAC mit einem Kanal
- Anpassung von K_{Loss} temperatur- und zeitabhängig über RAMP_LOSS

$$\dot{m} = \rho \cdot K_{Loss} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \cdot A_{Leck}$$

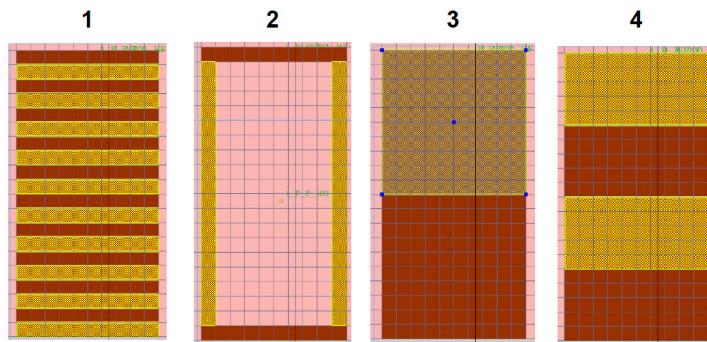


16



VENT-Positionierung

- Druckrandbedingung für HVAC wird durch Mittelung des Drucks in angrenzender Gas-Zelle bestimmt
- Wie sollten VENTS über Türoberfläche verteilt sein?

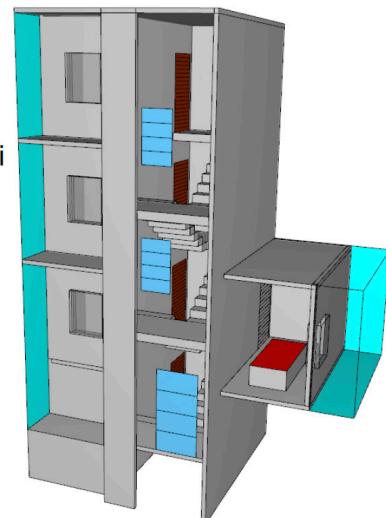


17



VENT-Positionierung

- Simulationsstudie zur Bewertung der möglichen Varianten
- Brand in Wohnung: $\dot{Q}_{max} = 1,2 \text{ MW}$, $t_{\alpha} = 300 \text{ s}$
- Türleckage: $A_L = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, entspricht $50 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 50 Pa Differenzdruck, vergleichbar mit dichtschließender Tür
- Alle Türen geschlossen, konstante Leckagefläche

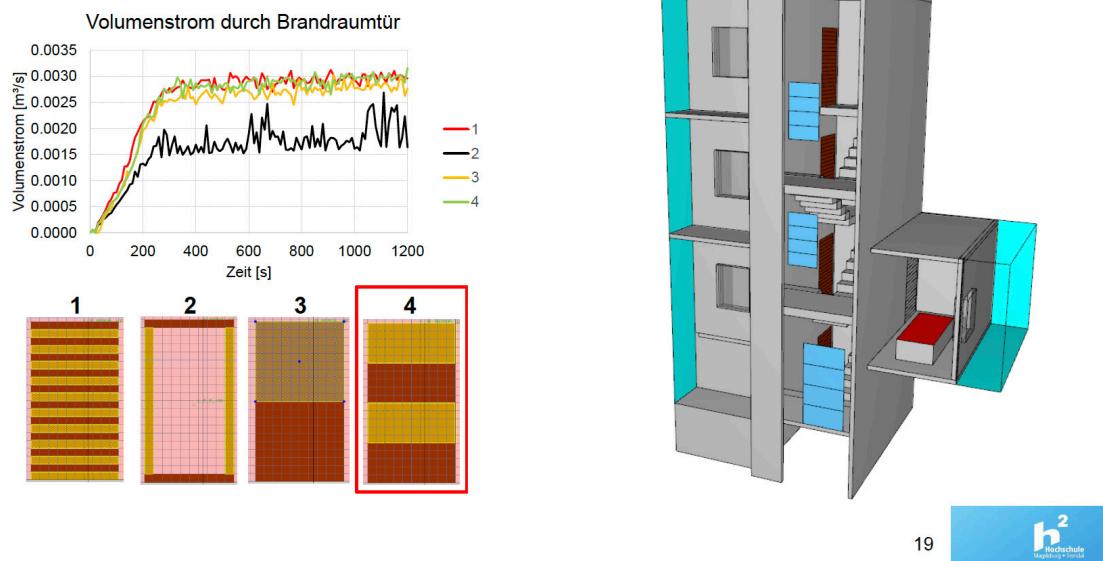


18



69

VENT-Positionierung



Raumabschluss

- Prognose des Versagens über Äquivalenzbetrachtung der thermischen Einwirkung zwischen Simulation und Prüfbedingung (ETK)
- Automatisierte Steuerung des Versagens über Ansatz der kumulierten Wärmemenge E
- Zeitverzögerte Freigabe des gesamten Querschnitts (vier Schritte zu je 30 s)

Thermische Einwirkung:

- Wärmestrom: $q_{tot} = \varepsilon \cdot \sigma (T_f^4 - T_s^4) + h_c (T_g - T_s)$
- Approximierte Formulierung ohne T_s : $q \approx \propto (4\varepsilon\sigma T_f^4 + h_c T_f)$
- Kumulierte Wärmemenge $E = \int q A dt \approx A \int (4\varepsilon\sigma T_f^4 + h_c T_f) dt$

Äquivalente Widerstandsdauer unter ETK

- Auswertung von Naturbrandversuchen mit klassifizierten Türen

Klassifizierter FW unter ETK [min]	äq. unter EKT [min]	Quelle
30	25,2	[1]
20	15,2	[2]
20	22,9	[2]
45	39,1	[3]
30	37,2	[4]
30	27,5	[5]
30	32,8	[6]

[1] Westphal et al. (2025) Wohnungseingangstüren unter Naturbrandbeanspruchung

[2] Zelinka et al. (2018) Compartment Fire Testing of a Two-Story Mass Timber Building

[3] Osborne (2015) Full-scale Mass Timber Shaft Demonstration Fire – Final Report

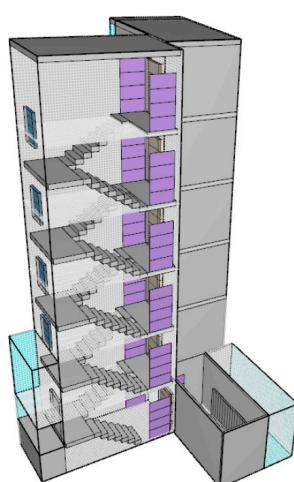
[4] Bechthold et al. (1978) Brandversuche Lehrte

[5] Joyeux (2002) Experimental investigation of fire door behaviour during a natural fire

[6] Nyman (2002) Equivalent Fire Resistance Ratings of Construction Elements Exposed to Realistic Fires



Ausblick



Nicolas Hauke**Leistungsbezogene Nachweisführung - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade****Abstract:**

Der Beitrag beschreibt ein reales Projekt, in dem mithilfe des Fire Dynamics Simulator (FDS) die thermische Einwirkung auf eine Glasfassade infolge eines Pkw-Brands in einer Großgarage untersucht wurde. Ziel war es, für den sicherheitstechnisch erforderlichen Zeitraum die Ausbreitung von Feuer und Rauch in die angrenzende Ladenstraße einer Mall zu begrenzen.

Vorgestellt wird die Erstellung eines leistungsbezogenen Simulationsgutachtens nach DIN 18009-1. Im Mittelpunkt stehen die Simulationen mit ihren maßgebenden Randbedingungen sowie der dynamisch fortschreitende Pkw-Bemessungsbrand. Die materialtypischen Eigenschaften von Glas unter Brandeinwirkung wurden wissenschaftlich ermittelt und im Modell abgebildet. Auf dieser Grundlage wurden die Versagenskriterien der Glasfassade abgeleitet.

Die Simulationsergebnisse werden präsentiert, eingeordnet und hinsichtlich objektspezifischer Maßnahmen diskutiert, die ein ausreichendes Sicherheitsniveau ermöglichen sollen. Der Beitrag stellt die modellbedingten Grenzen von FDS dar, bewertet diese ingenieurtechnisch und zeigt geeignete Kompressionsansätze auf. Abschließend fasst der Beitrag den Anwendungsbereich zusammen, benennt zentrale „Lessons Learned“ und bewertet die Übertragbarkeit auf vergleichbare Fragestellungen.



Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Ein Praxisbeispiel einer leistungsbezogenen
Nachweisführung

Brand vs. Glasfassade

Inhalt

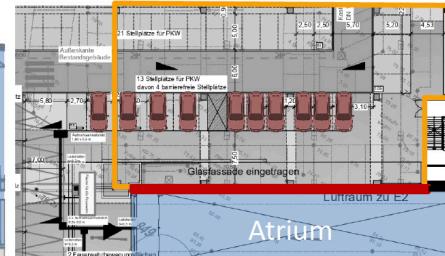
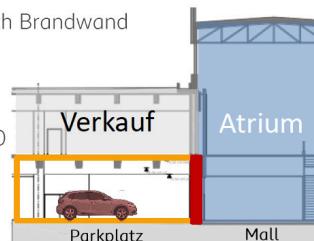
- Aufgabenstellung
- Schutzziele
- Leistungskriterien
- Geometrie/Modell
- Bemessungsbrand
- Materialeigenschaften Glas
- Ergebnisse & Sicherheiten
- Lessons Learned & Zusammenfassung



Brand vs. Glasfassade

Aufgabenstellung/Abweichung

- Umbaumaßnahmen im Bestand eines Einkaufszentrums
- Es grenzen hier:
 - Verkaufsstätte nach § 60 SBauVO NRW Teil 3 an
 - Parkbereich als Großgarage nach § 122 SBauVO NRW Teil 5.
- Trennung der beiden Bereiche durch Brandwand
 - Wunsch des Bauherrn: Ausführung als Glasfassade
 - Abweichend soll das Glas in F0 statt F90 errichtet werden
- Erstellung ing. Nachweis notwendig



14.10.2025 3 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Leistungsbezogener Nachweis

Gesetzliche Grundlage
§ 30 BauO NRW
§ 129 (1) SBauVO

Anforderung
innere Brandwand bzw.
feuerbeständige Trennung

Schutzziele

- Ausbreitung von Feuer und Rauch
- wirksame Löscharbeiten
- (Rettung von Menschen und Tieren)

Abweichung
Keine Brandwand, kein
Feuerwiderstand

Funktionale Anforderung
Vorbeugung der Feuer- und Rauchausbreitung durch die Glasfassade

- Beherrschbarkeit des Brandes
- Sicherung Angriffswege
- Unterstützung manueller Löschmaßnahmen

Quantifizierung
Leistungskriterium
via FDS

Ingenieursmäßiger Nachweis
Stellt Abweichung „Gefahr“ dar?



14.10.2025 4 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade

Brand vs. Glasfassade

Leistungskriterien I

- Bewertung Glasbruch/Trennung:
 - Recherche: Verhalten von Glas bei Brandeinwirkung?
 - Primärquelle: KIT-Studie
 - Einwirkdauer und Temperaturniveau
 - 370 °C
 - 550 °C
 - 730 °C
- > Begrenzung des Brandes und Rauches auf einen Teilbereich
- Quantifizierung: 2-fach Verglasung
 - 550 °C AST strukturelles Versagen des kompletten Glaskörpers (beide Scheiben)
 - Keine Berücksichtig der Einwirkdauer

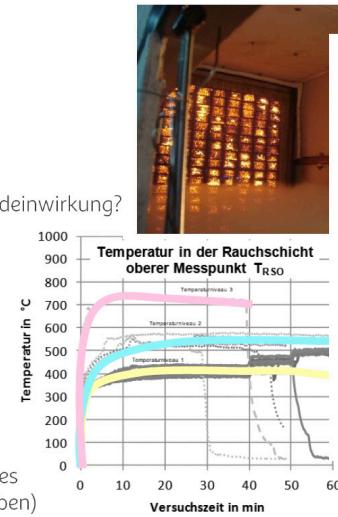


Tabelle 7-10: Versagenszeiten der Fenster

Fensterart		Temperaturniveau		
		1 (niedrig)	2 (mittel)	3 (hoch)
Rahmen	Verglasung	Innenscheibe 1. Riss	2:56	1:13
		Außenscheibe	NZ	Z: 31:42
Holz	2-fach	Innenscheibe 1. Riss	1:49	1:18
		Außenscheibe	NZ	TZ: 60:00
PVC	2-fach	Innenscheibe 1. Riss	2:19	0:56
		Außenscheibe	NZ	Z: 26:22
PVC	3-fach („Passivhaus“)	Innenscheibe 1. Riss	0:05	1:07
		Außenscheibe	NZ	Z: 43:52
Holz	3-fach („Passivhaus“)	Innenscheibe 1. Riss	1:59	1:00
		Außenscheibe	NZ	NZ: > 60:00 Z: 30:00

14.10.2025 5 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



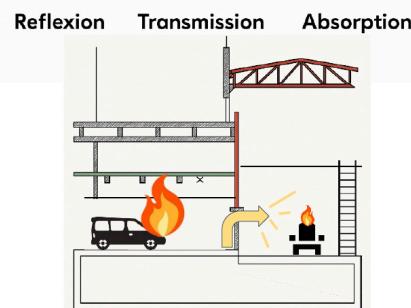
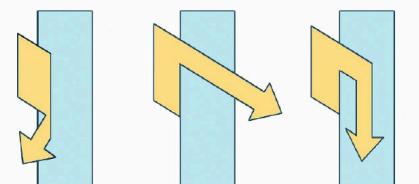
Brand vs. Glasfassade

Leistungskriterien II

- Bewertung Luftraum/Gasphase hinter der Fassade:
 - Berücksichtigung der Transmissionseigenschaften von Glas
- > Begrenzung des Brandes auf einen Teilbereich
- Quantifizierung: Entzündung durch Strahlung/Oberflächentemperatur
 - Adiabate Temperatur (Gasphase)

Temperaturerhöhung $\leq 180 \text{ K}$
(Anlehnung an DIN 4102-3)
 - Thermische Strahlung

kritische Wärmestromdichte ($\text{CHF} \leq 10 \text{ KW/m}^2$)
(thermisch dünne Materialien wie Papier, ohne Einwirkdauer)



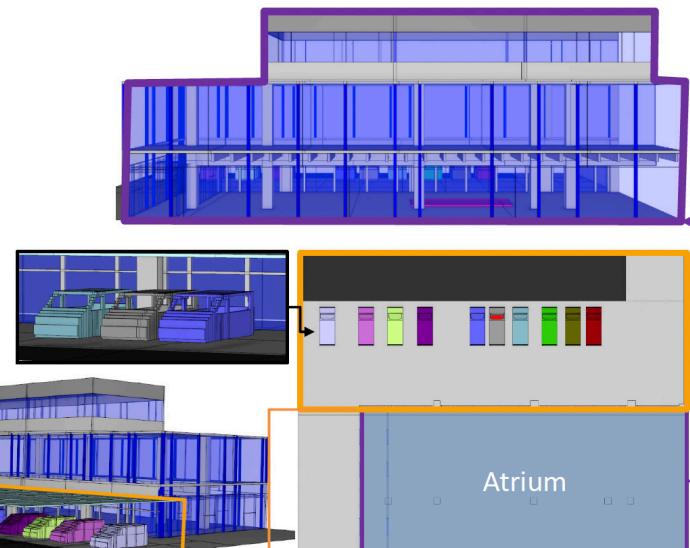
14.10.2025 6 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Modell

- Grundlagengeometrie
 - Ausschnitts des Atriums der Eingangshalle – Ladenstraße
 - Teilbereich Großgarage – erste Parkreihe
- Reale Fahrzeuggeometrie zur Messung der Oberflächentemperatur
- Glasfassade gem. Architektenplanung
- FDS-6.9.1-0-g889da6a-release
- Voruntersuchungen zu:
 - NRA/Path length
 - Zellgröße



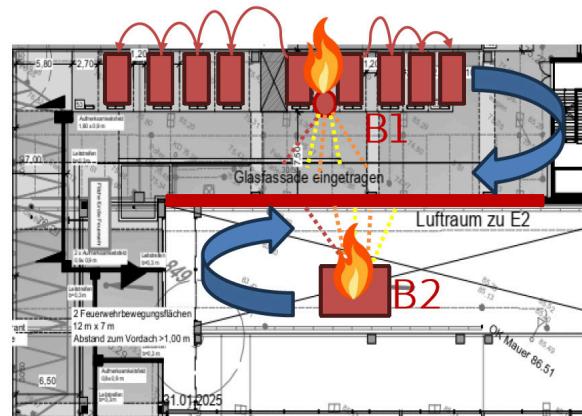
14.10.2025 7 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Bemessungsbrand I

- Einwirkung eines Brandes von
 - „Innen“ - Verkaufsstätte: Einkaufsstraße mit Aktionsflächen und Sitzgelegenheiten
 - „Außen“ - Großgarage: Parkflächen mit variabler Anzahl von PKW, maßgebend vor allem erste Parkreihe
 - Brandweiterleitung PKW zu PKW
- Entwicklung von 2 Bemessungsbränden



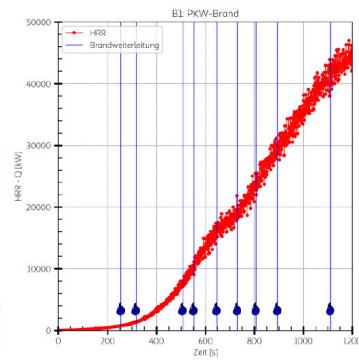
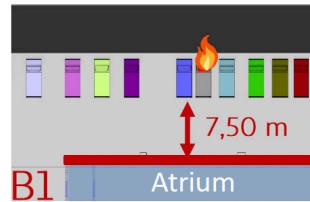
14.10.2025 8 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Bemessungsbrand II: PKW-Brand

- Anordnung der kompletten ersten parkreihe mit VW T6.1
 - Abbildung der 3D-Geoemtrie
 - Brandfläche auf „Fahrzeugboden“
- Primärbrand zentral, Fenster freigegeben
 - Dynamische Brandweiterleitung
 - Flächige Messung an Fahrzeugeiten, Fenster geschlossen
 - Überschreitung an einem Messpunkt von 250 °C
 - Start Folgebrand
 - Fenster freigegeben
 - Ergebnis: $\dot{Q}_{B1,max} \approx 48 \text{ MW}$



Kenngroße	Primärbrand	Folgebrand
Max. Brandleistung	5 MW	5 MW
Brandlast	10.000 MJ	10.000 MJ
Brandausbreitungsgeschw.	$t_g = 300 \text{ s}$	$t_g = 150 \text{ s}$
Effektiver Heizwert	20.000 kJ/kg	
Ruß-Ausbeute	0,116 kg/kg	
CO-Ausbeute	0,1 kg/kg	

[13]

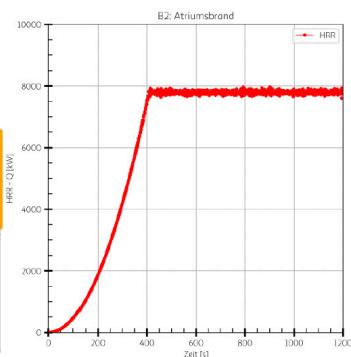
14.10.2025 9 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Bemessungsbrand III: Atriumsbrand

- Brand einer Aktionsfläche, hier Sitzgelegenheit mit ca. 30 m²
- Klassisch αt^2 mit \dot{q} für Einkaufzentren
- Sprinklerung im Dachbereich des Atriums
 - Ansatz HRR freeze: $t_{act} + 30 \text{ s Delay}$
- Ergebnis: $\dot{Q}_{B2,max} \approx 8 \text{ MW}$



Kenngroße	Primärbrand
Spez. Wärmefreisetzungsrates	380 kW/m ² [7]
Brandfläche	29,52 m ²
Brandausbreitungsgeschw.	$t_g = 150 \text{ s}$
Effektiver Heizwert	20.350 kJ/kg
Ruß-Ausbeute	0,10 kg/kg
CO-Ausbeute	0,04 kg/kg

Mischbrandlast gem. [7]

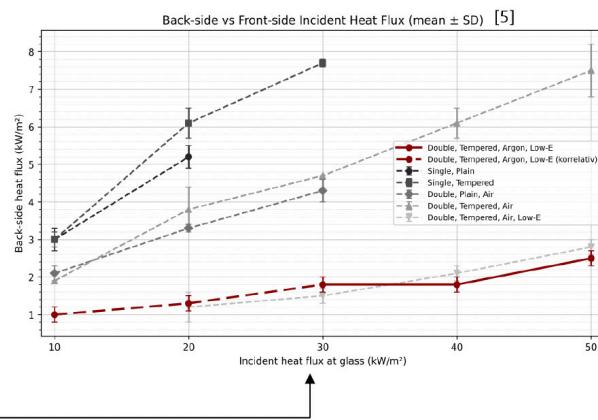
14.10.2025 10 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

„Transmission“ in FDS

- Kein direktes Transmissionsmodell in FDS
- Indirekter Ansatz: Absorption ↓ - Transmission ↑
 - Physikalisch: lambert-beersche Gesetz
 $I = I_0 * \exp(-\alpha L) \rightarrow T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha L)$
 - Transmissionsgrad $T \approx g_{Wert}$ nach DIN 4108-4
 - Umstellung: $\alpha = -\frac{\ln(g_{Wert})}{L_{total}}$
 mit $L_{total} = \sum_{i=1}^n L_i$ - Materialdicke Glas/Argon
 - Analyse bzw. Vergleich mit Experiment:
 - „Dämpfung“ (Wärmedämmglas zweifach + Argon):
 - FDS: 9,1 % ↔ Experiment: 8,2 %

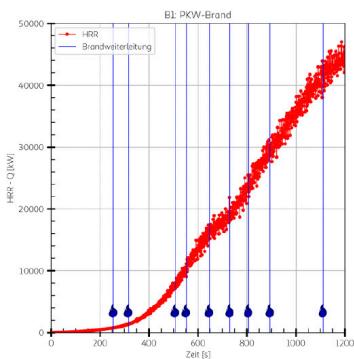


14.10.2025 11 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse I

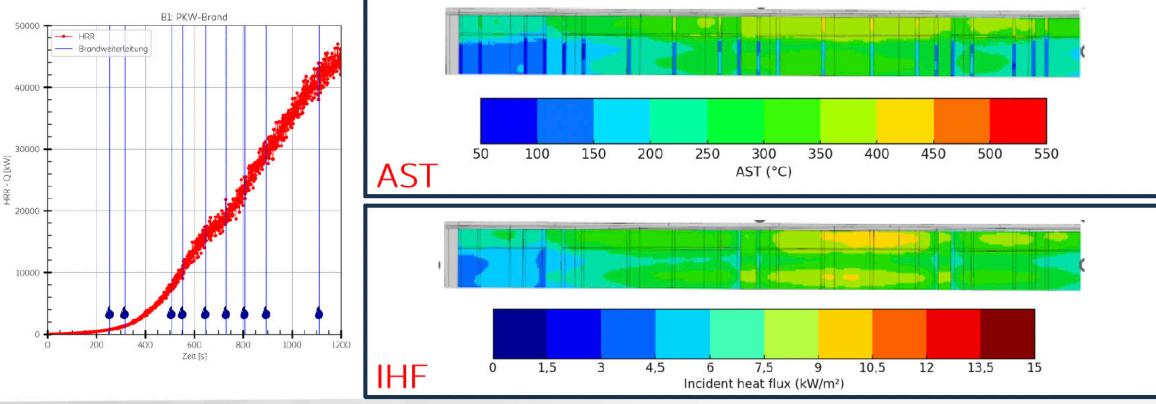


14.10.2025 12 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse II

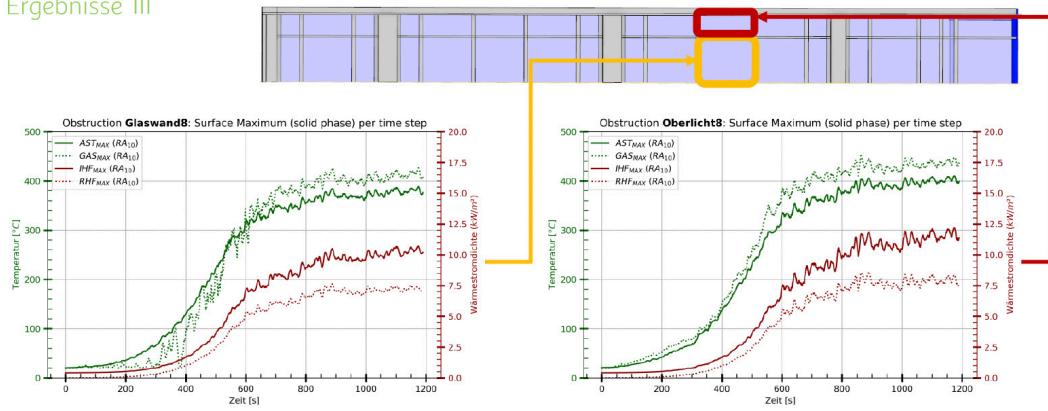


14.10.2025 13 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse III

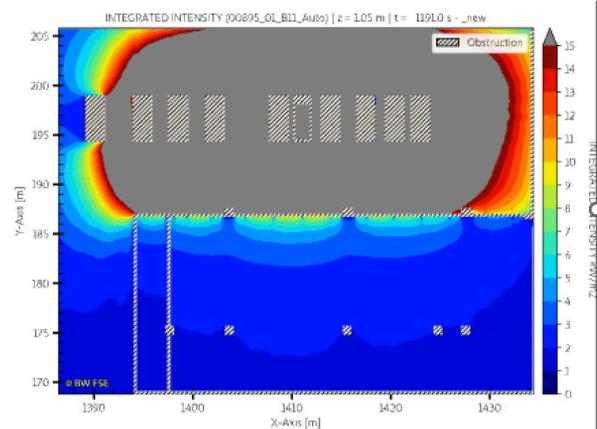
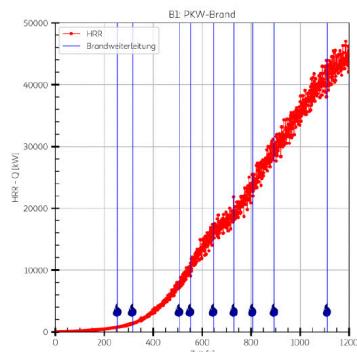


14.10.2025 14 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse IV

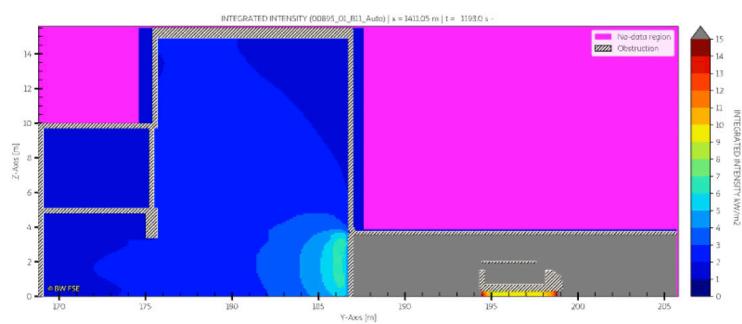
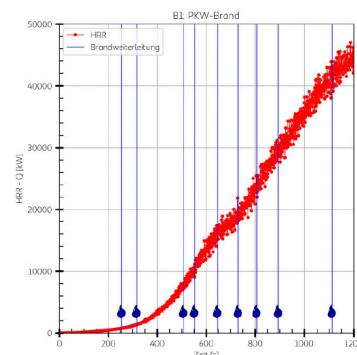


14.10.2025 15 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse V



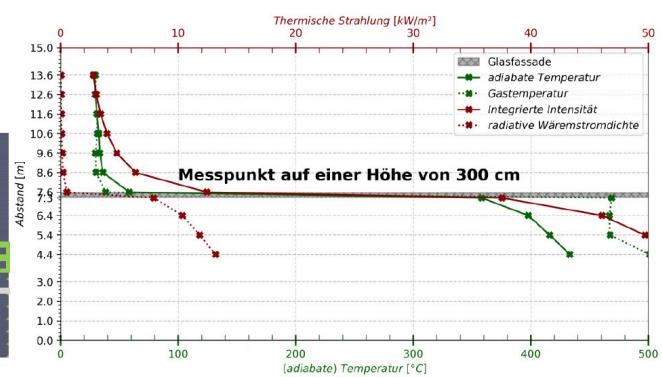
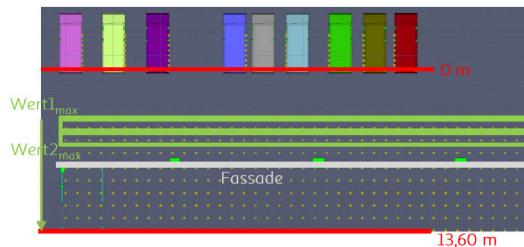
14.10.2025 16 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse VI

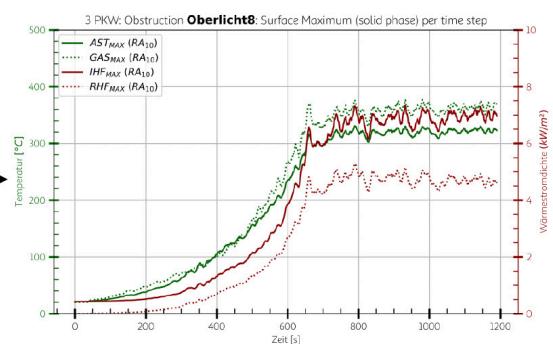
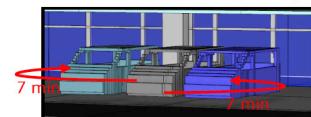
- Maximalwert pro Messreihe
- Veränderung der Messgröße bezogen auf die Entfernung zum Brand



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse VII

- Extrem konservatives Szenario mit 48 MW und 10 PKW mit einer Brandweiterleitung von < 1 min bis 3,5 min
 - Literatur geht eher von 7 min bis 10 min aus [11, 12]
- Szenario mit 3 PKW mit 7 min Brandweiterleitung
 - 100 °C AST weniger
 - 5 kW/m² Strahlung weniger



Brand vs. Glasfassade

Sicherheiten/Maßnahmen

- Dreifachverglasung + Rahmenmaterial Holz
 - geringer Transmission, langerer Widerstand
 - Brandlastfreier Freistreifen in Garage und Ladenstraße
 - feste Parkanordnung
 - trockene Sprinklerleitung in der Garage
 - „Thermisches Schild“ zwischen erster Parkreihe und Fassade
- Erhöhung Sicherheitsniveau,
Vorgaben Simulationsgutachten



Brand vs. Glasfassade

Lessons Learned - Einflussfaktoren

Faktor	Beschreibung	Bewertung	Quellen	
Glasdicke	Dickere Scheiben → späterer „Erstriss“ bei gleichem q “		[1],[2],[4]	
Glasart	Floating = Kleinteilig/netzartiger Zerfall; kürzere Zeit bis Bruch Vorgespannt = „schlagartig“ Kollaps; längere Zeit bis Bruch		[1],[4],[5],[8],[9], [14]	Evidenzgewicht hoch
Anzahl der Scheiben	Mehr Scheiben = höherer „Trennwiderstand“		[1],[4],[5],[8]	moderat
Rahmen	Rand/Abdeckung beeinflussen ΔT ; Holzrahmen halten Außenscheiben länger intakt		[1],[3][4],	Gering/ ungewiss
Fenstergröße	Uneinheitlich: klein (weniger Wärmekapazität) vs. groß (mehr Spannungen)		[1],[8],[10]	

To be continued...



Brand vs. Glasfassade

Zusammenfassung/Fazit

- Nachweis
 - PKW-Brand und Brand im Atrium erzeugten keine kritischen adiabaten Oberflächentemperaturen
 - Trennung als Glasfassade zwischen Großgarage und Verkaufsstätte begrenzt Ausbreitung von Feuer und Rauch
- Anwendbarkeit
 - Sender (Brand) und Empfänger (Fassade)-Darstellung validiert
 - Transmission nicht hinreichend → sehr konservative Betrachtung notwendig
 - Absicherung: zusätzliche Worst-Case-Abschätzung
z.B. Ansatz der vorderseitigen Einstrahlung auf der Rückseite
 - Sicherheiten: geplante + zusätzliche Maßnahmen durch Gutachten
U.a. Abstände, brandschutztechnische Infrastruktur, Anzahl der RW, Ausführung der Fassade...

14.10.2025 21 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Literatur I

- | | |
|-----|--|
| [1] | J. Kunkelmann, „Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise. Teil 2: Verhalten von Verglasungen bei thermischer Beanspruchung, Verhalten von Verglasungen beim Feuerwehreinsatz, Mechanische Zerstörung von Verglasungen, Zerstörung von Verglasungen durch Explosivmittel“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe, Deutschland, 164, Feb. 2013. |
| [2] | R. K. Mishra, P. K. Sharma, und R. Kumar, „Experimental analysis of glass failure criteria under different thermal conditions“, Front. Therm. Eng., Bd. 4, S. 1488206, Nov. 2024, doi: 10.3389/fther.2024.1488206 . |
| [3] | P. J. Pagni, „Thermal Glass Breakage“, in Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium, International Association for Fire Safety Science, 2002, S. 3–22. |
| [4] | V. Babrauskas, „Glass Breakage in Fires“, Fire Science and Technology Inc., 1997, [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/267852703_Glass_breakage_in_fires |
| [5] | Rebekah L. Schrader und Shuna Ni, „Experimental Study of Heat Transfer Through Windows Exposed to a Radiant Panel Heater“, Aug. 2025, doi: doi.org/10.1007/s10694-024-01685-8 . |

14.10.2025 22 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Literatur II

- [6] R. K. Mishra, P. K. Sharma, und R. Kumar, „Experimental analysis of glass failure criteria under different thermal conditions“, *Front. Therm. Eng.*, Bd. 4, S. 1488206, Nov. 2024, doi: [10.3389/fther.2024.1488206](https://doi.org/10.3389/fther.2024.1488206).
- [7] vfdb-Referat 4, „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) e.V., Münster, Technischer Bericht TB 04-01, März 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vfdb.de/media/doc/technischeberichte/TB_04_01_Leitfaden_IngMethoden_4Auflage_2020-03-26.pdf
- [8] M. Peng, J. Hvidberg, H. Bengtsson, und L. Giuliani, „Fire-Induced Cracking of Modern Window Glazing: An Experimental Study“, in *8th International Conference on the Applications of Structural Fire Engineering (ASFE 2024)*, Nanning, China, Feb. 2024. Zugegriffen: 30. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/fire-induced-cracking-of-modern-window-glazing-an-experimental-st>
- [9] J. M. Willi, D. J. Gorham, und G. P. Horn, „Window Pane Failure During Exterior Fire Exposure“, *Fire Technol.*, Bd. 61, Nr. 4, S. 1613–1645, Juli 2025, doi: [10.1007/s10694-024-01656-z](https://doi.org/10.1007/s10694-024-01656-z).
- [10] Y. Wang, Y. Zhang, Q. Wang, Y. Yang, und J. Sun, „The effect of glass panel dimension on the fire response of glass façades“, *Construction and Building Materials*, Bd. 181, S. 588–597, Aug. 2018, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.06.088](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.088).

14.10.2025 23 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Literatur III

- [11] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 2053 Blatt 2: Raumlufttechnik – Garagen – Entrauchung (VDI-Lüftungsregel)*. in VDI 2053 Blatt 2. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2053-blatt-2-raumlufttechnik-garagen-entrauchung-vdi-lueftungsregel>
- [12] Deutscher Ausschuss für Stahlbau (DAST), „Untersuchung zur Tragsicherheit offener Parkgaragen in Stahl- und Verbundbauweise unter Brändeinwirkungen von E-Fahrzeugen und kraftstoffbetriebenen Fahrzeugen“, DAST – Deutscher Ausschuss für Stahlbau e.V., Forschungsbericht 20453N, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://dast.deutscherstahlbau.de/veroeffentlichungen/forschungsberichte?tx_bfscommon_viewpdf%5Baction%5D=index&tx_bfscommon_viewpdf%5Bcontroller%5D=ViewPdf&tx_bfscommon_viewpdf%5Bfile%5D=22523&type=512365&cHash=f03d1d407cb76b4fd71cd04596c1a91e
- [13] Dr.-Ing. Matthias Siemon und Moritz Rupp, M. Eng., „Brandszenarien bei E-PKW Stand der Wissenschaft“, *KSI Smart Brandschutz*, Sep. 2022.
- [14] Y. Wang, Experimental and Numerical Study of Glass Facade Breakage Behaviour under Fire Conditions, Hong Kong: Springer, 2019

14.10.2025 24 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade





**brandwerk
fse**

Die Spezialisten

flexibler, fokussierter, besser

brandwerk fse

ein Geschäftsfeld der
brandwerk traffic GmbH
Veronikastraße 32
45131 Essen

0201 / 95 99 75 - 00
0201 / 95 99 75 - 11

mail@brandwerk.team
www.brandwerk.expert

14.10.2025 Hauke brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Bjarne Husted**Investigating fire spread in large compartments with exposed wood surfaces using a scaling-based pyrolysis model in FDS****Abstract:**

To evaluate the Spyro model, simulations were performed replicating the full-scale FRIC compartment fire test involving exposed cross-laminated timber (CLT) surfaces. Cone calorimeter experiments for CLT were conducted using three different heat flux levels of 35, 50 and 70 kW/m². The cone calorimeter data for CLT and mass timber from the literature were used as input for the Spyro model, and its predictions were benchmarked against those from the ITP model and the FRIC test. Key parameters including fire growth rate, time to flashover, and total HRR were compared.

The results show that both the Spyro and ITP models are capable of reproducing key features of the FRIC test when wind conditions are included. However, the Spyro model demonstrated an under-prediction of fire growth rate and an over-prediction of peak HRR, attributed to limitations in its scaling behaviour. The ITP model provided more accurate fire growth rates but still overestimated total HRR. The study also highlights the importance of sample thickness in cone calorimeter tests, as Spyro currently does not account for this variable. Despite current limitations, the Spyro model offers a promising approach for simulating fire spread based on experimentally derived material data, with comparable computational performance to the ITP model. With further validation of the downscaling abilities and additional cone calorimeter experiments for lower incident heat flux levels relevant to early fire development, the Spyro model could serve as a useful tool for performance-based fire safety engineering in timber buildings.



Investigating fire spread in large compartments with wood surfaces using a scaling-based pyrolysis model by use of CFD

Bjarne P. Husted^{a,b}

^aDepartment of Civil and Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark

^bThe Danish Institute of Fire and Security Technology, Hvidovre, Denmark

Danmarks Tekniske Universitet



Acknowledgement

Signe Harvig Bjerrum, M.Sc., who did most of this work



Danmarks Tekniske Universitet

2



Agenda

- Introduction and background
- Objective
- Method
 - Overall approach
 - FDS model
 - Cone calorimeter test
- Results
 - The Spyro model
- Discussion
 - The Spyro model compared to the ITP model
 - Assessment of the FDS modelling approach and the Spyro model
- Conclusion



Introduction and Background

Why study fire spread on wood surfaces?

- Growing demand for lowering the carbon footprint
- Timber surfaces and CLT is increasingly popular but change the fire dynamics
- Limit of max. 20 % untreated wood surfaces inside a compartment beyond 150 m²
- Need for further investigations to close the gap between sustainability goals and fire safety requirements
 - Full scale tests versus CFD
- Common approach: The ITP model – based on user defined input. (Ignition Temperature Pyrolysis)
- New alternative approach: The Spyro model based on reference cone calorimeter HRR data



Illustration of the newly built WoodHub office building in Odense, Denmark from CF Møller Architects



Objective

- Overall objective: Explore how the Spyro model in FDS can be used to simulate fire spread on wood surfaces in large compartments
- Approach: Using the Spyro model in FDS model to simulate the large scale fire test conducted by A. S. Bøe in 2023 (FRIC test) using cone calorimeter data for the mass timber from literature and experimentally obtained cone calorimeter data for CLT
 - Results from the Spyro simulations are benchmarked against the reported results from the FRIC test and the results obtained using the ITP model in FDS



Illustration of FRIC test setup from A.S. Bøe et al (2023)



Spyro was developed by Jonathan Hodges and co-authors

Fire Safety Journal 141 (2023) 103960



Contents lists available at ScienceDirect

Fire Safety Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/firesaf



An engineering model for the pyrolysis of materials

Jonathan L. Hodges^{a,*}, Brian Y. Lattimer^b, Anil Kapahi^c, Jason E. Floyd^d

^a RDT&E Division, Jensen Hughes, Blacksburg, VA, USA

^b Mechanical Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA

^c RDT&E Division, Jensen Hughes, Baltimore, MD, USA

^d Fire Safety Research Institute, UL Research Institutes, Columbia, MD, USA

ARTICLE INFO

Keywords:
Fire chemistry
Modeling
Performance-based design

ABSTRACT

Accurately representing the time dependent heat release rate of fuels is critical to performance-based design in fire safety applications. Existing simplified models either use average pyrolysis rates at different heat fluxes or do not account for the change in burning behavior at higher heat transfer rates. This paper presents the theoretical basis of a reaction based nonisokinetic model. © 2023. This model is based on the amount of maintaining the chain of a



Method Overview

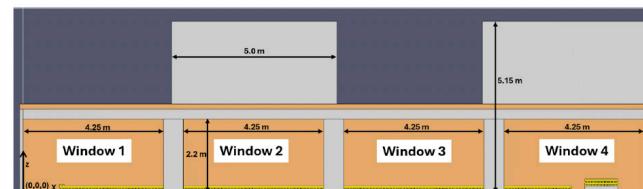
The overall approach for the analysis is structured in four steps

- **Step 1:** A FDS model that simulates the FRIC test scenario using the known ITP model. The results are used for determine the HRRPUA of the wood crib in the following Spyro simulations – Results can be found in the report
- **Step 2:** Conducting Cone calorimeter test for CLT samples and validation of the scaling performance of the Spyro model by comparing the output against the reference cone calorimeter data for CLT and mass timber
- **Step 3:** Application of the Spyro model into the FDS model using cone calorimeter data for mass timber to simulate the FRIC test scenario – Results can be found in the report
- **Step 4:** Application of the Spyro model into the FDS using the experimentally obtained cone calorimeter data CLT to simulate the FRIC test scenario



Method: The FDS Model

- The model geometry in FDS replicates the FRIC test compartment setup
- Computational domain extended beyond the compartment and is divided into 60 meshes.
 - Mesh cell size: 0.05 m inside the compartment 0.1 m outside
- CLT back wall, ceiling and the wood crib were made of Norwegian Spruce
- Wood crib modelled as stacked wood sticks
- Metal trays with heptane used to ignite the wood crib



FDS model geometry



CLT Sample, before test



Cone Calorimeter Test of CLT (16. May 2025)

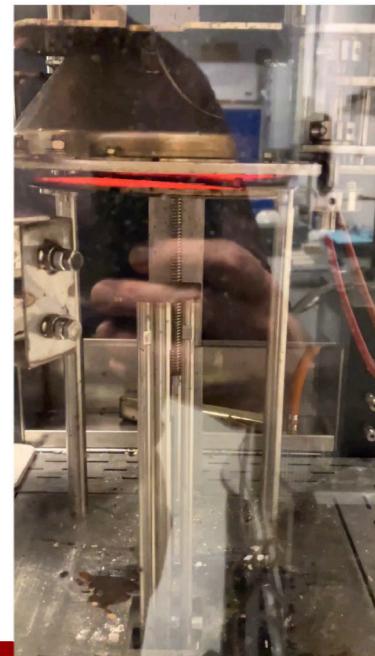
- The samples originally had a thickness of 100 mm, but this was reduced to 40 mm before the test in order for the samples to fit under the cone. The samples are made of a mix of spruce and pine with an average density of 393 ± 11.6 kg/m³. The specimens were tested with a heat flux directed parallel to the glued layers.
- The results from the six cone calorimeter test for CLT are presented in the following for three heat flux levels of 70 kW/m², 50 kW/m² and 35 kW/m², respectively. Two tests were performed at each heat flux level, with a duration of 1500 s, except for one test, which lasted 2500 s (the first test at 70 kW/m²).



Testing CLT in the Cone Calorimeter

Heat flux: 50 kW/m² (test 1)

Time to ignition: 19 seconds



Danmarks Tekniske Universitet

11



CLT after test



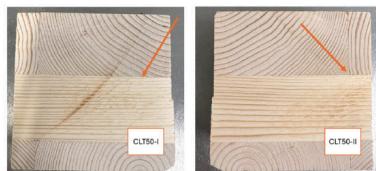
Danmarks Tekniske Universitet

12

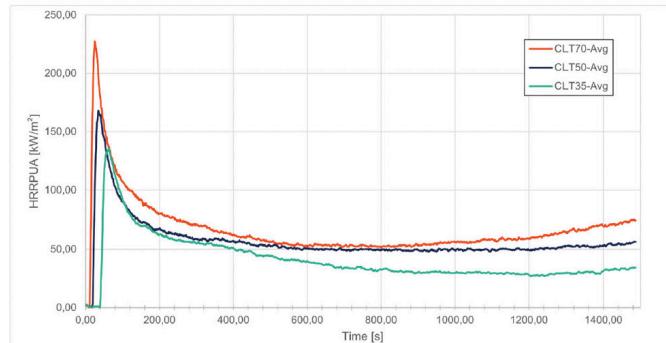


Method: Cone Calorimeter Tests at DBI

- Purpose: Provide input data for the FDS model applying the Spyro model
- Three heat flux levels: 35, 50, 70 kW/m²
- Two replicates per heat flux levels (6 test in total)
- CLT specimens, 40 mm thick



CLT test specimens before testing



Average HRRPUA as a function of time from CLT cone calorimeter test

Danmarks Tekniske Universitet

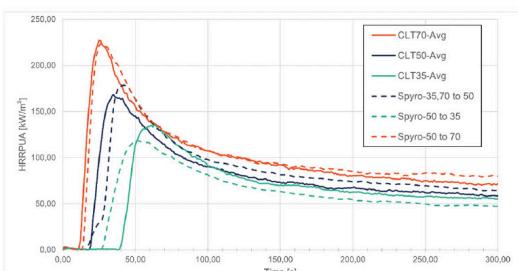
13



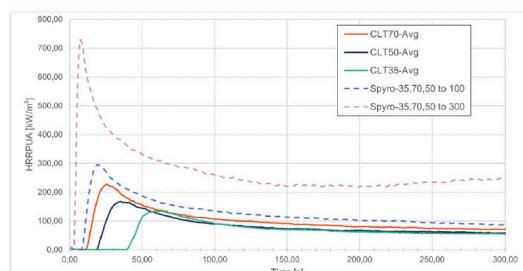
FDS Results - Validation of the Spyro Model

Testing the scaling ability of the Spyro model on both CLT and mass timber datasets

- Overall the Spyro model reproduces the same trends but the model is under-estimating the HRRPUA when using a reference curve to produce a HRRPUA curve for a lower heat flux level
- When scaling up the model tends to overestimates the HRRPUA
- What happens beyond the limit of the cone calorimeter? Results cannot be validated against experimental data



HRRPUA curves for CLT compared to the scaled curves by Spyro model within the limit of the cone calorimeter



HRRPUA curves for CLT compared to the scaled curves by Spyro model beyond the limit of the cone calorimeter

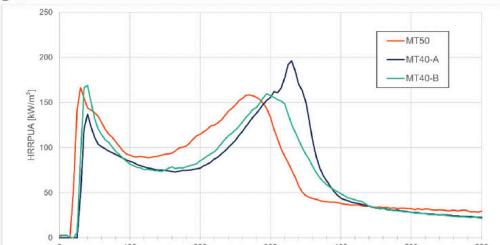
Danmarks Tekniske Universitet

14



FDS Results Using the Spyro Model

- Five simulations employing different cone calorimeter datasets (mass timber and CLT) with and without wind
- Different trends in the HRRPUA curves for mass timber and CLT – most likely due to different material thicknesses



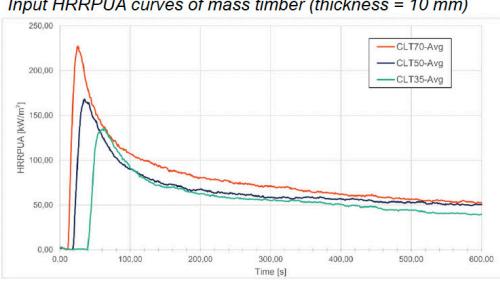
Overview of performed simulations using the Spyro model

Simulation	Wood crib		CLT ceiling and wall		
	Ignition temp. [°C]	HRRUA [kW/m²]	Dataset	Ignition temp. [°C]	Ref. heat flux [kW/m²]
SP-MT-A	300	240	RISE,MT	300	40A*,50
SP-MT-B	300	240	RISE, MT	300	40B*,50
SP-MT-BW [†]	300	240	RISE, MT	300	40B*,50
SP-CLT	300	240	Experiment, CLT	300	35,50,70
SP-CLT-W [†]	300	240	Experiment, CLT	300	35,50,70

[†] Including wind conditions of 2 m/s

* Dataset A for reference heat flux 40 kW/m² (RISE Research Institutes of Sweden)

[‡] Dataset B for reference heat flux 40 kW/m² (RISE Research Institutes of Sweden)



Input HRRPUA curves of CLT (thickness = 40 mm)



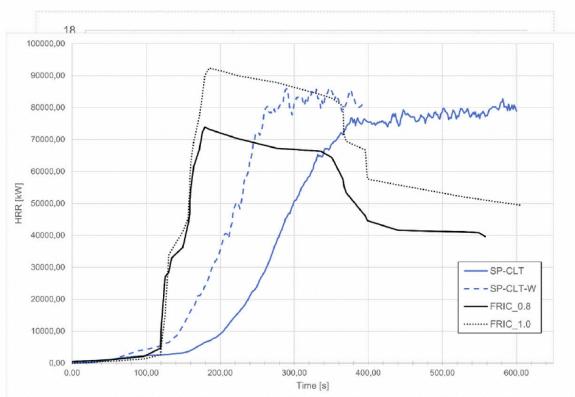
FDS Results Using the Spyro Model – Overall Findings for CLT

Visual observations

- Ignition times and time to flashover were comparable or slightly faster compared to the FRIC test
- The fire spread rate on the wood crib was also very similar to the FRIC test when including wind in the simulation

Total heat release rate

- Similar initial fire growth rate but overall slower fire growth rate after ignition of the ceiling (CLT 86-87s). Could be explained by the under-prediction tendencies when scaling down.
- Over-prediction of the maximum HRR. Could be explained by the over-prediction tendencies when scaling up
- The decay phase is not captured by the Spyro model



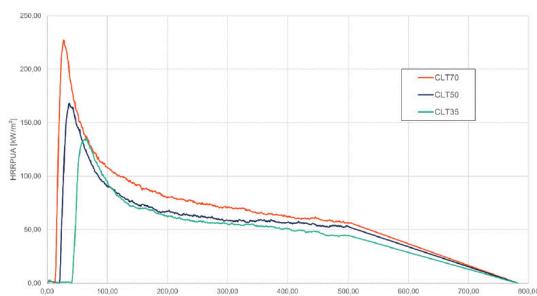
simulations employing CLT data with and without wind

HRR as a function of time (10 s Average) for the two Spyro simulations using CLT data with and without wind compared to the FRIC test

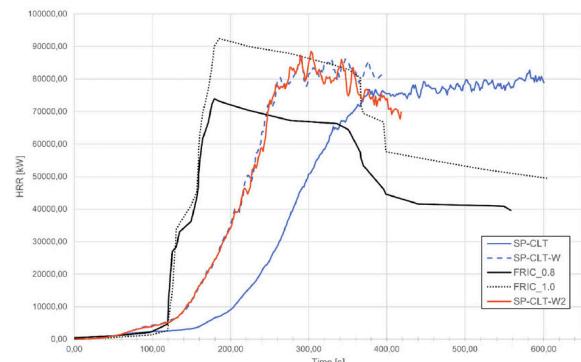


The Spyro Model – The Decay Phase

- An attempt to capture the decay phase by modifying the datasets for CLT using only the first peak



Modified HRRPUA for CLT neglecting the second peak



Alternative HRR for the Spyro simulation using



The Spyro model vs. the ITP model

Most pronounced differences

- The fire growth rate compared to the FRIC test
 - ITP model: Similar when including wind
 - Spyro model: Slower, with and without wind
- The influence of wind on the CLT surface temperatures
 - ITP model: No difference with and without wind
 - Spyro model: Faster temperature rise and higher surface temperatures when including wind

Limitations within the ITP model

- Fixed user-defined HRR
- Difficult to apply for predictive purposes without benchmark data

Limitations within the Spyro model

- Dependent on the Cone calorimeter data which is material specific and sensitive to the material thickness
- Currently the Spyro model is not able to scale the thickness of a material



Assessment of the FDS Modelling Approach and the Spyro Model

- Consider whether to use both first and second peak
- Number of reference HRRPUA curves and distribution across heat flux levels
 - Suggested heat flux levels: High, medium and low (just above critical heat flux level)
- The overall tendency to underpredict early fire growth, should be considered in terms of personal safety and egress times if the model is used to predict fire scenarios



Conclusion

- Overall the Spyro model demonstrate promising capabilities for simulating fire propagation in large compartments with exposed timber surfaces for prediction purposes
- The current tendency to under-predict the fire growth rate needs further investigations
- With continued development and further investigations, the Spyro model could play significant role in performance-based fire safety design for buildings with exposed wood surfaces in the future



Future Works

- Sensitivity study of input parameters to evaluate material properties and model parameters
- Enhanced wind modelling
- Expanded cone calorimeter testing at low heat flux levels



References

- Bjerrum, S. H. (2025). Investigating fire spread in large compartments with exposed wood surfaces using a scaling-based pyrolysis model by use of CFD, DTU Department of Civil and Mechanical Engineering. <https://findit.dtu.dk/en/catalog/68a906bc3954658f097ac69c>
- Pauner, M., Bjerrum, S., Hansen-Bruhn, I., & Husted, B. P. (2025). Cone Calorimeter Tests of Cross Laminated Timber (CLT) (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15630293>



Thanks

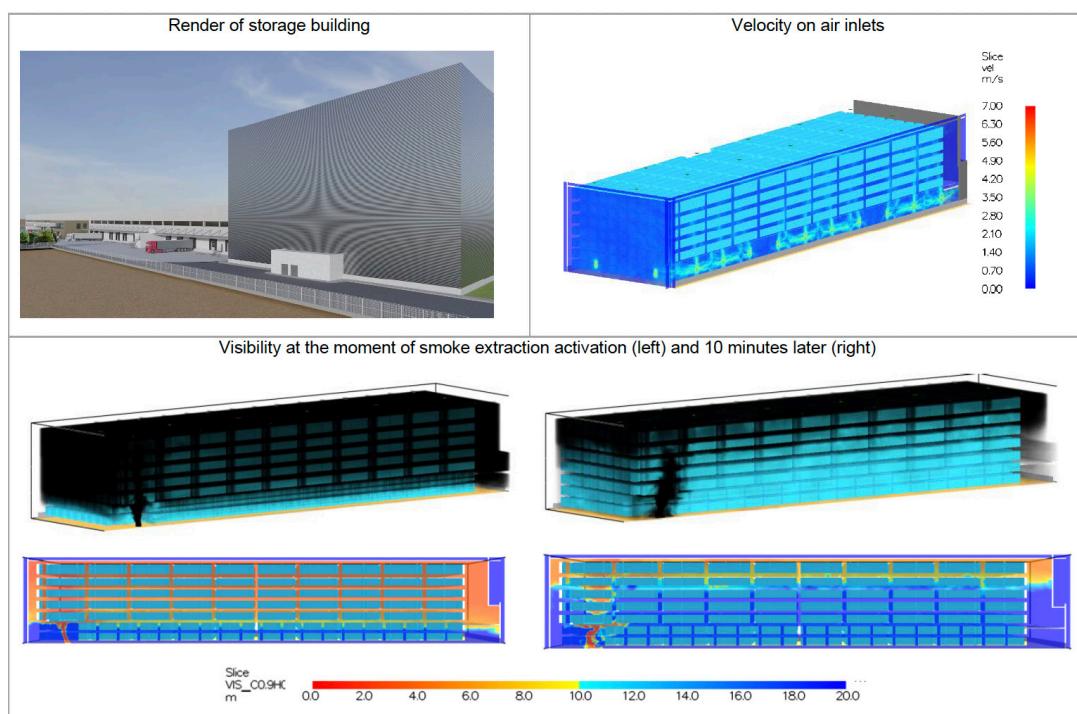
- Interested in my user manual to FDS scan the QR code



Sergio Sanz**The Use of FDS in Spanish Fire Safety Engineering: Applications and Challenges****Abstract:**

The Fire Dynamics Simulator (FDS) is increasingly used within the fire safety engineering community in Spain, primarily as a tool for performance-based design in projects that do not fully comply with prescriptive building codes. In practice, the most frequent applications involve smoke dispersion analysis to support evacuation studies (RSET/ASET), firefighter intervention strategies, and the evaluation and optimization of smoke control systems. These methodologies are applied across a wide range of assets, including train stations, stadiums, and logistics centers.

Although national guidelines are currently under development to provide a more standardized approach, international references such as BS PD 7974, NFPA standards, and SFPE guidelines remain the main framework. Many challenges still exist. On one hand, fire modeling involves significant uncertainties, particularly in defining parameters such as heat release rate, growth rate, and soot yield. On another hand, long computation times limit, from a practical perspective, both the model resolution (mesh), sensitivity assessments and the number of design iterations to be performed. Finally, estimating the accuracy and reliability of the model under study is difficult, as experimental data are often unavailable. These challenges highlight the need for engineering judgment and knowledge sharing to ensure robust and practical use of FDS in real projects.





The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain

Applications and Challenges

German FDS User Group Meeting

Sergio Sanz Solaesa

10th October 2025

ARUP

About Arup



The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

2

Arup

Founded in 1946 and dedicated to sustainable development, Arup is a collective of 18,000 designers, advisors and experts working across 140 countries. Established to be both humane and excellent, we collaborate with our clients and partners using imagination, technology and rigour to shape a better world.



34
Countries

95
Offices

+18,000
People

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

3

Arup in Germany

Local knowledge in a global network

4 Offices

390 Employees



32+ Nations
are represented
among our employees

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

4

Arup in Spain



In Spain we have more than 30 years of experience offering a wide range of services and projects to our clients. We work on projects of all types: singular building, urban planning and sustainability, as well as specialized consulting and advisory services in various fields of civil engineering.

+30
Years

+350
People

+6,000
Projects

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

5

Our markets



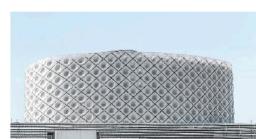
Cities



Highways



Aviation



Healthcare



Sport



Commercial



Arts & Culture



Hotels & Leisure



Residential



Education



Energy



Science, Industry & Tech.

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

6

Our services

ARUP

Design services

- | | |
|--|--|
|  Structural engineering |  Façades |
|  Mechanical engineering |  Acoustics |
|  Electrical engineering |  Lighting |
|  Civil engineering |  Fire engineering |
|  Geotechnics |  CFD Modelling |
|  Architecture | |

Consulting services

- | |
|--|
|  Transport advisory |
|  Property advisory |
|  Sustainability |
|  Energy |
|  Foresight |
|  Advanced digital engineering |

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

7

ARUP

Performance-Based Design in Spain



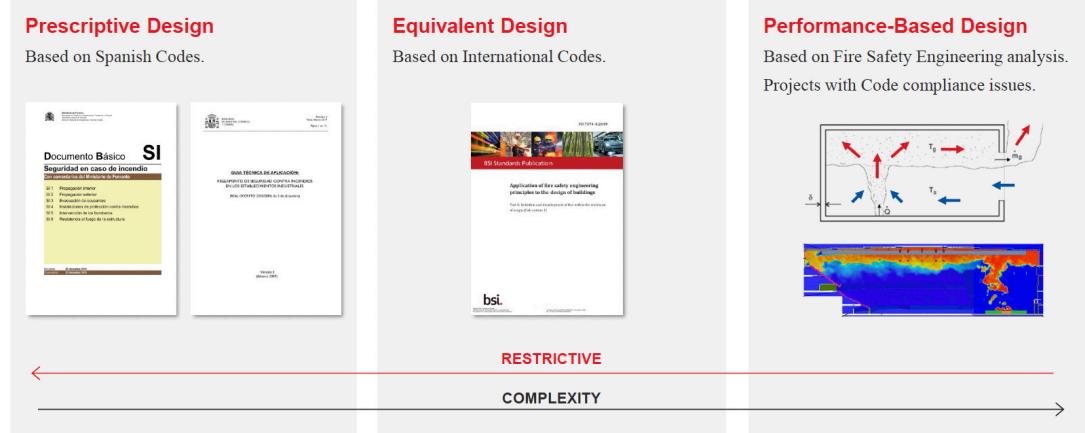
The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

8

ARUP

Performance-Based Design in Spain

From Prescriptive Design to Performance-Based Design



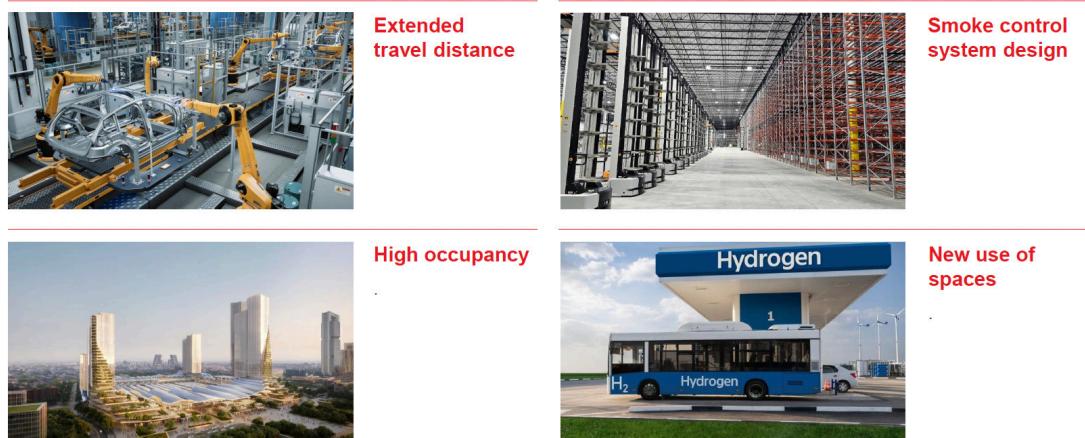
The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

9

ARUP

Performance-Based Design in Spain

Most common Code compliance issues



The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

10

ARUP

Performance-Based Design in Spain

Framework and Tools

Framework

- International references: EN, NFPA, British Standards (BS PD-7974), SFPE, NIST or FM Global.
- New Guidelines being developed in Spain to cover Performance-Based Design. They include requirements and recommendations for FDS modelling.

PBD Guide of Catalonia (2017)



PBD Guide of Madrid (2025)



Tools

Analytical calculations

Two zone models (CFAST, OZone)

3D Pedestrian Modelling (MassMotion, PathFinder)

CFD Simulations (FDS, FireFOAM, ANSYS)

FDS Simulations

Assessment of tenability conditions for evacuation (ASET/RSET) and fire services intervention.

Analysis of smoke control system performance.

Thermal and radiation analysis to predict flash-over, structural damage and fire propagation

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

11

ARUP

Performance-Based Design in Spain

Framework and Tools

Framework

- International references: EN, NFPA, British Standards (BS PD-7974), SFPE, NIST or FM Global.
- New Guidelines being developed in Spain to cover Performance-Based Design. They include requirements and recommendations for FDS modelling.

PBD Guide of Catalonia (2017)



PBD Guide of Madrid (2025)



Some snippets from PBD Guide of Madrid (2025)

NON-COMPLIANCE WITH PERFORMANCE DESIGN	REQUIREMENTS TO MEET TARGETS	EFFECTIVENESS CRITERIA	ADDITIONAL SECURITY MEASURES THAT COULD ASSIST IN MEETING THE OBJECTIVES
EVACUATION DISTANCES	ASET>RSET	At 1 m above the ground, during RSET: <= 60 °C Visibility > 10 m Radiation: 2,5 kW/m² CO2: < 50 ppm	Improve the lighting of evacuation routes: - LED illumination of routes; - LED illumination of exits
	Enabling intervention from within	At 1,8 m above the ground, during RSET: <= 100 °C Visibility > 10 m Radiation: 3 kW/m²	Install a high sensitivity detection system [e.g. Class A or B aspiration detection systems]. Implement an emergency management that includes training of workers and regular drills.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{air} c_p T_{air} \sqrt{\Delta}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Cell sizes in a ratio $D^*/5 > \Delta > D^*/20$ (recommended $D^*/4 > \Delta > D^*/16$) are considered acceptable.

In the case of a design with several calculation grids, these must be aligned. Preferably, the size of the cells should be the same or, failing that, follow a 1:2, 1:4, etc. ratio. Under no circumstances should cells of different meshes overlap.

Material	Polyurethane foam "GM37"
Formulation	CH1200 2NO ₂₈
Enthalpy of combustion _{air} (kJ/g)	28
CO production (g/g)	0,024
CO ₂ production (g/g)	1,63
Soot production (g/g)	0,113

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

12

ARUP

Some Applications



The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

13

ARUP

Some applications

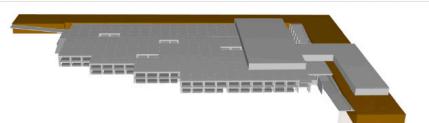
Parking with natural ventilation through façade

What?

40.000m² parking facility distributed over two underground levels.

FDS simulations to calculate tenability conditions (visibility, temperature, toxicity and radiation) in order to assess evacuation (ASET) and fire services intervention.

Parking FDS model



Visibility slice



Why?

Open stairs used for evacuations are not permitted under Spanish codes.

Fire Services required CFD smoke modeling to verify proper smoke evacuation based on natural ventilation through perimetral and central openings.

The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

15

Some applications

ARUP

Optimization of smoke outlet vents

What?

Clothing logistic center of 172.000m².

Smoke evacuation system based on 85 smoke reservoirs and about 1100 smoke vents (AOVs).

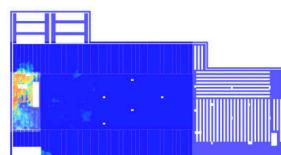
FDS simulations to reduce the number of smoke vents installed due to high maintenance costs.



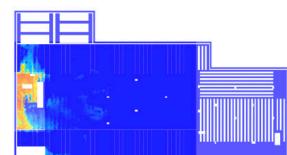
Why?

Reducing the number of smoke vents was a deviation from the prescriptive design.

Visibility plots with the original number of AOVs



Optimized solution



The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

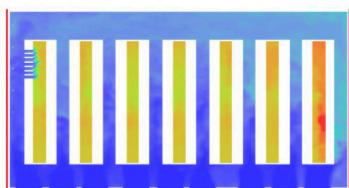
16

Some applications

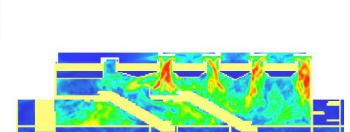
ARUP

More examples

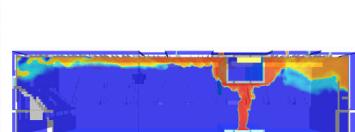
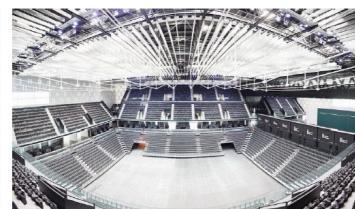
Data Centers



Train and Metro Stations



Stadia



The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

17

ARUP

Challenges



The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

18

ARUP

FDS for Performance-Based Design

Challenges



Uncertainty in Fire modelling

In most cases, the most important parameters to define the fire are:

- Maximum heat release rate (HRR max).
- Growth rate (α).
- Soot yield (Y_s).

These parameters are highly dependent on the type of fuel and its configuration, making it very project-specific.

Limit information is available in public databases (BS 7974, NFPA, SFPE, NIST, FSRI).



High computational cost

Large domains and long flow times (20-60 minutes) limit the mesh resolution to make the computational time feasible.

Limitation on sensitivity assessments and design iterations.

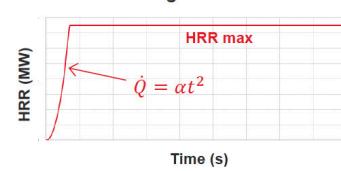
Future application of AI or GPU could reduce the computational time.



Hard to validate the results

Difficult to estimate the accuracy of the models due to the lack of experimental data.

Fire Curve Modelling



Addressing these challenges requires the application of robust fire and CFD engineering judgment and the careful incorporation of safety margins.

ARUP

Manuel Osburg, Gregor Jäger, Benjamin Schröder, Kristian Börger

**Quantifizierung der Ruß- und Schadstofffreisetzung bei Brandsimulationen –
Entwurf eines geänderten Konzepts zur Ermittlung der Anhaltswerte der Rauchausbeuten**

Abstract:

1. Einleitung

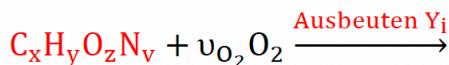
Die Herleitung von Bemessungsbränden bildet die Grundlage für die Simulation von Bränden im Rahmen ingenieurtechnischer Nachweise. Sie dienen der Quantifizierung von Brandszenarien im Hinblick auf die Freisetzung von Wärme und Rauch. Neben der zeitabhängigen Wärmefreisetzungsraten umfassen Bemessungsbrände weitere wesentliche Parameter wie die Ausbeuten an Verbrennungsprodukten, die effektive Verbrennungswärme sowie andere steuernde Größen der Verbrennungsreaktion, die für die Nachweisführung relevant sind.

Der *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes* [1] enthält ein Konzept zur Ermittlung der Anhaltswerte für Rauchausbeuten, das jedoch in seiner derzeitigen Form unvollständig ist und zu Fehlanwendungen führen kann. Der vorliegende Beitrag stellt ein überarbeitetes und erweitertes Konzept vor, das eine anwendungsorientierte Herleitung der genannten Parameter ermöglicht. Das Konzept fügt sich in die Systematik der Normreihe DIN 18009 ein und soll in die Norm DIN 18009-3 „Brandschutzingenieurwesen - Teil 3: Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände“ (derzeit in Bearbeitung) Einzug finden.

Ein zentrales Element ingenieurtechnischer Nachweise ist die Sichtweitenprognose auf Basis der Rußfreisetzung. Bestehende Modelle weisen hier erhebliche Unsicherheiten auf. Dieser Beitrag zeigt diese Defizite auf und stellt alternative Simulationsmethoden vor, die eine realistischere und zuverlässigere Prognose der Sichtweite ermöglichen.

2. Entstehung und Wirkung von Verbrennungsprodukten

Für die Verbrennung organischer Stoffe (auf Kohlenstoff basierende chemische Verbindungen) kann im Kontext des Brandschutzingenieurwesens allgemein von folgender vereinfachten Reaktion ausgegangen werden:



Der gewählte Brandstoff $C_xH_yO_zN_v$ reagiert mit Sauerstoff O_2 und bildet in einer einstufigen Verbrennungsreaktion Kohlenstoffdioxid CO_2 und Wasser H_2O . Bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen zusätzlich Kohlenstoffmonoxid CO und Ruß (besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff C). Bei Vorhandensein stickstoffhaltiger Stoffe wird zusätzlich Stickstoff N_2 und ggf. Cyanwasserstoff HCN gebildet. Ob und in welchem Ausmaß eine Verbrennungsreaktion vollständig oder unvollständig verläuft, wird maßgeblich durch die im Brandstoff enthaltenen Elemente, deren Bindungsverhältnisse und das verfügbare Sauerstoffangebot bestimmt.

Bei der Herleitung von Bemessungsbränden wird grundsätzlich zwischen zwei Brandregimen mit unterschiedlichem Sauerstoffangebot unterschieden [1]:

- a) Die Brandleistung wird durch die Beteiligung der Brandlasten am Brandgeschehen limitiert (brandlastgesteuerter Brand). Es liegt ein ausreichendes Sauerstoffangebot vor.
- b) Die Brandleistung wird durch die verfügbare Luftzufuhr bzw. einen Mangel an Sauerstoff begrenzt (ventilationsgesteuerter Brand).

Lokale Brände in großen Räumen sind in der Regel brandlastgesteuert. Für Raumbrände kann mithilfe der Gl. 4.4 ff aus [1] abgeschätzt werden, ob brandlast- oder ventilationsgesteuerte Bedingungen vorliegen.:

$$\dot{Q}_{max} = \text{MIN}\{\dot{Q}_{max,f}; \dot{Q}_{max,v}\} \quad \text{mit} \quad \dot{Q}_{max,f} = RHR_f \cdot A_f$$

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

Beim Übergang vom brandlast- zum ventilationsgesteuerten Brand $\dot{Q}_{\max,f} = \dot{Q}_{\max,v}$ beträgt das globale Äquivalenzverhältnis^[a] $\Phi = 1$.

Wie aus der in Abbildung 1 dargestellten Abhängigkeit zwischen Äquivalenzverhältnis und Rußausbeute ersichtlich ist, hat die Ventilationssteuerung ab $\Phi > 1$ einen signifikanten Einfluss auf die Rußbildung.

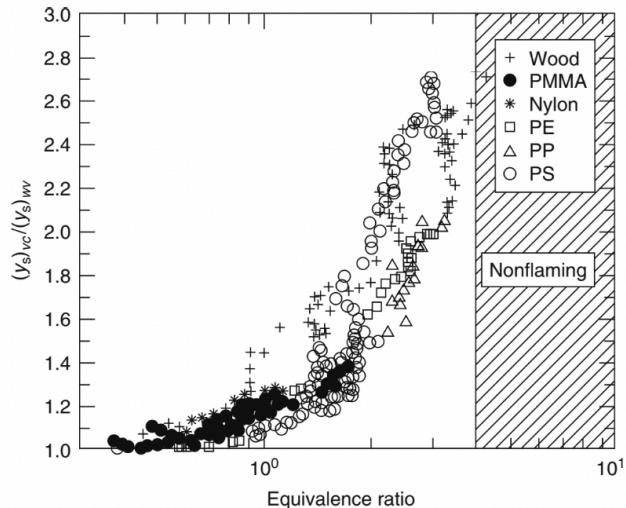


Abbildung 1: Verhältnis der Rußausbeute für brandlast- und ventilationsgesteuerte Bedingungen (Index vc steht für ventilationsgesteuerte und wv für brandlastgesteuerte Brände) [2]

Bei der Verwendung von Modellen für die Brandsimulation, wie beispielsweise dem *Fire Dynamics Simulator (FDS)*, kann die Verbrennungsreaktion durch Angabe der **Summenformel des Brandstoffs** $C_xH_yO_zN_v$ und der **Ausbeuten der Verbrennungsprodukte** Y_i in g/g definiert werden.

Das *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* enthält eine umfangreiche Sammlung experimentell ermittelter Werte für die maßgeblichen Ausbeuten der Verbrennungsprodukte [3]. Diese, in der Regel im Labormaßstab erhobenen Daten, dienen als Grundlage für die im aktuellen *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes* [1] enthaltenen Werte. Darüber hinaus bilden sie die Basis für das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept zur anwendungsorientierten Ermittlung von Rauchausbeuten.

Für den ingenieurtechnischen Nachweis einer ausreichenden Entrauung ist insbesondere die Bildung von Ruß von Bedeutung. Bei Nachweisen der Personensicherheit sind außerdem die toxikologisch ausschlaggebenden Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid und Cyanwasserstoff relevant. Erläuterungen zur Sichtweitenprognose finden sich in Kapitel 4.

a) Das **globale Äquivalenzverhältnis** Φ ist als Verhältnis der tatsächlichen Ventilation eines Brandraums durch die stöchiometrisch erforderliche Ventilation definiert [2].

Bei der Beschreibung der Verbrennungsreaktion sind jedoch nicht nur die stofflichen Bedingungen von Relevanz, sondern auch die **energetischen Wechselwirkungen**.

Die Freisetzungsraten der Verbrennungsprodukte \dot{G}_i ergeben sich aus dem Produkt der jeweiligen Ausbeute Y_i und der Massenverlustrate \dot{m} , die auch als Abbrandrate bezeichnet wird. Letztere kann als Quotient der Wärmefreisetzungsraten \dot{Q} und der effektiven Verbrennungswärme H_{eff} (auch als effektiver Heizwert bezeichnet) beschrieben werden. Somit spielen neben der Wärmefreisetzungsraten und den Ausbeuten der Verbrennungsprodukte auch die effektive Verbrennungswärme eine wesentliche Rolle bei der Modellierung der Verbrennungsreaktion.

$$\dot{G}_i = Y_i \cdot \dot{m} = Y_i \cdot \dot{Q}/H_{eff}$$

Um den Einfluss der Verbrennungswärme auf die Freisetzungsraten der Verbrennungsprodukte zu berücksichtigen, wird die Rußausbeute zu Vergleichszwecken auf die Verbrennungswärme bezogen:

$$Y_R^* \text{ (g/MJ)} = Y_R \text{ (g/g)} / H_{eff} \text{ (MJ/kg)} \cdot 10^3 \text{ (g/kg)}$$

Die bei der Verbrennung organischer Stoffe pro Masseneinheit des verbrauchten Sauerstoffs erzeugte Wärme ist eine nahezu konstante Größe mit dem Wert $E_{O_2} = 13,1 \text{ MJ/kgO}_2$ [4]. Durch die Vorgabe der Summenformel des Brandstoffs und der Ausbeuten ergibt sich aus den Stoffmengen v_i und den molaren Massen W_i indirekt die effektive Verbrennungswärme:

$$H_{eff} \approx v_{O_2} W_{O_2} / v_F W_F \cdot E_{O_2}$$

Die optionale Eingabe einer nicht zutreffenden Verbrennungswärme (z. B. des Heizwertes) würde zu einer modellinternen Korrektur des Wertes E_{O_2} und zu einer Über- oder Unterschätzung der Ventilationssteuerung bzw. der Temperaturentwicklung führen. Dieser Sachverhalt wurde bei der Herleitung des geänderten Konzepts berücksichtigt.

Ein weiterer Aspekt der Verbrennungsmodellierung ist die **radiative Wirkung der Flamme**. Während der konvektive Anteil der Wärmefreisetzungsraten \dot{Q}_c über den Plume abtransportiert wird und dabei Massenstrom, Geschwindigkeit und Temperatur in der Rauchgassäule und in der Rauchgasschicht bestimmt, wird der verbleibende Anteil der in der Verbrennungszone freigesetzten Wärme

$$\dot{Q}_r = \chi_r \cdot \dot{Q}$$

in alle Richtungen abgestrahlt. Dieser Effekt ist insbesondere bei der Bestimmung von Brandeinwirkungen auf Bauteile in der Umgebung der Flamme von Relevanz.

Da die Strahlungswirkung maßgeblich von heißen Rußpartikeln im Brandrauch verursacht wird, besteht eine starke Korrelation zwischen der energiebezogenen Rußausbeute Y_{R^*} und dem Strahlungsanteil χ_r (siehe Abbildung 2). Diese Korrelation begründet sich auf Experimenten im Labormaßstab. Bei größeren Brandflächen nimmt der Strahlungsanteil tendenziell ab, da die Strahlung in der Hülle der die Flammen umgebenden Verbrennungsprodukte absorbiert wird [5].

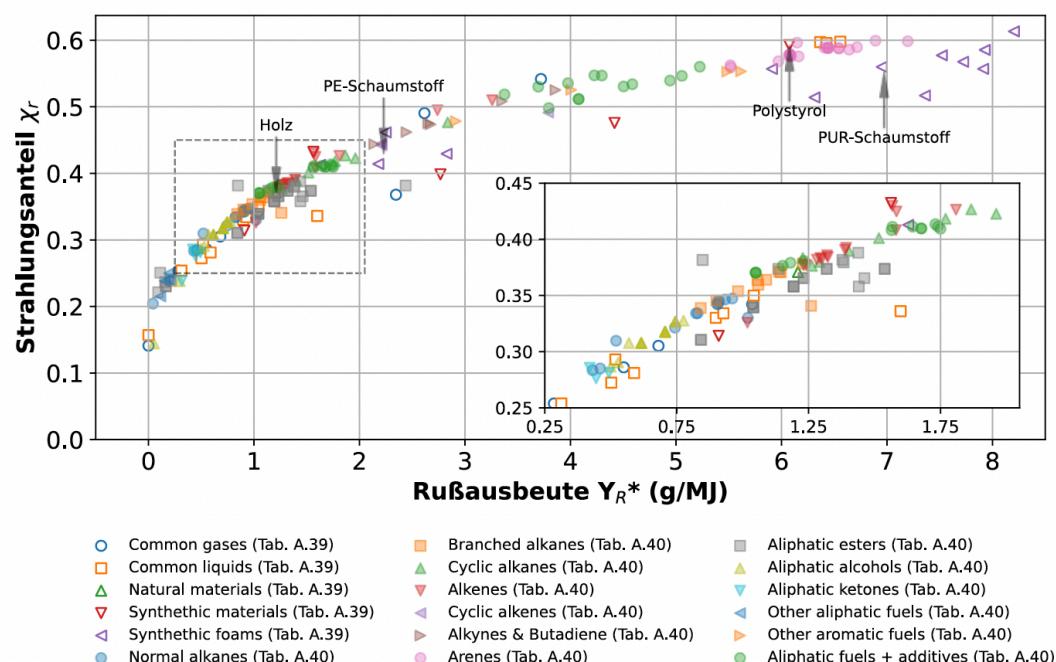


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Rußausbeute und Strahlungsanteil [3]

3. Entwurf eines geänderten Konzepts

Im Folgenden werden verschiedene Strategien beschrieben, um geeignete Anhaltswerte für Ausbeuten von Verbrennungsprodukten (im Folgenden als Rauchausbeuten bezeichnet) und andere Anhaltswerte zur Beschreibung der Verbrennungsreaktion auszuwählen. Die dabei angegebenen Parameter gelten für die flammende Verbrennung organischer Stoffe, wie es für Brände in baulichen Anlagen charakteristisch ist.

3.1 Verwendung von stoffbezogenen Werten

Können die brennbaren Stoffe für einen individuellen Bemessungsbrand konkret beschrieben werden, bietet sich die Verwendung stoffbezogener Werte an. Diese können aus der Literatur [3] entnommen oder im Ergebnis labormaßstäblicher Brandversuche mittels gravimetrischer oder photometrischer Messungen (z. B. Cone Calorimeter [6]) ermittelt werden.

Die in der Literatur dokumentierten oder in Experimenten gewonnenen Parameter gelten überwiegend für brandlastgesteuerte Bedingungen. Bei ventilationsgesteuerten Bedingungen kommt es zur vermehrten Bildung von Produkten der unvollständigen Verbrennung und somit zum Anstieg der CO- und Rußausbeute bzw. zur Verringerung der CO₂-Ausbeute und der effektiven Verbrennungswärme. Mithilfe empirisch bestimmter Gleichungen, z. B. aus [7], können die Werte in Abhängigkeit der Ventilationsbedingungen korrigiert werden.

3.2 Verwendung von stoffgruppenbezogenen Werten

Bei hinreichend identifizierbaren Brandstoffen und deren stofflicher Zusammensetzung können die in Tabelle 1 aufgeführten Referenz-Brandstoffe als Repräsentanten der jeweils zugeordneten Stoffgruppen gewählt werden. Für diese Stoffgruppen gelten dann die entsprechenden Anhaltswerte in Abhängigkeit der Ventilationsbedingungen. Die Anhaltswerte für den Fall eines lokalen Brandes bzw. brandlastgesteuerter Bedingungen sind in Tabelle 2 dokumentiert. Tabelle 3 enthält die Anhaltswerte für den Fall ventilationsgesteuerter Bedingungen.

Tabelle 1: Zuordnung der Referenz-Brandstoffe zu vier Stoffgruppen

Rußfreisetzung	Referenz-Brandstoff	Stoffgruppen
gering	Holz / Zellulose	Materialien mit hohem Holz- / Zelluloseanteil, biogene Baustoffe, Vegetation, gesättigte Kohlenwasserstoffe (z. B. Propan), Alkohole (z. B. Ethanol), Baustoffe mit geringer Rauchentwicklung (s1 nach DIN EN 13501-1)
mittel	Polyethylen-Schaumstoff	Einrichtungen und Möbel aus Materialien mit geringem Kunststoffanteil, ungesättigte Kohlenwasserstoffe, Baustoffe mit mittlerer Rauchentwicklung (s2 nach DIN EN 13501-1)
hoch	Polystyrol	Einrichtungen und Möbel aus Materialien mit hohem Kunststoffanteil, Fahrzeugbrände, Mülltonnenbrände, aromatische Kohlenwasserstoffe
sehr hoch	PVC	Halogenierte Kunststoffe (> 30 % Halogenanteil)

Tabelle 2: Anhaltswerte für Rauchausbeuten und andere Kennwerte zur Beschreibung der Verbrennungsreaktion für lokale Brände / brandlastgesteuerte Bedingungen ($\Phi \leq 1$ [a]), entnommen aus Tabelle A.39 in [3]

Rußfreisetzung	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Referenz-Brandstoff	Holz	PE-Schaum [b]	Polystyrol	PVC [c]
Summenformel [d]	C ₆ H ₁₀ O ₆	C _{2,1} H _{3,9} O _{0,26}	C ₈ H _{7,9} O _{0,97}	C ₂ H ₃ Cl
Effektive Verbrennungs-wärme H _{eff} (MJ/kg)	12,4	34,2	27,0	10,3 [d]
CO-Ausbeute Y _{CO} (g/g)	0,004	0,020	0,060	0,063
Rußausbeute Y _R (g/g)	0,015	0,077	0,164	0,172
Rußausbeute Y _{R*} (g/MJ)	1,2	2,3	6,1	16,7
Strahlungsanteil χ_r [e]	0,2 - 0,35		0,35 - 0,5	

b) Bei dem Referenz-Brandstoff **Polyethylen-Schaum** handelt es sich um den Mittelwert von vier Einzelwerten für das Material *Polyethylene foams* aus Tabelle A.39 in [3].

c) Bei der Verbrennung von PVC wird als reizend wirkender Brandrauchbestandteil **Chlorwasserstoff (HCl)** freigesetzt. Für den konservativen Fall, dass das enthaltene Chlor vollständig zu Chlorwasserstoff reagiert, beträgt die HCl-Ausbeute $Y_{HCl} = 0,583$ g/g.

d) Diese Parameter wurden im **Ergebnis einer Optimierungsberechnung** so abgeleitet, dass die Verbrennungsreaktion ausgeglichen ist und die Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit des Sauerstoffverbrauchs $E_{O_2} = 13,1$ MJ/kgO₂ beträgt (siehe auch [7]).

e) Die Auswahl eines geeigneten Wertes für den **Strahlungsanteil** hängt von u. a. der Brandherdfläche sowie vom Anwendungsfall ab. In der Regel sollte $\chi_r = 0,35$ gewählt werden.

Tabelle 3: Anhaltswerte für Rauchausbeuten und andere Kennwerte zur Beschreibung der Verbrennungsreaktion für ventilationsgesteuerte Bedingungen ($\Phi = 2$ [a])

Rußfreisetzung	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Referenz-Brandstoff	Holz	PE-Schaum [b]	Polystyrol	PVC [c]
Summenformel [d]	$C_6H_{10}O_6$	$C_{2,1}H_{3,9}O_{0,26}$	$C_8H_{7,9}O_{0,97}$	C_2H_3Cl
Effektive Verbrennungswärme H_{eff} (MJ/kg) [d]	10,9	29,8	20,7	5,9
CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g) [f]	0,145	0,388	0,137	0,343 [d]
Rußausbeute Y_R (g/g) [f]	0,028	0,124	0,330	0,237
Rußausbeute Y_R^* (g/MJ)	2,6	4,2	15,9	40,2
Strahlungsanteil χ_r [e]	0,35 - 0,5			

3.3 Verwendung von konservativen Werten

Für typische **Mischbrandlasten** in Standardgebäuden bzw. für Standardnutzungen [g] kann auf Richtwerte aus einem neuseeländischen Regelwerk zurückgegriffen werden [8]. Die entsprechenden Anhaltswerte für diesen generischen Referenz-Brandstoff sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Anhaltswerte für Rauchausbeuten und andere Kennwerte zur Beschreibung einer generischen Verbrennungsreaktion für Mischungen typischer Brandstoffe in Wohn- und Bürogebäuden oder vergleichbaren Nutzungen (entnommen aus [8])

Ventilationsbedingung	lokaler Brand oder brandlastgesteuert	ventilationsgesteuert
Referenz-Brandstoff	Mischbrandlast	
Summenformel [d]	$CH_{2,46}O_{0,61}$	
H_{eff} (MJ/kg)	20,0	14,8 [d]
CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g)	0,04	0,40
Rußausbeute Y_R (g/g)	0,07	0,14
Rußausbeute Y_R^* (g/MJ)	3,5	9,5
Strahlungsanteil χ_r [e]	0,35 - 0,5	

f) Die CO- und Ruß-Ausbeuten für den **ventilationsgesteuerten Fall** wurden mithilfe empirisch bestimmter Korrelationen aus [2] und einem Äquivalenzverhältnis von $\Phi = 2$ bestimmt.

g) Eine Auswahl an **Standardgebäuden bzw. Standardnutzungen** findet sich in Tabelle BB.1 der DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09.

Die in [8] bzw. Tabelle 4 enthaltenen Rußausbeuten decken die durch Wilk experimentell bestimmten Werte für Brände in möblierten Räumen ab [9].

Tabelle 5: Mittelwert experimentell bestimmter Rußausbeuten bei Raumbränden [9]

Ventilationsbedingung	brandlastgesteuert	ventilationsgesteuert
Rußausbeute Y_R (g/g)	0,052	0,115

Wenn keine spezifischen Anhaltspunkte zur Identifizierung der maßgebenden Brandstoffe vorliegen, kann **Polyurethan** ^[h] als Repräsentant für eine Vielzahl möglicher Brandstoffe herangezogen werden. Unter brandlastgesteuerten Bedingungen deckt die energiebezogene Rußausbeute etwa 90 % der in Tabelle A.39 [3] aufgeführten Stoffe ab (exkl. halogenierter Stoffe). Die Zugrundelegung dieses Referenz-Brandstoffs eignet sich besonders dann, wenn Nachweise zur Personensicherheit mit personenbezogener Betrachtung geführt werden sollen (FED-Konzept gemäß DIN 18009-2), da in diesem Zusammenhang auch die Ausbeute des toxikologisch relevanten Cyanwasserstoffs (HCN) berücksichtigt wird.

Tabelle 6: Anhaltswerte für Rauchausbeuten und andere Kennwerte zur Beschreibung der Verbrennungsreaktion von Polyurethan-Schaum

Ventilationsbedingung	lokaler Brand oder brandlastgesteuert	ventilationsgesteuert
Referenz-Brandstoff	Polyurethan-Schaum ^[h]	
Summenformel ^[d]	$\text{CH}_{1,16}\text{O}_{0,40}\text{N}_{0,14}$	
H_{eff} (MJ/kg) ^[d]	16,8	10,0
CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g)	0,03	0,30 ^[i]
HCN-Ausbeute Y_{HCN} (g/g) ^[j]	0,003	0,03
Rußausbeute Y_R (g/g)	0,118	0,24 ^[i]
Rußausbeute Y_R^* (g/MJ)	7	24
Strahlungsanteil χ_r ^[e]		0,35 - 0,5

h) Bei dem Referenz-Brandstoff **Polyurethan-Schaum** handelt es sich um den Mittelwert von sechs Einzelwerten für das Material *Polyurethane (rigid) foams* aus Tabelle A.39 in [3].

i) Die **CO- und Rußausbeute** für den ventilationsgesteuerten Fall wird mittels empirisch begründbarer Verhältnisse abgeschätzt: $Y_{\text{CO},\text{vc}} / Y_{\text{CO},\text{wv}} = 10$ und $Y_{\text{s},\text{vc}} / Y_{\text{s},\text{wv}} = 2$, siehe hierzu [2].

j) Die **HCN-Ausbeute** wird mittels eines empirisch begründbaren Verhältnisses abgeschätzt: $Y_{\text{CO}} / Y_{\text{HCN}} = 10$, siehe hierzu [10].

Der Referenz-Brandstoff Polyurethan-Schaum wird auch durch die Schweizer Brandschutzrichtlinie „Nachweisverfahren im Brandschutz“ [11] vorgeschlagen; die dazugehörigen Zahlenwerte finden sich in [12].

3.4 Zusammenfassung

Abbildung 3 fasst die Anhaltswerte für die energiebezogenen Rußausbeuten für den brandlast- und ventilationsgesteuerten Fall zusammen. Zudem enthält diese Abbildung die statistische Verteilung der in Tabelle A.39 [3] gelisteten Stoffe in Form eines Box-Plots.

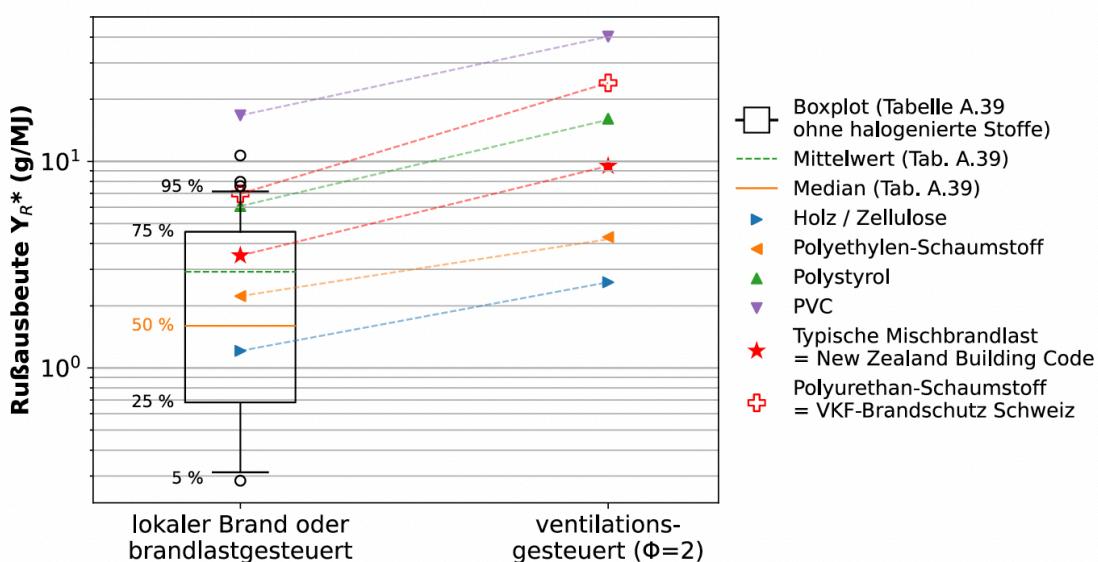


Abbildung 3: Zusammenfassung der Anhaltswerte für die Rußausbeuten

Die vorgeschlagenen Anhaltswerte für die Rußausbeuten decken die Verteilung der aus der Literatur [3] entnommenen Werte gut ab. Die aus internationalem Regelwerk entnommenen Anhaltswerte liegen über dem Mittelwert bzw. im Bereich des 95 %-Quantil.

4. Sichtweitenprognose bei Brandsimulationen

Der Nachweis der Sichtweite im Brandfall basiert in der Regel auf der experimentell ermittelten Gesetzmäßigkeit nach Jin [13]:

$$V = C/K$$

Dabei beschreibt V die Entfernung, bei der Personen ein Objekt, wie z. B. ein Notausgangsschild in einer verrauchten Umgebung gerade noch erkennen können. Über den Extinktionskoeffizienten K kann eine Korrelation zur Beleuchtungsart der verwendeten Notausgangsschilder ($C = 3$ für beleuchtete und $C = 8$ für hinterleuchtete Schilder) hergestellt werden.

Diese Methode ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, die im Wesentlichen mit dem Extinktionskoeffizienten des Rauches zusammenhängen. Numerische Brandmodelle wie FDS berechnen K als lokale Größe anhand der lokalen Rußkonzentration c_R sowie des massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m .

$$K = K_m \cdot c_R$$

K_m beschreibt die Lichtextinktion durch Rauchpartikel, differenziert jedoch nicht zwischen Streuung und Absorption. Folglich erlauben diese Modelle keine präzise Aussage über die tatsächliche Beeinträchtigung der Wahrnehmung durch Verdunkelung oder Unschärfe.

Der in Sichtweitenmodellen hinterlegte Standardwert $K_m = 8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ wurde von Mulholland und Croakin aus sieben Studien mit insgesamt 29 verschiedenen Brandstoffen mit flammender, stöchiometrischer oder überventilierter Verbrennung als Mittelwert erhoben. Die Untersuchungen umfassten photometrische Messungen der Lichtransmission bei einer Wellenlänge von $\lambda = 633 \text{ nm}$ sowie gravimetrische Messungen innerhalb von Cone Kalorimetern [14].

Untersuchungen von Gottuk et al. [15] und Hamins et al. [16] legen jedoch nahe, dass der Extinktionskoeffizient durch entsprechende Brandmodelle in realmaßstäblichen Anwendungen bis um den Faktor 5 überschätzt und die Sichtweite entsprechend unterschätzt wird. Diese Abweichungen sind möglicherweise auf die Art der Messung sowie Skalierungseffekte des massenspezifischen Extinktionskoeffizienten, der Energiefreisetzung bzw. Verbrennungseffektivität und der Rußausbeute zurückzuführen. Vergleichbare Abweichungen konnten durch die Autoren dieses Beitrags durch photometrische Messungen im ungestörten Strömungsfeld von Laborbränden reproduziert werden [17].

Darüber hinaus repräsentiert der Wert für K_m die Extinktion von monochromatischem Licht und steht in einer logarithmischen Abhängigkeit mit der Wellenlänge λ . Die unreflektierte Anwendung des Standardwertes von K_m im Rahmen ingenieurtechnischer Nachweise kann demzufolge unverhältnismäßige bauliche oder anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen zur Folge haben.

Eine weitere Unsicherheit in der Nachweisführung stellt der Abgleich der berechneten Sichtweite mit den zugrunde gelegten Leistungskriterien dar. Unterschiedliche Quellen unterliegen einer erheblichen Schwankungsbreite und weisen untere Grenzwerte zwischen 4 m und 20 m für die erforderliche Sichtweite auf, je nachdem wie vertraut Personen mit der Umgebung sind. Alternative Ansätze sind die Verwendung von ASET-RSET-Differenzkarten [18] oder Visibility maps (Sichtweiten Karten) [19]. Bei letzterem wird die erforderliche Sichtweite relativ zu den relevanten Notausgangsschildern entlang der Fluchtroute als Leistungskriterium definiert. Um einer inhomogenen Rauchverteilung gerecht zu werden, wird die Sichtweite zudem nicht als lokale Größe betrachtet, sondern über einen integrierten Extinktionskoeffizienten entlang der Sichtachse berechnet. Die Karten beschreiben in der Auflösung des Berechnungsgitters der zugrunde liegen Brandsimulation an welchen Stellen das Sichtweitenkriterium erfüllt bzw. nicht erfüllt ist. Die zeitliche Aggregation verschiedener Karten ermöglicht zudem die Erstellung von ASET-Karten, die den Zeitpunkt des Sichtbarkeitsverlusts dokumentieren.

Unabhängig von der Nachweisführung bedarf die traditionelle Sichtweitenmodellierung einer grundlegenden Revision, um die tatsächlichen Randbedingungen eines Brandereignisses berücksichtigen zu können. Die durch das Modell von Jin nur indirekt erfassten Einflüsse wie die Art des Brandrauches, Umgebungslicht sowie Kontraste zwischen Notausgangszeichen und der Umgebung können z. B. durch Raytracing Modelle von Zhang [20] sowie Wahlqvist und Rubini [21], berücksichtigt werden. Diese Modelle zielen auf die Erstellung von synthetischen Bildern, z. B. von Notausgangszeichen in verrauchten Umgebungen ab, was eine individuellere Bewertung der Sichtweite erlaubt.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Zehfuß, „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., TB 04/01, März 2020.
- [2] M. M. Khan, A. Tewarson, und M. Chaos, „Combustion Characteristics of Materials and Generation of Fire Products“, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY: Springer New York, 2016, S. 1143–1232. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [3] „Appendix 2: Thermophysical Property Data“, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY: Springer New York, 2016, S. 3425–3436. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [4] C. Huggett, „Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements“, *Fire Mater.*, Bd. 4, Nr. 2, S. 61–65, Juni 1980, doi: 10.1002/fam.810040202.
- [5] C. L. Beyler, „Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires“, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY: Springer New York, 2016, S. 2591–2663. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [6] M. Osburg und S. Busse, „Quantifizierung der Rauchpartikelfreisetzung bei Brandversuchen“, gehalten auf der 3. Magdeburger Brand- und Explosions-schutztag, Magdeburg, März 2013.
- [7] „FDS Combustion and Fuel Composition Calculators“. Zugegriffen: 17. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://support.thunderheadeng.com/pyro-sim/resources/>
- [8] *C / framework for fire safety design for New Zealand building code clauses C1-C6 protection from fire*. Wellington: Ministry of Business, Innovation & Employment, 2012.
- [9] E. Wilk, M. Osburg, und I. Kotthoff, „Der Brand in Räumen Teil 10 – Rauchgase beim Brand in Räumen und Gebäuden Teil 10-1-1 – Rauchgasentwicklung und -ausbreitung im Brandraum“, *Vfdb Z. Für Forsch. Tech. Im Brandschutz*, Nr. 4/2017.
- [10] B. Forell, „Bewertung der akuten Toxizität von Brandrauch“, *Tech. Überwach.*, Bd. 51, S. 20–29, 2010.
- [11] *Brandschutzrichtlinie 27-15 Nachweisverfahren im Brandschutz*, 1. Januar 2015. Zugegriffen: 12. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-127.pdf/content>
- [12] „CFD-Brandsimulationen im Hochbau“, *SSI-Spez.*, 1/09, Zugegriffen: 12. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ssi-schweiz.ch/wp-content/uploads/2017/11/SSI_Spezial_1_2009.pdf

- [13] T. Jin, „Visibility through Fire Smoke (I)“, 1970, *Japan Association for Fire Science and Engineering*: 2. doi: 10.11196/kasai.19.2.1.
- [14] G. W. Mulholland und C. Croarkin, „Specific extinction coefficient of flame generated smoke“, *Fire Mater.*, Bd. 24, Nr. 5, S. 227–230, Sep. 2000, doi: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<227::AID-FAM742>3.0.CO;2-9.
- [15] D. Gottuk, C. Mealy, und J. Floyd, „Smoke Transport and FDS Validation“, *Fire Saf. Sci.*, Bd. 9, S. 129–140, 2008, doi: 10.3801/iafss.fss.9-129.
- [16] A. Hamins *u. a.*, „Report of experimental results for the international fire model benchmarking and validation exercise #3“, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2006. doi: 10.6028/nist.sp.1013-1.
- [17] K. Börger, A. Belt, A. Kandler, T. Schultze, und L. Arnold, „Investigation of smoke characteristics by photometric measurements“, gehalten auf der Fire and Modeling Technical (FEMTC), September 2022.
- [18] B. Schröder, L. Arnold, und A. Seyfried, „A map representation of the ASET-RSET concept“, *Fire Saf. J.*, Bd. 115, S. 103154, Juli 2020, doi: 10.1016/jfiresaf.2020.103154.
- [19] K. Börger, A. Belt, und L. Arnold, „A waypoint based approach to visibility in performance based fire safety design“, *Fire Saf. J.*, Bd. 150, S. 104269, Dez. 2024, doi: 10.1016/jfiresaf.2024.104269.
- [20] Q. Zhang, „Image based analysis of visibility in smoke laden environments“, University Hull, Hull, 2010.
- [21] J. Wahlqvist und P. Rubini, „Real-time visualization of smoke for fire safety engineering applications“, *Fire Saf. J.*, Bd. 140, S. 103878, Okt. 2023, doi: 10.1016/jfiresaf.2023.103878.



Quantifizierung der Ruß- und Schadstofffreisetzung bei Brandsimulationen

Entwurf eines geänderten Konzepts
zur Ermittlung der Anhaltswerte für Rauchausbeuten

19. Anwendertreffen der FDS Usergroup

Manuel Osburg

Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

Gregor Jäger

hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH

Benjamin Schröder

Görtzen Stolbrink & Partner mbB

Kristian Börger

Bergische Universität Wuppertal

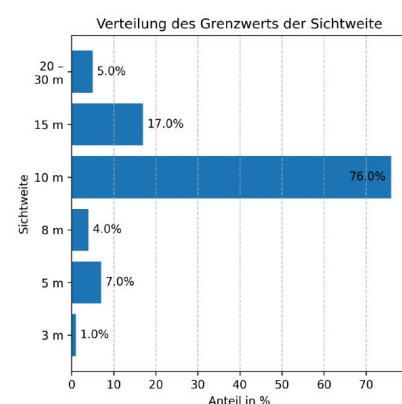
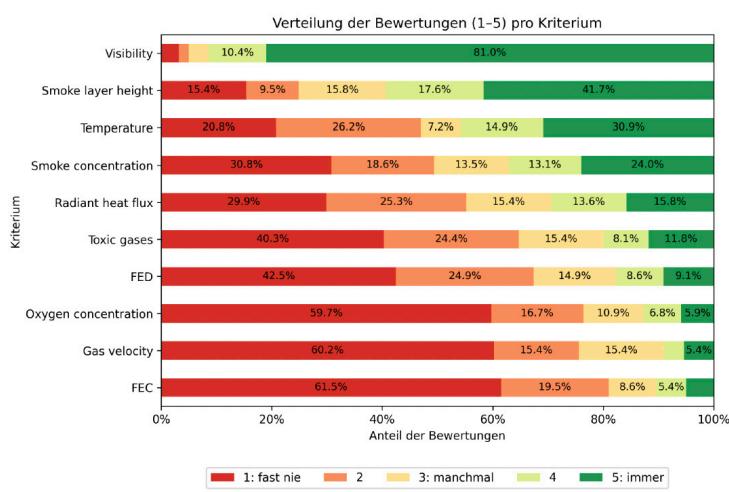
27.05.2025

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



DOI | 10.5281/zenodo.15522181

Online-Umfrage über die Anwendung von Leistungskriterien im Brandschutzingenieurwesen (254 Teilnehmer aus 43 Ländern)



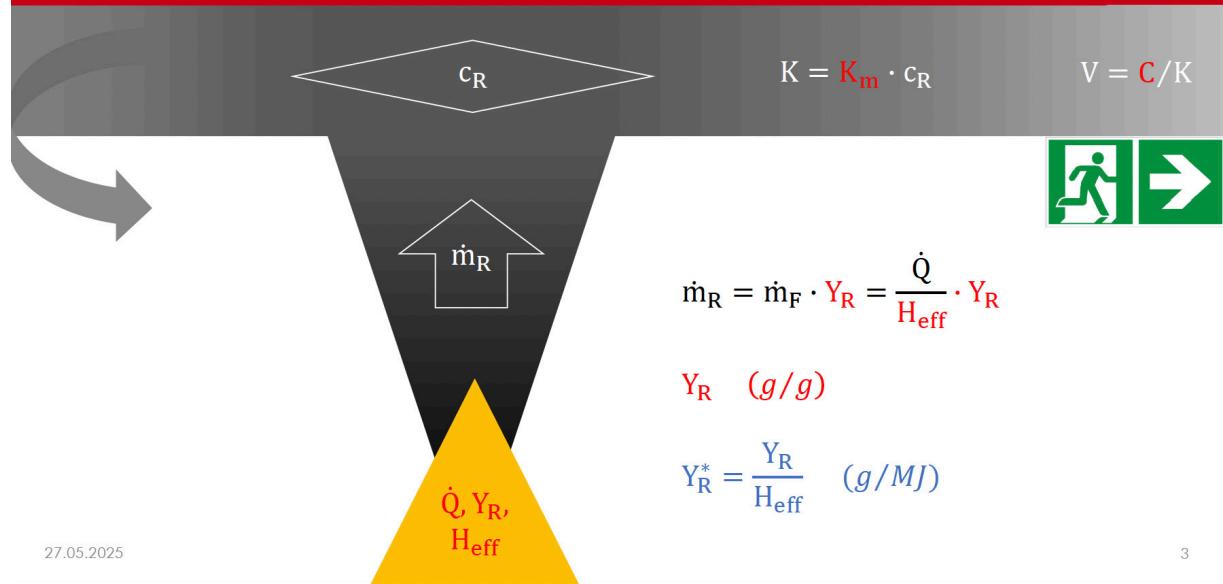
Gabriele Vigne et al., „The use of CFD and tenability criteria in Fire and Smoke Modelling in Performance Based Engineering processes – An Online Survey“. SFPE European Conference. Edinburgh, UK, 2025.

27.05.2025

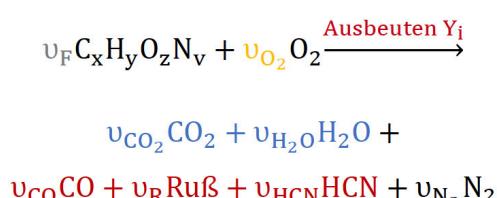
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

2

Ruß- und Schadstofffreisetzung bei Brandsimulationen

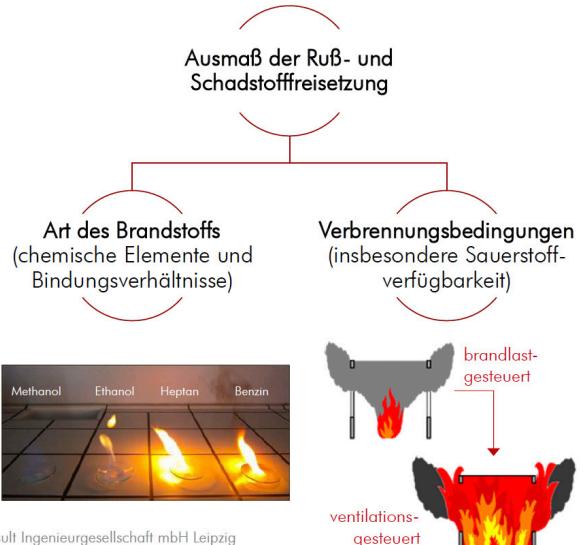


Verbrennungsmodellierung



$$\Delta h \approx \frac{v_{O_2} \cdot W_{O_2}}{v_F \cdot W_F} \cdot E_{O_2}$$

$$E_{O_2} = 13,1 \text{ MJ/kg}_{O_2}$$



Anhaltswerte für Rauchausbeuten: vfdb TB 04-01 (2020-03)



Zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Rauchausbeuten:

- 1) Verwendung empirischer Daten für spezifische Brandstoffe (Literaturwerte)
- 2) Verwendung konservativer Rauchausbeuten

Zellulose: Holz

Kunststoff A: Polyethylen (PE)

Kunststoff B: Polystyrol (PS)

Halogenierter Kunststoff: PVC

Tabelle 8.4 Ausbeuten und effektive Heizwerte für bemessungsrelevante Stoffgruppen

Ventilationsbedingungen	Stoffgruppe	$h_{u,\text{eff}}$ [kJ/g] ¹	Y_{CO_2} [g/g]	Y_{CO} [g/g]	$Y_{Ra\ddot{u}}$ [g/g]
brandlast-gesteuert	Zellulose	12,0	1,30	0,004	0,015
	Kunststoff A	30,5	2,76	0,024	0,060
	Kunststoff B	27,4	2,33	0,060	0,164
	halogenierte Kunststoffe	11,5	0,46	0,063	0,172
ventilations-gesteuert ²	Zellulose	12,0	0,91	0,145	0,028
	Kunststoff A	30,5	1,78	0,459	0,098
	Kunststoff B	27,4	1,50	0,137	0,331
	halogenierte Kunststoffe	11,5	0,32	0,500	0,237

Verwendung von stoffgruppenbezogenen Werten



Zuordnung der Referenz-Brandstoffe zu Stoffgruppen

Rußfreisetzung	Referenz-Brandstoff	Stoffgruppen
gering	Holz / Zellulose	Materialien mit hohem Holz- / Zelluloseanteil, biogene Baustoffe, Vegetation, gesättigte Kohlenwasserstoffe (z. B. Propan), Alkohole, Baustoffe mit geringer Rauchentwicklung (s1 nach DIN EN 13501-1)
mittel	Polyethylen-Schaumstoff	Einrichtungen und Möbel aus Materialien mit geringem Kunststoffanteil, ungesättigte Kohlenwasserstoffe, Baustoffe mit mittlerer Rauchentwicklung (s2 nach DIN EN 13501-1)
hoch	Polystyrol	Einrichtungen und Möbel aus Materialien mit hohem Kunststoffanteil, Fahrzeugbrände, Mülltonnenbrände, aromatische Kohlenwasserstoffe
sehr hoch	PVC	Halogenierte Kunststoffe (> 30 % Halogenanteil)

Verwendung von stoffgruppenbezogenen Werten



Rauchausbeuten für lokale Brände / brandlastgesteuerte Bedingungen ($\Phi = 1$)

Rußfreisetzung	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Referenz-Brandstoff	Holz	PE-Schaum	Polystyrol	PVC
Summenformel	$C_6H_{10}O_6$	$C_{2,1}H_{3,9}O_{0,26}$	$C_8H_{7,9}O_{0,97}$	C_2H_3Cl
Eff. Verbrennungswärme H_{eff} (MJ/kg)	12,4	34,2	27,0	10,3
CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g)	0,004	0,020	0,060	0,063
Rußausbeute Y_R (g/g)	0,015	0,077	0,164	0,172
Rußausbeute Y_R^* (g/MJ)	1,2	2,3	6,1	16,7
Strahlungsanteil χ_r	0,2 - 0,35		0,35 - 0,5	

27.05.2025

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

7

Verwendung von stoffgruppenbezogenen Werten



Rauchausbeuten für ventilationsgesteuerte Bedingungen ($\Phi = 2$)

Rußfreisetzung	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Referenz-Brandstoff	Holz	PE-Schaum	Polystyrol	PVC
Summenformel	$C_6H_{10}O_6$	$C_{2,1}H_{3,9}O_{0,26}$	$C_8H_{7,9}O_{0,97}$	C_2H_3Cl
Eff. Verbrennungswärme H_{eff} (MJ/kg)	10,9	29,8	20,7	5,9
CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g)	0,145	0,388	0,137	0,343
Rußausbeute Y_R (g/g)	0,028	0,124	0,330	0,237
Rußausbeute Y_R^* (g/MJ)	2,6	4,2	15,9	40,2
Strahlungsanteil χ_r		0,35 - 0,5		

27.05.2025

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

8

Verwendung von konservativen Werten



Rauchausbeuten für typische Mischbrandlasten in Standardgebäuden bzw. für Standardnutzungen



Rauchausbeuten für Polyurethan als Repräsentant einer Vielzahl mögl. Brandstoffe (90 % Quantil)



Ventilationsbedingung	lokaler Brand oder brandlastgesteuert	ventilationsgesteuert	Ventilationsbedingung	lokaler Brand oder brandlastgesteuert	ventilationsgesteuert
Referenz-Brandstoff			Referenz-Brandstoff		
Mischbrandlast			Polyurethan-Schaum		
Summenformel	$\text{CH}_{2,46}\text{O}_{0,61}$		Summenformel	$\text{CH}_{1,16}\text{O}_{0,40}\text{N}_{0,14}$	
H_{eff} (MJ/kg)	20,0	14,8	H_{eff} (MJ/kg)	16,8	10,0
CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g)	0,04	0,40	CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g)	0,03	0,30
Rußausbeute Y_{R} (g/g)	0,07	0,14	HCN-Ausbeute Y_{HCN} (g/g)	0,003	Anwendung bei FED-Nachweisen
Rußausbeute Y_{R}^* (g/MJ)	3,5	9,5	Rußausbeute Y_{R} (g/g)	0,118	0,24
Strahlungsanteil χ_{r}	0,35 - 0,5		Strahlungsanteil χ_{r}	0,35 - 0,5	

27.05.2025

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

9

Zusammenfassung der Anhaltswerte für Rußausbeuten

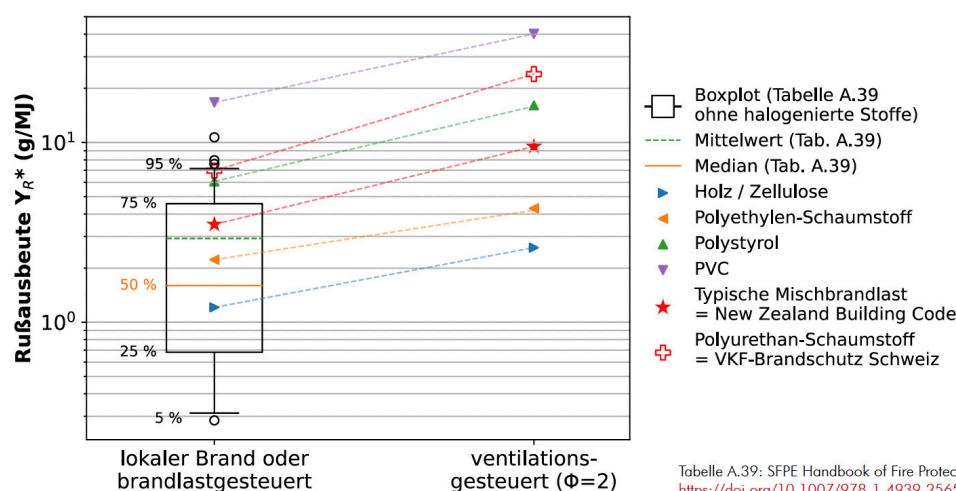


Tabelle A.39: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>

27.05.2025

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

10



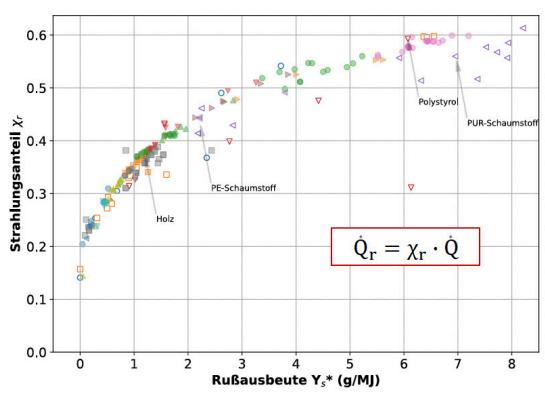
„Nebeneffekte“ der Verbrennungsmodellierung

27.05.2025

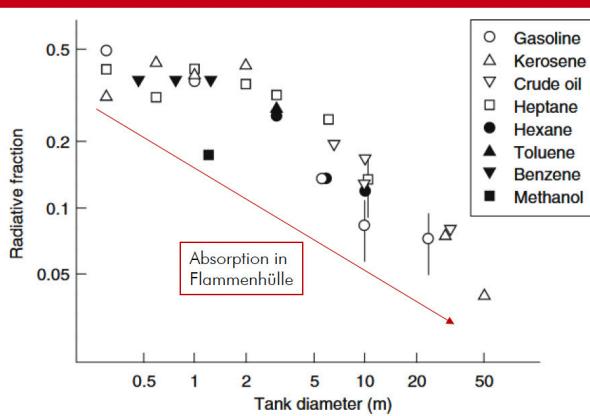
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

11

Strahlungswirkung der Flamme



- Common gases (Tab. A.39)
- Branched alkanes (Tab. A.40)
- Aliphatic esters (Tab. A.40)
- △ Natural materials (Tab. A.39)
- △ Alkenes (Tab. A.40)
- △ Aliphatic ketones (Tab. A.40)
- ▼ Synthetic materials (Tab. A.39)
- ▼ Cyclic alkenes (Tab. A.40)
- △ Alkynes & Butadiene (Tab. A.40)
- △ Other aromatic fuels (Tab. A.40)
- ◁ Synthetic foams (Tab. A.39)
- ▷ Other aromatic fuels (Tab. A.40)
- Normal alkanes (Tab. A.40)
- Arenes (Tab. A.40)
- Aliphatic fuels + additives (Tab. A.40)



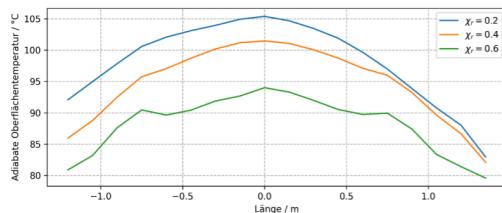
C. L. Beyler, „Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires“, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY: Springer New York, 2016, S. 2591–2663. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.

27.05.2025

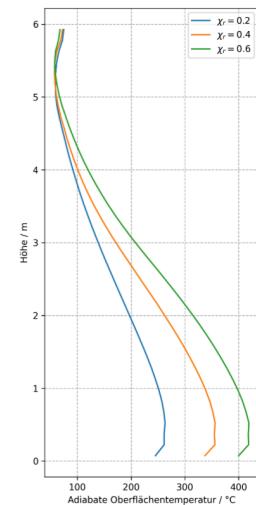
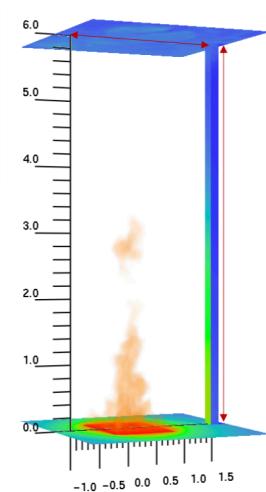
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

12

Strahlungswirkung der Flamme



\dot{Q}	χ_r	\dot{Q}_c	\dot{Q}_r
750 kW	0,2	600 kW	150 kW
	0,4	450 kW	300 kW
	0,6	300 kW	450 kW

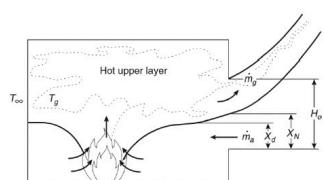


27.05.2025

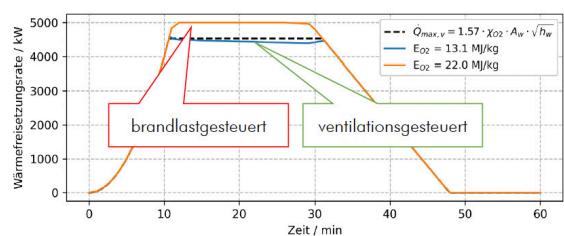
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

13

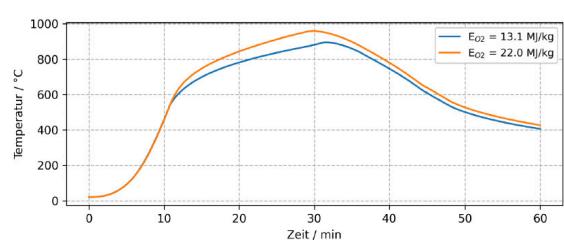
Einfluss der Stöchiometrie auf die Ventilationssteuerung



$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= 0,5 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \\ \dot{m}_{O2} &= 0,23 \cdot \dot{m}_a \\ \dot{Q}_{max,v} &= \dot{m}_{O2} \cdot E_{O2} \\ &= 1,57 \cdot \chi_{O2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \end{aligned}$$



Rauch-ausbeuten	H _{eff} (MJ/kg) Input	E _{O2} (MJ/kg) Output	$\dot{Q}_{max,v}$ (MW) Prognose
brandlast-gesteuert	16,8	13,1	$= 1,57 \cdot \chi_{O2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$
ventilationsgesteuert	10,0	13,1	$= 2,65 \cdot \chi_{O2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$
	16,8	22,0	



27.05.2025

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

14



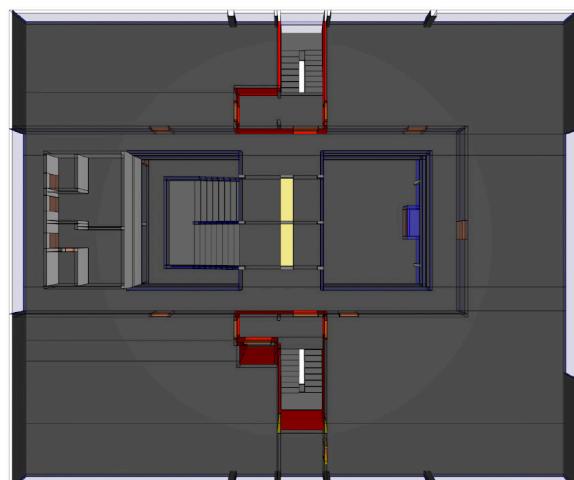
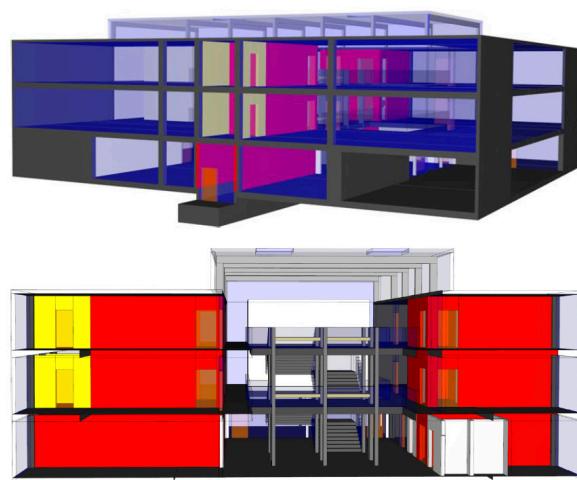
Anwendungsbeispiel und Methodenevaluierung

27.05.2025

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

15

Anwendungsbeispiel aus dem Brandschutzleitfaden für
Gebäude des Bundes (Juni 2019, 4. aktualisierte Auflage)



27.05.2025

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

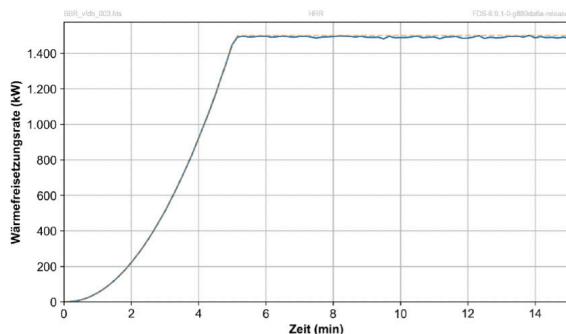
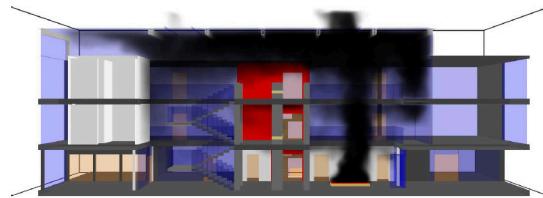
16

131

Bemessungsbrandszenario



Lokaler Brand im Erdgeschoss
Brandlastgesteuerte Bedingungen
Hohe Rußfreisetzung → Polystyrol

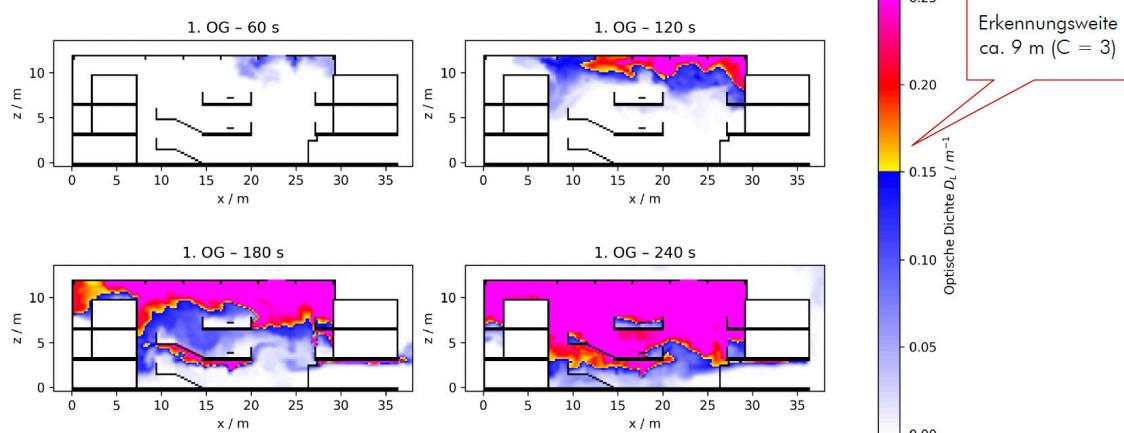


27.05.2025

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

17

Klassische Auswertung anhand der lokalen Verrauchung



27.05.2025

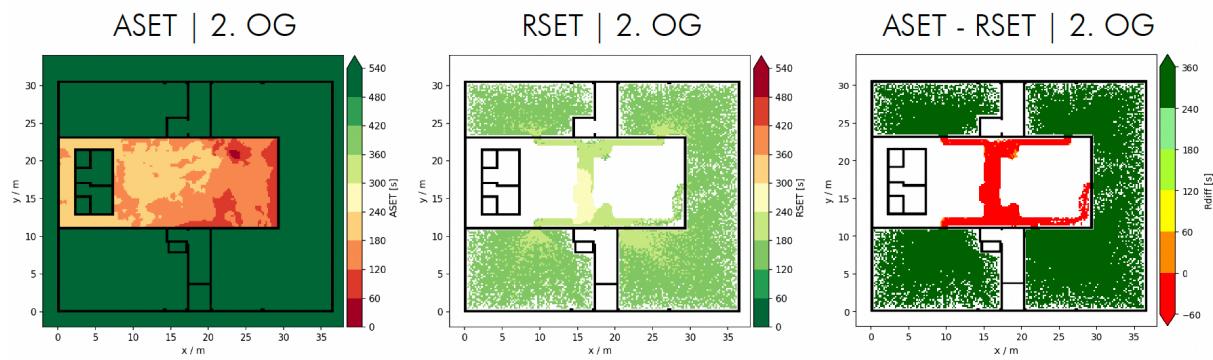
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

18

Kartenbasierte Darstellung des ASET-RSET-Konzepts



Schröder, Benjamin, Arnold, Lukas, und Seyfried, Armin. „A Map Representation of the ASET-RSET Concept“. Fire Safety Journal 115 (Juli 2020): 103154. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103154>.



27.05.2025

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

19

Erhöhung ASET durch Nutzungsbeschränkung



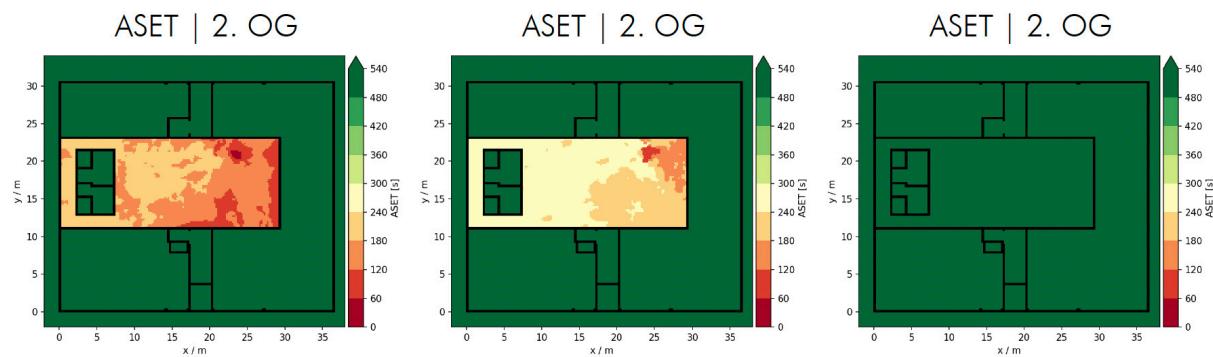
Hohe Fußfreisetzung
Referenz: Polystyrol



Mittlere Fußfreisetzung
Referenz: PE-Schaum



Geringe Fußfreisetzung
Referenz: Holz



27.05.2025

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

20



Visibility Maps – Sichtweite als integrierte Größe entlang des optischen Pfads

Börger, Kristian, Belt, Alexander, und Arnold, Lukas. „A Waypoint Based Approach to Visibility in Performance Based Fire Safety Design“. *Fire Safety Journal* 150 (Dezember 2024): 104269.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104269>.
<https://github.com/FireDynamics/fdsvismap>

$\bar{K} = \frac{K_m \int_0^L c_R(l) dl}{L}$

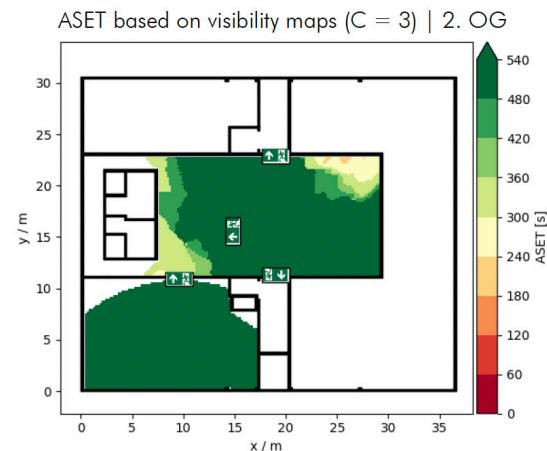
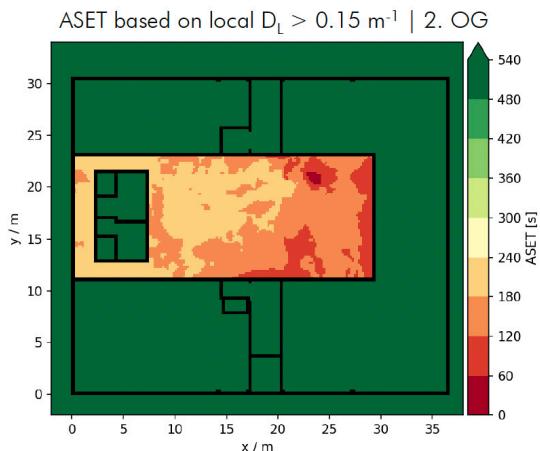
$\Rightarrow V = \frac{C}{\bar{K}}$

27.05.2025

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

22

Visibility Maps – Sichtweite als integrierte Größe entlang des optischen Pfads



⇒ Toxizitätsnachweis erforderlich (FED / FIC)

27.05.2025

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

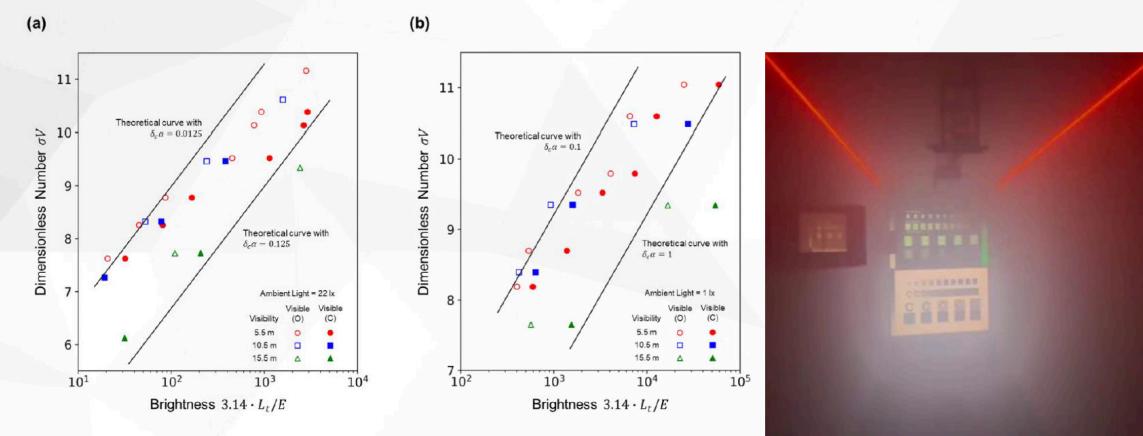
23

Repeating Jin's Experiment



Looking for C

Wai Kit Cheung, Jakub Bielawski, Lukas Arnold, Xinyan Huang, und Wojciech Węgrzyński.
„Repeating Jin's Experiment: Identifying the Limits of the Visibility in Smoke Model“, April 2025.



27.05.2025

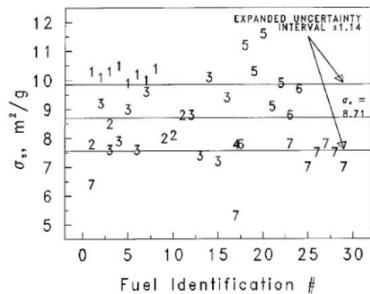
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

24

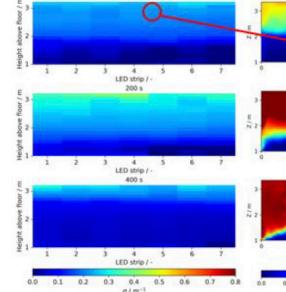
Skalenabhängigkeit K_m



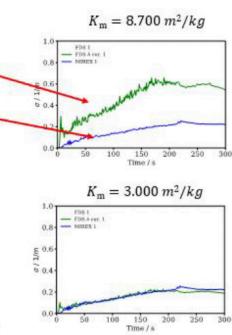
$$K = K_m \cdot c_R$$



LED5A (Experiment)



FDS (Simulation)



Mulholland, George W., und Carroll Croarkin. „Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke“. Fire and Materials 24, Nr. 5 (September 2000): 227–230. [https://doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5<227::AID-FAM742>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<227::AID-FAM742>3.0.CO;2-9).

Börger, Kristian, Belt, Alexander, Schultze, Thorsten, und Arnold, Lukas. „Remote Sensing of the Light-Obscuring Smoke Properties in Real-Scale Fires Using a Photometric Measurement Method“. Fire Technology 60, Nr. 1 (Januar 2024): 19–45. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01470-z>.

Börger, Kristian, Belt, Alexander, Kandler, Alicia, Schultze, Thorsten, und Lukas Arnold. „Investigation of smoke characteristics by photometric measurements“. Fire and Modeling Technical (FEMTC), September 2022.

27.05.2025

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

25

Dr. Gerhard Murtinger**in kurzer Beitrag zur Arrheniusgleichung****Abstract:**

Unter einem einfachen Material soll ein Material verstanden werden, das eine globale Reaktion erfährt und ohne Rückstand verbrennt. Wird das komplexe Pyrolysemodell auf einen TGA-Versuch eines einfachen Materials angewendet, so vereinfacht sich die Arrheniusgleichung zu einer gewöhnlichen, linearen Differentialgleichung mit einem nicht konstanten Koeffizienten. Solche Gleichungen können immer bis auf „Quadratur“ gelöst werden. Die Arrheniusgleichung enthält bekanntlich zwei material-spezifische Parameter A und E, auch als reaktionskinetische Parameter bezeichnet. Aus der Literatur sind zwei Formeln bekannt, in denen diese Parameter ausschließlich mit Hilfe von Größen am Wendepunkt der TGA-Kurve ausgedrückt werden. Diese Formeln werden auch im FDS User's Guide angegeben. Bei näherer Betrachtung stellt sich jedoch heraus, dass diese Formeln nur näherungsweise gelten, und zwar nur dann, wenn das Produkt aus A und E „groß“ ist, was für reale TGA-Versuche praktisch immer gegeben ist. Das soll in dem kurzen Vortrag bewiesen werden.

$$\frac{\partial Y(t)}{\partial t} = -AY(t)e^{-E/R\dot{T}t}$$



FDS | USERGROUP

19. Anwendertreffen, 9. – 10. Oktober 2025

Ein kurzer Beitrag zur Arrheniusgleichung

Dr. Murtinger, SIEMENS Mobility Austria

SIEMENS

Intern

Zur Arrheniusgleichung



TGA-Versuch

Einfaches Material: Eine Reaktion, kein Rückstand

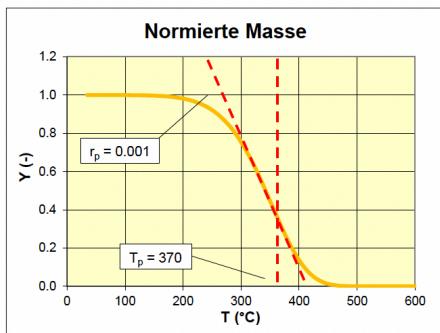
- TGA-Versuch:**
- Sehr geringe Probengröße, ca. 1 mm³.
 - Wärmeleitung vernachlässigbar, daher $T = T(t)$.
 - Lineare Aufheizrate, daher $\dot{T} = const.$
 - Messgröße: Normierte Masse $Y(t)$.

Vereinfachte Arrheniusgleichung:

$$\frac{\partial Y(t)}{\partial t} = -AY(t)e^{-E/R\dot{T}t}$$

$$Y(0) = 1$$

Zur Arrheniusgleichung



Typischer TGA-Versuch für einfaches Material:

- Genau ein Wendepunkt
- $m(t) \rightarrow 0$, für $t \rightarrow \infty$

Formeln für A und E¹:

$$E = er_p \frac{RT_p^2}{\dot{T}}, \quad A = er_p e^{E/RT_p}$$

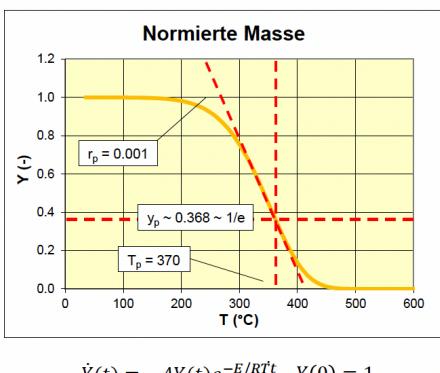
T_p , Referenztemperatur

r_p , Referenzrate

\dot{T} , Aufheizrate

¹ Siehe FDS User's Guide

Zur Arrheniusgleichung



Typischer TGA-Versuch für einfaches Material:

- Genau ein Wendepunkt
- $m(t) \rightarrow 0$, für $t \rightarrow \infty$

Formeln für A und E:

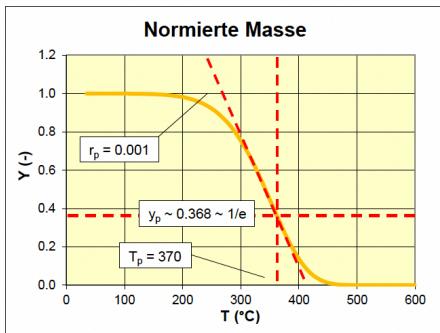
$$E = \frac{1}{y_p} r_p \frac{RT_p^2}{\dot{T}}, \quad A = \frac{1}{y_p} r_p e^{E/RT_p}$$

T_p , Referenztemperatur

r_p , Referenzrate

\dot{T} , Aufheizrate

Zur Arrheniusgleichung



Typischer TGA-Versuch für einfaches Material:

- Genau ein Wendepunkt
- $m(t) \rightarrow 0$, für $t \rightarrow \infty$

Formeln für A und E :

$$E \sim er_p \frac{RT_p^2}{\dot{T}}, \quad A \sim er_p e^{E/RT_p}$$

T_p , Referenztemperatur

r_p , Referenzrate

\dot{T} , Aufheizrate

Zur Arrheniusgleichung

Mit den Abkürzungen $\alpha = A, \beta = E/R\dot{T}$ lässt sich die vereinfachte Arrheniusgleichung folgendermaßen schreiben:

$$\dot{Y}(t) = -\alpha Y(t) e^{-\frac{\beta}{t}}$$

Diese Gleichung kann bis auf „Quadratur“ gelöst werden, d.h. mit $Y(0) = 1$ gilt

$$Y(t) = \exp\left(-\alpha \int_0^t e^{-\frac{\beta}{u}} du\right)$$

Daraus folgt: $Y(t) > 0, \dot{Y}(t) > 0$ für alle t .

Zur Arrheniusgleichung

Mit den Abkürzungen $\alpha = A, \beta = E/R\bar{T}$ lässt sich die *vereinfachte* Arrheniusgleichung folgendermaßen schreiben:

$$\dot{Y}(t) = -\alpha Y(t) e^{-\frac{\beta}{t}}$$

Zur Bestimmung des Wendepunktes wird die zweite Ableitung Null gesetzt:

$$\ddot{Y} = -\alpha \dot{Y} e^{-\frac{\beta}{t}} - \frac{\alpha \beta}{t^2} Y e^{-\frac{\beta}{t}} = -\alpha \dot{Y} e^{-\frac{\beta}{t}} + \frac{\beta}{t^2} \dot{Y} = \dot{Y} \left(-\alpha e^{-\frac{\beta}{t}} + \frac{\beta}{t^2} \right) = 0$$

Zur Arrheniusgleichung

Mit den Abkürzungen $\alpha = A, \beta = E/R\bar{T}$ lässt sich die *vereinfachte* Arrheniusgleichung folgendermaßen schreiben:

$$\dot{Y}(t) = -\alpha Y(t) e^{-\frac{\beta}{t}}$$

Zur Bestimmung des Wendepunktes wird die zweite Ableitung Null gesetzt:

$$\ddot{Y} = -\alpha \dot{Y} e^{-\frac{\beta}{t}} - \frac{\alpha \beta}{t^2} Y e^{-\frac{\beta}{t}} = -\alpha \dot{Y} e^{-\frac{\beta}{t}} + \frac{\beta}{t^2} \dot{Y} = \dot{Y} \left(-\alpha e^{-\frac{\beta}{t}} + \frac{\beta}{t^2} \right) = 0$$

Da \dot{Y} niemals verschwindet, muss der Ausdruck in der Klammer verschwinden. Wird der Wendepunkt von Y mit t_p bezeichnet, so gilt daher:

$$-\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} + \frac{\beta}{t_p^2} = 0 \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$

Zur Arrheniusgleichung

Mit den Abkürzungen $\alpha = A, \beta = E/R\dot{T}$ lässt sich die *vereinfachte* Arrheniusgleichung folgendermaßen schreiben:

$$\dot{Y}(t) = -\alpha Y(t) e^{-\frac{\beta}{t}}$$

Wird t_p in die Arrheniusgleichung eingesetzt, so folgt:

$$\dot{Y}(t_p) = -\alpha Y(t_p) e^{-\frac{\beta}{t_p}}$$

Da \dot{Y} niemals verschwindet, muss der Ausdruck in der Klammer verschwinden. Wird der Wendepunkt von Y mit t_p bezeichnet, so gilt daher:

$$-\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} + \frac{\beta}{t_p^2} = 0 \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$

Zur Arrheniusgleichung

Mit den Abkürzungen $\alpha = A, \beta = E/R\dot{T}$ lässt sich die *vereinfachte* Arrheniusgleichung folgendermaßen schreiben:

$$\dot{Y}(t) = -\alpha Y(t) e^{-\frac{\beta}{t}}$$

Wird t_p in die Arrheniusgleichung eingesetzt, so folgt ... und mit $r_p = -\dot{Y}(t_p), y_p = Y(t_p)$:

$$-r_p = \dot{Y}(t_p) = -\alpha Y(t_p) e^{-\frac{\beta}{t_p}} = -\alpha y_p e^{-\frac{\beta}{t_p}}$$

Da \dot{Y} niemals verschwindet, muss der Ausdruck in der Klammer verschwinden. Wird der Wendepunkt von Y mit t_p bezeichnet, so gilt daher:

$$-\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} + \frac{\beta}{t_p^2} = 0 \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$

Zur Arrheniusgleichung

Mit den Abkürzungen $\alpha = A$, $\beta = E/R\bar{T}$ lässt sich die *vereinfachte* Arrheniusgleichung folgendermaßen schreiben:

$$\dot{Y}(t) = -\alpha Y(t) e^{-\frac{\beta}{t}}$$

Wird t_p in die Arrheniusgleichung eingesetzt, so folgt ... und mit $r_p = -\dot{Y}(t_p)$, $y_p = Y(t_p)$:

$$-r_p = \dot{Y}(t_p) = -\alpha Y(t_p) e^{-\frac{\beta}{t_p}} = -\alpha y_p e^{-\frac{\beta}{t_p}} \quad \text{oder} \quad \frac{r_p}{y_p} = \alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}}$$

Da \dot{Y} niemals verschwindet, muss der Ausdruck in der Klammer verschwinden. Wird der Wendepunkt von Y mit t_p bezeichnet, so gilt daher:

$$-\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} + \frac{\beta}{t_p^2} = 0 \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$

Zur Arrheniusgleichung

Und wegen der Wendepunktgleichung

$$\frac{r_p}{y_p} = \frac{\beta}{t_p^2}$$

Wird t_p in die Arrheniusgleichung eingesetzt, so folgt ... und mit $r_p = -\dot{Y}(t_p)$, $y_p = Y(t_p)$:

$$-r_p = \dot{Y}(t_p) = -\alpha Y(t_p) e^{-\frac{\beta}{t_p}} = -\alpha y_p e^{-\frac{\beta}{t_p}} \quad \text{oder} \quad \frac{r_p}{y_p} = \alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}}$$

Da \dot{Y} niemals verschwindet, muss der Ausdruck in der Klammer verschwinden. Wird der Wendepunkt von Y mit t_p bezeichnet, so gilt daher:

$$-\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} + \frac{\beta}{t_p^2} = 0 \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$

Zur Arrheniusgleichung

Und wegen der Wendepunktgleichung

$$\frac{r_p}{y_p} = \frac{\beta}{t_p^2}$$

Wird t_p in die Arrheniusgleichung eingesetzt, so folgt ... und mit $r_p = -\dot{Y}(t_p)$, $y_p = Y(t_p)$:

$$-r_p = \dot{Y}(t_p) = -\alpha Y(t_p) e^{-\frac{\beta}{t_p}} = -\alpha y_p e^{-\frac{\beta}{t_p}} \quad \text{oder} \quad \frac{r_p}{y_p} = \alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}}$$

Aus den beiden Gleichungen für r_p/y_p gewinnt man Gleichungen für α und β :

$$\beta = \frac{r_p}{y_p} t_p^2 \quad \text{und} \quad \alpha = \frac{r_p}{y_p} e^{\frac{\beta}{t_p}}$$

Zur Arrheniusgleichung

Mit $T_p = \dot{T}t_p$ sowie $\alpha = A$ und $\beta = E/RT$ ergeben sich daraus die folgenden Formeln für A und E :

$$E = \frac{1}{y_p} r_p \frac{RT_p^2}{\dot{T}} \quad \text{und} \quad A = \frac{1}{y_p} r_p e^{E/RT_p}$$

Dabei heißt T_p Referenztemperatur, r_p Referenzrate. Diese Formeln wären identisch mit den im FDS User's Guide angegebenen, vorausgesetzt es würde gelten:

$$y_p = Y(t_p) = \frac{1}{e}$$

$Y(t_p)$ hängt jedoch von A und E bzw. α und β ab und kann daher nicht konstant sein.

Zur Arrheniusgleichung

Mit $T_p = \dot{T}t_p$ sowie $\alpha = A$ und $\beta = E/R\dot{T}$ ergeben sich daraus die folgenden Formeln für A und E :

$$E = \frac{1}{y_p} r_p \frac{RT_p^2}{\dot{T}} \quad \text{und} \quad A = \frac{1}{y_p} r_p e^{E/RT_p}$$

Dabei heißt T_p Referenztemperatur, r_p Referenzrate. Diese Formeln wären identisch mit den im FDS User's Guide angegebenen, vorausgesetzt es würde gelten:

$$y_p = Y(t_p) = \frac{1}{e}$$

Bei Siemens wurde gezeigt:

$$y_p = Y(t_p) \sim \frac{1}{e} \quad \text{sofern } \alpha\beta \text{ groß}$$

Zur Arrheniusgleichung

Für die vereinfachte Arrheniusgleichung gilt die Darstellung

$$Y(t) = \exp\left(-\alpha \int_0^t e^{-\frac{\beta}{u}} du\right)$$

wobei für das Integral keine analytische Funktion angegeben werden kann. Es soll gezeigt werden, dass für großes $\alpha\beta$

$$Y(t_p) = \exp\left(-\alpha \int_0^{t_p} e^{-\frac{\beta}{u}} du\right) \sim \frac{1}{e} \quad \text{wobei } -\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} + \frac{\beta}{t_p^2} = 0$$

Offensichtlich genügt es zu zeigen, dass für großes $\alpha\beta$

$$\alpha \int_0^{t_p} e^{-\frac{\beta}{u}} du \sim 1 \quad \text{und} \quad \alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} = \frac{\beta}{t_p^2} \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$

Zur Arrheniusgleichung

Durch die Substitution $x_p = \beta/t_p$ erhält die Wendepunktgleichung eine bemerkenswerte Symmetrie:

$$\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} = \frac{\beta}{t_p^2} \quad \xrightarrow{x_p = \beta/t_p} \quad \frac{e^{-x_p}}{x_p^2} = \frac{1}{\alpha\beta}$$

Führt man dieselbe Substitution für das Integral durch, so sind die Transformationsregeln für Integrale zu beachten. Es sei $x = \beta/u, u = \beta/x, du = -\beta/x^2 dx$. Die Grenzen des Integrals transformieren sich folgendermaßen

$$u = 0 \Rightarrow x = \infty, u = t_p \Rightarrow x = \frac{\beta}{t_p} = x_p$$

Offensichtlich genügt es zu zeigen, dass für großes $\alpha\beta$

$$\alpha \int_0^{t_p} e^{-\frac{\beta}{u}} du \sim 1 \quad \text{und} \quad \alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} = \frac{\beta}{t_p^2} \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$

Zur Arrheniusgleichung

Durch die Substitution $x_p = \beta/t_p$ erhält die Wendepunktgleichung eine bemerkenswerte Symmetrie:

$$\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} = \frac{\beta}{t_p^2} \quad \xrightarrow{x_p = \beta/t_p} \quad \frac{e^{-x_p}}{x_p^2} = \frac{1}{\alpha\beta}$$

Führt man dieselbe Substitution für das Integral durch, so sind die Transformationsregeln für Integrale zu beachten. Es sei $x = \beta/u, u = \beta/x, du = -\beta/x^2 dx$. Die Grenzen des Integrals transformieren sich folgendermaßen

$$u = 0 \Rightarrow x = \infty, u = t_p \Rightarrow x = \frac{\beta}{t_p} = x_p$$

Und das Integral selbst transformiert sich zu

$$\text{Zu zeigen: } 1 \sim \alpha \int_0^{t_p} e^{-\frac{\beta}{u}} du = \alpha\beta \int_{x_p}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx$$

Zur Arrheniusgleichung

Durch die Substitution $x_p = \beta/t_p$ erhält die Wendepunktgleichung eine bemerkenswerte Symmetrie:

$$\alpha e^{-\frac{\beta}{t_p}} = \frac{\beta}{t_p^2} \quad \xrightarrow{x_p = \beta/t_p} \quad \frac{e^{-x_p}}{x_p^2} = \frac{1}{\alpha\beta}$$

Könnte das uneigentliche Integral näherungsweise berechnet werden, indem der Integrand an der unteren Grenze ausgewertet wird, so wäre der Beweis wegen der Wendepunktgleichung erbracht:

$$\text{Zu zeigen: } 1 \sim \alpha \int_0^{t_p} e^{-\frac{\beta}{u}} du = \alpha\beta \int_{x_p}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \alpha\beta \cdot \frac{e^{-x_p}}{x_p^2} = \alpha\beta \cdot \frac{1}{\alpha\beta} = 1$$

Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Könnte das uneigentliche Integral näherungsweise berechnet werden, indem der Integrand an der unteren Grenze ausgewertet wird, so wäre der Beweis wegen der Wendepunktgleichung erbracht:

$$\text{Zu zeigen: } 1 \sim \alpha \int_0^{t_p} e^{-\frac{\beta}{u}} du = \alpha\beta \int_{x_p}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \alpha\beta \cdot \frac{e^{-x_p}}{x_p^2} = \alpha\beta \cdot \frac{1}{\alpha\beta} = 1$$

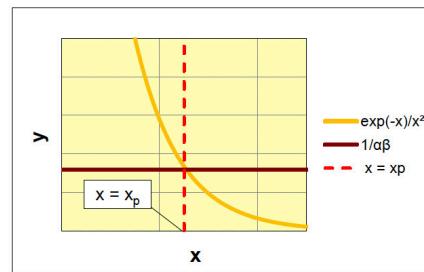
Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Man beachte, dass x_p groß ist, wenn $\alpha\beta$ groß ist.

$$\frac{e^{-x_p}}{x_p^2} = \frac{1}{\alpha\beta} \quad (\text{Wendepunktgleichung})$$



Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Mit den Abkürzungen $J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx$ und $J_a = \frac{e^{-a}}{a^2}$ wird gezeigt, dass $J \sim J_a$, wenn a groß ist.

Die Ungleichung $x \geq a$ gilt im gesamten Integrationsgebiet. Daher gilt ebenfalls im gesamten Integrationsgebiet

$$\frac{1}{x} \leq \frac{1}{a}$$

Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Mit den Abkürzungen $J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx$ und $J_a = \frac{e^{-a}}{a^2}$ wird gezeigt, dass $J \sim J_a$, wenn a groß ist.

Die Ungleichung $x \geq a$ gilt im gesamten Integrationsgebiet. Daher gilt ebenfalls im gesamten Integrationsgebiet ... und weiter

$$\frac{1}{x} \leq \frac{1}{a}, \frac{1}{x^2} \leq \frac{1}{a^2}$$

Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Mit den Abkürzungen $J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx$ und $J_a = \frac{e^{-a}}{a^2}$ wird gezeigt, dass $J \sim J_a$, wenn a groß ist.

Die Ungleichung $x \geq a$ gilt im gesamten Integrationsgebiet. Daher gilt ebenfalls im gesamten Integrationsgebiet ... und weiter

$$\frac{1}{x} \leq \frac{1}{a}, \frac{1}{x^2} \leq \frac{1}{a^2} \Rightarrow \frac{e^{-x}}{x^2} \leq \frac{e^{-x}}{a^2}$$

Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Mit den Abkürzungen $J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx$ und $J_a = \frac{e^{-a}}{a^2}$ wird gezeigt, dass $J \sim J_a$, wenn a groß ist.

Die Ungleichung $x \geq a$ gilt im gesamten Integrationsgebiet. Daher gilt ebenfalls im gesamten Integrationsgebiet ... und weiter

$$\frac{1}{x} \leq \frac{1}{a}, \frac{1}{x^2} \leq \frac{1}{a^2} \Rightarrow \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \leq \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{a^2} dx$$

Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Mit den Abkürzungen $J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx$ und $J_a = \frac{e^{-a}}{a^2}$ wird gezeigt, dass $J \sim J_a$, wenn a groß ist.

Die Ungleichung $x \geq a$ gilt im gesamten Integrationsgebiet. Daher gilt ebenfalls im gesamten Integrationsgebiet ... und weiter

$$\frac{1}{x} \leq \frac{1}{a}, \frac{1}{x^2} \leq \frac{1}{a^2} \Rightarrow J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \leq \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{a^2} dx = \frac{1}{a^2} \int_a^{\infty} e^{-x} dx = \frac{e^{-a}}{a^2} = J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Es soll gezeigt werden, dass diese Schlussweise korrekt ist, solange die untere Grenze des Integrals groß ist, d.h.:

$$\int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \sim \frac{e^{-a}}{a^2} \quad \text{wenn } a \text{ groß}$$

Mit den Abkürzungen $J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx$ und $J_a = \frac{e^{-a}}{a^2}$ wird gezeigt, dass $J \sim J_a$, wenn a groß ist.

Die Ungleichung $x \geq a$ gilt im gesamten Integrationsgebiet. Daher gilt ebenfalls im gesamten Integrationsgebiet ... und weiter

$$\frac{1}{x} \leq \frac{1}{a}, \frac{1}{x^2} \leq \frac{1}{a^2} \Rightarrow J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx \leq \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{a^2} dx = \frac{1}{a^2} \int_a^{\infty} e^{-x} dx = \frac{e^{-a}}{a^2} = J_a \quad \text{also } J \leq J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Um eine weitere Ungleichung zwischen J und J_a zu erhalten, wird J partiell integriert. Es gilt:

$$J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx = -\frac{e^{-x}}{x^2} \Big|_a^{\infty} - \int_a^{\infty} \frac{2e^{-x}}{x^3} dx = J_a - J_1 \quad \text{mit } J_1 = \int_a^{\infty} \frac{2e^{-x}}{x^3} dx$$

$$J \leq J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Um eine weitere Ungleichung zwischen J und J_a zu erhalten, wird J partiell integriert. Es gilt:

$$J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx = -\frac{e^{-x}}{x^2} \Big|_a^{\infty} - \int_a^{\infty} \frac{2e^{-x}}{x^3} dx = J_a - J_1 \quad \text{mit} \quad J_1 = \int_a^{\infty} \frac{2e^{-x}}{x^3} dx$$

Sei $\varepsilon > 0$ klein gewählt, dann gilt

$$\frac{2}{x^3} \leq \frac{\varepsilon}{x^2} \quad \text{wenn} \quad x \geq \frac{2}{\varepsilon}$$

$$J \leq J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Um eine weitere Ungleichung zwischen J und J_a zu erhalten, wird J partiell integriert. Es gilt:

$$J = \int_a^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2} dx = -\frac{e^{-x}}{x^2} \Big|_a^{\infty} - \int_a^{\infty} \frac{2e^{-x}}{x^3} dx = J_a - J_1 \quad \text{mit} \quad J_1 = \int_a^{\infty} \frac{2e^{-x}}{x^3} dx$$

Sei $\varepsilon > 0$ klein gewählt, dann gilt

$$\frac{2}{x^3} \leq \frac{\varepsilon}{x^2} \quad \text{wenn} \quad x \geq \frac{2}{\varepsilon}$$

Wird $a = 2/\varepsilon$ gesetzt, dann gilt im gesamten Integrationsgebiet, die folgende Ungleichung:

$$-\frac{2}{x^3} \geq -\frac{\varepsilon}{x^2}$$

$$J \leq J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Um eine weitere Ungleichung zwischen J und J_a zu erhalten, wird J partiell integriert. Es gilt:

$$J = \int_a^\infty \frac{e^{-x}}{x^2} dx = -\frac{e^{-x}}{x^2} \Big|_a^\infty - \int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx = J_a - J_1 \quad \text{mit} \quad J_1 = \int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx$$

Sei $\varepsilon > 0$ klein gewählt, dann gilt

$$\frac{2}{x^3} \leq \frac{\varepsilon}{x^2} \quad \text{wenn} \quad x \geq \frac{2}{\varepsilon}$$

Wird $a = 2/\varepsilon$ gesetzt, dann gilt im gesamten Integrationsgebiet, die folgende Ungleichung ... und weiter

$$-\frac{2e^{-x}}{x^3} \geq -\frac{\varepsilon e^{-x}}{x^2}$$

$$J \leq J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Um eine weitere Ungleichung zwischen J und J_a zu erhalten, wird J partiell integriert. Es gilt:

$$J = \int_a^\infty \frac{e^{-x}}{x^2} dx = -\frac{e^{-x}}{x^2} \Big|_a^\infty - \int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx = J_a - J_1 \quad \text{mit} \quad J_1 = \int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx$$

Sei $\varepsilon > 0$ klein gewählt, dann gilt

$$\frac{2}{x^3} \leq \frac{\varepsilon}{x^2} \quad \text{wenn} \quad x \geq \frac{2}{\varepsilon}$$

Wird $a = 2/\varepsilon$ gesetzt, dann gilt im gesamten Integrationsgebiet, die folgende Ungleichung ... und weiter

$$-\int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx \geq -\int_a^\infty \frac{\varepsilon e^{-x}}{x^2} dx$$

$$J \leq J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Um eine weitere Ungleichung zwischen J und J_a zu erhalten, wird J partiell integriert. Es gilt:

$$J = \int_a^\infty \frac{e^{-x}}{x^2} dx = -\frac{e^{-x}}{x^2} \Big|_a^\infty - \int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx = J_a - J_1 \quad \text{mit} \quad J_1 = \int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx$$

Sei $\varepsilon > 0$ klein gewählt, dann gilt

$$\frac{2}{x^3} \leq \frac{\varepsilon}{x^2} \quad \text{wenn} \quad x \geq \frac{2}{\varepsilon}$$

Wird $a = 2/\varepsilon$ gesetzt, dann gilt im gesamten Integrationsgebiet, die folgende Ungleichung ... und weiter

$$-J_1 = -\int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx \geq -\int_a^\infty \frac{\varepsilon e^{-x}}{x^2} dx = -\varepsilon J$$

$$J \leq J_a$$

Zur Arrheniusgleichung

Um eine weitere Ungleichung zwischen J und J_a zu erhalten, wird J partiell integriert. Es gilt:

$$J = \int_a^\infty \frac{e^{-x}}{x^2} dx = -\frac{e^{-x}}{x^2} \Big|_a^\infty - \int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx = J_a - J_1 \geq J_a - \varepsilon J$$

Sei $\varepsilon > 0$ klein gewählt, dann gilt

$$\frac{2}{x^3} \leq \frac{\varepsilon}{x^2} \quad \text{wenn} \quad x \geq \frac{2}{\varepsilon}$$

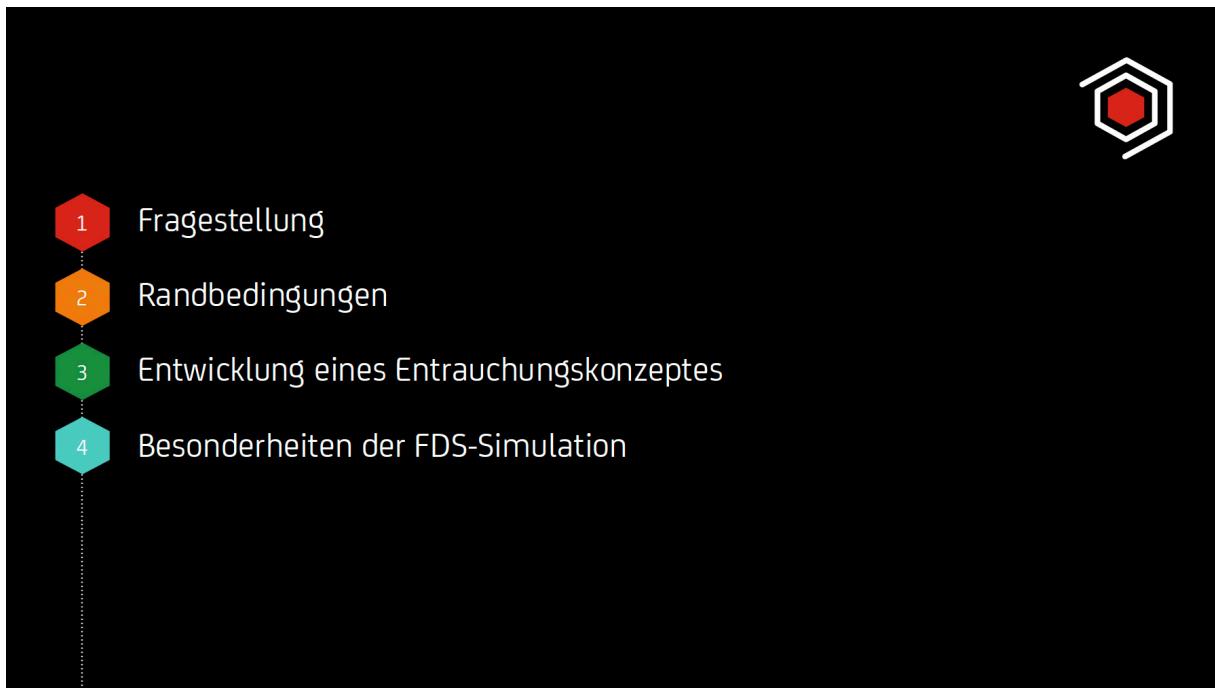
Wird $a = 2/\varepsilon$ gesetzt, dann gilt im gesamten Integrationsgebiet, die folgende Ungleichung ... und weiter

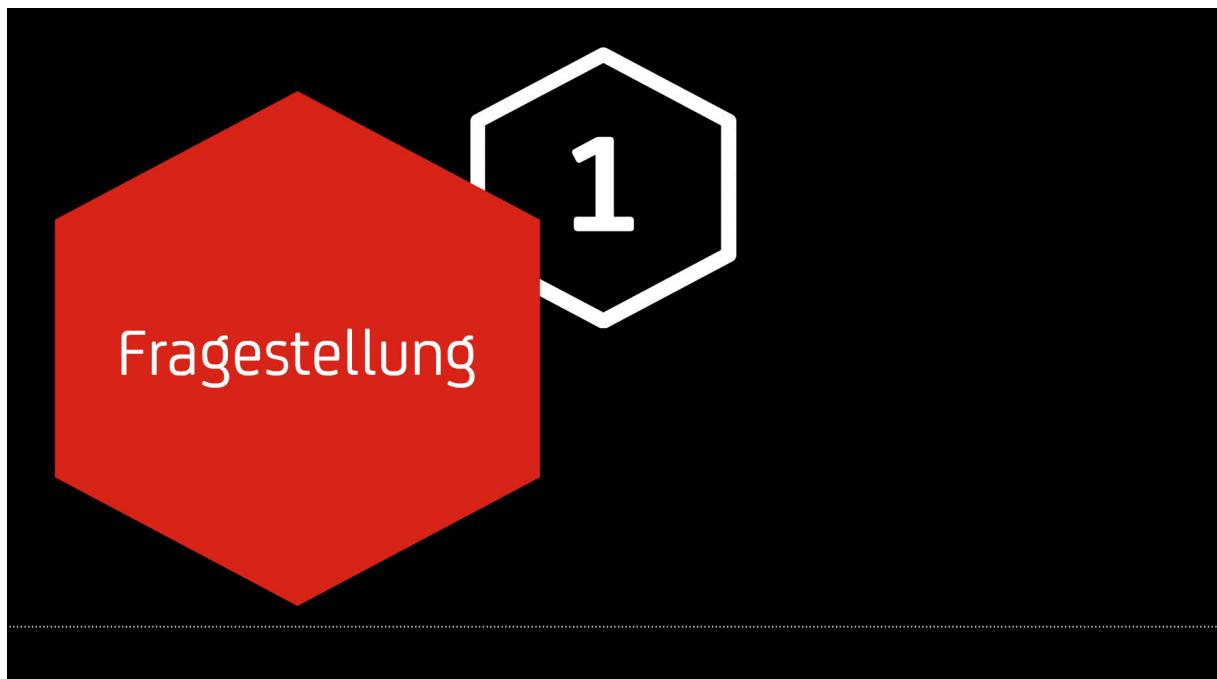
$$-J_1 = -\int_a^\infty \frac{2e^{-x}}{x^3} dx \geq -\int_a^\infty \frac{\varepsilon e^{-x}}{x^2} dx = -\varepsilon J$$

$$J \leq J_a$$

Frederik Buhk

Tunnel-Entrauchung: Einfluss der natürlichen Längsströmung auf die Entrauchungsstrategie





Fragestellung

- Reales Projekt, anonymisiert
- Ein vorhandenes Entrauchungskonzept mit bestehenden Strahlventilatoren soll für die Personensicherheit optimiert werden.



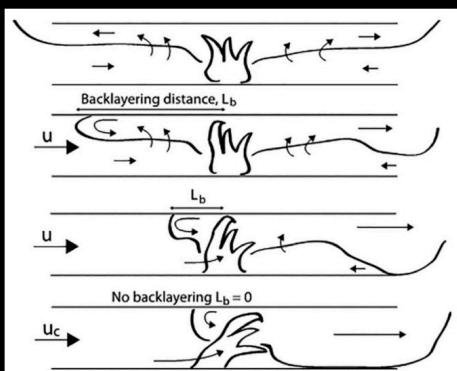
Randbedingungen

- 427 m lange Röhren (max. Rettungsweglänge)
- Röhren sind am Ende mit einem Gebäude verbunden
- Natürliche Längsströmung 1,5 m/s (im Mittel), 2,0 m/s (Hoher Wert)
- Richtung der Längsströmung variiert
- 2 Strahlventilatoren pro Röhre (je 11,1 m³/s)
- Rauchdetektion alle 8,5 m
- Vollständige Strömungsumkehr durch SV bis 1,5 m/s möglich



Randbedingungen

Backlayering



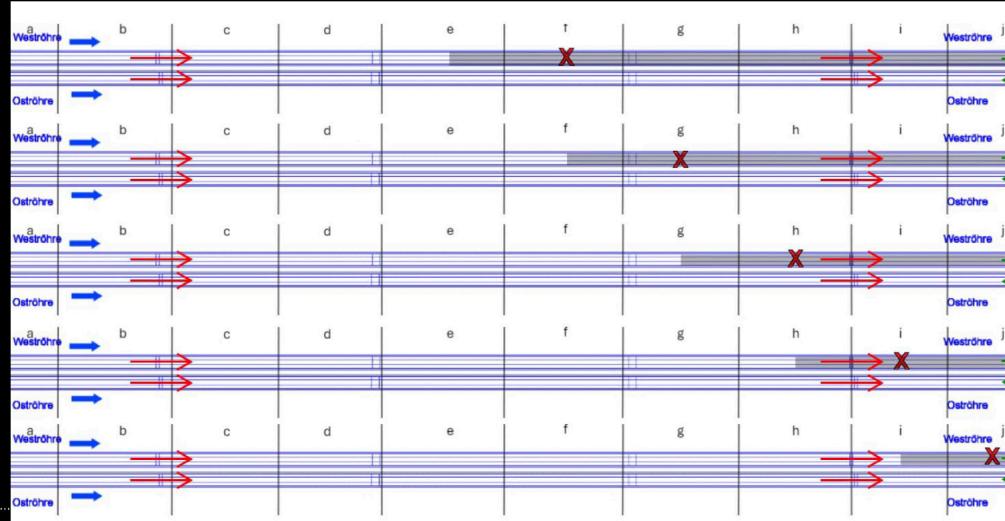
- Rauch strömt auch entgegen der Strömung
- Kritische Geschwindigkeit abhängig von Brand und Tunnel

2

Entwicklung
eines
Entrauchungs
konzeptes

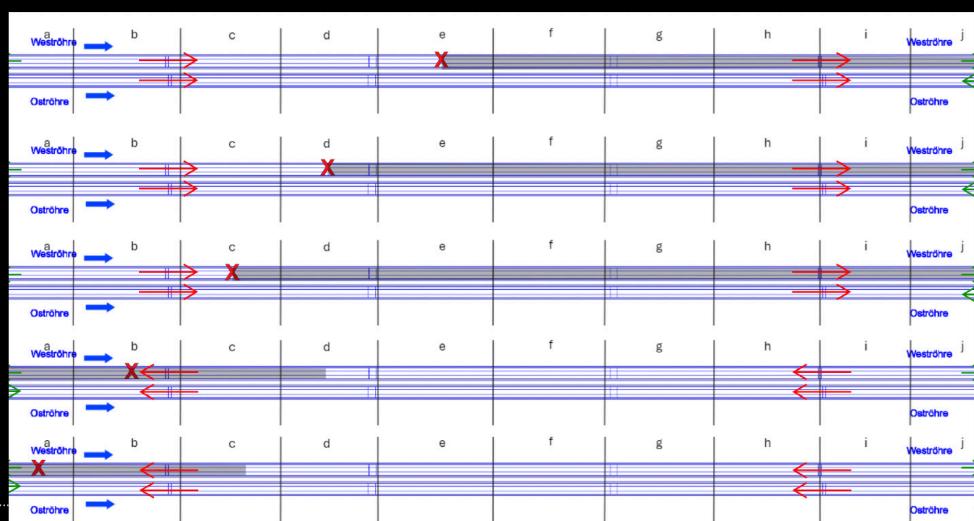
3

Längsströmung < 1,5 m/s



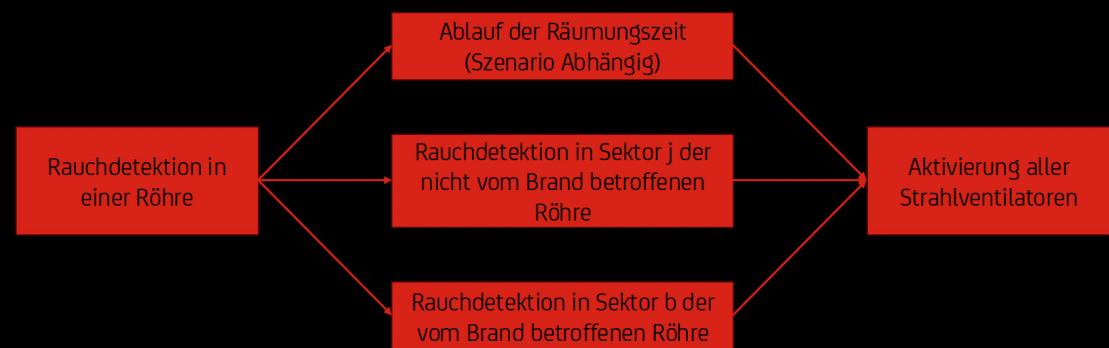
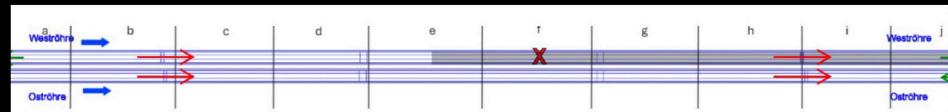
3

Längsströmung < 2,0 m/s (keine Umkehr)



3

Ansteuerung



3

Besonderheiten
der FDS
Simulation

4

Besonderheiten der FDS Simulation

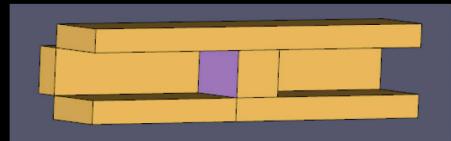
Abbildung der Grundströmung Rauchdurchlässig

- Portal mit OPEN Vent definiert -> Dynamic Pressure nutzen

```
&VENT XB=..., SURF_ID='OPEN', DYNAMIC_PRESSURE=2.4, PRESSURE_RAMP='wind' /
```

Modellierung der Strahlventilatoren / Jet Fans (Thunderhead Tutorial)

- HVAC
- Obstructions -> Für Turbulenzen



4



1

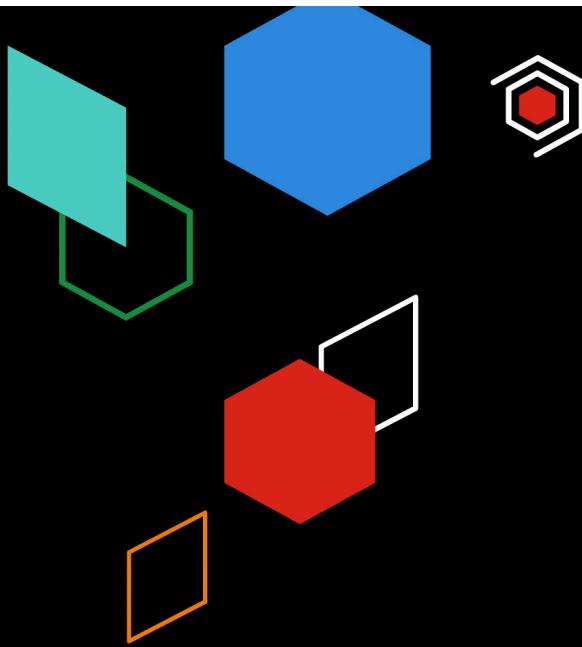
Impressum

hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz GmbH
Otto-Ostrowski-Straße 5
10249 Berlin
Deutschland
+49 (30) 89 59 55 0
servicedesk@hhpberlin.de
www.hhpberlin.de

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

Geschäftsführer:
Gregor Durkel, M. Sc.
Ing. Jep Bruins
Britt Schuurs, M. Sc. in Economics
Robert Wolff, M. A. in Business Economics

Prokuristen:
Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß
Dipl.-Ing. Andreas Dahlitz
Dipl.-Ing. Dirk Kohmann



Tristan Hehnen

Werkzeuge zur Datenauswertung - der fdsreader

Abstract:

Der fdsreader wird vorgestellt, welcher die Auswertung von FDS Simulationen erleichtert. Er ist ein frei verfügbares, quelloffenes Python-Paket.

Der fdsreader kann verschiedene, von FDS Simulationen erzeugte, Ausgabedaten einlesen und in native Python Datenstrukturen überführen. So werden beispielsweise Daten von slices in mehrdimensionale NumPy arrays überführt. Konkret können folgende Daten eingelesen werden: devices, slices, boundaries, smoke3d, plot3d, particles und isosurfaces.

Dies erlaubt es, komplexe Auswertungen mit geringem Aufwand durchzuführen, da auf umfangreiche Methoden des Python-Ökosystems zurückgegriffen werden kann. Beispielsweise lassen sich Daten aus slices oder boundaries leicht über beliebige Zeiträume mitteln. Es könnten auch Positionen an einer Wand bestimmt werden, welche eine bestimmte Temperatur überschreiten und wie groß ihre Gesamtfläche in Abhängigkeit von der Simulationszeit ist.

Die Nutzung des Paketes wird anhand von einfachen praktischen Beispielen vorgestellt. Dadurch soll ein erster Einblick in den Nutzen dieses Paketes ermöglicht werden. Für Interessierte werden weiterführende Informationen bereitgestellt, um sich mit dem fdsreader zu beschäftigen.

Felix Armbrust, Tristan Hehnen, Jochen Zehfuß, Olaf Riese, Lukas Arnold

Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells

Abstract:

Für eine realistische Simulation der Brandausbreitung ist die Berücksichtigung der Pyrolyse und damit der Zersetzung kondensierter Materie unerlässlich. Eine vollständige Parameterisierung umfasst Transport-, thermophysikalische und kinetische Eigenschaften. In den vorliegenden Untersuchungen wurde der Fokus ausschließlich auf die kinetischen Parameter gelegt, die in der Regel aus Mikroskalenexperimenten abgeleitet werden. Diese beruhen auf der Annahme, dass die Zersetzung allein durch die Kinetik gesteuert wird und Effekte wie Wärmeleitung vernachlässigt werden können. Mikroskalenversuche sind jedoch stark von Randbedingungen wie Heizrate, Probenmasse oder Probenform abhängig.

Derzeit existiert in der Brandforschung kein einheitlicher Ansatz zur Bestimmung der erforderlichen Pyrolysemodell-Parameter. In einer experimentellen Untersuchungsreihe mit PMMA konnte gezeigt werden, dass die Empfehlungen der International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry (ICTAC) geeignet sind, um relevante Randbedingungen konsistent festzulegen. Hinsichtlich der Probenform - beispielsweise Stück- oder Pulverproben - gibt es jedoch keine klaren Vorgaben. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Zersetzung in diesen beiden Konfigurationen signifikant unterscheidet. Um die Auswirkungen auf Brandsimulationen zu untersuchen, wurden daher zwei separate kinetische Parametersätze durch Optimierung abgeleitet und in verschiedenen Szenarien mit dem Fire Dynamics Simulator (FDS) analysiert.



Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells

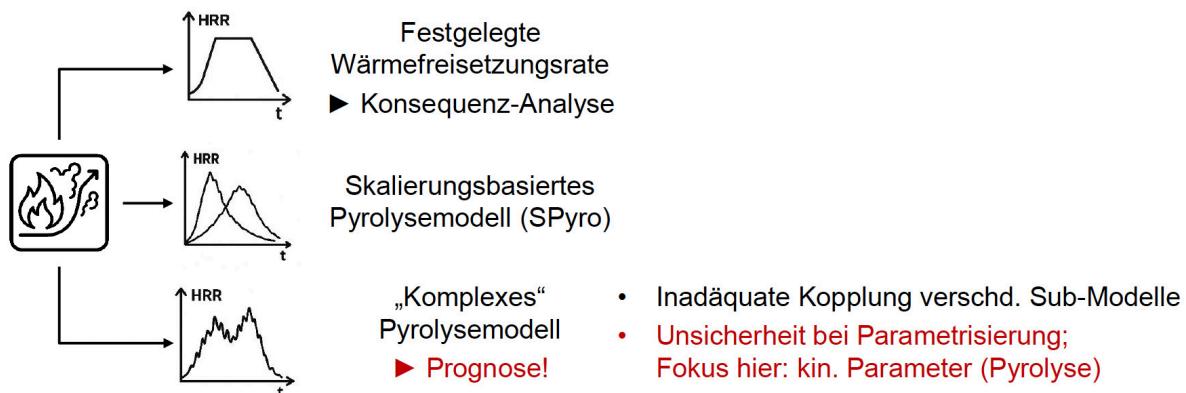
Felix Armbrust, Jochen Zehfuß, Olaf Riese (TU Braunschweig)

Tristan Hehnen, Lukas Arnold (Bergische Universität Wuppertal/Forschungszentrum Jülich)

Agenda

1. Hintergrund & Problemstellungen
2. Experimentelle Untersuchungen
3. Simulationsbasierte Konsequenz-Analyse
 - a) Ableitung kinetischer Parameter
 - b) Fallbetrachtungen
4. Diskussion & Conclusio

Ansätze der Brandmodellierung



[Stoliarov & Ding, 2023]



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 3

Kinetische Modellierung

$$\alpha(t) = \frac{m_0 - m(t)}{m_0 - m_\infty}$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) h(p)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) f(\alpha)$$

- Hier: einstufige Zersetzung
 - Realität: mehrstufige Zersetzung (konsekutiv/parallel, überlagernd ...)
- Wie wird **kinetisches Triplet** bestimmt?

[Vyazovkin et al., 2014]



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 4

Datengrundlage

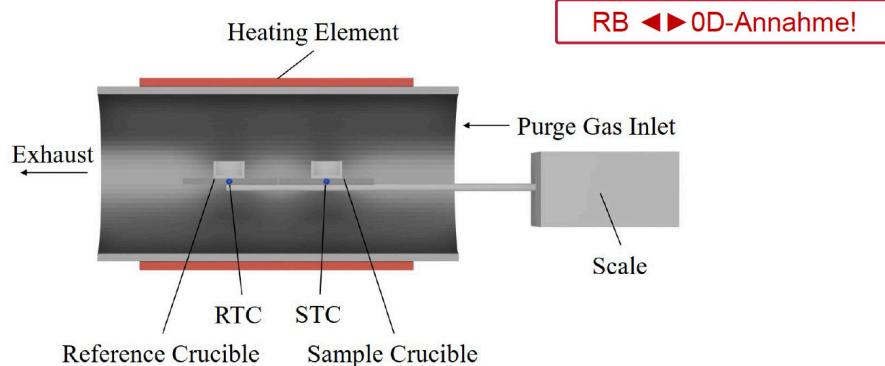
- Daten, die Reaktionsrate beschreiben, sollen nur von Kinetik abhängen
- Andere Transportphänomene (Wärmetransp., Massentransport) sollen vernachlässigbar sein
- **0D-Annahme:** instantane Erwärmung, instantaner Massenverlust
- Bestimmung kinetischer Parameter
 - Modellbasierte Ansätze (nte-Ordnung, Diffusionsmodell, etc.)
 - Modelfreie Ansätze (Friedmann, Kissinger-Akkhira-Sunose, etc.)

Mikro-Skala Versuche

z.B. Simultane thermische Analyse (STA)

► **Massenverlust ($m(t)$) bzw. dm/dt)**

► Wärmestrom



Probleme – Fragestellungen – Arbeitsplan

- Kein Konsens in Brandforschungs-Community zum experimentellen Vorgehen
- Normen mit Gestaltungs-Spielräumen (z. B. Probenform)

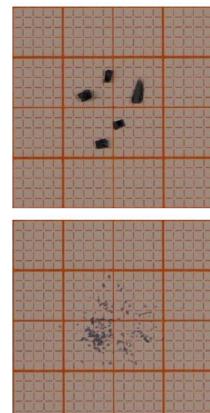
Fragestellungen

1. Wie sicherstellen, dass 0D-Annahme eingehalten wird? **ICTAC!**
2. Probenform beeinflusst maßgeblich Zersetzungsvorverhalten.
Welche Auswirkungen bestehen in Bezug auf eine Brandprognose?



Experimente

- Polymethylmethacrylat (PMMA)
- Simultane Thermische Analyse (STA)
- Variierte Randbedingungen
 - Probenform: Puder, Stück
 - Probenmassen: 1-12 mg
 - Heizraten: 5-60 K/min
 - Spülgas-Flussraten: 20-60 ml/min



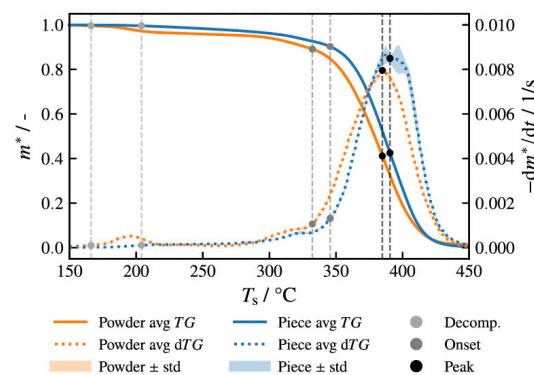
Zersetzungsvorverhalten von PMMA

- Zersetzung
 - Mehrschrittig (überlagert)
 - Vollständig
- Probenkonfiguration beeinflusst Zersetzungsvorverhalten
 - Isolierter ML-Peak vs. gradueller ML
 - Schulter vor Hauptzersetzungspunkt
 - Quantifizierbare Differenzen

$$\Delta T_{\text{decomp}} = 38,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

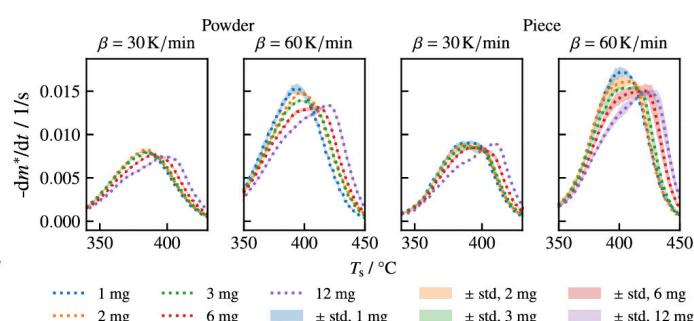
$$\Delta T_{\text{onset}} = 13,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{peak}} = 5,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Einfluss der Probenmasse

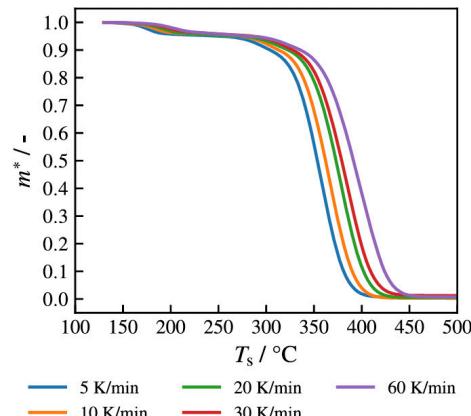
- Negative Auswirkungen v.a. bei $\uparrow m$ und $\uparrow \beta$ zu erwarten
- Untersuchungsschwerpunkt: 30 & 60 K/min
- Schrittweise Reduktion von m_0
- Kongruente Verläufe nur bei $\beta \leq 30 \text{ K/min}$ und $m \leq 3 \text{ mg}$
- Zstl. Aufsplitten des Peaks bei $\uparrow n$



► Für weitere Versuche $m = 3 \text{ mg}$, $\beta = 30 \text{ K/min}$

Einfluss der Heizrate

- Kurven-Verschiebung bei $\beta = \text{var}$. bekanntes Phänomen
- Steigung im Haupt-Peak verändert sich bei 60 K/min
 - ▶ Heizrate zu hoch
- Keine Veränderungen des Reaktionsverlaufs in Abhängigkeit von β
 - ▶ Voneinander unabhängige Reaktionsschritte



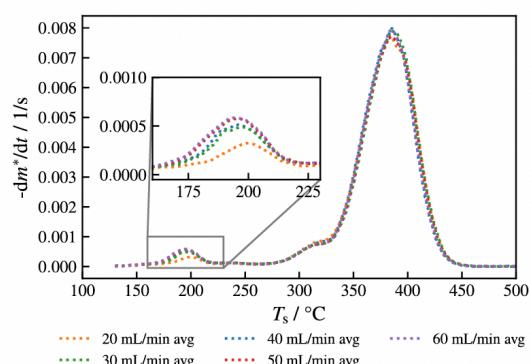
[Moukhina, 2012; Vyazovkin et al., 2014]



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 11

Einfluss des Spülgas-Volumenstroms

- Ausschließlich bei Puder zeigt sich Einfluss des Volumenstroms auf ersten ML-Peak
 - Je ↓ Volumenstrom, desto später setzt Reaktion ein
 - Reversible Reaktion
 - Bei höheren Temperaturen kein Einfluss
- ▶ Ausreichend hoher Volumenstrom notw. um Partialdruck-Abhängigkeit zu vernachlässigen



[Vyazovkin et al., 2014]



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 12

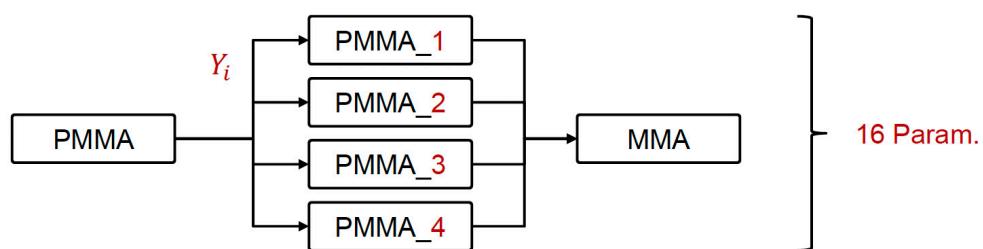
Zwischenfazit

- PMMA zersetzt sich
 - Vollständig
 - In mehreren, unabhängigen Schritten
 - V.a. in MMA (FTIR-Messungen)
 - Durch Variation der Randbedingungen: Sicherstellung 0D-Annahme (3 mg, 30 K/min)
 - Aber: Zwei verschiedene Zersetzungsmuster durch Probenkonfiguration
- Auswirkungen auf Brandprognose?
- Entwicklung zweier kinetischer Materialmodelle für die Zersetzung von PMMA

Ableitung kinetischer Parameter

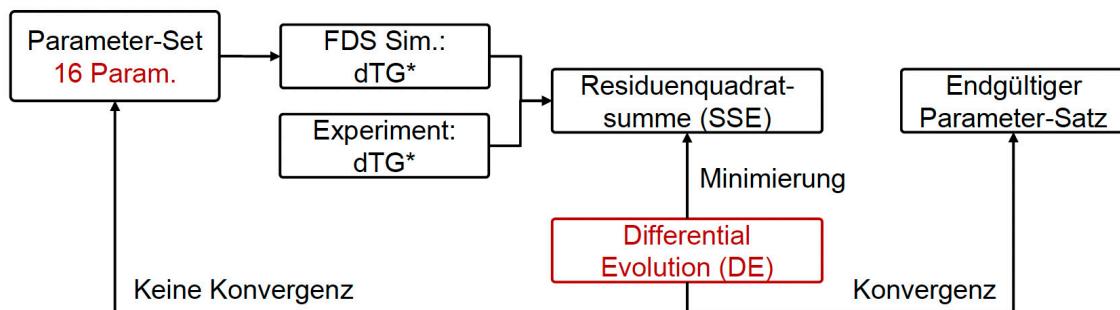
- Kinetisches Modell im Fire Dynamics Simulator (FDS 6.10.1-0-g12efa16-release)

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = A_{i,j} \exp\left(\frac{-E_{i,j}}{RT}\right) \rho_i^{n_{i,j}} (\dots)$$

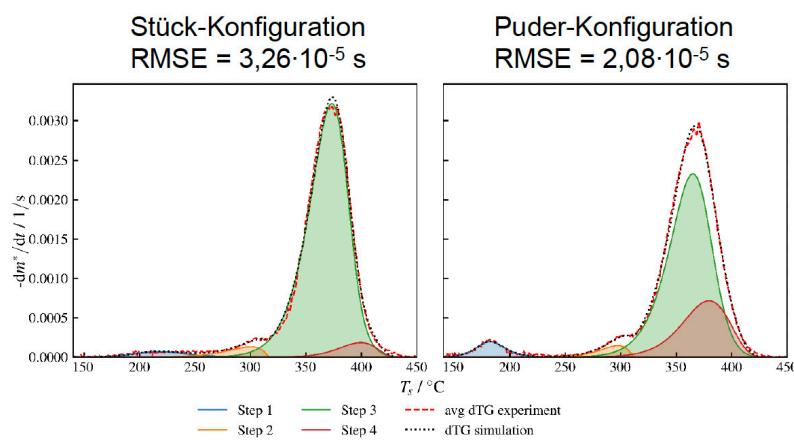


Ableitung kinetischer Parameter

- Optimierungs-Workflow

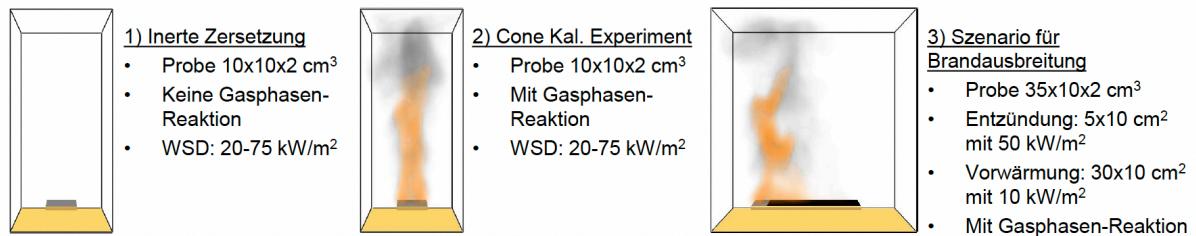


Ergebnis der Optimierung



Konsequenz-Analyse

- Large-Eddy-Simulation
- Kubische Fluid-Zellen (Kantenlänge 10 mm)
- Validierungs-Fall: NIST/NRC PMMA Parallel Panel Test
 - Thermophysikalische Materialeigenschaften
 - Brennstoff-Eigenschaften: MMA



[McGrattan et al., 2025b]



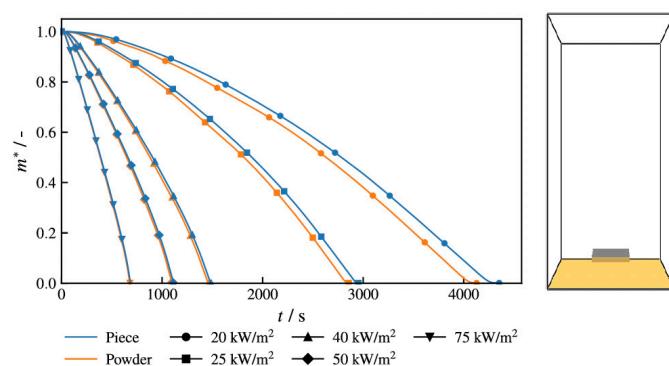
10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 17

Simulation – Inerte Zersetzung

- Parameter-Set für Puder führt bei niedrigen Wärmestromdichten zu schnellerer Zersetzung

$$\Delta t_{\max, 20 \text{ kW/sqm}} = 225,78 \text{ s}$$

$$\Delta t_{\max, 75 \text{ kW/sqm}} = 6,05 \text{ s}$$



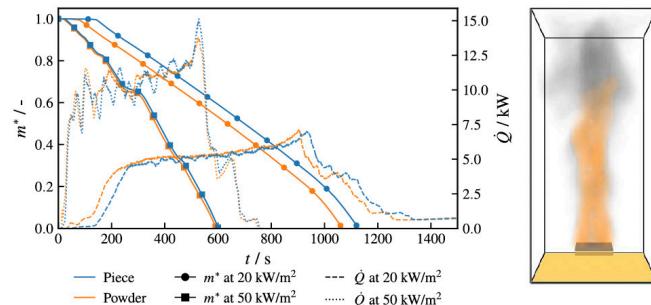
10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 18

Simulation – Cone Kalorimeter Experiment

- Zersetzung in CC Simulation insgesamt schneller (zstl. Wärmeeintrag durch Verbrennung)
- Unterschiede zwischen Parameter-Sets bei ↓WSD geringer

$$\Delta t_{\max, 20 \text{ kW/sqm}} = 60,04 \text{ s}$$

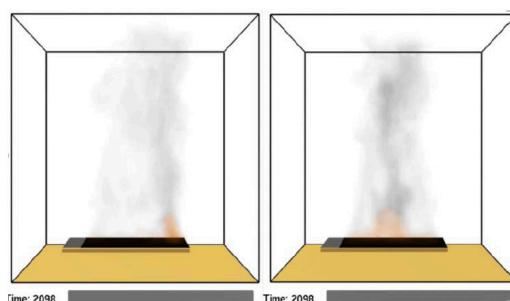
$$\Delta t_{\max, 75 \text{ kW/sqm}} = 6,35 \text{ s}$$



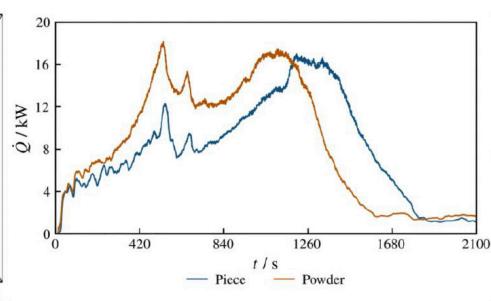
Simulation – Szenario für Brandausbreitung

- Gleichzeitige Entzündung
- Brandausbreitung im Fall des Puder-Parametersets schneller

Stück-Konfiguration

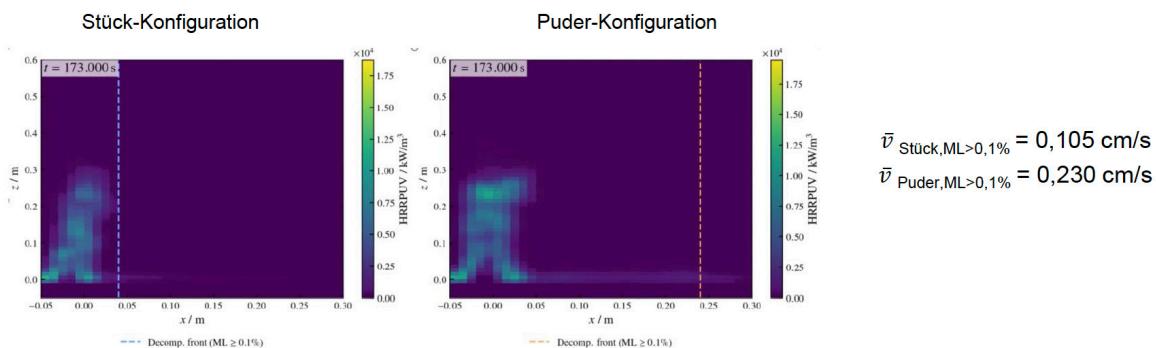


Puder-Konfiguration



Simulation – Szenario für Brandausbreitung

- Auch in Bezug auf Ausbreitungsgeschwindigkeit der Zersetzungsfrente



Diskussion & Fazit

- Sensitive exp. RB: Probenmasse, Heizrate, Spülgas-Volumenstrom
 - ICTAC-Empfehlungen geeignet für Sicherstellung der 0D-Annahme
 - Probenform beeinflusst Zersetzungsvorverhalten
 - Ursache? Unklar.
 - Wärmeleitungsproblem?
 - Restriktion der Gasfreisetzung?
 - Einfluss durch Probenzubereitung?
 - Andere Reaktionsarten?
 - Nicht bei allen Materialien ausgeprägt
 - Relevante Auswirkung auf Brandprognose vorhanden

► Weitere Untersuchungen notwendig

Literatur

DiDomizio M.J., McKinnon M.B. Impact of specimen preparation method on thermal analysis testing and derived parameters. ASTM Int., 2023.

McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E., Paul, C. Fire Dynamics Simulator User's Guide. Revision: FDS-6.10.1-0-g12efa16. 2025.

McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E., Paul, C. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation. Revision: FDS-6.10.1-0-g12efa16. 2025b.

Moukhina E. Determination of kinetic mechanisms for reactions measured with thermoanalytical instruments. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 109(2012).

Oswald H.R., Wiedemann H.G. Factors influencing thermoanalytical curves. *J. Therm. Anal.* 12(1977).

Stoliarov S.I., Ding Y. Pyrolysis model parameterization and fire growth prediction: The state of the art. *Fire Saf. J.*, 140(2023).

Vyazovkin, S., Chrissafis, K., Di Lorenzo, M.L., Koga, N., Pijolat, M., Roduit, B., Sbirrazzuoli, N., Suñol, J.J. ICTAC Kinetics Committee recomendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations. *Thermochim. Acta*, 590(2014).



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 23

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Haben Sie Fragen?

Weitere Details: Beitrag zum Symposium Heißbemessung 2025

Bei Interesse: f.armbrust@ibmb.tu-bs.de



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 24

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

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

Dr. Leonie Rommeswinkel und Marie Kutscheneruter

ISSN 2191-463X
19. Tagungsband
FDS Usergroup
Jahrgang 2025

hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz GmbH
Otto Ostrowski Str. 5, 10249 Berlin
hhpberlin.org

